

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Štefan Dirbák



# 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

# NÁVRH A REALIZACE PLOŠNÉHO MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE SOIL RESISTIVITY MEASUREMENT SYSTEM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Štefan Dirbák**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Michal Vrána**

**BRNO 2020**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Štefan Dirbák

**ID:** 173633

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh a realizace plošného měření rezistivity půdy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Rešerše a studium problematiky měření zemní impedance a rezistivity půdy.
2. Návrh a realizace měřicího a vyhodnocovacího systému.
3. Ověření navrhnutého řešení reálným měřením s vyhodnocením výsledků.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 18.5.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Vrána

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Táto diplomová práca sa zaoberá rešeršou a štúdiom problematiky merania zemnej impedancie a rezistivity pôdy. V súčasnosti je problematika merania a určovanie rezistivity pôdy zabezpečovaná prostredníctvom postupného merania určitých parametrov pôdy v jednotlivých bodoch plochy (prípadne hĺbky zeme). Táto práca je zameraná na myšlienku merania rezistivity pôdy na určitej ploche pomocou siete elektród prostredníctvom vhodne navrhnutého testovacieho, meracieho a vyhodnocovacieho systému. Takýto prístup môže nájsť uplatnenie pri potrebe determinovania parametrov pôdy (ako napr. rezistivity) na konkrétnej vymedzenej ploche (prípadne hĺbke). Perspektívu takejto aplikácie môžeme vidieť v šetrení času, energie a v neposlednom rade i financií potrebných na uskutočnenie merania rezistivity pôdy určitej plochy (oproti postupnému bodovému meraniu). Pre návrh a realizáciu meracieho systému pre spomínaný účel boli využité konfiguračné možnosti meracieho prístroja OMICRON CPC 100. Práca je zavŕšená overením navrhnutého riešenia reálnym meraním s vyhodnotením výsledkov.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

charakteristika pôdy, CPC 100, EUROTTEST 61557, homogenita pôdy, impedancia pôdy, korekcia rezistivity, modely pôdy, OMIRON Primary Test Manager, plošné meranie, potenciál elektródy, rezistivita pôdy, Schlumbergerova metóda, typické hodnoty rezistivity, Wennerova metóda

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with research and study of soil impedance measurement and soil resistivity. Currently, the issue of measuring and determining soil resistance is ensured through the gradual measurement of certain soil parameters at individual points of the surface (or depth of the ground). This thesis focuses on the idea of measuring soil resistance on a certain area using a network of electrodes through a suitably designed test, measurement and evaluation system. Such an approach may find application in the need to determine soil parameters (such as resistivity) on a specific demarcated area (or depth). The prospect of such an application can be seen in saving time, energy and money needed to measure the soil resistivity of a certain area (as opposed to gradual point measurements). The configuration possibilities of OMICRON CPC 100 measuring instrument were used for the design and implementation of the measuring system for the mentioned purpose. The work is completed by verification of the proposed solution by real measurement with evaluation of the results.

## **KEYWORDS**

soil characteristics, CPC 100, EUROTTEST 61557, soil homogeneity, soil impedance, resistance correction, soil models, OMIRON Primary Test Manager, area measurement, electrode potential, soil resistivity, Schlumberger method, typical resistance values, Wenner method

DIRBÁK, Štefan. *Návrh a realizácia plošného merania rezistivity pôdy*. Brno, 2020, 112 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedúci práce: Ing. Michal Vrána

## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Návrh a realizácia plošného merania rezistivity pôdy“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Michalovi Vránovi, za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci a taktiež pánovi Ing. Václavovi Vyčítalovi, za konzultácie, trpezlivosť a umožnenie merania rezistivity.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>ÚVOD</b>	<b>16</b>
<b>1 Charakteristika pôdy</b>	<b>17</b>
1.1 Skladba pôdy . . . . .	17
<b>2 Rezistivita pôdy</b>	<b>19</b>
2.1 Definícia rezistivity pôdy . . . . .	19
2.2 Účel merania rezistivity pôdy . . . . .	20
2.3 Faktory ovplyvňujúce hodnotu rezistivity pôdy . . . . .	23
2.3.1 Vplyv vody na rezistivitu pôdy . . . . .	23
2.3.2 Vplyv teploty (mrazu) na rezistivitu pôdy . . . . .	26
2.3.3 Vplyv obdobia (mesiaca) v roku na rezistivitu pôdy . . . . .	27
2.4 Typické hodnoty rezistivity pôdy . . . . .	28
<b>3 Metódy pre meranie rezistivity pôdy</b>	<b>30</b>
3.1 Wennerova metóda . . . . .	30
3.1.1 Princíp metódy . . . . .	30
3.1.2 Korekcia rezistivity pôdy na ročné obdobie . . . . .	35
3.2 Schlumbergerova metóda . . . . .	37
3.2.1 Princíp metódy . . . . .	37
3.2.2 Prepočítavací koeficient . . . . .	38
3.2.3 Presnosť merania rezistivity pôdy . . . . .	39
<b>4 Horizontálne modely pôdy</b>	<b>40</b>
4.1 Jednovrstvový model . . . . .	40
4.2 Dvojvrstvový model . . . . .	40
4.3 Viacvrstvový model . . . . .	42
<b>5 Krokové a dotykové napätie</b>	<b>43</b>
5.1 Definícia krokového napätia . . . . .	43
5.2 Výpočet krokového napätia . . . . .	43
5.3 Definícia dotykového napätia . . . . .	45
<b>6 Meracie prístroje</b>	<b>46</b>
6.1 METREL - EUROTTEST 61557 . . . . .	46
6.1.1 Obsluha prístroja - ovládanie . . . . .	47
6.1.2 Technické parametre . . . . .	49
6.2 OMICRON - CPC 100 . . . . .	50

6.2.1	Odvetvia použitia . . . . .	51
6.2.2	Meranie rezistivity pôdy s CPC 100 (Wennerova metóda) . . .	51
6.2.3	Manuálna obsluha CPC 100 a možnosti automatizácie . . . . .	54
6.2.4	Popis rozhraní prístroja CPC 100 . . . . .	60
6.2.5	Bezpečnostné pokyny pre použitie OMICRON CPC 100 . . . . .	64
6.2.6	Porovnanie prístrojov CPC 100 a EUROTTEST 61557 . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Návrh a realizácia systému</b>	<b>66</b>
7.1	Ovládanie prístroja CPC 100 . . . . .	66
7.2	Ovládanie elektród . . . . .	67
7.3	Voľba platformy . . . . .	69
7.3.1	Vlastnosti dosky Arduino Mega 2560 rev3 . . . . .	70
7.3.2	Rozšírenie dostupných digitálnych výstupov použitej dosky . . .	71
7.4	Voľba spôsobu konektivity a ovládania platformy . . . . .	73
7.4.1	SW riešenie - tvorba a opis aplikácie . . . . .	74
7.5	Programovanie zariadenia . . . . .	78
7.6	Vyhotovené zariadenie . . . . .	79
7.6.1	Schéma zapojenia výrobku k prístroju CPC 100 . . . . .	80
7.6.2	Binárne svorky . . . . .	81
7.6.3	Napájanie . . . . .	81
7.6.4	Pohľad na súčiastky zariadenia . . . . .	82
7.6.5	Uzemnenie prístroja . . . . .	82
7.7	Vyhodnocovací systém . . . . .	83
7.7.1	Zobrazenie výsledkov bez "zvláštneho" programu . . . . .	83
7.7.2	SW program CPC Start Page . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Meranie rezistivity pôdy v teréne</b>	<b>86</b>
8.1	Všeobecné údaje o meraní . . . . .	86
8.1.1	Miesto realizácie . . . . .	86
8.1.2	Panujúce podmienky . . . . .	87
8.2	Výsledky z merania pre konkrétne rozmiestnenia . . . . .	87
8.2.1	Rozmiestnenie elektród: 1x16 (posun o štyri) . . . . .	88
8.2.2	Rozmiestnenie elektród: 1x16 (posun o jednu) . . . . .	89
8.2.3	Rozmiestnenie elektród: 2x8 . . . . .	90
8.2.4	Rozmiestnenie elektród: 4x4 . . . . .	91
8.3	Príklad výpočtu rezistivity pôdy . . . . .	94
8.4	Príklad výpočtu chyby merania . . . . .	95

<b>9</b>	<b>Výhody a nevýhody plošného merania</b>	<b>96</b>
9.1	Výhody . . . . .	96
9.2	Nevýhody . . . . .	96
<b>10</b>	<b>Záver</b>	<b>97</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>99</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>103</b>
<b>A</b>	<b>- Zoznam vybavenia pre plošné meranie</b>	<b>104</b>
<b>B</b>	<b>- Výkresy pre výrobu meracích elektród</b>	<b>105</b>
<b>C</b>	<b>- Vyhotovené meracie elektródy</b>	<b>107</b>
<b>D</b>	<b>- Kód nahraný do platformy</b>	<b>108</b>
<b>E</b>	<b>- Aplikácia „Electrode Control“</b>	<b>109</b>
<b>F</b>	<b>- Tabuľky stavov pre rôzne rozmiestnenia</b>	<b>110</b>
<b>G</b>	<b>- Uzemňovacia tyč pre vyhotovený prístroj</b>	<b>111</b>
<b>H</b>	<b>- Rozloženie elektród 4x4 v teréne</b>	<b>112</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	Trojuholník pre klasifikáciu rozličných typov pôdy [4] . . . . .	18
2.1	Schéma zapojenia pre stanovenie merného odporu pevnej látky [4] . .	20
2.2	Elektrické pole valcovej tyčovej elektródy uloženej vertikálne v zemi .	21
2.3	Závislosť merného odporu pôdy na vlhkosti pôdy [23] . . . . .	24
2.4	Zobrazenie pórového priestoru v hornine vyplneného vodou [4] . . . .	24
2.5	Priemerný ročný úhrn zrážok v ČR v rokoch 1981-2010 (podľa ČHMÚ)	25
2.6	Vplyv teploty na rezistivitu horniny [4]. . . . .	26
2.7	Graf vyjadrujúci zmenu merného odporu pôdy počas roka [2, 6] . . .	27
3.1	Schéma zapojenia mer. prístroja, elektród - Wennerova metóda [14] .	30
3.2	Závislosť strednej rezistivity pôdy od hĺbky, pre rôzne typy pôd [2, 23]	33
3.3	Rozloženie elektrického poľa v homogénnej pôde [2] . . . . .	34
3.4	Rozloženie elektrického poľa v nehomogénnej pôde [2] . . . . .	35
3.5	Charakteristika korekčného činiteľa v závislosti na ročnom období [1]	36
3.6	Schéma zapojenia mer. prístroja, elektród - Schlumbergerova metóda [2] . . . . .	37
4.1	Dvojvrstvový model pôdneho priestoru [23] . . . . .	41
4.2	Pole bodovej elektródy pre rôzne hodnoty pomerov rezistív vrstiev [2]	41
4.3	Viacvrstvový model pôdneho priestoru [28] . . . . .	42
5.1	Pologulová elektróda s vytekajúcim elektr. prúdom $I$ do zeme [14] . .	44
6.1	Predný panel prístroja EUROTTEST 61557 a jeho popis [30] . . . . .	47
6.2	Displej prístroja zobrazujúci záložku pre meranie rezistivity . . . . .	48
6.3	Displej prístroja zobrazujúci záložku pre nastavenie vzdialenosti sond	48
6.4	Pripojenie meracích káblov a sond k meraciemu prístroju [30] . . . . .	49
6.5	Príklad výsledku z merania rezistivity pôdy EUROTTEST 61557 . . . .	49
6.6	Predný panel prístroja CPC 100 a jeho popis [24] . . . . .	50
6.7	Schéma zapojenia, OMICRON CPC 100 - Wennerova metóda [24] . .	52
6.8	Bočný panel prístroja (vysokonapäťové a vysokoprúdové výstupy [24]	53
6.9	Karta s parametrami pre meranie rezistivity pôdy - CPC 100 [24] . .	54
6.10	Karta „Quick“ pre meranie definované užívateľom - CPC 100 [24] . .	56
6.11	Karta „Sequencer“ - CPC 100 [24] . . . . .	59
6.12	Ikona pre vyhodnotenie merania [24] . . . . .	60
6.13	ePC interface [24] . . . . .	61
6.14	Popis sériového rozhrania RS 232 [24] . . . . .	61
6.15	Popis konektoru pre externé bezpečnostné funkcie [24] . . . . .	62
6.16	Popis možností nastavenia pre spúšťač „trigger“ [24] . . . . .	63
6.17	Nastavenie prístroja pre deaktiváciu kontroly PE (uzemnenia) [24] . .	64
7.1	Principiálna schéma zapojenia relé pre štyri stavy meracej sondy . . .	68

7.2	Princip. sch. zapojenia relé pre všetky kombinácie stavov meracej sondy	69
7.3	16 kanálový relé modul použitý pri realizácii systému . . . . .	70
7.4	Originálne zariadenie - ARDUINO MEGA 2560 REV3 [12] . . . . .	71
7.5	Multiplexor 74HC4067 - vľavo a expandér PCF8574 - vpravo . . . . .	72
7.6	Prostredie aplikácie Electrode Control v 2.136 (úvod) . . . . .	76
7.7	Prostredie aplikácie „Aktivácia elektród užívateľom“ a) . . . . .	77
7.8	Prostredie aplikácie „Aktivácia elektród užívateľom“ b) . . . . .	77
7.9	Prostredie aplikácie „Automatické meranie“ . . . . .	78
7.10	Označenie jednotlivých relé meracích sond - elektród (EL1 až EL8) .	78
7.11	Označenie jednotlivých relé meracích sond - elektród (EL9 až EL16) .	79
7.12	Pohľad na vyhotovené zariadenie pre plošné meranie $\rho$ pôdy . . . . .	80
7.13	Schéma pripojenia výrobku k CPC 100 . . . . .	80
7.14	Pohľad na svorky pre pripojenie binárnych kontaktov nachádzajúcich sa na boku vyhotoveného prístroja . . . . .	81
7.15	Vnútorňý pohľad na súčiastky vyhotoveného zariadenia . . . . .	82
7.16	Vyhodnotenie pomocou text. editora . . . . .	83
7.17	Odkaz na tvorbu protokolu pomocou SW CPC Start Page . . . . .	84
7.18	Zjednodušená ukážka údajov z protokolu (CPC Start Page) . . . . .	84
7.19	Odkaz na tvorbu excel file loaderu . . . . .	85
7.20	Príklad šablóny v programe excel pre tvorbu vyhodnocovacieho systému	85
8.1	Poloha realizácie merania - označenie bodu pre EL1 . . . . .	87
8.2	Schéma rozmiestnenia elektród (Wenner - 1x16) . . . . .	88
8.3	Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (1x16) . . . . .	88
8.4	Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (1x16) . . . . .	89
8.5	Schéma výsledného rozmiestnenia elektród (Wenner - 2x8) . . . . .	90
8.6	Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (2x8) . . . . .	90
8.7	Schéma výsledného rozmiestnenia elektród (Wenner - 4x4) . . . . .	91
8.8	Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (4x4) . . . . .	92
B.1	Technický výkres č. 1 pre výrobu meracích sond (tyčí) . . . . .	105
B.2	Technický výkres č. 2 pre výrobu meracích sond (tyčí) . . . . .	106
C.1	Pohľad na vyhotovené tyče . . . . .	107
D.1	Ukážka časti kódu nahraného do platformy . . . . .	108
E.1	Ukážka blokov pri tvorbe aplikácie . . . . .	109
G.1	Uzemňovacia tyč vyhotoveného prístroja . . . . .	111
H.1	Rozloženie elektród pri prebiehajúcim meraní v teréne . . . . .	112

# Zoznam tabuliek

2.1	Rozsah stredných hodnôt rezistivity, pre daný charakter pôdy [1, 33] .	28
3.1	Veľkosť konfiguračného koeficientu $n$ v závislosti na pomere $a/h$ [2] .	31
3.2	Korekcia mernej rezistivity na základe ročného obdobia - prvá časť [9]	36
3.3	Korekcia mernej rezistivity na základe ročného obdobia - druhá časť [9]	36
3.4	Hodnoty prepočítavacieho koeficientu v závislosti na vzdialenostiach jednotlivých elektród od pomyselného stredu merania [3] . . . . .	39
6.1	Všeobecné technické parametre prístroja EUROTTEST 61557 [30] . . .	50
6.2	Porovnanie meracích prístrojov CPC 100 a EUROTTEST 61557 . . . .	65
7.1	Tabuľka stavov pre rozmiestnenie elektród v priamke - Wenner . . . .	67
7.2	Technická špecifikácia - ARDUINO MEGA 2560 REV3 [12] . . . . .	72
7.3	Dekódovacia tabuľka pre nastavenie adresy expandéru PCF8574 [34] .	73
F.1	Tabuľka stavov pre rozmiestnenie elektród v priamke - Wenner . . . .	110
F.2	Tabuľka stavov pre rozmiestnenie 2x8 - Wenner . . . . .	110
F.3	Tabuľka stavov pre rozmiestnenie 4x4 - Wenner . . . . .	110

# Zoznam veličín, symbolov a skratiek

<b>Skratka:</b>	<b>význam:</b>	<b>jednotka:</b>
<i>a</i>	Vzdialenosť dvoch susedných elektród	[m]
<i>AC</i>	Striedavá veličina	[-]
<i>APP</i>	Aplikácia	[-]
<i>BIN IN</i>	Binárne vstupy CPC 100 a vytvoreného zariadenia	[-]
<i>BP</i>	Blúdivé prúdy	[-]
<i>BT</i>	Bluetooth	[-]
<i>COM</i>	Spoločný kontakt relé	[-]
<i>C<sub>1</sub></i>	Prúdová elektróda č. 1	[-]
<i>C<sub>2</sub></i>	Prúdová elektróda č. 2	[-]
<i>ČHMÚ</i>	Český hydrometeorologický ústav	[-]
<i>DC</i>	Jednosmerná veličina	[-]
<i>DEC</i>	Decimálna (desiatková) sústava	[-]
<i>EL<sub>1</sub></i>	Označenie elektródy č. 1	[-]
<i>GND</i>	Potenciál zeme	[-]
<i>h</i>	Hĺbka zarazenia meracích elektród	[m]
<i>HEX</i>	Hexadecimálne (šestnástková) sústava	[-]
<i>h<sub>n</sub></i>	Hrúbka <i>n</i> -tej vertikálnej vrstvy	[m]
<i>HW</i>	Hardware	[-]
<i>i</i>	Vzdialenosť C1 a C2 od stredu merania	[m]
<i>ICSP</i>	Protokol pre sériové programovanie	[-]
<i>I<sub>RMS</sub></i>	Efektívna striedavého hodnota prúdu	[A]
<i>I2C</i>	Dvojžilová obojsmerná zbernica	[-]
<i>I+</i>	Kladný prúdový výstup	[-]
<i>I-</i>	Záporný prúdový výstup	[-]
<i>k</i>	Korekčný činiteľ	[-]
<i>l</i>	Dĺžka	[m]
<i>m</i>	Prepočítavací koeficient	[m]

<b><i>n</i></b>	Konfiguračný koeficient	[-]
<b><i>N</i></b>	Pracovný vodič	[-]
<b><i>NC</i></b>	Kontakt relé „Normal Close“	[-]
<b><i>NN</i></b>	Nízke napätie	[V]
<b><i>NO</i></b>	Kontakt relé „Normal Open“	[-]
<b><i>OS</i></b>	Operačný systém	[-]
<b><i>PC</i></b>	Počítač	[-]
<b><i>PE</i></b>	Uzemňovací vodič	[-]
<b><i>P<sub>1</sub></i></b>	Napätová elektróda č. 1	[-]
<b><i>P<sub>1.1</sub></i></b>	Označenie relé vo funkcií prepínača	[-]
<b><i>P<sub>2</sub></i></b>	Napätová elektróda č. 2	[-]
<b><i>R</i></b>	Elektrický odpor pôdy	[Ω]
<b><i>RC</i></b>	Obvod tvorený rezistorom a kondenzátorom	[-]
<b><i>R(f)</i></b>	Činná zložka impedancie (rezistencia)	[Ω]
<b><i>RJ 45</i></b>	Označenie typu sieťového konektoru	[-]
<b><i>S</i></b>	Prierez valca naplneného zeminou	[m <sup>2</sup> ]
<b><i>SMD</i></b>	Druh elektronických súčiastok	[-]
<b><i>SW</i></b>	Software	[-]
<b><i>TTL</i></b>	Štandard integrovaných obvodov	[-]
<b><i>u</i></b>	Vzdialenosť P1 a P2 od stredu merania	[m]
<b><i>U</i></b>	Elektrické napätie	[V]
<b><i>U<sub>dot</sub></i></b>	Dotykové napätie	[V]
<b><i>U<sub>k</sub></i></b>	Krokové napätie	[V]
<b><i>USB</i></b>	Univerzálna sériová zbernica	[-]
<b><i>U+</i></b>	Kladný napätový výstup	[-]
<b><i>U-</i></b>	Záporný napätový výstup	[-]
<b><i>V<sub>RMS</sub></i></b>	Efektívna hodnota striedavého napätia	[V]
<b><i>VYP</i></b>	Označenie relé vo funkcií vypínača	[-]
<b><i>x</i></b>	Vzdialenosť od objektu	[m]
<b><i>X(f)</i></b>	Jalová zložka impedancie (reaktancia)	[Ω]

<b><i>xml</i></b>	Prípona súboru typu <i>xml</i>	[-]
<b><i>xmt</i></b>	Prípona súboru typu <i>xmt</i>	[-]
<b><math>\gamma</math></b>	Merná vodivosť pôdy	[S.m <sup>-1</sup> ]
<b><math>\pi</math></b>	Ludolfovo číslo	[-]
<b><math>\rho</math></b>	Rezistivita ôdy	[ $\Omega$ .m]
<b><math>\rho_1</math></b>	Rezistivita povrchovej vrstvy pôdy	[ $\Omega$ .m]
<b><math>\rho_2</math></b>	Rezistivita spodnej vrstvy pôdy	[ $\Omega$ .m]
<b><math>\sigma</math></b>	Prúdová hustota	[A.m <sup>-2</sup> ]

# ÚVOD

Meranie elektrickej rezistivity pôdy môže byť vykonané za rôznymi účelmi. Veľkosť tejto fyzikálnej veličiny je kľúčová napr. pre návrh, realizáciu alebo rekonštrukciu uzemňovacieho systému. Úmyslom takto vytvoreného systému je zabezpečiť ochrannú a pracovnú funkciu. Požiadavky na ochrannú funkciu majú vždy prednosť [1]!

O problematike správneho návrhu uzemnenia bolo vydaných množstvo publikácií. Nie v každej sa však nachádzajú informácie o tzv. agresivite pôdy s ktorou je rezistivita spätá. Korózia v pôde prebieha elektrochemickým mechanizmom. Jej posudzovanie je však náročné, keďže zemina v ktorej sa vyšetřovaný prvok nachádza je často nehomogénna a s veľkým počtom ovplyvňujúcich činiteľov.

V určitom krátkom časovom intervale platí, že rezistivita pôdy je materiálovou konštantou. Toto tvrdenie je pravdivé len za určitých podmienok. V sledovanom čase sa nesmú meniť faktory ovplyvňujúce jej veľkosť. Nesmie sa meniť zloženie pôdy, klimatické podmienky (predovšetkým vlhkosť a teplota pôdy). Rezistivita pôdy je prevrátenou hodnotou mernej vodivosti pôdy. Z kontextu potom vyplýva, že čím vyššia je hodnota rezistivity pôdy, tým menšia je jej vodivosť. Pre meranie rezistivity pôdy sa používa niekoľko metód, ako napr. Schlumbergerova metóda, Owensova metóda, meranie priamo tyčou, meranie dlhou tyčou ale predovšetkým Wennerova metóda [2].

Pri meraní rezistivity pôdy je nevyhnutné dodržať určité bezpečnostno-technické právne predpisy, ktoré sú zhotovené príslušnými úradmi a vydávané vo forme technických noriem, vyhlášok a nariadení.

Cielom tejto práce je načrtnúť problematiku týkajúcu sa plošného merania rezistivity pôdy a najpoužívanejších metód, ktoré sa pre tento účel môžu využiť. Predovšetkým sa v práci nachádza podrobný popis návrhu a konštrukcie meracieho a vyhodnocovacieho systému vhodného pre plošné meranie rezistivity pôdy. Ďalej sa uvádza overenie navrhnutého riešenia reálnym meraním v teréne s následnou interpretáciou výsledkov.

# 1 Charakteristika pôdy

Cielom tejto kapitoly je stručne načrtnúť problematiku týkajúcu sa vlastností pôdy, jej zloženia a štruktúre horninového prostredia. Jednou z fundamentálnych povinností pri interpretácii výsledkov merania elektrickej rezistivity horninového prostredia je vysvetliť príčiny zistených priestorových zmien rezistivity. Táto skutočnosť vyžaduje minimálnu orientáciu v danej problematike.

Pôda je trojdimenzionálny (priestorový) prírodný útvar. Nachádza sa na pevninách a predstavuje povrchové vrstvy o mocnosti (hrúbke) 0,2-3,0 m. Pôda tvorí oblasť, ktorú nazývame *pedosféra*. Pedosféra je samostatný prírodný útvar, ktorý sa zrodil premenou vrchnej časti zemskej kôry, vplyvom organizmov na horniny, za prítomnosti vzduchu, vody a pôsobením slnečnej radiácie. Tvorí pôdny obal Zeme, nachádzajúci sa na povrchu litosféry [3].

## 1.1 Skladba pôdy

Pôda sa skladá z pevnej, kvapalnej a plynnej zložky. Pevná zložka je tvorená minerálnymi a organickými látkami. Organické látky môžeme kategorizovať na neživé organické látky (kyseliny, humus, cukry a iné.) a živé mikro i makro organizmy. Živé organizmy zapríčiňujú mechanickú a biogénnu reštruktúru minerálnej časti pôdy. Kvapalnú zložku tvorí pôdna voda, poprípade pôdny roztok a plynnú zložku tvorí pôdny vzduch. Obecne možno uviesť nasledujúce objemové pomery, 50 % z celkového objemu pôdy pripisujeme pevnej, 30 % kvapalnej a 20 % plynnej zložke [3].

Z týchto (a iných) skutočností je teda zrejmé, že pôda môže tvoriť homogénny systém len z makroskopického hľadiska. Energia, voda a vzduch nepretržite menia svoje zastúpenie v pôde a preto variuje i hodnota rezistivity. O nehomogenite pôdy a z toho vyplývajúcich pôdnych modeloch sa viac dočítame v kapitole č. 4.

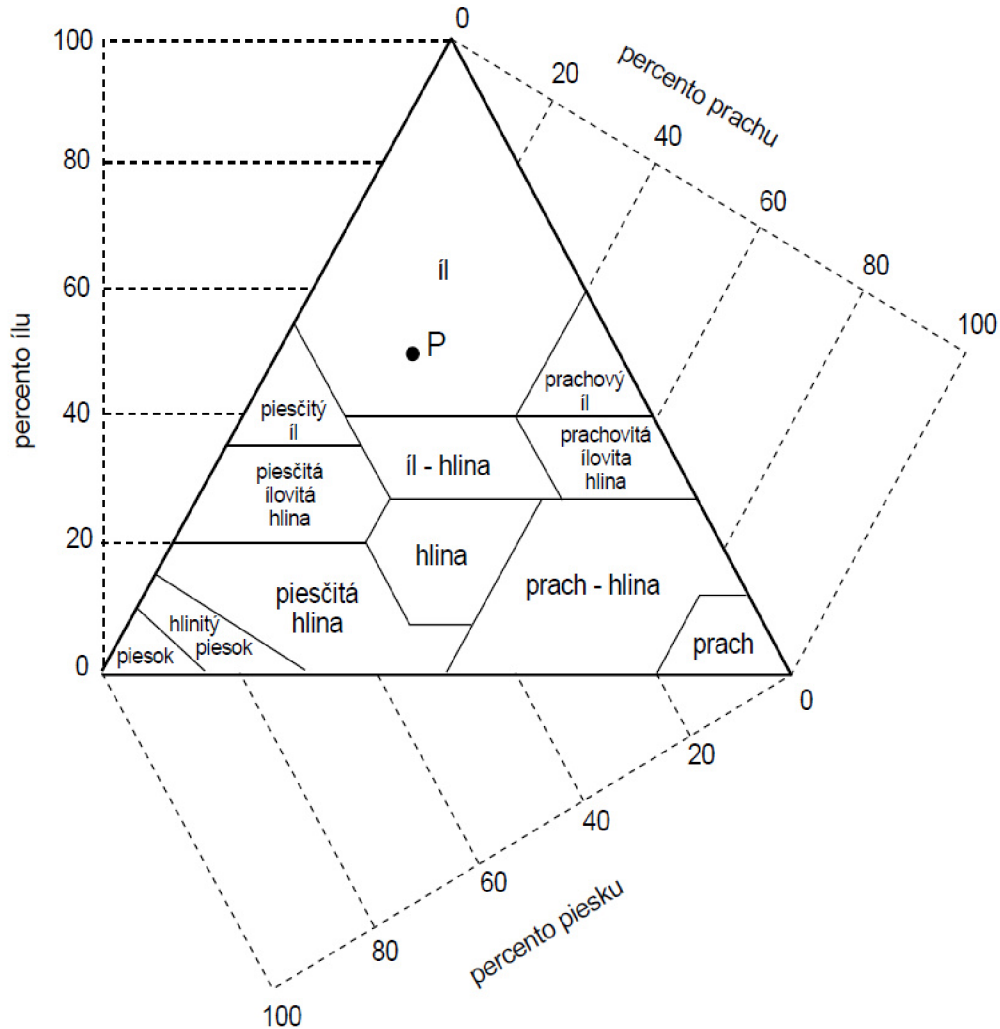
V horninovom prostredí sa nachádza veľké množstvo voľných nosičov elektrického náboja (elektróny, ióny), ktoré sa podieľajú na tvorbe elektrických prúdov a elektromagnetických polí. Poprípade vytvárajú lokálne akumulácie elektrického náboja (zdroj elektrických polí). Na vytvorení týchto javov sa podieľajú rôzne lokálne poprípade globálne fyzikálne a chemické procesy [4].

Klasifikáciu pôdy môžeme uskutočniť napr. na základe textúry alebo rozmeru zrn a to nezávisle od mineralogického zloženia. Klasifikácia podľa rozmerov (priemeru) jednotlivých zrn je nasledovná [4]:

- *Piesok*: od 0.05 mm do 2 mm
- *Prach*: od 0.002 mm do 0.05 mm
- *íl*: 0,002 mm a menej



Najväčší podiel obsahu v pôde majú ílové minerály, ktoré do značnej miery ovplyvňujú elektrickú rezistivitu pôdy. Na obr. č. 1.1 sa nachádza trojuholník, prostredníctvom ktorého sme schopný klasifikovať rozličné typy pôdy, na základe percentného obsahu piesku, prachu alebo ílu.



Obr. 1.1: Trojuholník pre klasifikáciu rozličných typov pôdy [4]

Na uloženie elektród sa nehodí piesočnatá pôda. Netvorí hrudy a rozpadáva sa. Voda zo zrážok v nej rýchlo presakuje do nižšie uloženého pôdneho priestoru a taktiež ľahko vysychá. Dobre vodivá je vlhká vápenitá ílová pôda. Po veľkých dažďoch sa zamáča, ak však vyschne býva tvrdá a málo vodivá [2].

Hodnota merného odporu pôdy je tým väčšia, čím sú horniny staršie. Sypká pôda s vodou a v nej rozpustenými soľami predstavuje dobre vodivé prostredie. Takmer dokonalými izolátormi sú pevné a súvislé horniny ako napr. žula, svor, pieskovec, čadič a ďalšie. Žula môže dosahovať rezistivity rádovo až niekoľko sto miliónov  $\Omega \cdot m$  [2].

## 2 Rezistivita pôdy

Veľkosť rezistivity pôdy priamo ovplyvňuje počet použitých zemných elektród aplikovaných v určitých systémoch. Taktiež vplýva na ich rozmery. Čím má rezistivita vyššiu hodnotu, tým je nutné použiť väčší počet zemných elektród prípadne zvoliť vhodné rozmery elektródy. Merný odpor pôdy sa mení a to v závislosti od viacerých činiteľov (o tejto problematike viac v podkapitole 2.3). Prieskum zloženia pôdy a hodnoty jej merného odporu sa vyžaduje napr. pre návrh a vyhotovenie uzemňovacieho systému [2].

### 2.1 Definícia rezistivity pôdy

Rezistivita pôdy (merný odpor pôdy) je fyzikálna veličina, charakterizujúca diferenciálne odporové vlastnosti pôdy z hľadiska vedenia elektrického prúdu. Rezistivita pôdy číselne predstavuje rezistanciu valca naplneného zeminou o dĺžke  $l = 1$  m a priereze  $S = 1$  m<sup>2</sup>. Rezistivita sa označuje písmenom  $\rho$  a meria sa v ( $\Omega$ .cm) alebo častejšie v ( $\Omega$ .m). Rezistivitu môžeme vypočítať pomocou vzťahu č. 2.1 [19].

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{U \cdot S}{I \cdot l} \quad (2.1)$$

Kde:

$R$  - Odpor vodiča ( $\Omega$ )

$S$  - Prierez vodiča (m<sup>2</sup>)

$l$  - Dĺžka vodiča (m)

$U$  - Elektrické napätie (V)

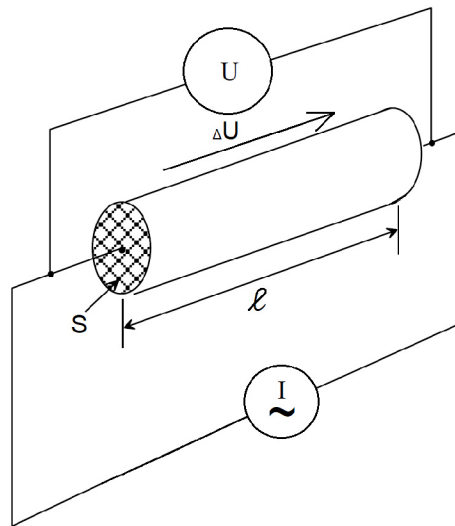
$I$  - Elektrický prúd (A)

Merná elektrická vodivosť pôdy (konduktivita) predstavuje prevrátenú hodnotu rezistivity. Konduktivita sa označuje písmenom  $\gamma$  a jej jednotkou je (S/m). Môžeme ju vypočítať pomocou vzťahu 2.2 [4].

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

Ako už bolo načrtnuté, elektrická rezistivita sa popisuje schopnosťou materiálu prenášať elektrický náboj, ktorý sa v horninovom prostredí prenáša prostredníctvom elektrónov, iónov a tzv. dier. Záporné elektróny sa v horninovom prostredí nachádzajú v mineráloch kovov a spôsobujú tak elektrónovú vodivosť. Kladné a záporné

ióny sa uplatňujú vo vlhkosti prítomnej v pórovom priestore horninového prostredia alebo priamo v podzemnej vode. Kladné diery v polovodičových mineráloch obsiahnutých v hornine. Najväčšia časť elektrickej vodivosti je realizovaná iónovou vodivosťou, pretože prevažný priestor pevnej horniny je tvorený nevodivými minerálmi [4]. Princiálna schéma zapojenia pre stanovenie merného odporu pevnej látky je zobrazená na obr. č. 2.1.



Obr. 2.1: Schéma zapojenia pre stanovenie merného odporu pevnej látky [4]

## 2.2 Účel merania rezistivity pôdy

Výsledok z merania rezistivity pôdy nám dáva informáciu potrebnú pre návrh a realizáciu uzemňovacieho systému. Jedná sa o úmyselne vytvorené vodivé spojenie elektrických zariadení a predmetov so zemou tak, aby určité miesto spotrebiča, zariadenia alebo siete bolo udržiavané na potenciálu zeme. Musí byť vždy vyhotovené tak, aby boli splnené požiadavky bezpečnosti a správnej funkcie celej elektrickej inštalácie. Preto je nevyhnutné, aby systém spĺňal požiadavky na odpor uzemnenia. Hlavným parametrom, ktorý ovplyvňuje odpor uzemnenia, je rezistivita pôdy. V prípade, že je rezistivita príliš vysoká, musíme pristúpiť k návrhu vhodných opatrení, ktoré zabezpečia dodržanie povolenej hodnoty odporu uzemňovacieho systému [31].

### Impedancia uzemnenia uzemňovacej elektródy

S impedanciou uzemnenia by sa malo uvažovať predovšetkým v striedavých sieťach a inštaláciách. Pri prúdoch so sieťovou frekvenciou je však reaktančná zložka

impedancie uzemnenia zanedbateľná. Z tohto dôvodu sa mnohokrát uvažuje len s rezistenciou, čiže s činným odporom uzemnenia [2].

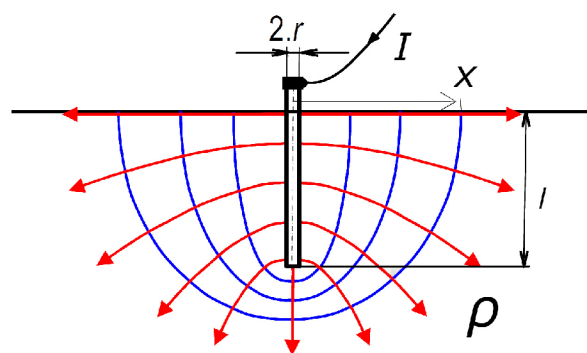
Odpor uzemnenia uzemňovacej elektródy sa skladá z troch zložiek [2]:

- *odpor zvodu a elektródy,*
- *prechodový odpor na rozhraní elektróda-pôda,*
- *odpor pôdy*

Práve odpor pôdy je mnohokrát väčší než prvé dve zložky. Odpor vodiča elektródy a prechodový odpor na rozhraní elektróda-pôda sa zvyčajne zanedbáva. Ak je zvod riadne pripevnený k elektróde (zemniču), hodnota ich odporu je nepatrná. Pri pripojení zvodu k zemniču pomocou svorky, musí byť svorka dobre utiahnutá. V prípade, že je zemnič dostatočne rozmerný, je do zeme správne osadený a pôda obsahuje dostatočné množstvo vody a elektrolytov prechodový odpor medzi zemničom a zemou je nízky [2].

### Elektrický potenciál valcovej tyčovej elektródy

Meranie rezistivity pôdy sa realizuje predovšetkým pomocou tyčových elektród. Pri uvažovaní prechodu elektrického prúdu  $I$  elektródou, prechádza elektrický prúd z elektródy do zeme. Pri prechode vzniká v zemi elektrické pole. Tento jav môžeme vidieť na obr. č. 2.2. Prúdnicie vychádzajúce z elektródy kolmo do zeme sú znázornené orientovanými krivkami so šípkami. Ekvipotenciály (množina bodov poľa s rovnakým elektrickým potenciálom) sú v celom priestore kolmé na prúdnicie. Samotná elektróda tvorí jednu z ekvipotenciál [4].



Obr. 2.2: Elektrické pole valcovej tyčovej elektródy uloženej vertikálne v zemi

Elektrický potenciál predstavuje skalárnu fyzikálnu veličinu, ktorú môžeme určiť napríklad pomocou nasledujúcich vzťahov (v závislosti od polohy) [5]. Pod každým vzťahom bude uvedený názov použitých veličín spolu s ich jednotkami, ak tak nebolo urobené v predošlom vzťahu.

*Elektrický potenciál na povrchu zeme vo vzdialenosti  $x$  od osi uzemňovača [5]:*

$$\varphi_x = \frac{\rho I}{4\pi l} \cdot \ln \left( \frac{l + \sqrt{l^2 + x^2}}{-l + \sqrt{l^2 + x^2}} \right) \quad (2.3)$$

Kde:

$\varphi_x$  - Elektrický potenciál na povrchu zeme (V)

$\rho$  - Rezistivita pôdy obklopujúca elektródu ( $\Omega \cdot \text{m}$ )

$I$  - Elektrický prúd tečúci elektródou (A)

$l$  - Hĺbka zarazenia elektródy (m)

$x$  - Horizontálna vzdialenosť od osi elektródy (m)

*Elektrický potenciál na povrchu elektródy [5]:*

V drvivej väčšine prípadov je polomer tyče mnohokrát menší ako jej dĺžka. Potom platí nasledujúci zjednodušený vzťah, pomocou ktorého sa nedopustíme výraznej chyby.

$$\varphi_e \approx \frac{\rho I}{2\pi l} \cdot \ln \left( \frac{2l}{r} \right) \quad (2.4)$$

Kde:

$\varphi_e$  - Elektrický potenciál na povrchu elektródy (V)

$r$  - Polomer elektródy (m)

*Elektrický odpor uzemnenia tyčovej elektródy [5]:*

Odpor uzemnenia tyčovej elektródy následne vypočítame zo vzťahu 2.5.

$$R_{uz} = \frac{\varphi_e}{I} \approx \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \left( \frac{2l}{r} \right) \quad (2.5)$$

Kde:

$R_{uz}$  - Elektrický odpor uzemnenia tyčovej elektródy ( $\Omega$ )

*Elektrický odpor zeme ( $\Omega$ ) [5]:*

Odpor zeme medzi povrchom elektródy a miestom na povrchu zeme vzdialenom od osi elektródy o vzdialenosť  $x$  vypočítame zo vzťahu:

$$R_x = \frac{\varphi_e - \varphi_x}{I} \approx R_{uz} - \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \left( \frac{l + \sqrt{l^2 + x^2}}{-l + \sqrt{l^2 + x^2}} \right) \quad (2.6)$$

## 2.3 Faktory ovplyvňujúce hodnotu rezistivity pôdy

Medzi faktory ovplyvňujúce hodnotu rezistivity pôdy môžeme zaradiť [4]:

- *Chemické zloženie pôdy,*
- *klimatické podmienky,*
- *úroveň zhutnenia,*
- *vlhkosť pôdy,*
- *úroveň podzemných vôd,*
- *teplota pôdy,*
- *ročné obdobie,*
- *geografická charakteristika*

Pôda je zriedkakedy homogénna a rezistivita pôdy sa bude meniť geograficky a v rôznych hĺbkach. Značne závisí od vlhkosti pôdy a jej teploty. Tieto veličiny nie sú konštantné a behom roka sa menia. Vlhkosť pôdy je závislá na jej pórovitosti a zrnitosti. Čím je obsah vody v pôde menší, tým je rezistivita vyššia. V niektorých oblastiach je možné účinok vysychania zaznamenať až do hĺbky dvoch metrov [1].

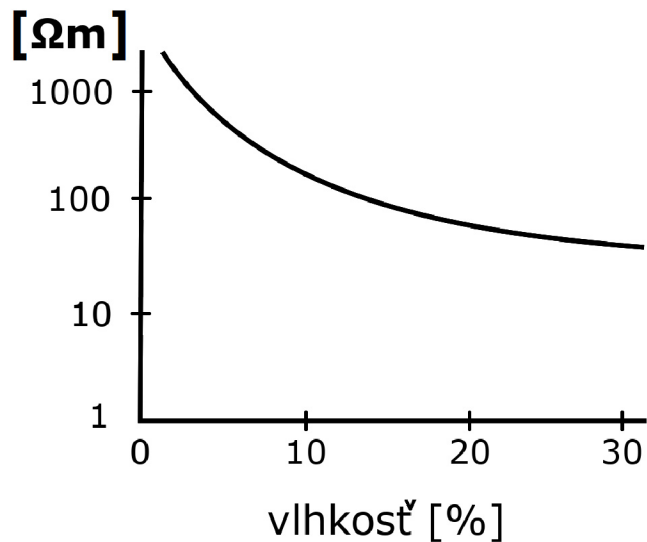
Pre potreby uzemňovania nie sú vhodné priepustné piesočnaté vrstvy. Pre uloženie uzemňovacích sústav považujeme za vhodné hlinité vodou nasýtené pôdy [2].

Hodnota rezistivity pôdy sa môže líšiť horizontálne i vertikálne. Preto je potrebné vykonať viac ako jeden súbor meraní [1].

### 2.3.1 Vplyv vody na rezistivitu pôdy

Ako už bolo spomenuté vyššie, obsah vlhkosti sa v pôde mení sezónne, mení sa podľa povahy vrstiev v zemi a hĺbky stálej vodnej hladiny. Platí, že obsah vody v pôde je najvýznamnejším faktorom, ktorý ovplyvňuje výslednú hodnotu rezistivity pôdy [4]. Zdroj [2] uvádza, že meranie je vhodnejšie uskutočniť v období sucha.

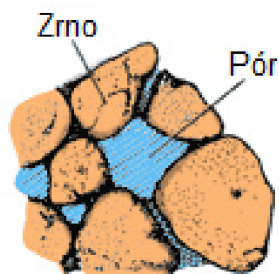
Vodu v pôde môžeme zaradiť do troch skupín. Je to hygroskopická, kapilárna a presakujúca. Hygroskopická voda predstavuje určité množstvo vody, ktoré je obsiahnuté v úplne suchej pôde, ktoré by sa z nej vypudilo až pri zahriatí pôdneho priestoru nad teplotu 100°C. Na hodnotu mernej vodivosti nemá veľký vplyv. Vo vlhkej pôde vyplňuje úzke medzery medzi časticami pôdy ako kapiláry a vlásočnice kapilárna voda, ktorá nevytečie, pretože je viazaná povrchovým napätím. Množstvo kapilárnej vody závisí na súhrnnej veľkosti priestoru medzi časticami pôdy. Na hodnotu mernej vodivosti má značný vplyv. Zrážková alebo spodná voda tvorí presakujúcu vodu, ktorá nieje viazaná v kapilárach [2]. Závislosť veľkosti rezistivity pôdy na jej vlhkosti sa nachádza nasledujúcej strane, na obr. č. 2.3.



Obr. 2.3: Závislosť merného odporu pôdy na vlhkosti pôdy [23]

### Pórovitosť

Obsah vody v horninách závisí v značnej miere na veľkosti jednotlivých elementov pôdy, predovšetkým však na jej pórovitosti. Pórový priestor je vyplnený elektrolytom. Elektrolyt je tvorený zrážkovou vodou alebo podzemnou vodou poprípade ich kombináciou. Vodivosť pôdy je určená obsahom vody a solí. Na obrázku 2.4 môžeme vidieť pórový priestor v granulárnych horninách [2, 4].



Obr. 2.4: Zobrazenie pórového priestoru v hornine vyplneného vodou [4]

Všeobecne ju môžeme rozdeliť na:

- Celkovú pórovitosť
- Efektívnu pórovitosť

Celková pórovitosť je priamo úmerná objemu dier v hornine (póry, pukliny, dutiny, ...) a nepriamo úmerná celkovému objemu vyšetrovanej horniny.

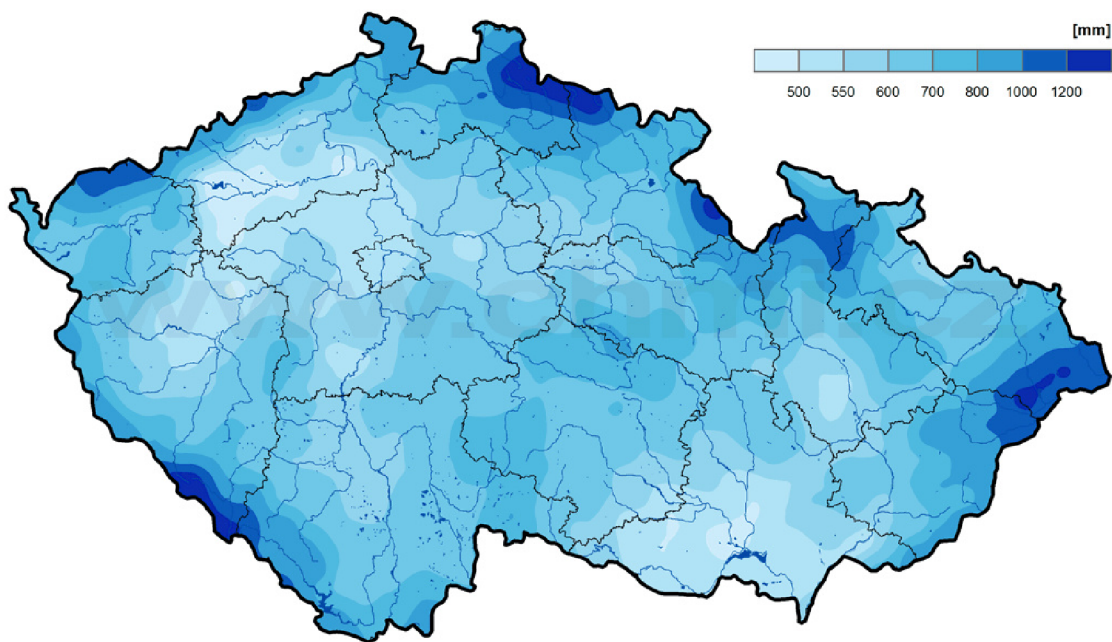
Efektívna pórovitosť je zväčša značne menšia ako celková. Tento jav sa uplatňuje vtedy, ak jednotlivé póry nie sú navzájom prepojené, rozmery pórov nie sú dostatočné pre cirkuláciu kvapalín alebo ak mineráli v hornine (íl) absorbujú vodu [4].

## Zrážky

V prípade dopadu dažďovej vody na povrch pôdy, dochádza k dvom javom. Časť vody odtečie po povrchu pôdy a zvyšok vsiaka priamo do pôdy. Určitý objem je zadržaný pôdou a zvyšok sa presúva vertikálnym smerom vplyvom gravitačnej sily Zeme až po hladinu podzemnej vody [4].

V prípade zvrstveného prostredia, vzdialeného od podzemnej vody, tvoreného hornou vrstvou s veľmi jemnými pórami a spodnou vrstvou skladajúcou sa čiste zo zrnitejšieho materiálu bude obsah vlhkosti v hornej vrstve značne väčší ako v spodnej. Táto skutočnosť vplýva na rezistivitu pôdy. Merná vodivosť pôdy bude značne väčšia v hornej vrstve [4].

Na obr. 2.5 je zachytený priemerný ročný úhrn zrážok za sledované obdobie (roky 1981-2010).



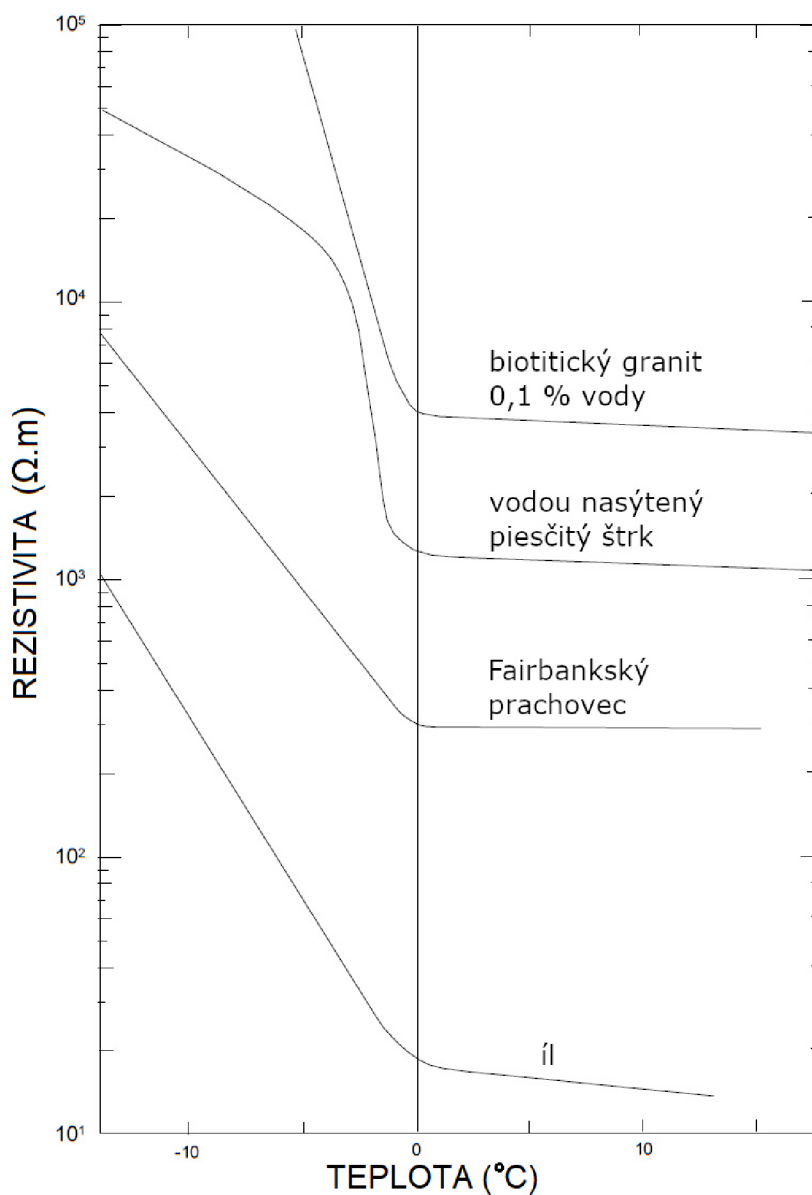
Obr. 2.5: Priemerný ročný úhrn zrážok v ČR v rokoch 1981-2010 (podľa ČHMÚ)

Vlhkosť pôdy je počas roku na určitom území *približne konštantná*. Toto tvrdenie sa však vzťahuje len pre hĺbky rádovo v jednotkách metrov. Po zrážkach vzrastie o určitú hodnotu ale systém odtoku a vplyv slnečného žiarenia (vyparovanie) zapríčiňuje, že vlhkosť pôdy sa *po určitom čase* vráti na pôvodnú hodnotu [4].



### 2.3.2 Vplyv teploty (mrazu) na rezistivitu pôdy

V horninovom prostredí sa nachádza elektrolyt obsahujúci ako katióny (+), tak anióny (-). Zvýšenie teploty spôsobuje zvýšenie vodivosti. Dôvodom je pri zvýšení teploty zvýšenie pohyblivosti iónov (katiónov i aniónov)[4]. Na rezistivitu pôdy značne pôsobí i mráz, ktorý ju zvyšuje. Pri jeho pôsobení môže dosahovať vo vrstvách zmrznutej pôdy značných hodnôt (až niekoľko tisíc  $\Omega \cdot m$ ). Hrúbka zmrznutej vrstvy závisí od danej oblasti a môže dosahovať hodnoty jeden meter a viac. Hodnoty rezistivity pôdy v takom prípade môžu dosahovať rádovo rovnakých hodnôt, aké vykazuje pôda v období sucha [1]. Na obr. č. 2.6 je vyobrazená grafická závislosť rezistivity horniny na teplote.

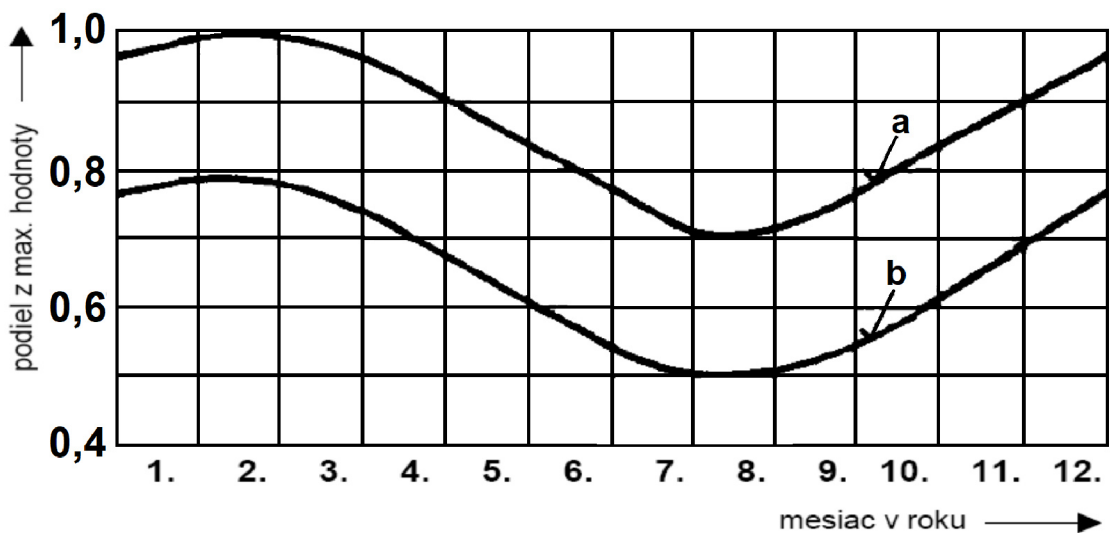


Obr. 2.6: Vplyv teploty na rezistivitu horniny [4].

Z grafickej závislosti na obr. 2.6 je zrejmé, že teplota pod hodnotou bodu mrazu ovplyvňuje rezistivitu radikálnejšie ako teplota nad hodnotou 0 °C. Ak teplota prejde cez hodnotu 0 °C, časť vody zamrzne. Predovšetkým táto skutočnosť prispieva k tomu, že rezistivita pôdy sa nesmie merať v období, kedy je pôda zmrznutá [9].

### 2.3.3 Vplyv obdobia (mesiaca) v roku na rezistivitu pôdy

Rezistivita pôdy sa mení počas roka tam, kde sezónne zmeny prinášajú zo sebou zmeny vlhkosti a teploty pôdy. Z tejto skutočnosti potom vyplýva, že počas roka musí dochádzať i k samotnej zmene rezistivity pôdy. Preto by uzemňovacie systémy mali byť navrhnuté pre najhoršie možné podmienky. Závislosť podielu z maximálnej hodnoty merného odporu pôdy na mesiaci v roku môžeme vidieť na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Graf vyjadrujúci zmenu merného odporu pôdy počas roka [2, 6]

Kde:

*Krivka a* - priebeh rezistivity pôdy v období sucha.

*Krivka b* - priebeh rezistivity pôdy v daždivom období.

Prečo je potrebné namerané hodnoty merného odporu korigovať sme si vysvetlili. Ako pri korekcií postupovať sa dozvieme v podkapitole č. 3.1.2.

## 2.4 Typické hodnoty rezistivity pôdy

Typické hodnoty rezistivity pôdy sa dajú zistiť aj inou formou ako jej meraním pomocou meracieho prístroja. Jednotlivé hodnoty rezistivity v závislosti od konkrétneho typu pôdy môžeme nájsť napr. v normách ČSN 33 2000-5-54 ed.2 alebo v ČSN EN 50522.

Spoliehať sa na určenie rezistivity podľa tabuliek sa neodporúča. Dôvodom je, že skutočné výsledky merania sa môžu diametrálne líšiť od výsledkov uvedených v tabulkách, čo zapríčiňuje nemožnosť dosiahnuť relevantných výsledkov. V tabulke č. 2.1 sa nachádza prehľad jednotlivých rozsahov hodnôt rezistivity pre daný typ pôdy [6].

Tab. 2.1: Rozsah stredných hodnôt rezistivity, pre daný charakter pôdy [1, 33]

Typ pôdy	Rezistivita ( $\Omega.m$ )
Bažinatá pôda	od niekoľkých do 30
Naplaveniny	20 až 100
Humus, prst	10 až 150
Vlhká rašelina	5 až 100
Tvárný íl	50
Výpenatý a kompaktný íl	100 až 200
Jurský íl	30 až 40
Ílovité piesky	50 až 500
Kremenné piesky	200 až 3 000
Holé kamenité pôdy	1 500 až 3 000
Zatrávnené kamenité pôdy	300 až 500
Mäkký vápenec	100 až 300
Kompaktný vápenec	1 000 až 5 000
Rozpukaný vápenec	500 až 1 000
Bridlica	50 až 300
Mikanitová bridlica	800
Žula a pieskovec podľa miery zvetrania	1 500 až 10 000
Žula alebo veľmi zvetraný vápenec	100 až 600
Močiar	5 až 40
Hlina	20 až 200
Zvetraná skala	do 1000
Moréna	do 30 000

Tabuľka č. 2.2 vyjadruje veľkosť rezistivity pôdy podľa charakteru pôdy i s prepočítaným odporom uzemňovača pre stanovenú hĺbku uloženia, či dĺžku uzemňovacieho pásiku.

Tab. 2.2: Rezistivita podľa druhu pôdy a prepočítaný odpor uzemňovača [20]

Typ pôdy	Rezistivita pôdy ( $\Omega \cdot m$ )	Odpor uzemnenia ( $\Omega$ )					
		Uzemňovač hĺbka (m)			Uzemňovací pásik dĺžka (m)		
		3	6	10	5	10	20
vlhký humus, močiar	30	10	5	3	12	6	3
poľnohospodárska pôda	100	33	17	10	40	20	10
pieskovitá hlina	150	50	25	15	60	30	15
vlhký piesok	300	66	33	20	80	40	20
suchý piesok	1000	330	165	100	400	200	100
betón 1:5	400	-	-	-	160	80	40
vlhký štrk	500	160	80	48	200	100	50
suchý štrk	1000	330	165	100	400	200	100
kamenistá zem	30,000	1000	500	300	1200	600	300
skala	$10^7$	-	-	-	-	-	-

Účinného zmenšenia merného odporu sa môže dosiahnuť pridaním soli do pôdy. Podľa zdroja [2] sa dáva 2 až 3 kg na elektródu. Účinok takéhoto počinu je však dočasný (obvykle zmizne po jednom roku). Navyše soľ agresívne poškodzuje elektródu pretože spôsobuje koróziu a tým ju ničí. Rýchlejšou koróziou podliehajú najmä elektródy vyrobené z ocele [2].

### 3 Metódy pre meranie rezistivity pôdy

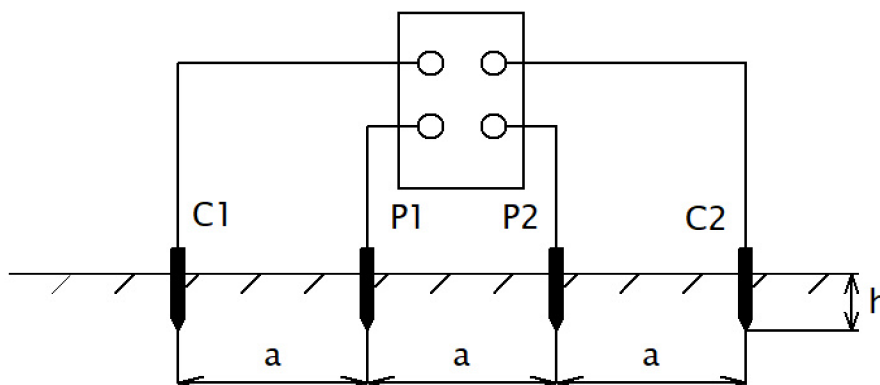
Pre meranie rezistivity pôdy bolo v minulosti vyhotovených niekoľko geoelektrických metód. Geoelektrické metódy patria k celosvetovo najrozšírenejším geofyzikálnym metódam. Patria sem metódy ako Wennerova metóda, Schlumbergerova, Owensova metóda, metóda merania priamo tyčou, meranie dlhou tyčou a ďalšie. Nasledujúca kapitola by mala čitateľa oboznámiť s vybranými metódami používanými pre meranie rezistivity pôdy, konkrétne s Wennerovou a Schlumbergerovou. Pochopenie základných princípov používaných pri meraní rezistivity je dôležité z viacerých dôvodov, napr. i pre orientovanie sa v problematike týkajúcej sa variácie hodnôt rezistivity v jednotlivých vrstvách pôdy, ktorej sa budeme venovať.

#### 3.1 Wennerova metóda

Jednou z najstarších, najznámejších a najpoužívanejších štvorelektrodových metód pre meranie rezistivity pôdy je tzv. Wennerova metóda vyvinutá dr. Frankom Wennerom z US Bureau Standard v 1915 [7, 9, 20]. Za zmienku ďalej stojí, že jej použitie je uprednostňované aj normou ČSN 33 2000-5-54.

##### 3.1.1 Princíp metódy

Princíp tejto univerzálnej metódy spočíva v použití štyroch elektród (sond) o priere 15 až 20 mm, ktoré sú zarazené v jednej priamke kolmo do zeme. Ako elektródy sa uplatňujú ocelové tyče, ktoré sú všetky zarazené do hĺbky „ $h$ “. Vzdialenosť (rozostup) medzi jednotlivými susednými elektródami „ $a$ “ je identická [2, 8, 14]. Na obr. č. 3.1 môžeme vidieť principiálne zapojenie obecného meracieho prístroja pre túto metódu, spolu s usporiadaním jeho elektród.



Obr. 3.1: Schéma zapojenia mer. prístroja, elektród - Wennerova metóda [14]

Vonkajšie elektródy, pripojené na svorky  $C_1$  a  $C_2$  vykonávajú funkciu prúdových sond, ktorými je do obvodu privádzaný (injektovaný) elektrický prúd. Vnútorne elektródy, pripojené na svorky  $P_1$  a  $P_2$  vykonávajú funkciu napätových sond, ktoré slúžia na meranie úbytku napätia, ktorý vznikne prechodom elektrického prúdu pôdou [2, 8, 14]. Rezistivitu pôdy  $\rho$ , pre štyri elektródy umiestnené v homogénnej pôde vypočítame zo vzťahu č. 3.1, ktorý dokázal pán Wenner [2]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot h^2}} - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{4 \cdot a^2 + 4 \cdot h^2}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{n} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{U}{I}}{n} \quad (3.1)$$

Kde:

$\rho$  - Rezistivita pôdy ( $\Omega \cdot m$ )

$\pi$  - Ludolfovo číslo (-)

$a$  - Vzdialenosť elektród (m)

$R$  - Nameraný odpor pôdy ( $\Omega$ )

$h$  - Hĺbka zarazenia elektród (m)

$n$  - Konfiguračný koeficient (-)

$U$  - Úbytok napätia medzi vnútornými elektródami (V)

$I$  - Prúd prechádzajúci vonkajšími elektródami (A)

Konfiguračný koeficient  $n$  nachádzajúci sa v menovateli vzťahu 3.1 môže nadobúdať hodnoty z intervalu  $\langle 1, 2 \rangle$ , pričom jeho hodnota závisí na pomere vzdialenosti zarazenia elektród k ich hĺbke zarazenia. Hodnoty koeficientu  $n$  pre vybrané pomery  $a/h$  sú umiestnené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 3.1: Veľkosť konfiguračného koeficientu  $n$  v závislosti na pomere  $a/h$  [2]

<b>a/h</b>	1/4	1/2	1	2	5	10	20	>20
<b>n</b>	1	1,04	1,19	1,52	1,88	1,97	1,99	2

Z tabuľky č. 3.1 je zrejmé, že čím je hĺbka zarazenia elektród  $h$  väčšia oproti ich vzdialenosti  $a$ , tým sa konfiguračný koeficient  $n$  väčšmi blíži k hodnote 1. Naopak v praxi sa často stretávame s predpokladom, že vzdialenosť elektród je 20-násobná (a viac) oproti ich hĺbke zarazenia. Ako sme si už mohli všimnúť v tabuľke, v takomto prípade sa hodnota konfiguračného koeficientu  $n$  blíži k hodnote 2, kedy môžeme pre výpočet rezistivity pôdy použiť zjednodušený vzťah č. 3.2 nachádzajúci sa na nasledujúcej strane.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{U}{I} \quad (3.2)$$

Kde:

$a$  - Vzdialenosť elektród (m)

$R$  - Nameraný odpor pôdy ( $\Omega$ )

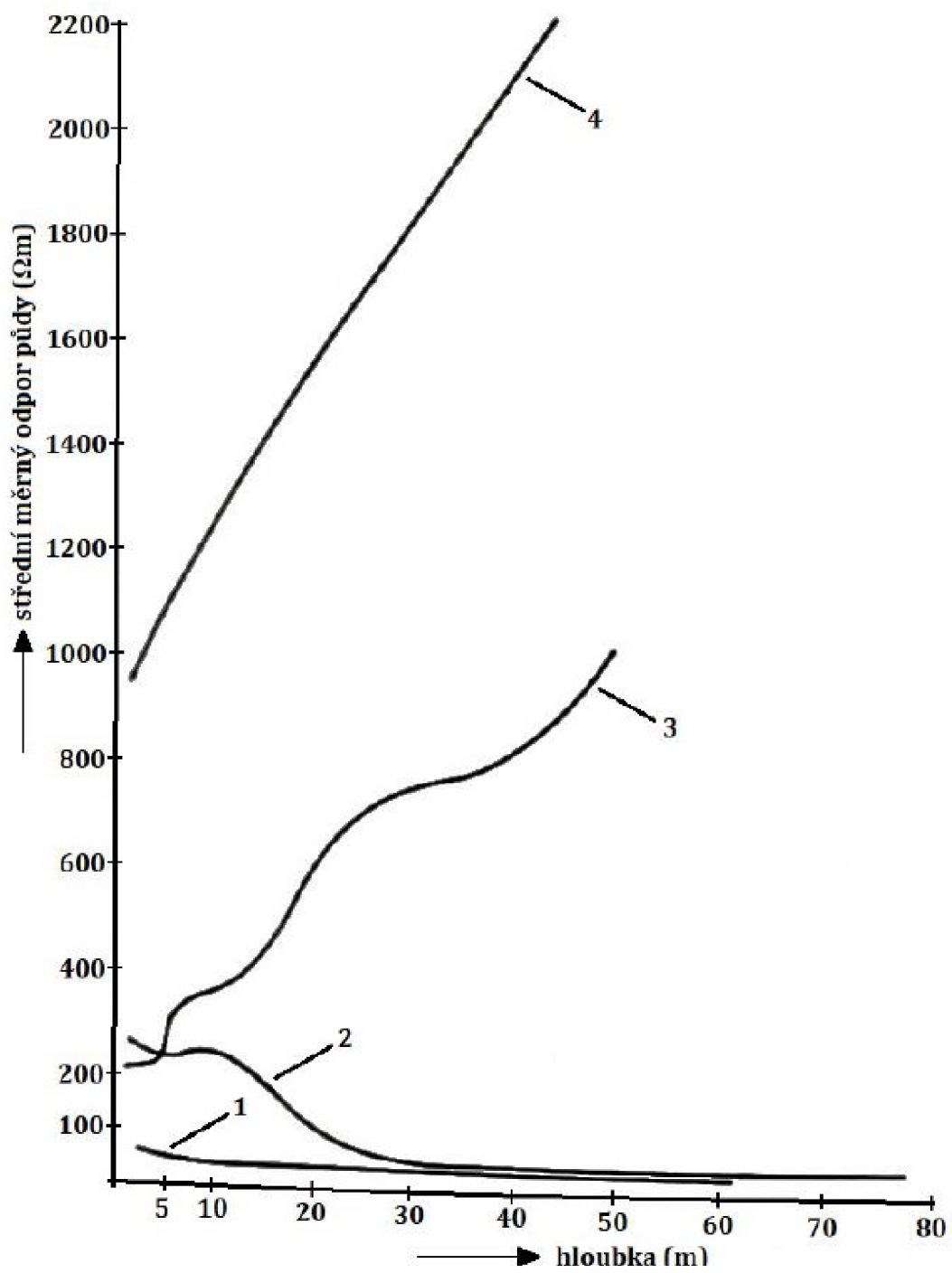
Je dôležité uvedomiť si, že stanovená veľkosť rezistivity pôdy predstavuje strednú hodnotu rezistivity pôdy do hĺbky rovnajúcej sa približne rozostupu sond „ $a$ “ [2, 14].

Merný odpor pôdy je potrebné merať v rovnakej hĺbke v akej budú uložené zemniče [2]. Zdroj [14] však uvádza, že pre účel návrhu jednoduchých zemničov je dostačujúce stanoviť rezistivitu pôdy tým spôsobom, že sa zmeria zemný odpor tyče o priemere 20 mm zarazenej do zeme v hĺbke 0,8 m. Nameraný zemný odpor sa potom rovná rezistivite pôdy.

Z rozsiahlych zemničov, ako sú zemné siete vonkajších rozvodní odteká prúd široko do zeme ako z mohutného telesa a na odpor má preto vplyv vodivosť aj hlboko položených vrstiev (za predpokladu rozdielnych merných vodivostí jednotlivých vrstiev). Z tohto dôvodu je potrebné určiť stredný odpor pôdy do hĺbky, zrovnateľnej s celkovými rozmermi zemniča. Čo predstavuje spravidla hĺbku niekoľko desiatok až stoviek metrov [2]!

V prípade, že na rezistivitu pôdy majú vplyv aj vrstvy horniny ležiace hlbšie než je vzdialenosť dvoch susedných elektród môžeme zväčšiť rozstup elektród. Z toho vyplýva, že ak vytvoríme meranie s postupným zväčšovaním vzdialenosti elektród, získame informácie o mernom elektrickom odpore vo väčších hĺbkach. Z takéhoto merania je možné zostrojiť graf, kde sa vynáša závislosť zmeranej strednej hodnoty merného odporu ( $\Omega \cdot m$ ) na hĺbke pôdy (m), pre ktorú bola táto hodnota stanovená. Priebeh kriviek môže byť rozmanitý. Na obr. č. 3.2 môžeme vidieť štyri priebehy. Prvý priebeh popisuje pôdu, ktorá má približne rovnaký merný odpor od povrchu až po maximálnu zmeranú hĺbku. Priebeh číslo dva popisuje pôdu, ktorej merný odpor mierne klesá s rastúcou hĺbkou a od určitej hodnoty je v závislosti na hĺbke nemenný. Z toho vyplýva, že v oboch prípadoch pojednávame o homogénnej pôde. Priebeh č. tri vyjadruje pôdu s lepšou vodivosťou na povrchu pôdy. Štvrtý priebeh je podobný tretiemu, avšak jeho povrchová vodivosť je na horšej úrovni. Z uvedeného ďalej vidíme, že priebeh č. tri a štyri predstavuje nehomogénne pôdy [2].

Tento typ meraní prináša výpoveď o tom, či má význam voľby hĺbkových (tyčových) alebo povrchových (pásových, drôtových) zemničov a to z fyzikálneho a ekonomického hľadiska [2].



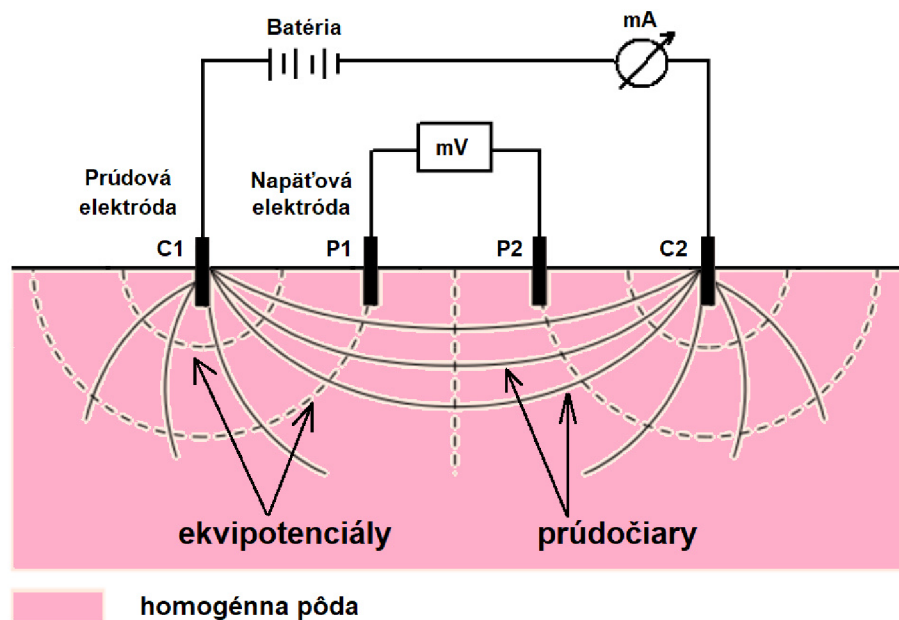
Obr. 3.2: Závislost střednej rezistivity pôdy od hĺbky, pre rôzne typy pôd [2, 23]



## Homogenita pôdy

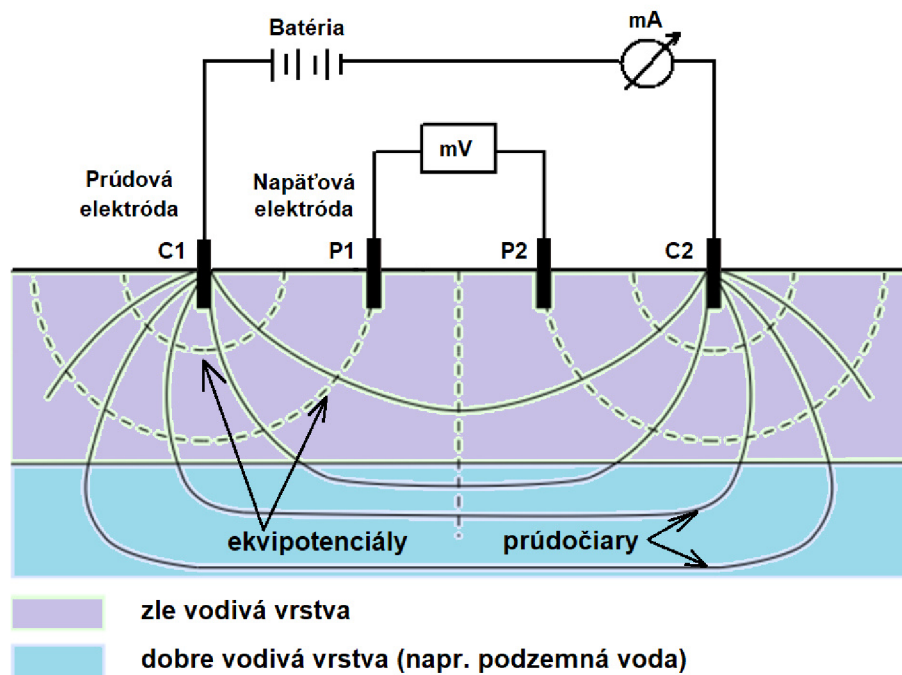
Ako už bolo spomenuté, základným princípom fungovania geoelektrických meraní je pripojenie zdroja napätia na vonkajšie (prúdové) meracie elektródy. Použiť sa môže ako jednosmerný tak i striedavý zdroj napätia. Následkom pripojenia zdroja napätia začína týmito elektródami pretekať elektrický prúd a vzniká tak v pôde elektrické pole.

Rozloženie elektrického poľa pritom závisí na vlastnostiach pôdy. Zjednodušene možno povedať, že ak budeme predpokladať homogénne vlastnosti pôdy (prúdová hustota bude v celom priestore rovnaká) tak siločiar (prúdočiary) budú spájať elektródy  $C_1$  a  $C_2$ . V takomto prípade budú mať ekvipotenciálne krivky kružnicový tvar a budú na siločiar kolmé [21]. Rozloženie elektrického poľa v homogénnej pôde môžeme vidieť na obr. č. 3.3.



Obr. 3.3: Rozloženie elektrického poľa v homogénnej pôde [2]

Homogenita pôdy je ojedinelá. V reálnych podmienkach sa v drvivej väčšine stretávame s nehomogénnou pôdou. V takomto prípade majú jednotlivé pôdne vrstvy rôzne vlastnosti a z toho ďalej vyplývajúce rôzne hodnoty rezistivity. Dôsledkom rôznych hodnôt merného odporu je deformovaný tvar (priebeh) siločiar a tým pádom aj ich koncentrácia v pôdnom priestore. Práve táto skutočnosť ovplyvňuje výslednú veľkosť napätia zmeranú na vnútorných elektródach  $P_1$  a  $P_2$  [2]. Rozloženie elektrického poľa v nehomogénnej pôde môžeme vidieť na obr. č. 3.4.



Obr. 3.4: Rozloženie elektrického poľa v nehomogénnej pôde [2]

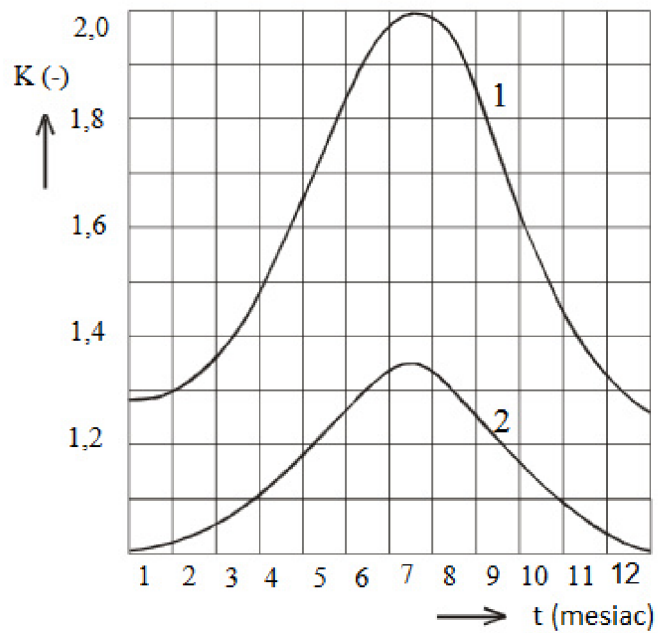
### 3.1.2 Korekcia rezistivity pôdy na ročné obdobie

Aby sme obdržali adekvátnu hodnotu rezistivity pôdy, musíme nameranú hodnotu rezistivity pôdy vynásobiť korekčným činiteľom „ $K$ “. Tento činiteľ rešpektuje vplyv kolísania meranej rezistivity v závislosti na ročnom období do hĺbky 3 m. Pre hĺbku väčšiu ako 3 m sa rezistivita pôdy nekoriguje. Protokol z merania musí súčasne obsahovať ako nameranú tak i korigovanú hodnotu rezistivity pôdy. Nesmie chýbať ani špecifikácia klimatických podmienok vládnuvich v priebehu merania [9].

Samotnú grafickú charakteristiku korekčného činiteľa vyjadrujú tzv. Wettsteinové krivky na obr. č. 3.5. Nachádza sa tu závislosť veľkosti korekčného činiteľa na danom mesiaci v roku a to konkrétne pre daždivé obdobie alebo obdobie sucha. *Krivka „1“* udáva hodnoty  $K$  pre meranie v daždivom období a *krivka „2“* udáva hodnoty  $K$  pre meranie v období sucha. [16].

Hranicu medzi obdobím sucha a daždivým obdobím je občas náročné určiť. Daždivé obdobie môžeme uvažovať v prípade, že zrážkový úhrn za posledných 48 hodín je 6 mm a viac alebo vtedy, ak je zrážkový úhrn za posledných 7 dní 16 mm a viac. Informácie o aktuálnych zrážkových úhrnoch je možné dohľadať na webových stránkach ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) [9].

Odčítanie hodnôt korekčného činiteľa z Wettsteinových kriviek na obr. č. 3.5 by nemuselo priniesť relevantné výsledky. Konkrétne hodnoty korekčného činiteľa môžeme nájsť aj v tab. č. 3.2 a 3.3.



Obr. 3.5: Charakteristika korekčného činiteľa v závislosti na ročnom období [1]

Tab. 3.2: Korekcia mernej rezistivity na základe ročného obdobia - prvá časť [9]

Mesiac	0,5	1	2	3	4	5	6	6,5	7
Suché o.	1,00	1,00	1,02	1,06	1,13	1,21	1,31	1,36	1,39
Daždivé o.	1,28	1,28	1,29	1,37	1,49	1,66	1,86	1,94	1,99

Tab. 3.3: Korekcia mernej rezistivity na základe ročného obdobia - druhá časť [9]

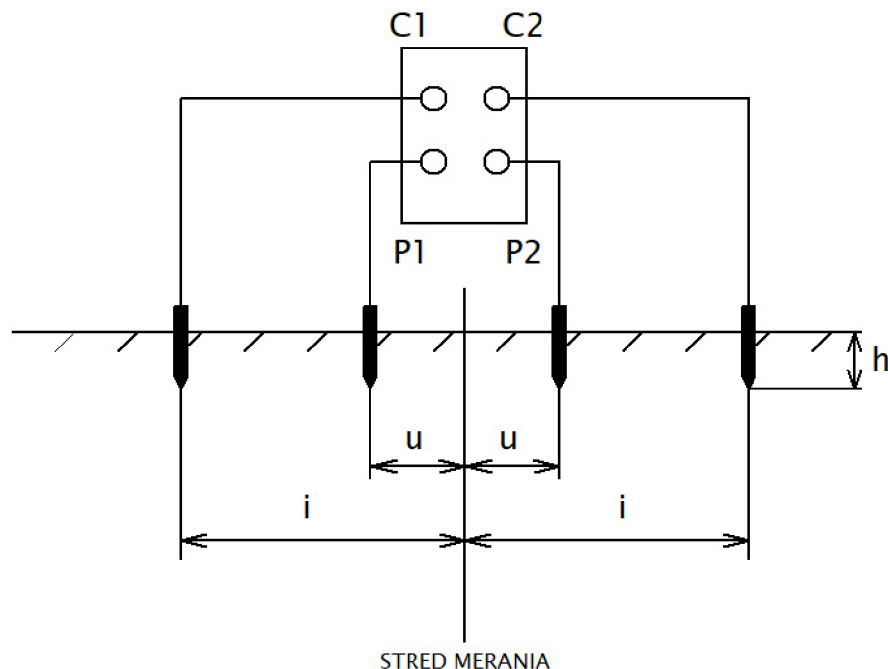
Mesiac	7,5	8	8,5	9	10	11	11,5	12
Suché o.	1,40	1,37	1,33	1,28	1,18	1,10	1,04	1,01
Daždivé o.	2,00	1,99	1,93	1,83	1,61	1,44	1,32	1,29

## 3.2 Schlumbergerova metóda

Táto metóda je oproti Wennerovej metóde menej známa. Z časového hľadiska uskutočnenia merania je výhodnejšia a to z dôvodu, že umožňuje rýchlejší postup merania čiastkových rezistívít. I napriek tomuto faktu sa v praxi používa častejšie Wennerova metóda. Pri Schlumbergerovej metóde je rozteč napäťových (vnútorných) elektród konštantná. Pozícia prúdových (vonkajších) elektród sa mení. Vzťah pre výpočet nameranej rezistivity je zložitejší, z tohto dôvodu sa odporúča používať túto metódu výhradne s prístrojom umožňujúcim automatické vyhodnotenie merania [7, 9].

### 3.2.1 Princíp metódy

Podobne ako Wennerova metóda i Schlumbergerova metóda využíva pre meranie rezistivity pôdy štyri elektródy, ktoré sú zarazené v jednej priamke do zeme. Ako elektródy sa uplatňujú ocelové tyče, ktoré sú všetky zarazené do hĺbky „ $h$ “. Vonkajšie elektródy  $C_1$  a  $C_2$  vykonávajú funkciu prúdových sond, ktorými je do obvodu privádzaný elektrický prúd a vnútorné elektródy  $P_1$  a  $P_2$  funkciu napäťových sond, ktoré slúžia na meranie úbytku napätia, ktorý vznikne prechodom elektrického prúdu pôdou. Na obr. č. 3.6 môžeme vidieť principiálne zapojenie všeobecného meracieho prístroja pre túto metódu, spolu s jeho sondami [2, 8].



Obr. 3.6: Schéma zapojenia mer. prístroja, elektród - Schlumbergerova metóda [2]

Jedná sa teda o obdobu Wennerovej metódy s tým rozdielom, že vzdialenosti (rozostupy) medzi jednotlivými elektródami nie sú počas merania identické. Vonkajšie (prúdové) elektródy sú umiestnené od pomyselného stredu merania vo vzdialenosti „ $i$ “ a vnútorné (napätové, potenciálové) elektródy sú umiestnené od stredu merania vo vzdialenosti „ $u$ “. Umiestnenie elektród je symetrické podľa pomyselného stredu merania. Meracie prúdové elektródy  $C_1$  a  $C_2$  sa pri každom meraní pohybujú smerom od stredu merania. Potenciálové elektródy  $P_1$  a  $P_2$  zostávajú na rovnakých miestach až do chvíle, kedy zmerané napätie na potenciálových elektródach nedosahuje veľmi malej hodnoty vzhľadom na meranie. Od tohto bodu je potrebné zabezpečiť posun potenciálových elektród smerom von od stredu merania do novej vzdialenosti „ $u$ “. Platí, že primeranou vzdialenosťou medzi  $P_1$  a  $P_2$  by mala byť vzdialenosť rovná alebo menšia ako jedna pätina vzdialenosti medzi  $C_1$  a  $C_2$  na počiatku merania [22].

Princíp výpočtu odporu pôdy opäť spočíva vo využití Ohmovho zákona. Odpor pôdy je priamo úmerný napätiu zmeranému napätovými elektródami a nepriamo úmerný prúdu zmeranému prúdovými elektródami.

Rezistivitu pôdy  $\rho$  vypočítame ako súčin odporu pôdy „ $R$ “ a prepočítavacieho koeficientu „ $m$ “ podľa nasledujúceho vzťahu [2]:

$$\rho = R.m \quad (3.3)$$

Kde:

$\rho$  - Rezistivita pôdy ( $\Omega.m$ )

$R$  - Nameraný zemný odpor ( $\Omega$ )

$m$  - Prepočítavací koeficient rešpektujúci rozloženie elektród (m)

Významným rozdielom oproti Wennerovej metóde je fakt, že pomocou Schlumbergerovej metódy nie je možné zmerať merný odpor vo väčšej hĺbke pomocou zmeny vzdialenosti medzi elektródami [23].

### 3.2.2 Prepočítavací koeficient

Hodnotu prepočítavacieho koeficientu pre výpočet rezistivity pôdy získanú prostredníctvom Schlumbergerovej metódy získame výpočtom rovnice č. 3.4 [2]:

$$m = \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{i^2}{u} - u \right) \quad (3.4)$$

Kde :

$i$  - Vzdialenosť vonkajších elektród od pomyselného stredu merania (m)

$u$  - Vzdialenosť vnútorných elektród od pomyselného stredu merania (m)

Niektoré zdroje uvádzajú i tabuľku s prepočítavacími koeficientmi v závislosti od rôznych hĺbok merania (vzdialeností „ $i$ “) a taktiež od rôznych vzdialeností „ $u$ “. Tieto tabuľky boli vytvorené za účelom uľahčenia výpočtu rezistivity pôdy. V tabuľke č. 3.4 môžeme vidieť hodnoty prepočítavacieho koeficientu do hĺbky štyroch metrov.

Tab. 3.4: Hodnoty prepočítavacieho koeficientu v závislosti na vzdialenostiach jednotlivých elektród od pomyselného stredu merania [3]

$i$ (m)	$u$ (m)	$m$ (m)
1	0.25	5.9
2	0.50	11.8
3	0.50	27,5
4	0.50	49,5

### 3.2.3 Presnosť merania rezistivity pôdy

Jedným z najdôležitejších parametrov pre presnosť merania je vzdialenosť (rozteč) medzi jednotlivými elektródami. Zdroj [9] uvádza, že meracia skupina je povinná používať na meranie vzdialenosti pomôcky ako napr. meter alebo etalón dĺžky.

Výsledky z merania rezistivity pôdy môžu byť negatívne ovplyvnené aj rušivými signálmi (bludnými prúdmi), nachádzajúcimi sa v meranom zemnom systéme. O BP pojednáva norma ČSN 33 2000-5-52, ktorá vymedzuje tento pojem na také prúdy, ktoré pretekajú v blízkosti umelých zdrojov elektrického prúdu. Napr. v priemyselných objektoch. V blízkosti stĺpov VN atď. môžu zemné prúdy dosahovať značných hodnôt. Čo sa týka použitého zdroja pri meraní, nemala by frekvencia zdroja byť 50 Hz alebo násobok základnej harmonickej. Podobne prístroj pre meranie napätia by mal na zabezpečenie preventívneho opatrenia obsahovať selektívny filter, pre meranie napätia výhradne príslušnej frekvencie [9]. Aby nenastala závislosť merania na objektoch uložených v zemi, je potrebné, aby elektródy boli zarazené od ľubovoľného objektu v zemi (stožiar, uzemňovací pás, a pod.) v horizontálnej vzdialenosti min. na vzdialenosť rozteče elektród. Rovnaké pravidlo platí i pre náhle zmeny terénu. Z tohto tvrdenia vyplýva, že ak je rozteč elektród napr. 3 m, je potrebné dodržať minimálne vzdialenosť 3 m od kraja náhle zmeny terénu [9]. Pre elimináciu chýb interpretácie výsledkov je odporúčané vykonávať jednotlivé merania rezistivity pôdy vždy pri rovnakých poveternostných podmienkach [29].

## 4 Horizontálne modely pôdy

Účelom tejto kapitoly je oboznámiť čitateľa s problematikou týkajúcou sa náhrady pôdneho priestoru tzv. horizontálnymi modelmi. Dôvodom takéhoto postupu je skutočnosť, že v reálnych podmienkach sa zväčša stretávame s tým, že hodnota rezistivity pôdy sa mení v závislosti od hĺbky.

V praxi je najčastejšie používaný jednovrstvový a dvojvrstvový horizontálny model. Dostupná je však náhrada aj prostredníctvom viacvrstvého (troj, štvor, päť atď.) horizontálneho alebo vertikálneho modelu či modelu so šikmým delením. Ďalšou variantou je tiež náhrada pôdneho priestoru prostredníctvom jednovrstvého modelu s nehomogenitami atp.

Za zámerom *jednoduchého* analytického riešenia, sa vo výpočtoch predpokladá *homogénna* vodivosť pôdy. Druhou možnosťou je brať v úvahu *heterogénne* pôdne prostredie. Heterogénne prostredie potom rozkladáme zväčša do *horizontálnych pôdnych vrstiev* s odlišnými a výrazne ohraničenými vodivosťami [2].

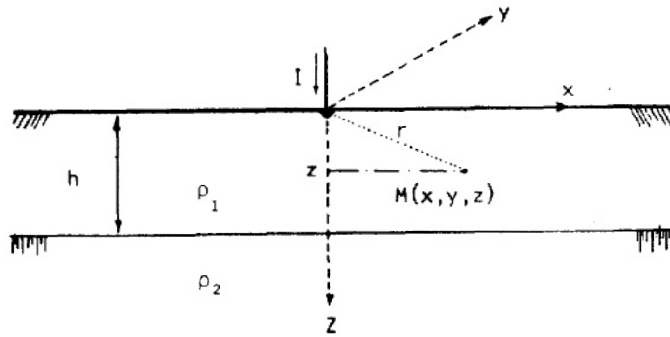
### 4.1 Jednovrstvový model

Predstavuje najzákladnejší model pôdy, v ktorom sa predpokladá homogénny pôdny priestor. Z tejto skutočnosti potom vyplýva, že na rezistivitu pôdy sa nazerá ako na skalárnu veličinu a v prípade, že intenzita elektrického poľa neprevyšuje prierny gradient pôdy pokladáme ju za konštantu [2].

### 4.2 Dvojvrstvový model

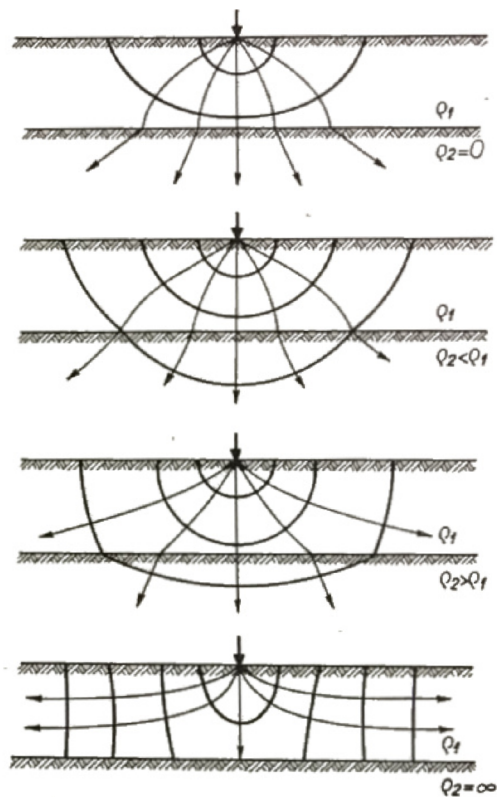
Ako sme sa už mohli dočítať, vo väčšine prípadov je merný odpor pôdy horných a spodných vrstiev rôzny. Často sa teda jeho hodnota mení s hĺbkou. Môžeme sa stretnúť s prípadmi, kedy vysoká hladina spodnej vody spôsobuje, že merný odpor hornej (povrchovej) vrstvy je väčší než spodnej. Alebo naopak, že pod hornou vrstvou leží veľmi zle vodivé skalnaté podložie. Ďalším faktorom podieľajúcim sa na rôznych hodnotách vodivosti jednotlivých vrstiev môžu byť atmosferické vplyvy, ako napr. vysušovanie alebo zamrznutie pôdy. Atmosferické vplyvy pôsobia dočasne, oproti napr. skalnatému podložíu ktoré ovplyvňuje hodnotu dlhodobo [2].

Pre dvojvrstvový model platí, že horná horizontálna vrstva pôdy má hrúbku  $h$  a merný odpor  $\rho_1$ . Spodná vrstva má nekonečnú hodnotu hrúbky a merný odpor  $\rho_2$ . Rozloženie vrstiev tohto modelu je patrné z obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Dvojvrstvový model pôdneho priestoru [23]

Na obr. č. 4.2 môžeme vidieť tvar poľa pre rôzne pomery  $\rho_2/\rho_1$ . Predpokladom je, že sa jedná o bodovú elektródu tzn., že jej rozmery sú malé oproti hĺbke zarazenia „ $h$ “. Podľa rozdielnych tvarov jednotlivých polí si môžeme všimnúť, že gradienty potenciálu v okolí elektródy budú pre rôzne pomery rezistív odlišné. Gradienty sú väčšie v prípade, kedy je povrch vodivejší ako podložie [2].



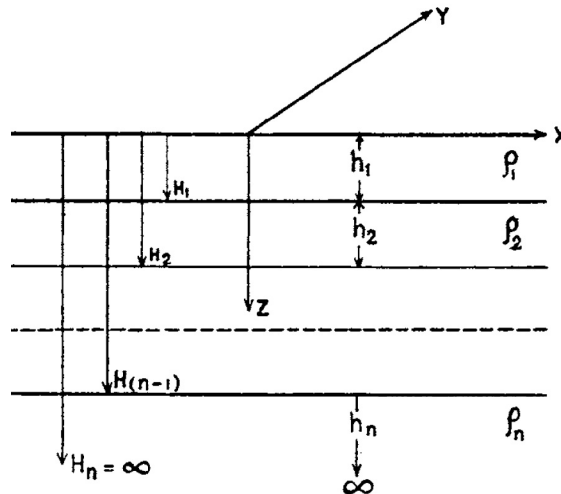
Obr. 4.2: Pole bodovej elektródy pre rôzne hodnoty pomerov rezistív vrstiev [2]



Osolsobě (1964, s. 715) „špatně vodivá horní vrstva má na celkový zemní odpor větších zemničů menší vliv. Výpočty ukazují, že u rozsáhlých zemničů zvětšuje horní špatně vodivá vrstva odpor tak málo, že se nevyplatí zakopávat zemniče až do dolní lépe vodivé vrstvy, neboť nepatrné zmenšení odporu nevyváží náklady spojené s hlubokým zakopávaním.“

### 4.3 Viacvrstvý model

Pre viacvrstvý horizontálny model platí, že celý vyšetřovaný pôdny priestor je nahradený niekoľkými horizontálnymi vrstvami pôdy s rôznymi hodnotami merného odporu (tj.  $\rho_1, \rho_2$  až  $\rho_n$ ). Vrstvy s merným odporom  $\rho_1, \rho_2$  až  $\rho_{(n-1)}$  majú hrúbku  $h_1, h_2$  až  $h_{n-1}$ . Spodná vrstva má nekonečnú hodnotu hrúbky  $h_n = \infty$  a merný odpor  $\rho_n$ . Rozloženie jednotlivých vrstiev tohto modelu môžeme vidieť na obrázku č. 4.3 [28].



Obr. 4.3: Viacvrstvý model pôdneho priestoru [28]

## 5 Krokové a dotykové napätie

Pri vykonávaní merania merného odporu pôdy tečú pôdnym priestorom a tým pádom zemným odporom *zväčša striedavé* prúdy rádovo v jednotkách ampérov. Pri tomto počíne vzniká v pôde úbytok napätia (princíp merania rezistivity pôdy) a to môže mať za následok vznik zdraviu **nebezpečných krokových napätí**.

Okrem tohto sa počas merania rezistivity *môže* na meracích elektródach vyskytnúť **nebezpečná hodnota dotykového napätia**. V našom prípade injektáž prúdu do pôdy zabezpečuje prúdový AC výstup meracieho prístroja OMICRON CPC 100. Hodnota napätia zo spomínaného výstupu môže dosiahnuť maximálne napätie 130 V a maximálna hodnota prúdu môže byť 6 A. Tento výstup je počas merania pripojený k vonkajším meracím elektródam  $C_1$  a  $C_2$  [24].

### 5.1 Definícia krokového napätia

Za predpokladu, že sa určitá osoba nachádza v blízkosti elektródy a z jej povrchu vyteká do zeme elektrický prúd, tak pri kroku preklenie rôzne hodnoty potenciálov. Ich rozdiel potom nazývame krokové napätie  $U_k$ , pričom jeho hodnota závisí na vzdialenosti  $x$  od stredu elektródy a dĺžke kroku. Väčšinou sa stretávame s hodnotou dĺžky kroku 1 m [14]. Niektorí autori uvádzajú aj iné hodnoty ako 0,75 m a pod.

Definícia krokového napätia  $U_k$  podľa európskej normy ČSN EN 50522 je nasledovná. „*Krokové napätie je napätie medzi dvoma bodmi zemského povrchu vzdialených od seba 1 m, čo je považované za dĺžku jedného kroku človeka* [33].“

### 5.2 Výpočet krokového napätia

Teória vstupu elektrického prúdu do zeme a jeho šírenie zemou tvorí základ nie len pre návrh a realizáciu uloženia zemničov. Pre získanie najjednoduchšieho výpočtu je potrebné zvoliť prúdové pole pologuľovej elektródy na povrchu zeme. vid. obr. 5.1.

V prípade, že z povrchu pologule vyteká do zeme elektrický prúd  $I$  (A), v zemi vo vzdialenosti  $x$  (m) od stredu pologule je prúdová hustota  $\sigma$  ( $\text{Am}^{-2}$ )[14].

$$\sigma = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot x^2} \quad (5.1)$$

Vo vzdialenosti  $x$  od stredu elektródy je intenzita elektrického poľa [14]:

$$E = \rho \sigma = \frac{\rho I}{2 \cdot \pi \cdot x^2} \quad (5.2)$$

Kde pre vzťah 5.2 platí:

$E$  - Intenzita elektrického poľa ( $\text{Vm}^{-1}$ )

$\rho$  - rezistivita pôdy ( $\Omega \cdot \text{m}$ )

Napätie  $U$  (V) medzi miestom o vzdialenosti  $x$  a povrchom  $r$  [14]:

$$U = \int_r^x E dx = \frac{\rho I}{2\pi} = \int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (5.3)$$

Celkové napätie (V) na zemniči (celkový potenciál elektródy) [14]:

$$U_0 = \int_r^\infty E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - 0 \right) = \frac{\rho I}{2\pi \cdot r} \quad (5.4)$$

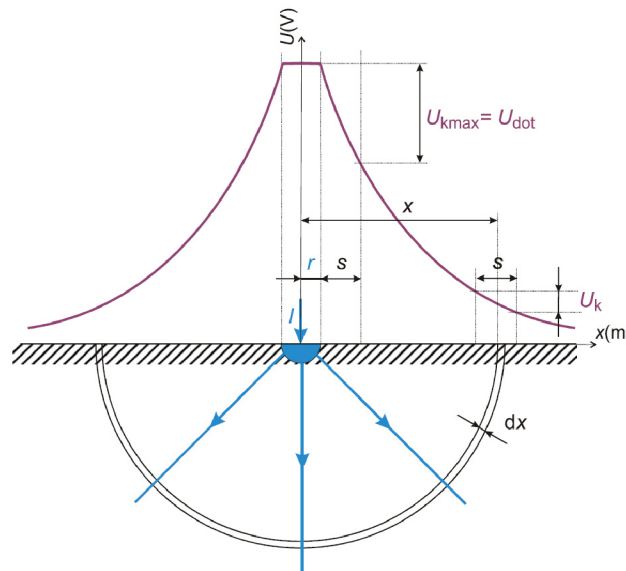
Zemný odpor  $R$  ( $\Omega$ ) elektródy v tvare pologule [14]:

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r} \quad (5.5)$$

$$U_k = \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{x-\frac{s}{2}} - \frac{1}{x+\frac{s}{2}} \right) \quad (5.6)$$

Práve vo vzdialenosti  $x = r + s/2$  od stredu zemniča sa nachádza maximálna hodnota krokového napätia  $U_k, \text{max}$ .

$$U_{k\text{max}} = U_{\text{dot}} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{s}{r^2 + s \cdot r} \quad (5.7)$$



Obr. 5.1: Pologulová elektróda s vytekajúcim elektr. prúdom  $I$  do zeme [14]

## 5.3 Definícia dotykového napätia

Definícia dotykového napätia  $U_T$  ( $U_{dot}$ ) podľa európskej normy ČSN EN 50522 je nasledovná: „*napätie medzi vodivými časťami, ktorých sa človek alebo zviera dotýka súčasne* [33].“

Dotyk so živou časťou elektrického obvodu môže spôsobiť úraz elektrickým prúdom. Vzhľadom na túto skutočnosť je dôležité vedieť, čo ho môže spôsobiť [26]:

- Dotyk so živou časťou.
- Súčasný dotyk častí s rôznymi potenciálmi.
- Dotyk s neživou časťou, ktorá sa v dôsledku poruchy stala nebezpečnou živou časťou.

V dôsledku vyššie uvedených bodov začne telom človeka prechádzať elektrický prúd. Účinky elektrického prúdu na ľudský organizmus závisia od [26]:

- Veľkosti a druhu elektrického prúdu.
- Odporu kladeného postihnutými tkanivami tela.
- Cesty vstupu a dráhy elektr. prúdu telom.
- Trvania kontaktu s elektrickým okruhom.

## 6 Meracie prístroje

Na trhu sa momentálne nachádza široká škála meracích prístrojov, ktoré možno využiť pre meranie rezistivity pôdy. Cena takýchto zariadení je pri mnohých z nich dostupná až po vyžiadaní cenovej ponuky. Tie najlacnejšie sa pohybujú rádovo v tisícoch korún. Profesionálne multifunkčné testovacie sady však môžu dosiahnuť cenu niekoľko sto tisíc.

V tejto kapitole si predstavíme dva meracie prístroje, ktoré boli použité pre účel tejto práce. Prvým prístrojom bude revízny prístroj EUROTTEST 61557 od spoločnosti METREL. Jedná sa o cenovo dostupnejší prístroj. Podrobnejšie sa zameriame na univerzálnu testovaciu sadu určenú primárne na injektáž pre zariadenia v trafostanici od spoločnosti OMICRON electronics. Konkrétne na model CPC 100. Tento prístroj spadá do vyššej cenovej kategórie, my ho však máme k dispozícii pre meracie účely v laboratórnych priestoroch. Okrem iného predstavuje základný článok pre splnenie jedného z cieľov tejto práce, ktorým je návrh a realizácia meracieho a vyhodnocovacieho systému určeného k plošnému meraniu merného elektrického odporu pôdy.

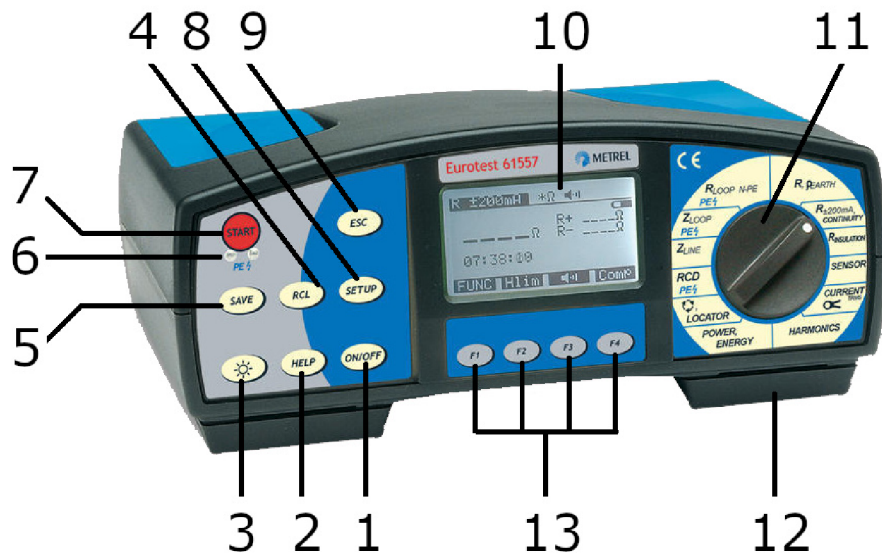
Oba meracie prístroje majú svoje špecifické vlastnosti. Popis jednotlivých funkcií oboch prístrojov a ich vzájomné porovnanie môže byť výhodné, pretože prináša informácie o jednotlivých výhodách a nevýhodách použitia konkrétneho prístroja pre meranie merného odporu pôdy. Navyše využitie viacerých prístrojov pre meranie umožňuje porovnanie interpretovaných výsledkov.

### 6.1 METREL - EUROTTEST 61557

Merací prístroj METREL EUROTTEST 61557 je profesionálny multifunkčný prístroj, ktorý so svojimi parametrami vyhovuje požiadavkám normy EN 61557 ale hlavne umožňuje meranie merného odporu pôdy pomocou Wennerovej metódy, čo predstavuje prínos pre účely tejto práce. Elektrické obvody prístroja sú vybavené SMD súčiastkami a aj vďaka tomu dosahuje nízku hmotnosť (bez príslušenstva s batériami 2,1 kg). Vďaka jeho hmotnosti a rozmerom 265x110x185 mm sa ľahko prenáša. Veľkou výhodou je aj to, že na jeho ovládanie nie sú potrebné školenia (okrem pozorného prečítania návodu) [30].

V prípade potreby uchovania výsledkov z merania je užívateľovi dostupná zabudovaná pamäť prístroja, ktorá dokáže uložiť výsledky z 3000 meraní. Počítačový SW umožňuje prenos údajov medzi prístrojom a PC, ďalej ponúka tvorbu protokolov z meraní. Pripojenie sa realizuje pomocou komunikačného rozhrania RS 232 [30].

### 6.1.1 Obsluha prístroja - ovládanie



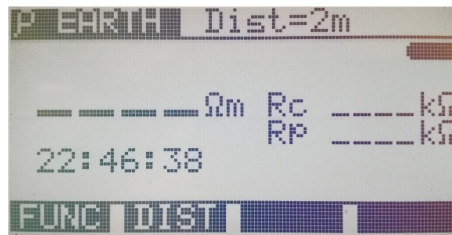
Obr. 6.1: Predný panel prístroja EUROTTEST 61557 a jeho popis [30]

Legenda k obr. č. 6.1 [30]:

- 1 - ON/OFF - zapnutie a vypnutie prístroja
- 2 - HELP - zobrazenie schémy zapojenia a iných údajov
- 3 - Svetlo - podsvietenie displeja.
- 4 - RCL - vyvolanie uložených údajov
- 5 - SAVE - uloženie výsledkov merania
- 6 - PE - test PE spojenia
- 7 - START - spustenie merania
- 8 - SETUP
- 9 - ESC - ukončenie začatej činnosti
- 10 - Maticový LCD s podsvietením
- 11 - Rotačný prepínač funkcií
- 12 - Úchyty pre uchytenie pásu
- 13 - Funkčné tlačidlá - výber parametrov pri každej funkcií

Napájanie prístroja je zabezpečené pomocou batérií (4x1,5 V - IEC LR14) a nevyžaduje tak pripojenie do elektrickej siete NN. Táto skutočnosť predstavuje veľkú výhodu, pretože meranie merného odporu častokrát vykonávame na miestach, kde elektrická sieť nieje dostupná.

Po zapnutí prístroja (**ON/OFF**) nastavíme prepínač do polohy **R,  $\rho$  EARTH**. Následne tlačidlom **FUNC (F1)** zvolíme  **$\rho$  EARTH**. Na displeji sa nám zobrazí záložka pre meranie rezistivity pôdy (viď obr. č. 6.2).



Obr. 6.2: Displej prístroja zobrazujúci záložku pre meranie rezistivity

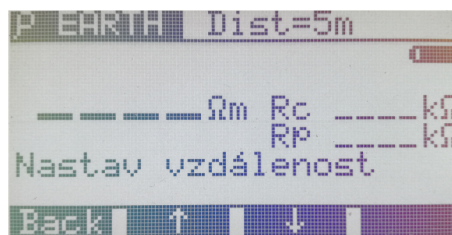
Kde:

$R_c$  - Odpor prúdovej sondy

$R_p$  - Odpor potenciálovej sondy

Hodnota vzdialenosti (rozostupu) jednotlivých elektród ktorá sa zobrazí, je hodnotou nastavenou pri poslednej manipulácii s prístrojom. To sa hodí v prípade, že vytvárame sériu meraní rezistivity pre rôzne rozostupy meracích elektród. Naproti tomu, hodnota prúdu injektovaná do pôdy sa nedá nastaviť.

Zmenu rozostupu elektród „ $a$ “ vykonáme prostredníctvom tlačidla **DIST (F2)**. Po jeho stlačení sa zobrazí menu:

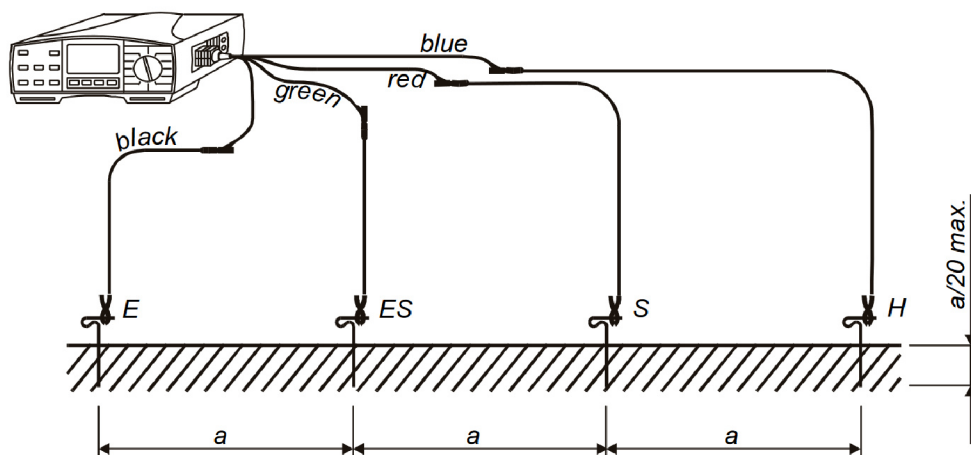


Obr. 6.3: Displej prístroja zobrazujúci záložku pre nastavenie vzdialenosti sond

Prístroj umožňuje nastavenie vzdialenosti rozostupu od 1 m až po 30 m s krokom jeden meter. Toto nastavenie vykonáme tlačidlom **DIST (F2)**. Zvolená vzdialenosť sa zobrazuje v hornej časti displeja. Po nastavení potrebnej vzdialenosti sa tlačidlom **BACK (F1)** vrátíme do predchádzajúceho menu.

## Schéma zapojenia prístroja

Ďalším krokom je nutnosť pripojenia meracích káblov k meracím sondám zaradeným do pôdy a k prístroju. Zapojenie tohto prístroja pre meranie rezistivity pôdy pomocou Wennerovej metódy môžeme vidieť na obr. č. 6.4. V prípade, že užívateľovi nieje dostupná pri vykonávaní merania rezistivity pôdy príručka obsahujúca schému zapojenia, môže si ju zobraziť na displeji prístroja. Pre tento počin je potrebné stlačiť v karte pre meranie merného odporu tlačidlo **HELP**.



Obr. 6.4: Pripojenie meracích káblov a sond k meraciemu prístroju [30]

Pre spustenie merania je potrebné stlačiť **START** a podržať ho, pokiaľ sa výsledok neustáli. Nameraná hodnota zostane zobrazená na displeji prístroja.



Obr. 6.5: Príklad výsledku z merania rezistivity pôdy EUROTTEST 61557

### 6.1.2 Technické parametre

Maximálna hodnota merného odporu, ktorú prístroj nameria je 20 kΩm. Ak je výsledok mimo rozsah (napr. rozpojený obvod) zobrazí sa hlásenie **>20kΩm**. Technické parametre prístroja EUROTTEST 61557 sú uvedené v tabuľke č. 6.1

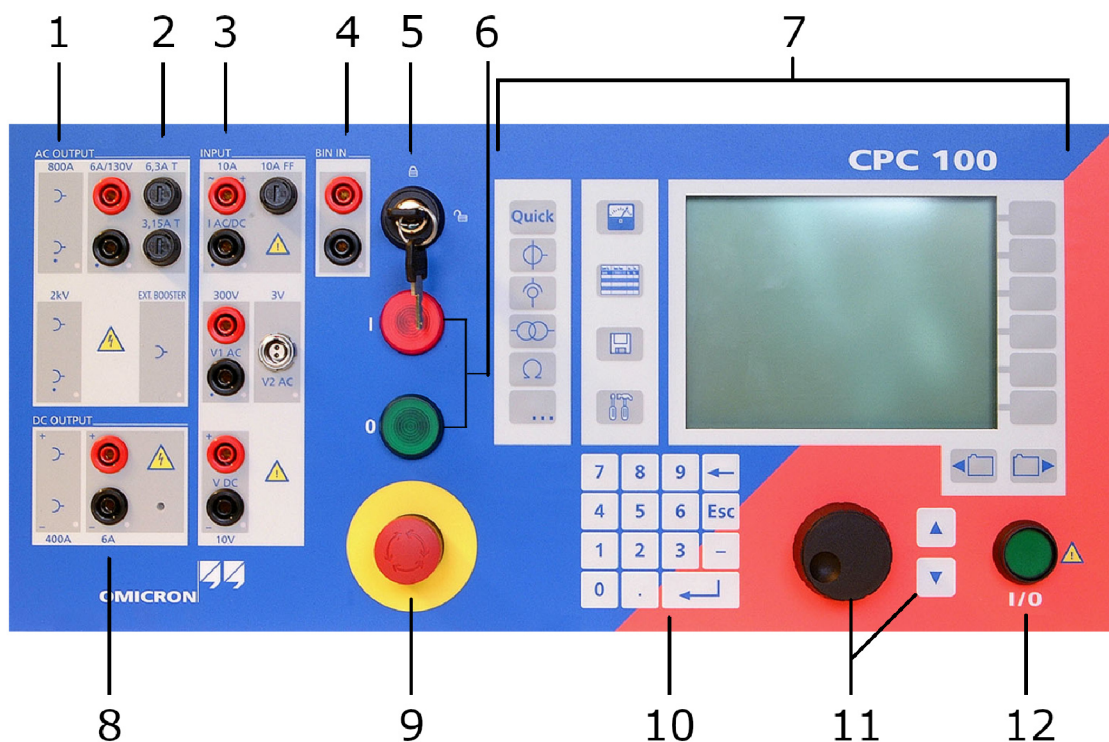


Tab. 6.1: Všeobecné technické parametre prístroja EUROTTEST 61557 [30]

Ochranná trieda	Dvojitá izolácia
Kategória	CAT III/300V alebo CATII/600V
Krytie	IP 44
Rozsah pracovných teplôt	0 - 40 °C
Nominálna pracovná teplota	10 - 30 °C
Maximálna vlhkosť	85 % RH (0 - 40 °C)
Nominálna vlhkosť	40 - 60 % RH

## 6.2 OMICRON - CPC 100

Model CPC 100 predstavuje univerzálnu testovaciu sadu určenú hlavne pre prvky rozvodne. Veľkou výhodou tejto patentovanej univerzálnej testovacej sady je, že dokáže nahradiť niekoľko individuálnych testovacích zariadení. Z tejto skutočnosti vyplýva, že okrem iného znižuje náklady na preškolenie obsluhy a skracaje čas testovania. Obsluha môže funkcie prístroja ovládať prostredníctvom integrovaného predného panela vid' obr. č. 6.6 alebo časť funkcií pomocou softvéru PTM (Primary Test Manager) priamo z počítača [10].



Obr. 6.6: Predný panel prístroja CPC 100 a jeho popis [24]

Legenda k obr. č. 6.6 [24]:

- 1 - AC výstup 6A alebo 130V, (chránený poistkou)
- 2 - Poistky pre 6A AC a 6A DC výstupy
- 3 - Vstupy pre meranie
- 4 - Binárne vstupy
- 5 - Bezpečnostný zámok, uzamykatelný prepínač
- 6 - Kontrolky, bezpečná prevádzka (zelená svieti), nebezpečná (červená bliká)
- 7 - Vstavateľný ePC
- 8 - DC output 6A
- 9 - Núdzové tlačidlo
- 10 - Membránová klávesnica
- 11 - Ovládacie prvky pre navigáciu
- 12 - START/STOP TEST

### 6.2.1 Odvetvia použitia

Merací prístroj CPC 100 je možné použiť v týchto odvetviach [10]:

- Testovanie výkonových transformátorov
- Testovanie meracích transformátorov
- Testovanie ističov a rozvádzačových systémov
- Testovanie a monitorovanie káblov
- Testovanie a monitorovanie rotačných strojov
- Testovanie prenosového vedenia (linky)
- Testovanie uzemňovacieho systému

Pre naše záujmy je dôležitý posledný bod použitia prístroja CPC 100 (testovanie uzemňovacieho systému). Do tejto kategórie spadajú dve podkategórie. Patrí sem meranie krokového/dotykového napätia a meranie rezistivity pôdy.

### 6.2.2 Meranie rezistivity pôdy s CPC 100 (Wennerova metóda)

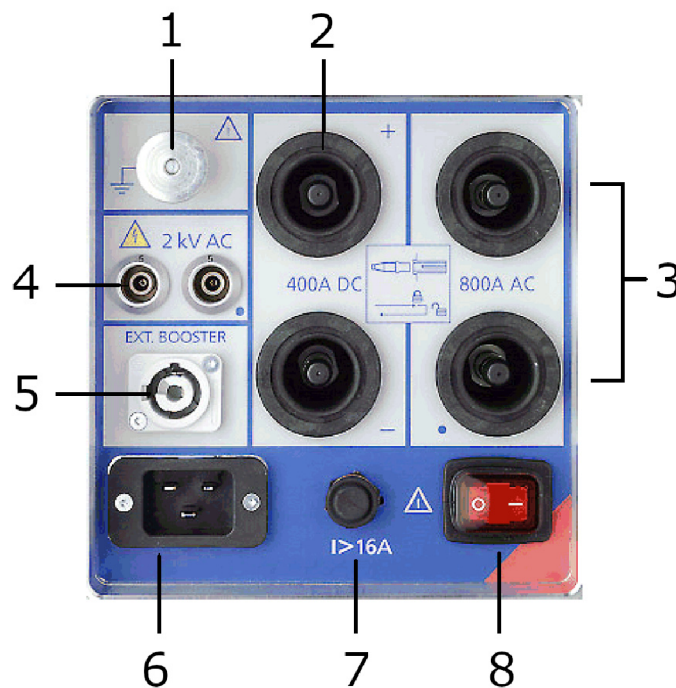
Prístroj CPC 100 je navrhnutý tak, aby pri meraní rezistivity pôdy využíval Wennerovu metódu. Teoretické informácie týkajúce sa merania rezistivity pôdy pomocou Wennerovej metódy sa nachádzajú v podkapitole 3.1. S rozstupom „ $a$ “ je pri vykonávaní merania zmeraná stredná hodnota merného odporu pôdy medzi pomocnými elektródami „ $U$ “, až do hĺbky „ $a$ “. Preto zmena rozostupu „ $a$ “ jednotlivých elektród spôsobí zmenu hĺbky objemu, pre ktorý sa meria hodnota merného odporu pôdy [24].



Z obrázku č. 6.7 je patrné, že pri meraní rezistivity pôdy je aktívny výstup „AC 6 A/130 V“. Pri meraní tento výstup zabezpečuje injektáž striedavého prúdu do pôdy prostredníctvom vonkajších (prúdových) meracích elektród. Tento výstup je chránený poistkou 6,3 A T. Skutočnosť, že je schopný poskytnúť maximálny prúd 6 A a napätie 130 V využijeme pri návrhu, realizácii ale hlavne *dimenzovaní* zariadenia zabezpečujúceho prepínanie jednotlivých elektród pri využití prístroja CPC 100 na plošné meranie rezistivity pôdy. Pre meranie úbytku napätia prostredníctvom vnútorných meracích elektród sa využije konektor prístroja „V1 AC“ vzniknutého v pôde, pri toku striedavého prúdu vonkajšími elektródami. Pri veľkých slučkových odporoch, prípadne pri rozpojenom meracom obvode sa na výstupe prístroja 6A AC môže vyskytnúť nebezpečné napätie [24]!

### Bočný panel prístroja

Pre realizáciu merania rezistivity pôdy sa využijú tri prvky bočného panelu CPC100 a to konkrétne zemniaca svorka, konektor pre pripojenie k napájajúcej sieti a sieťový vypínač. Uzemnenie prístroja musí byť realizované prostredníctvom zemniacej svorky a vodiča o priereze minimálne  $6 \text{ mm}^2$ . Prístroj sa za žiadnych okolností nesmie prevádzkovať bez spoľahlivého uzemnenia zemniacim vodičom [24]! Vzhľad bočného panelu vyšetřovaného prístroja môžeme vidieť na obr. č. 6.8.



Obr. 6.8: Bočný panel prístroja (vysokonapätové a vysokoprúdové výstupy [24])

Legenda k obr. č. 6.8 [24]:

- 1 - zemniaca svorka
- 2 - prúdový výstup DC (400 A)
- 3 - prúdový výstup AC (800 A)
- 4 - vysokonapäťový výstup AC (2 KV)
- 5 - rozširujúci booster napr. pre pripojenie rozširujúceho prúdového zosilňovača
- 6 - konektor pre pripojenie k napájacej sieti 85 V - 264 V AC, 1 fázové
- 7 - automatický vypínač
- 8 - sieťový vypínač ZAP/VYP

### 6.2.3 Manuálna obsluha CPC 100 a možnosti automatizácie

**1. Využitie meracej karty „RGround“:** V OS prístroja CPC 100 sa pre každé odvetvie jeho použitia nachádzajú tzv. meracie karty. Meracie karty predstavujú najjednoduchší spôsob manuálneho nastavenia, o ktorom sa pojednáva aj v manuáli prístroja. Každá meracia (testovacia) karta uskutočňuje špecifickú skúšku. Napr. pre meranie merného odporu pôdy slúži karta s názvom „RGround“. U každej z dostupných kariet je možné nastaviť určité parametre merania. Možnosti nastavenia parametrov závisia od typu zvolenej karty. Karta „RGround“ ponúka zmenu (nastavenie) parametrov veľkosti menovitého skúšobného prúdu a frekvencie menovitého skúšobného prúdu pre potlačenie interferencie potenciálnych bludných prúdov tečúcich pôdou. Na tejto karte sa nachádzajú aj údaje, ktoré sa zobrazia a variujú počas merania a ostatné nemenné až po ukončení merania. Jedná sa o aktuálnu efektívnu hodnotu testovacieho prúdu, efektívnu hodnotu napätia meraného medzi pomocnými napäťovými elektródami, vypočítanú činnú a jalovú zložku zemnej impedancie. Vyobrazenie tejto karty je možné vidieť na obr. č. 6.9.

RWinding	TRTapCheck	<b>RGround</b>	Commer	Insert Card
I test:	1.000 A			Delete Card
f:	128.00 Hz			Rename Card
I RMS:	879.0 mA			Clear Results
V RMS:	474.5 mV	7.60 °		Save As Default
R(f):	228.3 mΩ	X(f):	21.93 mΩ	
Assessed: n/a				

Obr. 6.9: Karta s parametrami pre meranie rezistivity pôdy - CPC 100 [24]

Legenda k obr. č. 6.9:

I test - menovitý testovací proud (A)

f - frekvencia testovacieho prúdu (Hz)

I RMS - aktuálna efektívna hodnota testovacieho prúdu (A)

V RMS - efekt. hodnota napätia meraného medzi napäťovými elektródami (V)

R(f) - vypočítaná hodnota činnej zložky impedancie ( $\Omega$ )

X(f) - vypočítaná hodnota jalovej zložky impedancie ( $\Omega$ )

Po zapnutí prístroja je prednastavenou kartou karta s názvom „Quick“. Túto kartu môžeme ignorovať alebo jednoducho zmazať pre lepšiu prehľadnosť a orientáciu v prostredí prístroja. Pre výber karty „RGround“ by sme mali dodržať nasledujúci postup. Pomocou vodorovne orientovaných tlačidiel nachádzajúcich sa vpravo od displeja zvolíme „Insert card“. Následne sa na displeji zobrazia zložky odpovedajúce jednotlivým typom meraní. Pomocou tlačidiel „Up“ a „Down“ vyberieme zložku s názvom „R (Resistance)“ a potvrdíme tlačidlom „Enter“. Následne obdobným spôsobom zvolíme spomínanú kartu „RGround“ odpovedajúcu meraniu rezistivity pôdy.

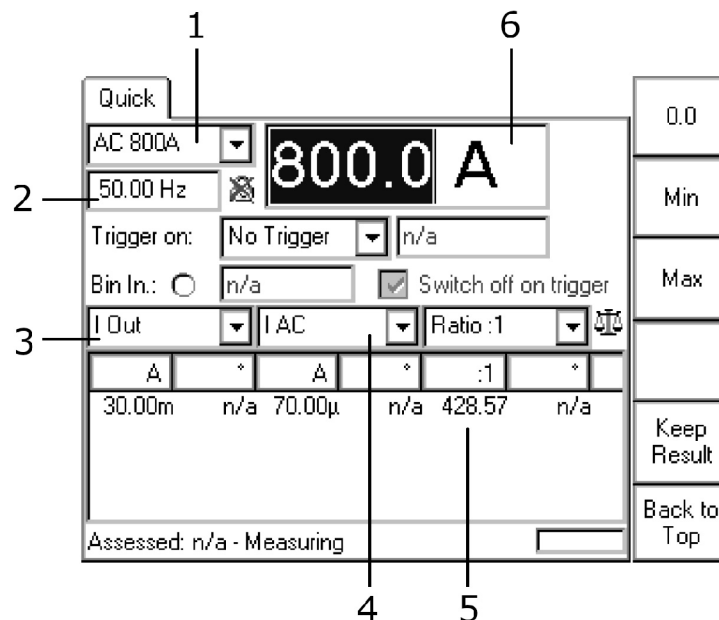
Ako už bolo spomenuté, v prostredí karty je užívateľovi umožnené nastavovať dva parametre (veľkosť menovitého skúšobného prúdu a jeho frekvenciu). Pokladáme za dôležité spomenúť, že ako prvé je potrebné nastaviť hodnotu frekvencie skúšobného prúdu. Zmena veľkosti skúšobného prúdu môže byť vykonaná až po tom, ako užívateľ nastaví frekvenciu a stlačí tlačidlo „START/STOP TEST“. Informácia o tomto postupe absentuje v manuály, čo môže viesť k tomu, že užívateľovi môže dlhšiu dobu trvať, kým na tento postup príde sám. Hodnota frekvencie by sa podľa [24] nemala rovnať 50 a 60 Hz. Z teórie však vieme, že jej hodnota by sa nemala rovnať ani násobkom harmonických zložiek, pretože pri meraní môže nastať ovplyvnenie blúdivými prúdmi s rovnakou frekvenciou. Prístroj má ako prednastavenú hodnotu frekvencie práve 128 Hz, čo predstavuje vyhovujúcu hodnotu. Užívateľovi je umožnené nastaviť minimálnu hodnotu frekvencie 15 Hz a maximálnu hodnotu 400 Hz. Zmena hodnoty môže byť vykonaná s krokom 0,01 Hz!

Po dodržaní bezpečnostných predpisov, nastavení jednotlivých parametrov merania, pripojení jednotlivých elektród podľa schémy na obr. č. 6.7 môže užívateľ pristúpiť k samotnému meraniu. Meranie sa spúšťa tlačidlom „START/STOP TEST“. Po jeho stlačení sa na displeji okamžite zobrazia hodnoty veličín (I RMS, V RMS, R(f) a X(f)). Hodnoty týchto veličín sa počas merania menia. Pre jednoduchú optickú indikáciu toho, či je prevádzka prístroja nebezpečná slúžia kontrolky na prednom paneli prístroja. Pri vykonávaní testu na čelnom paneli prístroja bliká červená výstražná kontrolka, indikujúca životu nebezpečné napätia alebo prúdy na výstupoch prístroja. Meranie R(f) a X(f) je frekvenčne neselektívne. Pre ukončenie merania sa

opäť použije tlačidlo „START/STOP TEST“. V prípade potreby núdzového zastavenia merania je k dispozícii tlačidlo „EMERGENCY BUTTON“.

Pre meranie rezistivity pôdy pri zarazení štyroch meracích elektród s určitým rozstupom „a“ je meranie prostredníctvom karty „RGround“ ideálnou voľbou. Jednoducho otvoríme kartu, nastavíme veľkosť a frekvenciu prúdu prechádzajúceho vonkajšími elektródami a meranie môže byť realizované. Pre plošné meranie rezistivity pôdy však nieje vhodná. Samozrejme sa naň môže využiť ale nepriniesla by možnosť automatizácie merania a urýchlenie celého procesu. V prípade série meraní by muselo byť manuálne otvorených, nastavených a spustených niekoľko kariet „RGround“. Zobrazenie niekoľkých kariet na displeji by mohlo viesť k maximálnej neprehľadnosti, pretože každá karta by mala rovnaký názov aj keď s rozdielnym indexom. Zmenu názvu jednotlivých kariet prístroj umožňuje ale pri množstve kariet je časovo náročná. Navyše pri využití kariet pre plošné meranie rezistivity by po každom meraní museli byť výsledky uložené jednotlivo alebo by si ich užívateľ musel odpísať.

**2. Využitie meracej karty „Quick“:** Využitie karty „Quick“ predstavuje najzákladnejší spôsob manuálneho ovládania prístroja CPC 100 prostredníctvom predného panelu. Užívateľovi umožňuje definovať veľké množstvo veličín a ich parametrov. Vytvára tak množstvo kombinácií. Vyobrazenie tejto karty je možné vidieť na obr. č. 6.10.



Obr. 6.10: Karta „Quick“ pre meranie definované užívateľom - CPC 100 [24]



Legenda k obr. č. 6.10:

- 1 - nastavenie výstupného rozsahu
- 2 - nastavenie frekvencie poprípade fázového uhlu
- 3 - prvá meraná veličina
- 4 - druhá meraná veličina
- 5 - tabuľka meraných hodnôt s výsledkami
- 6 - nastavenie výstupnej hodnoty

Karta „Quick“ je prednastavenou kartou prístroja CPC 100 ktorá sa zobrazí po jeho zapnutí a načítaní OS. Môže sa však stať, že ju nedopatrením zmažeme. V takomto prípade ju opäť aktivujeme stlačením tlačidla „Quick“ nachádzajúcim sa na vodorovne orientovaných tlačidlách vľavo od displeja. Pre využitie tejto karty na meranie rezistivity pôdy môžeme využiť nasledujúci postup. Pomocou navigačných prostriedkov prejdeme na prvé vodorovné pole „AC 800A“ (č. 1) vid. obr. 6.10. Zo zoznamu vyberieme „AC 6A“. Následne prejdeme na pole „50.00 Hz“ (č.2) a nastavíme frekvenciu (napr. 128 Hz). Obdobným postupom prestavíme pole v ľavej časti obrazovky „I Out“ (č.3) na „I AC“, pole v strede obrazovky „I AC“ (č.4) na „V1 AC“ a pole v pravej časti obrazovky „Ratio:1“ (č.5) na „R, X“. Je dôležité nastaviť pole v ľavej časti na „I AC“ a pole v strede obrazovky na „V1 AC“! Ak by sme tento postup nedodrжали, prístroj by neumožnil výber „R, X“ v pravom poli. Ako posledné nastavíme hodnotu prúdu. Pole „800.0“ (č.6) prestavíme na nami požadovanú hodnotu prúdu (napr. 4 A).

Meranie sa spúšťa tlačidlom „START/STOP TEST“. Po jeho stlačení sa na displeji okamžite zobrazia hodnoty veličín (I RMS, V RMS, R(f) a X(f)). Hodnoty týchto veličín sa počas merania menia. Pre „zmrazenie“ aktuálnych hodnôt je potrebné stlačiť tlačidlo „Keep Result“. Ako pre spustenie merania tak i pre jeho ukončenie sa použije tlačidlo „START/STOP TEST“. Nastavenie meracej karty „Quick“ pre meranie rezistivity pôdy je oproti meracej karte „RGround“ náročnejšie. Z toho vyplýva, že pre jedno meranie rezistivity pôdy so štyrmi elektródami je vhodnejšia karta „RGround“. Na rozdiel od nej karta „Quick“ umožňuje využiť tzv. „trigger“ a binárne vstupy „BIN IN“. To znamená, že umožňuje určité možnosti automatizácie spustenia a vypnutia merania prostredníctvom externého zariadenia. Z tohto dôvodu je vhodnejšia pre využitie na plošné meranie rezistivity pôdy. Veľmi dôležité je poznamenať, že túto kartu je možné prispôbiť podľa konkrétnych požiadaviek užívateľa a na displeji môže byť otvorená takmer v neobmedzenom počte.

**3. Využitie meracej karty „Sequencer“:** Podobne ako karta „Quick“ aj táto karta umožňuje užívateľovi prispôbiť jej nastavenia podľa požiadaviek na meranie a môže tak byť využitá na meranie merného odporu pôdy. Na rozdiel od



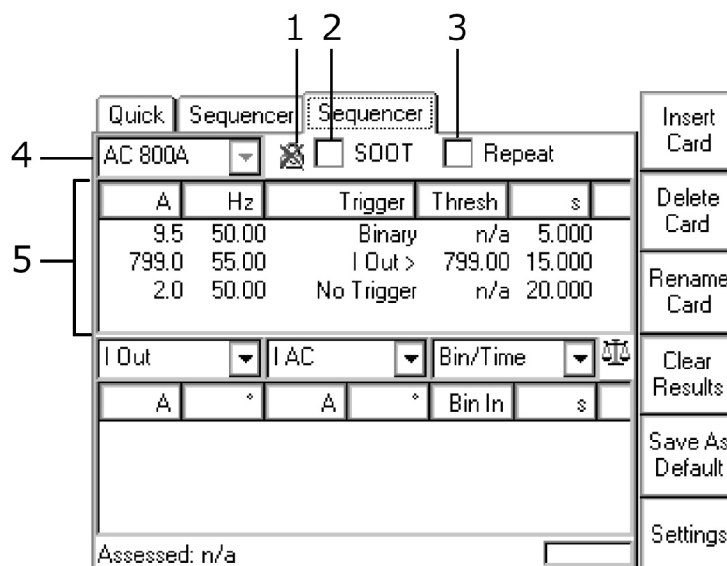
iných kariet, karta „Sequencer“ umožňuje po definovaní parametrov vytvoriť sekvenciu meraní. Táto skutočnosť ju dostáva do popredia nášho záujmu. Jednotlivé merania vo vnútri sekvencie sú uskutočňované jedno po druhom. Celkový počet meraní jednej sekvencie je však limitovaný na maximálne sedem meraní. Pri otvorení druhej karty „Sequencer“ a opätovnom definovaní parametrov merania sa celkový počet meraní zvýši na dvojnásobok (k tejto skutočnosti sa ešte vrátíme). Sekvencia meraní v danej karte môže byť spustená manuálne. Po spustení sekvencie pomocou tlačidla „START/STOP TEST“ sa okamžite spustí prvé meranie (zo siedmich nadefinovaných). Prvé meranie prebieha po dobu, ktorú užívateľ nastavil pre konkrétne meranie v karte „Sequencer“. Po uplynutí nastaveného času sa spustí druhé meranie, ktoré prebieha opäť po dobu, ktorú užívateľ nastavil pre toto meranie. Opísovaný princíp je aplikovaný na všetkých sedem meraní. Takýto prístup predstavuje určitý spôsob automatizácie merania. Pre našu úlohu však nieje vhodné spustenie a ukončenie daného merania po uplynutí definovaného času. V karte „Sequencer“ je podobne ako v karte „Quick“ možné využiť „trigger“ a binárne vstupy „BIN IN“, pomocou ktorých vieme meranie spustiť i ukončiť.

V prípade, že by vyšetrovaná karta umožňovala teoreticky neobmedzené množstvo meraní spúšťaných pomocou binárnych vstupov, bolo by možné plne automatizovať plošné meranie rezistivity pôdy. Keďže je celkový počet meraní jednej sekvencie obmedzený na maximálne sedem, musíme tento problém vyriešiť. Prvou možnosťou je rozšírenie pomocou tvorby a definovania parametrov novej (druhej karty „Sequencer“). Tento prístup však vyžaduje, po uskutočnení prvej série meraní pomocou automatiky manuálnu aktiváciu druhej karty „Sequencer“. Následne môžu byť opäť jednotlivé merania druhej série spúšťané pomocou binárnych vstupov a tým pádom aj vzdialene a automaticky. Druhou možnosťou je využiť tzv. „Repeater“ alebo teda „Opakovač“. Ten umožňuje to, že sekvencia meraní *sa nemusí* uskutočniť len raz od merania č. 1 až po meranie č. 7 ale, že sa môže trvalo opakovať [24]. Vyobrazenie tejto karty je možné vidieť na obr. č. 6.11.

Legenda k obr. č. 6.11:

- 1 - synchronizácia s V1 AC (vyžaduje až 200 ms)
- 2 - sekvencia sa preruší ak je, ak je splnená riadiaca podmienka
- 3 - Automatické spustenie sekvencie po jej ukončení (opakovanie sekvencie)
- 4 - voľba výstupného rozsahu
- 5 - tabuľka stavov (nastavenie špecifikácie užívateľom)

Pre využitie tejto karty na meranie rezistivity pôdy môžeme využiť nasledujúci postup. Pomocou navigačných prostriedkov prejdeme na prvé pole „AC 800A“ vid. obr. 6.11. Zo zoznamu vyberieme „AC 6A“. Následne prejdeme na pole „50.00 Hz“



Obr. 6.11: Karta „Sequencer“ - CPC 100 [24]

a nastavíme frekvenciu (napr. 128 Hz). Obdobným postupom prestavíme veľkosť prúdu. V prípade, že chceme využiť funkciu trigrovania pomocou binárnych vstupov, nastavíme pole „Trigger“ na „Binary“. Pole „Tresh“ ponecháme nastavené na „n/a“. Pole v ľavej časti obrazovky „I Out“ prestavíme na „I AC“. Pole v strednej časti „I AC“ prestavíme na „V1 AC“ a pole v pravej časti obrazovky „Bin/Time“ na „R, X“. Ak by sme tento postup nedodržali, prístroj by neumožnil výber „R, X“ v pravom poli „Bin/Time“.

Meranie sa spúšťa tlačidlom „START/STOP TEST“. Po jeho stlačení sa na displeji okamžite zobrazia hodnoty veličín (I RMS, V RMS, R(f) a X(f)). Hodnoty týchto veličín sa počas merania menia. Hodnoty ostanú nemenné až po ukončení daného merania prostredníctvom uplynutia nadefinovaného času užívateľom alebo prostredníctvom ovládania binárnymi vstupmi. Po ukončení celej série merania sa na displeji zobrazia výsledky z jednotlivých meraní. V tomto kroku môže užívateľ prístupiť buď k mechanickému prepísaniu jednotlivých výsledkov celej série merania na papier, v rešpektíve do elektronického zariadenia ako napr. PC, tablet, mobil a pod. alebo k uloženiu výsledkov priamo do pamäte prístroja. Ďalšou výhodou karty „Sequencer“ je, že uloženie výsledkov zo série meraní prebieha do jedného súboru vo formáte „xml“.

## **Uloženie výsledkov/šablóny z merania rezistivity pôdy CPC 100**

Po realizácii jednotlivých meraní (poprípade sekvencie meraní) sa odporúča name-  
rané hodnoty uložiť. Dôvodom je skutočnosť, že pri vypnutí prístroja alebo výpadku  
napájacieho zdroja sa neuložené výsledky merania stratia napriek tomu, že sú zo-  
brazené na displeji prístroja. V systéme súborov prístroja CPC 100 existujú tieto  
typy súborov [24]:

- name.xml
- name.xmt

Súbor s príponou „xml“ obsahuje informácie o skúške so všetkými obsiahnu-  
tými testovacími kartami a špecifickým nastavením. Tento súbor môže obsahovať aj  
výsledky skúšky a jej hodnotenie, ktoré bolo spoločne s nastaveniami uložené.

Súbor s príponou „xmt“ predstavuje šablónu skúšky. Jedná sa o užívateľsky defi-  
novateľnú šablónu, ktorá obsahuje jednu alebo viac testovacích kariet so špecifickým  
nastavením skúšky, avšak bez výsledkov skúšky!

## **Vyhodnotenie merania prostredníctvom prístroja CPC 100**

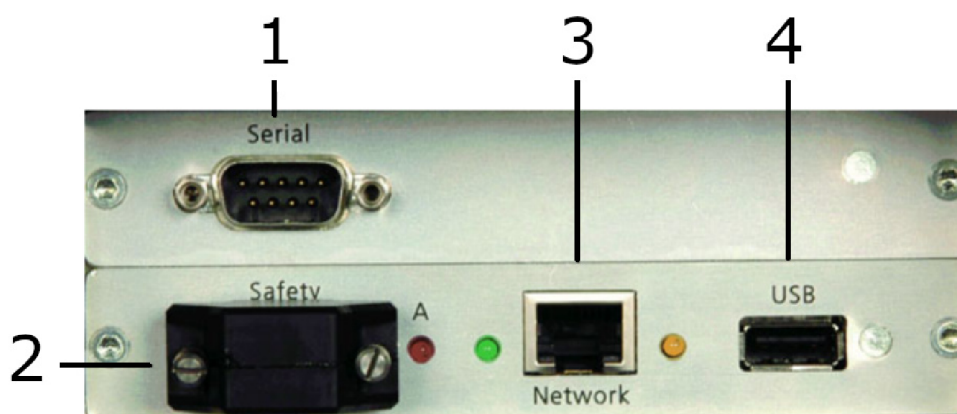
Vyhodnotenie merania je manuálny, užívateľom uskutočňovaný proces, ktorý je na všet-  
kých meracích kartách zhodný. Pre vyhodnotenie merania je potrebné, aby užívateľ  
zvolil ikonu nachádzajúcu sa v pravom dolnom rohu meracej karty. Jej vyobrazenie  
je možné vidieť na obr. č. 6.12 [24].



Obr. 6.12: Ikona pre vyhodnotenie merania [24]

### **6.2.4 Popis rozhraní prístroja CPC 100**

V tejto podkapitole si predstavíme „interface“ meracieho prístroja CPC 100, ktorý  
by eventuálne mohol prispieť k tvorbe meracieho a vyhodnocovacieho systému pre  
plošné meranie rezistivity pôdy. Na obr. 6.13 si môžeme všimnúť, že prístroj CPC 100  
ktorý je nám dostupný v laboratórnych priestoroch disponuje sériovým portom, ko-  
nektorom pre externé bezpečnostné funkcie, konektorom pre ethernet a USB konek-  
torom. Každý zo spomínaných konektorov bude bližšie popisovaný v nasledujúcom  
texte.



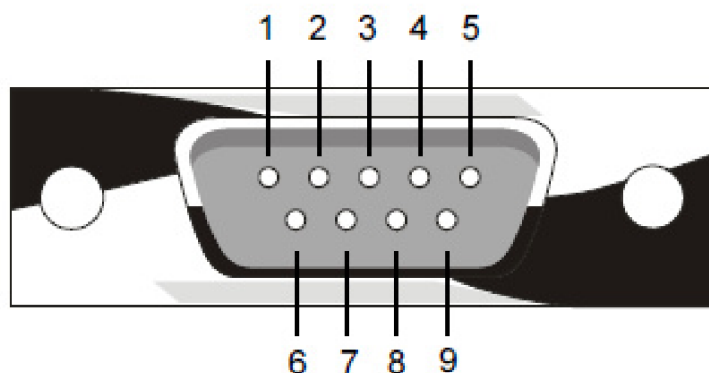
Obr. 6.13: ePC interface [24]

Legenda k obr. č. 6.13 [24]:

- 1 - Konektor sériového rozhrania na pripojenie testovacej sady CP TD1
- 2 - Konektor pre externé bezpečnostné funkcie
- 3 - Konektor RJ 45, pripojenie CPC 100 k PC alebo sieťovému rozbočovaču
- 4 - USB rozhranie CPC 100

### Popis jednotlivých pinov sériového rozhrania RS 232

Podľa zdroja [24] slúži sériový port pre pripojenie prístroja CPC 100 k prístroju CP TD1 a k ich vzájomnej komunikácii.



Obr. 6.14: Popis sériového rozhrania RS 232 [24]

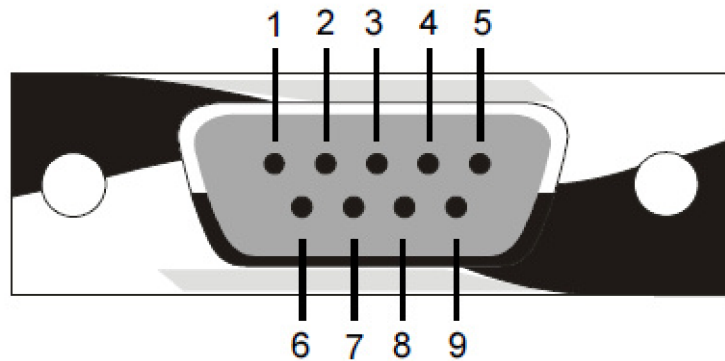
Legenda k obr. č. 6.14 [24]:

- 1 - Výstražné zelené svetlo (TTL level)
- 2 - Výstražné červené svetlo (TTL level)
- 3 - Tlačítko štart (N/O)

- 4 - Spoločný štart N/O a núdzové vypnutie (emergency stop)
- 5 - Núdzové vypnutie (emergency stop)
- 6 - Potenciál zeme (GND)
- 7 - Potenciál zeme (GND)
- 8 - Tlačidlo štart (N/C)
- 9 - Potenciál zeme (GND)

### Popis jednotlivých pinov konektoru pre bezpečnostné funkcie

Ku konektoru pre externé bezpečnostné funkcie môžu byť pripojené prístroje zabezpečujúce externé núdzové vypnutie prístroja CPC 100, externé tlačítko „bdelosť“, externé tlačítko pre „skúška start/stop“, externé výstražné žiarovky I/O [24].

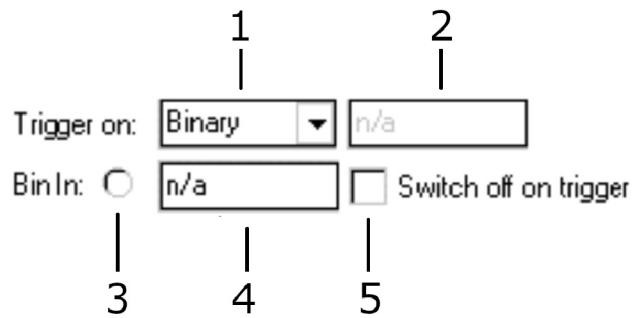


Obr. 6.15: Popis konektoru pre externé bezpečnostné funkcie [24]

Legenda k obr. č. 6.15 [24]:

- 1 - DCD (in), Data Carrier Detect
- 2 - RXD (in), Receive Data
- 3 - TXD (out), Transmit Data
- 4 - DTR (out), Data Terminal Ready
- 5 - GND, Ground
- 6 - DSR (in), Data Set Ready
- 7 - RTS (out), Request To Send
- 8 - CTS (in), Clear To Send
- 9 - RI (in), Ring Indicator

## Nastavenie pre spúšťač „trigger“



Obr. 6.16: Popis možností nastavenia pre spúšťač „trigger“ [24]

Legenda k obr. č. 6.16 [24]:

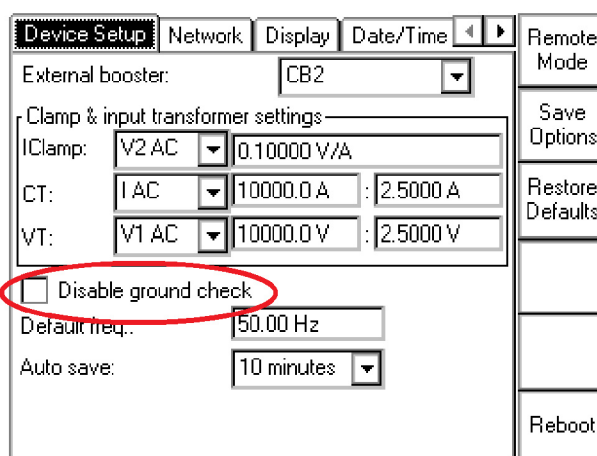
- 1 - Voľba spúšťacej udalosti
- 2 - Medzná hodnota pre spúšť pri meraní
- 3 - Indikuje stav signálu na binárnom vstupe „BIN IN“
- 4 - Zobrazenie času opozdenia
- 5 - Voľba vypnutia výstupov prístroja po výskyte spúšťacej udalosti

*Poznámka k č. 4: čas opozdenia je čas medzi poslednou zmenou výstupnej hodnoty CPC 100 a výskytom spúšťacej udalosti.*

*Poznámka k č. 5: označiť v prípade, že sa výstupy prístroja majú po výskyte spúšťacej udalosti vypnúť.*

## 6.2.5 Bezpečnostné pokyny pre použitie OMICRON CPC 100

Merací prístroj CPC 100 smie byť pripojený len k napájacej sieti s ochranným vodičom PE. Nie len pri vykonávaní merania rezistivity pôdy môže nastať situácia, kedy pripojenie k ochrannému vodiču PE prípadne k ochrannému uzemneniu nieje korektné. V takomto prípade sa na displeji prístroja objaví poruchové hlásenie (313). Je nevyhnutné, aby sa užívateľ uistil, že pripojenie prístroja k PE je korektné a neporušené. Ak sa výstražné hlásenie objaví napriek tomu, že pripojenie prístroja k PE je korektné a neporušené, musí v nastaveniach zvoliť „Device Setup“ a zaškrtnúť políčko „Disable ground check“ vid. obr. č. 6.17



Obr. 6.17: Nastavenie prístroja pre deaktiváciu kontroly PE (uzemnenia) [24]

Pri realizácii merania rezistivity pôdy v teréne môže nastať situácia, kedy nieje dostupná distribučná sieť NN a užívateľ sa rozhodne zabezpečiť napájanie napr. prostredníctvom dieselaagregátu. V takomto prípade je potrebné uzemniť neutrálny vodič N napájacieho výstupu alebo deaktivovať kontrolu PE (uzemnenia) pomocou postupu popísaného vyššie. Pre pripojenie k napájacej sieti je potrebné použiť napájací kábel s konektorom IEC320/C20. Ďalej platí, že sieťová prípojka musí byť istená vhodným istiacim prvkom s menovitým prúdom o veľkosti 16 A. Ako predlžovací kábel sa môže použiť len kábel s vhodne dimenzovaným prierezom. Merací prístroj CPC 100 sa za žiadnych okolností nesmie prevádzkovať pri podmienkach, ktoré nespĺňujú alebo prekračujú medzné hodnoty pre teplotu a vlhkosť.

V prípade, že nesvieti žiadna výstražná kontrolka poprípade obe výstražné kontrolky svietia súčasne, je prístroj vadný a nesmie sa používať! K vstupným a výstupným zdierkam na čelnom paneli sa smú pripojiť len vodiče s bezpečnostným konektorom tzv. „4mm banana connector“ s umelohmotným krytím.

## 6.2.6 Porovnanie prístrojov CPC 100 a EUROTTEST 61557

V nasledujúcej tabuľke môžeme nájsť porovnanie základných atribútov dvoch prístrojov použitých pre účely tejto práce. Konkrétne prístrojov CPC 100 od spoločnosti OMICRON a EUROTTEST 61557 od spoločnosti METREL. Jednotlivé údaje boli čerpané z príručiek (manuálov) k prístrojom.

Tab. 6.2: Porovnanie meracích prístrojov CPC 100 a EUROTTEST 61557

Atribút porovnania	CPC 100	EUROTTEST 61557
Váha (bez príslušenstva)	29 kg	s batériami 2.1 kg
Rozmery	468 x 394 x 233 mm	265 x 110 x 185 mm
Mobilita	nižšia	vyššia
Cena	vyššia	nižšia
Potreba uzemnenia	áno	nie
Náročnosť obsluhy	vyššia	nižšia
Výsledok z merania $\rho$	R [ $\Omega$ ]	$\rho$ [ $\Omega.m$ ]
Napájanie	230 V, 50 Hz	batérie 4x1,5 V - IEC LR14
Možnosť zmeny „f“ pri $\rho$	áno (15 - 400 Hz)	nie
Možnosť zmeny „I test“ pri $\rho$	áno (až do 6 A)	nie
Rozsah pracovných teplôt	-10 až 55 °C	0 - 40 °C
Maximálna vlhkosť	až 95 %	až 85 %



## 7 Návrh a realizácia systému

V tejto kapitole sú uvedené informácie týkajúce sa splnenia čiastkového cieľa tejto práce, konkrétne o návrhu a realizácii systému zabezpečujúceho plošné meranie rezistivity pôdy pomocou prístroja OMICRON CPC 100 a vyhodnocovacieho „systému“.

### 7.1 Ovládanie prístroja CPC 100

Od začiatku návrhu a realizácie systému zabezpečujúceho plošné meranie rezistivity pôdy pomocou prístroja CPC 100 sme hľadali spôsob, akým bude tento prístroj ovládaný. Informácie potrebné na to, aby sme vyriešili danú problematiku sme sa rozhodli hľadať v najdostupnejšej literatúre a to v používateľskej príručke. Po jej preštudovaní sme zistili, že vyšetrovaný prístroj od spoločnosti OMICRON je možné ovládať napríklad pomocou externej PC aplikácie PTM (Primary Test Manager). Vzhľadom nato, že pri vykonávaní merania by musel byť dostupný notebook s príslušným SW vybavením, nebude táto možnosť využitá. Aj z tohto dôvodu sme sa rozhodli zabezpečiť ovládanie (spustenie a ukončenie merania) prostredníctvom vlastných binárnych vstupov prístroja „BIN IN“. Tieto binárne vstupy slúžia pre bezpotenciálové kontakty alebo pre napätie až 300 V DC. To znamená, že riadiacim kritériom môže byť prepínanie bezpotenciálovým kontaktom alebo pomocou priloženia jednosmerného napätia až 300 V. Pre binárne vstupy prístroja CPC 100 platí, že vstupná impedancia je vyššia ako 100 k $\Omega$  a doba nábehu je 100 ms. Mechanické vyhotovenie vyšetrovaných vstupov prístroja je zabezpečené pomocou dvoch panelových 4 mm „laboratórnych“ zdierok, pričom každá predstavuje jeden kontakt (podobne ako drvivá väčšina výstupov prístroja).

Za princíp ovládania, sme zvolili prepínanie binárnych vstupov „BIN IN“ za pomoci bezpotenciálového kontaktu. V praxi to znamená, že ak prepojíme tieto dva kontakty (póly) pomocou vhodného vodiča, spúšťacím impulzom pre spustenie merania môže byť vytiahnutie jedného konca tohto vodiča zo zdierky (prerušenie obvodu). Pre vytvorenie automatizovaného spúšťania a ukončenia merania pomocou bin. vstupov, je teda možné využiť ľubovoľného a ovládaného spínacieho prvku ako napr. triak alebo elektromagnetické relé.

Pri ovládaní meracieho prístroja pomocou PC aplikácie PTM alebo pomocou nami vytvoreného zariadenia využívajúceho binárne vstupy, je z bezpečnostných dôvodov (vysoké napätia na výstupoch) nutné stlačiť zelené tlačidlo na zariadení pre aktiváciu výstupov. Z toho vyplýva, že napriek tomu, že vieme zabezpečiť vzdialené ovládanie prístroja, musí byť na začiatku merania prítomná obsluha vykonávajúca manuálne odblokovanie spustenia merania prostredníctvom spomínaného tlačidla.

## 7.2 Ovládanie elektród

Z teórie pre meranie rezistivity pôdy, či už pomocou Wennerovej alebo Schlumbergerovej metódy z kapitoly č. 3 vieme, že pre jedno meranie sú aktívne práve štyri elektródy. Nasledujúce meranie ( $n + 1$ ) nieje výnimkou. Rozdiel je jedine v tom, že aktívne nie sú rovnaké elektródy ako v predchádzajúcom meraní. Na zabezpečenie ovládania elektród bola zvolená súčiastka tzv. elektromagnetické relé. Jeho princíp alebo podrobnejšia charakteristika nieje predmetom tejto práce.

Ďalšou úlohou bolo zvoliť potrebný počet súčiastok (relé) pre náš cieľ. Táto úloha bezprostredne súvisí s celkovým počtom použitých elektród pre celý súbor meraní. Počet elektród sme zvolili na šesťnásť. Dôvodom voľby práve takéhoto počtu elektród bola potreba návrhu plošného merania. Keďže každé meranie v danom kroku vyžaduje práve štyri elektródy, pri rozložení elektród napr. (4x4) môžeme rezistivitu pôdy zmerať ako v horizontálnom, tak i vo vertikálnom smere. Mohol byť zvolený tiež menší celkový počet meracích elektród (napr. osem), v takomto prípade by sme však prišli o možnosť vertikálneho merania. Samozrejme teoreticky by bolo možné použiť nekonečné množstvo elektród. Technicky by však takáto realizácia nebola možná. Čím vyšší počet by sme zvolili, tým by stúpala náročnosť realizácie projektu a samozrejme aj náklady na jeho realizáciu.

Po tom ako sme si fixne stanovili počet meracích elektród, bolo potrebné zistiť, aké stavy (signály) budú musieť byť privedené k jednotlivým elektródam. Z tohto dôvodu bola vytvorená tabuľka stavov vychádzajúca z obr. č. 8.4 nachádzajúcom sa na strane č. 89. Z tabuľky č. F.1 je zrejmé, že meracia elektróda č. 1 nadobúda jediného stavu (v našom prípade kladného potenciálu prúdovej elektródy) elektróda č. 2 nadobúda dva stavy elektr. č. 3 zase troch. Podobne je tomu na krajných elektródach č. 14, 15 a 16. Elektródy č. 4 až 13 nadobúdajú všetky štyri možné stavy počas celého súboru meraní.

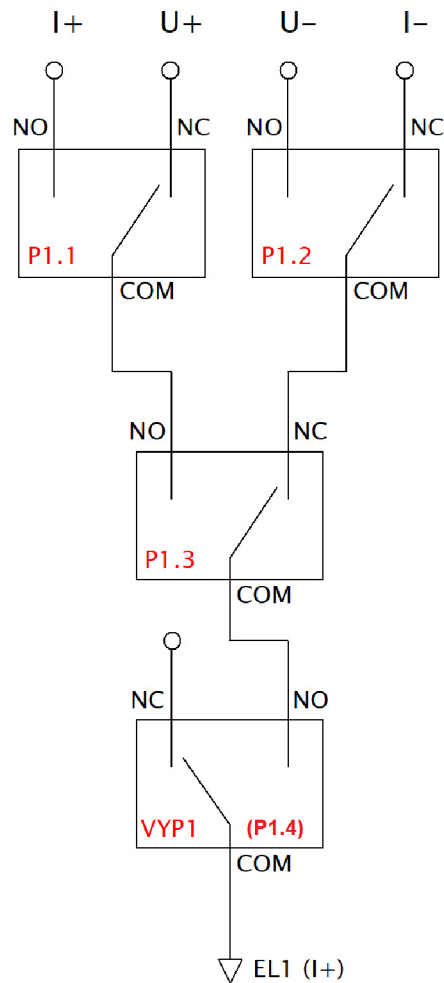
Tab. 7.1: Tabuľka stavov pre rozmiestnenie elektród v priamke - Wenner

Elektróda	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
SIG.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I-	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U-	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
U+	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
I+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Predstavme si situáciu, kedy sonda *EL1* plní funkciu prúdovej elektródy s kladným potenciálom *I+* (odpovedá výstupu zdroja označeného v tejto práci ako *A*). V prípade, že by vyšetrovaná sonda plnila túto funkciu počas merania permanentne,



pojená k meraciemu zariadeniu). Z tejto skutočnosti vyplýva, že pre jednu meráciu sondu je potrebné použiť štyri relé ako môžeme vidieť na obr. č. 7.2.

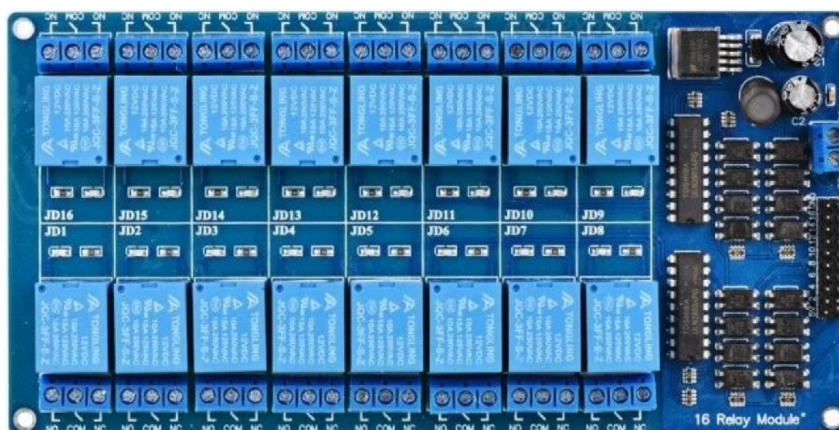


Obr. 7.2: Princíp. sch. zapojenia relé pre všetky kombinácie stavov meracej sondy

Nečinnosť meracej sondy *EL1*, zabezpečíme pomocou relé vo funkcii vypínača označeného na obr. č. 7.2 ako *VYP1*. Pripojenie predchádzajúceho obvodu - obr. 7.1 na kontakt *NO* relé *VYP1* má svoje opodstatnenie. Meracia sonda musí byť vzhľadom na bezpečnosť v bežnom stave. Napätie sa na meracej sonde môže vyskytnúť až po impulze vyslanom na prepnutie spoločného kontaktu *COM* na elektródu *NO*. Práve v tento okamih sa meracia sonda spojí so zvyškom obvodu.

### 7.3 Voľba platformy

Na trhu je dostupných niekoľko vývojových platforiem, ktoré sú vhodné na realizáciu nenáročných projektov malej automatizácie. Každá je niečím odlišná, prípadne



Obr. 7.3: 16 kanálový relé modul použitý pri realizácii systému

výnimočná. Medzi najznámejšie platformy patrí napr. Raspberry Pi, Arduino Uno či BBC Micro:bit. Zo všetkých spomínaných platforiem sú dostupné tzv. klony, ktoré by mali fungovať totožne ako originálny vývojový kit. Taktiež by mali byť zachované dôležité parametre originálneho zariadenia. Výhodou takéhoto riešenia je predovšetkým nízka obstarávacia cena. Nevýhodou môže byť napr. nižšia spoľahlivosť oproti originálnemu výrobku. Mnohokrát sa pri použití klonu vyžaduje nainštalovať doplnkový software zabezpečujúci kompatibilitu komunikácie dosky s počítačom.

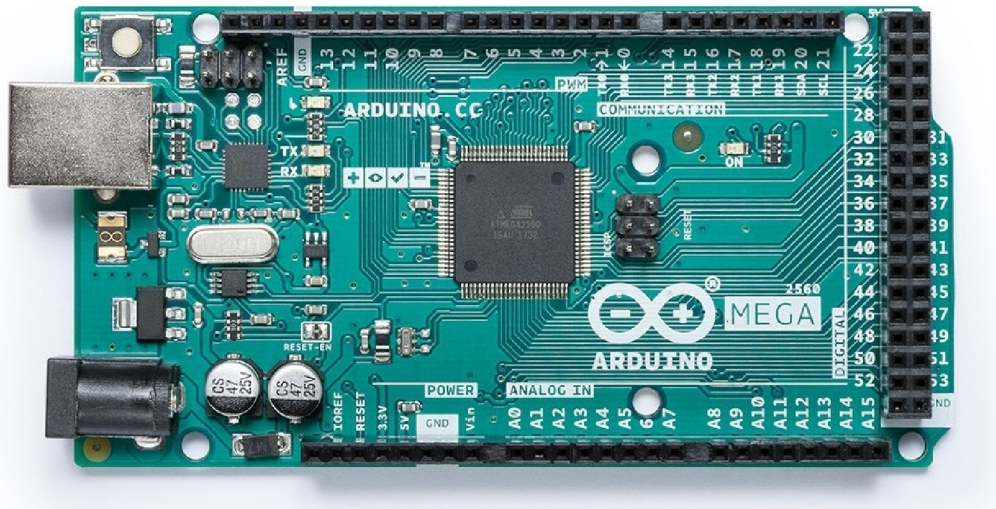
Pre náš zámer bola zvolená platforma Arduino. Konkrétne sa jedná o dosku Arduino Mega 2560 rev3 (klon). Jedným z dôvodov výberu bola napríklad spomínaná nízka obstarávacia cena. Ďalej je vhodné poznamenať, že pre užívateľov je dostupné veľké množstvo publikácií zaoberajúcich sa danou problematikou (úvod do programovania, návody/projekty atď.). K základnému produktu je možné pripojiť tzv. shield. Jedná sa o doplnkové zariadenie (dosku plošného spoja), ktorý zabezpečí rozšírenie možností použitia základného zariadenia. To znamená, že poskytuje možnosť budúceho rozšírenia (modifikácie) projektu.

### 7.3.1 Vlastnosti dosky Arduino Mega 2560 rev3

Vývojový systém založený na mikrokontroléry ATmega2560. Obsahuje 54 digitálnych vstupno-výstupných (tzv. I/O) pinov, 16 analógových vstupov a kryštálový oscilátor s frekvenciou 16 MHz. Na doske sa ďalej nachádza napájací konektor, ICSP a tlačítko zabezpečujúce funkciu reset. Napájacie napätie môžeme byť dodávané pomocou univerzálnej sériovej zbernice (USB), vhodného sieťového adaptéru alebo batérie. Zdroj energie je zvolený automaticky. Komunikácia s počítačom môže byť zabezpečená jednoducho pomocou dátového káblu s vidlicovými konektormi typu USB A-B. Spomínané zariadenie je kompatibilné s množstvom shieldov navrhnutých napr. pre Arduino UNO a iné. Software potrebný pre programovanie zariadenia



si používateľ môže bezplatne stiahnuť zo stránky výrobcu alebo jednoducho využiť Arduino Web Editor. V tomto prípade sa nevyžaduje inštalácia programu Arduino IDE ale využije sa možnosť programovania zariadenia online. Vzhľad originálneho výrobku môžeme vidieť na obr. č. 7.4. Technická špecifikácia sa nachádza v tabuľke č. 7.2.



Obr. 7.4: Originálne zariadenie - ARDUINO MEGA 2560 REV3 [12]

### 7.3.2 Rozšírenie dostupných digitálnych výstupov použitej dosky

V kapitole č. 7.2 sme sa mohli dočítať, že celkový počet elektród pre meranie rezistivity pôdy predstavuje 16 ks. To odpovedá 64 ks relé, ktoré vyžadujú ovládanie prostredníctvom 64 digitálnych výstupov. Z technickej špecifikácie v tab. č. 7.2 však vieme, že Arduino Mega 2560 rev3 poskytuje 54 digitálnych vstupno-výstupných (tzv. I/O) pinov. Z toho vyplýva, že doska neposkytuje dostatočné množstvo digitálnych výstupov pre realizáciu nášho projektu. Keďže eliminácia počtu meracích sond nepripadala do úvahy, museli sme hľadať riešenie. Spočiatku sme chceli použiť 16 kanálový multiplexor 74HC4067. Tento obvod však nespĺňal naše požiadavky, pretože v určitom okamihu by neumožňoval ovládať viaceré elektródy. Z tohto dôvodu sme použili jednoduchý prídavný modul (expandér) s obvodom PCF8574.

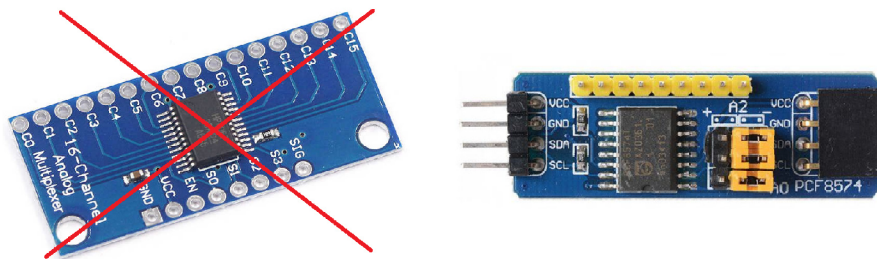
Výhodou použitého expandéru je, že môže byť napájaný piatimi voltami, komunikácia môže byť zabezpečená prostredníctvom I2C zbernice ale hlavne umožňuje rozšírenie až o osem vstupno-výstupných pinov. Možnosť rozšírenia je však väčšia, pretože tento obvod umožňuje obohatenie dosky Arduina až o 64 výstupov. Tento fakt je zabezpečený prostredníctvom troch prepínačov adresy a možnosti prepojenia až ôsmich expandérov [32]. Pre náš projekt využijeme dva takéto moduly. Výstupný prúd dátových pinov dosahuje úroveň až 25 mA pri napätí 5 V, čo predstavuje

Tab. 7.2: Technická špecifikácia - ARDUINO MEGA 2560 REV3 [12]

Mikrokontrolér	ATmega2560
Operačné napätie	5 V
Vstupné napätie (odporúčané)	7-12 V
Vstupné napätie (limit)	6-20 V
Digitálne I/O piny	54 (15 pre výstup PWM)
Analógové vstupné piny	16
Jednosmerný prúd na I/O pin	20 mA
Jednosmerný prúd pre 3,3 V pin	50 mA
Flash pamäť	256 kB (8 kB pre bootloader)
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Kryštálový oscilátor	16 MHz
Dĺžka	101,52 mm
Šírka	53,30 mm
Váha	37 g

dostačujúci prúd pre zabezpečenie magnetického poľa cievky jedného relé. Schéma zapojenia nebude uvedená, pretože pre pripojenie modulu PCF8574 k doske Arduina stačí zapojiť celkom 4 vodiče. Svorčku VCC je potrebné pripojiť k svorke s označením 5 V. Svorčka GND predstavuje zem. Zvyšné dve svorky (SDA a SCL) slúžiacie na komunikáciu sa zapoja na svorky s identickým označením na doske použitej platformy. Pre zabezpečenie správnej komunikácie s doskou je potrebné stiahnuť a nainštalovať knižnicu PCF8574, ktorá sa nachádza v prílohe na CD priloženom k tejto diplomovej práci.

obr č. 7.5.



Obr. 7.5: Multiplexor 74HC4067 - vľavo a expandér PCF8574 - vpravo

Keďže každé zariadenie má svoju vlastnú adresu, pri vytváraní programu musela byť použitá dekodovacia tabuľka 7.3 vyjadrujúca adresu modulu v desiatkovej

(DEC) a šestnástkovej (HEX) sústave, v závislosti od zapojenia jednotlivých pinov ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ) modulu PCF8574.

Tab. 7.3: Dekódovacia tabuľka pre nastavenie adresy expandéru PCF8574 [34]

A0	A1	A2	DEC	HEX
L	L	L	32	20
H	L	L	33	21
L	H	L	34	22
H	H	L	35	23
L	L	H	36	24
H	L	H	37	25
L	H	H	38	26
H	H	H	39	27

Legenda k tabuľke 7.3:

- ( $A_0$  až  $A_2$ ) - označenie kontaktov (pinov) expandéru PCF8574
- ( $L/H$ ) - napätová úroveň príslušného kontaktu (pinu): Low/High (0V/5V)

## 7.4 Voľba spôsobu konektivity a ovládania platformy

Pre zabezpečenie ovládania platformy je dostupných niekoľko možností.

Jedným z najzákladnejších je ovládanie pomocou mechanického tlačidla alebo spínača. V takomto prípade musia byť tlačidlá alebo spínače pripojené na digitálny vstupný PIN vývojovej dosky. Počet dostupných digitálnych PINOV závisí od konkrétneho modelu dosky. Ak ich chceme využívať práve na tento účel, musíme ich nastaviť ako vstupné (INPUT). Nevýhodou pri tejto voľbe môže predstavovať napríklad vznik viacnásobných zopnutí a rozopnutí obvodu po stlačení tlačidla. Samozrejme tento jav je možné odstrániť buď pomocou softvéru alebo pomocou hardvéru napr. RC obvodom. Ďalšiu nevýhodu predstavuje pripojenie tlačidla k doske pomocou káblu (vodiča), čo by zapríčinilo nepohodlné a nemobilné (neprenosné) ovládanie.

Práve pre zaistenie jednoduchého, pohodlného a mobilného ovládania vznikla myšlienka tvorby mobilnej aplikácie. V súčasnej dobe existujú rôzne vývojové aplikácie s množstvom dostupných materiálov pre výučbu. Jednou z nich je aj MIT App Inventor Classic. Táto aplikácia od spoločnosti Google umožňuje užívateľovi vyvíjať aplikácie pre mobilné telefóny s operačným systémom Android. Veľkou výhodou je napríklad možnosť vývoja prostredníctvom webového prehliadača. MIT App Inventor sa delí na dve časti. Prvou je "Inventor Designer", ktorý ponúka výber komponentov pre aplikáciu ako napr. tlačidlá, obrázky, notifikácie, vrstvy, médiá, mapy a mnoho ďalšieho. Druhou časťou je "Inventor Blocks", ktorý určuje, aké



úlohy majú jednotlivé komponenty spĺňať. Najväčšiu výhodu predstavuje možnosť grafického programovania [25].

### 7.4.1 SW riešenie - tvorba a opis aplikácie

Pred tvorbou samotnej aplikácie zabezpečujúcej ovládanie jednotlivých relé, sme si museli stanoviť minimálne požiadavky, ktoré musí spĺňať. To znamená, že aplikácia musí spĺňať podmienky na jednoduché pripojenie k ovládanému zariadeniu, jednoduchú orientáciu v jej grafickom prostredí, intuitívne prepínanie (aktiváciu a deaktiváciu) elektród a hlavne spĺňať základné podmienky pre bezpečnosť používateľa.

Po spustení aplikácie sa zobrazí prvá obrazovka "Screen1" s textom, ktorý oboznámi užívateľa s účelom aplikácie, nainštalovanou verziou a požiadava o ukončenie aplikácie prostredníctvom tlačidla "Opustiť aplikáciu" v prípade, že nie je poučeným pracovníkom, nemá znalosti na ovládanie aplikácie, poprípade ju spustil náhodne.

V prípade, že sa používateľ rozhodne pokračovať, dôjde k spusteniu obrazovky č. 2, s názvom "Zabezpečenie". Keďže voľný prístup používateľa do jadra aplikácie by mohol znamenať nebezpečie pre jeho osobu (pri vykonávaní merania), rozhodli sme sa zabezpečiť aplikáciu pomocou hesla. Po vložení nesprávneho hesla je používateľ upozornený, že vložené heslo je nesprávne. Po vložení správnej kombinácie, je mu umožnené pokračovať.

Na ďalšej obrazovke aplikácia umožňuje nahliadnutie do schémy zapojenia meracieho prístroja CPC 100 pre meranie rezistivity pôdy. Táto možnosť môže byť využitá v situáciách, kedy pracovníkovi nie je dostupná schéma v papierovej forme a jeho znalosti nie sú dostatočné na zapojenie meracieho príslušenstva z pamäti.

Ďalej musí užívateľ určiť, o aký typ merania má záujem. Na výber má dve možnosti (aktiváciu elektród užívateľom alebo automatické meranie).

#### **„Aktivácia elektród užívateľom“**

Ak užívateľ zvolí prvú možnosť (aktivácia elektród užívateľom), bude následne presmerovaný na obrazovku na ktorej je potrebné zvoliť, akým spôsobom máme usporiadané elektródy na meracom pracovisku pre plošné meranie rezistivity. Na výber máme z usporiadania 1x16, 2x8, 4x4. Po výbere jednej z ponúkaných možností sa zobrazí text, ktorý upozorňuje používateľa na to, aké usporiadanie zvolil a ako sú v aplikácii označované jednotlivé elektródy pre zvolené usporiadanie.

Pri počiatočných návrhoch bol princíp nasledovný. V hornej časti obrazovky sa nachádzal text vysvetľujúci princíp ovládania jednotlivých tlačidiel. Zároveň v strednej úrovni sa zobrazili jednotlivé tlačidlá umožňujúce aktiváciu a deaktiváciu elektród a taktiež v dolnej časti obrazovky sa zobrazilo grafické BT tlačidlo s textom *nie ste pripojený!*. Takýto návrh by síce mohol byť funkčný ale na druhú stranu aj

nebezpečný. K tomu, ako bola zabezpečená eliminácia nebezpečenstva (skratu na výstupných svorkách prístroja CPC 100) sa ešte vrátíme.

Aby sa používateľ nezabudol pripojiť a táto skutočnosť nevedla k mylnej predstave o tom, že elektródy sú aktívne (alebo naopak neaktívne), bola deaktivovaná viditeľnosť všetkých tlačidiel určených na ovládanie do chvíle kedy je zabezpečená konektivita. Pre zabezpečenie konektivity musí používateľ zapnúť funkciu pripojenia BT na svojom mobilnom telefóne a vykonať spárovanie s použitým HW modulom v tomto systéme (HC 05). Následne sa musí vrátiť späť do aplikácie a stlačiť v nej ikonu na pripojenie BT prostredníctvom APP. Následne sa mu zobrazí zoznam zariadení ktoré sú dostupné a opäť zvolí modul HC 05.

Zabezpečenie proti aktivácií viacerých štvoríc elektród (čo by viedlo k skratu na svorkách CPC 100) bolo vykonané obdobným princípom ako pri konektivite. To znamená že v prípade, že klikneme napr. na aktiváciu štvorice elektród EL1, EL2, EL3, a EL4 aplikácia nám “zakáže“ aktivovať zvyšné elektródy. Ako už bolo spomenuté, zabezpečuje to obdobný spôsob (nezobrazia sa tlačidlá určené na aktiváciu zvyšných elektród). Takéto opatrenie by sa dalo samozrejme zabezpečiť aj pomocou kódu, ktorý kompilujeme a nahrávame pomocou SW programu Arduino IDE priamo do kontroléru. Riešenie pomocou grafického programovania použitého pri tvorbe tejto aplikácie je však intuitívnejšie, jednoduchšie a tým pádom sa dá realizovať za kratší čas.

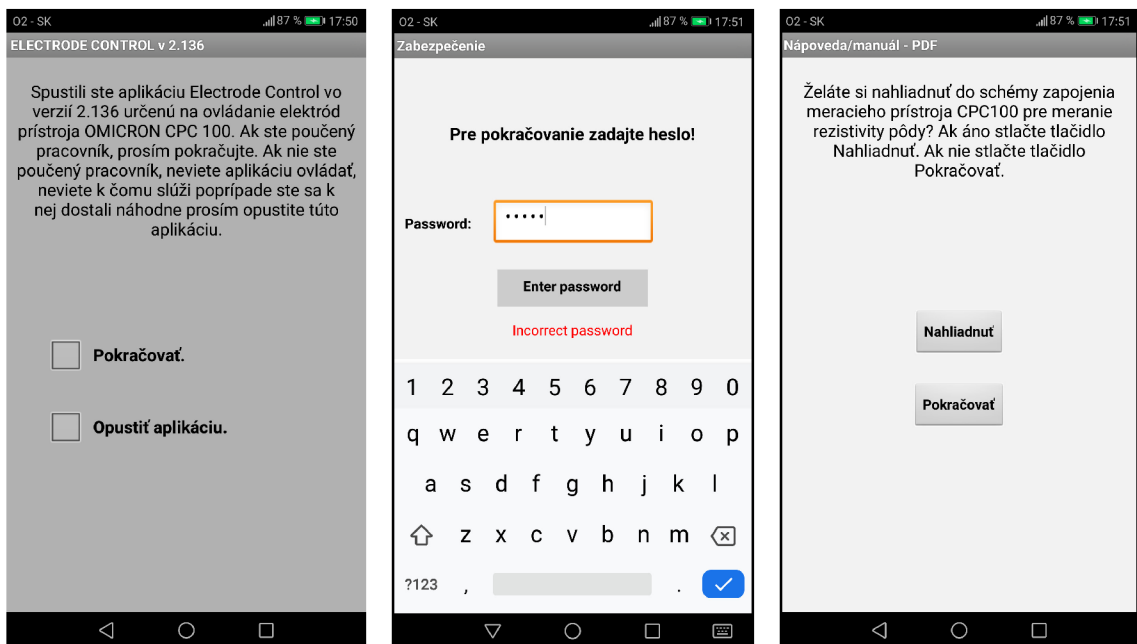
„Aktivácia elektród užívateľom“ slúži pre polo-automatizované plošné meranie rezistivity pôdy. To znamená, že po aktivácií príslušných elektród (napr. EL1 až EL4) pomocou aplikácie, musí užívateľ spustiť meranie na prístroji CPC 100 “ručne“. V takomto prípade sa *nevyužívajú* ani svorky *BIN IN* a ani meranie pomocou *sequenceru*. Takýto spôsob (prístup) môže oproti plne automatizovanému systému priniesť určité výhody. Jednou z výhod môže byť možnosť použitia ľubovoľného prístroja (napr. prístroja EUROTTEST 61557) pre plošné meranie rezistivity. Aplikácia (a vyhotovené zariadenie) v takomto prípade slúži na prepínanie elektród a nie na ovládanie meracieho prístroja. Prostredie aplikácie “Electrode Control v 2.136“ pre *aktiváciu elektród užívateľom* je možné vidieť na obrázkoch 7.7 až 7.8.

### **„Automatické meranie“**

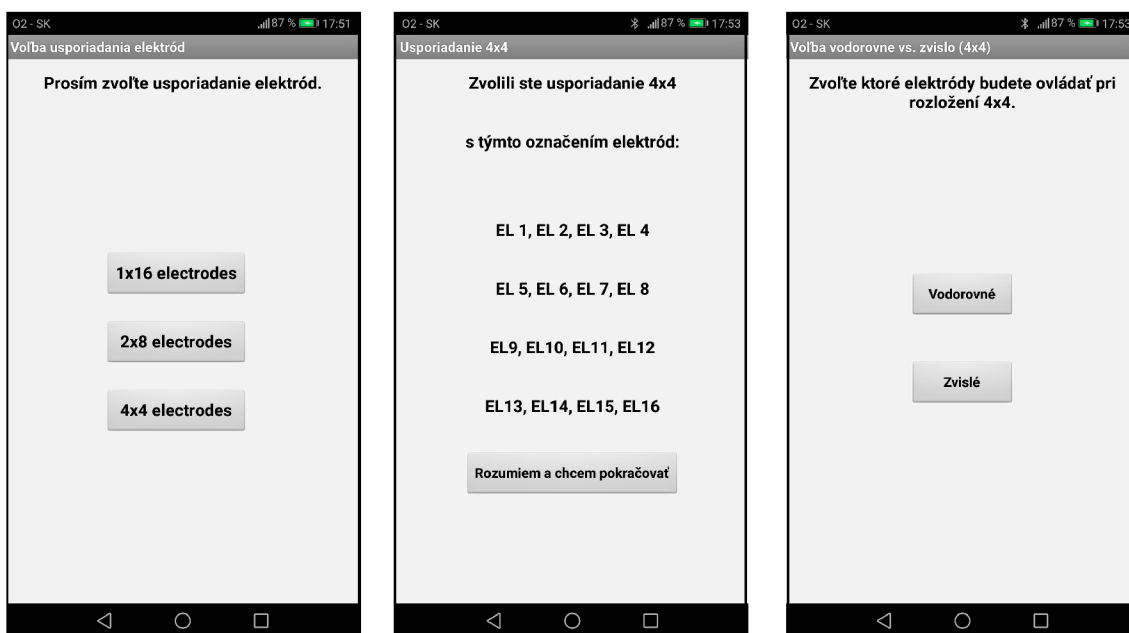
Ak užívateľ zvolí možnosť (automatické meranie), bude následne presmerovaný na obrazovku určenú priamo pre spustenie plne automatického merania. Pre pripojenie zariadenia k BT modulu vyhotoveného zariadenia platia informácie z predošlého textu. V režime automatického merania nieje potrebná aktivácia jednotlivých elektród užívateľom (elektródy sa aktivujú automaticky). Aplikácia v kombinácii so smartphonom predstavuje vysielateľ a platforma (Arduino) v kombinácii s ostatnými

elektronickými prvkami k nej pripojenej prijímač. Po stlačení tlačidla „ŠTART“ sa vyšle z vysielča do prijímača spúšťací signál. Po prijatí spúšťacieho signálu sa spustí kód nahraný v platforme, ktorý zabezpečuje nasledovné. Ako prvé sa aktivujú elektródy EL1 až EL4 (pomocou relé modulu). Následne sa spustí prvé meranie v sekvencií prístroja CPC 100 (pomocou svoriek BIN IN - vid. kap. 7.6.2). Po zmeraní výsledkov sa deaktivujú elektródy EL1 až EL4 (opäť pomocou relé). Ďalej sa aktivujú elektródy EL5 až EL8, spustí sa druhé meranie v sekvencií a po zmeraní výsledkov sa tieto elektródy deaktivujú. Tento cyklus sa opakuje, až pokým sa nepremeria rezistivita pôdy pomocou všetkých šestnástich elektród. Táto možnosť merania je optimalizovaná výlučne pre merací prístroj CPC 100. Akým spôsobom je výsledky z merania možné vyhodnotiť sa dozvieme v kapitole 7.7.

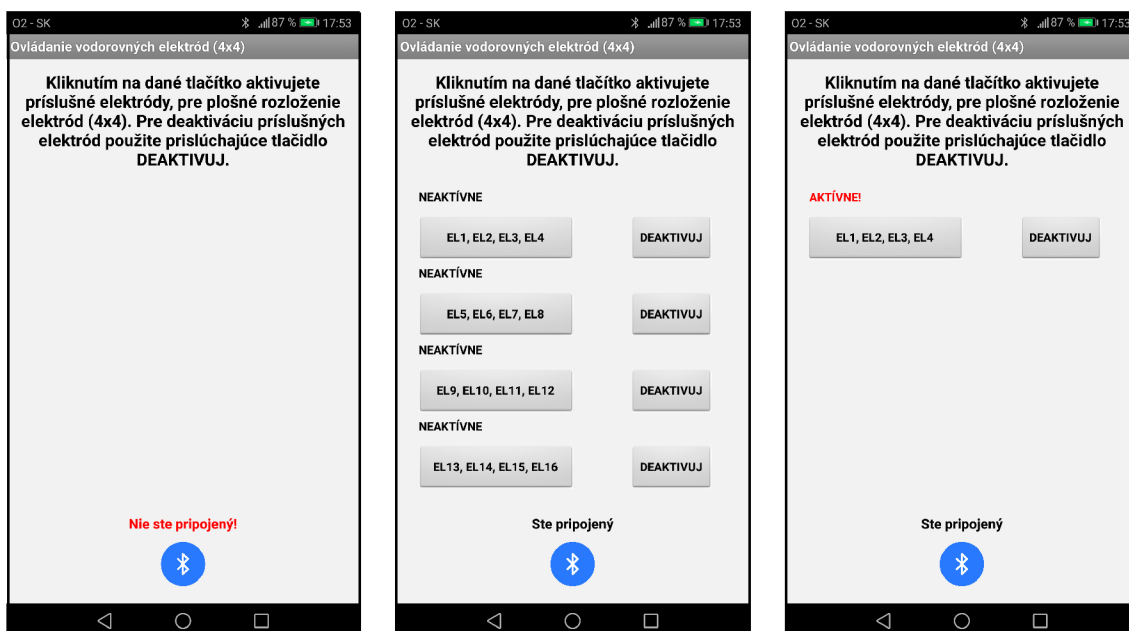
Posledným krokom tvorby bola voľba názvu aplikácie a návrh ikony. Dôležité je poznamenať, že vytvorenú APP je možné spustiť napr. prostredníctvom notebooku. Pre takéto riešenie použitia existuje množstvo emulátorov ako napr. emulátor *BlueStacks*. Kompatibilita tohto programu bola patrične overená (odskúšaná). Prostredie aplikácie “Electrode Control v 2.136“ pre *automatické meranie* je možné vidieť na obrázkoch 7.6 až 7.8.



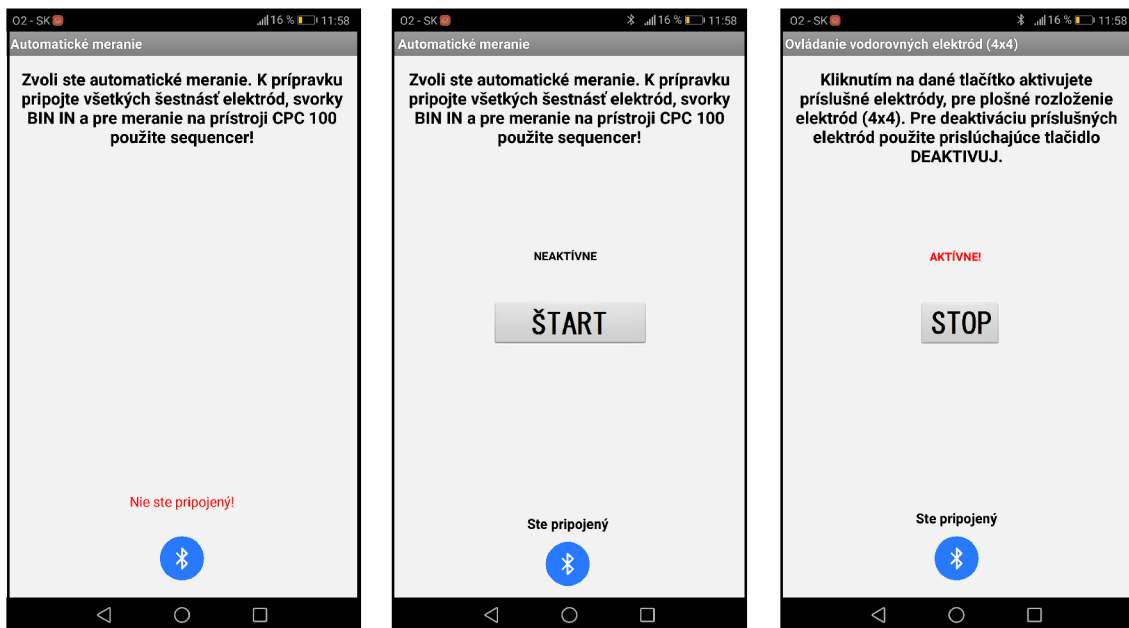
Obr. 7.6: Prostredie aplikácie Electrode Control v 2.136 (úvod)



Obr. 7.7: Prostredie aplikácie „Aktivácia elektród užívateľom“ a)



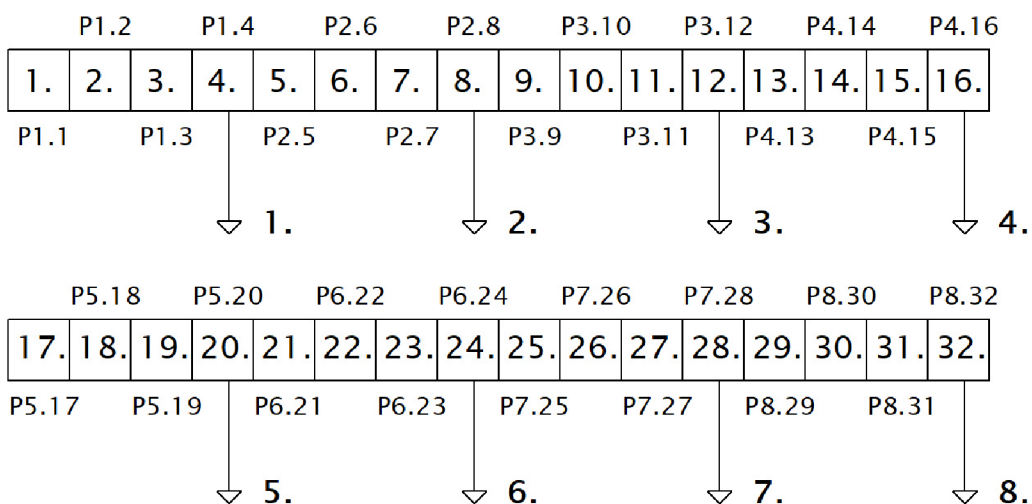
Obr. 7.8: Prostredie aplikácie „Aktivácia elektród užívateľom“ b)



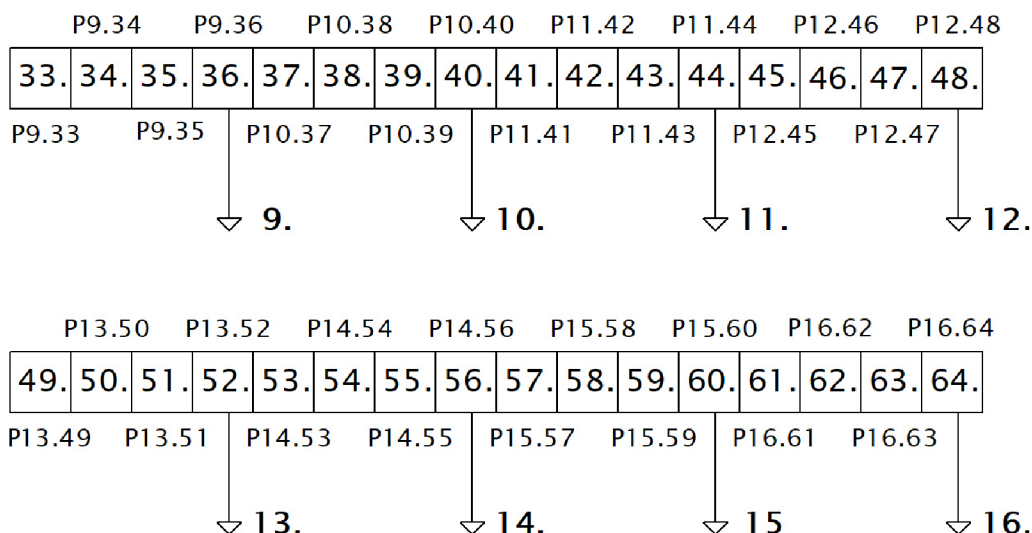
Obr. 7.9: Prostredie aplikácie „Automatické meranie“

## 7.5 Programovanie zariadenia

Programovací jazyk použitý pre zariadenie zabezpečujúce plošné meranie rezistivity pôdy sa nazýva „Wiring“. Tento jazyk je veľmi podobný jazyku *C++*. Pri tvorbe kódu zohrávali dôležitú úlohu najmä nami vytvorené blokové schémy na obr. 7.10, 7.11. Taktiež schéma zapojenia štyroch relé pre jednu elektródu na obr. č. 7.2 nachádzajúcom sa v kapitole 7.2. Kód bol *kompilovaný* a *nahrávaný* prostredníctvom programu *Arduino IDE*.



Obr. 7.10: Označenie jednotlivých relé meracích sond - elektród (EL1 až EL8)



Obr. 7.11: Označenie jednotlivých relé meracích sond - elektród (EL9 až EL16)

Na obrázkoch č. 7.10 a č. 7.11 môžeme vidieť, ku ktorým konkrétnym relé (celkový počet 64) sa pripájajú jednotlivé elektródy (celkový počet 16). Označenie napr. *P1.3* značí, že sa jedná o relé vo funkcii prepínača (*P1.3*). Ďalej z označenia vyplýva, že toto relé zabezpečuje tok signálu pre elektródu č. 1 (*P1.3*) a je ovládané výstupom č. 3 použitej platformy (*P1.3*) - Arduino MEGA rev. 3. Každý horizontálne uložený blok (skladajúci sa z elementárnych blokov) predstavuje určitý šestnásť-kanálový relé modul.

## 7.6 Vyhotovené zariadenie

Na obr. č. 7.12 môžeme vidieť konečný vzhľad vyhotoveného zariadenia podieľajúceho sa na plošnom meraní rezistivity pôdy prostredníctvom meracieho prístroja OMICRON CPC 100. Toto elektronické zariadenie sa skladá z kovovej (ocelovej) prístrojovej krabice s vonkajšími rozmermi (ŠxVxH): 350x70x217 mm a jeho celková hmotnosť predstavuje približne 3,3 kg.

Na prednom paneli zariadenia sa nachádza šestnásť zdierok (každá predstavuje jeden kontakt) s priemerom zásuvky 4 mm. Každá zo spomínaných zdierok má prechodový odpor 5 mΩ. Zdierky slúžia k pripojeniu šestnástich meracích elektród. Pripojenie musí byť zabezpečené pomocou jednožilového káblu s prierezom minimálne 1 mm<sup>2</sup> (napr. kábel CYA 1x1,00 H05V-K).

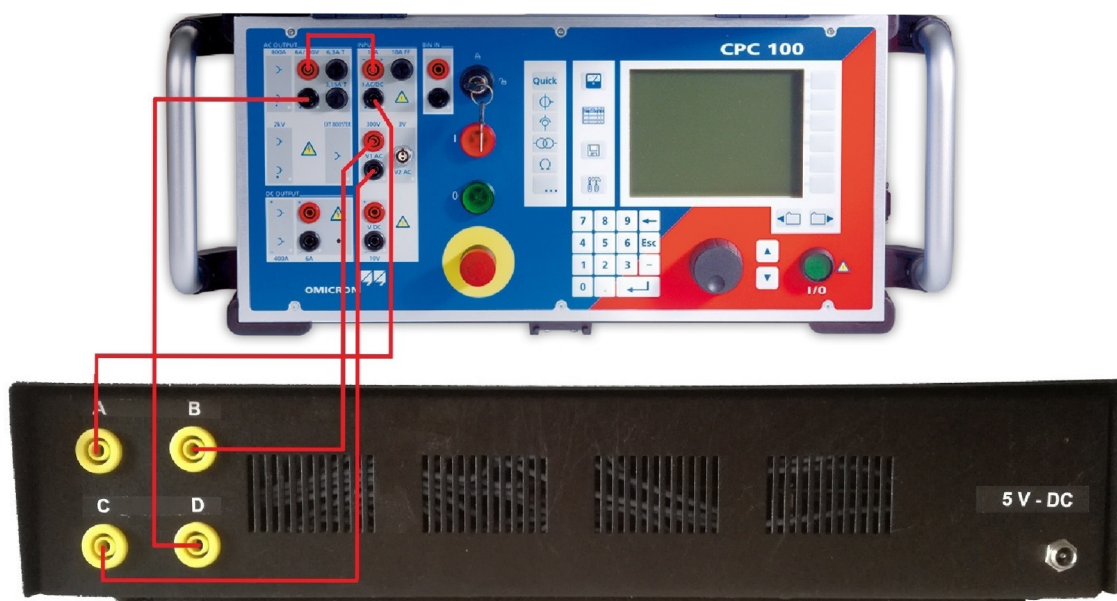




Obr. 7.12: Pohľad na vyhotovené zariadenie pre plošné meranie  $\rho$  pôdy

### 7.6.1 Schéma zapojenia výrobku k prístroju CPC 100

Na zadnom paneli zariadenia sa v ľavej časti nachádzajú štyri zdievky žltej farby. Označené sú písmenami A, B, C a D. Zadné zdievky slúžia k pripojeniu “vstupného signálu“ z prístroja CPC 100. Schému zapojenia zadných zdievok k meraciemu prístroju CPC 100 môžeme vidieť na obr. č. 7.13



Obr. 7.13: Schéma pripojenia výrobku k CPC 100

## 7.6.2 Binárne svorky

Binárne svorky nachádzajúce sa na pravej strane vyhotoveného zariadenia slúžia na ovládanie (spustenie a ukončenie) sekvencie merania. Tieto svorky sú v zariadení pripojené na samostatný relé modul, ktorý zabezpečuje ich spínanie. Binárne vstupy vyhotoveného zariadenia sa pripájajú k binárnym vstupom prístroja CPC 100. Potrebné je pripojiť červenú svorku BIN IN vyhotoveného zariadenia s červenou svorkou CPC 100 a obdobne čiernu svorku BIN IN vyhotoveného zariadenia s čiernou svorkou CPC 100.



Obr. 7.14: Pohľad na svorky pre pripojenie binárnych kontaktov nachádzajúcich sa na boku vyhotoveného prístroja

## 7.6.3 Napájanie

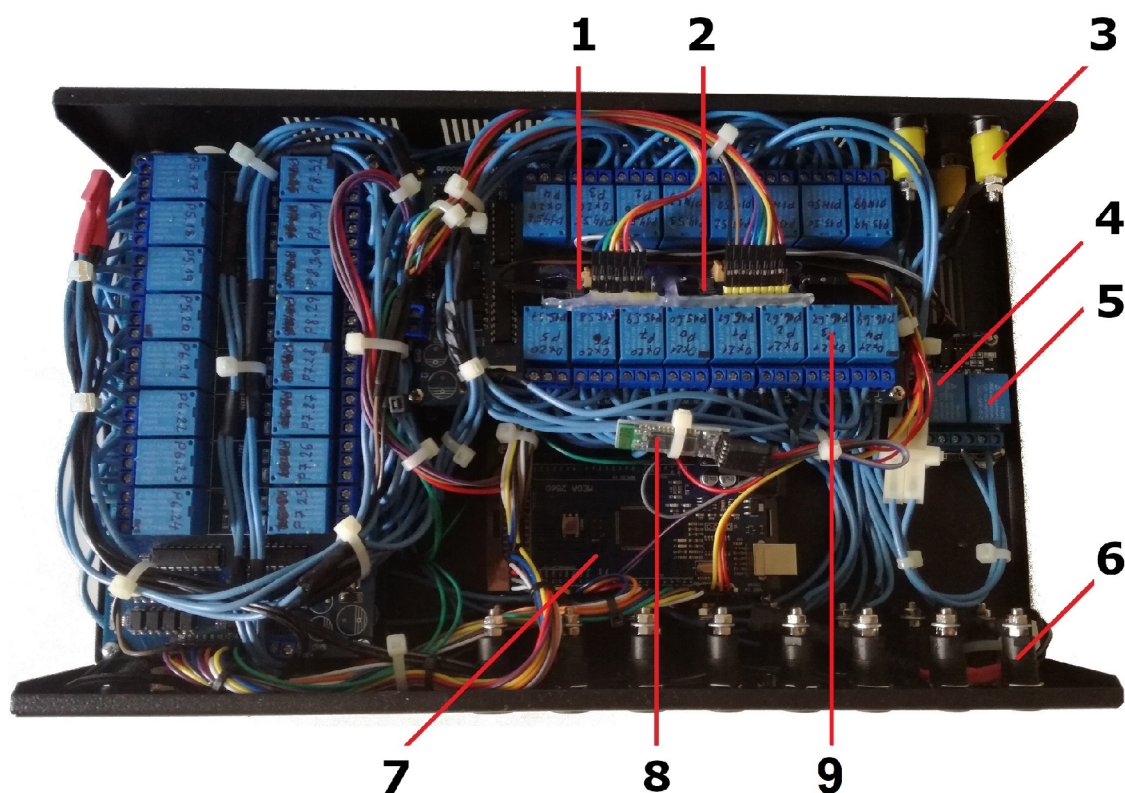
Vyhotovené zariadenie vyžaduje napájanie prostredníctvom DC zdroja s nominálnym napätím 5 V. Pripojenie je zabezpečené pomocou „súosého“ konektoru o dimenziách 5,5x2,1 mm. Ako zdroj je teda možné použiť napr. sieťový napájací adaptér alebo 5 V batériu s dostatočnou kapacitou.

Napájanie platformy je zabezpečené prakticky okamžite po pripojení napätia (súosého konektoru). Napájanie všetkých štyroch šestnásť-kanálových relé modulov je opozdené. Toto opozdenie zabezpečuje relé, ktoré môžeme vidieť na obr. č. 7.15 nachádzajúceho sa v podkapitole č. 7.6.4. Spomínané relé je označené číslom 4. Opozdenie je 0,1 sekundy. Dôvodom je použitý typ relé modulov zabezpečujúcich prepínanie elektród (LOW TRIGGER). Ak by k opozdeniu nedošlo, okamžite po pripojení napájacieho napätia z adaptéru by sa „aktivovalo“ všetkých 64 relé. Po tomto počine by odoberaný prúd dosahoval nemalej hodnoty. Z toho vyplýva, že ak by sme použili adaptér s nižším výkonom, ako je potrebné, začalo by dochádzať k prúdovým rázom (vybíjanie a nabíjanie kondenzátorov v adaptéry). Toto by negatívne ovplyvňovalo elektroniku a platforma by kvôli nestabilnému napájaniu nedokázala vyslať impulz pre „deaktiváciu“ všetkých 64 relé. Výhodou opozdenia je teda i fakt, že je v takomto prípade možné použiť adaptér s nižším výkonom ako by bolo potrebné bez opozdenia.



## 7.6.4 Pohľad na súčiastky zariadenia

Na nasledujúcom obrázku 7.15 môžeme vidieť pohľad do vnútra vyhotoveného zariadenia s označením základných prvkov.



Obr. 7.15: Vnútorňý pohľad na súčiastky vyhotoveného zariadenia

- 1 - expandér č. 1
- 2 - expandér č. 2
- 3 - konektory A, B, C a D (pre pripojenie CPC 100)
- 4 - opozdenie napájania šestnásť kanálových relé modulov
- 5 - ovládanie binárnych vstupov
- 6 - konektory 1 až 16 (pre pripojenie siete elektród)
- 7 - platforma Arduino MEGA rev. 3
- 8 - BT modul HC-05
- 9 - 16 kanálový relé modul zabezpečujúci prepínanie elektród

## 7.6.5 Uzemnenie prístroja

Uzemnenie prístroja je riešené prostredníctvom uzemňovacej elektródy (tyče), so svorkou pre pripojenie uzemňovacieho káblu s prierezom 6 mm<sup>2</sup>. Uzemňovaciu tyč je možné vidieť v prílohe G.

## 7.7 Vyhodnocovací systém

V tejto kapitole sú uvedené základné informácie o tom, ako môže užívateľ plošné meranie rezistivity pôdy pomocou prístroja CPC100 vyhodnotiť. K vyhodnoteniu je možné pristupovať z rôznych hľadísk. Postup priamo závisí od požiadaviek používateľa (zobrazenie, kopírovanie, tlač dát, vytvorenie grafických charakteristík a pod.). Všetky informácie a postupy uvedené v tejto kapitole sú uvedené pre SW „CPC Start Page“ verzie 4.50 (dostupný napr. na CD pribalenom k prístroju CPC100).

### 7.7.1 Zobrazenie výsledkov bez „zvláštneho“ programu

Po uskutočnení plošného merania rezistivity pôdy a následnom uložení výsledkov do súboru v tvare napr. *TEST\_REZISTIVITA\_TRIGGER\_BIN\_IN.xml*, prekopírovaní do PC, máme niekoľko možností, ako daný súbor „otvoriť“ a získať tak možnosť k spracovaniu údajov z merania. Pravdepodobne najjednoduchší spôsob *otvorenia* súboru, predstavuje fundamentálny textový editor, zakomponovaný priamo v OS Windows. Tzn. máme možnosť využitia napr. programu s názvom „Poznámkový blok“. Po otvorení súboru sa používateľovi sprístupnia výsledky merania v pomerne neprehľadnom zdrojovom kóde. Takýto prístup *k získaniu a spracovaniu* potrebných výsledkov je už však pomerne zložitý a pracný. Ukážka zdrojového kódu sa nachádza na obr. 7.16, kde môžeme vidieť nameranú hodnotu činnej zložky impedancie cca 47,37 Ω.

```
</Values_Item>
<Values_Item vt="13" clsid="{249B6839-48CB-11D4-8220-00104B6552C4}">
  <_v vt="19">1</_v>
  <bstrMulti vt="8"></bstrMulti>
  <bstrUnit vt="8">Ω</bstrUnit>
  <nPrecision vt="3">11</nPrecision>
  <dValue vt="5">47.3727606997116</dValue>
```

Obr. 7.16: Vyhodnotenie pomocou text. editora

### 7.7.2 SW program CPC Start Page

Ďalšou možnosťou je využitie SW programu „CPC Start Page“ od spoločnosti OMICRON. Tento program umožňuje napr. zobraziť správu (protokol) z merania a otvorenie súboru v kooperácii s programom „MS Excel“.

#### CPC Start Page - protokol z merania

Pre využitie tvorby protokolu z merania je potrebné, aby používateľ klikol v programe „CPC Start Page“ na odkaz „Display test report“ viď obr. 7.17 a následne na odkaz s názvom „Select files“.



Obr. 7.17: Odkaz na tvorbu protokolu pomocou SW CPC Start Page

Po tom, ako zvolí umiestnenie súboru, sa mu zobrazí protokol z merania s informáciami ako napr. dátum a čas skúšky, názov a typ použitej karty, označenie použitých výstupov prístroja, nastavené hodnoty a výsledky merania. Výhodou je, že všetky údaje sú usporiadané v tabuľkách. „Test report“ ďalej umožňuje spracovanie napr. prostredníctvom tlaču, uloženia vo formáte „html“ alebo editovanie pomocou odkazu na „MS Word“. Z uvedeného vyplýva, že pre prosté zobrazenie dát je tento postup ideálnou voľbou aj vďaka prehľadnosti dát zoskupených v tabuľkách. Viď obr. č. 7.18.

No.	Output	Freq.	Trigger	Time
1	0.500 A	128.00 Hz	Binary	100.000 s
2	0.500 A	128.00 Hz	Binary	100.000 s

atď.

Results:										
State No.	I AC			V1 AC		R, X		Bin.	Time	Overl.
1	437.23 mA	0.00 °	20.713 V	0.03 °	47.373 Ω	24.804 mΩ	come	3.866 s	no	
2	439.26 mA	0.00 °	20.871 V	0.03 °	47.514 Ω	24.878 mΩ	go	3.164 s	no	

atď.

Obr. 7.18: Zjednodušená ukážka údajov z protokolu (CPC Start Page)

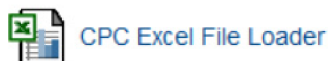
Pri využití takéhoto postupu však absentuje možnosť automatického vytvorenia grafických závislostí ako napr. závislosť rezistivity pôdy na rozstupe elektród alebo závislosť rezistivity pôdy na polohe uloženia meracích elektród (plošné meranie rezistivity pôdy). Takúto možnosť docielime aplikovaním tzv. „CPC Excel File Loaderu“ priamo v programe CPC Start Page (viď text nižšie).

### CPC Start Page - Excel File Loader

Prostredníctvom nasledujúceho postupu je užívateľovi umožnené vytvoriť „excelovský“ *xls* súbor, vďaka ktorého môže načítať výsledky uložené do súboru s príponou *.xml* z prístroja CPC100. Existujú dva prístupy ako pracovať s takýmto *xls* súborom. Prvým je spracovanie dát (ako napr. výpočty, tvorba grafov a pod.) ihneď po načítaní výsledkov z *.xml* súboru. Druhým prístupom je vytvorenie tzv. *xls* šablóny. Veľkú výhodu môže predstavovať tvorba šablóny v prípade, ak bude meranie niekoľko krát opakované.

Najskôr si vysvetlíme, ako postupovať, ak je potrebné spracovanie dát priamo po načítaní výsledkov. Pre takýto prístup musí užívateľ kliknúť v programe „OMICRON

CPC Start Page“ na odkaz „CPC Excel File Loader“ (vyžaduje balík MS EXCEL) vid' obr. č. 7.19.



Obr. 7.19: Odkaz na tvorbu excel file loaderu

Po kliknutí na tento odkaz sa užívateľovi zobrazí hárok s názvom „Welcome“. Prostredníctvom odkazu „Load XML-File“ na tomto hároku je potrebné otvoriť súbor z merania v tvare napr. *TEST\_REZISTIVITA\_TRIGGER\_BIN\_IN.xml*. Po načítaní zvoleného súboru sa vytvoria dva nové hárky s názvami, „Overview“ a „Enter 1“. V oboch hárkoch sa nachádzajú údaje z merania. Samotné výsledky sú však umiestnené v hároku „Enter 1“, ktorý v podstate obsahuje rovnaké údaje ako „Report“ tzn. protokol z merania (popisovaný vyššie). Hárok v exceli umožňuje *manuálne* vytvorenie grafických závislostí. Ak má používateľ záujem o vytvorenie „systému“, ktorý by vytváral výpočty a grafické závislosti automaticky, môže pri znalosti výslednej štruktúry dát vytvorenej pomocou prístroja CPC100 využiť nasledujúci spôsob. Využije postup popisovaný vyššie, popisujúci manuálnu tvorbu výpočtov, grafov a pod. avšak po ich tvorbe vymaže dáta/výsledky (iba číselné hodnoty) z merania. Takýto prístup si môžeme dovoliť, pretože vieme, že po načítaní nového súboru *.xml* (z nového) merania sa výsledky uložia do rovnakých buniek. Vytvoríme tak užívateľom definovanú šablónu. Na obr. č. 7.20 môžeme vidieť *.xls* šablónu. Biele bunky predstavujú načítané dáta zo súboru *.xml* a farebné bunky predstavujú užívateľom vytvorené a definované bunky.

R, X	Binary	Time	Distance	Depth	Coefficient (n)	Correction factor	Electrodes	Soil resistivity
			[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[Ωm]
16,94Ω	COME	3,866s	0,5	0,3	1,66666	1,15	EL 1-4	73,40
22,87Ω	GO	3,164s	0,5	0,3	1,66666	1,15	EL 5-8	99,10
19,44Ω	COME	2,242s	0,5	0,3	1,66666	1,15	EL 9-12	84,24
19,53Ω	GO	0,836s	0,5	0,3	1,66666	1,15	EL 13-16	84,63

Obr. 7.20: Príklad šablóny v programe excel pre tvorbu vyhodnocovacieho systému

Kde:

- Distance - vzdialenosť elektród (a) [m]
- Depth - hĺbka zaradenia elektród (h) [m]
- Coefficient (n) - koeficient vyjadrujúci pomer (a/h) [-]
- Correction factor - Korekčný faktor [-]
- Electrodes - označenie elektród [-]
- Soil resistivity - Vypočítaná hodnota rezistivity [-]

## 8 Meranie rezistivity pôdy v teréne

V tejto kapitole sú uvedené informácie o praktickom postupe plošného merania rezistivity pôdy, v rámci účelu tejto diplomovej práce. Terénne meranie poskytlo praktické overenie funkčnosti vyhotoveného zariadenia (systému), určeného k plošnému meraniu rezistivity pôdy s využitím určitej formy automatizácie. V tejto kapitole nájdeme údaje o mieste realizácie merania, panujúcich podmienkach, praktickom postupe merania, získaných poznatkoch počas merania a ďalšie.

### 8.1 Všeobecné údaje o meraní

K plošnému meraniu rezistivity pôdy bol využitý prístroj OMICRON CPC 100 a vyhotovené zariadenie umožňujúce prepínanie jednotlivých elektród. Pre rozloženia elektród (2x8 a 4x4), boli v prvom kroku získané hodnoty odporu pre sériové zapojenie prístroja CPC 100 s vyhotoveným zariadením. V druhom kroku boli získané hodnoty odporu len prostredníctvom meracieho prístroja CPC 100. To umožňuje jednoduché porovnanie výsledkov (do akej miery je ovplyvnené meranie vyhotoveným zariadením). Pre všetky merania bola využitá Wennerova metóda.

Pre každú elektródu bola použitá nami vyhotovená kabeláž o celkovej dĺžke 400 m (16x25 m). Ako vodič bol použitý jednožilový kábel s prierezom  $1 \text{ mm}^2$  - konkrétne CYA 1x1,00 H05V-K. Tento vodič disponuje dostatočným prierezom a izolačnou pevnosťou. K uzemneniu prístroja CPC 100 boli použité elektródy, ktoré k nemu boli pribalené. Jednotlivé elektródy boli zarazené kolmo do zeme do hĺbky  $h = 0,3 \text{ m}$ . Vzdialenosť medzi elektródami bola vždy konštantná ( $a = 1 \text{ m}$ ). Pre zatĺkanie elektród do zeme sme museli použiť „*mohutnejšie*“ kladivo (kladivo s hmotnosťou 500 g nevyhovuje).

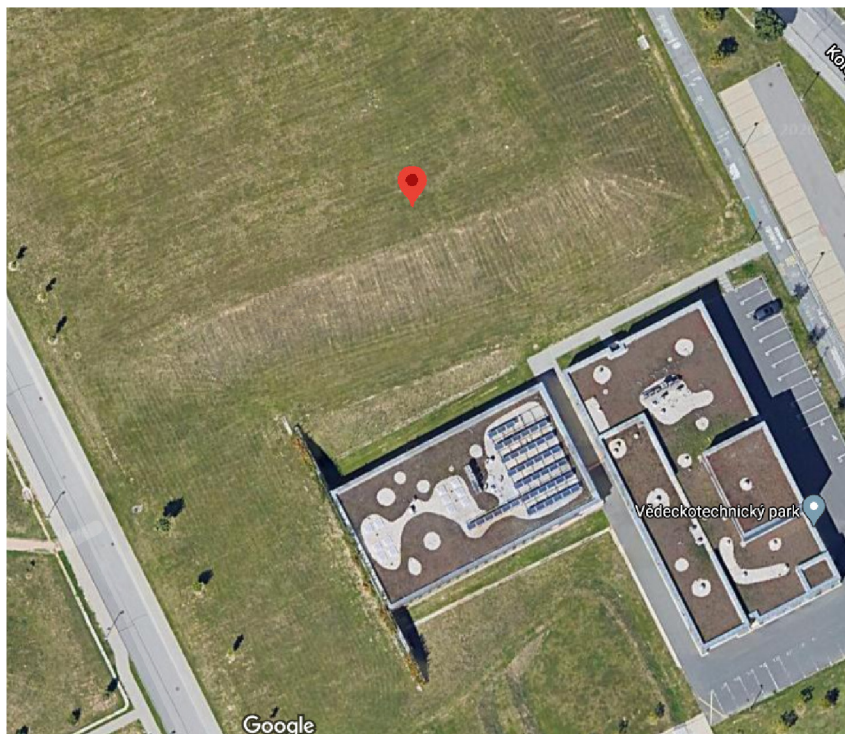
#### 8.1.1 Miesto realizácie

Plošné meranie rezistivity pôdy bolo uskutočnené vedľa vedecko-technického parku Profesora Lista, ktorý je úzko prepojený s Fakultou elektrotechniky a komunikačných technológií Vysokého učení technického v Brne. Podľa zdroja [36] sa na území, kde bolo uskutočnené meranie, nachádza pôdny typ (druh) - modálna hnedozem.

Pri meraní boli jednotlivé elektródy umiestnené tak, že elektróda č. 1 bola **V prvom meraní** zarazená **do rovnakého bodu** a to pre všetky rozloženia elektród vid obr. 8.1. Tento bod je charakterizovaný GPS súradnicami: **49.228675,16.573586**. Tento údaj je vhodné si zaznačiť pri každom meraní a to z dôvodu možnosti opakovania merania. Pri meraní bolo dbané na presné rozostupy elektród. Ak by sa jednotlivé vzdialenosti medzi elektródami nedodržali, mohli by výsledky z merania



priniest nerelevantné výsledky. Pre dodržanie jednotlivých vzdialeností (rozstupov) bolo použité meracie pásmo. Nieje vhodné, (najmä pri rozložení 1x16) aby sa vzdialenosť „a“ určovala od „elektrody k elektróde“.



Obr. 8.1: Poloha realizácie merania - označenie bodu pre EL1

### 8.1.2 Panujúce podmienky

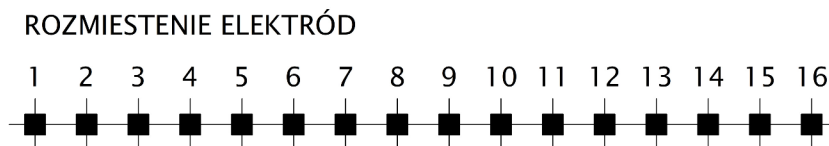
Meranie bolo uskutočnené dňa **14.05.2020** v poobedných hodinách. Teplota vzduchu v tieni predstavovala hodnotu  $13^{\circ}\text{C}$ . Tomuto dňu predchádzalo obdobie dažďa, ktoré prispelo k zníženiu hodnoty rezistivity v danej lokalite.

## 8.2 Výsledky z merania pre konkrétne rozmiestnenia

V tejto podkapitole sa nachádzajú schémy vyjadrujúce jednotlivé rozloženia (rozmiestnenia) elektród a výsledky z terénneho merania prislúchajúce k danému rozloženiu elektród. V jednotlivých tabuľkách je uvedená veľkosť nastaveného menovitého testovacieho prúdu, frekvencia testovacieho prúdu, aktuálna efektívna hodnota testovacieho prúdu, efektívna hodnota napätia medzi napäťovými elektródami, činná a jalová zložka impedancie. Posledným údajom je vypočítaná hodnota rezistivity.

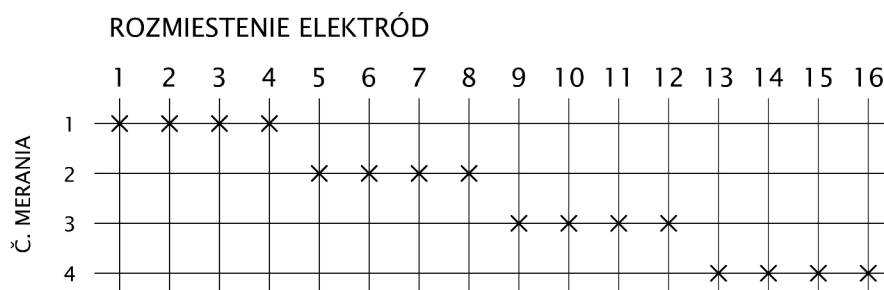
## 8.2.1 Rozmiestnenie elektród: 1x16 (posun o štyri)

Celkové rozmiestnenie všetkých šestnástich elektród v jednej priamke môžeme vidieť na obrázku 8.2.



Obr. 8.2: Schéma rozmiestnenia elektród (Wenner - 1x16)

Na obrázku 8.3 môžeme vidieť, ktoré elektródy sú aktívne pri konkrétnom čísle merania.



Obr. 8.3: Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (1x16)

### Namerané hodnoty

V tabuľke č. 8.1 môžeme vidieť namerané hodnoty odporu a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy. V tejto tabuľke (8.1), je žltou farbou vyznačená číselná hodnota odporu, ktorá predstavuje *maximálnu* hodnotu odporu z celého súboru merania a to pre každé rozloženie elektród.

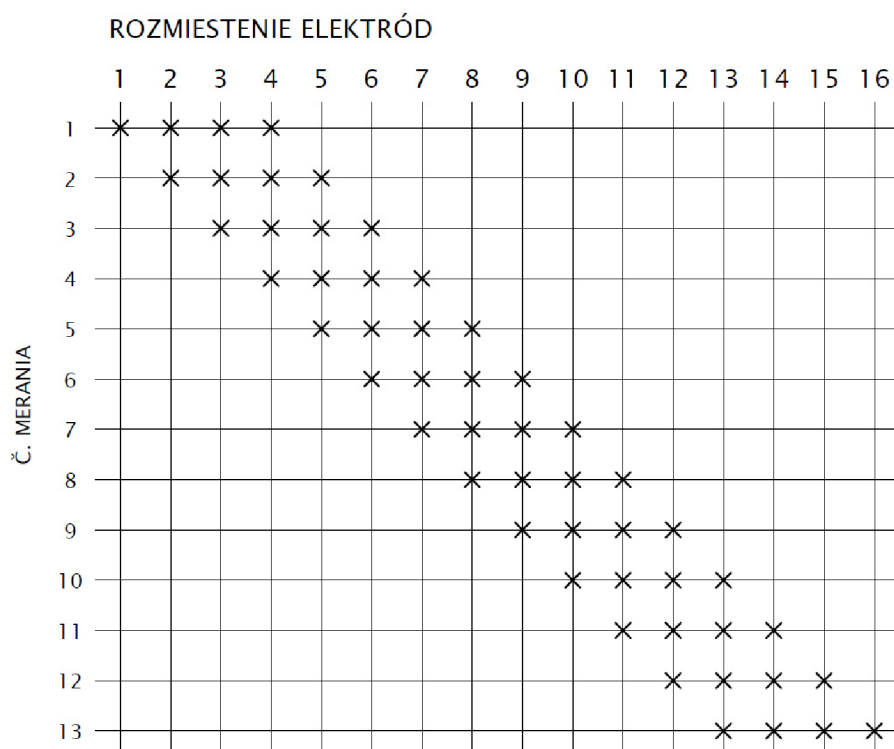
Tab. 8.1: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (1x16).

(1x6) OMICRON CPC 100 pripojený k vyhotovenému zariadeniu									
Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
		[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
1	EL1-EL2-EL3-EL4	5	128	450,5	2,24 $\angle$ -0,18	4,96	-15,75	37,77	62,70
2	EL5-EL6-EL7-EL8	5	128	515,2	2,62 $\angle$ -0,20	5,08	-17,96	38,66	64,17
3	EL9-EL10-EL11-EL12	5	128	416,3	1,99 $\angle$ 0,02	4,78	-20,02	36,36	60,37
4	EL13-EL14-EL15-EL16	5	128	440,4	2,50 $\angle$ -0,25	5,68	-24,33	43,26	71,82

## 8.2.2 Rozmiestnenie elektród: 1x16 (posun o jednu)

Celkové rozmiestnenie všetkých šestnástich elektród v jednej priamke, pre logiku, ktorá uvažuje o posune elektród smerom „doprava“, pri každom ďalšom meraní *o jednu elektródu*, je identické ako pre posun o štyri (viď obr. č. 8.2). Pri posune *o jednu doprava* sa však líši pozícia aktívnych elektród.

Pre takýto prístup, je možné uskutočniť celkovo trinásť meraní, čo je výhodné napr. z hľadiska väčšieho počtu dát, pre rovnaké rozloženie elektród, ako v predchádzajúcom prípade. Aktívne elektródy pre konkrétne číslo merania sú zobrazené na obr. č. 8.4, kde si môžeme všimnúť, že napr. v štvrtom meraní sú aktívne elektródy 4, 5, 6 a 7 (nie 13, 14, 15 a 6 ako tomu bolo pri posune o štyri).



Obr. 8.4: Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (1x16)

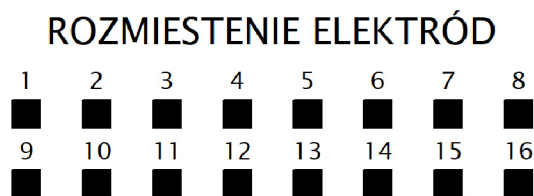
### Namerané hodnoty

Posun o jednu elektródu nebol pri realizácii terénneho merania využitý, z dôvodu, že nami vyhotovené zariadenie v čase merania, touto možnosťou nedisponoval. Táto funkcia bola naprogramovaná neskôr.



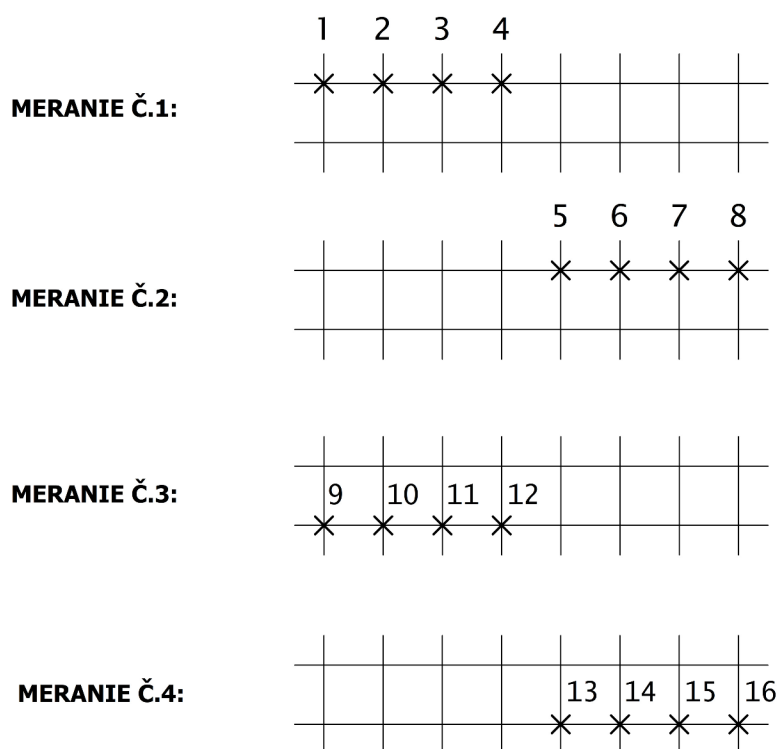
### 8.2.3 Rozmiestnenie elektród: 2x8

Celkové rozmiestnenie všetkých šestnástich meracích elektród v dvoch rovnobežných priamkach (rozloženie 2x8) môžeme vidieť na obrázku 8.5.



Obr. 8.5: Schéma výsledného rozmiestnenia elektród (Wenner - 2x8)

Na obrázku 8.6 môžeme vidieť, ktoré elektródy sú aktívne pri konkrétnom čísle merania.



Obr. 8.6: Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (2x8)

#### Namerané hodnoty

V tabulke č. 8.2 môžeme vidieť namerané hodnoty odporu a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy pre zapojenie prístroja CPC 100 k vyhotovenému zariadeniu.

niu. V tejto tabuľke (8.2), je žltou farbou vyznačená číselná hodnota odporu, ktorá predstavuje *minimálnu* hodnotu odporu z celého súboru merania a to pre každé rozloženie elektród.

Tab. 8.2: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (2x8).

<b>(2x8) OMICRON CPC 100 pripojený k vyhotovenému zariadeniu</b>									
Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
		[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
1	EL1-EL2-EL3-EL4	5	128	448,8	2,23 $\angle$ -0,18	<b>4,97</b>	-15,85	<b>37,80</b>	<b>62,75</b>
2	EL5-EL6-EL7-EL8	5	128	513,9	2,62 $\angle$ -0,22	<b>5,08</b>	-19,69	<b>38,66</b>	<b>64,18</b>
3	EL9-EL10-EL11-EL12	5	128	384,7	1,86 $\angle$ -0,21	<b>4,82</b>	-17,42	<b>36,72</b>	<b>60,96</b>
4	EL13-EL14-EL15-EL16	5	128	392,7	1,61 $\angle$ -0,23	<b>4,10</b>	-16,61	<b>31,24</b>	<b>51,85</b>

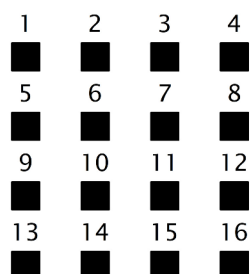
V tabuľke č. 8.3 môžeme vidieť namerané hodnoty odporu a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy pre meranie uskutočnené výlučne prístrojom CPC 100.

Tab. 8.3: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (2x8) - overenie.

<b>(2x8) Samotný OMICRON CPC 100</b>									
Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
		[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
1	EL1-EL2-EL3-EL4	5	128	447,2	2,22 $\angle$ -0,19	<b>4,97</b>	-16,90	<b>37,82</b>	<b>62,78</b>
2	EL5-EL6-EL7-EL8	5	128	512,5	2,60 $\angle$ -0,23	<b>5,08</b>	-20,47	<b>38,66</b>	<b>64,18</b>
3	EL9-EL10-EL11-EL12	5	128	382,4	1,85 $\angle$ -0,23	<b>4,83</b>	-19,37	<b>36,73</b>	<b>60,97</b>
4	EL13-EL14-EL15-EL16	5	128	385,3	1,58 $\angle$ -0,24	<b>4,11</b>	-16,94	<b>31,25</b>	<b>51,87</b>

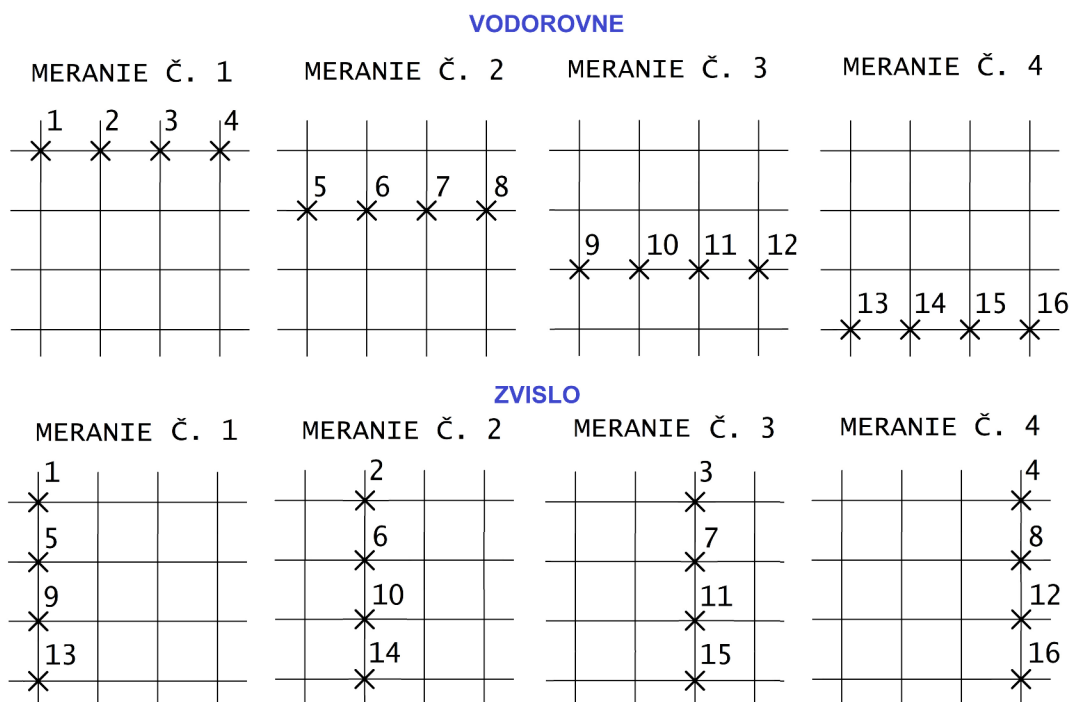
## 8.2.4 Rozmiestnenie elektród: 4x4

Celkové rozmiestnenie elektród (pre rozloženie 4x4) môžeme vidieť na obrázku 8.7.



Obr. 8.7: Schéma výsledného rozmiestnenia elektród (Wenner - 4x4)

Na obrázku 8.7 môžeme vidieť, ktoré elektródy sú aktívne pri konkrétnom čísle merania (pri aktivácii vodorovných, alebo zvislých elektród).



Obr. 8.8: Schéma aktívnych elektród pre dané číslo merania (4x4)

### Namerané hodnoty

V tabuľke č. 8.4 môžeme vidieť namerané hodnoty odporu a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy *pre zapojenie prístroja CPC 100 k vyhotovenému zariadeniu* pre *vodorovnú* aktiváciu jednotlivých elektród v rozložení 4x4. V tabuľke č. 8.5 sa nachádzajú zmerané hodnoty odporu *prostredníctvom prístroja CPC 100* a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy opäť pre *vodorovnú* aktiváciu jednotlivých elektród v rozložení 4x4.

Tabuľka č. 8.6 vyjadruje namerané hodnoty odporu a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy *pre zapojenie prístroja CPC 100 k vyhotovenému zariadeniu* pre *zvislú* aktiváciu jednotlivých elektród v rozložení 4x4. V tabuľke č. 8.7 sa nachádzajú zmerané hodnoty odporu *prostredníctvom prístroja CPC 100* a z nich vypočítané hodnoty rezistivity pôdy pre *zvislú* aktiváciu jednotlivých elektród v rozložení 4x4.

Tab. 8.4: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (4x4) - vodorovne a)

<b>(4x4) OMICRON CPC 100 pripojený k vyhotovenému zariadeniu</b>										
VODOROVNE	Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
			[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
	1	EL1-EL2-EL3-EL4	5	128	449,4	2,20 $\angle$ -0,27	4,89	-23,16	37,25	61,84
	2	EL5-EL6-EL7-EL8	5	128	446,5	2,23 $\angle$ -0,18	4,99	-15,50	37,95	62,99
	3	EL9-EL10-EL11-EL12	5	128	382,8	1,85 $\angle$ -0,20	4,83	-16,98	36,80	61,08
	4	EL13-EL14-EL15-EL16	5	128	424,6	2,02 $\angle$ -0,29	4,75	-24,23	36,19	60,07

Tab. 8.5: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (4x4) - vodorovne b)

<b>(4x4) Samotný OMICRON CPC 100</b>										
VODOROVNE	Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
			[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
	1	EL1-EL2-EL3-EL4	5	128	449,4	2,21 $\angle$ -0,28	4,90	-23,81	37,30	61,92
	2	EL5-EL6-EL7-EL8	5	128	448,9	2,24 $\angle$ -0,16	4,99	-13,93	37,96	63,02
	3	EL9-EL10-EL11-EL12	5	128	383,5	1,86 $\angle$ -0,22	4,84	-18,67	36,82	61,12
	4	EL13-EL14-EL15-EL16	5	128	424,5	2,02 $\angle$ -0,30	4,76	-25,01	36,24	60,16

Tab. 8.6: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (4x4) - zvislo a)

<b>(4x4) OMICRON CPC 100 pripojený k vyhotovenému zariadeniu</b>										
ZVISLO	Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
			[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
	1	EL1-EL5-EL9-EL13	5	128	380,5	1,86 $\angle$ -0,31	4,90	-26,58	37,29	61,90
	2	EL2-EL6-EL10-EL14	5	128	396,7	1,89 $\angle$ -0,23	4,76	-19,17	36,22	60,12
	3	EL3-EL7-EL11-EL15	5	128	328,6	1,60 $\angle$ -0,28	4,87	-23,96	37,09	61,58
	4	EL4-EL8-EL12-EL16	5	128	511,2	2,50 $\angle$ -0,24	4,89	-20,53	37,19	61,74

Tab. 8.7: Namerané hodnoty  $R$  a vypočítané rezistivity (4x4) - zvislo b)

<b>(4x4) Samotný OMICRON CPC 100</b>										
ZVISOLO	Č. mer.	Označ. elektród	$I_{TEST}$	$f$	$I_{RMS}$	$V_{RMS}$	$R$	$X$	$\rho$	$\rho_k$
			[A]	[Hz]	[mA]	[V]	[ $\Omega$ ]	[m $\Omega$ ]	[ $\Omega$ m]	[ $\Omega$ m]
1		<b>EL1-EL5-EL9-EL13</b>	5	128	380,8	1,87 $\angle$ -0,24	<b>4,91</b>	-20,41	<b>37,35</b>	<b>62,00</b>
2		<b>EL2-EL6-EL10-EL14</b>	5	128	395,6	1,88 $\angle$ -0,22	<b>4,76</b>	-18,70	<b>36,24</b>	<b>60,16</b>
3		<b>EL3-EL7-EL11-EL15</b>	5	128	325,9	1,59 $\angle$ -0,14	<b>4,87</b>	-11,52	<b>37,09</b>	<b>61,58</b>
4		<b>EL4-EL8-EL12-EL16</b>	5	128	509,4	2,49 $\angle$ -0,28	<b>4,89</b>	-23,77	<b>37,21</b>	<b>61,78</b>

### 8.3 Príklad výpočtu rezistivity pôdy

Plošné meranie rezistivity pôdy bolo realizované pri rozstupe jednotlivých elektród s hodnotou 1 m ( $a = 1$  m). Každá zo šestnástich elektród bola zarazená do hĺbky  $h = 0,3$  m a preto sme hodnotu konfiguračného koeficientu zvolili  $n = 1,65$  (viď. tab. č. 3.1). Interpretované sú ako nekorigované, tak i korigované hodnoty rezistivity pôdy. Pre výber správnej hodnoty korekčného činiteľa sme použili tab. č. 3.2, nachádzajúcu sa v kapitole 3.1.2. Výber korekčného činiteľa bol realizovaný pre obdobie dažďov, pretože úhrn zrážok za posledných 48 hodín bol v dobe realizácie merania približne 11 mm (informácie o zrážkach boli získané z ČHMÚ). Príklad výpočtu nekorigovanej i korigovanej hodnoty rezistivity pôdy je uvedený pre posledný riadok tabuľky č. 8.7.

#### Príklad výpočtu pre nekorigovanú hodnotu rezistivity pôdy

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{n} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 1,4,89}{1,65} = 37,21 \Omega \cdot m \quad (8.1)$$

#### Príklad výpočtu pre korigovanú hodnotu rezistivity pôdy

$$\rho_k = \rho \cdot K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{n} \cdot K = \frac{4 \cdot \pi \cdot 1,4,89}{1,65} \cdot 1,66 = 37,21 \cdot 1,66 = 61,78 \Omega \cdot m \quad (8.2)$$

Legenda k rovnici 8.1 a 8.2:

$\rho$  - Vypočítaná hodnota rezistivity pôdy ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_k$  - Korigovaná hodnota rezistivity pôdy ( $\Omega \cdot m$ )

$\pi$  - Ludolfovo číslo (-)

$a$  - Vzdialenosť elektród (m)

$R$  - Nameraný odpor pôdy ( $\Omega$ )

$n$  - Konfiguračný koeficient (-)

$K$  - Korekčný činiteľ (-)

## 8.4 Príklad výpočtu chyby merania

V tejto podkapitole je uvedený výpočet absolútnej a relatívnej chyby merania. Keďže *skutočnú* hodnotu meranej veličiny nepoznáme, použijeme *konvenčne pravú* hodnotu. Za konvenčne pravú hodnotu meranej veličiny je považovaná hodnota rezistivity pôdy stanovená výlučne prostredníctvom prístroja OMICRON CPC 100. Za *nameranú* hodnotu meranej veličiny je považovaná rezistivita pôdy stanovená prostredníctvom prístroja OMICRON CPC 100, v kombinácii so zapojeným vyhotoveným zariadením. Prostredníctvom takéhoto postupu, môžeme stanoviť, do akej miery nami vyhotovené zariadenie ovplyvnilo výsledok z merania.

Príklad výpočtu absolútnej a relatívnej chyby merania rezistivity pôdy je uvedený pre prvý riadok tab. 8.6 a 8.7 (hodnoty podfarbené červenou). Dôvodom je maximálna odchýlka *nameranej* hodnoty rezistivity pôdy, od *konvenčne pravej* hodnoty rezistivity pôdy (maximálna absolútna a relatívna chyba merania rezistivity pôdy) [35].

### Príklad výpočtu absolútnej chyby merania

$$\Delta x = x_n - x_p \quad (8.3)$$

$$\Delta \rho_{k,max} = \rho_{k,n} - \rho_{k,p} = 61,90 - 62,00 = -0,10 \Omega.m \quad (8.4)$$

### Príklad výpočtu relatívnej chyby merania

$$\delta x_{\%} = \frac{|\Delta x|}{x_p} \cdot 100 \quad (8.5)$$

$$\delta \rho_{k,max\%} = \frac{|\Delta \rho_{k,max}|}{\rho_{k,p}} \cdot 100 = \frac{|-0,10|}{62,00} \cdot 100 \approx 0,16 \% \quad (8.6)$$

Legenda k rovniciam 8.3 až 8.6 [35]:

$\Delta_x$  - Absolútna chyba merania

$\Delta_{\rho_{k,max}}$  - Maximálna absolútna chyba merania rezistivity pôdy ( $\Omega.m$ )

$\delta_{x,\%}$  - Relatívna chyba merania (%)

$\delta_{\rho_{k,max}\%}$  - Maximálna relatívna chyba merania rezistivity pôdy (%)

$x_n$  - Nameraná hodnota meranej veličiny

$\rho_{k,n}$  - Nameraná hodnota rezistivity pôdy ( $\Omega.m$ )

$x_p$  - Konvenčne pravá hodnota meranej veličiny

$\rho_{k,p}$  - Konvenčne pravá hodnota rezistivity pôdy ( $\Omega.m$ )

## 9 Výhody a nevýhody plošného merania

Pri plošnom meraní rezistivity pôdy sa môžeme stretnúť s určitými výhodami a nevýhodami.

### 9.1 Výhody

Za najväčšiu výhodu považujeme fakt, že takýto prístup merania rezistivity trvá podstatne kratšiu dobu než postupné meranie v jednotlivých bodoch plochy (klasický prístup). Z tohto tvrdenia vyplýva, že ak by bolo potrebné “zmapovať” rezistivitu pôdy na rozsiahlejšom území (napr. za účelom projektovania rozsiahlych zemničov), môžu byť ušetrené určité náklady na odpracované hodiny zamestnanca/ov. Podobne môžu byť ušetrené náklady na dopravu k miestu merania, pretože celá plocha môže byť premeraná v priebehu dňa a odpadá nutnosť opätovnej dopravy k miestu merania. V niektorých prípadoch (záleží od vyhotovenia systému) môže byť ovládanie celého cyklu merania intuitívnejšie (cyklus môže prebiehať automaticky). Keďže meranie trvá podstatne kratšiu dobu, môžu byť ušetrené náklady na elektrickú energiu z NN siete (napriek pridruženému odberu EE zariadením na prepínanie elektród). Pri postupnom meraní daných parametrov v jednotlivých bodoch plochy, musí užívateľ pre zmeranie rezistivity pôdy v ploche najprv rozmiestniť elektródy (často krát vzdialené od meracieho prístroja aj desiatky metrov), vrátiť sa k meraciemu prístroju, zahájiť meranie (získať výsledky) a opakovať tento postup niekoľko krát. Pri plošnom meraní (s využitím automatizácie) je ušetrená energia obsluhy na tieto úkony.

### 9.2 Nevýhody

Medzi nevýhody môžeme zaradiť najmä zriaďovacie náklady. Patrí sem materiál pre výrobu meracích elektród, ich opracovanie a nutnosť veľkého počtu vodičov. Negatívum predstavuje i čas a náklady potrebné pre zhotovenie samotného zariadenia umožňujúceho plošné meranie rezistivity pôdy. Náročnejšie je i prenášanie takéhoto systému na meracie pracovisko a jeho následné uskladnenie.



## 10 Záver

Diplomová práca je zameraná na návrh a realizáciu plošného merania rezistivity pôdy. V prvej kapitole, teoretickej časti, sa nachádzajú informácie o vlastnostiach pôdy a horninového prostredia. Cieľom spomínanej kapitoly je informovať čitateľa o zložení pôdy a premostiť sa tak k myšlienke, že pôda predstavuje zriedka kedy homogénny priestor s nevariujúcou veľkosťou rezistivity. Po osvojení uvedených poznatkov bude čitateľ schopný vysvetliť príčiny podieľajúce sa na priestorových zmenách rezistivity pôdy.

V druhej kapitole je uvedená definícia pojmu *rezistivita pôdy*, dôvod jej merania a faktory ovplyvňujúce jej veľkosť. Kapitola je ukončená prehľadovou tabuľkou vyjadrujúcou typické hodnoty rezistivity pôdy, pre určitý charakter pôdy.

Tretia kapitola sa zaoberá *vybranými* metódami pre meranie rezistivity pôdy, ktoré možno použiť i pre *plošné meranie* rezistivity. Konkrétne pojednáva o Wennerovej a Schlumbergerovej metóde. Pre obe spomínané metódy bol uvedený popis princípu merania, všeobecná schéma zapojenia meracieho prístroja s elektródami a vzťahy pre výpočet rezistivity z nameraných hodnôt. Ďalej je tu uvedený princíp a dôvod korekcie rezistivity pôdy pre konkrétne ročné obdobie.

Ďalšia časť popisuje náhradu pôdneho priestoru, tzv. horizontálnymi modelmi pôdy. Nachádza sa tu popis jedno, dvoj a viacvrstvomého modelu. Dvojvrstvomý model bol doplnený o obrázok vyjadrujúci pole bodovej elektródy, umiestnenej v pôde s rôznym pomerom  $\rho_2/\rho_1$ .

Vzhľadom na to, že pri vykonávaní merania rezistivity pôdy sa na pracovisku môžu objaviť nebezpečné hodnoty krokového a dotykového napätia, bola piata kapitola venovaná tejto problematike. Uvedená je tu definícia oboch pojmov podľa európskej normy ČSN EN 50522 a odvodenie výpočtu krokového napätia.

Ďalej nasleduje kapitola popisujúca meracie prístroje použité pre účel tejto práce (METREL - EUROTTEST 61557 a OMICRON - CPC 100). Podrobnejší popis sa týka meracieho prístroja CPC 100, ktorý bol využitý pre návrh a realizáciu meracieho a vyhodnocovacieho systému určenému k plošnému meraniu rezistivity pôdy. Účel meracieho prístroja EUROTTEST 61557 mal spočívať v možnosti porovnania interpretovaných výsledkov poskytnutých prístrojom CPC 100. Z určitých dôvodov však nemohol byť pri realizácii merania dostupný. Popísané sú jednotlivé funkcie prístrojov, princíp obsluhy, schémy zapojenia, technické parametre, ich obsluha a ďalšie. Kapitola je ukončená prehľadovou tabuľkou, v ktorej môžeme nájsť porovnanie vybraných atribútov oboch prístrojov.

Ďalšiu významnú časť tvorí praktická časť tejto práce, ktorá je zameraná na návrh a realizáciu systému zabezpečujúceho plošné meranie rezistivity pôdy. Je tu vysvetlené, akým spôsobom je ovládaný merací prístroj CPC 100 a akým spôso-



bom je ovládaná sieť meracích elektród. Ďalej je tu vysvetlený dôvod voľby použitej platformy a akým spôsobom bol vyriešený problém s malým počtom vstupno-výstupných (tzv. I/O) pinov platformy. Následne tu nájdeme informácie o SW riešení (tvorba, popis) aplikácie podieľajúcej sa na aktivácií príslušných meracích elektród. Kapitola je zavŕšená popisom vytvoreného vyhodnocovacieho systému.

Vyhotovený systém bol navrhnutý tak, aby poskytol užívateľovi v prípade potreby použiť prakticky ľubovoľný merací prístroj. To znamená, že umožní rozšírenie použitia „klasického“ meracieho prístroja (s postupným meraním daných parametrov v jednotlivých bodoch plochy) pre účel plošného merania. V prípade použitia vyhotoveného systému s prístrojom CPC 100 (a využitia sequenceru), umožní prakticky automatické meranie rezistivity v ploche. Vyhotovené zariadenie poskytuje možnosť využitia šesnástich meracích elektród. Po určitej modifikácii by však bolo možné rozšíriť jeho možnosti (napr. väčší počet elektród, meranie rezistivity v diagonále pri rozložení elektród 4x4 a pod.).

Do kapitoly číslo osem boli vložené informácie popisujúce realizáciu plošného merania rezistivity pôdy, spolu s interpretáciou výsledkov. Terénne meranie poskytlo praktické overenie funkčnosti vyhotoveného zariadenia (systému), určeného k plošnému meraniu rezistivity pôdy s využitím určitej formy automatizácie. Pri realizácii merania bola zvolená hodnota frekvencie testovacieho prúdu 128 Hz, pre potlačenie prípadných účinkov blúdivých prúdov sieťovej frekvencie. Z výsledkov merania je patrné, že meraná pôda je pomerne homogénna. Minimálna hodnota korigovanej rezistivity pôdy stanovená meraním je **51,85  $\Omega \cdot m$**  a maximálna je **71,82  $\Omega \cdot m$** . Meranie prebehlo (podľa [36]) na pôdnom type, modálna hnedozem, čomu odpovedajú i namerané hodnoty rezistivity pôdy. Pri porovnaní získaných výsledkov prostredníctvom meracieho prístroja CPC 100 v zapojení s vyhotoveným zariadením a výsledkov poskytnutých samotným prístrojom CPC 100, si môžeme všimnúť, že sa odlišujú len veľmi málo. Minimálna hodnota relatívnej chyby merania rezistivity pôdy je **0 %** (identické výsledky) a maximálna hodnota relatívnej chyby merania je **0,16 %**.

V kapitole číslo deväť sa zaoberáme výhodami a nevýhodami *plošného* prístupu k meraniu rezistivity pôdy. Za najväčšiu výhodu považujeme fakt, že oproti meraniu parametrov v jednotlivých bodoch plochy, plošné meranie trvá podstatne kratšiu dobu, z čoho vyplývajú ďalšie výhody.

## Literatúra

- [1] ČSN 33 2000-5-54. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení: Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování*. Ed. 2. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÝ INSTITUT, 2007.
- [2] OSOLSOBĚ, Jan a Mirko ZAPLETAL. *Zemnění a bezpečnost*. Praha: Československá akademie věd, 1964, 11 s.
- [3] VARGA, František. *ODPOR PŮDY A JEHO VPLYV NA REGULÁCIU TROJBODOVÉHO ZÁVESU TRAKTOROV*. Nitra, 2011. Dizertačná práca. SLOVENSKÁ POLNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA V NITRE TECHNICKÁ FAKULTA. Vedoucí práce Anton Žikla.
- [4] GAJDOŠ, Vojtech. *Elektromagnetické vlastnosti hornín*. Bratislava, 2013. VYSOKOŠKOLSKÉ SKRIPTÁ. Univerzita Komenského v Bratislave.
- [5] MAYER, Daniel; POLÁK, Jozef. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [6] MLČÁK, Tomáš. *ZEMNÍ ODPOR ZEMNICE: REZISTIVITA PŮDY*. Ostrava, 2009. Návod do měření. Katedra elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB – TU Ostrava.
- [7] WENNER, Frank. *A method of measuring earth resistivity*. [online]. Wahington: National Bureau of Standards, 1916, s. 469-478 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <https://archive.org/details/met124694781916258258unse>
- [8] MAREŠ, Pavel. *ELEKTRO: Měřič rezistivity a zemního odporu CA 6472/6474* [online]. 2008, s. 36-37 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36834.pdf>
- [9] PNE 33 33 00 - 1. *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie*. ČEZ Distribuce, E.ON CZ, E.ON Distribuce, PRE distribuce, ČEPS, 2017.
- [10] *OMICRONENERGY: OMICRON CPC 100* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cpc-100/description/>
- [11] ČSN EN 61557-5 ED. 2. *ČSN EN 61557-5 (356230) Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 kV a se stejnosměrným napětím do 1,5 kV - Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany: Část 5: Zemní odpor*. Praha: ÚNMZ, 2014.

- [12] Arduino Mega 2560 Rev3. *ARDUINO* [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [13] *NATIONAL INSTRUMENTS: What Is LabVIEW?* [online]. Texas [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://bit.ly/2RTPsGp>
- [14] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, et al. *Provoz distribučních soustav. část A. Praha: Státní program na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie. 2011, ISBN 978-80-01-04935-8.*
- [15] Vyhláška č. 50/1978 Sb. *Vyhláška Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu o odborné způsobilosti v elektrotechnice.*
- [16] GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Meranie rezistivity pôdy a odporu uzemnenia. *Retel: online knižnica pre revíznych technikov a elektrotechnikov* [online]. 30.9.2017 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://row.sk/oYs9z>
- [17] ČSN EN 50 522. *Uzemňování elektrických instalací nad 1 kV. Český normalizační institut, Prosinec 2011.*
- [18] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Elektrické stanice a vedení.* Brno, 2017. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [19] KOČVARA, Antonín. *Uzemňování elektrických zařízení.* Praha: IN-EL, 1995. Knižnice elektro
- [20] BRŮSIL, Marián a Miroslava BOČKAYOVÁ. *Bezpečnosť práce na elektrických zariadeniach: Meranie odporu uzemnenia, jedna z činností pri vykonávaní odborných prehliadok.* ZTS Elektronika SKS s.r.o. Nová Dubnica.
- [21] LHOTÁK, Jiří. *Návrh zemnicího systému pro nízké napětí.* Plzeň, 2014. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI - FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Radka Valešová.
- [22] LAUKO, Tomáš. *Porovnanie parametrov ochranných uzemnení.* Nitra, 2019. DIPLOMOVÁ PRÁCA. SLOVENSKÁ POLNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA V NITRE - TECHNICKÁ FAKULTA. Vedúci práce Stanislav Paulovič.
- [23] KUBĚNA, Michael. *Vhodnost modelování skutečného modelu půdy náhradním jednovrstvým nebo dvouvrstvým horizontálním modelem půdy* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119191>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Václav Vyčítal.

- [24] *OMICRON CPC 100 Reference Manual: PRIMARY TEST SYSTEM FOR SUBSTATION EQUIPMENT COMMISSIONING AND MAINTENANCE*. Article Number VESD0600 - Manual Version: CPC100.AE.5. © OMICRON electronics, 2005. [online]. [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://lnk.sk/qBNY>
- [25] *With MIT App Inventor, anyone can build apps with global impact: What is App Inventor?* [online]. Massachusetts: Institute of Technology, ©2012-2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://appinventor.mit.edu/explore/content/what-app-inventor.html>
- [26] KŘÍŽ, Michal. *Provádění revizí elektrických instalací do 1 000 V v prostorách bez nebezpečí výbuchu*. SVAZEK 106. IN-EL, spol. s r.o., 2018. ISBN 9788087942413.
- [27] MOLIŠ, M. *Vytvoření laboratorního modelu zemnicí soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 81 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Topolánek, Ph.D.
- [28] P. K. BHATTACHARYA AND H. P. PATRA *Methods in Geochemistry and Geophysics* DIRECT CURRENT GEOELECTRIC SOUNDING Indian: Institute of Technology, Department of Geology and Geophysics, 1968. 150 s. ELSEVIER PUBLISHING COMPANY Amsterdam/London/New York
- [29] 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.
- [30] *EUROTEST 61557: Návod na obsluhu METREL*. 2015.
- [31] MERAVÝ, Ján. *Elektrotechnická spôsobilosť pre elektrikárov*. 5. upravené vydanie. Trenčín: IGAZ-tlačivá-papier, 2018. ISBN 978-80-89576-05-0.
- [32] TEXAS INSTRUMENTS. *PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus*. DATASHEET. Dallas Texas: SCPS068J, 2001.
- [33] ČSN EN 50522. *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [34] *Texas Instruments: Datasheet - PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus* [online]. SCPS068J. 2015, 42 s. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>
- [35] GUTTEN, Miroslav. *Meranie a meracie systémy I.: Prístroje a systémy*. EDIS, 2012. ISBN 9788055405834.

[36] Pôdna mapa, Česká geologická služba. [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z:  
<https://mapy.geology.cz/pudy/>

## Zoznam príloh

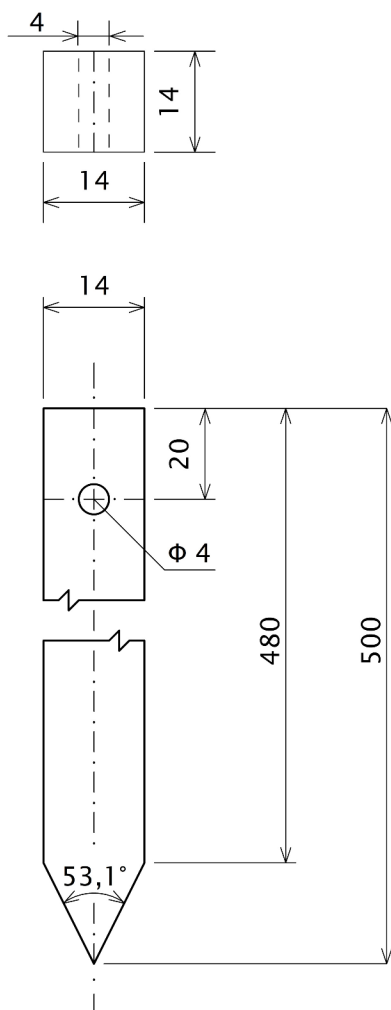
A - Zoznam vybavenia pre plošné meranie	104
B - Výkresy pre výrobu meracích elektród	105
C - Vyhotovené meracie elektródy	107
D - Kód nahraný do platformy	108
E - Aplikácia „Electrode Control“	109
F - Tabuľky stavov pre rôzne rozmiestnenia	110
G - Uzemňovacia tyč pre vyhotovený prístroj	111
H - Rozloženie elektród 4x4 v teréne	112

## A - Zoznam vybavenia pre plošné meranie

Pred zahájením samotného merania je viac než vhodné, aby bola vykonaná kontrola vybavenia. Zistiť na mieste merania, že nám „chýba“ čo i len jeden z kľúčových prvkov pre plošné meranie rezistivity môže viesť k strate času a vo výsledku i financií.

- Merací prístroj (napr. OMICRON CPC 100)
- Sieťový napájací kábel k meraciemu prístroju
- Napájanie NN (napr. elektrocentrála s výkonom min. 3 kW)
- Zariadenie umožňujúce prepínanie elektród
- Napájanie zariadenia umožňujúceho prepínanie elektród (adaptér DC - 5V)
- Vyhotovená aplikácia „Electrode control v 2.136“
- Smartphone/notebook na ktorom spustíme APP „Electrode control v 2.136“
- Predlžovací kábel s vhodnou dĺžkou (ideálne 50 m)
- Vodiče pre kontakty „BIN IN“
- Vodiče pre napájanie vstupov A, B, C a D (na zariadení)
- Vodiče zabezpečujúce kontakt s meracími elektródami
- Meracie elektródy (v našom prípade 16 ks)
- Uzemňovacia elektróda prístroja CPC 100 + vhodný vodič (min. 6 mm<sup>2</sup>)
- Uzemňovacia elektróda prístroja pre prepínanie elektród + vhodný vodič
- Kladivo pre zarážanie elektród do pôdy
- Vhodná obuv do terénu, rukavice a pod.
- Nástroj (kľúč) pre vyťahovanie elektród z pôdy
- Zvinovací meter prípadne pásmo
- Špagát pre vytýčenie jednotlivých priamok
- Papiere a pero pre zaznamenanie výsledkov (prípadne USB flash disk)

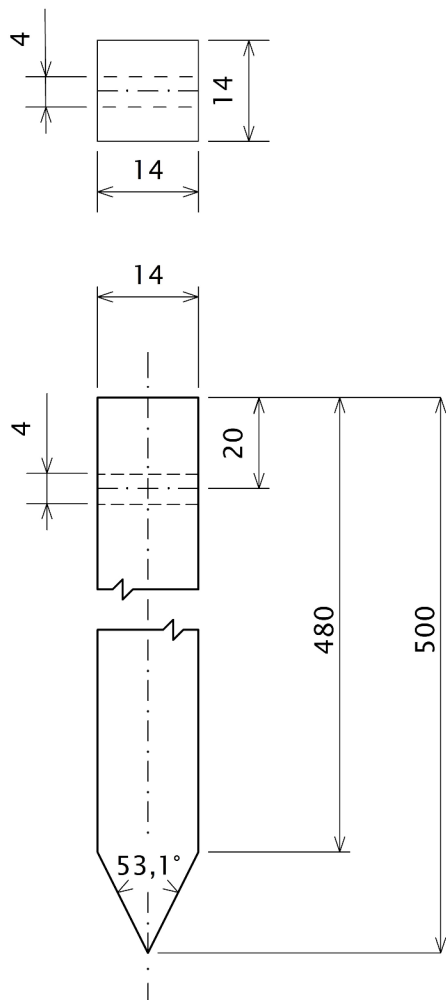
## B - Výkresy pre výrobu meracích elektród



Materál: nerezová ocel 1.4301 Tolerovanie: ISO 8015 Presnosť: ISO 2768	Dátum: 12.03.2020	Podpis: _____
Konštruoval: Študent Kontroloval: Študent	Schválil: Študent Dátum: 18.03.2020	Hmotnosť: 0,78 kg
<b>VUT – BRNO</b>	<b>Názov: Meracia elektróda</b>	
	Č. výkresu: 1.	Listov: 2   List: 1.

Obr. B.1: Technický výkres č. 1 pre výrobu meracích sond (tyčí)





Materál: nerezová ocel 1.4301 Tolerovanie: ISO 8015 Presnosť: ISO 2768	Dátum: 12.03.2020	Podpis: _____
Konštruoval: Študent Kontroloval: Študent	Schválil: Študent Dátum: 18.03.2020	Hmotnosť: 0,78 kg
<b>VUT – BRNO</b>	<b>Názov: Meracia elektróda</b>	
	Č. výkresu: 1.	Listov: 2   List: 2.

Obr. B.2: Technický výkres č. 2 pre výrobu meracích sond (tyčí)

## C - Vyhotovené meracie elektródy



Obr. C.1: Pohľad na vyhotovené tyče

## D - Kód nahraný do platformy

Kód nahraný do platformy (Arduino MEGA2560) sa nachádza na priloženom CD. Ukážku pre aktiváciu a deaktiváciu elektród EL1 až EL4 môžeme vidieť nižšie.

```
if (buttononesixteen_state == 0 && Received == 'a')
{
  //ELEKTRODA 1 - SIG. A:
  pinMode(3, OUTPUT);          //P 01.03 = Prepnutie COM na NO (E1)
  digitalWrite(3, LOW);
  pcf8574_1.write(0, OUTPUT); // EXPAND
  pcf8574_1.write(0, LOW);
  pinMode(4, OUTPUT);          //VYP 01.04 = Prepnutie COM na NO (E1 = SIG A)
  digitalWrite(4, LOW);

  //ELEKTRODA 2 - SIG. B:
  pinMode(7, OUTPUT);          //P 02.07 = Prepnutie COM na NO (E2)
  digitalWrite(7, LOW);
  pinMode(8, OUTPUT);          //VYP 02 = Prepnutie COM na NO (E2 = SIG B)
  digitalWrite(8, LOW);

  //ELEKTRODA 3 - SIG. C:
  pinMode(10, OUTPUT);         //P 03.10 = Prepnutie COM na NO (E3)
  digitalWrite(10, LOW);
  pinMode(12, OUTPUT);         //VYP 03 = Prepnutie COM na NO (E3 = SIG C)
  digitalWrite(12, LOW);

  //ELEKTRODA 4 - SIG. D:
  pinMode(16, OUTPUT);         //VYP 04 = Prepnutie COM na NO (E4 = SIG D)
  digitalWrite(16, LOW);

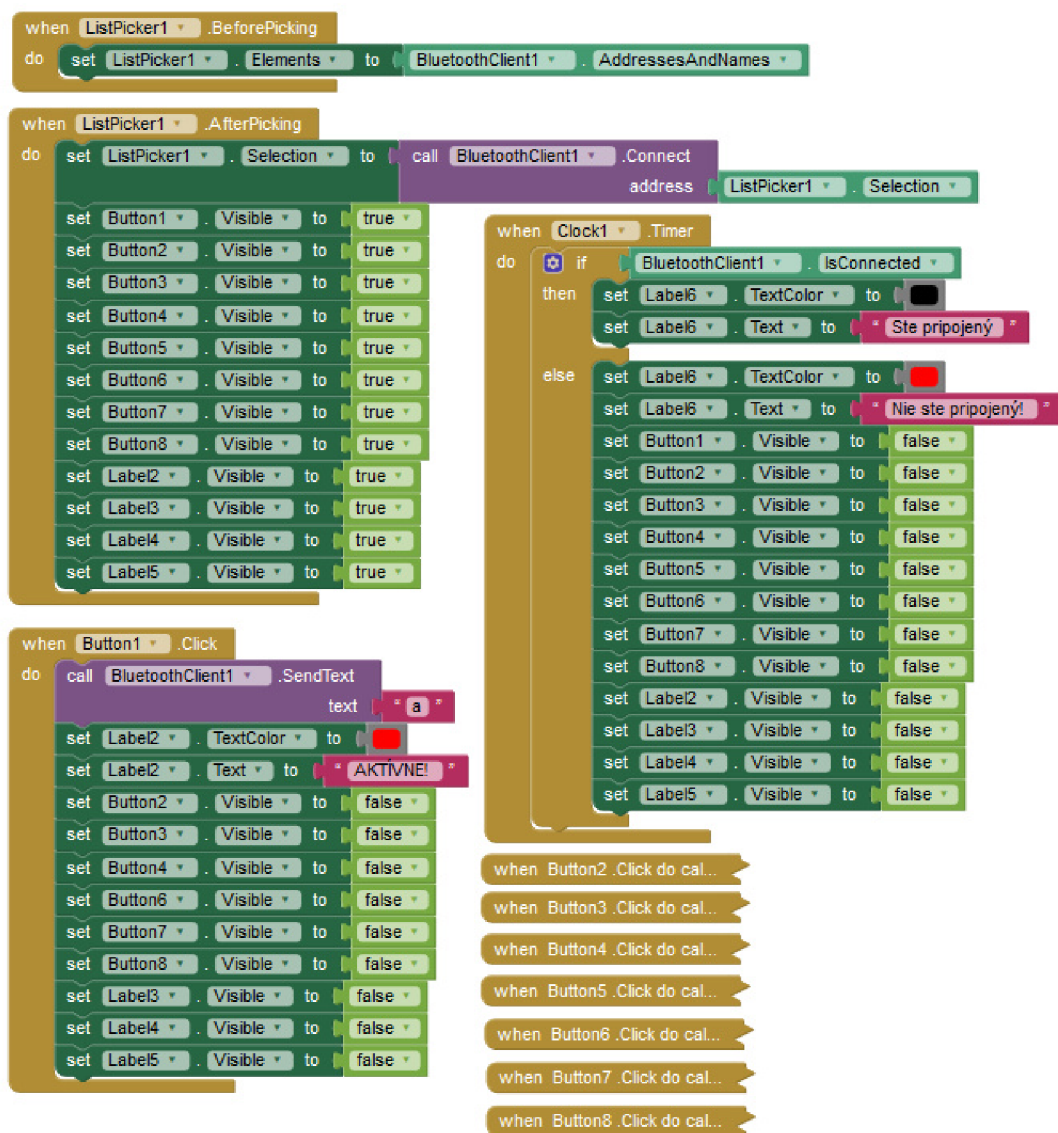
  buttononesixteen_state = 1;
  Received = 0;
}
if (buttononesixteen_state == 1 && Received == '!')
{
  pcf8574_1.write(0, HIGH);    //"VYPNUTIE"

  for (int i = 2; i < 17; i++) {
    digitalWrite(i, HIGH);
  }
}
```

Obr. D.1: Ukážka časti kódu nahraného do platformy

## E - Aplikácia „Electrode Control“

Vyhotovená aplikácia zabezpečujúca ovládanie vyhotoveného výrobku a prístroja CPC 100 sa nachádza na priloženom CD. Verzia programu je v 2.136. Ďalej bola vložená aj editovateľná verzia, s príponou „\*aia“. Ukážku blokov pri tvorbe aplikácie pomocou MIT App Inventoru, môžeme vidieť nižšie.



Obr. E.1: Ukážka blokov pri tvorbe aplikácie

## F - Tabuľky stavov pre rôzne rozmiestnenia

Tabuľky stavov zabezpečujúce prehľad o stave (signáloch) jednotlivých elektród môžeme vidieť nižšie.

Tab. F.1: Tabuľka stavov pre rozmiestnenie elektród v priamke - Wenner

Elektróda	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
SIG.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I-	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U-	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
U+	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
I+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Tab. F.2: Tabuľka stavov pre rozmiestnenie 2x8 - Wenner

Elektróda	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
SIG.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I-	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
U-	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
U+	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
I+	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tab. F.3: Tabuľka stavov pre rozmiestnenie 4x4 - Wenner

Elektróda	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
SIG.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I-	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
U-	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
U+	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0
I+	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1



## G - Uzemňovacia tyč pre vyhotovený prístroj



Obr. G.1: Uzemňovacia tyč vyhotoveného prístroja

## H - Rozloženie elektród 4x4 v teréne



Obr. H.1: Rozloženie elektród pri prebiehajúcom meraní v teréne