VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZEMNÍCÍ SOUSTAVY, JEJICH MĚŘENÍ A ÚLOHA REZISTIVITY PŮDY

THE MEASUREMENTS OF EARTHING SYSTEMS AND THE ROLE OF ELECTRICAL SOIL RESISITIVITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Jan Capyk

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jan Capyk ***ID:*** 221232

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Zemnící soustavy, jejich měření a úloha rezistivity půdy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s metodami užívanými pro měření uzemnění a rezistivity půdy.
2. Vytipujte lokalitu a navrhněte plán provedených dlouhodobějších měření.
3. Proveďte vybraná dlouhodobější a rozsáhlejší měření.
4. Vyhodnoťte a graficky zpracujte získané výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce je v teoretické části zaměřena na vysvětlení pojmu rezistivity půdy, použitelné metody jejího měření, srovnání dvou používaných metod měření odporu zemniče a popis přístroje měření Metra PU 193 použitého pro praktickou část práce. V praktické části je čtenář seznámen s výsledky měření rezistivity půdy a odporu zemniče v terénu, s jejich vyhodnocením vzhledem k různým faktorům, které je ovlivnily, a s návrhy zemničů pro sloupy vysokého napětí, u kterých byla měřena rezistivita půdy. Práce obsahuje sestrojené grafy různých závislostí dle výsledků naměřených hodnot a srovnává je s teoretickými předpoklady.

Klíčová slova

zemnící soustava, rezistivita půdy, odpor zemniče, elektroda, dotykové napětí, odpojovač, sloup vysokého napětí

Abstract

The theoretical part of the thesis is focused on explaining the concept of soil resistivity, applicable methods of its measurement, comparison of two methods used to measure the resistance of the earth electrode and a description of the measuring device Metro PU 193 used for the practical part of the thesis. In the practical part, the reader is acquainted with the results of measuring soil resistivity and earth resistance in the field, with their evaluation with respect to various influencing factors and with designs of earth conductors for high voltage poles for which soil resistivity was measured. The thesis contains plotted graphs of various dependencies according to the results of measured values and compares them with theoretical assumptions.

Keywords

earthing system, soil resistivity, earth resistance, electrode, contact voltage, disconnector, high voltage pole

Bibliografická citace

CAPYK, Jan. *Zemnící soustavy, jejich měření a úloha rezistivity půdy* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142384. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	*Jan Capyk*
VUT ID studenta:	*221232*
Typ práce:	*Bakalářská práce*
Akademický rok:	*2021/22*
Téma závěrečné práce:	*Zemnící soustavy, jejich měření a úloha rezistivity půdy*

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.

V Brně dne 31. května 2022 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji tímto vděčně vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Vyčítalovi, Ph.D. za výtečně vedenou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mojí bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2022 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. REZISTIVITA PŮDY **12**

2. METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY **15**

2.1 Měření dlouhou tyčí *15*
2.2 Třípólová metoda s tyčí *16*
2.3 Owensova metoda *17*
2.4 Schlumbergerova metoda *18*
2.5 Wennerova metoda *19*
2.5.1 Jednovrstvý model *20*
2.5.2 Dvouvrstvý model *22*

3. METODY MĚŘENÍ ODPORŮ ZEMNIČE **23**

3.1 Měření odporů zemniče klasickou metodou *23*

4. MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ **24**

4.1 Měřící přístroj PU 193 ..... *24*
4.2 Popis panelu přístroje *24*
4.3 Popis zapojení a ovládání přístroje při měření rezistivity *25*
4.4 Popis zapojení a ovládání přístroje při měření odporu zemniče *26*
4.5 Technické parametry přístroje *27*
4.6 Zhodnocení přístroje z pohledu uživatele *28*

5. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ **29**

5.1 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY NA ZAHRADĚ AUTORA PRÁCE 29
5.1.1 Příprava a popis měření (zahrada autora práce) *29*
5.1.2 Průběh měření (zahrada autora práce) *30*
5.1.3 Naměřené hodnoty a výsledky (zahrada autora práce) *31*
5.1.4 Naměřené hodnoty s přepočtem pomocí koeficientu K (zahrada autora práce) *32*
5.2 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY U SLOUPŮ VYSOKÉHO NAPĚTÍ 34
5.2.1 Trasa vedení sloupů vysokého napětí *34*
5.2.2 Měření rezistivity půdy u sloupů VN *35*
5.2.3 Naměřené hodnoty rezistivity půdy u sloupů vysokého napětí *38*
5.2.4 Návrh zemničů pro tři sloupy vedení vysokého napětí *39*
5.2.5 Návrh zemniče pro sloup 19 ..... *40*
5.2.6 Návrh zemniče pro sloup 1 ..... *41*
5.2.7 Návrh zemniče pro sloup 13 ..... *42*
5.2.8 Shrnutí návrhu zemniče *44*
5.2.9 Ověření návrhů odporu zemničů *45*
5.3 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY (PLOŠNÉ MĚŘENÍ) 47
5.3.1 Plošné měření rezistivity půdy *47*
5.4 MĚŘENÍ ODPORU ZEMNIČŮ 49

5.4.1 Měření rezistivity půdy u odpojovačů pro účely měření odporu zemničů 49
5.4.2 Měření odporu zemniče (odpojovač 1) 51
5.4.3 Měření odporu zemniče (odpojovač 2) 52
5.4.4 Měření odporu zemniče (odpojovač 3) 53
6. ZÁVĚR 55
LITERATURA 57
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 58
SEZNAM PŘÍLOH 59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Rezistivita různých typů půdy v závislosti na teplotě [5] 13
1.2 Závislost činitele K na ročním období [2] 14
2.1 Měření rezistivity půdy dlouhou tyčí [3] 15
2.2 Třípólová metoda s tyčí [4] 16
2.3 Zapojení a konstrukce Owensonovy dvoupólové metody [3] 17
2.4 Schéma zapojení pro měření Schlumbergerovou metodou [1] 18
2.5 Schéma zapojení pro měření Wennerovou metodou [1] 19
2.6 Proměřování různých typů půd od povrchu až do velkých hloubek [3] 21
2.7 Závislost rezistivity půdy na ρ pro rozličné poměry ρ2 ρ1 [3] 22
3.1 Schéma zapojení pro měření odporu zemniče [8] 23
4.1 Popis přístroje PU 193 [6] 24
4.2 Zapojení přístroje pro měření rezistivity [6] 25
4.3 Ovládání přístroje [6] 25
4.4 Ukázka zobrazovacího panelu před měřením rezistivity [6] 25
4.5 Zapojení přístroje pro měření odporů zemniče [6] 26
4.6 Ukázka zobrazovacího panelu pro měření zemních odporů [6] 26
4.7 Ukázka zobrazovacího panelu pro rušivé napětí Us větší než 3 V [6] 27
4.8 Přístroj a komponenty pro měření 28
5.1 Rozložení elektrod a místo měření na zahradě autora práce 29
5.2 Zobrazená hodnota z měření rezistivity půdy na vzdálenost a =3 m 30
5.3 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce 31
5.4 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce pro vzdálenost a = 1 m 32
5.5 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce pro vzdálenost a = 3 m 32
5.6 Trasa vedení a špatně přístupná místa 34
5.7 Měření rezistivity u sloupu VN pro vzdálenost a = 1 m [9] 35
5.8 Měření rezistivity u sloupu VN pro vzdálenost a = 3 m [9] 36
5.9 Ukázka měření rezistivity půdy u sloupů VN pro a = 1 a 3 m 37
5.10 Předpokládané dovolené dotykové napětí [11] 45
5.11 Plošné měření rezistivity půdy pro vzdálenost a = 1 m [9] 47
5.12 Plošné měření rezistivity půdy pro vzdálenost a = 3 m [9] 48
5.13 Měření rezistivity půdy u odpojovače 1 pro účely měření odporu zemniče 49
5.14 Měření rezistivity půdy u odpojovače 2 pro účely měření odporu zemniče 50
5.15 Měření rezistivity půdy u odpojovače 3 pro účely měření odporu zemniče 50
5.16 Měření odporu zemniče u odpojovače 1 51
5.17 Měření odporu zemniče u odpojovače 3 53

SEZNAM TABULEK

1.1 Hodnoty rezistivity pro různé typy půd [1] 12
2.1 Hodnoty konfiguračního koeficientu v závislosti na poměru a/h [3] 20
4.1 Referenční a pracovní podmínky přístroje [6] 27
5.1 Naměřené hodnoty rezistivity půdy u sloupů VN 38
5.2 Zadané a zvolené hodnoty pro návrh zemničů 39
5.3 Naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity půdy u sloupů VN 39
5.4 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 19 40
5.5 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 1 41
5.6 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 13 42
5.7 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 13 42
5.8 Zadané a vypočtené hodnoty odporu, proudu a dotykového napětí sloupů VN 45
5.9 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 1 51
5.10 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 2 52
5.11 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 3 54

Úvod

Rezistivita je fyzikální veličinou, která udává schopnost materiálu vést elektrický proud. Měří se za účelem správného návrhu uzemnění, z důvodu ochrany zařízení, elektrických přístrojů, strojů před účinky přepětí a velkých proudů a také k ochraně lidí a zvířat před úrazem při dotyku neživých částí, které mohou být v případě poruchy pod napětím. Rezistivitu ovlivňuje několik faktorů, například vlhkost půdy, teplota, složení půdy apod. [2].

Bakalářská práce je členěna do šesti základních částí. Kapitola 1 pojednává o tom, co znamená pojem rezistivita půdy. V kapitole 2 se zaměřuje na způsoby a metody měření rezistivity půdy. Pro metody měření odporu zemniče je vyhrazena kapitola 3. Práce vymezuje různé metody, které mohou být použity pro měření rezistivity půdy a odporu zemniče. Srovnává tyto metody z hlediska přesnosti, efektivity, využitelnosti v praxi apod. O použití a obsluze měřícího přístroje pojednává kapitola 4. V kapitole 5 je popsáno praktické měření včetně jeho výsledků. Kapitola 6 závěrem uvádí hodnocení praktického měření z pohledu autora práce.

Stěžejní obsah práce tvoří praktické měření rezistivity půdy autorem v terénu, které bylo prováděno během celého roku. Díky těmto měřením je autor práce schopen porovnat jednotlivé naměřené hodnoty v závislosti na proměnlivosti počasí a jiných různých faktorech, které rezistivitu půdy mohou ovlivňovat.

Cílem práce je prozkoumat velikost rezistivity půdy v blízkosti autorova bydliště pro návrh zemničů. Dále realizovat celoroční měření a pozorovat proměnlivost naměřených hodnot rezistivity půdy na základě faktorů, které rezistivitu půdy ovlivňují. Výsledné hodnoty jsou srovnávány s teoretickými předpoklady a vyhodnoceny z pohledu autora.

1. REZISTIVITA PŮDY

Rezistivita je fyzikální veličinou, která udává schopnost materiálu vést elektrický proud. Rezistivita se značí ρ a jednotkou je (Ωm).

Měření rezistivity je prováděno např. při budování přenosové soustavy, kdy je třeba zjistit odpor uzemnění objektu v daném místě. Hodnota odporu v místě pracovního uzlu by neměla překročit 5 Ω. Pokud je dáno špatné podloží a málo vodivá půda, je dovoleno základní hodnotu překročit na maximální hodnotu 15 Ω. Platí pro zemniče distribuční soustavy. Pokud je definována půda s tzv. ztíženými podmínkami, jedná se o půdu, kde je rezistivita v hloubce 1–3 m větší než 200 Ωm. Odpor uzemnění vodičů PEN a PE, které opouštějí trafostanici, by neměl překročit hodnotu 2 Ω včetně uzemněného uzlu zdroje. To platí pro sítě TN (T – spojením se zemí, N – spojení s uzlem zdroje ochranným vodičem) s nominálním napětím vůči zemi 230 V [2].

Tabulka 1.1 Hodnoty rezistivity pro různé typy půd [1]

Charakter půdy	**ρ (Ωm)**
Bažinatá půda	5-40
Jíl, Slín	30-40
Ornice	20-150
Hlinito-písčité louky	50-500
Písek	200-2500
Štěrkopísek	2000-3000
Kamenitá půda s travním porostem	250-3000
Měkký vápenec	100-300
Rozpukaný vápenec	500-1000
Pískovec	2000-3000
Zvětralá skála	300-1000
Kamenitý terén, balvany, dolomity	1000-3000
Žulová skála	1500-50000

Vztah pro výpočet rezistivity [1]:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (\Omega m) \qquad (1)$$

Kde:

– R odpor (Ω)

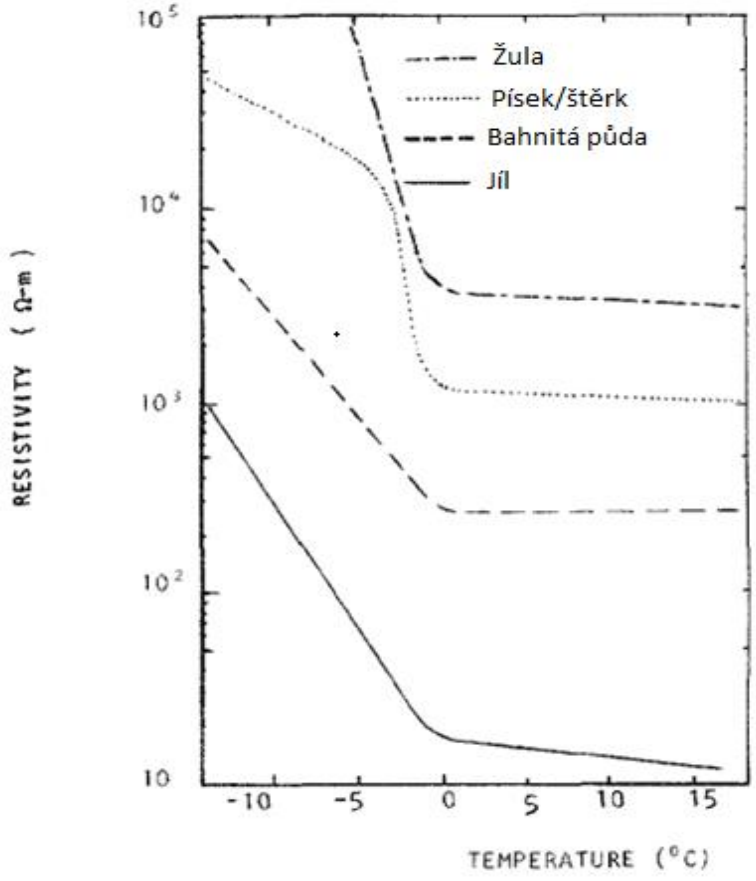
– S průřez (m^2)

– l délka vodiče (m)

Pro návrh zemničů je žádoucí znát půdní strukturu v poměrně malé hloubce a na krátkých vzdálenostech, a to z toho důvodu, že výkon uzemňovací soustavy je ovlivněn především charakteristickými vlastnostmi půdy, která obklopuje uzemňovací elektrodu [5].

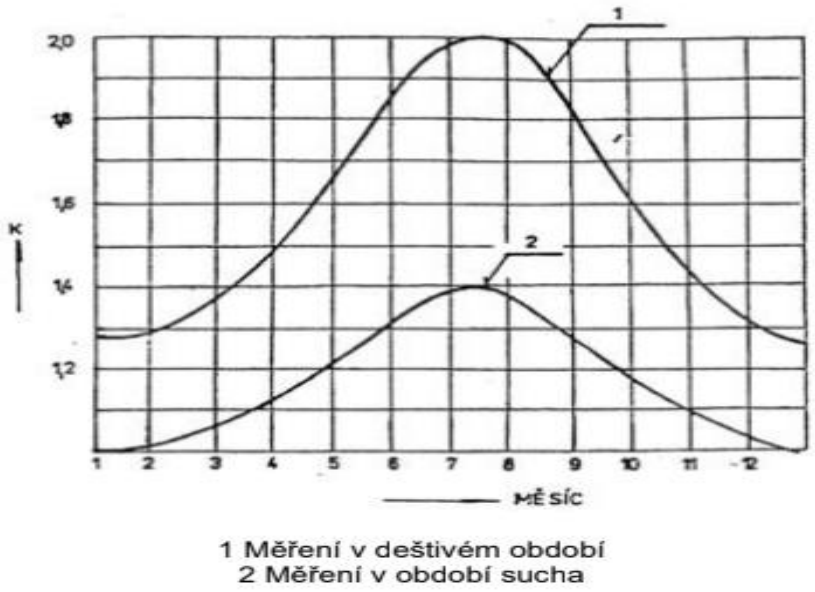
Zásadní informací potřebnou pro uzemnění je skutečná struktura půdy. Půdní struktura je poměrně složitá. Obecnou strukturu půdy lze zjednodušeně modelovat pomocí vrstev, a to na dvouvrstvou, třívrstvou, nebo čtyřvrstvou. Dvouvrstvá půdní struktura je dostačující pro konstrukci uzemnění přenosové soustavy. Rezistivita půdy do 3 m hloubky se mění podle ročních období, množství srážek, počasí apod. [5].

Na obrázku (1.1) je znázorněna závislost rezistivity půdy jednotlivých druhů zemin na teplotě. Z obrázku je viditelné, že každá zemina má zvýšenou rezistivitu, pokud je teplota hluboko pod bodem mrazu. S rostoucí teplotou, u všech čtyř druhů půdy v bodě 0 °C jsou hodnoty rezistivity téměř konstantní. [5].



Obrázek 1.1 Rezistivita různých typů půdy v závislosti na teplotě [5]

V případě, že je nutné eliminovat vliv kolísání rezistivity půdy do hloubky 3 m, je změřená hodnota vynásobena součinitelem K. Hodnoty jsou násobeny podle křivek uvedených na obrázku (1.2), při násobení je vždy důležité zvolit správnou křivku, z důvodu rozdílnosti hodnot pro suché a deštivé období. Jedná se o směrodatnou hodnotu pro návrh uzemnění. Rezistivita bez výrazné proměnlivosti (nekolísá) se obvykle pohybuje v hloubkách okolo 20 m. S touto rezistivitou se počítá při návrhu uzemňovacích soustav.[2].



Obrázek 1.2 Závislost činitele K na ročním období [2]

Na obrázku (1.2) jsou znázorněny dvě křivky pro určení rezistivity dle ročního období. Koeficient K je volen na základě počasí během měření. Pro deštivé počasí je použita křivka 1, pro suché křivka 2. Zvoleným koeficientem K je vynásobena naměřená hodnota rezistivity půdy [2].

Výpočet rezistivity [2]:

$$\rho = R \cdot K \qquad (\Omega m) \qquad (2)$$

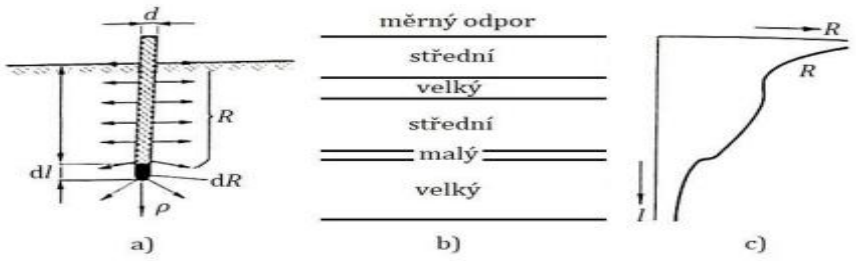
Kde:
– R naměřený odpor půdy (Ω)
– K násobící součinitel rezistivity daného období (-)

2. METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY

Metody měření rezistivity půdy jsou různé z pohledu přesnosti a odlišného postupu při měření. Některé metody jsou používány v praxi více a některé zřídka. V této kapitole budou popsány metody od méně používaných až po ty nejčastěji užívané v praxi.

2.1 Měření dlouhou tyčí

Tato měřící metoda využívá dlouhou tyč, která je zasouvána do země stále hlouběji a hlouběji. Při každém zasunutí je důležité měřit délku tyče v zemi. Do tyče se injektuje proud a je měřen potenciál země. Pomocí hodnoty délky tyče v zemi a průměru tyče je měřen zemní odpor v hloubce, ve které je tyč zasunuta. Při měření touto metodou je zapotřebí velmi dlouhá a pevná tyč. V případě většího počtu měření se jedná o velmi nepraktickou metodu, která není v praxi příliš využívána [3]. Obrázek (2.1) je vysvětlen dále v textu.



Obrázek 2.1 Měření rezistivity půdy dlouhou tyčí [3]

Výpočet pro odpor tyče (je určen z Ohmova zákona) [3]:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \qquad (3)$$

Na obrázku (2.1.a)) je znázorněna tyč, která je zasouvána do země. Dle zasunutí tyče do země o délku *l* s průměrem *d* je změřen zemní odpor *R*. Na obrázku (2.1.b), c)) je znázorněno, že ve vrstvách s velkým měrným odporem půdy je naměřená malá hodnota gradientu odporu *dR/dl*. Naopak velké hodnoty gradientu odporu jsou naměřeny ve vrstvách půdy, kde je malý měrný odpor [3].

U této metody je určena rezistivita půdy pomocí Rüdenbergovy rovnice [3]:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \cdot \left(\frac{4l}{d}\right) \cdot \frac{R^2}{-\frac{dR}{dl}}} \quad (\Omega m) \qquad (4)$$

Kde:

– *l* délka tyče (m)

– d průměr tyče (mm)

– *R* odpor (Ω)

2.2 Třípólová metoda s tyčí

Jedná se o metodu, která je z praktického hlediska využívána taktéž méně. Tato níže popisovaná metoda je využitelná při měření jednoduššími měřícími přístroji. Metoda pracuje na principu potenciálového spádu, pomocí kterého je určen odpor tyče. K měření je použita tyč T a dvě elektrody, proudová P a napěťová N [4].

Výpočet pro odpor tyče (z Ohmova zákona) [3]:

$$R = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \qquad (5)$$

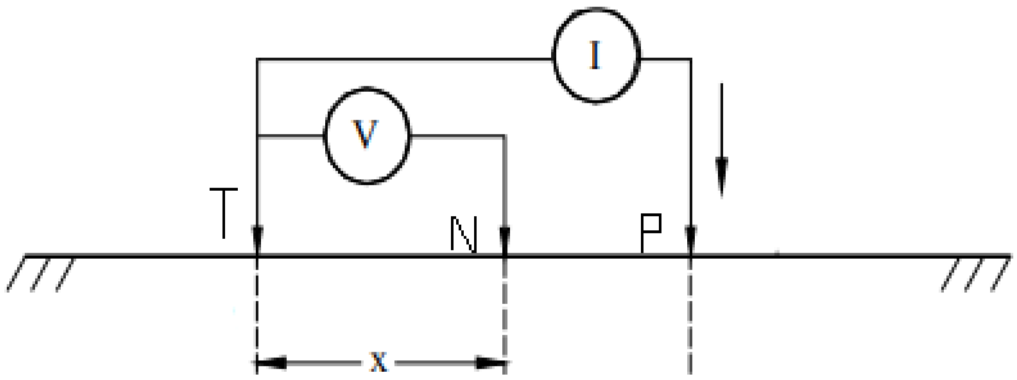
Rezistivita půdy je určena pomocí rovnice [4]:

$$\rho = \frac{2\pi \cdot \mathrm{R}}{\ln \cdot \left(\frac{4l}{d}\right)} \quad (\Omega\mathrm{m}) \qquad (6)$$

Kde:
– l délka tyče (m)
– d průměr tyče (mm)
– R odpor (Ω)

Je dána tyč o průměru d a délce l, tyč je zasouvána kolmo do země a pomocí předchozí rovnice je určena rezistivita.

Na obrázku (2.2) je zobrazeno schéma pro měření s touto metodou.



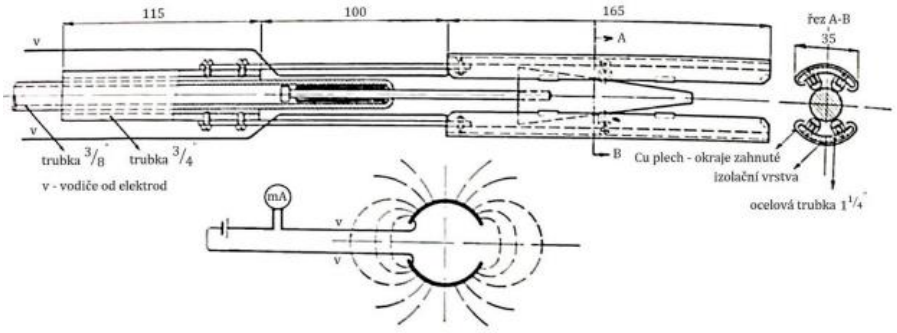
Obrázek 2.2 Třípólová metoda s tyčí [4]

Na obrázku (2.2) je znázorněna proudová elektroda (P), která pouští proud a napěťová elektroda (N), která měří vzniklé napětí mezi ní a tyčí (T). Všechny elektrody jsou v přímce a napěťová elektroda je vždy umístěna přibližně v šedesáti dvou procentní vzdálenosti mezi napěťovou a proudovou elektrodou [4].

2.3 Owensova metoda

Owensova metoda je nazývána přímá metoda měření odporu půdy. Jedná se o jednu ze složitějších metod měření z pohledu vyhodnocování výsledků, která se v praxi využívá rovněž zřídka. Při použití Owensovy metody je nutné do půdy vyvrtat díru. Rozměr vyvrtané díry je závislý na velikosti měřících elektrod. Odpor půdy je měřen v protějších stěnách díry. Struktura povrchu vyvrtané díry musí být celistvá a hladká. Do protilehlých stěn jsou zasunuty elektrody, které jsou rozevírány pomocí trnu spojeného s tyčí. Tyč je možné rozměrově upravovat, pro různá hloubková měření. Od elektrod jsou vyvedeny drátky až k madlu tyče. Elektrody musí být co nejvíce přitlačeny ke stěnám z důvodu lepší přilnavosti a docílení co nejpřesnějšího měření [3].

Jedná se o metodu měření pomocí úbytku napětí, kdy je použit pomocný článek s napětím 4,5 V s miliampérmetrem. Poté je měřením určen odpor úzké vrstvy půdy kolem zasunutých elektrod. Pro výpočet správné hodnoty odporu je nutné zjistit poměr rezistivity půdy ku měřenému odporu [3]. Na obrázku (2.3) je znázorněno zapojení a konstrukce Owensovy metody.



Obrázek 2.3 Zapojení a konstrukce Owensonovy dvoupólové metody [3]

Pro měření je použit izolační válec, který má stejný průměr jako zkušební elektrody. Na tento válec se upevní válcové elektrody, které mají taktéž průměr jako zkušební elektrody. Poté je izolační válec vložen do roztoku. Následně je změřena rezistivita půdy a odpor elektrolytu a tím je určen hledaný poměr. Poměr elektrod na obrázku (2.3) je 20:1[3].

Vztah pro určení měrného odporu půdy [3]:

$$\rho = 20 \cdot \frac{Uk}{I} \quad (\Omega\text{m}) \quad (7)$$

Kde:

– Uk konstantní napětí 4,5V (V)

– I hodnota miliampérmetru (mA)

– 20 hodnota poměru

Vztah pro určení středního měrného odporu půdy [3]:

$$\rho = 20 \cdot \frac{Uk}{\Sigma \mathrm{I}[mA]} \quad (\Omega\mathrm{m}) \quad (8)$$

Kde:

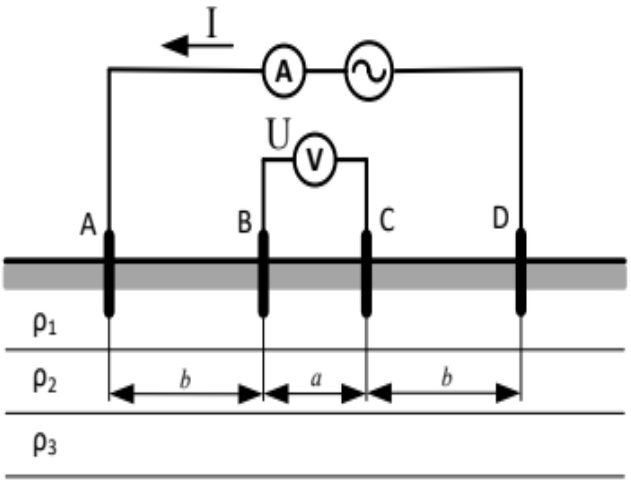
– Uk konstantní napětí 4,5V (V)

– ΣI aritmetický průměr všech hodnot miliampérmetru (mA)

– 20 hodnota poměru

2.4 Schlumbergerova metoda

Tato metoda měření je z hlediska provedení snadnější než předešlé metody. Měření dílčích rezistivit je díky uspořádání elektrod rychlejší viz. obrázek (2.4). Napěťové elektrody u tohoto provedení jsou stále ve stejné vzdálenosti a =1 m od sebe (vnitřní elektrody). Vzdálenost vnějších proudových elektrod se mění, a to v rozsahu b =1, 3 a 5 m [1].



Obrázek 2.4 Schéma zapojení pro měření Schlumbergerovou metodou [1]

Na obrázku (2.4) je znázorněn princip Schlumbergerovy metody. Elektrody B a C jsou napěťové a vzdálenost a se mezi nimi nemění. Elektrody A a D jsou proudové a vzdálenost b se mění na 1, 3 a 5 m [1].

Vztah pro určení měrného odporu půdy touto metodou [1]:

$$\rho = \frac{\pi \cdot U \cdot (b - \frac{a}{2})^2}{a \cdot I} \approx \frac{\pi \cdot U \cdot b^2}{a \cdot I} \quad (\Omega\mathrm{m}) \quad (9)$$

Kde:

– U napětí (V)

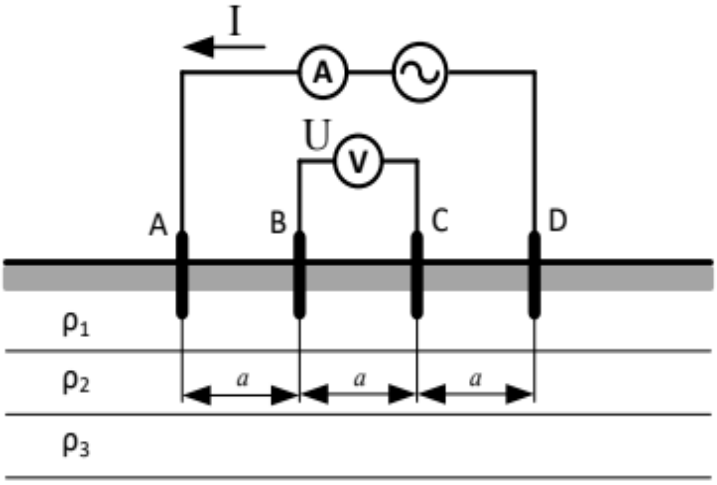
– a, b vzdálenost elektrod (m)

– I proudu (A)

Měření je jednoduché, ale pokud by měla být hodnota rezistivity určena výpočtem dle rovnice (9), jedná se o mírně složitější výpočet. Z tohoto důvodu je doporučováno tuto metodu využívat pouze v případě, že si měřící přístroj automaticky vyhodnotí hodnoty měření.

2.5 Wennerova metoda

Wennerova metoda je nejčastěji využívána v praxi, z toho důvodu byla aplikována autorem této práce při měření v terénu, se kterými bude čtenář seznámen následně v praktické části. Měření dle Wennerovy metody je prováděno pro různé vzdálenosti jednotlivých elektrod. Wennerova metoda je zobrazena na obrázku (2.5).



Obrázek 2.5 Schéma zapojení pro měření Wennerovou metodou [1]

Wennerova metoda využívá čtyř elektrod, jako Schlumbergerova metoda, která byla popsána v kapitole (3.4). Elektrody jsou rozmístěny v jedné řadě v libovolné vzdálenosti *a* od sebe, ale na rozdíl od Schlumbergerovy metody musí být vzdálenost *a* stejná u všech elektrod. Na vnější elektrody je připojen zdroj střídavého proudu a na vnitřních elektrodách je měřeno napětí. Dle přístroje je možné navolit různý rozsah frekvencí [1].

2.5.1 Jednovrstvý model

Elektrody by měly být zasunuty všechny ve stejné vzdálenosti *a* od sebe a ve stejné hloubce *h*. Pro určení správné hodnoty rezistivity v různých hloubkách půdy je třeba měření opakovat pro více vzdáleností *a*, např. 1, 3, 5 m. Např. přístroj, který byl autorem použit při měření v terénu, umožnuje vzdálenost elektrod *a* nastavit až do 20 m [1].

Vztah pro určení měrného odporu půdy touto metodou [3]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{4a^2 + 4h^2}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{n} \quad (\Omega m) \quad (10)$$

Kde:

– R odpor (Ω)

– a vzdálenost elektrod (m)

– h hloubka elektrod v zemi (m)

– n konfigurační koeficient (-)

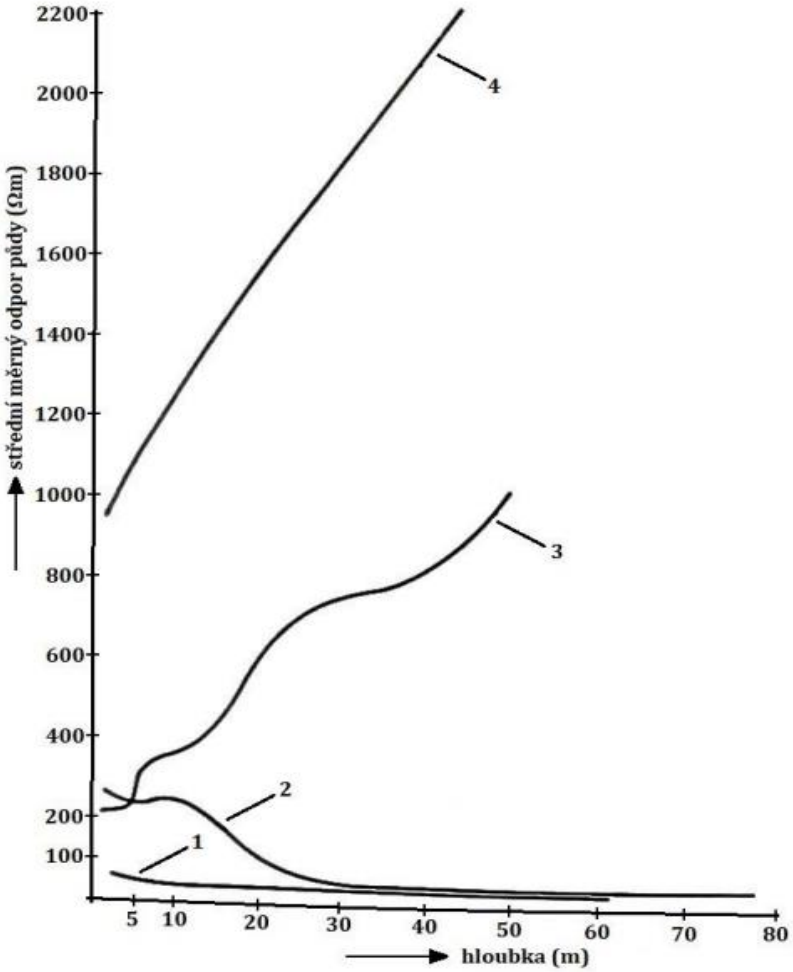
Rovnice (10) je dána pro všechny čtyři elektrody v řadě o hloubce *h* a vzdálenosti *a*. Konfigurační koeficient *n* závisí na velikosti poměru *a/h.* Tento koeficient nabývá hodnot od 1 do 2 a jeho hodnoty jsou uvedeny tabulce (2.1).

Tabulka 2.1 Hodnoty konfiguračního koeficientu v závislosti na poměru a/h [3]

a/h	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**5**	**10**	**20**	**>20**
n	1	1,04	1,19	1,52	1,88	1,97	1,99	2

Pokud je prováděno měření, které je vyhodnoceno pomocí vzorce (10), je nutné mít poměr vzdálenosti elektrod a hloubky *a/h* alespoň 1/20 [3].

Na následujícím obrázku (2.6) jsou znázorněny křivky pro měření odporu půdy se zvětšujícími se rozestupy elektrod. Křivka 4 znázorňuje odpor půdy pro skalnatou zeminu. Křivka roste lineárně, lze tedy říci, že se zvyšující se hloubkou roste i rezistivita půdy. Naopak pro stejnorodou hlinitou a hlinitopísčitou půdu (křivka 1 a 2) je odpor půdy se zvyšující se hloubkou téměř konstantní. Suchý jíl (křivka 3) má podobné vlastnosti jako skalnatá zemina (křivka 4), rezistivita tohoto podloží se však nepohybuje v tak vysokých hodnotách, jako je tomu u skalnaté zeminy (křivka.4).

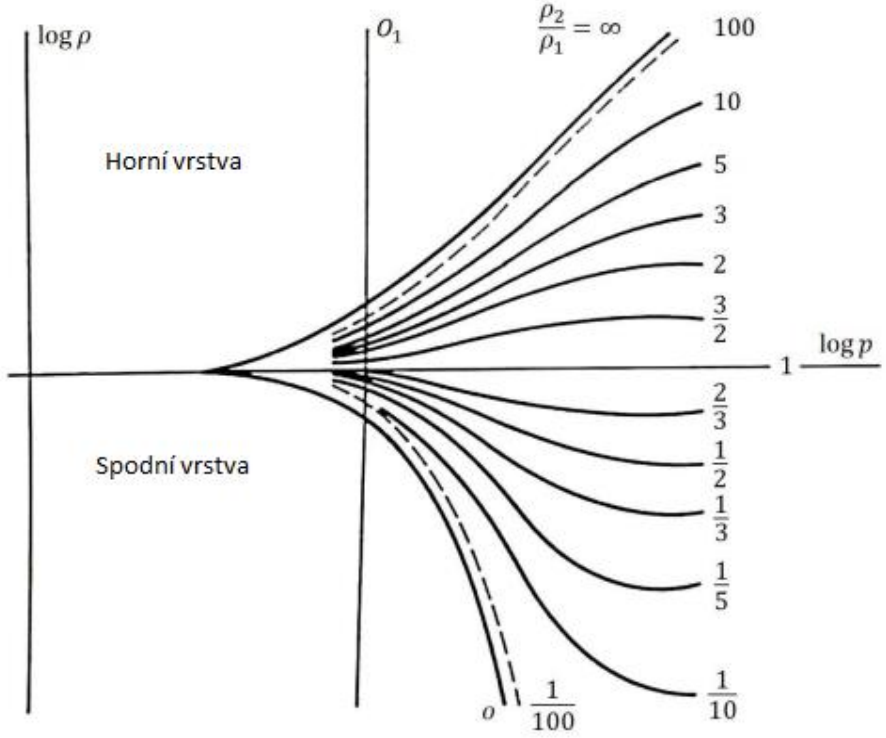


Obrázek 2.6 Proměřování různých typů půd od povrchu až do velkých hloubek [3]

Křivka 1 – stejnorodá hlinitá půda
Křivka 2 – hlinitopísčitá půda
Křivka 3 – suchý jíl
Křivka 4 – skalnatá půda

2.5.2 Dvouvrstvý model

U dvouvrstvého modelu je možné stanovit měrný odpor u spodní i horní vrstvy a také tloušťku horní vrstvy půdy *h*. Tento model je přesnější, protože půda není uvažována jako celek, ale je rozdělena na dvě vrstvy viz. obrázek (2.7) [3].



Obrázek 2.7 Závislost rezistivity půdy na p pro rozličné poměry ρ_2/ρ_1 *[3]*

Princip dvouvrstvého modelu spočívá v tom, že ze změřených hodnot odporu je sestrojena křivka dle poměru měřeného odporu a poloviční vzdálenosti mezi vnějšími proudovými elektrodami. Horní vrstva je označena ρ_1 a spodní ρ_2. Měrný odpor ρ_m.

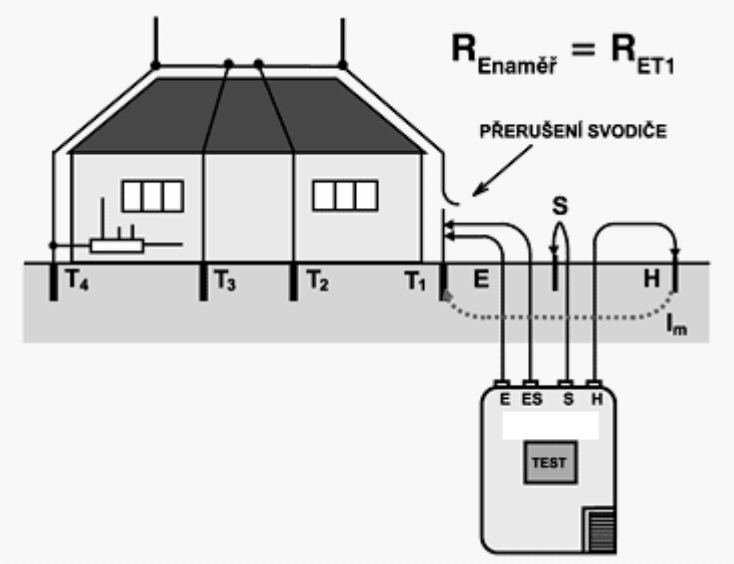
Poloviční vzdálenost je vyjádřena jako $p = 1{,}5a$. Křivka měřených hodnot je vypočítána dle rovnice $\log \rho_m = f(logp)$. Tato křivka je porovnávána s křivkami, které jsou uvedeny na obrázku (2.7). Získaná křivka je vložena do grafu a posouvána dokud se neprotne s jakoukoliv teoretickou křivkou z grafu. Na základě vzdálenosti logaritmické osy ρ a křivky je určena hodnota odporu půdy pro vrchní vrstvu ρ_1. Když je tato hodnota vynásobena poměrem $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, je získána hodnota odporu půdy pro spodní vrstvu ρ_2.

Tloušťka *h* je určena pomocí vzdáleností mezi osou O_1 a logaritmickou osou ρ [3].

3. METODY MĚŘENÍ ODPORŮ ZEMNIČE

3.1 Měření odporů zemniče klasickou metodou

U této metody měření je použit podobný princip jako u měření rezistivity půdy Wennerovou a Třípólovou metodou. Přístroj je připojen na měřený zemnič a sondy. Pokud není brán v potaz odpor vodiče k měřenému zemnímu odporu, je použita metoda pro tři vodiče. Pokud nelze zanedbat tento odpor, je nutné použít metodu čtyř vodičovou [6]. Na obrázku (3.1) je znázorněno zapojení přístroje pro měření odporu zemniče.



Obrázek 3.1 Schéma zapojení pro měření odporu zemniče [8]

Pokud není brán zřetel na odpor mezi vodičem a měřeným zemním odporem, je možné odpojit svorku ES, která je použita jako zemnič při čtyřvodičovém zapojení. V takovém případě je použita svorka H, která představuje pomocný proudový zemnič, svorka S, která představuje pomocnou napěťovou sondu, a svorka E, která je připojena k zemniči. Pro čtyřvodičovou metodu se připojí pouze svorka ES, která představuje pomocný zemnič.

Při měření je důležité, aby byly všechny sondy zasunuty v jedné přímce. Nejčastěji je používána metoda tří sond, při které je měřen pokles napětí na uzemnění a hodnota proudu, který jimi protéká. Odpor se poté vypočítá pomocí Ohmova zákona [7].

Měření odporu zemniče v této práci je prováděno pomocí přístroje Metra PU 193, jehož popisu fungování je věnována kapitola (4.1).

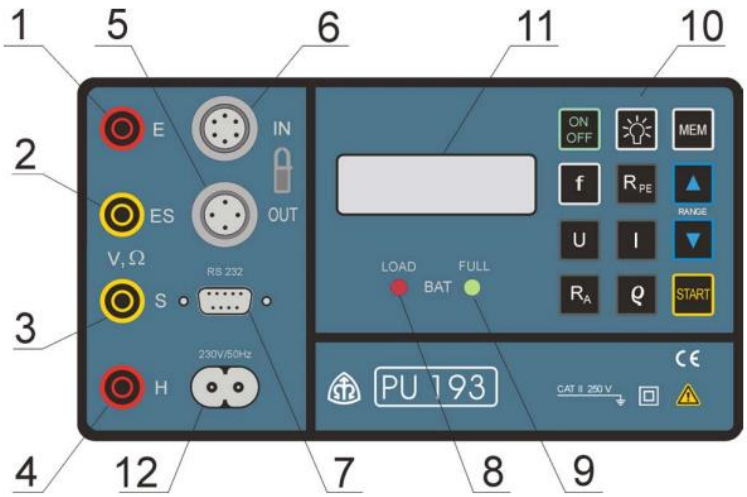
4. MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ

4.1 Měřící přístroj PU 193

Jedná se o přístroj od českého výrobce Metra Blansko, který je určen primárně pro měření rezistivity půdy a měření odporu zemniče. Tento přístroj byl použit autorem práce při praktickém měření v terénu.

4.2 Popis panelu přístroje

Hlavní panel přístroje má následující rozhraní (obrázek 4.1).

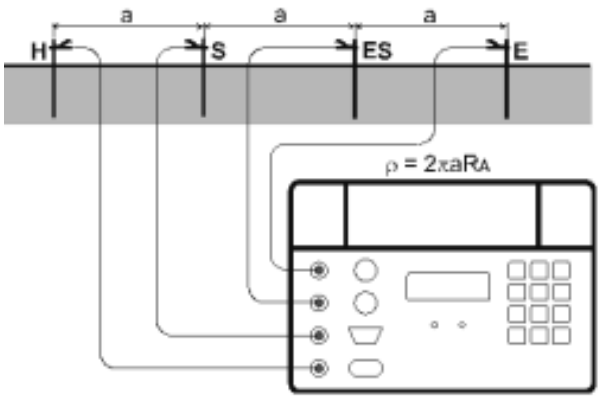


Obrázek 4.1 Popis přístroje PU 193 [6]

1 Svorka E je určena k zapojení zemniče
2 Svorka ES je určena k zapojení zemniče při čtyřvodičovém zapojení
3 Svorka S je určena pro zapojení pomocné napěťové sondy
4 Svorka H je určena pro zapojení pomocné proudové sondy
5 Konektor IN pro připojení měřicích kleští PKM193
6 Konektor OUT pro připojení vysílacích kleští PKT193
7 Konektor RS232 pro komunikaci s počítačem
8 LED (červená) LOAD indikace nabíjení akumulátoru
9 LED (zelená) FULL indikace ukončeného nabíjení akumulátoru
10 Klávesnice
11 Zobrazovací panel
12 Síťová přívodka (při nabíjení akumulátorů se přístroj připojuje do sítě) [6]

4.3 Popis zapojení a ovládání přístroje při měření rezistivity

V této podkapitole je vysvětlen postup měření rezistivity půdy Wennerovou metodou pomocí obrázků (4.2,4.3 a 4.4).

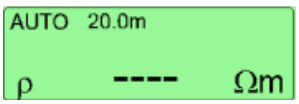


Obrázek 4.2 Zapojení přístroje pro měření rezistivity [6]

Pro měření rezistivity půdy je nutné zasunout do země 4 elektrody ve vzdálenosti *a* od sebe, tato vzdálenost musí být mezi všemi elektrodami stejná. Poté jsou zapojeny elektrody na jednotlivé svorkovnice. Vnější elektrody (H, E) jsou připojeny na zdroj střídavého proudu a na vnitřních elektrodách (S, ES) je měřeno napětí. [6].

Obrázek 4.3 Ovládání přístroje [6]

Stisknutím tlačítka ON je přístroj zapnut. Následně přístroj automaticky provede test funkčnosti. Tento test trvá asi 5 s. Po dokončení testu je možné s přístrojem dále manipulovat. Pro měření rezistivity půdy je nutné stisknout tlačítko *ρ* [6].



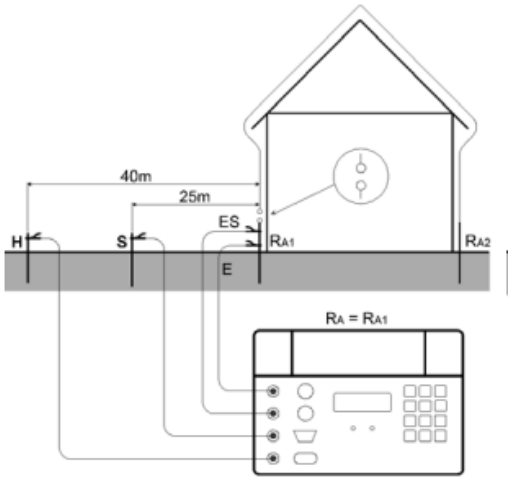
Obrázek 4.4 Ukázka zobrazovacího panelu před měřením rezistivity [6]

Zobrazovací panel se přepne do režimu měření rezistivity půdy a požaduje nastavení vzdálenosti, ve které jsou rozestaveny elektrody.

Nastavení je provedeno pomocí šipek „range“ (obrázek 4.3), dále je nutné stisknout tlačítko START, přístroj provede měření a hodnota rezistivity se zobrazí na zobrazovacím panelu (obrázek 4.4). Maximální hodnotu, kterou je přístroj schopen naměřit, je 20 kΩm [6].

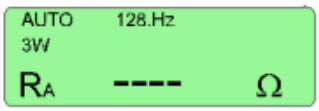
4.4 Popis zapojení a ovládání přístroje při měření odporu zemniče

V této podkapitole je znázorněn postup při měření odporů zemniče klasickou metodou pomocí obrázků (4.5,4.6 a 4.7).



Obrázek 4.5 Zapojení přístroje pro měření odporů zemniče [6]

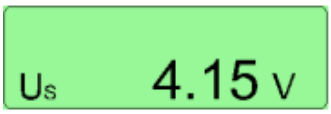
Pro měření odporů zemniče jsou sondy zasunuty do půdy v jedné přímce. Měření se provádí se třemi sondami, nebo čtyřmi. Měření čtyřmi sondami je přesnější. Dle obrázku (4.5) jsou připojeny jednotlivé sondy (H, S, ES, E) k měřícímu přístroji. H představuje pomocnou proudovou sondu, S představuje pomocnou napěťovou sondu a sondy ES, S představují zemnič. Po připojení jednotlivých sond k přístroji, je pomocí obrázku (4.3) vysvětlen postup pro nastavení měření. Stisknutím tlačítka ON je přístroj zapnut. Stejně, jako v případě popsaném v předchozí podkapitole (4.3) přístroj provede automatický test funkčnosti. Po stisknutí tlačítka R_A se na zobrazovacím panelu objeví nabídka pro měření zemního odporu [6].



Obrázek 4.6 Ukázka zobrazovacího panelu pro měření zemních odporů [6]

Na zobrazovacím panelu se zobrazí označení 3W, které značí nastavení přístroje pro měření se třemi vodiči. Dvojitým zmáčknutím tlačítka R_A je možné změnit pole na označení 4W, tímto je přístroj přepnut na měření se čtyřmi vodiči.

Stisknutím tlačítka START se spustí měření, přístroj nejprve změří sériové rušivé napětí *Us*. Pro rušivé napětí *Us* nižší než 3 V si přístroj automaticky zvolí měřící rozsah a provede měření. Naměřená hodnota odporu se zobrazí na zobrazovacím panelu místo čtyř pomlček (obrázek 4.6) [6].



Obrázek 4.7 Ukázka zobrazovacího panelu pro rušivé napětí Us větší než 3 V [6]

Pokud hodnota rušivého napětí *Us* přesáhne 3 V, na zobrazovacím panelu se objeví naměřená hodnota *Us* a měření se přeruší z důvodu vysoké hodnoty rušivého napětí *Us*.

4.5 Technické parametry přístroje

Tabulka 4.1 Referenční a pracovní podmínky přístroje [6]

Referenční podmínky:		**Pracovní podmínky:**	
napájecí napětí	(12 ± 1) V	napájecí napětí	(12 ± 2) V
teplota	(23 ± 2) °C	teplota	- 5 °C až 40 °C
relativní vlhkost	(45-55) %	relativní vlhkost	max. 80 % při 23 °C
poloha přístroje	libovolná	poloha přístroje	libovolná
magnetická indukce	0,5 mT	magnetická indukce	0,1 mT

Napájecí napětí přístroje je 12 V, hmotnost 2,3 kg [6].

4.6 Zhodnocení přístroje z pohledu uživatele

Obsluha přístroje je velice jednoduchá. Uživatelská příručka k použití přístroje je sepsána výrobcem detailně a srozumitelně. Přístroj je uložen do přenosného ochranného obalu na popruh přes rameno, váží pouze 2 kg, což je při měření v terénu výhodou. Elektrody, které se zasouvají do země, mají na horním průřezu čtvercový tvar, spodní část tvoří špičku, tudíž se lehce zatloukají do země a při jejich vytahování stačí použít obyčejné kleště. Tato jednoduchá manipulace s elektrodami při jejich přesouvání na různá místa v terénu představuje významnou úsporu času. Obrázek (4.8) je popsán dále v textu.

Obrázek 4.8 Přístroj a komponenty pro měření

Na obrázku (4.8) jsou k vidění velké smotky drátů. Pokud je prováděno měření na větší vzdálenosti mezi elektrodami, smotané dráty se musí pečlivě rozmotat a po každém měření smotat. Dráty se často kroutí a sukují, tato manipulace zabírá mnoho času a představuje největší nevýhodu přístroje. Tuto nevýhodu lze vyřešit pořízením malých navíjecích bubnů, které se používají například u prodlužovacích kabelů a které nejsou součástí přístroje od výrobce. Dráty se na buben lehce namotávají navíjením, nebo odvíjí opačným otáčením držáku.

5. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Tato kapitola představuje praktickou část předmětné bakalářské práce. V úvodu této kapitoly bude čtenář seznámen s přípravou autora na samotné měření rezistivity půdy a odporu zemniče, místy, na kterých měření probíhalo, jeho průběhem a výsledky.

Měření pro tuto práci je rozděleno do více částí:

1) Půlroční měření rezistivity půdy na zahradě autora práce
2) Měření rezistivity půdy v dráze vedení VN (návrh zemničů u sloupů)
3) Měření rezistivity půdy ve vymezeném prostoru 50x50m
4) Měření odporu zemniče odpojovačů VN

5.1 Měření rezistivity půdy na zahradě autora práce

5.1.1 Příprava a popis měření (zahrada autora práce)

Pro půlroční měření rezistivity půdy byla zvolena zahrada autora práce v obci přibližně 30 km od města Brna, v okrese Brno-venkov, v Jihomoravském kraji. Měření rezistivity půdy na zahradě autora práce probíhalo od měsíce října r. 2021 do začátku měsíce května r. 2022. Cílem měření mělo být zjištění proměnlivosti rezistivity půdy na stejném místě v závislosti na změně počasí. Po celou dobu měření v délce šesti měsíců byly elektrody zasunuty do stejné hloubky h v půdě na zahradě autora práce ve vzdálenosti a od sebe na délku 1 a 3 m, viz obrázek (5.1).

Obrázek 5.1 Rozložení elektrod a místo měření na zahradě autora práce

Elektrody byly zasunuty vedle sebe v jedné přímce. Zahrada autora práce se nachází ve svažitém terénu nad rodinným domem, převážně na skalnatém podloží s navezenou hlinitou vrstvou na povrchu.

5.1.2 Průběh měření (zahrada autora práce)

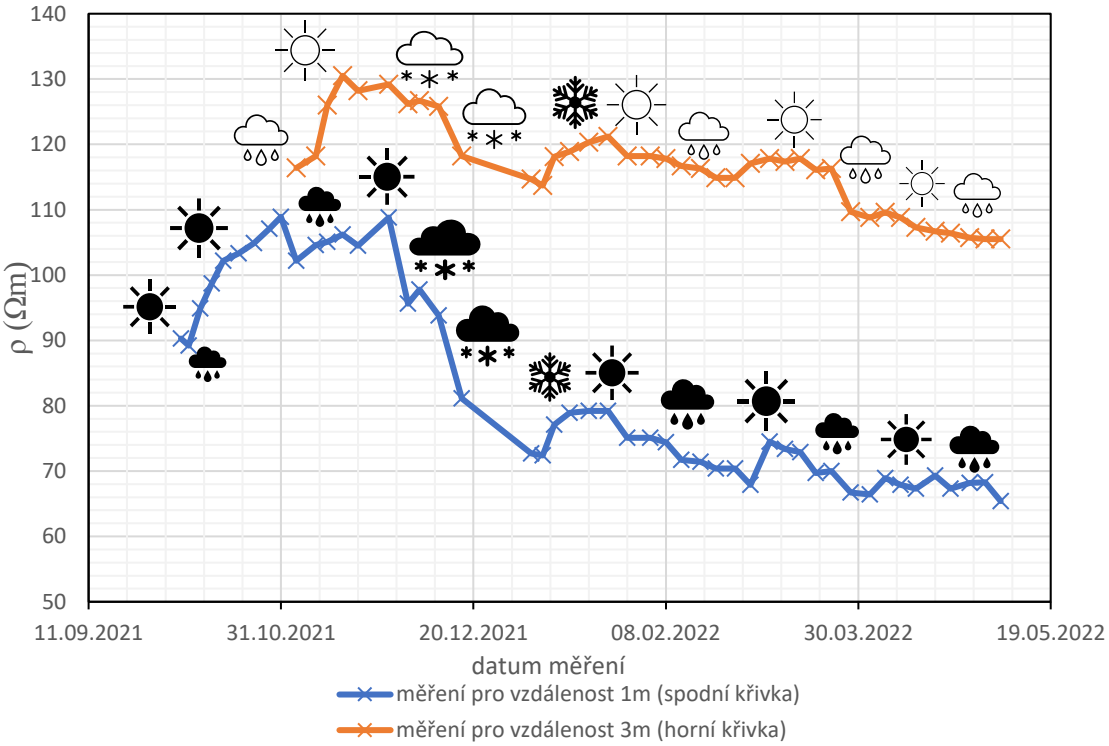
Samotné měření bylo prováděno autorem výlučně dle pokynů výrobce, uvedených v návodu k přístroji. Před každým měřením byly autorem práce rozmotány dráty zakončené banánky, kterými byly připojeny na měřící přístroj a dále zapojeny do patřičných elektrod, do krajních proudových (E, H) a prostředních napěťových (E, ES). Po zapnutí přístroje, na kterém byl nastaven program pro měření rezistivity půdy, byla autorem nastavena vzdálenost elektrod a frekvence 128 Hz. Naměřená hodnota rezistivity půdy, uvedená na přístroji, byla zapsána autorem do bloku s uvedením data měření a aktuálního stavu počasí. Měření bylo zopakováno i pro druhou vzdálenost elektrod 3 m, a to stejným postupem, pouze se změnou nastavení vzdálenosti *a* elektrod na přístroji. Elektrody pro vzdálenost a = 1 a 3 m byly ponechány v půdě od měsíce října r. 2021 do začátku měsíce května r. 2022. Na obrázku (5.2) je zobrazen přístroj při měření v terénu.

Obrázek 5.2 Zobrazená hodnota z měření rezistivity půdy na vzdálenost a =3 m

Při každém jednotlivém měření v daný den bylo totéž měření provedeno autorem na přístroji dvakrát, bezprostředně po sobě, aby byl autor ujištěn, že přístroj nevykázal chybnou hodnotu, např. z důvodu rušivých elementů, špatného zapojení, či špatného kontaktu.

5.1.3 Naměřené hodnoty a výsledky (zahrada autora práce)

Výsledky z měření jsou na obrázku (5.3).



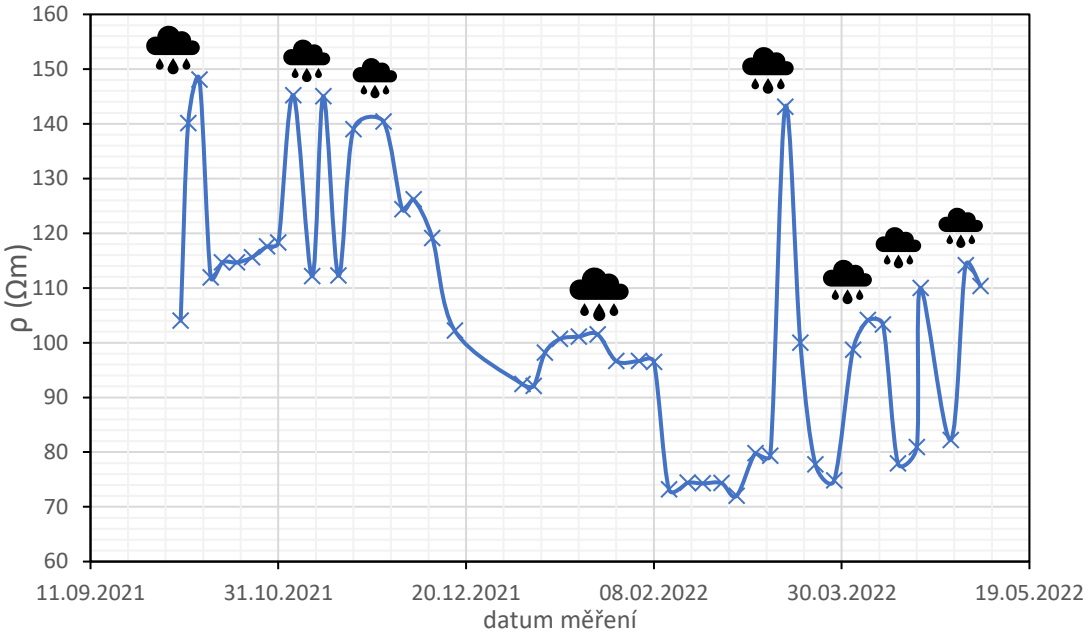
Obrázek 5.3 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce

V obrázku (5.3) jsou zobrazeny dva průběhy, a to pro měření na vzdálenost a = 1 m a a = 3 m. Pro jednotlivé body je znázorněno počasí, při kterém bylo měření prováděno. Z důvodu provádění měření po celou dobu na stejném místě se oba průběhy podobají. Velikost rezistivity se mění dle rozestupů elektrod. Vzhledem k tomu, že proměnlivost počasí byla celkově nevýrazná, z obrázku lze vyčíst, že největší pokles rezistivity byl zaznamenán v zimním období. V tomto období byla půda převážně vlhká z důvodu tání sněhu. Následně v jarním období se rezistivita půdy měnila jen mírně, a to z důvodu malé proměnlivosti počasí a nízké vlhkosti půdy. Půda při mírných jarních deštích nebyla dostatečně vlhká na to, aby se to při měření rezistivity výrazněji projevilo.

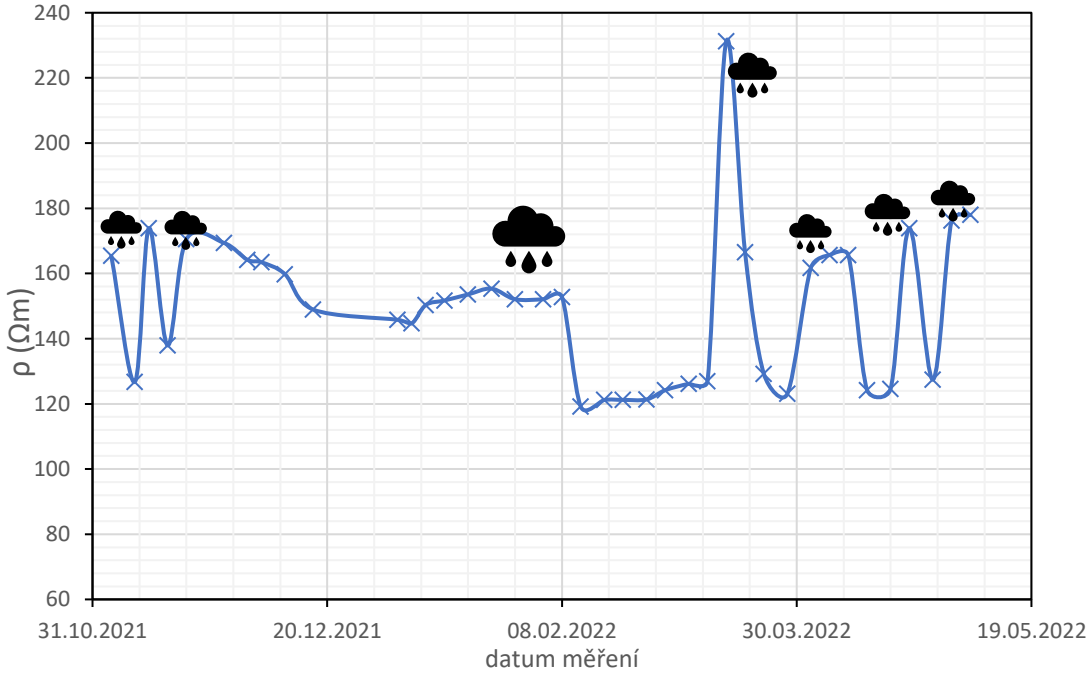
Měření rezistivity půdy na vzdálenost a = 3 m bylo prováděno od měsíce listopadu r. 2021. Tabulka všech naměřených hodnot je z důvodu velkého rozsahu uvedena v příloze A předmětné bakalářské práce.

5.1.4 Naměřené hodnoty s přepočtem pomocí koeficientu K (zahrada autora práce)

V obrázcích (5.4 a 5.5) jsou uvedeny naměřené hodnoty rezistivit z zahrady autora práce přepočítané pomocí koeficientu K.



Obrázek 5.4 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce pro vzdálenost a = 1 m



Obrázek 5.5 Hodnoty rezistivity půdy na zahradě autora práce pro vzdálenost a = 3 m

Z obou obrázků (5.4 a 5.5) jsou patrné značné výkyvy hodnot rezistivity půdy stanovené při použití koeficientu K v deštivých dnech. Koeficient K (kapitola 1), koriguje měřené hodnoty na vlivy počasí (viz. obrázek 1.2). V tomto případě nelze vycházet z toho, že při deštivých dnech je půda vždy vlhká. |Pokud je půda vyprahlá a prší, vlhkost se rychle vstřebá a měření vykazuje hodnoty rezistivity jako v suchém období.

Pokud autor koeficient K nepoužil, žádný větší rozdíl v naměřených hodnotách rezistivity půdy v rozličných stavech počasí ze shora uvedeného důvodu nezaznamenal, jak vyplývá z obrázku (5.3).

Závěrem lze tedy konstatovat, že je velmi obtížné určit, kdy má být použit přepočet pomocí koeficientu K. Efektivní bylo využití koeficientu K pro vlhkou půdu v období měření mezi 04.01.2022 až 08.02.2022. V tomto období byla půda převážně bahnitá důvodem tání sněhu a deštivých srážek. V tomto období měřené hodnoty rezistivity půdy klesaly dle velikosti vlhkosti dle teoretického předpokladu, kdy rezistivita půdy se zvětšující se vlhkostí klesá. Naopak při nevhodném použití přepočítávacího koeficientu K by se autor mohl dopustit zanesení chyby, jak je znázorněno v obrázcích (5.4 a 5.5). Koeficient K by tedy neměl být volen dle stavu počasí v době měření, ale na základě skutečné vlhkosti půdy. Tabulka přepočtených hodnot rezistivity půdy dle koeficientu K je uvedena z důvodu velkého rozsahu v příloze B předmětné práce.

5.2 Měření rezistivity půdy u sloupů vysokého napětí

5.2.1 Trasa vedení sloupů vysokého napětí

Měření rezistivity půdy u sloupů VN bylo prováděno mezi obcí Silůvky a obcí Prštice. Účelem měření bylo provést průzkum v okolí tohoto vedení a získat hodnoty rezistivity půdy pro případný návrh zemničů Na této trase bylo proměřeno 19 sloupů, včetně odpojovačů a transformátoru. Měření rezistivity půdy u sloupů VN bylo náročnější než měření na zahradě autora práce. Z důvodu velkého počtu komponentů přístroje k měření a dalšího potřebného vybavení bylo k přejíždění mezi jednotlivými sloupy VN využito osobní vozidlo. Sloupy stály v lese, mezi zarostlými keři, v poli atd. Některá místa měření byla velmi špatně přístupná přes husté nálety rostlin. Místy byl vlivem podzimního počasí nehostinný bahnitý terén viz. obrázek (5.6).

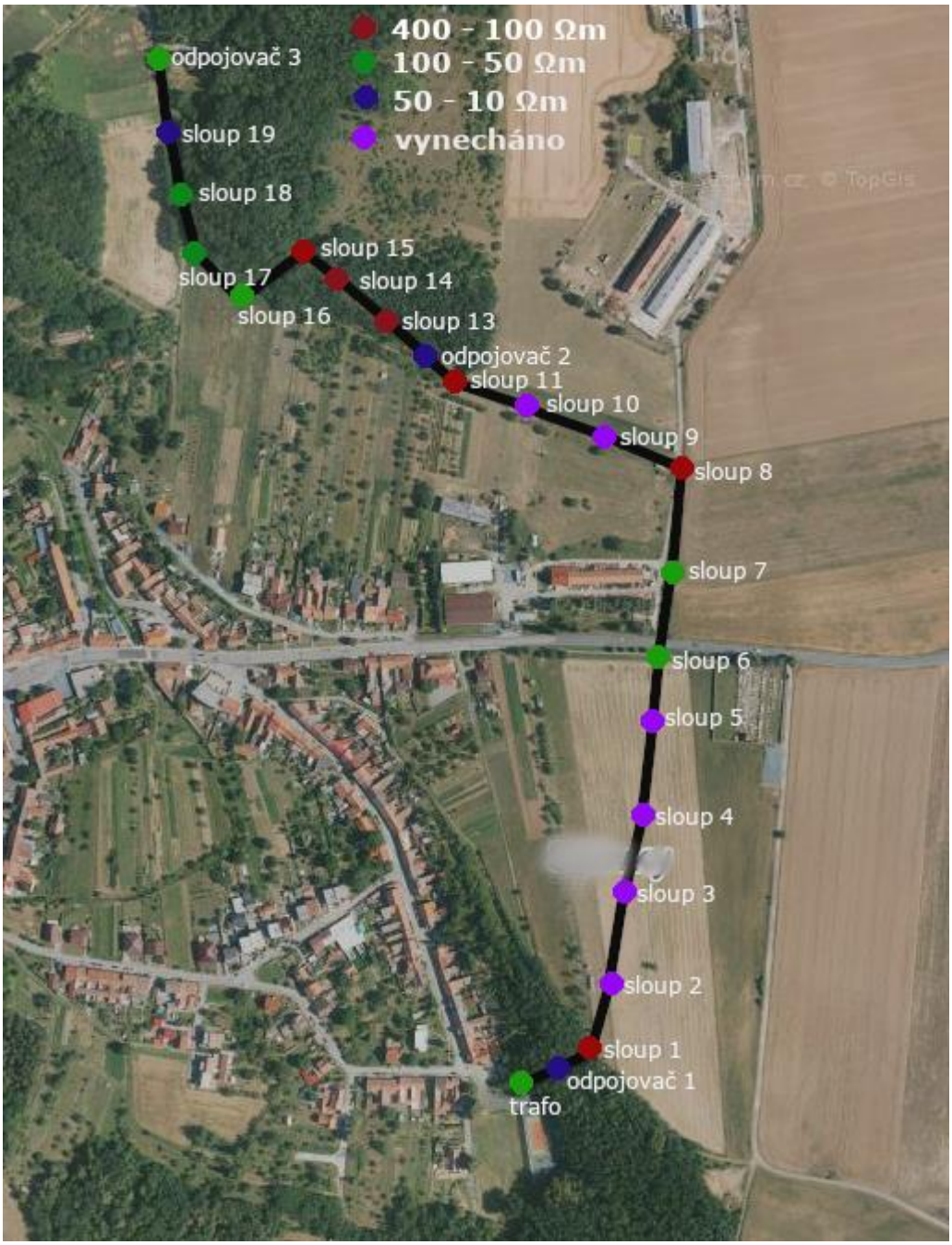
Obrázek 5.6 Trasa vedení a špatně přístupná místa

Na obrázku (5.6) je vidět nepřístupné místo s vysokým porostem křovin, kterých bylo na trase vedení nespočet. V některých místech bylo nutné keře částečně vymýtit pro snazší rozmístění elektrod.

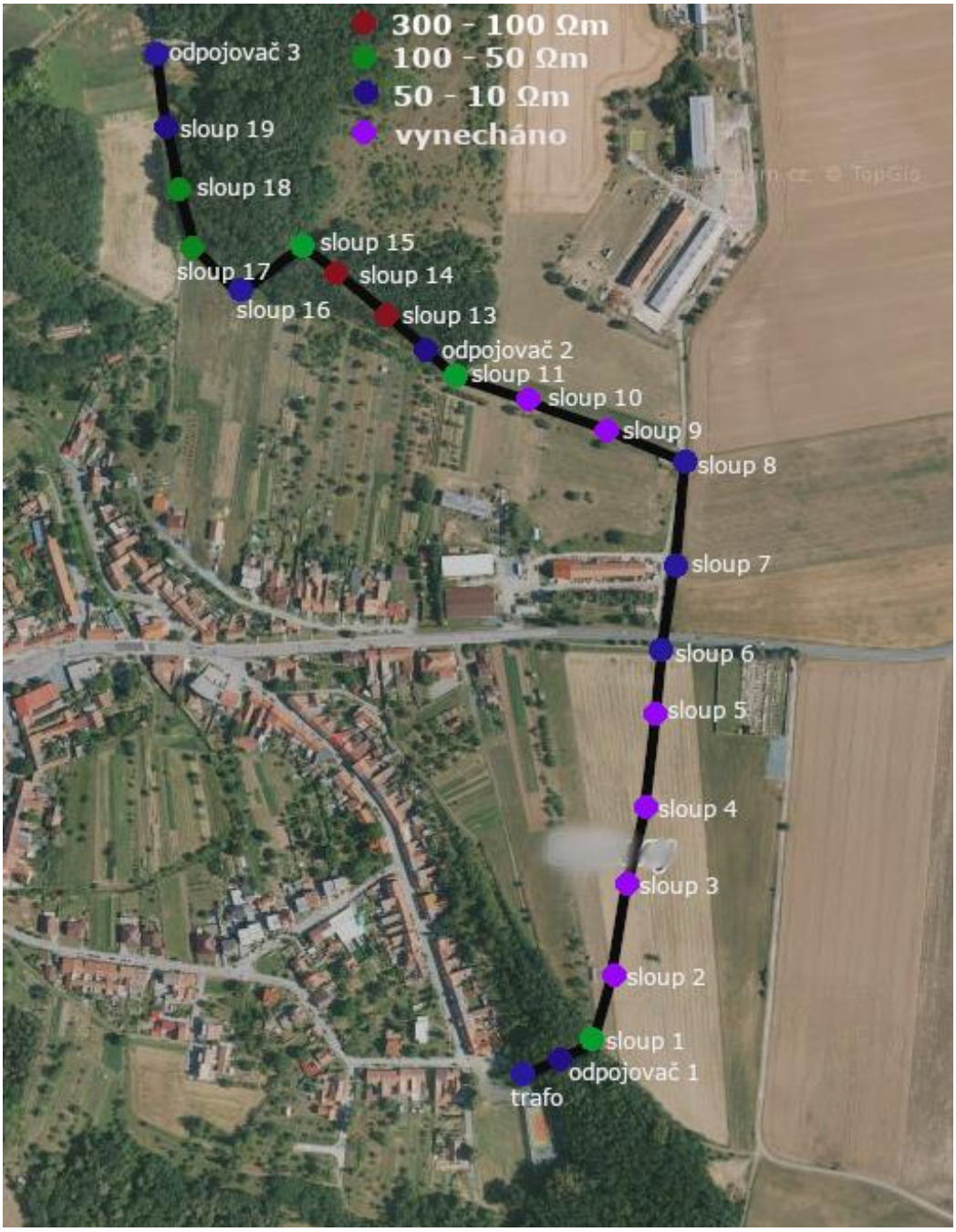
Na trase nebylo možné měřit všechny sloupy, protože vedou přes soukromé pozemky, kde je chován dobytek. Z těchto důvodů bylo přibližně 6 sloupů vynecháno, přičemž měření bylo prováděno na všech ostatních přístupných sloupech. Jedná se o vedení 22 kV.

5.2.2 Měření rezistivity půdy u sloupů VN

Předmětné měření bylo prováděno stejným způsobem jako při měření rezistivity půdy na zahradě autora práce. Pro každý sloup bylo prováděno měření pro rozestup elektrod 1 a 3 m. Měření bylo náročnější z toho důvodu, že u každého sloupu musely být elektrody zatloukány, rozmotány jednotlivé dráty, odměřeny hodnoty a po odměření bylo nutné dráty smotat, elektrody vytáhnout a přemístit se k dalšímu sloupu. Měřená trasa viz obrázek (5.7 a 5.8).



Obrázek 5.7 Měření rezistivity u sloupu VN pro vzdálenost a = 1 m [9]



Obrázek 5.8 Měření rezistivity u sloupu VN pro vzdálenost a = 3 m [9]

Na obrázku (5.7 a 5.8) je vytyčeno rozmístění sloupů VN, které byly měřeny. K obrázku je přidána legenda přibližně naměřených hodnot rezistivity půdy u jednotlivých sloupů, znázorněna barevnými body. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce (5.1).

Obrázek 5.9 Ukázka měření rezistivity půdy u sloupů VN pro a = 1 a 3 m

Na obrázku (5.9) je ukázka, jak probíhalo měření rezistivity půdy v blízkosti sloupů VN. Pro měření byly použity 4 elektrody, které byly rozmístěny u sloupu VN na vzdálenost 1 m. Po naměření hodnot na tuto vzdálenost byly elektrody rozmístěny na vzdálenost 3 m. Obě naměřené hodnoty byly následně zapsány autorem práce do bloku a měření bylo opakováno po celé měřené trase VN.

5.2.3 Naměřené hodnoty rezistivity půdy u sloupů vysokého napětí

V tabulce (5.1) jsou umístěny naměřené hodnoty rezistivity půdy z trasy vedení VN, a to pro obě vzdálenosti. V den měření rezistivity půdy v okolí sloupů VN bylo deštivé počasí.

Tabulka 5.1 Naměřené hodnoty rezistivity půdy u sloupů VN

	a = 1 m	**a = 3 m**	
trasa VN	**ρ (Ωm)**	**ρ (Ωm)**	**místo**
trafo	85,4	44,1	louka
odpojovač 1	80,3	41,4	les
sloup 1	161,1	69	pole
sloup 6	66	30,3	pole
sloup 7	77,2	42,7	pole
sloup 8	112,8	41,1	pole
sloup 11	104,3	65,5	louka
odpojovač 2	23,8	29,7	louka
sloup 13	366	260	les
sloup 14	353	228	les
sloup 15	125,7	83,5	les
sloup 16	53,8	26,3	pole
sloup 17	67,6	54,4	les
sloup 18	72,6	58,1	les
sloup 19	41,6	21,6	louka
odpojovač 3	81,6	34,3	louka

Naměřené hodnoty pro vzdálenost elektrod a =1 m jsou větší než pro vzdálenost a = 3 m. Autor předpokládá, že to může být způsobeno např. podbetonováním sloupu. U odpojovačů to může být umocněno ještě umístěním zemniče, neboť při měření nelze přesně určit, kde se zemnič nachází. Rozdílnost hodnot může být také způsobena tím, že spodní vrstvy půdy mají obvykle méně proměnlivou hodnotu rezistivity půdy, kdežto povrchové vrstvy jsou více náchylné na jejich vysychání, a tedy jejich rezistivita v průběhu roku více kolísá. Pro vzdálenost a = 3 m jsou elektrody umístěny dál od sloupu, z tohoto důvodu je možné, že měření rezistivity není ovlivněno zmíněnými faktory. Složení půdy je v okolí sloupů různorodé, největší změna rezistivity byla naměřena u sloupů 13 a 14, u nichž je půda navezená (jedná se o bývalou nelegální skládku) a pro detailnější prozkoumání okolí sloupů v dané lokalitě bylo realizováno plošné měření, které je detailně popsáno v kapitole 5.3.1. Naměřené hodnoty z tabulky (5.1) jsou použity k návrhu zemniče pro tři sloupy VN v rozdílných oblastech (louka, les pole), a to v následující kapitole.

5.2.4 Návrh zemničů pro tři sloupy vedení vysokého napětí

V dané kapitole autor navrhuje konkrétní typy zemničů pro tři sloupy VN dle velikosti hodnot naměřené rezistivity v jejich blízkosti. Jedná se o návrh zemničů pro sloupy 1,13 a 19. Sloupy byly autorem vybrány ze dvou důvodů, každý z nich se nachází na jiném místě (pole, louka a les) a také mají odlišné hodnoty rezistivity půdy. Sloup 19 má rezistivitu okolní půdy menší než 50 Ωm, sloup 1 má okolní rezistivitu menší než 200 Ωm a sloup 13 má rezistivitu okolní půdy větší než 200 Ωm.

Tabulka 5.2 Zadané a zvolené hodnoty pro návrh zemničů

Soustava kompenzovaná										
t_{vyp} **(ms)**	I_p **(A)**	h_1 **(m)**	h_2 **a** h_p**(m)**	h_3 **(m)**	d **(m)**	η_{12} **(-)**	η_{123} **(-)**	η_{pn} **(-)**	η_{op} **(-)**	n **(-)**
1200	20	0,4	0,7	1	0,015	0,7	0,65	0,87	0,9	2

V tabulce (5.2) jsou obsaženy zadané a zvolené hodnoty pro návrh zemničů. Hodnoty poruchového proudu I_p a vypínacího času t_{vyp} byly autorovi zadány.

Zemnič by měl být navržen tak, aby dotykové napětí při poruše bylo menší, než dovolené dotykové napětí podle normy ČSN 50522 viz. obrázek (5.10). V rámci návrhu byly uvažovány čtyři typy uspořádání zemničů (kruhový, dvoukruhový, tříkruhový a tříkruhový s paprskem). Hodnoty hloubky h byly zvoleny autorem práce jako konstantní. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce (5.2). Ostatní parametry zadání z tabulky (5.2) byly zvoleny dle doporučení zdroje [10] a účel parametrů je vysvětlen dále v textu.

Tabulka 5.3 Naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity půdy u sloupů VN

ρ_{1m} (Ωm)	ρ_{3m} (Ωm)	datum	počasí	K (-)	sloup	$\rho_{př1m.}$(Ωm)	$\rho_{př3m.}$(Ωm)	$\rho_{prům}$ (Ωm)
1124	569	25.03.2022	sucho	1,047	13	1176,82	595,74	886,28
161,1	69	10.11.2021	sucho	1,148	1	184,94	79,21	132,07
41,6	21,6	10.11.2021	sucho	1,148	19	47,75	24,79	36,27

V tabulce (5.3) jsou naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity půdy v blízkosti sloupů 1, 13, a 19. Hodnoty rezistivity byly přepočítány pomocí koeficientu K na základě vlhkosti půdy. Následně byl z hodnot pro 1 a 3 m rozestup elektrod vypočten aritmetický průměr, který byl použit pro návrh zemničů.

Příklad výpočtu rezistivity pomocí koeficientu K pro 1. řádek tabulky (5.3) [1]:

$$\rho_{př1m} = \rho_{1m} \cdot K = 1124 \cdot 1{,}047 = 1176{,}82\ \Omega\text{m} \quad (12)$$

$$\rho_{př3m} = \rho_{3m} \cdot K = 569 \cdot 1{,}047 = 595{,}74\ \Omega\text{m} \quad (12)$$

Příklad výpočtu průměrné hodnoty rezistivity pro 1.řádek tabulky (5.3):

$$\rho_{pům} = \frac{\rho_{př1m}+\rho_{př3m}}{2} = \frac{1176{,}82+595{,}74}{2} = 886{,}28\ \Omega\text{m} \quad (13)$$

5.2.5 Návrh zemniče pro sloup 19

Tabulka 5.4 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 19

D_{kr1} (m)	D_{kr2} (m)	R_{kr1} (Ω)	R_{kr2} (Ω)	R_{cel} (Ω)
3	4	6,03	4,53	3,69

V tabulce (5.4) jsou zvoleny hodnoty průměru zemniče *D* a vypočtené hodnoty odporu. Hodnoty průměru zemniče *D* byly voleny autorem práce během výpočtu, dokud nebylo dosaženo hodnoty odporu zemniče vyhovující podmínce dotykových napětí. Pro sloup 19 byl zvolen dvoukruhový zemnič.

Výpočet odporu 1. kruhu pro sloup 19 [10]:

$$R_{kr1} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr1}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr1}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr1}}{2 \cdot h_1} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr1} = \frac{36{,}27}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 3} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 3}{0{,}015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 3}{2 \cdot 0{,}4} \right) = 6{,}03\ \Omega \quad (15)$$

Výpočet odporu 2. kruhu pro sloup 19 [10]:

$$R_{kr2} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr2}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr2}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr2}}{2 \cdot h_2} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr2} = \frac{36{,}27}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 4} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 4}{0{,}015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 4}{2 \cdot 0{,}7} \right) = 4{,}53\ \Omega \quad (15)$$

Kde:
– *D* průměr kruhu (m)
– *d* průměr pásku (m)
– *h* hloubka kruhu pod povrchem (m)

Výpočet celkového odporu obou kruhů pro sloup 19 [10]:

$$R_{cel} = \frac{R_{kr1} \cdot R_{kr2}}{R_{kr1} + R_{kr2}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} = \frac{6{,}03 \cdot 4{,}53}{6{,}03 + 4{,}53} \cdot \frac{1}{0{,}7} = 3{,}69\ \Omega \quad (16)$$

Kde:
– η_{12} koeficient využití dílčích uzemnění pro malé objekty a vzájemné vzdálenosti zemničů do 2 m, doporučuje zdroj [10] $\eta_{12} = 0{,}7$

Hodnoty k výpočtům jsou uvedeny v tabulce (5.2, 5.3 a 5.4).

5.2.6 Návrh zemniče pro sloup 1

Tabulka 5.5 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 1

D_{kr1} (m)	D_{kr2} (m)	D_{kr3} (m)	R_{kr1} (Ω)	R_{kr2} (Ω)	R_{kr3} (Ω)	R_{cel2} (Ω)	R_{cel3} (Ω)
3	4	6	21,95	13,79	9,11	12,11	7,99

V tabulce (5.5) jsou zvoleny hodnoty průměru zemniče *D* a vypočtené hodnoty odporu. Hodnoty průměru *D* zemniče byly voleny autorem práce během výpočtu, dokud nebylo dosaženo požadované hodnoty výsledného odporu navrhovaného zemniče. Pro sloup 1 byl zvolen tříkruhový zemnič.

Výpočet odporu 1. kruhu pro sloup 1 [10]:

$$R_{kr1} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr1}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr1}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr1}}{2 \cdot h_1} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr1} = \frac{132,07}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 3} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 3}{0,015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 3}{2 \cdot 0,4} \right) = 21,25\ \Omega \quad (15)$$

Výpočet odporu 2. kruhu pro sloup 1 [10]:

$$R_{kr2} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr2}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr2}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr2}}{2 \cdot h_2} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr2} = \frac{132,07}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 4} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 4}{0,015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 4}{2 \cdot 0,7} \right) = 13,79\ \Omega \quad (15)$$

Výpočet odporu 3. kruhu pro sloup 1 [10]:

$$R_{kr3} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr3}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr3}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr3}}{2 \cdot h_3} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr3} = \frac{132,07}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 6} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 6}{0,015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 6}{2 \cdot 1} \right) = 9,11\ \Omega \quad (15)$$

Kde:
– *D* průměr kruhu (m)
– *d* průměr pásku (m)
– *h* hloubka kruhu pod povrchem (m)

Výpočet celkového odporu obou kruhů pro sloup 1 [10]:

$$R_{cel2} = \frac{R_{kr1} \cdot R_{kr2}}{R_{kr1} + R_{kr2}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} = \frac{21,25 \cdot 13,79}{21,25 + 13,79} \cdot \frac{1}{0,7} = 12,11\ \Omega \quad (16)$$

Kde:
– η_{12} koeficient využití dílčích uzemnění pro malé objekty a vzájemné vzdálenosti zemničů do 2 m, doporučuje zdroj [10] η_{12} = 0,7

Výpočet celkového odporu tří kruhů pro sloup 1 [10]:

$$R_{cel3} = \frac{R_{cel2} \cdot R_{kr3}}{R_{cel2} + R_{kr3}} \cdot \frac{1}{\eta_{123}} = \frac{12{,}11 \cdot 9{,}11}{12{,}11 + 9{,}11} \cdot \frac{1}{0{,}65} = 7{,}99\ \Omega \quad (17)$$

Kde:

– η_{123} koeficient využití dílčích uzemnění pro malé objekty a vzájemné vzdálenosti zemničů do 2 m, doporučuje zdroj [10] η_{123} = 0,65

Hodnoty k výpočtům jsou uvedeny v tabulce (5.2, 5.3 a 5.5).

5.2.7 Návrh zemniče pro sloup 13

Tabulka 5.6 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 13

D_{kr1} (m)	D_{kr2} (m)	D_{kr3} (m)	R_{kr1} (Ω)	R_{kr2} (Ω)	R_{kr3} (Ω)	R_{cel2} (Ω)	R_{cel3} (Ω)
3	7	10	147,33	70,42	50,89	68,06	44,80

Tabulka 5.7 Zvolené a vypočtené hodnoty pro návrh zemniče u sloupu 13

$D_{paprsku}=L$ (m)	$R_{paprsku}$ (Ω)	$R_{paprsků}$ (Ω)	R_{cel4} (Ω)
20	74,39	42,75	24,3

V tabulce (5.6 a 5.7) jsou zvoleny hodnoty průměru zemniče *D* a vypočtené hodnoty odporu. Hodnoty průměru zemniče *D* byly voleny autorem práce během výpočtu, dokud nebylo dosaženo požadované hodnoty výsledného odporu navrhovaného zemniče. Pro sloup 13 byl zvolen tříkruhový zemnič a dva paprskové zemniče, které směřují na opačné strany v úhlu 180°.

Výpočet odporu 1. kruhu pro sloup 13 [10]:

$$R_{kr1} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2 \cdot} D_{kr1}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr1}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr1}}{2 \cdot h_1} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr1} = \frac{886{,}28}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 3} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 3}{0{,}015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 3}{2 \cdot 0{,}4} \right) = 147{,}33\ \Omega \quad (15)$$

Výpočet odporu 2. kruhu pro sloup 13 [10]:

$$R_{kr2} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2 \cdot} D_{kr2}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr2}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr2}}{2 \cdot h_2} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr2} = \frac{886{,}28}{2 \cdot \pi^{2} \cdot 7} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 7}{0{,}015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 7}{2 \cdot 0{,}7} \right) = 70{,}42\Omega \quad (15)$$

Kde:

– *D* průměr kruhu (m)

– *d* průměr pásku (m)

– *h* hloubka kruhu pod povrchem (m)

Výpočet odporu 3. kruhu pro sloup 13 [10]:

$$R_{kr3} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi^{2\cdot} D_{kr3}} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot D_{kr3}}{d} + ln \cdot \frac{\pi \cdot D_{kr3}}{2 \cdot h_3} \right) \quad (\Omega) \quad (15)$$

$$R_{kr3} = \frac{132{,}07}{2 \cdot \pi^2 \cdot 10} \left(ln \cdot \frac{8 \cdot 10}{0{,}015} + ln \cdot \frac{\pi \cdot 10}{2 \cdot 1} \right) = 50{,}89\ \Omega \quad (15)$$

Kde:

– *D* průměr kruhu (m)

– *d* průměr pásku (m)

– *h* hloubka kruhu pod povrchem (m)

Výpočet celkového odporu obou kruhů pro sloup 13 [10]:

$$R_{cel2} = \frac{R_{kr1} \cdot R_{kr2}}{R_{kr1} + R_{kr2}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} = \frac{147{,}33 \cdot 70{,}42}{147{,}33 + 70{,}42} \cdot \frac{1}{0{,}7} = 68{,}06\ \Omega \quad (16)$$

Kde:

– η_{12} koeficient využití dílčích uzemnění pro malé objekty a vzájemné vzdálenosti zemničů do 2 m, doporučuje zdroj [10] $\eta_{12} = 0{,}7$

Výpočet celkového odporu tří kruhů pro sloup 13 [10]:

$$R_{cel3} = \frac{R_{cel2} \cdot R_{kr3}}{R_{cel2} + R_{kr3}} \cdot \frac{1}{\eta_{123}} = \frac{68{,}06 \cdot 50{,}89}{68{,}06 + 50{,}89} \cdot \frac{1}{0{,}65} = 44{,}80\ \Omega \quad (17)$$

Kde:

– η_{123} koeficient využití dílčích uzemnění pro malé objekty a vzájemné vzdálenosti zemničů do 2 m, doporučuje zdroj [10] $\eta_{123} = 0{,}65$

Výpočet odporu jednoho paprsku pro sloup 13 [10]:

$$R_{paprsku} = \frac{\rho_{pům}}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(ln \cdot \frac{2 \cdot L}{d} + ln \cdot \frac{L}{2 \cdot h_4} \right) \quad (\Omega) \quad (18)$$

$$R_{paprsku} = \frac{886{,}28}{2 \cdot \pi \cdot 20} \left(ln \cdot \frac{2 \cdot 20}{0{,}015} + ln \cdot \frac{20}{2 \cdot 0{,}7} \right) = 74{,}39\ \Omega \quad (18)$$

Kde:

– *L* délka paprsku (m)

– *d* průměr pásku (m)

– *h* hloubka kruhu pod povrchem (m)

Výpočet celkového odporu obou paprsků pro sloup 13 [10]:

$$R_{paprsků} = \frac{R_{paprsku}}{n} \cdot \frac{1}{\eta_{pn}} = \frac{74{,}39}{2} \cdot \frac{1}{0{,}87} = 42{,}75\ \Omega \tag{19}$$

Kde:
– *n* počet paprsků
– *ηpn* koeficient využití paprskových zemničů, doporučuje zdroj [10] *ηpn* = 0,87 pro *n* = 2

Výpočet celkového odporu obou paprsků a tří kruhů pro sloup 13 [10]:

$$R_{cel4} = \frac{1}{\frac{n \cdot \eta_{pn}}{R_{paprsků}} + \frac{1}{R_{cel3}}} \cdot \frac{1}{\eta_{op}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 0{,}87}{42{,}75} + \frac{1}{44{,}80}} \cdot \frac{1}{0{,}9} = 24{,}30\ \Omega \tag{20}$$

Kde:
– *n* počet paprsků
– *ηpn* koeficient využití paprskových zemničů, doporučuje zdroj [10] *ηpn* = 0,87 pro *n* = 2
– *ηop* koeficient využití kombinace zemničů, doporučuje zdroj [10] *η* = 0,9

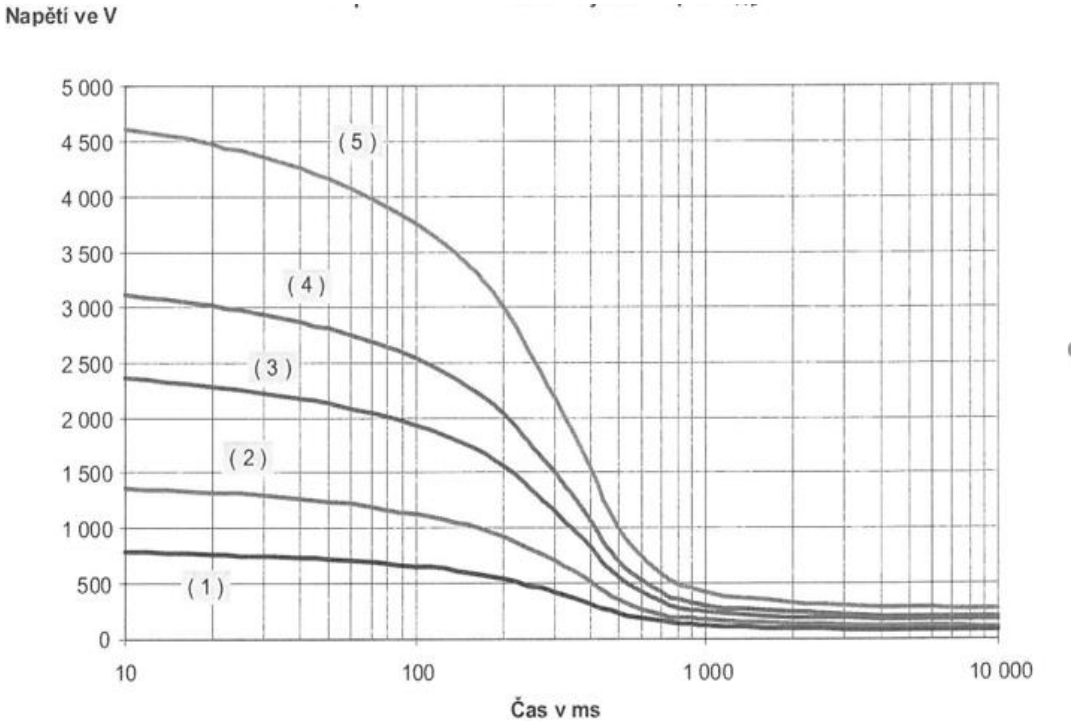
Hodnoty k výpočtům jsou uvedeny v tabulce (5.2, 5.3, 5.6 a 5.7).

5.2.8 Shrnutí návrhu zemniče

Shora uvedenými výpočty zemničů v půdě o rozdílné rezistivitě je autorem navržen počet a velikost zemničů pro dané tři sloupy. Pro nejvíce vodivou půdu v okolí sloupu 19 navrhuje autor zemnič s dvěma kruhy. U sloupu 1 je navržen zemnič s třemi kruhy. Nejvíce zemničů je navrženo pro sloup 13, který se nachází ve velmi málo vodivé půdě. Pro tento případ je použita kombinace tříkruhových zemničů se dvěma paprsky. Z pohledu autora by řešením snížení počtu zemničů byla navážka vodivější půdy v okolí sloupu 13. V kapitole 5.3.1 se autor zabývá plošným měřením rezistivity půdy mezi sloupy 13, 14, 15. Z tohoto měření bylo zjištěno, že hodnota rezistivity je ve vzdálenosti 9 m od sloupu 13 cca třetinová (obrázek 5.11). Z toho autor vyvozuje, že řešením snížení navrženého počtu zemničů pro sloup 13, by bylo jeho posunutí o cca 9 m.

5.2.9 Ověření návrhů odporu zemničů

Tato kapitola se bude věnovat ověření shora uvedených návrhů odporu všech tří zemničů s ohledem na dotykové napětí. Pro návrh odporu zemničů byla použita křivka dotykových napětí viz. obrázek (5.10) dle zdroje [11]. Při návrzích zemničů bylo uvažováno, že dotykové napětí bude 50 % z celkového nárustu potenciálu zemniče při poruše. Dle zadání je při poruše uvažován poruchový proud I_p = 20 A, viz tabulka (5.8).



Obrázek 5.10 Předpokládané dovolené dotykové napětí [11]

Křivka (1) – Dovolená dotyková napětí bez přídavných rezistencí
Křivka (2) –rezistivita ρ= 500 Ωm, R_F = 750 Ω, R_{F1} = 0 Ω
Křivka (3) –rezistivita ρ= 500 Ωm, R_F = 1750 Ω, R_{F1} = 1000 Ω
Křivka (4) –rezistivita ρ= 1000 Ωm, R_F = 2500 Ω, R_{F1} = 1000 Ω
Křivka (5) –rezistivita ρ= 2000 Ωm, R_F = 4000 Ω, R_{F1} = 1000 Ω
R_{F1} – průměrná hodnota odporu pro staré vlhké boty.
R_F – hodnota přídavného odporu kontaktu chodidla se zemí v nevodivé půdě 1,5 x ρ.

Tabulka 5.8 Zadané a vypočtené hodnoty odporu, proudu a dotykového napětí sloupů VN

místo	sloup	R (Ω)	I_p (A)	U_{epr} (V)	U_{dotyk}/U_{epr} (%)	U_{dotyk} (V)
pole	19	3,69	20	73,91	50	36,95
louka	1	7,99	20	159,89	50	79,94
les	13	24,30	20	486,16	50	243,08

Výpočet celkového nárustu potenciálu zemniče na povrchu země pro 1. řádek tabulky (5.8) [10]:

$$U_{epr} = R \cdot I_p = 3{,}69 \cdot 20 = 73{,}91 \text{ V} \tag{21}$$

Kde:

– U_{epr} celkový nárust potenciálu zemniče (V)

– R celkový odpor zemniče

– I_p poruchový proud

Výpočet dovoleného dotykového napětí pro 1. řádek tabulky (5.8):

$$U_{dotyk} = \frac{U_{epr} \cdot 50}{100} = \frac{73{,}91 \cdot 50}{100} = 36{,}95 \text{ V} \tag{22}$$

Kde:

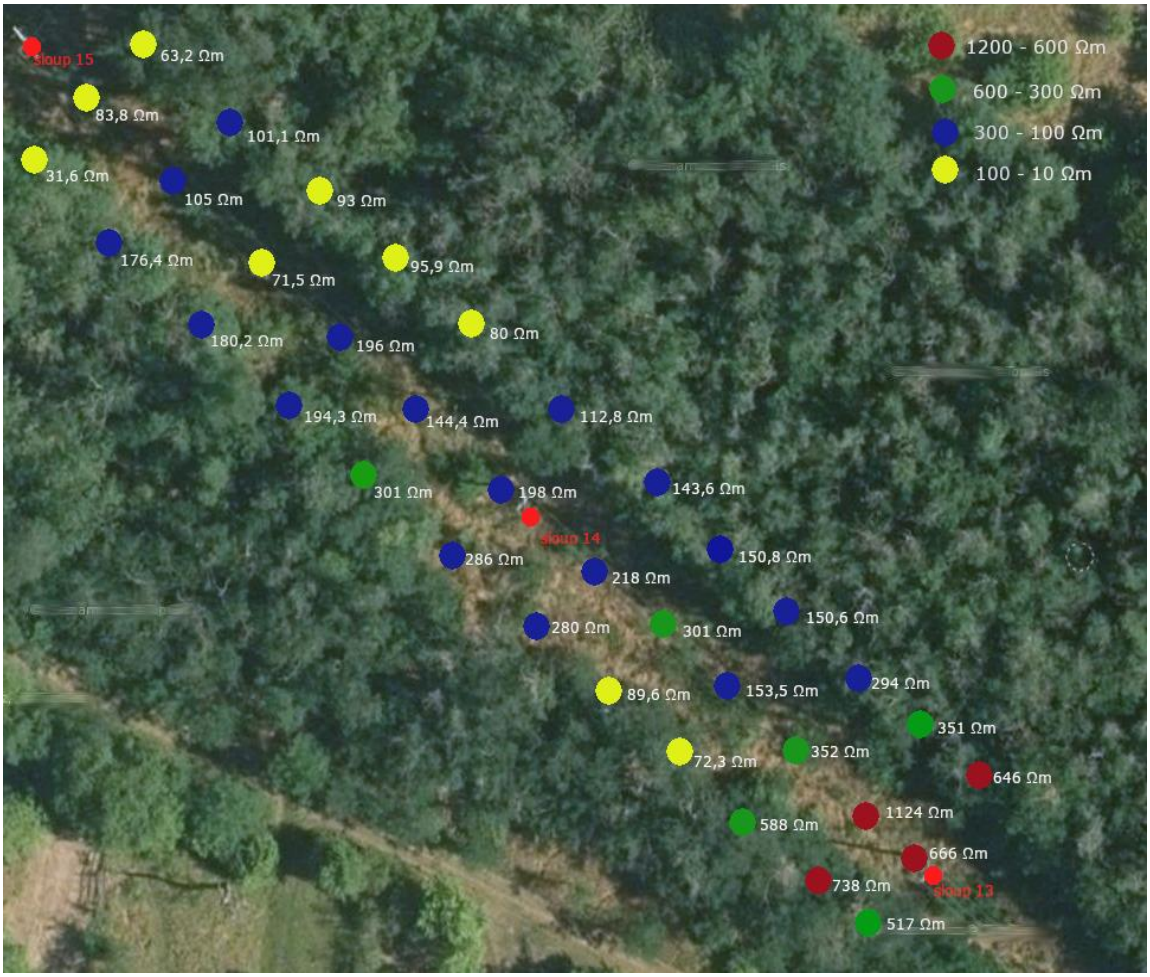
– U_{dotyk} dovolené dotykové napětí (V)

Křivka (1) z obrázku (5.10) představuje napětí, která se mohou objevit na lidském těle při dotyku holou rukou proti bosé noze. Tato závislost se týká zemních poruch v sítích nad 1 kV. Dovolené dotykové napětí pro omezené trvání průtoku poruchového proudu je napětí, které je připuštěno na lidské tělo po dobu trvání poruchy t_{vyp} a tímto napětím je zaručena bezpečnost osob. Norma udává jako velikost maximálního dovoleného ustáleného dotykového napětí U_{dotyk}=80 V pro dobu trvání $t_{vyp} \geq 5$ s [11]. Při návrhu a výpočtu zemniče v této práci bylo pro zjednodušení u sloupů 1 a 19 uvažováno s průběhem křivky (1) vzhledem k nízké rezistivitě v okolí daných sloupů. Byl tedy uvažován pouze odpor lidského těla bez jakýchkoli doplňkových odporů. Při návrhu a výpočtu zemniče u sloupu 13 bylo pro zjednodušení uvažováno s průběhem křivky (4) vzhledem k vysoké hodnotě povrchové rezistivity v okolí sloupu 13. Křivka (4) simuluje místo, kde se předpokládá, že jsou lidé obuti a rezistivita půdy je poměrně vysoká ρ = 1000 Ωm. V tomto případě je uvažován doplňkový odpor R_F = 2500 Ω. Dovolené dotykové napětí je v tomto případě uvažováno do U_{dotyk} = 250 V po dobu trvání $t_{vyp} \geq 5$ s z důvodu rozložení napětí mezi předmětný doplňkový odpor a odpor člověka [11]. Autor vyvozuje, že jeho všechny návrhy zemničů byly zvoleny správně vůči dovolenému dotykovému napětí dle uvažovaných křivek (1) a (4) viz obrázek (5.10).

5.3 Měření rezistivity půdy (plošné měření)

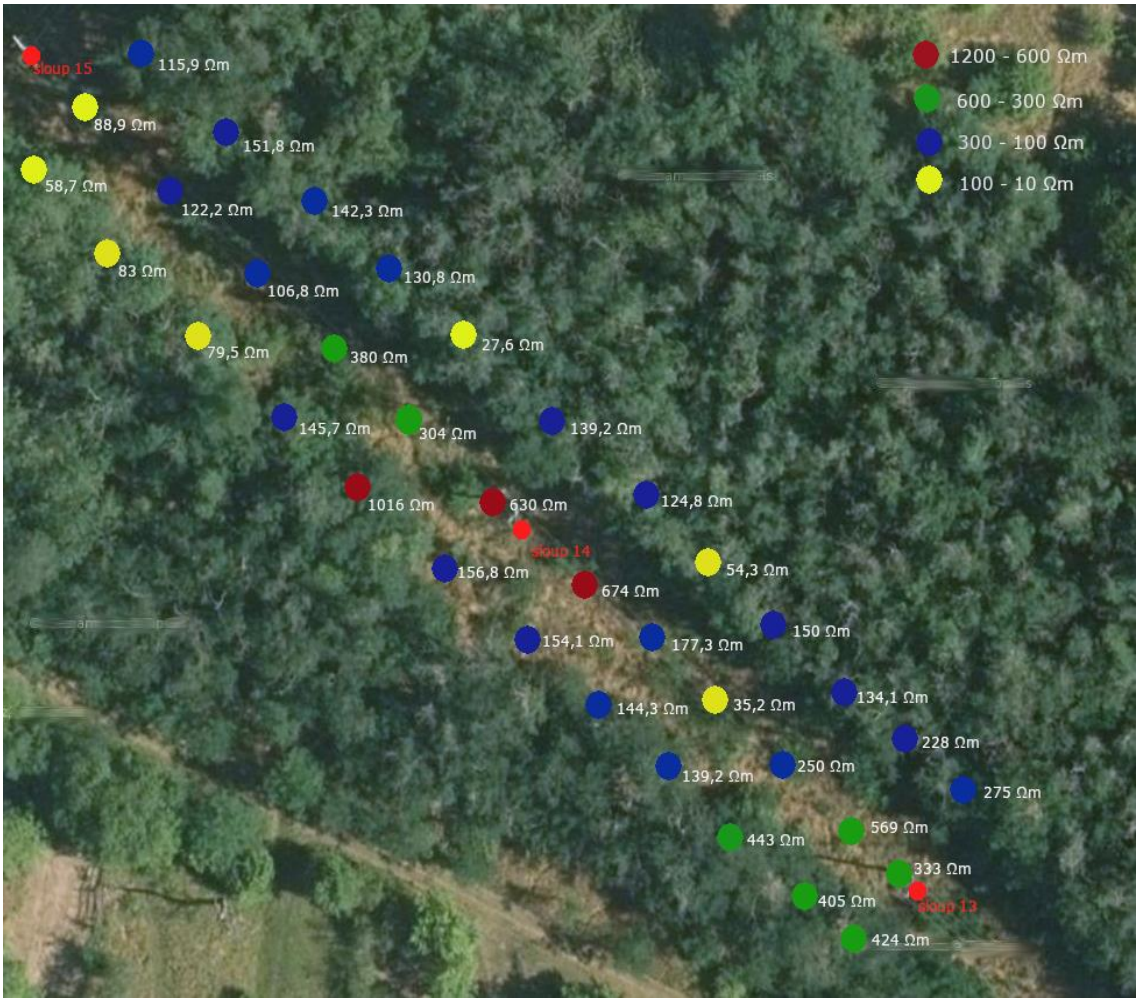
5.3.1 Plošné měření rezistivity půdy

Plošné měření rezistivity půdy bylo realizováno za účelem detailního prozkoumání dílčí části z celé proměřené oblasti, a to konkrétně mezi sloupy 13, 14 a 15. Tato oblast byla autorem zvolena z důvodu, že z proběhnuvšího měření rezistivity půdy u daných sloupů bylo zjištěno, že hodnota rezistivity půdy je v předmětné lokalitě vysoká oproti ostatním naměřeným hodnotám u zbylých sloupů VN. Vzdálenost mezi měřenými body na obrázcích (5.11 a 5.12) je 8 m. Plošné měření bylo zaměřeno na zjištění proměnlivosti rezistivity půdy v této lokalitě. Během předmětného měření bylo slunečné počasí.



Obrázek 5.11 Plošné měření rezistivity půdy pro vzdálenost a = 1 m [9]

Na obrázku (5.11) jsou znázorněny hodnoty rezistivity půdy pro vzdálenost elektrod a = 1 m ve vybrané lokalitě plošného měření. Z předchozího měření všech sloupů VN autor předpokládal, že největší rezistivita by měla být naměřena v oblasti mezi sloupy 13 a 14, což se potvrdilo, neboť autor naměřil hodnoty rezistivity okolo 250 Ωm. Naopak hodnoty naměřené rezistivity od sloupu 14 blíže ke sloupu 15 klesají, a to k hodnotám okolo 100 – 50 Ωm.



Obrázek 5.12 Plošné měření rezistivity půdy pro vzdálenost a = 3 m [9]

Na obrázku (5.12) jsou znázorněny hodnoty rezistivity půdy naměřené pro vzdálenost elektrod a = 3 m ve vybrané lokalitě plošného měření. Autor naměřil nejvyšší hodnoty rezistivity půdy okolo sloupu 14. Proměnlivost hodnot rezistivity oproti předešle uvedenému měření pro vzdálenost a = 1 m je dle názoru autora dána např. větším rozestupem elektrod od sebe, a tudíž i měřením v hlubší vrstvě půdy této oblasti, anebo změnou složení půdy v daném místě.

Plošné měření probíhalo na rozloze 80 x 40 m v různorodém terénu, v lese, na mýtině, v křoví. Z pohledu autora se jednalo o velmi zajímavé měření z důvodu proměnlivosti naměřených hodnot. Nejvyšší hodnoty rezistivity půdy byly naměřeny v prostředním pásu plochy, tvořícím mýtinu, který je evidentní z obrázku (5.12). V této části tvořila podloží zejm. navezená stavební suť. V levém horním rohu na obrázku plošného měření (5.12) se ve skutečnosti nachází úzká cesta, kde je úrodná půda a hodnota rezistivity se zde pohybovala v nižších hodnotách.

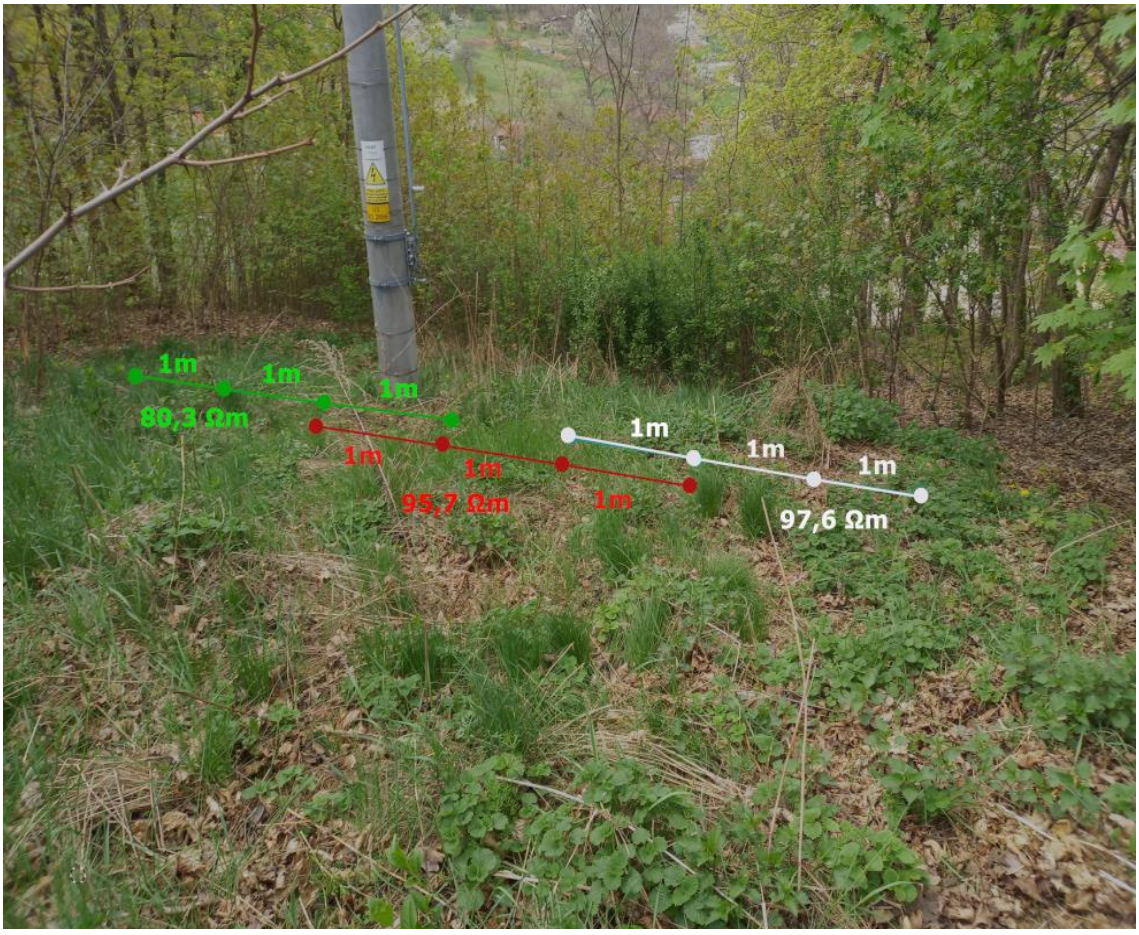
V pravých rozích obou obrázků (5.11 a 5.12) je uvedena legenda pro lepší orientaci čtenáře dle barevných bodů, značících škálu hodnot proměnlivosti rezistivity půdy v této oblasti.

5.4 Měření odporu zemničů

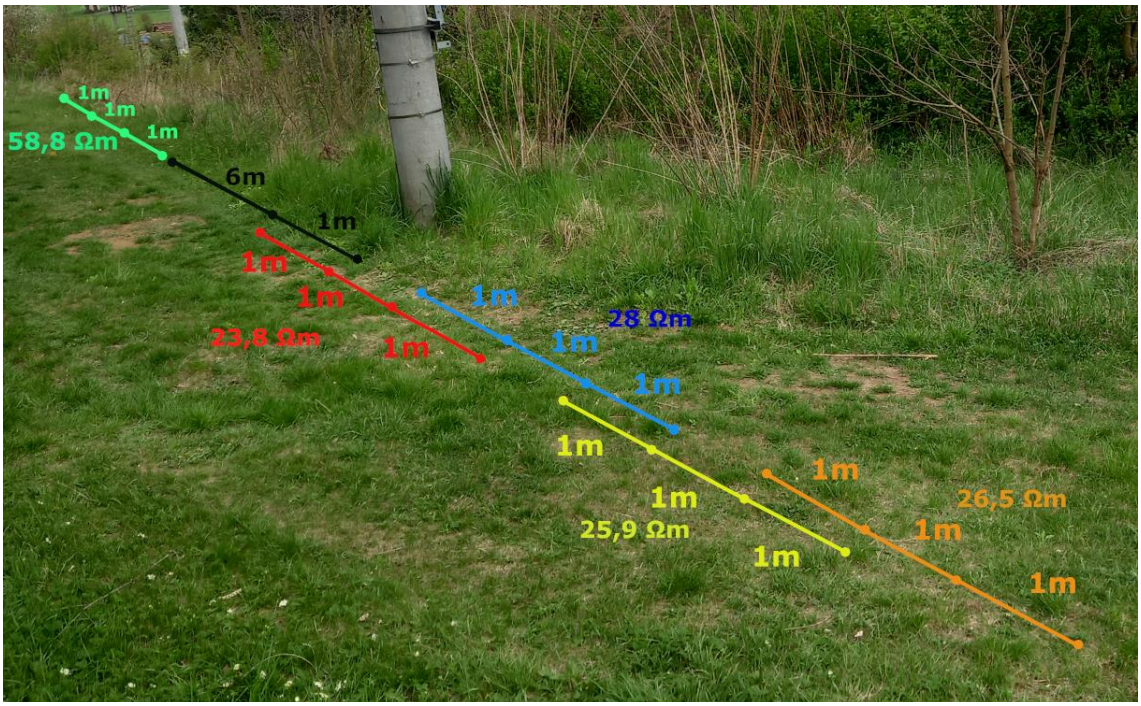
5.4.1 Měření rezistivity půdy u odpojovačů pro účely měření odporu zemničů

Pro měření odporu zemničů byla využita stejná trasa vedení VN, jako při měření rezistivity půdy, konkrétně byly měřeny odpory zemničů u odpojovačů 1, 2 a 3, jejichž poloha je znázorněna na obrázcích (5.7 a 5.8). Odpojovač 1 se nachází na daných obrázcích mezi transformátorem a sloupem 1, odpojovač 2 se nachází mezi sloupem 11 a 13 a odpojovač 3 se nachází jako poslední na měřené trase, za sloupem 19. Měřením byl proveden průzkum ověření velikosti odporu uvedeného na štítku zemnícího pásku na každém z odpojovačů.

Před samotným měřením odporu zemničů všech tří odpojovačů, byla nejprve změřena rezistivita půdy v jejich okolí, naměřené hodnoty jsou vyneseny viz. obrázek (5.13, 5.14, 5.15). Měření bylo provedeno pro vzdálenost elektrod a = 1 m, a to z důvodu zjištění vodivosti půdy v okolí zemniče.

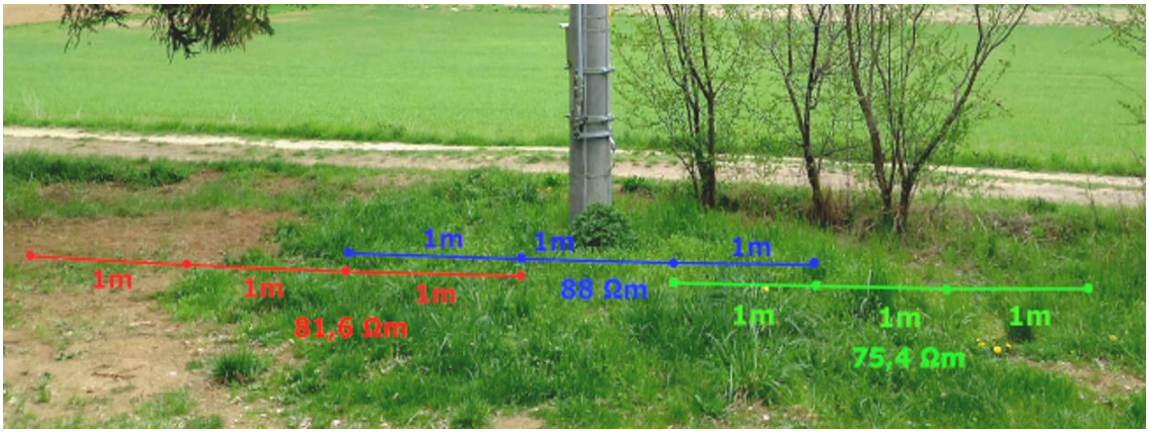


Obrázek 5.13 Měření rezistivity půdy u odpojovače 1 pro účely měření odporu zemniče



Obrázek 5.14 Měření rezistivity půdy u odpojovače 2 pro účely měření odporu zemniče

U odpojovače 2 na obrázku (5.14) byla naměřena rezistivita cca pětkrát menší než u odpojovače 1. Dle polohy obou odpojovačů lze usoudit, že podloží po celé trase je různorodé. V tomto případě i mírná změna složení půdy ovlivní hodnotu rezistivity. V tomto místě byla půda nejvíce vodivá ze všech bodů měření na měřené trase VN.

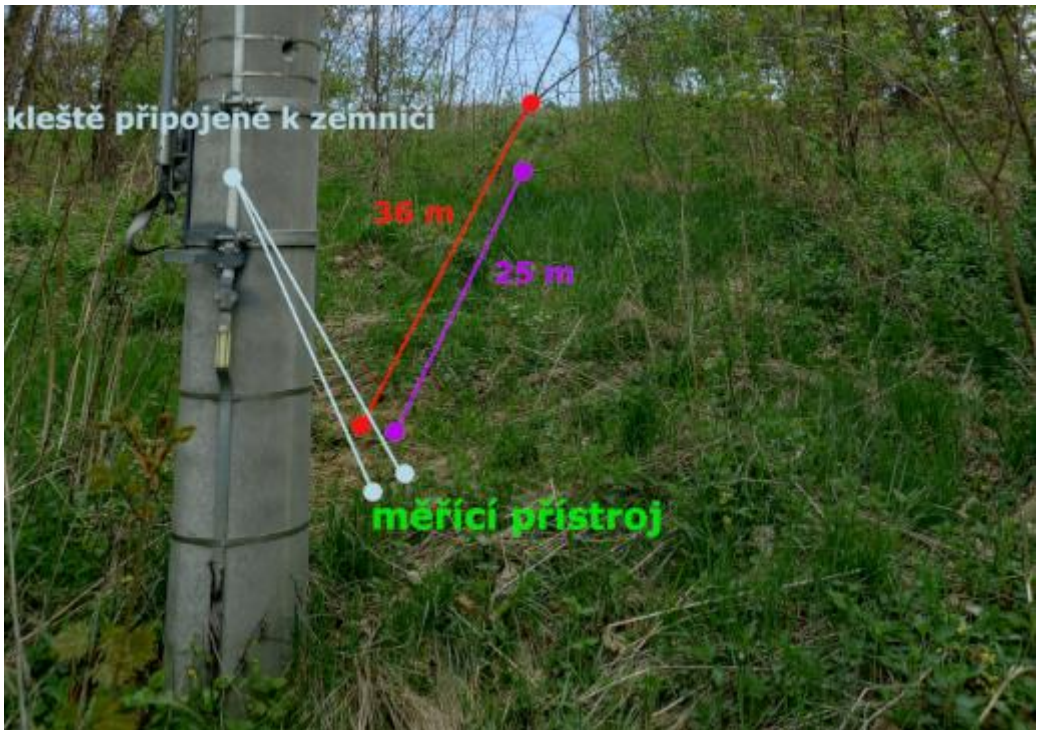


Obrázek 5.15 Měření rezistivity půdy u odpojovače 3 pro účely měření odporu zemniče

U odpojovače 3 se hodnota rezistivity půdy pohybovala v podobných hodnotách, jako u odpojovače 1. Po kontrolním změření rezistivity půdy u jednotlivých odpojovačů bylo provedeno měření odporu zemničů.

5.4.2 Měření odporu zemniče (odpojovač 1)

Na obrázku (5.16) je znázorněna ukázka měření odporu zemniče u odpojovače 1.



Obrázek 5.16 Měření odporu zemniče u odpojovače 1

Pro měření byl použit měřící přístroj PU 193 od výrobce Metra jako u měření na zahradě autora práce. Pro použití tohoto přístroje na dané měření je doporučená vzdálenost proudové elektrody 40 m od měřeného zemniče (viz. červená čára obrázek (5.16). Ve skutečnosti se však v místě měření (patrno z horní části obrázku 5.16) u proudové elektrody nacházel plot a vzdálenosti 40 m proudové elektrody od odpojovače nebylo možné při měření dosáhnout, z toho důvodu byla vzdálenost proudové elektrody pouze 36 m při vzdálenosti napěťové elektrody 25 m. Naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulce (5.9). Frekvence *f* je frekvence měřícího proudu.

Tabulka 5.9 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 1

***f* (Hz)**	***R_A* (Ω)**	**Napěťová el. (m)**	**Proudová el. (m)**
59	12,4	25	36
128	11,9	25	36
59	12,91	26,5	36
128	12,18	26,5	36
59	12,29	23,5	36
128	11,8	23,5	36
59	11,45	25 (o 90°doleva)	36
128	10,91	25 (o 90°doleva)	36

V tabulce (5.9) jsou uvedeny naměřené hodnoty odporů zemniče u odpojovače 1. Měření bylo prováděno ve čtyřech různých variantách, kdy byla napěťová elektroda umístěna ve vzdálenosti 25 m, poté 23,5 m a 26,5 m od odpojovače 1. U poslední varianty měření byla napěťová elektroda přesunuta o 90° doleva do vzdálenosti 25 m od odpojovače 1. Štítková hodnota odporu byla 10 Ω. Autor naměřil vyšší hodnoty, než bylo uvedeno na štítku, je ale nutné zdůraznit, že proudová elektroda nebyla umístěna ve vzdálenosti 40 m od zemniče z důvodu existence pevného plotu a během měření na přístroji svítila kontrolka, upozorňující na problém nedodržení předepsané vzdálenosti rozmístění elektrod. Autor se domnívá, že touto chybou nebyla naměřena hodnota uvedená na štítku.

5.4.3 Měření odporu zemniče (odpojovač 2)

Měření odpojovače 2 probíhalo stejným způsobem jako u odpojovače 1, ale proudová elektroda již byla umístěna náležitě ve vzdálenosti 40 m od zemniče. Místo, kde se fakticky nachází odpojovač 2, není možné graficky simulovat na obrázku z důvodu husté vegetace a špatné přístupnosti, z tohoto důvodu je k tomuto měření přiložena pouze následující tabulka naměřených hodnot (5.10).

Tabulka 5.10 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 2

f (Hz)	R_A (Ω)	Napěťová el. (m)	Proudová el. (m)
59	5,62	25	40
128	5,09	25	40
59	5,74	26,5	40
128	5,24	26,5	40
59	5,45	23,5	40
128	4,97	23,5	40
59	4,87	25 (o 180°doleva)	40
128	4,39	25 (o 180°doleva)	40

V tabulce (5.10) jsou uvedeny naměřené hodnoty odporů zemniče u odpojovače 2. Měření bylo provedeno ve čtyřech variantách. V tomto případě byla štítková hodnota odporu zemniče 5 Ω.

Všechny naměřené hodnoty se pohybovaly blízko hodnoty štítkové. Při daném měření měřící přístroj nevykazoval žádné upozornění na chybu. U odpojovače 2 byla autorem práce ověřena měřením štítková hodnota jako odpovídající.

5.4.4 Měření odporu zemniče (odpojovač 3)

Měření odpojovače 3 probíhalo stejným způsobem jako u odpojovače 2 viz. obrázek (5.17).

Obrázek 5.17 Měření odporu zemniče u odpojovače 3

Na obrázku (5.17) je znázorněno měření odporu zemniče u odpojovače 3. Tento odpojovač byl ze všech tří měřených odpojovačů nejlépe přístupný. Měření bylo prováděno stejně jako u předešlých odpojovačů, pouze se změnou umístění napěťové elektrody při 4. měření, kdy nebyla posunuta o 90° doleva, kvůli betonové ploše (jejíž existence se zábradlím je patrná z levé části obrázku (5.17), ale byla otočena o 180° do vzdálenosti 25 m ve směru fotografa obrázku (5.17). Naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulce (5.11).

Tabulka 5.11 Naměřené hodnoty odporů u odpojovače 3

f **(Hz)**	R_A **(Ω)**	**Napěťová el. (m)**	**proudová el. (m)**
59	7,13	25	40
128	6,7	25	40
59	7,15	26,5	40
128	6,73	26,5	40
59	7,16	23,5	40
128	6,69	23,5	40
59	6,96	25 (o 180°)	40
128	6,52	25 (o 180°)	40

V tabulce (5.11) jsou uvedeny hodnoty odporů zemniče u odpojovače 3. Měření bylo opakováno pro čtyři různé pozice napěťové elektrody, stejně jako u odpojovače 1 a 2. V tomto případě byla štítková hodnota zemniče na odpojovači 7 Ω.

Všechny změřené hodnoty se pohybovaly blízko hodnoty štítkové. Ani v tomto případě nebyl žádný problém s chybnou kontrolkou na přístroji. U odpojovače 3 autor rovněž ověřil jeho štítkovou hodnotu za adekvátní.

6. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala měřením rezistivity půdy a odporu zemniče. Teoretická část byla primárně zaměřena na vysvětlení pojmu rezistivita půdy a na popis měřících metod používaných k měření rezistivity půdy a odporu zemniče. Autor věnoval pozornost zejména popisu Wennerovy metody, jíž využil při svém praktickém měření v terénu přístrojem PU 193. Podstatu jeho fungování popsal autor čtenáři v samostatné kapitole.

Praktická měření byla rozdělena do několika částí. V první části bylo realizováno měření rezistivity půdy na zahradě autora práce. Ve druhé části bylo realizováno měření rezistivity půdy v okolí sloupů vedení vysokého napětí na zvolené trase mezi obcemi Silůvky a Prštice. Ve třetí části práce se autor zaměřil na návrh zemničů pro sloupy VN 1,13, a 19, u nichž naměřené hodnoty rezistivity byly z celé trasy vedení nejvíce rozdílné. Při prvotním měření rezistivity v okolí sloupů vysokého napětí byla autorem práce naměřena nečekaně vysoká rezistivita půdy v řádech stovek Ωm kolem sloupů 13 až 14. Z toho důvodu byla oblast v jejich blízkosti vybrána pro detailní plošné měření rezistivity půdy, které bylo realizováno ve čtvrté části. Poslední část práce prezentuje autorovo měření odporů zemničů u odpojovačů VN.

Výsledky celoročního měření rezistivity půdy na zahradě autora práce ukázaly malou proměnlivost naměřených hodnot rezistivity. Autor vyvodil, že to bylo způsobeno vlivem převládajícího sucha nad počtem srážek v průběhu roku. Výsledné hodnoty na obě měřené vzdálenosti rozmístěných elektrod se lišily při dané proměnlivosti počasí v řádech jednotek až desítek Ωm. Nejvyšší pokles naměřených hodnot rezistivity byl zaznamenán v zimním období, což dle autora koresponduje s nejvyšší četností deštivých a sněhových srážek a s nejvyšší vlhkostí půdy v daném období během celého roku měření. Z provedeného měření rezistivity v zimních měsících lze konstatovat, že bylo dosaženo teoretického předpokladu, že s vyšší vlhkostí půdy rezistivita klesá.

Výsledky měření rezistivity u sloupů VN byly specifické rovněž dle nesourodého složení podloží v okolí sloupů. Naměřené hodnoty rezistivity půdy pro vzdálenost elektrod 1 m byly vyšší než pro vzdálenost 3 m. Autor se domnívá, že tato skutečnost mohla být způsobena měřením v blízkosti betonových podstavců sloupů VN při kratší vzdálenosti elektrod, naopak při větší vzdálenosti měření probíhalo v silnější vrstvě celistvé půdy. Při měření rezistivity půdy u odpojovačů autor vyvodil další faktor, který může měření ovlivnit, a tím je přítomnost zemničů v půdě. Na trase vedení sloupů VN se naměřené hodnoty pohybovaly v desítkách Ωm.

V další části práce se autor věnoval výpočtu odporů zemničů a jejich návrhu pro vybrané sloupy z měřené trasy VN. Autor navrhl velikost a počet celkem tří zemničů pro tři sloupy VN dle naměřených hodnot rezistivity půdy v jejich okolí. V případě vodivé půdy u sloupu 19 autor navrhl dva kruhové zemniče, u vyšší rezistivity půdy u sloupu 1 byl navržen zemnič s třemi kruhy, u sloupu 13 s nejvyšší rezistivitou doporučil kombinaci zemniče se třemi kruhy a dvěma paprsky. Autor v závěru svojí práce polemizuje nad tím,

zda by nebylo přínosnější v okolí sloupů s nejvyšší rezistivitou navézt vodivější půdu a tím snížit velikost a počet navržených zemničů, v závislosti na skutečnosti, že vodivá půda má nízkou rezistivitu. Autorovy návrhy zemničů byly následně ověřeny pomocí křivek dovoleného dotykového napětí dle normy ČSN 50522 jako vyhovující

Při plošném měření rezistivity se autor zaměřil na oblast bývalé nelegální skládky odpadů mezi sloupy 13 a 14. Z výsledků plošného měření rezistivity půdy pro obě vzdálenosti lze vyvodit předpoklad výrazné různorodosti složení půdy v dané lokalitě. Hodnoty rezistivity se v rozdílných místech měření, vyskytujících se nedaleko od sebe, pohybovaly kolísavě od desítek Ωm až po jednotky tisíců Ωm.

Cílem měření odporů zemničů bylo ověřit štítkové hodnoty odporů uvedené na zemničích u odpojovačů VN. U jednotlivých odpojovačů bylo autorem provedeno více kontrolních měření odporu zemniče s rozdílnou vzdáleností napěťové elektrody. U odpojovačů 2 a 3 byly naměřeny hodnoty odporů jejich zemničů v takřka totožné výši jako na štítcích. U odpojovače 1 byly naměřeny hodnoty vyšší než na jeho štítku, pravděpodobně z důvodu chybného měření na straně autora, které spočívalo v umístění proudové elektrody na kratší vzdálenost od odpojovače, než bylo přístrojem požadováno, a to z důvodu existence pevného plotu v blízkosti odpojovače a nemožnosti elektrodu umístit do požadované vzdálenosti.

Autor se zabýval rovněž vhodností použití přepočítávacího koeficientu K. Poukázal na skutečnost, že jeho nevhodným zvolením může dojít např. k předimenzování zemniče. Tyto poznatky pouze potvrzují pravidlo, že zamýšlené měření je třeba vždy důkladně zvážit po stránce teoretické a následně jej provést s důrazem na přesnost a vyvarování se chyb. Závěrem autor vyvozuje, že měření rezistivity půdy je z hlediska praktické využitelnosti naměřených dat nenahraditelným a významným postupem zejména při navrhování zemničů.

Zpracování této práce bylo pro autora nemalým přínosem a dobrou zkušeností, kterou si rozšířil povědomí o existenci rezistivity půdy, o faktorech, které ji ovlivňují a zároveň si mohl osvojit práci s měřícím přístrojem PU 193 od výrobce Metra v praxi.

LITERATURA

[1] *PNE 33 3300-1: Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn*: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie. 2017.

[2] *PNE 33 0000-1: Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě*: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie. 6. vydání.2017.

[3] OSOLSOBĚ, Jan a Mirko ZAPLETAL. *Zemnění a bezpečnost*. Praha: ČSAV, 1964.

[4] IEEE STD 81 -2012. *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, USA: IEEE Power and Energy Society. 2012, [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/6392181

[5] DAWALIBI, F. *Transmission-line grounding. Volume 1*. Final report.: Simulations using LINPA, PATHS, or GTOWER computer codes [online]. 1982, 452s [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://www.osti.gov/biblio/6675778

[6] Metra Blansko PU 193. *Návod k používání: Měření zemních odporů.* [online]. 2005, 18 s [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://www.revizeshop.cz/fotky29448/fotov/_ps_83Pristroje_pro_revize_a_telekomunikace-NPU193-web.pdf

[7] *TEM Electronic Components: Měření izolačního odporu a odporu uzemnění* [online]. [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/43423/mereni-izolacniho-odporu-a-odporu-uzemneni-zjistete-jak-zmerit-odpor-uzemneni/

[8] *ELVA elektorevize* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://www.revize-instalaci.cz/revize-elektro/mereni-odporu-zemnice-a-rezistivity-pudy/

[9] In: *Mapy.cz* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://mapy.cz/zakladni?x=16.7532056&y=48.6953527&z=7

[10] *PNE 33 0000-4: Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie. 4. vydání.2018.

[11] *ČSN EN 50522: Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV*. Český normalizační institut, 2011.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

A	ampérmetr
E	proudová elektroda/zemnič
ES	napěťová elektroda/pomocný zemnič
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
H	proudová elektroda/pomocná proudová elektroda
PE	uzemňovací vodič
PEN	ochranný vodič
S	napěťová elektroda/pomocná napěťová elektroda
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VN	vysoké napětí

Symboly:

a	vzdálenost elektrod/sond	(m)
a/h	poměr vzdálenosti a hloubky elektrod/sond	(-)
b	vzdálenost elektrod/sond	(m)
d	průměr	(mm)
D	průměr	(m)
dR/dl	gradient odporu	(-)
f	frekvence	(Hz)
h	hloubka	(m)
I	proud	(A)
I	proud na ampérmetru	(A)
K	násobící součinitel rezistivity daného období	(-)
l	délka vodiče/tyče	(m)
n	konfigurační koeficient	(-)
R	odpor	(Ω)
R_A	odpor zemniče	(Ω)
S	průřez	(m^2)
U	napětí	(V)
Uk	konstantní napětí	(V)
Us	rušivé napětí	(V)
ΣI	suma všech proudů ampérmetru	(A)
π	Ludolfovo číslo	
ρ	rezistivita půdy	(Ωm)
ρ_1	rezistivita horní vrstvy půdy	(Ωm)
ρ_2	rezistivita spodní vrstvy půdy	(Ωm)
ρ_m	měrný odpor půdy	(Ωm)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY (ZAHRADA) 60

PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY S PŘEPOČTEM K 62

PŘÍLOHA C - VYBAVENÍ PRO PROVEDENÁ MĚŘENÍ 66

Příloha A - Naměřené hodnoty (zahrada)

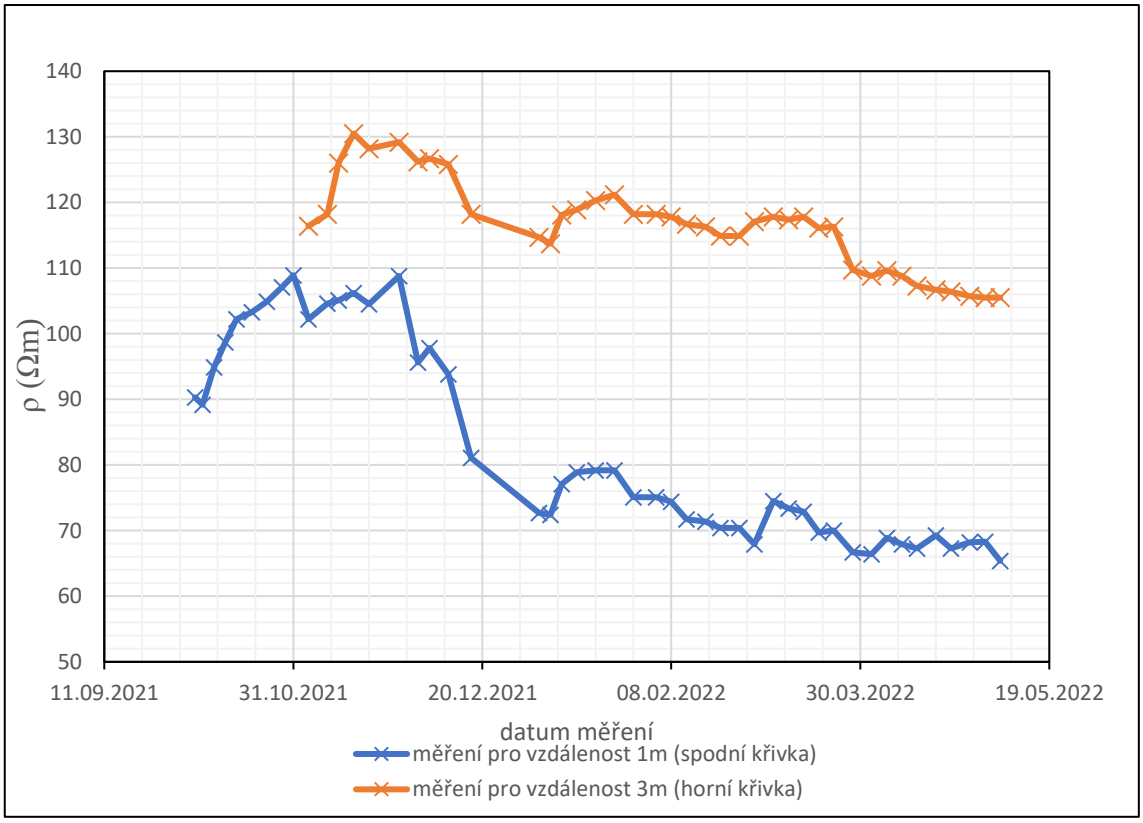
A.1 Tabulka naměřených hodnot část 1.

	***a*=1 m**	***a*=3 m**	
Datum:	**ρ (Ωm)**	**ρ (Ωm)**	**počasí:**
05.10.2021	90,3	-	slunečno/sucho
07.10.2021	89,2	-	po dešti
10.10.2021	94,9	-	mokrá půda
13.10.2021	98,7	-	suchá půda
16.10.2021	102,2	-	suchá půda
20.10.2021	103,3	-	suchá půda
24.10.2021	104,9	-	suchá půda
28.10.2021	107,1	-	suchá půda
31.10.2021	108,9	-	suchá půda
04.11.2021	102,2	116,4	po dešti
09.11.2021	104,6	118,2	suchá půda
12.11.2021	105,1	126,0	mrholení
16.11.2021	106,2	130,5	suchá půda
20.11.2021	104,5	128,2	mrholení
28.11.2021	108,8	129,2	sněžení
03.12.2021	95,6	126,2	po roztání sněhu
06.12.2021	97,8	126,7	tání sněhu
11.12.2021	93,8	125,8	sněžení
17.12.2021	81,1	118,2	tání sněhu
04.01.2022	72,7	114,7	tání sněhu
07.01.2022	72,4	113,7	déšť
10.01.2022	77,1	118,1	mráz
14.01.2022	78,9	118,9	mráz
19.01.2022	79,2	120,3	mráz
24.01.2022	79,2	121,2	mráz
29.01.2022	75,1	118,2	sníh
04.02.2022	75,1	118,2	sníh
08.02.2022	74,4	117,8	přeháňky
12.02.2022	71,7	116,7	slunečno
17.02.2022	71,4	116,3	slunečno
21.02.2022	70,4	114,9	slunečno
26.02.2022	70,4	114,9	slunečno
02.03.2022	67,9	117,1	slunečno
07.03.2022	74,5	117,8	slunečno
11.03.2022	73,4	117,4	slunečno

A.2 Tabulka naměřených hodnot část 2.

	a=1 m	*a*=3 m	
Datum:	**ρ (Ωm)**	**ρ (Ωm)**	**počasí:**
15.03.2022	72,9	117,8	slunečno
19.03.2022	69,7	116,1	déšť
23.03.2022	70,0	116,3	slunečno
28.03.2022	66,7	109,7	slunečno
02.04.2022	66,4	108,8	slunečno
06.04.2022	68,9	109,6	slunečno
10.04.2022	67,9	108,8	déšť
14.04.2022	67,3	107,3	déšť
19.04.2022	69,3	106,7	déšť
23.04.2022	67,3	106,4	slunečno
28.04.2022	68,2	105,7	slunečno
02.05.2022	68,3	105,5	déšť
06.05.2022	65,4	105,5	déšť

A.3 Graf naměřených hodnot (průběhy bez grafiky počasí)



Příloha B - Naměřené hodnoty s přepočtem K

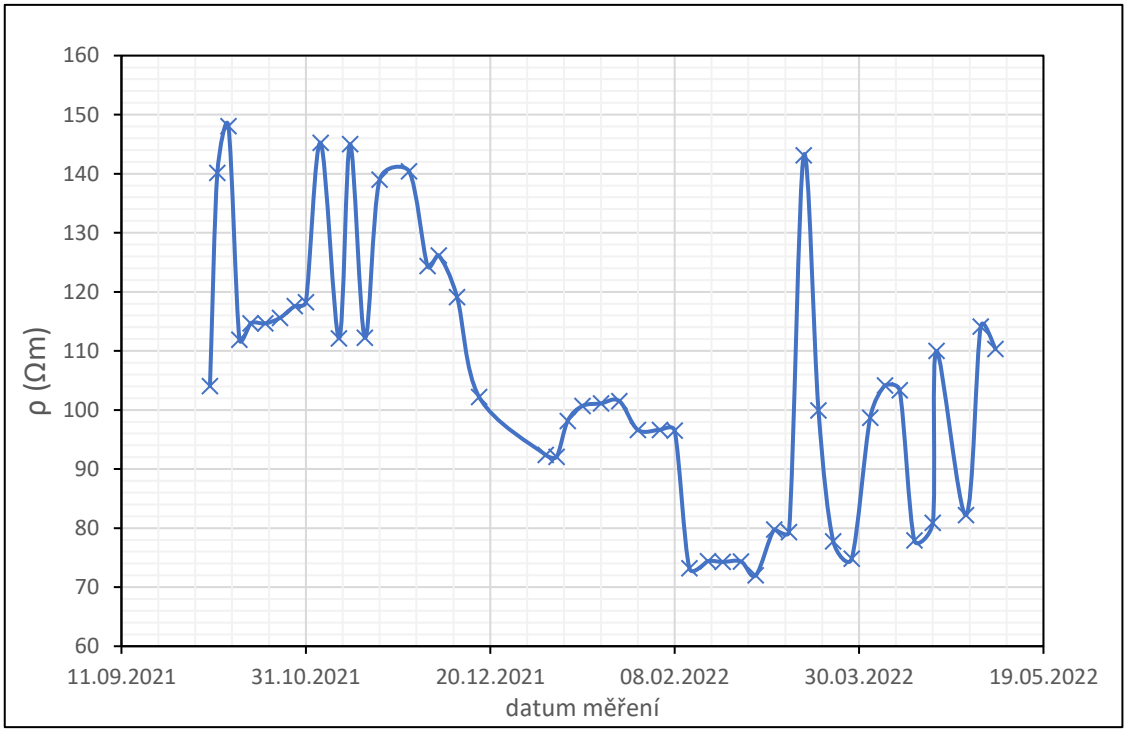
B.3 Tabulka naměřených hodnot část 1(a= 1 m)

datum	sucho1, mokro 2	ρ_z (Ωm)	K (-)	ρ_p (Ωm)
05.10.2021	1	90,3	1,152	104,026
07.10.2021	2	89,2	1,571	140,133
10.10.2021	2	94,9	1,560	148,044
13.10.2021	1	98,7	1,134	111,926
16.10.2021	1	102,2	1,122	114,668
20.10.2021	1	103,3	1,110	114,663
24.10.2021	1	104,9	1,102	115,600
28.10.2021	1	107,1	1,098	117,596
31.10.2021	1	108,9	1,086	118,265
04.11.2021	2	102,2	1,421	145,226
09.11.2021	1	104,6	1,072	112,131
12.11.2021	2	105,1	1,380	145,038
16.11.2021	1	106,2	1,057	112,253
20.11.2021	2	104,5	1,330	138,985
28.11.2021	2	107,1	1,311	140,408
03.12.2021	2	95,6	1,301	124,376
06.12.2021	2	97,8	1,290	126,162
11.12.2021	2	93,8	1,270	119,126
17.12.2021	2	81,1	1,260	102,186
04.01.2022	2	72,7	1,271	92,402
07.01.2022	2	72,4	1,272	92,057
10.01.2022	2	77,1	1,273	98,148
14.01.2022	2	78,9	1,276	100,676
19.01.2022	2	79,2	1,277	101,107
24.01.2022	2	79,2	1,282	101,511
29.01.2022	2	75,1	1,287	96,639
04.02.2022	2	75,1	1,287	96,639
08.02.2022	2	74,4	1,297	96,489
12.02.2022	1	71,7	1,021	73,206
17.02.2022	1	71,4	1,042	74,399
21.02.2022	1	70,4	1,055	74,272
26.02.2022	1	70,4	1,056	74,342
02.03.2022	1	67,9	1,061	72,015
07.03.2022	1	74,5	1,071	79,775
11.03.2022	1	73,4	1,081	79,345
15.03.2022	1	72,9	1,963	143,103
19.03.2022	2	69,7	1,434	99,950
23.03.2022	1	70,0	1,111	77,770

B.4 Tabulka naměřených hodnot část 2 (a= 1 m)

datum	sucho1, mokro 2	ρ_z (Ωm)	K (-)	ρ_p (Ωm)
28.03.2022	1	66,7	1,122	74,824
02.04.2022	2	66,4	1,486	98,664
06.04.2022	2	68,9	1,512	104,142
10.04.2022	2	67,9	1,522	103,337
14.04.2022	1	67,3	1,158	77,900
19.04.2022	1	69,3	1,168	80,922
20.04.2022	2	67,3	1,634	109,982
28.04.2022	1	68,2	1,206	82,215
02.05.2022	2	68,3	1,671	114,109
06.05.2022	2	65,4	1,687	110,323

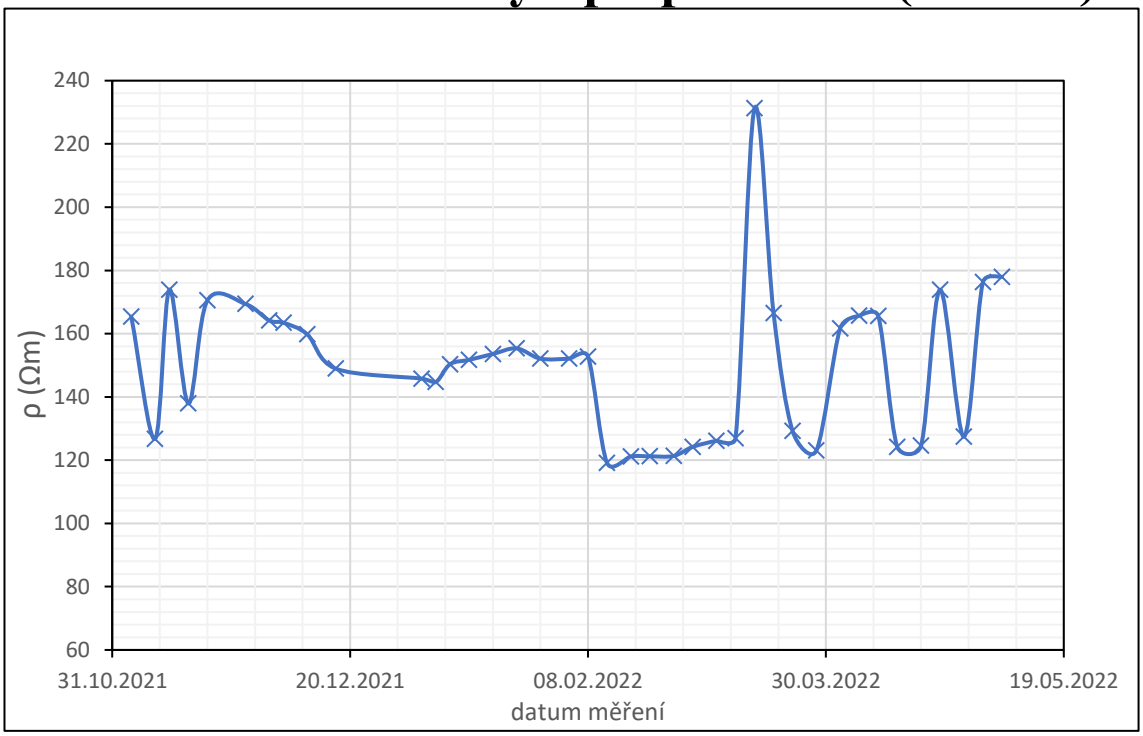
B.5 Naměřené hodnoty s přepočtem K (a = 1 m)



B.6 Tabulka naměřených hodnot část 1(a= 3 m)

datum	sucho1, mokro 2	ρ_z (Ωm)	K (-)	ρ_p (Ωm)
04.11.2021	2	116,4	1,421	165,404
09.11.2021	1	118,2	1,072	126,710
12.11.2021	2	126,0	1,380	173,880
16.11.2021	1	130,5	1,057	137,939
20.11.2021	2	128,2	1,330	170,506
28.11.2021	2	129,2	1,311	169,381
03.12.2021	2	126,2	1,301	164,186
06.12.2021	2	126,7	1,290	163,443
11.12.2021	2	125,8	1,270	159,766
17.12.2021	2	118,2	1,260	148,932
04.01.2022	2	114,7	1,271	145,784
07.01.2022	2	113,8	1,272	144,697
10.01.2022	2	118,1	1,273	150,341
14.01.2022	2	118,9	1,276	151,716
19.01.2022	2	120,3	1,277	153,575
24.01.2022	2	121,2	1,282	155,342
29.01.2022	2	118,2	1,287	152,100
04.02.2022	2	118,2	1,287	152,100
08.02.2022	2	117,8	1,297	152,775
12.02.2022	1	116,7	1,021	119,151
17.02.2022	1	116,3	1,042	121,185
21.02.2022	1	114,9	1,055	121,220
26.02.2022	1	114,9	1,056	121,334
02.03.2022	1	117,1	1,061	124,196
07.03.2022	1	117,8	1,071	126,140
11.03.2022	1	117,4	1,081	126,909
15.03.2022	1	117,8	1,963	231,241
19.03.2022	2	116,1	1,434	166,487
23.03.2022	1	116,3	1,111	129,209
28.03.2022	1	109,7	1,122	123,061
02.04.2022	2	108,8	1,486	161,666
06.04.2022	2	109,6	1,512	165,660
10.04.2022	2	108,8	1,522	165,583
14.04.2022	1	107,3	1,158	124,200
19.04.2022	1	106,7	1,168	124,594
23.04.2022	2	106,4	1,634	173,879
28.04.2022	1	105,7	1,206	127,421
02.05.2022	2	105,5	1,671	176,259
06.05.2022	2	105,5	1,687	177,968

B.7 Naměřené hodnoty s přepočtem K (a = 3 m)



Příloha C - Vybavení pro provedená měření

- Dlouhé dráty pro měření na určité vzdálenosti
- Kladivo
- Svinovací metr a pásmo
- Poznámkový blok na zapisování naměřených hodnot
- Velké kleště k vytahování elektrod
- 4x elektrody k měření
- Sekera a mačeta k případnému odstranění keřů v místě měření