VYSOKOŠKOLSKÉ SKRIPTÁ

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

Prírodovedecká fakulta

Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky

René Putiška, Ivan Dostál

Elektrická odporová tomografia



2021

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

Predkladané vysokoškolské skriptá sú určené pre študentov magisterského štúdia v rámci študijného programu Aplikovaná a environmentálna geofyzika (študijný odbor Vedy o Zemi) na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave ako učebné texty k predmetu Geoelektrické metódy.

© RNDr. René Putiška, PhD., Mgr. Ivan Dostál, PhD., 2021

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Geologická sekcia, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky

2021

Recenzent

doc. RNDr. Martin Bednarik, PhD.

Za odbornú stránku týchto vysokoškolských skrípt zodpovedajú autori.

Vyšlo ako elektronická publikácia.

Rozsah 156 strán, 9,92 AH, vydanie prvé.

Vydala Univerzita Komenského v Bratislave.



Dielo je vydané pod medzinárodnou licenciou Creative Commons CC BY-S A4.0 (vyžaduje sa: povinnosť uvádzať pôvodného autora diela; povinnosť odvodené dielo zdieľať pod rovnakou licenciou ako pôvodné dielo). Viac informácií o licencii a použití diela: <u>https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</u>

Dostupné na stránke: https://fns.uniba.sk/putiska/

ISBN: 978-80-223-5115-7

Obsah

Ú	Úvod9			
1	Zá	Základné pojmy a veličiny		
2	2 Elektrické vlastnosti hornín			
3	Ту	oy elektródových usporiadaní	20	
	3.1	Wenner	21	
	3.2	Schlumberger	26	
	3.3	Dipól – dipól	29	
	3.4	Pól – pól	33	
	3.5	Pól – dipól	34	
	3.6	Hĺbkový dosah elektródových usporiadaní	37	
4	Pri	ama a inverzná úloha v odporových metódach	39	
	4.1	1D priame modelovanie	40	
	4.2	2D priame modelovanie	41	
	4.3	3D priame modelovanie	43	
	Inve	rzný proces v geoelektrických metódach	46	
	4.4	Možnosti rozdelenia modelu	47	
	4.5	Teória inverzie	48	
	4.6	Vplyv topografie na výsledok inverzie	52	
	4.7	Stredná kvadratická odchýlka a počet iterácii	54	
5	Pre	ehľad softvéru pre 2D modelovanie a interpretáciu	55	
	5.1	RESITOMO	55	
	5.2	ELETOM – elektrická tomografia	55	
	5.3	X2IPI	56	
	5.4	SensInv 2D	57	
	5.5	AGI EarthImager 2D	58	

5.6 Z	/ondRes2D	59
5.7 E	BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography)	60
5.8 T	S2DIP	62
5.9 F	RES2DINV	63
5.10	RES2DMOD	64
5.11	Workbench ERT & IP modules	65
6 Práca	a v programoch RES2DMOD a Res2DINV	67
6.1 F	Program RES2DMOD	67
6.1.1	1 Operácie so súbormi (File)	71
6.1.2	2 Editovanie a zobrazovanie modelov (Edit)	72
6.1.3	3 Nastavenia (Options)	75
6.1.4	Modelový výpočet (Model computaion)	76
6.2 F	Program RES2DINV	76
6.2.7	I Inverzný výpočet použitý v programe RES2DINV	78
6.2.2	2 Operácie s dátovými súbormi a formát dát (File)	79
6.2.3	B Editovanie dát (Edit)	83
6.2.4	Zmena programových nastavení	85
6.2.5	5 Možnosti inverzie (Inversion)	92
6.2.6	6 Možnosti topografie (Topography Options)	111
6.2.7	Zobrazenie inverzného výsledku	114
7 Prípa	dové štúdie využitia elektrickej odporovej tomografie	115
7.1 0	Geologická stavba a tektonika	115
7.2 li	nžinierské stavby – líniové	121
7.3 li	nžinierske stavby – objekty	127
7.4 S	Svahové deformácie (zosuvy)	134
7.5 E	nvironmentálne záťaže (skládky)	145

Zoznam obrázkov

OBR.	I.1 SCHÉMA UZAVRETÉHO ELEKTRICKÉHO OBVODU13
OBR.	2.1 ŠTRUKTÚRA ELEKTRICKEJ DVOJVRSTVY (GAJDOŠ, 2013)17
OBR.	3.1 SCHÉMA VŠEOBECNÉHO ŠTVORELEKTRÓDOVÉHO USPORIADANIA
OBR.	3.2 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE WENNER ALFA. 22
OBR.	3.3 ZORADENIE A SCHEMATICKÝ ZNÁZORNENÝ SMER POHYBU A ZÁPISU PRE 2D WENNER USPORIADANIE
	POUŽÍVANÉ V ERT
OBR.	3.4 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE WENNER BETA23
OBR.	3.5 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE WENNER GAMA24
OBR.	3.6 REZY CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE WENNER (LOKE, 2019). A) REZ CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE
	WENNER ALFA, B) REZ CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE WENNER BETA, A) REZ CITLIVOSTI PRE
	USPORIADANIE WENNER GAMA,25
OBR.	3.7 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE SCHLUMBERGER
OBR.	3.8 REZY CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE SCHLUMBERGER (LOKE, 2019), A) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE
	N=1, B) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=2, C) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=4, D) CITLIVOSŤ
	USPORIADANIA PRE N=6
OBR.	3.9 POROVNANIE USPORIADANÍ A) WENNER A B) SCHLUMBERGER (LOKE, 2019)
OBR.	3.10 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE DIPÓL - DIPÓL
OBR.	3.11 SCHÉMA MERANIA A PRINCÍP MERANIA PRE USPORIADANIE DIPÓL – DIPÓL
OBR.	3.12 REZY CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE DIPÓL - DIPÓL (LOKE, 2019), A) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE
	N=1, B) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=2, C) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=4, D) CITLIVOSŤ
	USPORIADANIA PRE N=6
OBR.	3.13 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE PÓL - PÓL
OBR.	3.14 REZY CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE PÓL - PÓL (LOKE, 2019)
OBR.	3.15 ZÁKLADNÁ SCHÉMA PRE USPORIADANIE PÓL – DIPÓL
OBR.	3.16 REZY CITLIVOSTI PRE USPORIADANIE PÓL - DIPÓL (LOKE, 2019), A) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE
	N=1, B) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=2, C) CITLIVOSŤ USPORIADANIA PRE N=4, D) CITLIVOSŤ
	USPORIADANIA PRE N=6
OBR.	3.17 MAXIMÁLNA HĹBKA MERANIA PRE RÔZNE ELEKTRÓDOVÉ USPORIADANIA PRE 48 ELEKTRÓD: 39
OBR.	4.1 TRI ROZDIELNE MODELY POUŽÍVANĚ PRI INTERPRETÁCII ODPOROVÝCH MERANÍ, A)
	JEDNOROZMERNÉ - 1D, B) DVOJROZMERNÉ - 2D, C) TROJROZMERNÉ - 3D (UPRAVENÉ PODĽA LOKE,
	2004)
OBR.	4.2 VÝSLEDOK 1D MODELOVANIA PRE 4 VRSTEVNÝ MODEL PROSTREDIA V PROGRAME RES1D
OBR.	4.3 2D MODEL PROSTREDIA S DVOMI BLOKMI ZADEFINOVANÝ POMOCOU PRAVOUHLÝCH BUNIEK (DOLE)
	A VYPOCITANA ODOZVA TOHTO MODELU PRE ELEKTRODOVE USPORIADANIE WENNER ALFA POMOCOU
	SOFTVERU RES2DMOD (HORE)
OBR.	4.4 TYPY ROZDELENIA PROSTREDIA POUZIVANE PRI 3D MODELOVANI (PREVZATE Z LOKE, 2004):

OBR. 4.5 3D MODEL PROSTREDIA S DVOMI BLOKMI ZOBRAZENÝ POMOCOU HORIZONTÁLNYCH REZOV (HORE)
A ODOZVA TOHTO MODELU PRE USPORIADANIE PÓL-PÓL TIEŽ VO FORME HORIZONTÁLNYCH REZOV
ZDANLIVÉHO MERNÉHO ODPORU (DOLE)
OBR. 4.6 SCHEMATICKÝ DIAGRAM INVERZNÉHO PROCESU
OBR. 4.7 ROZDIELNE MODELY PROSTREDIA POUŽÍVANÉ PRI 2D INVERZII (PREVZATÉ, LOKE, 2019):
OBR. 4.8 RÔZNE SPÔSOBY ZAHRNUTIA TOPOGRAFIE DO 2-D INVERZNÉHO MODELU. (A) SCHEMATICKÝ
DIAGRAM TYPICKÉHO 2-D INVERZNÉHO MODELU BEZ TOPOGRAFIE. MEDZI SUSEDNÝMI ELEKTRÓDAMI JE
POUŽITÝ HORIZONTÁLNY SMER PRE SIEŤ KONEČNÝCH PRVKOV SO 4 UZLAMI. VRSTVY BLÍZKO POVRCHU
SÚ TIEŽ ROZDELENÉ VERTIKÁLNE DO NIEKOĽKÝCH LÍNIÍ SIETE. MODEL SO ZAKRIVENÝM GRIDOM PRE
ZHODU S AKTUÁLNOU TOPOGRAFIOU, KDE (B) SPODNÉ UZLY SÚ VERTIKÁLNE POSUNUTÉ O ROVNAKÚ
VZDIALENOSŤ AKO POVRCHOVÉ UZLY, (C) POSUN SPODNÝCH UZLOV JE POSTUPNE REDUKOVANÝ S
HĹBKOU ALEBO (D) RAPÍDNA REDUKCIA S HĹBKOU A (E) MODEL ZÍSKANÝ POMOCOU INVERZIE SCHWARZ
CHRISTOFFELOVOU TRANSFORMAČNOU METÓDOU (LOKE, 2010)53
OBR. 5.1 PRÍKLAD VÝSTUPU Z PROGRAMU ELETOM
(HTTPS://WWW.GEOANDSOFT.COM/ENGLISH/GEOELECTRICAL_TOMOGRAPHY.HTM)56
OBR. 5.2 PRÍKLAD VÝSTUPU PRI POUŽITÍ KVADRUPÓLOVÉHO USPORIADANIA V PROGRAME X2IPI
(HTTP://GEOPHYS.GEOL.MSU.RU/X2IPI/X2IPI.HTML)
OBR. 5.3 PRÍKLAD VÝSTUPU Z PROGRAMU SENSINV 2D (WWW.GEOTOMOGRAPHIE.DE/HTML/2D.HTML)58
OBR. 5.4 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME AGI EARTHIMAGER 2D
(HTTPS://WWW.AGIUSA.COM/AGI-EARTHIMAGER-2D)59
OBR. 5.5 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME ZONDRES2D (HTTP://ZOND-GEO.COM/ENGLISH/ZOND-
SOFTWARE/ERT-AND-VES/ZONDRES2D/)60
OBR. 5.6 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME BERT
(HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PROJECT/BERT-BOUNDLESS-ELECTRICAL-RESISTIVITY-
TOMOGRAPHY/FIGURES)62
OBR. 5.7 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME TS2DIP (WWW.ZONGE.COM)
OBR. 5.8 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME RES2DINV (WWW.GEOELECTRICAL.COM)
OBR. 5.9 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME RES2DMOD (LOKE, 2019)
OBR. 5.10 PRÍKLAD ZOBRAZENIA INVERZIE V PROGRAME WORKBENCH ERT & IP MODULES
(HTTPS://WWW.AARHUSGEOSOFTWARE.DK/WORKBENCH-ERT-IP-MODULE)66
OBR. 6.1 ROZMIESTNENIE ELEKTRÓD PRE RÔZNE USPORIADANIA A ICH KONŠTANTY (LOKE, 2019)68
OBR. 6.2 ROZDELENIE PROSTREDIA NA BLOKY POMOCOU PRAVOUHLEJ SIETE (LOKE, 2019)
OBR. 6.3 ZOBRAZENIE MOŽNÝCH OPERÁCIÍ SO SÚBOROM (LOKE, 2019)
OBR. 6.4 ZOBRAZENIE MOŽNOSTÍ PRE EDITOVANIE A ZOBRAZOVANIE MODELOV (LOKE, 2019)
OBR. 6.5 ZOBRAZENIE BLOKOV MODELU S PSEUDOREZOM ZDANLIVEJ REZISTIVITY (LOKE, 2019)
OBR. 6.6 ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE NASTAVENIA (LOKE, 2019)
OBR. 6.7 POSTUP MERANIA PRE VYTVORENIE PSEUDOREZU POUŽITÍM MULTI-ELEKTRÓDOVÉHO SYSTÉMU
(LOKE, 2019)

5

OBR. 6.8 ROZLOŽENIE BLOKOV POUŽITÝCH V MODELI SPOLU S BODMI MERANIA V PSEUDOREZE (LOKE, 2019)

			. 77
OBR.	6.9 Z	OBRAZENIE MOŽNÝCH OPERÁCIÍ SO SÚBOROM (LOKE, 2019)	. 80
OBR.	6.10	ZOBRAZENIE MOŽNOSTÍ PRE EDITOVANIE A ZOBRAZOVANIE VSTUPNÝCH ÚDAJOV (LOKE, 2019)	. 83
OBR.	6.11	PRÍKLAD DÁTOVÉHO SÚBORU S CHYBNÝMI ÚDAJMI (LOKE, 2019)	.84
OBR.	6.12	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE ZMENU NASTAVENÍ (LOKE, 2019)	. 85
OBR.	6.13	ZOBRAZENIE OKNA PRE LIMITY VSTUPNÉHO MODELU (LOKE, 2019)	. 87
OBR.	6.14	ZOBRAZENIE OKNA PRE PARAMETRE PRIAMEHO MODELOVANIA (LOKE, 2019)	. 88
OBR.	6.15	ZOBRAZENIE OKNA PRE NASTAVENIE VEĽKOSTI GRIDU (LOKE, 2019)	. 89
OBR.	6.16	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE ZMENU INVERZNÝCH PARAMETROV (LOKE, 2019)	. 90
OBR.	6.17	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE NASTAVENIE ZOBRAZENIA DÁT (LOKE, 2019)	.91
OBR.	6.18	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE MOŽNOSTI INVERZIE (LOKE, 2019)	.92
OBR.	6.19	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE TYPY INVERZNÝCH METÓD A ICH NASTAVENIA (LOKE, 2019)	. 93
OBR.	6.20	ZOBRAZENIE NASTAVENIA BLOKOVEJ INVERZIE (LOKE, 2019)	.94
OBR.	6.21	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE NASTAVENIA METÓDY VYHLADENIA NAJMENŠÍCH ŠTVORCOV (LOKE,	
	2019))	. 95
OBR.	6.22	ZOBRAZENIE VÝBERU MOŽNOSTI LOGARITMUS ALEBO ZDANLIVÝ ODPOR (LOKE, 2019)	. 96
OBR.	6.23	ZOBRAZENIE MOŽNOSTI PRE VOĽBU OPTIMALIZAČNEJ METÓDY(LOKE, 2019)	. 97
OBR.	6.24	ZOBRAZENIE MOŽNOSTÍ PRE NASTAVENIA REFERENČNÉHO MODELU (LOKE, 2019)	. 98
OBR.	6.25	ZOBRAZENIE OKNA PRE NASTAVENIA RÝCHLEJ INVERZIE PRE DLHÉ PROFILY (LOKE, 2019)	. 99
OBR.	6.26	ZOBRAZENIE PONUKY RÝCHLEHO VÝPOČTU JACOBYHO MATICE (LOKE, 2019)	100
OBR.	6.27	ZOBRAZENIE OKNA PRE NASTAVENIE ČASOZBERNEJ INVERZIE (LOKE, 2019)	101
OBR.	6.28	ZOBRAZENIE PONUKY PRE DOPLNENIE CHÝBAJÚCICH DÁT (LOKE, 2019)	102
OBR.	6.29	ZOBRAZENIE MOŽNOSTI NASTAVENIA MERANIA S PLÁVAJÚCIMI ELEKTRÓDAMI. (LOKE, 2019)	103
OBR.	6.30	ZOBRAZENIE OKNA PRE MERANIE S ELEKTRÓDAMI POD VODNOU HLADINOU (LOKE, 2019)	104
OBR.	6.31	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE MODELOVÉ OBMEDZENIA (LOKE, 2019)	104
OBR.	6.32	ZOBRAZENIE MODELOVÝCH BLOKOV (LOKE, 2019)	105
OBR.	6.33	ZOBRAZENIE MOŽNOSTI ZMENY HRÚBKY VRSTIEV (LOKE, 2019)	106
OBR.	6.34	ZOBRAZENIE OKNA PRE ZMENU HĹBKY VRSTIEV (LOKE, 2019)	107
OBR.	6.35	ZOBRAZENIE OKNA PRE POUŽITIE ROZŠÍRENÉHO MODELU (LOKE, 2019)	108
OBR.	6.36	ZOBRAZENIE VÝBERU VYTVORENIE MODELU S BLOKMI ROVNAKEJ ŠÍRKY (LOKE, 2019)	108
OBR.	6.37	ZOBRAZENIE VÝBERU PRE REDUKCIU EFEKTU POSTRANNÝCH BLOKOV (LOKE, 2019)	109
OBR.	6.38	ZOBRAZENIE NASTAVENIA PRE SPRESNENIE MODELU (LOKE, 2019)	110
OBR.	6.39	ZOBRAZENIE MOŽNOSTI PRE NASTAVENIE PRAVÉHO A ĽAVÉHO OHRANIČENIA MODELU	
	(LOK	E, 2019)	111
OBR.	6.40	ZOBRAZENIE POLOŽIEK PRE MOŽNOSTI TOPOGRAFIE (LOKE, 2019)	12
OBR.	6.41	TOPOGRAFICKÝ LINEÁRNY TREND POSUNUTIA PRE HROMADNÝ DÁTOVÝ SÚBOR (LOKE, 2019)	112
OBR.	6.42	ZOBRAZENIE OKNA PRE TYP TOPOGRAFICKÉHO MODELOVANIA (LOKE, 2019)	113

OBR. 7.1 ODPOVÝ OBRAZ MURÁNSKEHO ZLOMU NA REFERENČNOM PROFILE POD ODKRYVOM PRI OBCI	
MURÁŇ (UPRAVENÉ PODĽA PUTIŠKA ET. AL., 2012)11	.7
OBR. 7.2 ODPOVÝ OBRAZ MURÁNSKEHO ZLOMU NA PROFILOCH 1,2 A 3 PRI OBCI MURÁŇ (UPRAVENÉ PODĽA	
PUTIŠKA ET. AL., 2012)	.8
OBR. 7.3 3D VIZUALIZÁCIA ERT ODPOROVÝCH REZOV NA LOKALIZÁCIU A ZISTENIE HRÚBKY ŠTRKOVÝCH POLÔF	ł
PRE VYBUDOVANIE SYSTÉMU TEPELNÉHO ČERPADLA12	0
OBR. 7.4 PLOŠNÁ MAPA VÝSKYTOV JEDNOTLIVÝCJ LITOLOGICKÝCH TYPOV HORNÍN PRE VYBUDOVANIE	
SYSTÉMU TEPELNÉHO ČERPADLA	!1
OBR. 7.5 OBLASŤ PODUNAJSKEJ NÍŽINY, MALÉ STARÉ RIEČNE RAMENO, INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ (HORE)	
A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)12	:3
OBR. 7.6 OBLASŤ PODUNAJSKEJ NÍŽINY, VEĽKÉ STARÉ RIEČNE RAMENO, INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ (HORE)	
A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)12	24
OBR. 7.7 OBLASŤ PODUNAJSKEJ NÍŽINY, HRUBÁ POLOHA ŠTRKOV, INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ (HORE)	
A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)12	24
OBR. 7.8 OBLASŤ PODUNAJSKEJ NÍŽINY, TENKÁ POLOHA ŠTRKOV, INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ (HORE)	
A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)12	25
OBR. 7.9 OBLASŤ PODUNAJSKEJ NÍŽINY, KONTAKT NEOGÉN – KRYŠTALIMIKUM, INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ	
(HORE) A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)12	26
OBR. 7.10 OBLASŤ NEOGÉNNEJ PANVY, ZLOŽITÉ GEOLOGICKO-ŠTRUKTÚRNE POMERY KVARTÉRNYCH	
SEDIMENTOV. INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ - ELEKTRÓDOVÉ USPORIADANIE WENNER-ALFA (HORE),	
INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ – ELEKTRÓDOVÉ USPORIADANIE DIPÓL-DIPÓL (V STREDE) A GEOLOGICKÁ	
INTERPRETÁCIA (DOLE)12	8
OBR. 7.11 OBLASŤ NEOGÉNNEJ PANVY, INTERPRETÁCIA V ODPOROVO MÁLO KONTRASTNÝCH PODMIENKAC.	
INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ – ELEKTRÓDOVÉ USPORIADANIE WENNER-ALFA (HORE), INVERZNÝ	
ODPOROVÝ REZ – EL. USPORIADANIE DIPÓL-DIPÓL (V STREDE) A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE).	
	29
OBR. 7.12 INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM PRE BYTOVÝ DOM, SITUÁCIA ERT PROFILOV A PRIESKUMNÝCH	4
DIEL	0
OBR. 7.13 INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM PRE BYTOVÝ DOM, PROFIL ERT-P1. INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ	, •
(HORE), A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)	:2
OBR. 7.14 INŽINIERSKO-GEOLOGICKÝ PRIESKUM PRE BYTOVÝ DOM, PROFIL ERT-P2. INVERZNÝ ODPOROVÝ RE	Ζ
(HORE), A GEOLOGICKÁ INTERPRETÁCIA (DOLE)	3
OBR. 7.15 SITUÁCIA PROFILOVÝCH MERANÍ METÓDOU ERT NA PLOŠNOM ZOSUVE NAD OBCOU CHMIŇANY N	A
PODKLADOVEJ INŽINIERSKOGEOLOGICKEJ MAPE	:5
OBR. 7.16 INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY ŠTYROCH PROFILOVÝCH MERANÍ NA PLOŠNOM ZOSUVE NAD OBCOU	
CHMIŇANY	6
OBR. 7.17 INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY ŠTYROCH PROFILOVÝCH MERANÍ V 3D ZOBRAZENÍ NA PLOŠNOM	
ZOSUVE NAD OBCOU CHMIŇANY13	57

OBR.	7.18 LOKALITA VRANIE, SITUÁCIA ERT PROFILOVOVÝCH MERANÍ	. 139
OBR.	7.19 LOKALITA VRANIE, INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY	. 140
OBR.	7.20 KAŠTIEĽ ZÁBORSKÉ, SITUÁCIA ERT PROFILOVOVÝCH MERANÍ	. 141
OBR.	7.21 KAŠTIEĽ ZÁBORSKÉ, PROFILY ERT-P1 A ERT-P2. INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY A INTERPRETOVANÉ	
	GEOLOGICKÉ REZY	. 143
OBR.	7.22 KAŠTIEĽ ZÁBORSKÉ, PROFILY ERT-P3 A ERT-P4. INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY A INTERPRETOVANÉ	
	GEOLOGICKÉ REZY.	. 145
OBR.	7.23 SKLÁDKA MALÝ HARČÁŠ, SITUÁCIA ERT PROFILOVÝCH MERANÍ	. 146
OBR.	7.24 SKLÁDKA MALÝ HARČÁŠ, PROFIL ERT-PF-1. INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ A GEOLOGICKÁ	
	INTERPRETÁCIA	. 147
OBR.	7.25 SKLÁDKA MALÝ HARČÁŠ, PROFIL ERT-PF-2. INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ A GEOLOGICKÁ	
	INTERPRETÁCIA	. 147
OBR.	7.26 SKLÁDKA MALÝ HARČÁŠ, PROFIL ERT-PF-3. INVERZNÝ ODPOROVÝ REZ A GEOLOGICKÁ	
	INTERPRETÁCIA	. 148
OBR.	7.27 SKLÁDKA MADZAGOŠ, SITUÁCIA ERT PROFILOVÝCH MERANÍ	. 149
OBR.	7.28 SKLÁDKA MADZAGOŠ, INVERZNÉ ODPOROVÉ REZY 4 PROFILOVÝCH MERANÍ	. 150

Úvod

Jednosmerné odporové metódy využívajú umelo vyvolané jednosmerné elektrické pole pre zistenie fyzikálnych (odporových) vlastností horninového prostredia. Začiatkom ich rozvoja bolo ich hlavné uplatnenie pri geologických úlohách, kde sa vyformovali dve silné skupiny metód. Na mapovanie horizontálnych rozhraní sa veľmi úspešne využívalo tzv. elektrické odporové sondovanie (VES), ktorého metodika bola založená na rozťahovaní elektródového systému symetricky od sondážneho bodu, čím sa postupne zvyšoval hĺbkový dosah. V prípade očakávaných vertikálnych kontaktov sa využívala metóda odporového profilovania (OP), pri ktorej sa konštantné usporiadanie elektród posúvalo po profile, čím sa zistil priebeh zdanlivého odporu horninového prostredia pod profilom.

Spomínané dve metódy (VES a OP) poskytujú relatívne kvalitné informácie o rozložení merného odporu v horninovom prostredí, avšak hustota informácie pri klasickej metodike nie je veľká a s hĺbkou klesá. Preto boli snahy o vytvorenie vhodnej metódy, ktorá by poskytovala dostatočne hustú informáciu v horizontálnom aj vertikálnom smere pri relatívne jednoduchej metodike merania a hlavne nízkej časovej náročnosti. Na základe toho bola vytvorená metóda, ako kombinácia VES a OP, ktorú tvorí multi-elektródový systém, nazývaná elektrická odporová tomografia, v anglosaskej literatúre označovaná ako electric resistivity tomography (ERT), alebo 2D electrical imaging survey (resp. resistivity imaging). V podstate ide o vertikálny odporový rez horninového prostredia, avšak pri dostatočnej hustote takýchto rezov možno vytvoriť aj trojrozmerný model (3D model) prostredia.

Tieto techniky majú široké využitie v inžinierskej geológii, hydrogeológii a v environmentálnej problematike. V poslednej dekáde nastal veľký rozvoj vo vývoji geofyzikálnych aparatúr a 2D/3D inverzných softvéroch, čo výrazne zvýšilo atraktivitu používania elektrickej odporovej tomografie. Veľa geofyzikálnych prác ukázalo, že použitím dostatočného množstva nameraných dát je možné relatívne presne rekonštruovať horninové prostredie pomocou zobrazenia v odporovom reze (Daily a Owen, 1991; Park a Van, 1991; Shima, 1992; Li a Oldenburg, 1992; Sasaki, 1994; Loke a Barker, 1995, 1996; LaBrecque et al., 1996). Pri 2D elektrickej tomografiii sa obvykle využíva veľké množstvo elektród, 25 a viac, pripojených na viacžilový kábel (Griffiths a Barker, 1993). Presnejšie interpretačné modely dáva teoreticky 3D

9

tomografický prieskum, avšak v súčasnej dobe je 2D tomografický prieskum lepším ekonomickým riešením medzi presnosťou modelu a nižšími cenovými nákladmi (Dahlin, 1996).

Hlavným problémom pri interpretácii údajov z geoelektrických meraní, ako aj pri iných geofyzikálnych meraniach, je riešenie obrátenej úlohy (inverzný proces, alebo inverzia). Tá je z geofyzikálneho hľadiska nejednoznačná, čo znamená, že existuje viacero riešení zadanej úlohy. Taktiež narastá množstvo softvérov, ktoré sa líšia hlavne použitým algoritmom výpočtu inverzie, typom filtrovania dát, ale aj systémom rozdelenia prostredia na bunky rôznej veľkosti a tvaru. Pri interpretácii údajov je potrebné teda brať do úvahy teoretické obmedzenia inverzného procesu pri elektrických meraniach, chyby vznikajúce pri zbere údajov (metodické aj náhodné), typ použitého algoritmu a filtra pri inverznom výpočte ale aj skúsenosti interpretátora.

Naša úprimná vďaka patrí RNDr. Bibiane Brixovej, PhD. za starostlivé prečítanie rukopisu, za cenné rady a kritické pripomienky, ktoré prispeli k jeho skvalitneniu.

1 Základné pojmy a veličiny

Pri jednosmerných odporových metódach sa budeme stretávať s nasledujúcimi veličinami elektrický prúd, elektrické napätie, elektrický odpor, merný odpor, zdanlivý merný odpor a elektrický potenciál:

 <u>Elektrický prúd</u> je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje množstvo elektrického náboja, ktorý prejde prierezom vodiča za jednotku času. Smer elektrického prúdu sa delí na: 1. skutočný a 2. dohodnutý. Skutočný smer elektrického prúdu je daný od '-' póla zdroja k '+' pólu zdroja. Dohodnutý smer elektrického prúdu je opačný.

Značka: I

Základná jednotka: ampér, symbol A

Ďalšie používané jednotky: miliampér mA, mikroampér µA

Vzorec: I=Q/t, kde Q je elektrický náboj, t je čas

Meracie prístroje: ampérmeter.

 <u>Elektrické napätie</u> je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje rozdiel elektrického potenciálu dvoch bodov a predstavuje energiu potrebnú na premiestnenie elektrického náboja medzi týmito dvoma bodmi v určitom elektrickom poli.

Značka: U

Základná jednotka: volt, symbol V

Meracie prístroje: voltmeter, osciloskop

Vzorec: U = R . I, kde R je elektrický odpor, I je elektrický prúd.

 <u>Elektrický odpor</u> je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje schopnosť materiálu zabraňovať prechodu elektricky nabitých častíc. Je definovaný ako podiel napätia a prúdu prechádzajúceho predmetom následkom napätia.

Značka: R

Základná jednotka: ohm, symbol Ω

Meracie prístroje: ohmmeter

```
Vzorec: R = U/I, kde U je elektrické napätie, I je elektrický prúd.
```

- <u>Merný elektrický odpor</u> je fyzikálna veličina, vyjadrujúca elektrický odpor vodiča dĺžky 1 m o priereze 1 m². Merný elektrický odpor je materiálová konštanta, charakterizujúca elektrickú vodivosť látky. Čím väčší je merný elektrický odpor, tým menšia je vodivosť danej látky.
- <u>Zdanlivý merný odpor</u> z podielu napätia a prúdu vypočítame stredný odpor prostredia, ktorý je ovplyvnený celým rozložením elektrického poľa. Tento stredný odpor sa nazýva zdanlivým merným odporom. Zdanlivý merný odporom je merný odpor homogénneho polpriestoru, na ktorom by sme s rovnakým usporiadaním merali pri rovnakom prúde rovnaké napätie.
- <u>Elektrický potenciál</u> je skalárna fyzikálna veličina, ktorá opisuje potenciálnu energiu jednotkového elektrického náboja v nemennom elektrickom poli. Ide teda o potenciál elektrického poľa, tzn. množstvo práce potrebné na prenesenie jednotkového elektrického náboja zo vzťažného bodu, ktorému je prisúdený nulový potenciál, do daného miesta.

Značka: φ

Základná jednotka: volt, symbol V

Vzorec: $\varphi_e = Ep /Q$ (kde Ep je elektrostatická potenciálna energia nabitého telesa a Q je jeho náboj).

 Ohmov zákon - v roku 1827 George Simon Ohm prvý popísal vzťah medzi napätím a prúdom prechádzajúcim rezistorom. Zistil, že ide o priamu úmernosť - koľkokrát sa zväčší napätie, toľkokrát sa zväčší prúd. Na základe tohto spoznania sformuloval zákon, ktorý nazývame Ohmov zákon (1.1): Elektrický prúd I pretekajúci v uzavretom elektrickom obvode (obr. 1.1) je priamo úmerný elektrickému napätiu V a nepriamo úmerný elektrickému odporu. Matematické vyjadrenie Ohmovho zákona je

$$I=\Delta V/R \qquad (1.1)$$

kde R je odpor, I je prúd a $\Delta V = \varphi_2 - \varphi_1$ je potenciálový rozdiel. Zákon platí pre obvody zložené z lineárnych prvkov, ktorými preteká jednosmerný prúd a pre ideálne podmienky - konštantná teplota, konštantný odpor, ideálne prívodné vodiče.



Obr. 1.1 Schéma uzavretého elektrického obvodu

Ohmov zákon je možné napísať aj v tzv. diferenciálnom tvare (1.2). Tento vyjadruje vzťah elektrického poľa a elektrického prúdu, čo je pôvodný tvar Ohmovho zákona:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$
 (1.2)

kde σ je konduktivita (alebo merná vodivosť) prostredia, vektor \vec{j} je prúdová hustota a vektor \vec{E} popisuje intenzitu elektrického poľa. Pre geofyzikálne účely je zaužívané používať namiesto konduktivity jej recipročná hodnotu, teda rezisitivitu (alebo merný odpor) ρ ($\rho = 1/\sigma$) a intenzita elektrického poľa sa zvykne nahrádzať gradientom elektrického potenciálu φ , ktorý je výstupným údajom pri odporových meraniach ($\vec{E} = -\nabla\varphi$). Ohmov zákon teda môžeme zapísať v "geofyzikálnej" forme (1.3):

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \varphi \qquad (1.3)$$

2 Elektrické vlastnosti hornín

Elektrické vlastnosti hornín určujú chovanie hornín v elektrickom poli a sú určené tromi základnými parametrami: elektrickou vodivosťou (alebo odporom), permitivitou (dielektrickou konštantou) a polarizovateľnosťou (elektrochemickou aktivitou).

Elektrická vodivosť geologického prostredia závisí od vodivosti jeho jednotlivých častíc a ich priestorového usporiadania voči smeru prúdu. Elektrický náboj sa v horninovom prostredí prenáša elektrónmi, iónmi a tzv. dierami (v polovodičoch). Podľa vodivosti elektrického prúdu rozdeľujeme minerály a horniny na tri základné typy: vodiče, dielektriká (nevodiče a izolátory) a polovodiče. Z fyzikálneho hľadiska je uvedené rozdelenie určené stavbou kryštálovej mriežky a štruktúrou elektrónových energetických pásov. Štruktúra energetických pásov je determinovaná typom vzájomnej väzby atómov v kryštálovej mriežke. Najpevnejšie sú kovalentné a iónové väzby charakteristické pre dielektriká. Kovalentná väzba je typ chemickej väzby medzi dvoma atómami, ktoré majú jeden alebo viac nespárených elektrónov. Podstatou iónovej väzby sú príťažlivé sily medzi katiónmi a aniónmi. Najvoľnejšia väzba je kovová, ktorá umožňuje vysokú pohyblivosť elektrónov a tým súvisiacu vodivosť kovov. Pre elektrickú vodivosť hornín majú veľký význam elektrochemické javy, vznikajúce na rozhraní skelet – kvapalina. Na väčšine takýchto rozhraní dochádza v smere normály k určitému rozdeleniu kladných a záporných nábojov. Tieto náboje vznikajú pri:

- (1) prednostnej adsorbcii iónov na rozhraní
- (2) pri adsorbcii a orientácii bipolárnych molekúl, alebo
- (3) pri prechode elektrónov z jednej fázy do druhej

a majú obyčajne formu elektrónov, iónov, bipolárnych molekúl a polarizovaných atómov.

Polárne vodné molekuly majú silnú tendenciu vyvolávať disociáciu povrchových skupín pevných látok a naopak, pevné látky ovplyvňujú susediacu vrstvu kvapaliny, takže sa do určitej miery mení jej štruktúra a koncentrácia prítomných iónov. V dôsledku týchto interakcií vzniká tzv. "povrchová fáza" situovaná v oblasti rozhrania skelet – kvapalina.

Ak sa polárne molekuly z vodného roztoku dostanú do kontaktu s pevnou látkou, penetrujú medzi jej povrchové atómy, oslabujú intenzitu ich iónovej väzby a môžu viesť k ich disociácii.

Najrozšírenejšie pevné koloidné zložky hypergénnej zóny – ílové minerály, majú v dôsledku izomorfnej zámeny v tetraedrických a oktaedrických pozíciách prebytok nábojov, ktoré sa vyrovnávajú pútaním niektorých katiónov na vonkajšom povrchu. Pri styku s vodou tieto katióny disociujú. Disociované ióny majú tendenciu zostávať v blízkosti nabitých povrchov. Výsledkom toho je, že ílové minerály vo vode majú stály (permanentný) náboj. Jeho veľkosť závisí na množstve "nahradených" nábojov v mriežke minerálov, ale nezávisí na pH kvapaliny (Gajdoš, 2013).

Pri iných druhov skeletu dochádza na ich povrchu k javu, pri ktorom určité skupiny atómov v kryštálovej mriežke nie sú skoordinované, takže vykazujú určitý elektrický náboj. Pri styku s kvapalinou dochádza k čiastočnej disociácii povrchových iónov pevných látok, ktoré potom obmedzujú veľkosť povrchových nábojov pevnej fázy. Tieto disociované ióny majú tendenciu zostávať v blízkosti nabitých povrchov. Príčinou tohto javu je pútanie povrchových nábojov, uvolnených pri disociácii k pevnej fáze, čo zabraňuje ich voľnému rozptylu do voľného prostredia. V závislosti na vzdialenosti od povrchových nábojov, sa elektrické polia jednotlivých nábojov navzájom ovplyvňujú a spôsobujú vznik kombinovaného elektrického poľa v kvapalnej vrstve nachádzajúcej sa v susedstve povrchov pevných látok. Toto pole priťahuje disociované ióny (alebo iné ióny toho istého náboja), ktoré sa potom akumulujú v blízkosti nabitých povrchov. Výsledné rozdelenie iónov sa podobá usporiadaniu podobnému ako pri platňovom kondenzátore. Toto usporiadanie (napr. negatívne nabitý povrch pevnej látky a pozitívne nabité ióny roztoku) určuje vznik tzv. elektrickej dvojvrstvy (Gajdoš, 2013).

<u>Permitivita (absolútna permitivita)</u> je fyzikálna veličina označovaná obvykle gréckym písmenom ε (epsilon). Permitivita vyjadruje schopnosť prostredia zosilňovať alebo zoslabovať elektrické pole v dôsledku polarizácie (Mareš a kol., 1990). V geoelektrickej praxi je permitivita zavedená ako relatívna bezrozmerná veličina a vyjadruje, koľkokrát sa zväčšila kapacita kondenzátora, ktorého dielektrikom je študovaná hornina, v pomere k jeho kapacite vo vákuu. Minimálne hodnoty relatívnej permitivity sú typické pre suché pórovité horniny, maximálne hodnoty sú typické pre

tie isté horniny, ale plne nasýtené vodou. Pre horninotvorné minerály sa hodnota mení od 4 do 11. Pre vodu je hodnota relatívnej permitivity maximálna a dosahuje hodnotu 80. Z toho vyplýva, že rozhodujúcim faktorom určujúcim veľkosť permitivity ja nasýtenie hornín vodou.

<u>Polarizovateľnosť a elektrochemická aktivita</u> hornín určujú možnosti použitia metódy vyvolanej polarizácie a metódy spontánnej polarizácie. Keď je hornina vystavená pôsobeniu jednosmerného elektrického prúdu, dochádza k jej polarizácii. Podstata polarizácie horniny s iónovou vodivosťou spočíva v deformácii elektrickej dvojvrstvy, nachádzajúcej sa na hranici pevnej a kvapalnej fázy (Mareš a kol., 1990). Horniny s elektrónovou vodivosťou, najmä rudy, sa polarizujú v dôsledku vytvorenia elektrickej dvojvstvy na styku dvoch prostredí s elektrónovou a iónovou vodivosťou. Polarizovateľnosť hornín obsahujúcich elektrónové vodiče závisí najmä od veľkosti plochy, na ktorej dochádza ku kontaktu elektrónového vodiča s iónovým. Polarizovateľnosť rúd stúpa s narastajúcou vlhkosťou a klesá so zvyšujúcou sa mineralizáciou roztoku.

<u>Elektrická dvojvrstva</u> (Obr. 2.1) sa skladá z dvoch častí. Z pevnej časti, ktorá je reprezentovaná pevne adsorbovanými iónmi na fázovom rozhraní a z tzv. difúznej časti. Difúzna časť vzniká pôsobením dvoch protichodných vplyvov. Zatiaľ čo sa elektrostatické sily snažia vytvoriť kompaktnú, pevnú dvojvrstvu, pôsobí proti elektrickým silám molekulárny tepelný pohyb, ktorý sa snaží ióny rozptýliť po celom priestore. Ióny, ktoré kompenzujú náboj pevnej fázy, nie sú potom zoradené v jednej pevnej ploche pri povrchu, ale ich prebytok spojito klesá smerom do roztoku. Týmto usporiadaním iónov v roztoku je zároveň určený priebeh potenciálu v blízkosti povrchu, kde sa miesto náhleho potenciálneho skoku medzi pevnou fázou a roztokom, objavuje plynulý pokles potenciálu, ktorý siaha tak ďaleko do roztoku, ako difúzna vrstva.



Obr. 2.1 Štruktúra elektrickej dvojvrstvy (Gajdoš, 2013)

Podobne ako s priebehom potenciálu, je to aj s pohyblivosťou iónov. V pevnej časti dvojvrstvy sú ióny nepohyblivé. V difúznej vrstve ióny tesne priliehajúce k pevnej časti môžu vykonávať iba tangenciálny pohyb. Pohybová zložka v smere normály je tu nulová. Smerom od pevnej časti do voľného roztoku normálová zložka pohybu narastá až do voľného roztoku, kde je rovnaká ako tangenciálne zložka.

<u>Merný elektrický odpor hornín</u> je ovplyvnený množstvom prirodzených geologických a hydrogeologických faktorov: mineralogickým zložením, porozitou a stupňom nasýtenie horniny vodou, mineralizáciou vody zaplňujúcou póry, štruktúrou a textúrou hornín, teplotou a tlakom (Mareš a kol., 1990).

Merný odpor horninového prostredia sa znižuje úmerne so stupňom nasýtenia pórov prostredia vodou, s jej mineralizáciou a kvalitou (chemizmom). Tento stupeň zníženia merného odporu možno vyjadriť Archieho zákonom (Keller a Frischknecht 1966, McNeill 1980, Karous 1989). S využitím Archieho zákona môžeme zhodnotiť vzťah medzi zmeraným odporom ρ_z , odporom skeletu (horninová matrica) ρ_{ma} a odporom vody ρ_w použitím vzťahu (2.1):

 $\rho_z^{-1} = \rho_{ma}^{-1} + P^m . a^{-1} . \rho_w^{-1},$ (2.1)

kde *P* je pórovitosť horniny (pomer objemu vodou nasýtených pórov a celkového objemu horniny), *a* je štruktúrny koeficient (závisí na type horniny a pohybuje sa v rozmedzí 1.6 až 2.3) a *m* je cementačný faktor (podľa typu horniny má hodnotu od 0.6 do 1.2).

Z uvedeného vzťahu je zrejmé, že zmenu merného odporu môžeme očakávať iba pri zmene pórovitosti, pri zmene nasýtenia pórov vodou a pri zmene odporu vody v póroch ρ_w . Tento odpor je silne závislý na koncentrácii rozpustených iónov vo vode. Väčšinou sa závislosť na koncentrácii vyjadruje v ekvivalentných koncentráciách (C_{ekv}) soli NaCl. Potom je možné pre určenie ρ_w použiť vzťah (2.2):

$$\rho_{w} = k_{t} \cdot C_{ekv}^{-1}, \qquad (2.2)$$

kde k_t je koeficient závislosti na teplote roztoku (pri teplote okolo 10 °C má hodnotu asi 0.9, pri teplote 20 °C je 0.8, ak sú koncentrácie C_{ekv} uvedené v g.l⁻¹ a ρ_w v Ωm).

Merný odpor minerálov sa mení v rozmedzí viac ako 20 rádov. Najčastejšie sa vyskytujúce horninotvorné minerály, ako sú kremeň, sľuda a živce, majú vysoký merný odpor v rozpätí 10^{12} až 10^{14} Ω m (Mareš a kol., 1990). Merný elektrický odpor prevažnej väčšiny vyvretých, metamorfovaných a sedimentárnych hornín teda nezávisí na mineralogickom zložení, ale na porozite, stupni nasýtenia vodou a na mineralizácii vody vyplňujúcej póry. Vzťah medzi pórovitosťou, priepustnosťou a odporom niektorých hornín je uvedený v tabuľke 2.1.

Horniny	Pórovitosť (%)	Priepustnosť (cm/s)	Merný odpor
			(ohm.m)
Ílovec	35	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹	70 – 200
Krieda	35	10 ⁻⁵	30 - 300
Vulkanický tuf	32	10 ⁻⁵	20 - 300
Slieň	27	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹	20 - 100
Pieskovec	3 – 35	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	30 - 800
Dolomit	1 – 12	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁷	200 - 10.000
Vápenec	3	$10^{-10} - 10^{-12}$	200 - 10.000
Metabridlice	2,5	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁹	300 - 800
Rula	1,5	10 ⁻⁸	1.000 - 20.000
Kvarcit	< 1	10 ⁻¹⁰	1.000 - 10.000
Žula	1	10 ⁻⁹ – 10 ⁻¹⁰	1.000 - 15.000
Gabro	1-3	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁹	6.000 - 10.000
Bazalt	1,5	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸	800 - 15.000

Tabuľka 2.1: Pórovitosť, priepustnosť a odpor základných typov hornín (Gajdoš, 2013)

Merný odpor základných horninových typov (Karous, 1989) je uvedený v tabuľke 2.2. Merný odpor týchto hornín je veľmi závislý od množstva zlomov a porúch a percenta nasýtenia horninových štruktúr podzemnou vodou. Jeden daný typ horniny môže mať veľký rozsah merného odporu, od cca 1 000 Ω m do 10 miliónov Ω m (napr. zlepenec), v závislosti od stupňa saturácie horninového prostredia. (Loke, 2019). Táto vlastnosť je užitočná pri detekcii zlomových zón napríklad v inžinierskej geológii a pri prieskume podzemných vôd (Keller a Frischknecht, 1966; Daniels a Alberty, 1966; Telford a kol. 1990).

Hornina, ruda	Merný elektrický odpor
	R _z (Ωm)
Sedimentárne horniny	
Hliny	10 ⁻¹ až 10 ²
ĺly	10 ⁻¹ až 10 ²
Piesky	10 až 10 ⁵
Piesky nasýtené minerálnou vodou	10 ⁻¹ až 10
Štrky štrkopiesky	10² až 10 ⁴
Pieskovce	10² až 10⁵
Vápence	10² až 10 ⁶
Sliene, slieňovce	10 až 10 ²
Zlepence	10 až 10 ⁶
Sadrovce	10 ⁴ až 10 ⁶
Magmatické a metamorfované horniny	I
Žula, gabro, čadič, diabas	3.10 ² až 10 ⁶
Kryštalické bridlice	10² až 10⁵
Ílovité bridlice	10 až 10 ³
Kremence	10 ³ až 10 ⁸
Mramory	10 ² až 10 ⁶
Ruly	10² až 10⁴
Rudy	
Chalkopyritové	10 ⁻⁴ až 10 ⁻¹
Galenitové	10-2
Arzén pyritové	10-1
Hematitové	10 ⁻¹ až 10 ²
Chromité	10 ³
Wolframové	10² až 10⁵
Antimonitové	10 ³ až 10 ⁷

Tabuľka 2.2: Merné odpory hornín a rúd (Karous, 1989).

3 Typy elektródových usporiadaní

Vodivé spojenie meracieho systému zo zemou je zabezpečené elektródami.. Usporiadaním elektród rozumieme rozmiestnenie elektród na povrchu zeme, pomocou ktorých sa vytvára a meria elektrické pole. Existuje veľa rôznych typov usporiadaní, ktoré sú vhodné pre riešenie rôznych konkrétnych problémov a sú optimálne z hľadiska techniky terénnych prác (Karous 1989).

Súčasné techniky terénneho merania vyžadujú zavedenie prúdu do horninového prostredia pomocou dvoch prúdových elektród (C1 a C2 na obr.3.1) a meranie rozdielu potenciálov na dvoch potenciálových elektródach (P1 a P2).



C1, C2 - prúdové elektródy

P1, P2 - potenciálové (meracie) elektródy

Obr. 3.1 Schéma všeobecného štvorelektródového usporiadania

Hodnotu zdanlivého merného odporu ρ_a získame podľa vzťahu (3.1), kde k je konštanta usporiadania (geometrický faktor), ΔU je rozdiel potenciálov na elektródach *P1* a *P2* a *I* je veľkosť elektrického prúdu meraný medzi elektródami C1 a C2. Konštanta usporiadania k je charakteristická pre daný typ usporiadania a je daná všeobecným vzťahom (3.2).

$$\rho_{\rm a} = k \frac{\Delta U}{I} \,, \tag{3.1}$$

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_1P_2} - \frac{1}{C_2P_1} + \frac{1}{C_2P_2}},$$
(3.2)

20

Zdanlivým merným odporom rozumieme merný odpor homogénneho polpriestoru, na ktorom by sme rovnakým usporiadaním merali pri rovnakej hodnote elektrického prúdu rovnaké elektrické napätie. Zdanlivý merný odpor prostredia ρ_a nie je určený iba odporovými vlastnosťami prostredia, ale tiež typom a rozmerom usporiadania. Je preto dôležité, aby pri zobrazovaní odporových hodnôt, bolo uvedené použité elektródové usporiadanie (Karous, 1989).

Autori Szalay a Szarka (2008), v článku "On the classification of surface geoelectric arrays" sumarizovali a následne klasifikovali 92 rôznych elektródových usporiadaní. My sa budeme venovať len základným typom, ktoré sa najčastejšie využívajú v praxi. Budeme sa teda zaoberať elektródovými usporiadaniami Wenner alfa (WA), Wenner beta (WB), Wenner gama (WG), Schlumberger (SCH), pól-pól (PP), pól-dipól (PD), dipól-dipól (DD).

Na nasledujúcich stranách sú charakterizované vyššie uvedené elektródové usporiadania pomocou základnej schémy s konštantou usporiadania a schematického znázornenia princípu pri 2D meraní. Následne sú jednotlivé usporiadania porovnané na základe ich hĺbkového dosahu, citlivosti na zmenu merného odporu a počtu bodov zápisu.

3.1 Wenner

Usporiadane je pomenované podľa Franka Wennera, ktorý ho použil ako prvý. Usporiadanie Wenner je charakteristické vždy rovnakou vzdialenosťou medzi elektródami "**a**". Rozlišujeme tri varianty usporiadania Wenner: Wenner alfa, Wenner beta a Wenner gama.

Wenner alfa

Pri usporiadaní Wenner alfa sú dve prúdové elektródy C1 a C2 situované na vonkajšej strane usporiadania a potenciálové elektródy P1 a P2 ležia vo vnútri usporiadania (obr. 3.2). Bod zápisu meracieho systému je v strede usporiadania.



P1, P2 - potenciálové (meracie) elektródy

a - elektródová vzdialenosť

Obr. 3.2 Základná schéma pre usporiadanie Wenner alfa.

Pri multi-elektródovom systéme merania sa využívajú násobky elektródovej vzdialenosti "**a**" na získanie informácií z väčšej hĺbky. Použitím viacerých meraní s rôznym násobkom **"a**" získame 2D rez zdanlivého merného odporu (obr. 3.3). Maximálny násobok je závislý na dĺžke zapojeného multi-elektródového systému.



Obr. 3.3 Zoradenie a schematický znázornený smer pohybu a zápisu pre 2D Wenner usporiadanie používané v ERT.

Wenner beta

Toto usporiadanie je modifikáciou Wenner alfa a vznikne zmenou pozície elektród na C2-C1-P1-P2, čím sa zmení aj hodnota konštanty k (obr. 3.4). Systém merania pri ERT je rovnaký ako pri usporiadaní Wenner alfa, zhodný je aj počet bodov zápisu. Usporiadanie Wenner beta je zhodné s usporiadaním dipól-dipól pre n=1.



a – elektródová vzdialenosť

Obr. 3.4 Základná schéma pre usporiadanie Wenner beta

Wenner gama

Treťou modifikáciou usporiadania Wenner je Wenner gama, kde pozícia elektród je v tvare C1-P1-C2-P2 (obr. 3.5). Systém merania pri ERT je rovnaký ako pri usporiadaní Wenner alfa, zhodný je aj počet bodov zápisu.



C1, C2 - prúdové elektródy
P1, P2 - potenciálové (meracie) elektródy
a - elektródová vzdialenosť

Obr. 3.5 Základná schéma pre usporiadanie Wenner gama

Citlivosť usporiadaní Wenner

Na grafoch citlivosti (Obr. 3.6 a) má usporiadanie Wenner alfa takmer horizontálne rozloženie pod stredom usporiadania (Loke, 2019). Vzhľadom k tejto vlastnosti je usporiadanie Wenner alfa relatívne citlivé na vertikálne zmeny avšak menej citlivé na zmeny odporu v horizontálnom smere.

Usporiadanie Wenner beta (Obr. 3.6 b) je v skutočnosti zvláštnym prípadom usporiadania dipól – dipól (vzdialenosť medzi elektródami konštantná). Problematika citlivosti je teda opísaná pri usporiadaní dipól – dipól.

Wenner Gama (Obr. 3.6 c) je usporiadanie pomerne nezvyčajné, keď sú prúdové a potenciálne elektródy prekladané. Sekcia citlivosti ukazuje, že najhlbšie oblasti mapované týmto poľom sú pod elektródami C1 a P2 a nie pod stredom usporiadania.



Obr. 3.6 Rezy citlivosti pre usporiadanie Wenner (Loke, 2019). a) rez citlivosti pre usporiadanie Wenner alfa, b) rez citlivosti pre usporiadanie Wenner beta, a) rez citlivosti pre usporiadanie Wenner gama,

Usporiadanie Wenner - zhrnutie:

- Použitie: najrýchlejšia metóda na širokú škálu úloh, dobré rozlíšenie pre vertikálne rozhrania, horšie rozlíšenie pre horizontálne a kvázi horizontálne vrstvy, detekcia veľkých nehomogenít rôzneho tvaru, tektonické zóny.
- Najpoužívanejší variant: Wenner alfa.
- Rozlíšenie: nízke, nevyhovujúce pre detailný prieskum hlbších štruktúr.

 Pokrytie meraného úseku: slabý hĺbkový dosah, približne 1/6 maximálneho vzdialenosti C1C2. Nevýhodou tejto 2D metódy je relatívne nízke horizontálne pokrytie (problém pri malom počte elektród).

3.2 Schlumberger

Usporiadanie Schlumberger je jedným z najčastejšie používaných usporiadaní na odporové sondovanie. Na vývoji vzniku geoelektrických odporových metód stáli bratia Conrad a Macel Schlumbergerovci vo Francúzku (1912), podľa ktorých je aj usporiadanie pomenované. Upravená forma tohto usporiadania môže byť použitá pre multielektródové systémy.

Systém usporiadania s konštantným rozstupom je znázornený na obrázku 3.7, kde **"n"** faktor pre toto usporiadanie je pomer vzdialenosti medzi C1-P1 (alebo P2-C2) elektródami a vzdialenosti medzi potenciálovými elektródami P1-P2. Všimnite si, že usporiadanie Wenner alfa je súčasť usporiadania Schlumberger pre prípad, že **"n"** faktor je rovný 1.



C1, C2 - prúdové elektródy

P1, P2 - potenciálové (meracie) elektródy

- a elektródová vzdialenosť
- n násobok elektródovej vzdialenosti



Citlivosť usporiadania Schlumberger v závislosti na zmene parametra **"n"** od n=1 (Wenner) do n=6 (klasický Schlumberger) je **"n"** znázornená na obrázku 3.8 a až 3.8 d. Pozitívna citlivosť sa s narastaním faktora **"n"** koncetruje pod elektródami P1, P2. Pri n=6 je pozitívna citlivosť pod P1, P2 oddelená od pozitívnej citlivosti blízko C1, C2. To znamená, že usporiadanie Schlumberger je citlivé pre horizontálne zmeny.



Obr. 3.8 Rezy citlivosti pre usporiadanie Schlumberger (Loke, 2019), a) citlivosť usporiadania pre n=1, b) citlivosť usporiadania pre n=2, c) citlivosť usporiadania pre n=4, d) citlivosť usporiadania pre n=6.

Usporiadanie Schlumberger - zhrnutie:

- **Použitie:** vertikálne, kvázi-horizontálne a horizontálne rozhrania, väčšie štruktúry, tektonika, striedanie horizontálnych vrstiev.
- **Rozlíšenie:** stredné, viac-menej dostatočné aj pre detailný prieskum hlbších štruktúr.
- **Pokrytie meraného úseku:** stredný hĺbkový dosah, približne 1/5 maximálneho vzdialenosti C1C2. Jednou z nevýhod tejto 2D metódy je relatívne nízke horizontálne pokrytie (problém pri malom počte elektród).

Porovnanie usporiadaní Schlumberger a Wenner (Obr. 3.9)

- Usporiadanie Schlumberger (Obr. 3.9 b) má mierne lepšie horizontálne pokrytie v porovnaní s usporiadaním Wenner (Obr. 3.9 a).
- Usporiadanie Wenner má pri každej hĺbkovej úrovni o 3 dátové body menej než pri predchádzajúcej úrovni.
- Usporiadanie Schlumberger má o 2 dátové body menej než predchádzajúca úroveň.
- Horizontálne pokrytie dát pri usporiadaní Schlumberger je o niečo širšie, ako pri usporiadaní Wenner, ale užšie ako pri usporiadaní dipól-dipól.



Obr. 3.9 Porovnanie usporiadaní a) Wenner a b) Schlumberger (Loke, 2019)

3.3 Dipól – dipól

Pri usporiadaní dipól – dipól (Obr. 3.10) je vzdialenosť medzi prúdovými elektródami C1, C2 taká istá ako medzi potenciálovými elektródami P1, P2. Pri usporiadaní dipól-dipól je parameter **"a**" spočiatku pevný a mení sa násobok elektródovej vzdialenosti **"n**" od 1,2,3, až po 6 (nad 6 je usporiadanie veľmi citlivé na šum). Potom sa zväčší parameter **"a**" a znova sa postupne mení **"n".**



- C1, C2 prúdové elektródy
- P1, P2 potenciálové (meracie) elektródy
- a elektródová vzdialenosť
- n násobok elektródovej vzdialenosti

Obr. 3.10 Základná schéma pre usporiadanie dipól - dipól.

Dipól – dipól je asi najviac používané usporiadanie, má veľké rozlíšenie a lepšie horizontálne pokrytie ako Wenner. Kombináciou parametrov "**n**" a "**a**" môžeme získať rôznu hustotu informácii (Obr. 3.11). Čím sa hodnota "**n**" zväčšuje, tým sa intenzita signálu znižuje. Možnosť ako sa vyrovnať s týmto problémom je zvýšiť hodnotu "**a**" (vzdialenosť medzi C1,C2 a P1,P2).



kombináciou rôznych hodnôt parametrov "a" a "n" môžeme získať vysokú hustotu informácie

Obr. 3.11 Schéma merania a princíp merania pre usporiadanie dipól – dipól

Usporiadanie dipól-dipól má najväčšiu citlivosť medzi elektródami C2C1 a P1P2 (teda medzi dipólmi). To znamená, že usporiadanie je citlivé na zmenu odporu pod elektródami dipólov (Obr. 3.12a). Ak **"n"** faktor narastá, tak je väčšia citlivosť stále viac koncentrovaná pod C1C2 a P1P2 dipólmi, ale citlivosť medzi dipólmi C1P1 klesá (Obr. 3.12 b, c, d). Dipól – dipól je veľmi citlivý na horizontálne zmeny odporu, ale relatívne necitlivý na vertikálne zmeny.

Usporiadanie dipól - dipól - zhrnutie:

- Použitie: najdetailnejšia metóda, špeciálne na detekciu vertikálnych štruktúr (dutiny, jaskyne, tenké praskliny, zosuvy, rudné žily).
- Rozlíšenie: najvyššie, umožňuje maximálne možné použitie pre hlbšie situované štruktúry.
- Pokrytie meraného úseku: stredný hĺbkový dosah, približne 1/5 maximálnej vzdialenosti C1C2. Efektívna hĺbka je silne limitovaná rýchlym poklesom meraného potenciálu, kvôli veľkej vzdialenosti dipólov (faktor "n").



Obr. 3.12 Rezy citlivosti pre usporiadanie dipól - dipól (Loke, 2019), a) citlivosť usporiadania pre n=1, b) citlivosť usporiadania pre n=2, c) citlivosť usporiadania pre n=4, d) citlivosť usporiadania pre n=6.

3.4 Pól – pól

Usporiadanie pól - pól sa nepoužíva tak bežne ako Wennerove, dipól-dipólové a Schlumbergerove usporiadane. Ideálne bodové pole s iba jednou prúdovou a jednou potenciálnou elektródou (Obr. 3.13) neexistuje. Aby sa aproximovalo usporiadanie pól-pól, musí byť jedna prúdová a jedna potenciálová elektróda (C2 a P2) umiestnená v určitej vzdialenosti od elektród C1 a P1. Účinok elektródy C2 (a obdobne i P2) je približne úmerný pomeru vzdialenosti C1-P1 k vzdialenosti C2-P1. Aby sa nebrali do úvahy účinky elektród C2 a P2, musí byť vzdialenosť týchto elektród od profilu najmenej 20-násobok najväčšej použitej vzdialenosti C1-P1, aby sa zabezpečilo, že chyba bude menšia ako 5%. Nevýhodou tohto usporiadania je, že kvôli veľkej vzdialenosti medzi elektródami P1 a P2 môže zachytávať veľké množstvo telurického šumu, ktorý môže vážne zhoršiť kvalitu meraní. Toto usporiadanie sa teda používa hlavne pri prieskumoch, kde sa používajú relatívne malé rozostupy elektród (menej ako niekoľko metrov). Je populárne pri archeologických prieskumoch, kde sa používajú práve malé vzdialenosti elektród. Používa sa tiež na 3-D prieskumy (Li a Oldenburg, 1992).

Toto usporiadanie má najširšie horizontálne pokrytie a najväčšiu hĺbku prieskumu. Má však najhoršie rozlíšenie, čo je vidieť na rezoch citlivosti pre usporiadanie pól – pól na obrázku 3.14 (Loke, 2019).



C1, C2 - prúdové elektródy

P1, P2 - potenciálové (meracie) elektródy

a - elektródová vzdialenosť

Obr. 3.13 Základná schéma pre usporiadanie pól - pól.



Obr. 3.14 Rezy citlivosti pre usporiadanie pól - pól (Loke, 2019)

Usporiadanie pól - pól - zhrnutie:

- Použitie: skúmanie hlbokých štruktúr (všetkých druhov). Používa sa zriedkavo.
- Rozlíšenie: nízke.
- **Pokrytie meraného úseku:** maximálny hĺbkový dosah, približne 70 % dĺžky profilu.

3.5 Pól – dipól

Usporiadanie pól-dipól má relatívne dobré horizontálne pokrytie. Má výrazne vyššiu silu signálu v porovnaní s usporiadaním dipól-dipól a nie je až tak citlivé na telurický šum ako usporiadanie pól - pól. Na rozdiel od ostatných bežných usporiadaní je usporiadanie pól-dipól asymetrické (Obr. 3.15). Vyžaduje si vzdialenú elektródu C2, ktorá musí byť umiestnená dostatočne ďaleko od profilu.



- C1, C2 prúdové elektródy
- P1, P2 potenciálové (meracie) elektródy
- a elektródová vzdialenosť
- n násobok elektródovej vzdialenosti



Na obrázku 3.16 a, b, c, d, je znázornená citlivosť usporiadania pól - dipól pre rôzne hodnoty **"n"**. Oblasť s najväčšou citlivosťou leží pod dipólovým párom P1-P2, najmä pre veľké hodnoty **"n"** faktoru. Pri hodnotách n= 4 a viac, sa vysoko pozitívna horizontálna odozva pod dipólom P1-P2 stáva čoraz vertikálnejšou. Podobne ako usporiadanie dipól-dipól je usporiadanie pól - dipól citlivejšie na vertikálne štruktúry.


Obr. 3.16 Rezy citlivosti pre usporiadanie pól - dipól (Loke, 2019), a) citlivosť usporiadania pre n=1, b) citlivosť usporiadania pre n=2, c) citlivosť usporiadania pre n=4, d) citlivosť usporiadania pre n=6.

Usporiadanie pól - dipól - zhrnutie:

- **Použitie:** najúčinnejšie usporiadanie na detekciu všetkých vertikálnych štruktúr (aj štíhlych prasklín) s veľkým hĺbkovým dosahom.
- Rozlíšenie: dobré, presnosť meraných pozícií v reze sa znižuje (bočný posun), pretože pole nie je symetrické.
- Pokrytie meraného úseku: veľký hĺbkový dosah, cca. 1/3 dĺžky profilu.
 Vyššie bočné pokrytie. Pre lepšie výsledky (pokiaľ ide o polohy) sa odporúča použiť ďalší reverzný pól-dipól alebo kombinovaný pól dipól.

3.6 Hĺbkový dosah elektródových usporiadaní

Otázkou hĺbkového dosahu jednotlivých elektródových usporiadaní sa zaoberali viacerí autori v 60-tich a 70-tich rokoch 20. storočia. Roy a Apparao (1971) použili na vyjadrenie priebehu signálu v homogénnom polpriestore smerom do hĺbky parameter DIC (depth investigation characteristic). Normalizovaný parameter DIC využili na porovnanie medzi jednotlivými elektródovými usporiadaniami. Edwards (1977) následne definoval strednú hĺbku merania ako interval prvej polovice totálneho signálu NDIC pre dané elektródové usporiadanie. Efektívnu hĺbku merania (z_e) definoval ako stred tohto intervalu. Táto koncepcia sa v podstate nezmenila a využíva sa aj v súčasnosti. Prehľad efektívnych hĺbok merania podľa Edwardsa (1977) pre jednotlivých elektródových usporiadaní závisí od parametra "**a**" (elektródová vzdialenosť) a "**n**" (násobok elektródovej vzdialenosti).

El. usporiadani	e	z _e /a	z _e /L	El. usporiada	nie	z _e /a	z _e /L
Wenner alfa		0.519	0.173	Pól - dipól	n = 1	0.519	0.296
Wenner beta		0.416	0.139		n = 2	0.925	0.308
Wenner gama		0.594	0.198		n = 3	1.318	0.330
					n = 4	1.706	0.341
Schlumberger	n= 1	0.519	0.173		n = 5	2.093	0.349
	n = 2	0.925	0.186		n = 6	2.478	0.354
	n = 3	1.318	0.189		n = 7	2.863	0.358
	n = 4	1.706	0.190		n = 8	3.247	0.361
	n = 5	2.093	0.190				
	n = 6	2.478	0.191	Dipól - dipól	n = 1	0.416	0.139
	n = 7	2.863	0.191		n = 2	0.697	0.174
	n = 8	3.247	0.191		n = 3	0.962	0.192
	n = 9	3.632	0.191		n = 4	1.220	0.203
	n = 10	4.015	0.191		n = 5	1.476	0.211
					n = 6	1.730	0.216
Pól - pól		0.869			n = 7	1.983	0.220
					n = 8	2.236	0.224

Tab. 3.1 Efektívna hĺbka merania pre rôzne elektródové usporiadania (Edwards, 1977).L - celková dĺžka usporiadania, a – elektródová vzdialenosť.

Na obrázku 3.17 je príklad maximálneho hĺbkového dosahu pre vybrané elektródové usporiadania pri použití profilu s dĺžkou 47 m (48 elektród) a elektródovou vzdialenosťou 1 m. Usporiadanie pól - pól má najväčší hĺbkový dosah, menší má usporiadanie pól - dipól a v ostatných prípadoch sa hĺbkový dosah pohybuje okolo 1/6 dĺžky profilu.



Obr. 3.17 Maximálna hĺbka merania pre rôzne elektródové usporiadania pre 48 elektród: a – elektródová vzdialenosť v metroch, n – násobok elektródovej vzdialenosti.

4 Priama a inverzná úloha v odporových metódach

V odporových metódach riešime priamu a obrátenú úlohu pomocou modelovania, ktoré podľa cieľa úlohy delíme na priame (forward modeling) a inverzné (inversion).

V priamej modelovacej metóde je rozloženie rezistivity prostredia vopred dané a cieľom je vypočítať hodnotu zdanlivého merného elektrického odporu, ktorá môže byť nameraná nad takouto štruktúrou (Loke 2019). Výsledkom priameho modelovania sú hodnoty vypočítaného zdanlivého merného elektrického odporu. Zdanlivý je z dôvodu, že nadobúda rôzne hodnoty pre jednotlivé elektródové usporiadania nad rovnakou štruktúrou.

Pri inverznej metóde máme k dispozícii namerané hodnoty zdanlivého merného elektrického odporu a cieľom je vytvoriť model štruktúry s takou odozvou na povrchu, ktorá sa bude čo najviac zhodovať s nameranými hodnotami. Využíva sa tu priame modelovanie na výpočet odozvy inverzného modelu a iteračné procesy na dosiahnutie čo najlepšej zhody medzi nameranými a vypočítanými hodnotami zdanlivého merného

odporu. Výsledkom inverznej metódy je teda model horninového prostredia charakterizovaný zmenami merného elektrického odporu. Inverzný problém v odporových metódach bol prvýkrát vyriešený začiatkom tridsiatych rokov minulého storočia napr. Langer, 1933; Slichter, 1933. Od vtedy, až takmer dokonca osemdesiatych rokov minulého storočia zostala terénna metodika a spôsob spracovania nameraných údajov takmer nezmenený.

Vzhľadom na to, v koľkých smeroch sa mení meraná veličina, t.j. aký typ modelu prostredia predpokladáme, môžeme modelovanie rozdeliť na jednorozmerné - 1D (Obr. 4.1a), dvojrozmerné - 2D (Obr. 4.1b) a trojrozmerné - 3D (Obr. 4.1c).



Obr. 4.1 Tri rozdielne modely používané pri interpretácii odporových meraní, a) jednorozmerné - 1D, b) dvojrozmerné - 2D, c) trojrozmerné - 3D (upravené podľa Loke, 2004).

Od konca osemdesiatych rokov až do súčasnosti prebieha výrazné zdokonalovanie zberu dát v teréne a ich interpretácie. Pre prácu v teréne sú používané automatické, počítačom riadené a kontrolované multi-elektródové meracie systémy. Hlavnou výhodou multi-elektródových systémov oproti tradičným technikám je neporovnateľne vyššia hustota nameraných údajov a možnosť kombinácie rôznych elektródových usporiadaní. Zdokonalenie výpočtovej techniky umožnilo pri spracovaní údajov používať časovo náročné matematické algoritmy, ktoré nám dovoľujú využívať čoraz zložitejšie modely.

4.1 1D priame modelovanie

Na výpočet odozvy 1D modelu (Obr. 4.1a) horninového prostredia na povrchu sa využíva predpoklad, že prostredie obsahuje len horizontálne vrstvy. V tomto prípade zmeny merného odporu sa uskutočňujú len s hĺbkou, nie v laterálnom smere, čo je

hlavný nedostatok 1D modelovania. Táto metóda je úspešne používaná pre geologické situácie, kde je možné horninové prostredie charakterizovať jednorozmerným prostredím (vid. obr. 4.1a), napr. vrstvy sedimentov v sedimentárnej panve alebo hladina podzemnej vody. Výsledkom 1D modelovania sú odporové krivky, kde sa zdanlivý merný odpor mení s hĺbkou (Obr. 4.2). Uvedený postup je stále používaný pri interpretácii meraní vertikálneho elektrického sondovania (VES).



Obr. 4.2 Výsledok 1D modelovania pre 4 vrstevný model prostredia v programe RES1D

4.2 2D priame modelovanie

2D modelovanie poskytuje dvojrozmerné zobrazenie prostredia (obr. 4.1b), teda na rozdiel od 1D modelovania sú zohľadnené aj laterálne zmeny merného odporu. Pri 2D modelovaní sa prostredie najčastejšie rozdeľuje do určitého počtu horizontálnych hranolov (ich rozmer v smere osí x a z je konečný a v smere osi y nekonečný), ktorých vertikálny rez (xz) vytvára sieť buniek. Každá bunka reprezentuje časť prostredia s určenou hodnotou merného odporu.

Pri priamom modelovaní je rozloženie merného odporu horninového prostredia dané a cieľom je vypočítať zdanlivý merný odpor, ktorý by sme mohli nad danou štruktúrou namerať. Priame modelovanie je aj súčasťou inverzného procesu, pretože pri inverzných metódach je nutné vypočítať teoretické hodnoty zdanlivého merného odporu pre inverzný model a porovnať ich s údajmi nameranými v teréne. Na výpočet

hodnôt zdanlivého merného odporu sú najčastejšie používané tri hlavné metódy: analytické metódy, metóda hraničných prvkov a metódy konečných diferencií a konečných prvkov. Analytické metódy dosahujú pravdepodobne najväčšiu presnosť, ale ich obmedzenie je v relatívne jednoduchej geometrii (napr. guľa alebo valec). Metódy hraničných prvkov sú v tomto smere viac flexibilné, ale počet možných regiónov s rozdielnou hodnotou merného odporu je obmedzený (obvykle menej ako 10). Vzhľadom na to, že pri inžinierskom a environmentálnom prieskume môže mať prostredie ľubovoľné rozloženie merného odporu, sú obvykle jedinou možnosťou na výpočet zdanlivého merného odpor metódy konečných diferencií a konečných prvkov. Tieto metódy totiž umožňujú rozdeliť prostredie na tisícky buniek s rozdielnou hodnotou merného odporu. Predošlé dve metódy sa využívajú ako nezávislé metódy, ktoré možno využiť na kontrolu správnosti metód konečných diferencií a konečných prvkov (Loke, 2019).

Ako už bolo spomenuté, metódy konečných diferencií a konečných prvkov umožňujú rozdeliť prostredie do určitého počtu blokov použitím pravouhlej siete pričom je možné špecifikovať hodnotu merného odporu v každej bunke (obr. 4.3). Metóda konečných diferencií je založená na metóde opísanej Deyom a Morrisonom (1979a). Metóda konečných prvkov vyžíva štandardné trojboké prvky prvého rádu (Silvester a Ferrari, 1990) a využíva sa pri modelovaní so započítaním vplyvu topografie do modelu.



Obr. 4.3 2D model prostredia s dvomi blokmi zadefinovaný pomocou pravouhlých buniek (dole) a vypočítaná odozva tohto modelu pre elektródové usporiadanie Wenner alfa pomocou softvéru RES2DMOD (hore).

4.3 3D priame modelovanie

3D modelovanie poskytuje najkomplexnejšie zobrazenie prostredia (obr. 4.1c), ale zároveň je aj najnáročnejšie jednak na zber dát ako aj na spracovanie. Najčastejšie využívame 3D modelovanie na zistenie prejavu izometrických telies (izolované dutiny, kovové predmety a pod.). Výpočet odozvy takýchto modelov najčastejšie prebieha pomocou metódy konečných diferencií alebo konečných prvkov. Najväčšou výhodou je, že získavame hodnoty zdanlivého merného odporu v x-ovom, y-ovom aj v diagonálnom smere. Pre tento typ modelovania existuje viacero typov modelov.

Jeden z možných typov modelov je na obrázku 4.4a, kde je prostredie rozdelené na niekoľko vrstiev a každá vrstva je ďalej delená na pravouhlé bunky. Druhý model rozdeľuje niekoľko vrchných vrstiev na polovice v horizontálnom aj vertikálnom smere (obr. 4.4b), ďalšou možnosťou je rozdelenie niekoľkých vrchných vrstiev na polovicu len v horizontálnom smere (obr. 4.4c).



Obr. 4.4 Typy rozdelenia prostredia používané pri 3D modelovaní (prevzaté z Loke, 2004):

- a) štandardný model, kde šírka pravouhlých buniek je rovná vzdialenosti medzi elektródami v x-ovom a y-ovom smere,
- b) model, kde niekoľko vrchných vrstiev je rozdelených na polovice vo vertikálnom aj horizontálnom smere, čo poskytuje lepšie rozlíšenie,
- c) model, kde sú bunky rozdelené len v horizontálnom smere.

Výsledkom 3D priameho modelovania sú hodnoty zdanlivého merného odporu rozmiestnené v 3D priestore. Hodnoty sú najčastejšie zobrazované formou horizontálnych (obr. 4.5) alebo vertikálnych rezov, ale aj pomocou 3D aplikácií.



Obr. 4.5 3D model prostredia s dvomi blokmi zobrazený pomocou horizontálnych rezov (hore) a odozva tohto modelu pre usporiadanie pól-pól tiež vo forme horizontálnych rezov zdanlivého merného odporu (dole).

Inverzný proces v geoelektrických metódach

Inverzný proces predstavuje súbor operácií, ktorými sa snažíme dosiahnuť čo najpresnejší opis študovaného prostredia. V geoelektrických metódach ide o vymedzenie telies s rôznou hodnotou merného elektrického odporu. V súčasnosti pri inverznom procese (obrátenej úlohe) využívame najčastejšie inverzný výpočet (obr. 4.6)



Obr. 4.6 Schematický diagram inverzného procesu

Inverzný výpočet umožňuje určenie takej hodnoty merného odporu buniek modelu prostredia, z ktorého vypočítaná odozva súhlasí s nameranými hodnotami. Na interpretáciu geofyzikálnych údajov bolo už použité množstvo inverzných techník (Treietl a Lines, 2001), najmä metóda konečných štvorcov (Inman, 1975), konjugovaných gradientov (Rodi a Mackie, 2001), maximálnej entropie (Bassrei a Quezada, 2001), syntetických neurálnych sietí (Zhang a Zhou, 2002) a rozkladu podľa singulárnych hodnôt (Muiuane a Pedersen, 2001). Najviac používanou inverznou technikou pre 2D a 3D odporovú inverziu je regularizovaná metóda najmenších štvorcov (Sasaki, 1989; DeGroot-Hedlin a Constable, 1990; Oldenburg a Li, 1994; Loke a Barker, 1996; Li a Oldenburg, 2000). Je to univerzálna metóda, ktorá 46 užívateľovi umožňuje zadať rôzne informácie o prostredí prostredníctvom obmedzenia inverzného procesu a výsledné inverzné modely sa tak viac blížia skutočnému geologickému prostrediu (Ellis a Oldenburg, 1994).

4.4 Možnosti rozdelenia modelu

Pri inverznom procese je prostredie modelu vždy rozdelené na menšie časti (regióny). Najjednoduchšie je rozdelenie na pravouhlé bunky (obr. 4.7a), ktoré sú fixné a počas inverzného procesu sa mení len hodnota merného odporu buniek. Radikálne iným prístupom je rozdelenie prostredia na základe rozhraní (obr. 4.7b), cez ktoré sa uskutočňuje zmena hodnoty merného odporu a vzniknuté regióny majú konštantnú hodnotu. Tento prístup je veľmi vhodný pre údaje zo syntetických modelov, avšak pre mnoho reálnych meraní je nestabilný, pretože vytvára vysoko oscilujúce rozhrania (Olayika a Yaramanci, 2000). Ďalšie snahy pre lepší popis prostredia viedli k vytvoreniu kombinácie rozdelenia prostredia pomocou laterálnych pravouhlých pásov spolu s rozhraniami, ako je uvedené na obr. 4.7c (Auken a Christiansen, 2004). V tomto prípade je možná zmena hodnoty merného odporu nielen v laterálnom smere ale aj cez rozhrania. Následnou kombináciou modelov boli vytvorené komplikovanejšie spôsoby rozdelenia prostredia, ako napr. kombinácia pravouhlých buniek a rozhrania (obr. 4.7d) alebo kombinácia rozhrania s trapezoidálnymi bunkami, ktorých tvar je deformovaný podľa tvaru rozhrania (obr. 4.7e). Modely založené na pravouhlých bunkách (obr. 4.7 a, c, d) sa obvykle vyžívajú na výpočet hodnôt zdanlivého merného odporu pri metóde konečných diferencií. Variant rozdelenia modelu s trapezoidálnymi bunkami (obr. 4.7e), ktorými je možné dobre opísať tvar rozhrania, je vhodný pre metódu konečných prvkov.

a) bunkovo založený model

P1	P2	P3					
P ₁₃							
P25							
P37							
P49							
P ₆₁							P72

b) model založený na rozhraní



c) leterálne obmedzený model založený na rozhraní



d) kombinácia bunkového modelu a rozhrania



 e) model s lichobežníkovými bunkami prispôsobenými rozhraniu





- a) výhradne bunkovo založený model,
- b) model založený výhradne na rozhraní,
- c) laterálne obmedzený model,
- d) kombinácia bunkového modelu a modelu založeného na rozhraní s pravouhlými bunkami,
- e) model s lichobežníkovými bunkami prispôsobenými rozhraniu.

4.5 Teória inverzie

Pri geofyzikálnom inverznom procese sa snažíme získať model, ktorého odozva je rovnaká ako aktuálne namerané údaje. Model je idealizovaná matematická predstava horninového prostredia. Model obsahuje fyzikálne parametre, ktoré môžeme získať z nameraných údajov. Odozva modelu predstavuje syntetické údaje, ktoré môžeme vypočítať pomocou zadefinovaných vzťahov pre model s danými parametrami. Všetky inverzné metódy sa v podstate snažia určiť model prostredia, ktorého odozva súhlasí s nameranými údajmi v určitých medziach. Matematickú väzbu medzi modelovými parametrami a modelovou odozvou pre 2D a 3D odporové modely

najčastejšie zabezpečuje metóda konečných diferencií (Dey a Morrison 1979a, 1979b) alebo metóda konečných prvkov (Silvester a Ferrari, 1990).

Všetky optimalizačné metódy modifikujú iniciálny model iteratívnym spôsobom tak, že minimalizujú rozdiel medzi odozvou modelu a nameranými hodnotami. Súbor nameraných údajov môžeme zapísať ako stĺpcový vektor (col), rovnica 4.1:

$$y = col(y_1, y_2, ..., y_m)$$
 (4.1)

kde m je počet meraní.

Odozvu modelu môžeme zapísať v jednoduchej forme 4.2:

$$\boldsymbol{f} = col(f_1, f_2, \dots, f_m) \tag{4.2}$$

Pri problematike merného odporu je bežnou praxou, že pre namerané údaje a odozvu modelu sa využije logaritmus hodnôt zdanlivého merného odporu a logaritmus modelových hodnôt ako modelových parametrov. Modelové parametre môžeme aproximovať vektorom

$$\boldsymbol{q} = col(q_1, q_2, \dots, q_n) \tag{4.3}$$

kde n je počet modelových parametrov.

Rozdiel medzi nameranými údajmi a odozvou modelu je daný rozdielovým vektorom *g*, definovaným ako

$$g = y - f \tag{4.4}$$

V optimalizačnej metóde najmenších štvorcov je iniciálny model modifikovaný tak, že suma štvorcov odchyliek *E* rozdielov medzi nameranými a modelovými hodnotami je minimalizovaná (Loke, 2004).

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{g} = \sum_{i=1}^n g_i^2 \tag{4.5}$$

Pre redukciu odchyliek je použitá Gauss-Newtonova rovnica, ktorá určuje zmenu v modelových parametroch (Lines a Treitel, 1984).

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \tag{4.6}$$

kde **Δq** je zmena modelového parametra a **J** je Jacobyho matica (veľkosti m× n) parciálnych derivácií. Časti Jacobyho matice sú dané vzťahom

$$\boldsymbol{J_{ij}} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \tag{4.7}$$

kde zmena *i*-tej odozvy modelu spôsobí zmenu *j*-teho parametra modelu. Po prepočítaní vektora zmeny parametrov je získaný nový model pomocou vzťahu

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k + \Delta \boldsymbol{q}_k \tag{4.8}$$

V praxi, pri geofyzikálnej inverzii, je jednoduchá metóda najmenších štvorcov (4.6) málokedy používaná. V niektorých situáciách môže byť matica $J^T J$ singulárna a tak rovnica pre Δq nemá riešenie. Ďalším bežným problémom je, že matica $J^T J$ je blízka singulárnej. To môže nastať ak použitý iniciálny model je veľmi odlišný od optimálneho. Vektor zmeny parametru vypočítaný pomocou rovnice (4.6) môže obsahovať zložky, ktoré sú príliš veľké a tak nový model, vypočítaný podľa (4.8) môže mať hodnoty, ktoré nie sú reálne (Loke, 2004). Jednou možnosťou riešenia tohto problému je Marquardt-Levenbergova modifikácia (Lines a Treitel, 1984) Gauss-Newtonovej rovnice, ktorá je daná

$$(\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{J} + \lambda \boldsymbol{I})\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{q}_k = \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{g}$$
(4.9)

kde *I* je jednotková matica a faktor λ je známy ako Marquardtov alebo útlmový faktor (niekedy nazývaný aj ako regularizačný parameter). Táto metóda je známa ako metóda vrcholovej regresie (Inman, 1975). Útlmový faktor efektívne vymedzuje hranicu hodnôt tak, že zložky vektora zmeny parametra budú v reálnych medziach. Zatiaľ čo Gauss-Newtonova metóda v rovnici (4.6) sa snaží minimalizovať len sumu štvorcov odchyliek vektorov, Marquardt-Levenbergova modifikácia tiež minimalizuje kombináciu hodnôt vektora odchyliek a vektora zmeny parametra (Loke, 2004).

Avšak keď je počet modelových parametrov veľký, ako v 2D a 3D inverznom modely, ktorý obsahuje veľký počet malých buniek, model vytvorený touto metódou môže mať nepravidelné rozloženie rezistivity s falošnými vysokými alebo nízkymi odporovými zónami (Constable et al., 1987).

Na prekonanie tohto problému bola Gauss-Newtonova metóda ďalej modifikovaná tak, aby minimalizovala priestorové variácie v modelových parametroch.

Táto plynulo obmedzená metóda najmenších štvorcov (Elis a Oldenburg, 1994) má nasledovnú matematickú formuláciu

$$(J^{T}J + \lambda F)\Delta q_{k} = J^{T}g - \lambda Fq_{k}$$

$$kde \quad F = \alpha_{x}C_{x}^{T}C_{x} + \alpha_{y}C_{y}^{T}C_{y} + \alpha_{z}C_{z}^{T}C_{z}$$

$$(4.10)$$

a C_x , C_y , C_z sú vyhladzovacie matice v **x**-ovom, **y**-ovom a **z**-ovom smere a α_x , α_y a α_z sú relatívne váhy daných vyhladzovacích filtrov v daných smeroch.

Rovnica (4.10), označovaná aj ako L_2 norma vyhladenej optimalizačnej metódy, sa pokúša minimalizovať hranol priestorových zmien modelových hodnôt merného odporu. Tento spôsob vytvára model s hladkou zmenou v hodnotách merného odporu. V niektorých prípadoch horninové prostredie obsahuje niekoľko regiónov relatívne homogénnych, ale s ostrými rozhraniami. Pre takéto prípady môže byť inverzná rovnica (4.10) modifikovaná tak, že je minimalizovaná absolútna zmena v modelových hodnotách rezistivity (Claerbout a Muir, 1973). Technicky je táto modifikácia označovaná ako L_1 norma vyhladenej optimalizačnej metódy, alebo ako bloková inverzná metóda. Existuje viacero spôsobov pre takýto typ modifikácie. Jednou z možností je iteratívna vyvážená metóda najmenších štvorcov (Wolke a Schwetlick, 1988). Optimalizačná rovnica (4.10) je tak modifikovaná na

$$(J^{T}J + \lambda F_{R})\Delta q_{k} = J^{T}R_{d}g - \lambda F_{R}q_{k}$$
(4.11)

kde $F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z$

a \mathbf{R}_{d} a \mathbf{R}_{m} sú váhové matice zavedené tak, že rozdielne elementy nevhodných údajov a vektorov ostrého modelu majú v inverznom procese rovnakú váhu (Loke, 2004).

Rovnica (4.11) predstavuje generálnu metódu, ktorá môže byť ďalej modifikovaná, ak je potrebné zahrnúť známe informácie o horninovom prostredí. Napríklad, ak je známe, že zmeny rezistivity v prostredí sú pravdepodobne obmedzené do určitej zóny, môže byť modifikovaný útlmový faktor λ (Ellis a Oldenburg, 1994) tak, že budú povolené väčšie zmeny v tejto zóne.

4.6 Vplyv topografie na výsledok inverzie

Pri meraniach vykonávaných v oblastiach s výrazným výškovým rozdielom nastáva problém s korektnosťou nameraných údajov v dôsledku zmien elektródových vzdialeností. Spočiatku sa tento problém riešil zavádzaním korekčných faktorov pre model homogénneho prostredia (Fox et al., 1980), ale neposkytoval dobré výsledky v prípadoch, kde boli veľké zmeny hodnôt merného odporu pri povrchu (Tong a Yang, 1990). V súčasnosti sa najviac využívajú tri spôsoby na zohľadnenie vplyvu topografie na inverzný výsledok. Všetky využívajú rozdelenie prostredia pre metódu konečných prvkov a bunkové uzly sa posúvajú len vo vertikálnom smere. Jednotlivé typy sa líšia len vo veľkosti posunu uzlov bunkovej siete.

V prvom prípade sa uzly siete deformujú podľa reliéfu v rovnakej miere smerom do hĺbky (obr. 4.8b). Takýto model je vhodný v prípadoch s malým alebo stredným topografickým prevýšením.

V druhom prípade sú bunkové uzly deformované podľa reliéfu s exponenciálnym poklesom (útlmom) veľkosti posunutia smerom do hĺbky (obr. 4.8c, d) tak, že v hlbších častiach modelu vplyv reliéfu zaniká. Tento typ je vhodný využívať pri stredne veľkých topografických rozdieloch (Loke, 2010). V prípadoch, keď je použitý prístup tlmenej topografie môžu vznikať neobvykle hrubé modelové vrstvy pod oblasťami, kde topografia narastá.

V treťom prípade (obr. 4.8e) sa používa Schwarz-Christoffelova transformačná metóda (Spiegel et al., 1980) pre výpočet veľkosti posunutia uzlov buniek (Loke, 2000). To je pravdepodobne najlepšia metóda, ktorá produkuje viac prirodzené modelové rezy v prípadoch s pomerne veľkým topografickým zakrivením. V niektorých neobvyklých prípadoch, kde má topografia veľmi ostré strmé vrcholy a riedke topografické merania, nemusí Schwarz-Christoffelova metóda správne fungovať. Ak sa to stane, je potrebné zadať niekoľko ďalších topografických údajov blízko vrcholov.

a) usporiadanie modelových blokov bez topografie

1	1	1	1	1	1	<u> </u>	<u> </u>	1	1	L 1	1	<u> </u>						<u> </u>	1	1	T	1	1	ī.	1	1	1	<u> </u>		<u> </u>	L	í –	<u> </u>	<u> </u>	1	1
Т																								Г												
Т																						Т		Г												П
T																																				
Т																						Т	Т	Γ												
Т	Г	Г			Г															Т	Т	Т	Т	Г	Г	Г										Τ
Т	Г	Г		Г	Г			Г	Γ										Τ	Т	Т	Т	Т	Г	Г	Г	Γ					Γ				Т
T																																				

b) usporiadanie modelových blokov s rovnakým vertikálnym posunom uzlov



c) usporiadanie modelových blokov s tlmeným vertikálnym posunom uzlov



d) usporiadanie modelových blokov s vysoko tlmeným vertikálnym posunom uzlov







Obr. 4.8 Rôzne spôsoby zahrnutia topografie do 2-D inverzného modelu. (a) schematický diagram typického 2-D inverzného modelu bez topografie. Medzi susednými elektródami je použitý horizontálny smer pre sieť konečných prvkov so 4 uzlami. Vrstvy blízko povrchu sú tiež rozdelené vertikálne do niekoľkých línií siete. Model so zakriveným gridom pre zhodu s aktuálnou topografiou, kde (b) spodné uzly sú vertikálne posunuté o rovnakú vzdialenosť ako povrchové uzly, (c) posun spodných uzlov je postupne redukovaný s hĺbkou alebo (d) rapídna redukcia s hĺbkou a (e) model získaný pomocou inverzie Schwarz-Christoffelovou transformačnou metódou (Loke, 2010).

4.7 Stredná kvadratická odchýlka a počet iterácii

Interpretovať namerané geofyzikálne údaje a získať tak čo najvernejší model štruktúr horninového prostredia nie je jednoduchá úloha. Na riešenie tejto úlohy najčastejšie slúžia matematické techniky obsahujúce iteratívne procesy, ktoré využívajú priame modelovanie a zmenu vstupného modelu pre dosiahnutie čo najlepšej zhody medzi nameranými a vypočítanými údajmi. Na dosiahnutie čo najlepšej zhody medzi nameranými a vypočítanými údajmi slúži proces opakovania zvolenej funkcie, pri ktorom sa z danej funkcie f(x) tvoria postupne funkcie f2(x) = f(f(x), f3(x) = f(f2(x)) = f(f(f(x))) atď. Proces takéhoto opakovania sa označuje ako iterácia a jednotlivé opakovanie v rámci tohto procesu sa označuje ako (prvá, druhá, x-tá) iterácia.

Kontrolu rozdielov medzi nameranými a vypočítanými údajmi zisťujeme pomocou výpočtu strednej kvadratickej odchýlky (4.12) RMS (root means square):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}} \sum_{i=1}^{n} (\rho c - \rho m)^{2}$$
 (4.12)

kde:

 ρ_c je vypočítaný zdanlivý merný odpor,

 ho_m je nameraný merný odpor,

n je počet bodov.

5 Prehľad softvéru pre 2D modelovanie a interpretáciu

5.1 RESITOMO

Resitomo v2 je program používaný pre 2,5D modelovanie a 2D tomografickú inverziu jednosmerných odporových meraní v prostredí DOS. Môže pomôcť pri plánovaní a interpretácii v geotechnickom inžinierstve a geologickom prieskume na zobrazenie napr. starých stavenísk, minerálnych akumulácií a dutín v moderných konštrukciách. V programe Resitomo je možné používať niektoré kombinácie vertikálnych a horizontálnych elektródových pozícií na ploche aj s topografickými eleváciami. Pracuje s dátami z usporiadaní pól-pól, pól-dipól, dipól-dipól a Wenner. Využíva algoritmy: konečných prvkov (FE) pre 2,5D priame modelovanie a SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) pre 2D rekonštrukciu. Vstupné aj výstupné súbory sú v ASCII formáte. Konečné zobrazenie možno ďalej spracovať v iných mapovacích programoch (www. harbourdom.de/resi_tomo.htm).

5.2 ELETOM – elektrická tomografia

ELETOM je softvér od firmy Geo&soft, ktorý vytvoril Ing. G. Scioldo. Vykonáva kompletnú 2D inverziu (obr. 5.1) z povrchových elektrických prieskumov pre usporiadania elektród typu Wenner, dipól-dipól, priečny dipól-dipól, usporiadania definované užívateľom a zmiešané usporiadania s použitím maximálne 64 elektród na usporiadanie. Program využíva metódu konečných prvkov (FEM - finite elements method) na vytvorenie povrchovej elektrickej odozvy 2D modelu. Iteračný algoritmus použitý na vykonanie inverzie je založený na minimalizácii strednej kvadratickej odchýlky medzi hodnotami poľa a simulovanými hodnotami z FEM. Redukcia šumu obsiahnutého v nameraných údajoch je získaná metódou iteračnej lineárnej regresie. Pre výpočet inverzie je nutné zadať len pozíciu a počet elektród použitých pri meraní (https://www.geoandsoft.com/english/geoelectrical_tomography.htm).



Obr. 5.1 Príklad výstupu z programu ELETOM (<u>https://www.geoandsoft.com/english/geoelectrical_tomography.htm</u>).

5.3 X2IPI

Program X2IPI (obr. 5.2) vytvorili Alexei A. Bobachev (Moscow State university) a Henri Robain (Institut de Recherche pour le Developpement, France) v prostredí Borland Delphi Professional v.7.

X2IPI umožňuje vykonávať 5 hlavných operácií s údajmi získanými z multielektródových meraní :

- vytváranie a úpravu protokolových súborov typu *.seq alebo *.org, potrebných pre multi-elektródové merania s aparatúrami SYSCAL® alebo SAS 4000 a SAS 1000. Pomocou tejto operácie je možné vytvoriť protokolové súbory pre usporiadania pól-dipól, "polovičný" Wenner, Wenner alfa, Wenner beta, Wenner-Schlumberger a dipól-dipól, modifikovať elektródové rozostupy, odstrániť chybné elektródy alebo celé merané profily, vytvárať "Roll along" súbory typu *.seq, *.up, *.dwn, tak isto aj zmeniť číslovanie v súboroch *.seq použitých pri aparatúre MULTINOD®,
- prácu s nameranými údajmi z aparatúr SYSCAL® alebo SAS 4000 a SAS 1000 vo formáte programu RES2DINV. Tu je umožnená vizualizácia údajov, odstránenie chybných meraní, spájanie súborov údajov, vkladanie údajov o topografii,
- odstránenie šumu geologického pozadia, ktorý spôsobujú nehomogenity blízko pod povrchom,

 vytváranie vstupných súborov v konvenčnom formáte pre iné interpretačné aplikácie, práca s výsledkami 2D inverzie vytvorenej programom RES2DINV (http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html).



Obr. 5.2 Príklad výstupu pri použití kvadrupólového usporiadania v programe X2IPI (<u>http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html</u>).

5.4 Sensinv 2D

Senslnv 2D je interaktívny program spoločnosti Geotomofraphie Dr. Thomas Fechner, používaný na modelovanie a inverziu údajov jednosmerných geoelektrických meraní (obr. 5.3) ako aj nestacionárnych javov. Umožňuje modelovanie a výpočet inverzie z ľubovoľných elektródových konfigurácií, ktoré používajú maximálne 6 prúdových a 2 potenciálové elektródy. Pomocou popredných modelovacích pomôcok je možné odhadnúť odozvy prostredia a tým optimalizovať geometriu usporiadania ešte v plánovacej etape prieskumu.

SensInv 2D má 3 hlavné moduly :

- výpočet citlivosti je funkcia na výpočet citlivosti zvolenej elektródovej konfigurácie ako aj jednotlivých elektród,
- modelovacie pomôcky, ktoré umožňujú vytvoriť model s ľubovoľnou geometriou, prideliť mu parametre a získať tak pokročilejšie modely, ktoré možno opakovane použiť.

 inverzné programy ako spätná projekcia, SIRT, MSIRT, v ktorých možno využiť ponuky prvotných údajov, alebo zadať vlastné geologické údaje, dokonca aj časovo závislé (<u>www.geotomographie.de/html/2d.html</u>).





5.5 AGI EarthImager 2D

AGI EatrhImager 2D (obr. 5.4) je 2D modelovací a interpretačný program od americkej firmy AGI Advanced Geosciences, Inc. pracujúci v prostredí Windows.

Program vykonáva odporovú inverziu, inverziu indukovanej polarizácie a ERT (elektrickú odporovú tomografiu) medzi dvomi alebo viacerými vrtmi a povrchovými elektródami, ako aj vrtnú IP inverziu. Rozšírená verzia umožňuje tiež spracovanie časovo závislých odporových meraní a ich inverziu na povrchu i vo vrtoch. Program umožňuje plánovať postup meraní pred prieskumom, virtuálny prieskum, inverznú simuláciu s užívateľom špecifikovaným Gaussovým šumom, topografickú korekciu a výstup odporového profilu s topografickými tvarmi. Priame modelovanie sa vykonáva metódou konečných diferencií alebo metódou konečných prvkov s možnosťou zadania geologických rozhraní. Pri inverzii možno využiť tri algoritmy: metódu tlmených najmenších štvorcov, hladkého modelu a priamu inverziu. Pre IP inverziu možno využiť tiež tri algoritmy: lineárnu metódu, nelineárnu-zbiehavú metódu a nelineárnu-postupnú metódu. V programe je možné upravovať chybné dáta a elektródy, odstrániť šum z

nameraných dát. Počas priebehu inverzie a konvergencie možno sledovať strednú kvadratickú chybu (RMS) a iné štatistiky. Nie je limitovaný počet elektród, typ usporiadania elektród, ani počet dát. Program ponúka odstraňovanie kontúrových kriviek a automatické orezávanie zobrazenia. Ikony na lište a rolovacie menu slúžia na ľahký prístup k často používaným položkám. Možné je tiež automatické ukladanie na disk počas práce a výstupy môžu byť vo formáte JPEG, XYZ alebo ako metasúbory Windows-u. Program dokáže skontrolovať stav pamäte počítača potrebnej pre výpočtové procesy (www.agiusa .com/ agi2dimg.shtml).



5.6 ZondRes2D

Autorom programu je Alex Kaminsky, ZOND software. Program Zondres2d je navrhnutý pre dvojrozmernú interpretáciu údajov elektrickej tomografie (obr. 5.5). Na interpretáciu (inverziu) údajov elektrickej tomografie sa používajú dvojrozmerné a trojrozmerné modely.

ZondRes2d má širokú škálu nástrojov na matematické modelovanie a analýzu jednosmerného prúdu (DC) a indukovaných polarizačných polí. V ZondRes2d má možnosť nastavenia váh pre merania, stanovenia a limitovania meniacich sa vlastností

rôznych buniek, použitie apriórneho modelu ako referencie v inverzii. V softvéri sú realizované robustné schémy odhadu šumu. Existuje tiež možnosť vložiť informáciu o litológii z vrtov a rozhrania stanovené z vrtov nastaviť ako prioritné. Takýto prístup zlepšuje kvalitu výsledkov. V spojení s programovým balíkom pre seizmickú tomografiu ZondST2d, program ZondRes2d umožňuje spojenú inverziu s refrakčnou seizmikou, gravimetriou, magnetikou a magnetotelurikou (<u>http://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondres2d/</u>).



Obr. 5.5 Príklad zobrazenia inverzie v programe ZondRes2d (<u>http://zond-</u>geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondres2d/)

5.7 BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography)

Softvér Boundless Electrical Resistivity Tomography (Rucker et al., 2007, Günther et al., 2006) alebo skrátene BERT sa zameriava hlavne na inverziu údajov z viacelektródových meracích systémov pri použití jednosmerného elektrického prúdu (obr. 5.6), ale umožňuje aj priame modelovanie na získanie syntetických údajov. Použitá metóda je "bezhraničná", pretože okrajové podmienky sú zadefinované ďaleko od záujmovej oblasti, aby sa znížil vplyv tejto hranice. Softvér pochádza z knižnice metód "Direct Current Finite Element Method Library", alebo skrátene DCFEMLib (Rucker et al., 2007), ktorý je založený na programovacom jazyku C ++. Časom, počas ďalšieho vývoja softwaru bola táto knižnica čiastočne nahradená knižnicou "Generalized Inversion and Modeling Library" založenou na programovacom jazyku Python (Rücker et al., 2017) alebo skrátene pyGIMLi.

Použitá inverzná schéma je všeobecne založená na Gauss-Newtonovej inverzii. Priame modelovanie, ktoré je tiež súčasťou inverzného procesu sa vykonáva pomocou diskretizácie FE metódy (Günther et al., 2006).

BERT používa neštruktúrovanú štvorbokú sieť. Oproti štruktúrovanej sieti má tú výhodu, že sieťové spojenia efektívnejšie popíšu geometriu modelovaného prostredia. Na generovanie sietí používa BERT softvér TetGen (Si, 2003).

BERT je open-source kód pre analýzu údajov ERT, ktorý je mimoriadne flexibilný, pokiaľ ide o kontrolu inverzie a podkladovej geometrie modelovaného prostredia.(<u>https://www.researchgate.net/publication/235978635_Boundless_Electric</u> <u>al_Resistivity_Tomography_BERT_v_20_Open_Access_Software_for_Advanced_an_d_Flexible_Imaging</u>).



Obr. 5.6 Príklad zobrazenia inverzie v programe BERT (https://www.researchgate.net/project/BERT-Boundless-Electrical-Resistivity-Tomography/figures)

5.8 **TS2DIP**

TS2DIP je modelovací program (obr. 5.7) od americkej firmy Zonge Engineering and Research Organization, Inc. pracujúci v prostredí Windows. Inverzia hladkého modelu je metóda pre konvertovanie odporových meraní a meraní indukovanej polarizácie do hladkého premenlivého modelu priečnych rezov. Program spracováva dáta z usporiadaní dipól-dipól alebo pól-dipól formátov Zonge, Geosoft alebo tabuľkových formátov. Použitá môže byť časová a frekvenčná oblasť dát z profilov o dĺžke 200 dipólov s rozpätím medzi 0,25 až 100. Namerané zdanlivé odpory sú spriemerované pre inicializáciu odporového modelu, zatiaľ čo modelové hodnoty indukovanej polarizácie sú nastavené na hodnotu 1. Interaktívne pomôcky umožňujú editovanie modelu pre zahrnutie známej geológie do modelu. Hodnoty rezistivity a indukovanej polarizácie v reze 2D modelu sú v procese inverzie opakovane modifikované až kým vypočítané hodnoty dát nie sú dostatočne zhodné s nameranými, s ohľadom na vyhladenosť modelu. Algoritmus priameho modelovania použitý v programe počíta zdanlivý odpor a hodnoty fázy vytváraných 2D modelov s presnosťou okolo 5%. Keď sú do vytvárania modelu zahrnuté i topografické informácie o profile, sieť elementov pre výpočet sa upraví podľa terénu. Výsledky inverzie možno exportovať ako tabuľkové ASCII súbory, ktoré sa dajú zobraziť v bežne používaných interpretačných a vizualizačných softvéroch, napr. od spoločností Geosoft a Golden Software (www.zonge.com).



Obr. 5.7 Príklad zobrazenia inverzie v programe TS2DIP (www.zonge.com)

5.9 RES2DINV

RES2DINV (obr. 5.8) je inverzný program od firmy Geotomo Software z Malajzie pre operačný systém Windows. Je vhodný pre povrchové prieskumy, vrtné prieskumy a prieskumy podzemnej vody. Pracuje s usporiadaniami Wenner (alfa, beta, gama), Wenner-Schlumberger, pól-pól, pól-dipól, dipól-dipól, gradient ako aj s nekonvenčnými typmi usporiadaní. Na vytvorenie 2D modelu, pri hladkej a ostro kontrastnej inverzii, využíva presnú alebo približnú optimalizačnú metódu najmenších štvorcov. Program bol optimalizovaný pre inverziu veľkého počtu dát (pri použití až 16000 elektród a 21000 registračných bodov). Obsahuje štyri rozdielne techniky pre topografické modelovanie. Ponúka rôzne varianty metódy najmenších štvorcov: rýchla kvázi-Newtonova metóda, pomalšia ale viac presná Gauss-Newtonova metóda a mierne rýchla hybridná technika, ktorá spája výhody kvázi-Newtonovej a Gauss-

Newtonovej metódy. Vyhladzovací filter môže byť upravený na zvýraznenie odporových rozdielov vo vertikálnom alebo horizontálnom smere. Funkcie inverzie tiež umožňujú redukciu šumu v dátach. Medzi podmienky pre inverzný proces je tiež možné zahrnúť informácie o odpore z vrtov či iných zdrojov (<u>www.geoelectrical.com</u>).



Obr. 5.8 Príklad zobrazenia inverzie v programe RES2DINV (www.geoelectrical.com)

5.10 RES2DMOD

RES2DMOD (obr. 5.9) je voľne prístupný 2D program pre priame modelovanie od firmy Geotomo Software z Malajzie, ktorý počíta zdanlivý odpor pseudoprofilov pre užívateľom definovaný 2D model prostredia. Je určený hlavne pre vysokoškolských študentov, aby sa oboznámili s využitím 2D elektrických vizualizačných metód. Môže tiež napomáhať užívateľom pri voľbe vhodných usporiadaní pre rôzne geologické situácie alebo prieskumy. Usporiadania podporované v tomto programe sú Wenner (alfa, beta, gamma), pól-pól, pól-dipól, dipól-dipól a gradient. Možno použiť model s maximálnym počtom 151 elektród (s dvomi uzlami na jednotku elektródovej vzdialenosti) alebo 75 elektród (so štyrmi uzlami na jednotku elektródovej vzdialenosti). Hodnoty zdanlivého odporu sú počítané metódou konečných prvkov alebo konečných diferencií (Loke, 2019).



Obr. 5.9 Príklad zobrazenia inverzie v programe RES2DMOD (Loke, 2019)

5.11 Workbench ERT & IP modules

Workbench ERT & IP modules (obr. 5.10) je modul programu Aarhus Geosoftware. Je to všestranný systém s pomôckami pre spracovanie a s početnými možnosťami inverzie pre geoelektrické odporové dáta. Integrovaná GIS-mapa ako časť modulu umožňuje mapové zobrazenie elektród alebo sondovacích pozícií aj s topografiou terénu. Plne podporuje asymetrické usporiadania ako gradient alebo dipóldipól. V oblasti spracovania dát umožňuje program zablokovať alebo odblokovať chybné dáta a odstrániť alebo pridať šum do dát. Modul inverzie umožňuje 1D bočne obmedzenú inverziu sondovaní pomocou hladkých modelov alebo vrstevných modelov s niekoľkými výraznými rozhraniami a tiež 2D hladkú inverziu pomocou často používaného programu RES2DINV. Modul má štandardne zabudované rozhranie programu RES2DINV s ľahkým prístupom k najpoužívanejším pomôckam. RES2DINV beží v pozadí a výsledky sú opätovne načítané do programu Aarhus Workbench s prístupom k všetkým možným vizualizačným tvarom. (https://www.aarhusgeosoftware.dk/workbench-ert-ip-module).



Obr. 5.10 Príklad zobrazenia inverzie v programe Workbench ERT & IP modules (<u>https://www.aarhusgeosoftware.dk/workbench-ert-ip-module</u>)

6 Práca v programoch RES2DMOD a Res2DINV

Nasledujúce kapitoly boli spracované podľa Loke (2019) a opisujú pracovné prostredie modelovacieho softvéru RES2DMOD a programu na interpretáciu ERT meraní Res2DINV.

6.1 Program RES2DMOD

RES2DMOD je voľne prístupný program pre priame 2D modelovanie, ktorý počíta pseudorez zdanlivej rezistivity pre užívateľom definovaný 2D model horninového prostredia. Je určený hlavne pre výuku študentov o používaní metód 2D elektrickej tomografie. V programe namodelované odozvy potenciálového poľa tiež môžu pomôcť užívateľovi pri výbere správneho elektródového usporiadania pre rôzne geologické situácie, ako aj pri zvažovaní rôznych faktorov prieskumu (cena prieskumu, hĺbka dosahu, kvalita rozlíšenia atď.). Program podporuje usporiadania Wenner (alfa, beta a gamma modifikácia), pól-pól, gradient, líniový dipól-dipól, pól-dipól a priečny dipól-dipól (Edwards, 1977). Rozmiestnenie elektród pre rôzne usporiadania znázorňuje obrázok 6.1. Každý typ usporiadania má svoje výhody aj nevýhody. Na vytvorenie odozvy namodelovaného prostredia je možné použiť usporiadanie s maximálmym počtom elektród 151 (s 2 uzlami na jednotku elektródovej vzdialenosti). Tento limit je podmienený rozlíšením displeja počítača.



Obr. 6.1 Rozmiestnenie elektród pre rôzne usporiadania a ich konštanty (Loke, 2019)

Prvým krokom pri práci s programom RES2DMod je príprava vstupného modelu prostredia, ktorý sa použitím pravouhlej siete rozdelí do určitého počtu blokov. Pravouhlá sieť pozostáva z N uzlov v horizontálnom smere a M uzlov vo vertikálnom smere (obr. 6.2). Na uzloch siete sa potenciál určuje metódou konečných diferencií.



Obr. 6.2 Rozdelenie prostredia na bloky pomocou pravouhlej siete (Loke, 2019)

Rozdelenie modelu má N-1 blokov v riadku a M-1 blokov v stĺpci a každý blok môže mať rôznu hodnotu odporu. Pomocou vstupného dátového súboru sa do programu zadajú hodnoty odporu pravouhlých blokov medzi líniami siete (a ďalšie informácie). Použitím dostatočne hustej siete môžu byť modelované komplexné geologické štruktúry. Využíva sa sieť s dvomi alebo štyrmi uzlami na jednotku elektródovej vzdialenosti. Prvá elektróda sa umiestňuje na 12. horizontálnom uzle od okraja siete modelu a podobne je to aj na opačnom okraji. V tabuľka 6.1 je rozloženie línií siete pre základný model použitý v programe, s elektródovou vzdialenosťou 1m (tabuľka udáva vertikálnu hĺbku línií a horizontálny odstup línií). Je však možné zvoliť si aj vlastnú hĺbku línii siete. Dostatočnú presnosť výsledku by malo zabezpečiť zadanie menších vertikálnych rozostupov gridových línií pri povrchu modelu a väčšie rozostupy v hĺbke. Vertikálna vzdialenosť medzi prvými troma líniami siete by nemala byť väčšia ako horizontálna vzdialenosť medzi vertikálnymi líniami siete.

	Horizontal	Node		Vertical	Node
Index	Location	Spacing	Index	Depth	Spacing
i	xi	dxi	j	zj	dzj
1	0.00	64.0	1	0.25	0.25
2	64.00	32.0	2	0.50	0.25
3	96.00	16.0	3	0.75	0.25
4	112.00	8.0	4	1.00	0.25
5	120.00	4.0	5	1.55	0.55
6	124.00	2.0	6	2.16	0.61
7	126.00	1.0	7	2.82	0.67
8	127.00	0.50	8	3.55	0.73
9	127.50	0.50	9	4.36	0.81
10	127.75	0.25	10	5.24	0.89
11	128.00	0.25	11	7.02	1.77
12	128.25	0.25	12	10.56	3.54
13	128.50	0.25	13	17.64	7.09
14	128.75	0.25	14	31.82	14.17
15	129.00	0.25	15	60.16	28.35
16	129.25	0.25	16	116.85	56.69
17	129.50	0.25	17	230.23	113.38

Tabuľka 6.1. Vertikálne a horizontálne polohy línií siete (Loke, 2019)

Vstupný 2D model prostredia je možné zadefinovať v ľubovoľnom textovom editore v nasledovnom formáte :

riadok 1 – meno modelu,

riadok 2 - počet elektród (maximálne 101),

riadok 3 – počet dátových úrovní preudorezu (maximum 32, ale závisí tiež na type usporiadania a počte elektród),

riadok 4 – znak špecifikujúci prostredie merania (pri meraní na povrchu terénu 0, pod vodou 1),

riadok 5 - veľkosť elektródovej vzdialenosti,

riadok 6 – znak udávajúci typ gridového modelu (0 alebo 1 pre programom definované hĺbky línií siete, 2 pre užívateľom definované hĺbky. Pri zadaní 1 je použitá škála hĺbok podľa hĺbkového dosahu použitého elektródového usporiadania),

riadok 7 – odstup prvého bloku v užívateľom definovanom modeli od prvej elektródy. Pre bežné situácie sa zadáva 0,

riadok 8 – počet blokov v užívateľskom modeli. Aby sme sa vyhli problémom treba použiť hodnotu, ktorá bude pokrývať všetky bloky medzi prvou a poslednou elektródou: (počet elektród – 1) * počet uzlov / jednotka elektródovej vzdialenosti,

riadok 9 – počet rozdielnych hodnôt odporov použitých v modeli (maximálne 16),

riadok 10 – počet uzlov na jednotku elektródovej vzdialenosti (2 alebo 4). Hodnotu 4 možno použiť pre maximálne 75 elektród,

riadok 11 - konkrétne hodnoty modelových odporov,

riadok 12 – počet riadkov pravouhlých blokov v modeli (maximálne 29). Netreba zabudnúť, že počet horizontálnych línií siete je rovný počtu riadkov blokov plus jedna,

riadok 13 – hĺbka horizontálnej línie siete gridu,

riadok 14-27 – hodnoty odporu v blokoch modelu, zadané riadok po riadku. Hodnota 0 znamená blok s prvou hodnotou odporu, 1 pre druhú hodnotu, atď. Pre 11-16 hodnotu je nutné použiť písmená A až F,

riadok 28 – typ usporiadania. 1 pre Wenner alfa, 2 pre pól-pól, 3 pre dipól-dipól, 4 pre Wenner beta, 5 pre Wenner gamma, 6 pre líniový pól-dipól, 7 pre Wenner-Schlumberger a 8 pre priečny dipól-dipól. Pre priečny dipól-dipól je nutné zadať vzdialenosť medzi prúdovými elektródami,

riadok 29 a 30 – zadať nuly. Je to návesť pre vypočítané hodnoty zdanlivého odporu a napätia, ktoré sú používané ako výstupný dátový súbor z tohto programu,

riadok 31, 32 a 33 – zadať nuly. Je to rezervované miesto pre nové možnosti ďalších verzií programu,

Vytvorený model je potrebné uložiť ako súbor s príponou *.MOD. Nastavenie a úprava parametrov modelu, jeho načítanie do RES2DMOD ako i vlastný výpočet zdanlivého odporu, sa realizuje prostredníctvom záložiek hlavnej ponuky programu (vid. kap. 6.1.1 až 6.1.4).

6.1.1 Operácie so súbormi (File)

Záložka "Operácie so súbormi (File)" (obr.6.3) umožňuje: načítanie súboru s modelom (Read file with forward model), uloženie výsledku vo formáte RES2DMOD (Save results in RES2DMOD format) a uloženie výsledku vo formáte RES2DINV (Save results in RES2DINV format).



Obr. 6.3 Zobrazenie možných operácií so súborom (Loke, 2019)
Načítanie súboru so vstupným modelom (Read file with forward model)

Vstupný dátový súbor modelu sa do programu RES2DMOD načítava prostredníctvom možnosti "Read file with forward model" (obr. 6.3). Zobrazí sa aktuálna zložka so súbormi vstupných modelov s príponou *.MOD.

Jedným z hlavných problémov, ktoré sa vyskytujú pri používaní tohto programu, sú chyby vo vstupnom dátovom súbore.

Uloženie výsledku vo formáte RES2DMOD (Save results in RES2DMOD format)

Hodnoty zdanlivého odporu modelu sa do súboru s formátom, ktorý využíva program RES2DMOD, ukladajú prostredníctvom možnosti "Save result in RES2DMOD format" (obr. 6.3). Opätovným načítaním takto uloženého súboru je možné zobraziť hodnoty zdanlivého odporu bez prepočítania napätia.

Uloženie výsledku vo formáte RES2DINV (Save results in RES2DINV format)

Táto možnosť umožňuje uloženie hodnôt zdanlivej rezistivity do súboru vo formáte, ktorý používa program RES2DINV, avšak už sa nedá opätovne otvoriť v programe RES2DMOD.

6.1.2 Editovanie a zobrazovanie modelov (Edit)

Záložka "Edit" (obr. 6.4) umožňuje interaktívne, pomocou myši alebo klávesnice, meniť rezistivitu blokov v modeli.

R	ES2D	MOD ve	er. 3.00s				
<u>F</u> ile	<u>E</u> dit	<u>Options</u>	Model computation	Print	<u>H</u> elp	Quit	
		dit model jisplay mo hange <u>a</u> rr	del ay type				
	± ⊻	torizontal p ertical disp	plotting scale play scaling factor				
	E	estore de	fault colours				

Obr. 6.4 Zobrazenie možností pre editovanie a zobrazovanie modelov (Loke, 2019)

Zobrazia sa pravouhlé bloky a grid konečných diferencií spolu s pseudorezom zdanlivej rezistivity. Zmenu rezistivity jedného bloku realizujeme použitím klévesy "+" alebo kurzorom myši. Nastavíme kurzor na blok a pravým tlačidlom myši ho označíme, zmení sa jeho farba na bielu. Potom ľavým tlačidlom myši vyberieme novú hodnotu rezistivity zo zobrazenej legendy, ktorá je nad modelom. Ľavým tlačidlom myši je možné označiť niekoľko blokov naraz. Tiež je možné použiť nasledovné klávesy :

Klávesa "D" – označí stĺpec blokov pod kurzorom
Klávesa "[" – označí riadok blokov naľavo od kurzora
Klávesa "]" – označí riadok blokov napravo od kurzora
Klávesa "{" – označí všetky bloky naľavo a pod kurzorom
Klávesa "}" – označí všetky bloky napravo a pod kurzorom

Po editovaní modelu je nutné ho opätovne prepočítať v položke "Model Computation" v hlavnom menu. Následne je možné si ho opäť pozrieť v položke "Edit/Display". Obr. 6.5 znázorňuje príklad modelu s pseudorezom zdanlivej rezistivity.



Obr. 6.5 Zobrazenie blokov modelu s pseudorezom zdanlivej rezistivity (Loke, 2019)

Zobrazenie modelu (Display model)

Položka "Display model" (obr. 6.4) zobrazí model bez línií gridu spolu s pseudorezom zdanlivej rezistivity.

Zmena typu usporiadania (Change array type)

Položka "Change array type" (obr. 6.4) umožňuje zmenu elektródového usporiadania, ako aj zmenu parametra "a" a hodnoty "n" (pre usporiadania pól-dipól, dipól-dipól a Wenner-Schlumberger). Zmena usporiadania a parametrov usporiadania sa najčastejšie využíva pre výber vhodného elektródového usporiadania.

Mierka horizontálneho zobrazenia (Horizontal plotting scale)

Prostredníctvom položky "Horizontal plotting scale" je možné meniť horizontálnu mierku (počet pixelov na jednotku elektródovej vzdialenosti). Táto možnosť má využitie hlavne pri zobrazovaní výsledkov z viacerých profilov s rôznym počtom elektród. Umožňuje zobraziť takéto profily v rovnakej mierke.

Faktor mierky vertikálneho zobrazenia (Vertical display scaling factor)

Položka "Vertical display scaling factor" (obr. 6.4) umožňuje špecifikovať pomer vertikálnej a horizontálnej mierky, t.j. faktor vertikálneho zväčšenia. Bežne sa používajú hodnoty 2.0, 1.5 a 1.0. Pri zadaní hodnoty 0.0, program použije prednastavený faktor mierky taký, že zobrazenie bude v rámci veľkosti displeja.

6.1.3 Nastavenia (Options)

Záložka "Nastavenia (Options)" (obr.6.6) ponúka dve možnosti: Normalizácia zdanlivej rezistivity (Apparent Resistivity Normalisation) a Metóda konečných prvkov alebo konečných diferencií (Finite-Element or Finite-Difference Method).



Obr. 6.6 Zobrazenie položiek pre nastavenia (Loke, 2019).

Normalizácia zdanlivej rezistivity (Apparent Resistivity Normalisation)

Pri výbere tejto možnosti (obr.6.6) program najprv vypočíta hodnoty napätí pre homogénne prostredie modelu. Tieto hodnoty sú potom použité ako korekčné faktory napätí vstupného modelu. Vo väčšine prípadov to mierne zvýši presnosť vypočítaných hodnôt zdanlivej rezistivity.

Metóda konečných prvkov alebo konečných diferencií (Finite-Element or Finite-Difference Method)

Výberom tejto položky (obr. 6.6) je možné zvoliť metódu konečných prvkov (Silvester a Ferrari, 1990) alebo metódu konečných diferencií, ktorá bude použitá pri výpočte hodnôt zdanlivej rezistivity. Pri väčšine modelov nie je veľký rozdiel v hodnotách zdanlivej rezistivity vypočítaných týmito metódami. Niektoré staršie implementácie metódy konečných prvkov však obsahujú zaujímavé chyby, ktorých efekt sa výraznejšie prejaví pri niektorých elektródových usporiadaniach.

6.1.4 Modelový výpočet (Model computaion)

Po vykonaní potrebných nastavení a upravení modelu, sa zvolením záložky "Model computation" spúšťa výpočet hodnôt zdanlivej rezistivity. V súčasnej dobe prebieha výpočet na výkonných PC rýchlo (kratšie ako 1 minúta). Po ukončení výpočtu sa zobrazí vypočítaný odporový rez modelu spolu s modelom, na ktorom bol výpočet realizovaný. Následne je možné výsledok uložiť v požadovanom formáte cez výber v záložke "File" (vid kap. 6.1.2).

6.2 Program RES2DINV

RES2DINV je interpretačný program, ktorý automaticky určuje 2D odporový model pre horninové prostredie z nameraných dát získaných z elektrického odporového prieskumu (Griffiths a Barker, 1993). Pracuje v prostredí OS Windows a s ním kompatibilnými grafickými kartami a tlačiarňami. Bol testovaný na video karte s rozlíšením 1600×1200 bodov so 16 miliónmi farieb.



Sequence of measurements to build up a pseudosection

Obr. 6.7 Postup merania pre vytvorenie pseudorezu použitím multi-elektródového systému (Loke, 2019)

Program bol vytvorený na inverziu veľkých dátových súborov (okolo 200 až 21000 meraní) získaných pomocou usporiadaní s veľkým počtom elektród (25 až 16000 elektród). Obr. 6.7 je príkladom elektródového usporiadania a meracieho postupu, ktorý môže byť použitý pre prieskum elektrickou odporovou tomografiou.

2D model použitý v inverzii, ktorý pozostáva z pravouhlých blokov je znázornený na obr. 6.8. Usporiadanie blokov je viazané na distribúciu bodov merania v pseudoreze. Distribúcia a veľkosť blokov je automaticky generovaná programom. Hĺbka spodnej hrany blokov je približne rovná ekvivalentnej hĺbke prieskumu (Edwards, 1977) závislej na rozpätí elektródového usporiadania. V prieskume sa obvykle využívajú usporiadania s konštantnou vzdialenosťou elektród. Program však umožňuje použitie aj rôznych vzdialeností medzi elektródami.

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS

	*********	******
	××××××××××××	<
	********	*****
	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
×*:	<del>∶**********</del>	******
	××********	*****
	××*****	****
	* * * * *	***

MODEL BLOCK

× DATUM POINT

**Obr. 6.8** Rozloženie blokov použitých v modeli spolu s bodmi merania v pseudoreze (Loke, 2019)

Program využíva pre výpočet hodnôt zdanlivej rezistivity priame modelovanie a pre inverzný výpočet nelineárne optimalizačné techniky (DeGroot-Hedlin and

Constable 1990, Loke and Barker 1996). Pri priamom modelovaní umožňuje použiť metódu konečných diferencií a konečných prvkov. Môže byť použitý pre elektródové usporiadania Wenner, pól-pól, dipól-dipól, pól-dipól, Wenner-Schlumberger a priečny dipól-dipól. Navyše program tiež umožňuje použitie nekonvenčných usporiadaní s takmer neobmedzeným počtom elektródových konfigurácií a umožňuje spracovať aj merania pod vodnou hladinou a vo vrtoch.

Načítanie súboru s nameranými hodnotami zdanlivého odporu do programu RES2DINV, nastavenie parametrov inverzie ako i vlastný výpočet inverzného odporového rezu prostredia, sa realizuje prostredníctvom záložiek hlavnej ponuky programu (vid. kap. 6.2.2 až 6.2.6).

#### 6.2.1 Inverzný výpočet použitý v programe RES2DINV

Inverzný proces využívaný pri interpretácií ERT meraní je popísaný v kap. 4.4. Inverzný výpočet použitý v programe RES2DINV je založený na vyhladenej metóde najmenších štvorcov (smoothness-constrained least-squares method) (DeGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992), ktorá je založená na rovnici:

$$(\mathbf{J}^{\mathsf{T}}\mathbf{J}+\lambda\mathbf{F})\mathbf{d}=\mathbf{J}^{\mathsf{T}}\mathbf{g}$$
(6.1)

 $\mathbf{F} = \mathbf{f}_{\mathbf{X}}\mathbf{f}_{\mathbf{X}}^{\mathsf{T}} + \mathbf{f}_{\mathbf{Z}}\mathbf{f}_{\mathbf{Z}}^{\mathsf{T}}$ 

 $\mathbf{f}_x$  = filter horizontálnej plošnosti

fz = filter vertikálnej plošnosti

J = matica parciálnych derivácií

 $\lambda$  = útlmový faktor

d = model poruchového vektora

**g** = vektor odchýlky

Výhoda tejto metódy je, že útlmový faktor a plošné filtre môžu byť upravené pre rozdielne typy údajov. Detailnejší popis rozdielnych variant tejto metódy možno nájsť v príručke "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys" (Loke,2019).

Program podporuje nové implementácie metód najmenších štvorcov založených na kvázi-Newtonovej optimalizačnej metóde (Loke and Barker 1996). Táto

metóda je oveľa rýchlejšia ako konvenčné metódy najmenších štvorcov pre súbory s veľkým počtom údajov a vyžaduje menej pamäte. Možno však použiť aj konvenčnú Gauss-Neutonovu metódu. Je pomalšia ako kvázi-Newtonova metóda, ale v prostrediach s veľkým odporovým kontrastom, väčším než 10:1, dáva trochu lepšie výsledky. Tretia možnosť, ktorú program ponúka je použitie Gauss-Newtonovej metód pre 1., 2. alebo 3. iteráciu, po ktorej sa použije kvázi-Newtonova metóda. V niektorých prípadoch je to najlepší kompromis (Loke a Dahlin 2002).

2D model použitý v programe rozdeľuje prostredie na pravouhlé bloky (obr. 6.8). Účelom programu je určiť rezistivitu pravouhlých blokov, ktoré budú vytvárať zdanlivú rezistivitu získavanú pri aktuálnom meraní. Pre usporiadania Wenner a Schlumberger je hrúbka prvej vrstvy daná ako polovica elektródovej vzdialenosti. Pre usporiadania pól-pól, dipól-dipól a pól-dipól je jej hrúbka daná ako 0.9, 0.3 a 0.6 elektródovej vzdialenosti. Hrúbka každej nasledujúcej hlbšej vrstvy narastá o 10% (alebo 25%). Hĺbka vrstiev môže byť menená manuálne užívateľom.

Rozdiel medzi vypočítanými a nameranými hodnotami zdanlivej rezistivity modelových blokov sa redukuje optimalizačnou metódou. Zistený rozdiel je udávaný ako efektívna chyba (RMS). Model s najmenšou možnou RMS však môže niekedy zobrazovať veľké a nereálne varianty v modelových hodnotách rezistivity a hlavne nie vždy je to najlepší model pre geologickú interpretáciu. Vo všeobecnosti najvhodnejším prístupom je v voľba modelu z iterácie, pri ktorej sa výrazne nemení RMS. Obvykle sa vyskytuje pri tretej až piatej iterácii.

#### 6.2.2 Operácie s dátovými súbormi a formát dát (File)

Záložka "Operácie so súbormi (File)" (obr.6.9) umožňuje: načítanie dátového súboru (Read data file), korekciu pozície elektród (Round up positions of electrodes), automatické prepnutie elektród (Automatically switch electrodes), orezanie údajov (Cut-off factor to remove data), výpočet chyby z opakovaných meraní (Calculate errors from repeated readings), import údajov (Data Import), transport údajov z formátu RES2DINV do formátu RES3DINV (Collate data into RES3DINV format), zlúčenie údajov do formátu RES2DINV (Concatenate data into RES2DINV format), spojenie 2D súborov meraných v rôznych časoch (Combine 2-D files into a time-lapse file), zmeniť

jednotku vyrovnávacej pamäte (Change buffer drive), uložiť zoradené dáta do nového súboru (Save sorted data after reading in data file) a zápis procesu inverzie (Trace program execution).

File Edi	DINVx64 ver. 4.03.25 t Change Settings	Inversion	Display	Topography	Options	Print	Help
Rea	d data file						
Rou Aut Cut	and up positions of el omatically switch ele -off factor to remove culate errors from rep	ectrodes ctrodes data eated readir	ngs				
Dat	a Import			>			
Col Cor Cor	late data into RES3DI ncatenate data into RE nbine 2-D files into a	IV format S2DINV for time-lapse f	mat file				
Cha Sav Trac	inge buffer drive e sorted data after rea e program execution	ding in data	file				
Exit	program						

Obr. 6.9 Zobrazenie možných operácií so súborom (Loke, 2019)

# Načítanie dátového súboru (Read data file)

Zvolením tejto možnosti (obr.6.9) sa zobrazí zoznam súborov s príponou *.DAT v aktuálnej zložke. Hodnoty zdanlivej rezistivity musia byť najprv zapísané do textového súboru v ľubovoľnom textovom editore, napr. Windows NOTEPAD. Dáta sú vo formáte ASCII, kde je čiarka alebo medzera alebo LF/CR použitá ako oddeľovač rozdielnych numerických dát. Program vyžaduje, aby dáta boli v určenom formáte. Dátový súbor pre usporiadanie dipól-dipól, pól-dipól a Schlumberger majú čiastočne odlišný formát, pretože je potrebný dipólový separačný faktor. Treba mať na pamäti, že program predpokladá, že x-ová pozícia bodov merania je pozdĺž rezu postupná z ľavej strany na pravú stranu. Topografické údaje sú umiestnené hneď za údajmi zdanlivej rezistivity. Prvý riadok indikuje, či súbor obsahuje topografické údaje. Ak tam nie sú, hodnota je 0. Hodnoty 1 a 2 reprezentujú topografické údaje. V prípade ak sú dané aktuálne horizontálne a vertikálne súradnice bodov na profile, treba zadať 1. Pri mnohých prieskumoch je vzdialenosť bodov na povrchu priamo zaznamenaná, ale nie ich horizontálna vzdialenosť. V takom prípade je potrebné pre topografické údaje zadať

hodnotu 2. Ďalej nasleduje počet topografických údajov. Po poslednom topografickom údaji je zadané číslo súradnice prvej elektródy.

Ak sa program zastaví s chybovým hlásením, príčinou môže byť chyba vo vstupnom súbore. Najprv je potrebné skontrolovať, či sú údaje v súbore v správnom formáte. Program sa bude snažiť detekovať bežné chyby, ako napr. nulové alebo záporné hodnoty zdanlivej rezistivity.

# Korekcia pozície elektród (Round up positions of electrodes)

Táto ponuka (obr. 6.9) je určená pre spracovanie údajov z dlhých profilových meraní realizovaných najmä pomocou mobilných meracích systémov, ako je napríklad systém Geometrics OhmMapper, alebo kontinuálne merania na vodných plochách. Mobilné meracie systémy majú pevnú vzdialenosť medzi uzlami elektród na kábli (zvyčajne 2,3, 5 a viac metrov). Kontinuálne merania sa však zvyčajne vykonávajú v nepravidelných intervaloch, v závislosti od rýchlosti, ktorou je multi-elektródový kábel ťahaný. Rozstup medzi po sebe nasledujúcimi meraniami nemá pevnú hodnotu a závisí od rýchlosti pohybu meracieho systému. Čím je rýchlosť väčšia, tým sú rozostupy medzi meraniami väčšie. Pozície meraní sa zvyčajne merajú pomocou GPS systému. Na základe skúsenosti merania s mobilným systémom na vodnej hladine doporučujeme rýchlosť pohybu cca 3km/h.

# Automatické prepnutie elektród (Automatically switch electrodes)

Umožňuje používateľovi automaticky prepínať polohy elektród C1 a C2 pre elektródové usporiadanie dipól-dipól uvedené vo všeobecnom formáte C2-C1-P2-P1. Výber možnosti umožňuje automaticky prepínať elektródy" zamení polohy elektród C1 a C2 tak, aby konfigurácie poľa mali pozitívny geometrický faktor.

# Orezanie údajov (Cut-off factor to remove data)

Táto ponuka (obr. 6.9) sa používa na filtrovanie údajov s veľmi vysokými geometrickým faktorom a s nízkym potenciálom, ktoré sú pravdepodobne zašumené.

# <u>Výpočet chyby merania pri opakovaných meraniach (Calculate errors</u> from repeated readings)

Táto voľba slúži na výpočet odhadu chyby merania pri opakovaných alebo recipročných meraní.

#### Import údajov (Data Import)

"Import údajov" (obr. 6.9) slúži na načítanie súboru nameraných údajov z rôznych prístrojov a prevod týchto údajov do formátu používaného v RES2DINVx64.

# <u>Transport údajov z formátu RES2DINV do formátu RES3DINV (Collate data</u> into RES3DINV format)

Táto ponuka (obr. 6.9) umožňuje používateľovi transformovať 2D paralelné profily s údajmi vo formáte RES2DINV do jedného dátového súboru vo formáte používanom programom RES3DINV.

# Zlúčenie údajov do formátu RES2DINV (Concatenate data into RES2DINV format)

Táto ponuka (obr. 6.9) umožňuje používateľovi spojiť niekoľko samostatných meraní, ktoré boli postupne merané v jednej línii do jedného súboru RES2DINV.

# Spojenie 2D súborov meraných v rôznych časoch (Combine 2-D files into a time-lapse file)

Táto ponuka (obr. 6.9) umožňuje spojiť 2D merania realizované na tom istom profile s rovnakou konfiguráciou merania ale v inom čase. V takto pripravenom súbore dokáže program vypočítať odporové zmeny v závislosti na čase merania.

#### Zmeniť jednotku vyrovnávacej pamäte (Change buffer drive)

Program automaticky vyberie jednotku pevného disku s najväčším množstvom voľného miesta ako jednotku vyrovnávacej pamäte na ukladanie dočasných súborov použitých v inverznom výpočte. Táto možnosť umožňuje používateľovi zmeniť vyrovnávaciu jednotku, napríklad použiť rýchlejšiu jednotku SSD.

# Uložiť zoradené dáta do nového súboru (Save sorted data after reading in data file)

Základné triedenie údajov je na základe hĺbky. Program umožňuje údaje roztriediť a uložiť v novom formáte na základe použitých hodnôt "a" a "n".

### Zápis procesu inverzie (Trace program execution)

Ak je táto možnosť povolená, program počas procesu inverzie ukladá informácie do súboru R2DTRACEX64.TXT. Používa sa hlavne na sledovanie problémov v programe.

# 6.2.3 Editovanie dát (Edit)

Záložka "Editovanie dát (Edit)" (obr.6.10) má v ponuke: odstránenie chybných údajov (Exterminate bad datum points), výrez z veľkých dátových súborov (Splice large data sets), orezanie veľkých dátových súborov (Trim large data set), otočenie pseudorezu (Reverse pseudosection) a zmena umiestnenie prvej elektródy (Change location of first electrode).



Obr. 6.10 Zobrazenie možností pre editovanie a zobrazovanie vstupných údajov (Loke, 2019)

#### Odstránenie chybných údajov (Exterminate bad datum points)

V tejto ponuke sa zobrazia hodnoty zdanlivej rezistivity vo forme profilov pre každú hĺbkovú úroveň. Hlavným účelom tejto voľby je odstránenie údajov, ktorých hodnota rezistivity je určite chybná. Príčinou takýchto extrémnych hodnôt môže byť zlyhanie relé na elektróde, zlý kontakt s prostredím v dôsledku nízkeho obsahu solí,

alebo zníženie prechádzajúceho prúdu cez kábel v dôsledku veľmi vlhkého prostredia. Majú obvykle príliš veľkú alebo nízku hodnotu zdanlivej rezistivity v porovnaní s okolitými hodnotami. Chybné hodnoty je najvýhodnejšie manuálne odstrániť, aby neovplyvňovali získaný model. Obr. 6.11 znázorňuje namerané údaje s niekoľkými zlými bodmi. Tie možno odstrániť kliknutím, čím sa zmení ich farba na červenú.



+Measured data +Removed data Obr. 6.11 Príklad dátového súboru s chybnými údajmi (Loke, 2019)

#### Výrez z veľkých dátových súborov (Splice large data sets)

Táto ponuka umožňuje vybrať časť z celého súboru dát (príliš veľký na spracovanie v krátkom čase) na inverziu. Vybrané údaje budú označené červenými krížikmi alebo bodkami, zatiaľ čo zvyšné ostanú čierne. V hornej časti obrazovky budú označené žltými čiarami pravé a ľavé ohraničenia vybratej časti. Ak súbor obsahuje príliš veľa údajov v spodných častiach, je možné redukovať počet údajov selektovaním len párnych alebo nepárnych údajov v každej línii. To je možné vykonať posunom žltej horizontálnej čiary. Stlačením "D" sa odstránia údaje na danej úrovni. Program umožňuje načítať súbor obsahujúci 15000 elektród. Celý dátový súbor môže byť invertovaný postupnou inverziou jednotlivých častí. Všeobecne sa odporúča skúsiť invertovať celý dátový súbor naraz.

# Orezanie veľkých dátových súborov (Trim large data set)

Táto pomuka je podobná ako predchádzajúca možnosť, s výnimkou dialógového okna na nastavenie ľavej a pravej hranice (a hornej a dolnej hranice pre pseudohĺbku)

#### Otočenie pseudorezu (Reverse pseudosection)

Táto voľba preklopí pseudorez v horizontálnom smere zľava doprava. To môže byť užitočné v prípade paralelných profiloch, keď meranie začínalo na opačných koncoch.

# Zmena umiestnenia prvej elektródy (Change location of first electrode)

Umožňuje zmeniť pozíciu prvej elektródy na profile.

### 6.2.4 Zmena programových nastavení

Záložka "Zmena programových nastavení (Change Settings)" (obr.6.12) má v ponuke: nastavenia pre útlmové parametre inverzie (Inversion Damping Parameters), nastavenie parametrov priameho modelovania (Forward modeling method settings), nastavenia priebehu inverzie (Inversion Progress Settings), výber zobrazenia dát (Data/Display Selection), uloženie parametrov inverzie (Save inversion parameters) a načítanie parametrov inverzie (Read inversion parameters).

Edit	Change Settings Inversion Display	Topography	Options Print Help
	Inversion Damping Parameters	>	Damping factors
	Forward modeling method settings Automatically adjust mesh grid size		Change of damping factor with depth Limit range of model resistivity
	Inversion Progress Settings	>	Reduce variations near borehole
	Data/Display Selection	>	Use sensitivity values to damp variations near boreholes
	Save inversion parameters Read inversion parameters		Use Active Constraint Balancing Use Diagonal Filter Use L-Curve method to select damping factor
			Limit range of data weights

Obr. 6.12 Zobrazenie položiek pre zmenu nastavení (Loke, 2019)

#### <u>Útlmové parametre inverzie (Inversion Damping Parameters)</u>

<u>Útlmové faktory (Damping factors)</u>. V tejto voľbe (obr. 6.12) je možné zadať iniciálnu hodnotu útlmového faktora v rovnici (6.1), ako aj jeho minimálnu hodnotu. Ak dáta obsahujú veľký podiel šumu, je vhodné použiť relatívne veľký útlmový faktor (napr. 0.3). Ak dáta obsahujú nízky šum, treba použiť nižší útlmový faktor (napr. 0.1). Inverzný proces bude generálne redukovať útlmový faktor v rovnici (6.1) po každej iterácii. Avšak musí byť zadaný minimálny útlmový faktor pre stabilitu inverzného procesu. Minimálna hodnota by mala byť zvyčajne jedna pätina hodnoty iniciálneho útlmového faktora.

Zmena útlmového faktora s hĺbkou (Change of damping factor with depth). Pretože rozlišovacia schopnosť odporových metód klesá exponenciálne s hĺbkou, útlmový faktor použitý v inverznej metóde najmenších štvorcov tiež narastá s každou hĺbkovou vrstvou. Zvyčajne sa útlmový faktor zväčšuje 1.05 krát s každou hlbšou vrstvou, ale je to možné meniť. Je vhodné použiť vyššiu hodnotu útlmového faktora ak model zobrazuje neprirodzené oscilácie. Tiež je možné zadať voľbu automatického určenia hodnoty zvyšujúcej útlmový faktor s hĺbkou programom. To môže byť dobrá voľba, ak hrúbka vrstiev je omnoho menšia ako štandardne, napr. ak zredukujeme elektródovú vzdialenosť v pôvodných dátach na polovicu a vytvárame model s menšími blokmi.

<u>Optimalizovať útlmový faktor (Optimise damping factor).</u> Pri výbere tejto voľby (obr. 6.12) sa bude program pokúšať nájsť optimálny útlmový faktor λ v rovnici (6.1), ktorý bude produkovať nižšiu RMS v každej iterácii. Využitím optimalizovaného útlmového faktora bude výrazne redukovaný počet iterácii. Avšak čas potrebný pre iteráciu sa zvýši. Pre malé a stredne veľké dátové súbory, môže táto voľba výrazne redukovať celkový čas potrebný na inverziu dát. Pre veľké dátové súbory, s viac ako 1000 údajmi, čas potrebný na každú iteráciu môže byť výrazne vyšší, kvôli výpočtu viacerých rovníc pre každú iteráciu. Použitie tejto voľby prináša model s nižšou RMS chybou, ale nie vždy to je najlepší model, hlavne pri dátach s vysokým podielom šumu. Prakticky je zlepšenie výsledku optimálnym útlmovým faktorom pre väčšinu dát vcelku malé.

### Hraničné podmienky pre odporový model (Limit range of model resistivity).

Táto voľba umožňuje určiť ohraničenie hodnôt odporového modelu, ktoré vytvorí inverzia. Dialogové okno tejto voľby je znázornené na obrázku 6.13. Ponúka možnosť nastaviť odporové ohraničenie modelu. Zadanie limitných podmienok zabráni tvorbe extrémne malých alebo veľkých modelových hodnôt, ktoré nie sú reálne. Užívateľ si tu tiež môže vybrať možnosť použitia ohraničenia získaného z prvej iterácie ako referenčného modelu.

Limit range of model resistivity values	
You can choose to limit the upper ar inversion model can take. In some c model resistivity values do not becc	nd lower values of the resistivity values of cases, this might be necessary to ensure ome too large or too small.
Do not limit resistivity values     Enter upper limit factor     50.0	C Limit range of resistivity values Enter lower limit factor 0.020
Use average resistivity     OK	C Use first iteration resistivity

Obr. 6.13 Zobrazenie okna pre limity vstupného modelu (Loke, 2019).

# Nastavenie parametrov priameho modelovania (Forward modeling method settings)

Umožňuje nastaviť hustotu siete pre priame a výber metódy priameho modelovania (obr. 6.14)

Forward modeling method settings
Horizontal mesh size
You can choose to have either 2 or 4 nodes between adjacent electrodes. calculated apparent resistivity values will be more accurate with 4 nodes, program will be slower and you must have sufficient free memory. If you finer or finest mesh option below, it is recommended that that you choose nodes option (unless the model refinement option is used). C Choose 2 nodes © Choose 4 nodes
⊢Vertical mesh size
This option sets the mesh size if the vertical direction. Choosing a finer give more accurate calculated apparent resistivity values, but it requires more computer time and memory. It is recomended that you use the normal if the resistivity contrasts are less than 50 to 1. For resistivity contrasts of about 500 to 1, using a finer mesh can improve the inversion results. For of over 500 to 1, try the finest mesh if you have sufficient computer
Type of forward modelling method You can choose to use the finite-difference or finite-element method for the modeling calculations. The finite-element method is always used for data topography or cross-borehole measurements.
OK Cancel

Obr. 6.14 Zobrazenie okna pre parametre priameho modelovania (Loke, 2019)

#### Hustota siete v horizontálnom smere (Horizontal mesh size)

V tejto ponuke sa nastavuje hustota rozdelenia modelu pre priame modelovanie v horizontálnom smere (obr. 6.14). Na výber sú 2 alebo 4 uzlové body medzi susednými elektródami. So 4 bodmi na elektródovú vzdialenosť budú hodnoty

zdanlivého odporu presnejšie (čiastočne pre väčší odporový kontrast). Štandardne program používa 2 uzlové body ak dáta obsahujú viac ako 90 elektród.

### Hustota siete vo vertikálnom smere (Verticall mesh size)

Táto ponuka (obr. 6.14) umožňuje pre obidve metódy priameho modelovania nastaviť hustejšiu sieť bodov vo vertikálnom smere. Pri zvolení detailneišieho delenia budú pri oboch metódach hodnoty zdanlivej rezistivity presnejšie, ale výpočet vyžaduje dlhší čas a viac pamäte. Použitie jemnejšej siete, poskytuje lepšie výsledky v prípadoch, kde sa očakáva odporový kontrast väčší ako 20:1. Využíva sa to hlavne v oblastiach kde vrstvy s nižšou rezistivitou ležia pod vrstvami s vyššou rezistivitou.

### Vyber metódy pre priame modelovenie (Type of forward modeling method)

Program umožňuje na výpočet hodnôt zdanlivého odporu použiť metódu konečných diferencií alebo metódu konečných (obr. 6.14). Štandardne program používa metódu konečných diferencií, ktorá je rýchlejšia, ak dátový súbor neobsahuje topografické údaje. Ak súbor obsahuje aj topografiu, štandardne sa použije metóda konečných prvkov.

# Automatické nastavenie veľkosti gridu (Automatically adjust mesh grid size)

Umožňuje povoliť alebo zakázať automatické nastavenie veľkosti siete gridu (obr. 6.15).

Automatically adjust grid size
This option enables the program to automatically adjust the size used by the finite-difference and finite-element programs it reads in a data file so as to optimize the calculation time. If
it reads in a data me so as to optimize the calculation time. If
you prefer to use a fixed mesh configuration, select the option
disable this setting.
C Disable automatic grid si: • Enable automatic grid siz
OK Cancel

Obr. 6.15 Zobrazenie okna pre nastavenie veľkosti gridu (Loke, 2019)

# Nastavenia priebehu inverzie (Inversion Progress Settings)

Táto ponuka umožňuje nastaviť priebeh inverzie (obr. 6.16).



**Obr. 6.16** Zobrazenie položiek pre zmenu inverzných parametrov (Loke, 2019)

#### Nastavenie vyhladzovacej krivky (Line Search local optimatization)

Inverzný výpočet určuje zmeny v modelových parametroch pri riešení rovnice (6.1). Zmena parametra **d** bude mať za následok model s nižšou RMS chybou. V prípade, že RMS chyba rastie, sú dve možnosti. Jedna možnosť je vyhľadať krivku, na zistenie optimálnej veľkosti kroku pre zmenu rezistivity modelových blokov, použitím kvadratickej interpolácie v prvej iterácií. Program sa bude pokúšať redukovať RMS chybu, ale môže uviaznuť v lokálnom minime. Alternatíva je ignorovať zväčšovanie RMS chyby a dúfať, že ďalšia iterácia bude viesť v menšej RMS chybe, čo by mohlo umožniť "vyskočit" z lokálneho minima. Tiež to ale môže viesť k ďalšiemu zväčšeniu RMS chyby. Druhá alternatíva je vyhľadať krivku po každej iterácii. To obvykle dáva optimálnu veľkosť kroku na zmenu rezistivity modelových blokov, ale bude si to vyžadovať najmenej jeden priamy výpočet na iteráciu. V niektorých prípadoch môžu byť jednotlivé priame výpočty užitočné, ak je v akceptovateľnej miere redukovaný počet iterácií potrebných pre zníženie RMS chyby.

# Limit konvergencie (Convergence limit)

Stanovuje percentuálnu RMS chybu v inverzii dát zdanlivej rezistivity, pričom si môžeme vybrať z dvoch možnosti. Prvá možnosť umožňuje zmenu v RMS chybe medzi dvoma iteráciami. Štandardne sa používa hodnota 5%. Druhá možnosť umožňuje nastaviť hodnotu RMS chyby, kedy bude výpočet zastavený. Po vytvorení modelu s menšou RMS chybou ako nastavený limit, výpočet sa ukončí. Bežne môže byť použitá hodnota medzi 12% a 5%, v závislosti na kvalite údajov.

# Počet iterácií (Number of iterations)

Táto voľba umožňuje používateľovi zadať maximálny počet iterácií pre inverzný výpočet. Štandardne je nastavených 5 iterácií. Pre veľké dátové súbory je to postačujúce. Obvykle nie je potrebné použiť viac ako 10 iterácií.

# Kontrola hodnoty odporu modelu (Model resistivity values check)

Program zobrazí varovanie, ak po iterácii inverzie súboru údajov bude hodnota modelového odporu príliš veľká (viac ako 20-násobok maximálnej hodnoty zdanlivého odporu) alebo príliš malá (menej ako 1/20 minimálnej hodnoty zdanlivého odporu)

# Výber zobrazenia dát (Data/Display Selection)

# Možnosti pre interval kontúr (Option for contour interval)

Štandardne program používa pre vykreslenie pseudorezov a modelových rezov logaritmický interval kontúr. To je obvykle najlepšia voľba pre väčšinu dát. Je však možné použiť lineárnu alebo užívateľom definovanú škálu (obr. 6.17).



**Obr. 6.17** Zobrazenie položiek pre nastavenie zobrazenia dát (Loke, 2019)

# Uložiť parametre inverzie (Save inversion parameters)

Výberom tejto voľby sa parametre inverzie uložia do súboru s préponou IVP.

# Načítať parametre inverzie (Read inversion parameters)

Táto ponuka načíta parametre uložené v súbore s príponou IVP a použije ich pri inverznom výpočte v programe RES2DINV.

# 6.2.5 Možnosti inverzie (Inversion)

Záložka "Inverzia (Inversion)" (obr.6.18) má v ponuke: spustenie inverzie (Carry out of inversion), výber a nastavenie inverzných metód (Inversion Methods and Settings) a modelové obmedzenia (Model Discretization). Môžeme tu tiež nastaviť citlivosť modelu (Model sensitivity options), parametre indukovanej polarizácie ( I.P. options) a automatické načítanie a spustenie inverzie viacerých súborov (Batch mode options).



Obr. 6.18 Zobrazenie položiek pre možnosti inverzie (Loke, 2019).

# Spustit' inverziu (Carry out of inversion)

Táto voľba spustí inverzný výpočet metódou najmenších štvorcov. Program si bude od užívateľa žiadať názov pre výstupný dátový súbor, v ktorom budú uložené výsledky a interval kontúr pre pseudorez (ak bol užívateľom zmenený). Inverzný výpočet možno zastaviť stlačením klávesy "Q".

# Inverzné metódy a nastavenia (Inversion Methods and Settings)

Táto ponuka umožňuje výber inverznej metódy a nastavenie jej parametrov (obr. 6.19).

RES2DIN	Wx64 ver. 4.03.25 Change Settings	Inversion Display	Topography Options	Print	Help
	, ,	Carry out inve	ersion		
		Inversion met	hods and settings	>	Select robust inversion
		Model discret	ization	>	Modify smoothness-constrained least-squares method
		Model sensiti	vity options	>	Choose logarithm of apparent resistivity
		I.P. options		>	Use reference model in inversion
		Batch mode of	options	>	Fast inversion of long survey lines or large data sets
					Use fast Jacobian routines for dense data sets
					Set time-lapse inversion settings
					Select method to handle missing data points
					Floating electrodes survey inversion method
					Limit water extent for underwater electrodes survey

**Obr. 6.19** Zobrazenie položiek pre typy inverzných metód a ich nastavenia (Loke, 2019).

# Výber blokovej inverzie (Select robust inversion

Výber tejto ponuky vyvolá nasledujúce dialógové okno (obr. 6.20). Umožňuje zvoliť vyhladenú inverzná metóda (norma L2) alebo robustnú / blokovú inverziu (norma L1).



Obr. 6.20 Zobrazenie nastavenia blokovej inverzie (Loke, 2019).

Nastavenia metódy vyhladenia najmenších štvorcov (Modify smoothnessconstrained least-squares method)

Výber tejto ponuky vyvolá nasledujúce dialógové okno (obr. 6.21).



**Obr. 6.21** Zobrazenie položiek pre nastavenia metódy vyhladenia najmenších štvorcov (Loke, 2019)

Prvá možnosť v dialógovom okne umožňuje použiť vyhladenie odporového modelu alebo aj hodnôt odporov modelu.

Možnosť "include damped least-squares constraint" je určená pre použitie v neobvyklých prípadoch, keď hodnoty citlivosti údajov blokov modelu sú výrazne zdeformované veľkými odchýlkami odporov. V niektorých situáciách, ako je meranie nad telesom s veľmi nízkou hodnotou rezistivity, môžu byť prúdové línie deformované tak, že časti prostredia nie sú dobre zmapované a v invreznom modeli máme veľmi nízku citlivosť hodnôt. Toto môže viesť k veľkým deformáciám práve pod takýmto telesom. Zdá sa, že táto možnosť poskytuje lepšie výsledky pri riešení kompaktných štruktúr, kde šírka a hrúbka je trochu menšia než hĺbka (napr. dutina alebo banské teleso, ktorých veľkosť je trochu menšia ako ich hĺbka). Táto možnosť by sa mala použiť ako posledná, ak zlyhajú iné možnosti! Výber možnosti logaritmus alebo zdanlivý odpor (Choose logarithm of apparent resistivity)

Výber tejto ponuky vyvolá nasledujúce dialógové okno (obr. 6.22).

Program predvolene používa ako dátový parameter pri uskutočňovaní inverzie logaritmus hodnôt zdanlivého odporu. Vo väčšine prípadov to prináša najlepšie výsledky. V niektorých prípadoch (napríklad so záporným alebo nulovým zdanlivým odporom) to nie je možné. Táto možnosť umožňuje, aby sa v takýchto situáciách použila hodnota zdanlivého odporu sama osebe.

Choo	se logarithm of apparent resistivity
You resi app	can select to use the logarithm of the apparent stivity values in the inversion, or directly use arent resistivity values.
•	Use logarithm of apparent resistiv Use apparent resistivity
	OK Cancel

Obr. 6.22 Zobrazenie výberu možnosti logaritmus alebo zdanlivý odpor (Loke, 2019).

# Typ optimalizačnej metódy (Type of method to solve least-squares equation)

Táto voľba umožňuje zvoliť dve rozdielne metódy na riešenie rovnice (6.1). Výber tejto ponuky vyvolá nasledujúce dialógové okno (obr. 6.23).



Obr. 6.23 Zobrazenie možnosti pre voľbu optimalizačnej metódy(Loke, 2019).

Štandardne, ak počet bodov meraní a modelových buniek je malý (menej ako niekoľko sto), používa program "štandardnú Gauss-Newtonovu" metódu najmenších štvorcov, kedy je vypočítané presné riešenie rovnice najmenších štvorcov. Ak počet bodov merania a modelových buniek je veľký (viac ako 2000), čas potrebný na riešenie rovnice najmenších štvorcov môže zaberať väčšiu časť inverzného procesu. Pre redukciu inverzného času, ako alternatíva pre riešenie rovnice najmenších štvorcov, môže byť použitá "nekompletná Gauss-Newtonova" metóda. Užívateľ môže zadať presnosť riešenia. Pre veľké dátové súbory poskytuje zadaná presnosť okolo 0.5% (konvergentný limit 0.005 v dialógovom okne) riešenie takmer ako riešenie získané "štandardnou Gauss-Newtonovou" metódou. Zadaním vyššej presnosti, napr. 0.1% bude teoreticky dávať výsledok, ktorý je ešte bližší k "štandardnej Gauss-Newtonovej" metóde, ale bude to náročnejšie na čas inverzie. Pre veľmi veľké dátové súbory a modely (obvykle viac ako 10000 meraní alebo buniek), je spolu s "nekompletnou Gauss-Newtonovou" metódou, poskytovaná voľba "kompresia dát". To výrazne redukuje potrebnú výpočtovú pamäť. Pre dátové súbory s veľmi dlhých profilov (viac ako 2000 elektród) je možná voľba "riedkej inverzie", ktorá môže značne zredukovať výpočtový čas a potrebnú pamäť.

### Použitie referenčného modelu pri inverzii (Use reference model in inversion)

Referenčný model je zvyčajne homogénny polopriestorový model. Nasledujúce dialógové okno (obr. 6.24) zobrazuje nastavenia, ktoré môže zvoliť používateľ.

se reference model in inversion	
background reference model helps to stabilize the inversion model by arge departures from a fixed resistivity value. A homogeneous reference will be used. Select your choice below.	
Yes - Use reference model No - do not use a reference model	
The damping factor for reference model controls the degree which the variations from the background model is constrained. A larger damping fac esult is smaller variations. A value of between 0.01 and 0.10 is normally Reference model damping factor 0.010	:to
You can choose to use the default reference resistivity value (usually the of the apparent resistivity values) or a user defined reference value.	
Default reference value     O User defined reference value	
Jser defined reference resistivity 100.00	
OK Cancel	

Obr. 6.24 Zobrazenie možností pre nastavenia referenčného modelu (Loke, 2019).

#### Rýchla inverzia pre dlhé profily (Fast inversion of long survey lines)

Kliknutím na možnosť ponuky "Fast inversion of long survey lines" sa zobrazí nasledujúce dialógové okno (obr.6.25).

Fast inversion of long survey lines



Obr. 6.25 Zobrazenie okna pre nastavenia rýchlej inverzie pre dlhé profily (Loke, 2019).

Prvou možnosťou je použiť optimalizovanú metódu na výpočet Jacobyho matice. Táto voľba môže výrazne skrátiť čas výpočtu bez ovplyvnenia presnosti hodnôt.

Druhou možnosťou je použitie rýchlej metódy na výpočet Jacobyho matice vylúčením modelových buniek, ktoré sú ďaleko od elektród použitých v poli. Hodnoty Jacobyho matice a teda aj model inverzie sa budú mierne líšiť od hodnôt získaných štandardnou metódou, rozdiel je však zvyčajne malý (menej ako 5%).

Treťou možnosťou je zvoliť "use fast metod". Tento výber výrazne skráti čas pre profily kde je viac ako 500 pozícii elektród. Výsledky sa budú mierne líšiť (zvyčajne menej ako 5%) od výsledkov získaných štandardnou metódou.

Výpočet Jacobyho matice (Use fast Jacobian routines for dense data sets)

Výber tejto ponuky vyvolá nasledujúce dialógové okno (obr. 6.26).

Use fast Jacobian calculation for dense data sets
This option is intended for data sets with very dense data sets the number of data points is much larger than the number of active electrodes in the survey grid. The estimated percentage reduction the calculation time over the standard method is shown below. method should only be used if the reduction is more than 20%. For sparse data sets, this method might be even slower than the method (will be shown by negative value below). Estimated reduction in Jacobian calculation time : 0.0% © No, use standard routines © Yes, use fast Jacobian routines
OK Cancel

Obr. 6.26 Zobrazenie ponuky rýchleho výpočtu Jacobyho matice (Loke, 2019)

Táto voľba používa optimalizovanú rutinu na výpočet hodnôt Jacobovej matice pre množiny údajov, kde je počet údajových bodov oveľa väčší ako počet elektród použitých na meranie. Výpočet hodnôt Jacobovej matice, môže byť pri tejto voľbe podstatne rýchlejší ako pri štandardnom výpočte.

# Nastavenie časozbernej inverzie (Set time-lapse inversion settings)

Časozberná inverzia sa používa na štúdium zmien merného odporu v čase. Pri zvolení tejto položky sa nám otvorí okno na obrázku 6.27.

Toto nastavenie použijeme ak sa 2-D prieskumy opakujú na tom istom profile v rôznych časoch a my potrebuje sledovať zmeny rezistivity prostredia v rôznych časových obdobiach. Napríklad pri štúdiách, ktoré zahŕňajú prietok vody vadóznou zónou, zmeny hladiny podzemnej vody v dôsledku extrakcie vody (Barker a Moore 1998), prietok chemických znečisťujúcich látok a úniky z priehrad. Nastavenia použité metódou inverzie sú uvedené nižšie. Relatívny význam, kladený na minimalizáciu rozdielov medzi modelmi v rôznych časoch, je riadený činiteľom tlmenia časozberu α. Vyššia hodnota faktora tlmenia časozberu prinúti rôzne časové modely, aby si boli podobnejšie, ale na úkor väčšej chyby merania (Rucker et al. 2011).

Používateľ si môže tiež upraviť filter drsnosti časového rozdielu tak, aby vybral plynulé alebo blokové rozdiely medzi časovými modelmi (Kim 2010; Loke et al. 2014).

Set time-lapse inversion settings
Please enter the cross time model damping factor. A value of 0.5 to 5.0 is used. If a value of 0.0 is used, the inversion of the different time series data will be carried out independently. If a value of 1.0 is used, equal weight will given to reducing the difference between the models at different times and individual model roughess. Use a larger damping factor for more noisy data to reduce artefacts in the models caused by the noise. Time lapse damping 0.2500 This refers to the type of constrain to be used in the time-lapse inversion. choose to have no constrains, where the inversions for the different time are carried out independently. This is probably not the best possible choice it is expected that the resistivity model for the later time data set are closely related to the model for the preceding data set. You can choose a constraint ensure the changes in the resistivity values of the corresponding model smooth, or that they are blocky.
O No constraints O Smooth changes O Blocky changes
OK Cancel

**Obr. 6.27** Zobrazenie okna pre nastavenie časozbernej inverzie (Loke, 2019)

# Metódy doplnenie chýbajúcich údajov (Method to handle missing data points)

Niekedy v dátových súboroch získaných pri časozberných meraniach (Timelapse) nejaké dáta chýbajú. Inverzný program ponúka dve možnosti doplnenia chýbajúcich dát, a to implicitne alebo explicitne (obr. 6.28). Autormi programu je doporučené použiť implicitnú metódu, ktorá je oveľa rýchlejšia. Method to handle missing data points For time lapse data sets, sometimes some of the data points missing in that the data from some array configurations were measured. The inversion program has two methods to deal missing data points. They can be excluded explicitely in that are not included in the inversion, or implicitely where it is that the data misfit is always zero at the missing data points. Select method to handle missing data points. Select method to handle missing data points. Implicit method C Explicit method It is recommended that you use the implicit method which can much faster for large data sets when used with the optimized Jacobian matrix calculation algorithm. OK Cancel

Obr. 6.28 Zobrazenie ponuky pre doplnenie chýbajúcich dát (Loke, 2019)

Metóda inverzného prieskumu plávajúcich elektród (Floating electrodes survey inversion method)

Táto voľba umožňuje nastaviť možnosti merania s elektródami plávajúcimi na vodnej hladine. Po zvolení tejto možnosti sa zobrazí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.29).

Na inverziu množiny údajov je možné použiť dve metódy. Prvá metóda (použiť pevnú vodnú vrstvu) je vhodnejšia, keď je maximálna hrúbka vodnej vrstvy malá (menej ako 20%) v porovnaní s maximálnou hĺbkou skúmania konfigurácie prieskumu. V prípadoch, keď je hrúbka vodnej vrstvy veľká, je vhodnejšia druhá inverzná metóda (začleniť vodnú vrstvu do modelu). Pri tejto metóde je časť s vodnou vrstvou zahrnutá do inverzného modelu. Metóda má dve nastavenia inverzie. Vo väčšine prípadov sa rezistivita vodnej vrstvy výrazne nemení pozdĺž línie prieskumu alebo s hĺbkou, takže za bežných okolností je vybraná možnosť "Minimalizovať zmeny vodivosti vody". Na prispôsobenie sa prípadom, keď existujú výrazné zmeny vo vodivosti vody (napríklad v zmiešavacej zóne medzi sladkou a slanou vodou), je možné použiť voľbu "Umožniť voľnú zmenu vodivosti vodnej vrstvy".

Floating electrodes survey inversion method There are two options to invert data set from a survey using floating electrodes. first method, the water layer has a fixed resistivity and the model section below water bottom has a constant thickness. This method works well when the water depth is much less than the maximum depth of penetration of the survey the water thickness is a significant fraction of the depth of penetration, it might better to incorporate the the water layer into the model section. Incorporate water layer into the mode O Use fixed water layer If you select the option to incorporate the water layer in the model, you can minimize the resistivity variation within within the water layer or to allow the resistivity to vary freely. Choose the first option if the resistivity of the water is accurately known, otherwise select the second option. Minimise water resistivity varia O Allow water resistivity to vary freely If you had selected the option to minimise the water layer resistivity variation, following damping factor value controls the degree which water resistivity is to vary. A higher value will results in a smaller resistivity variation. Water resistivity variation damping 8.0 You can impose a sharp boundary constraint between the water bottom and the underlying layer. This allows sharp changes in the model resistivity across the boundary. You can also select a gradual change across the boundary. Select sharp change C Choose gradual change 0K Cancel

Obr. 6.29 Zobrazenie možnosti nastavenia merania s plávajúcimi elektródami. (Loke, 2019)

<u>Obmedzenie rozsahu pre meranie s elektródami pod vodnou hladinou (Limit</u> <u>water extent for underwater electrodes survey)</u>

Po kliknutí na túto čiastkovú možnosť sa zobrazí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.30).

Túto možnosť je možné použiť, iba ak je načítaný dátový súbor s podvodnými elektródami a ak boli limity vodnej vrstvy menšie ako dĺžka profilu (napríklad prieskum cez priehradu alebo vodnú hrádzu). Keď program načíta dáta z takého dátového súboru, automaticky povolí možnosť obmedziť rozsah vodnej vrstvy na základe ľavého a pravého limitu nastaveného v dátovom súbore. Táto možnosť tiež umožňuje

používateľovi nastaviť rezistivitu buniek siete mimo oblasť pokrytú vodou pomocou dialógového okna nižšie.

Limit extent of water layer in underwater survey
This option is only relevant for a survey with electrodes on the water bottom all the electrode are underwater. Normally it is assumed the water layer the left and right edges of the finite-element mesh used. This option allows limit the water layer to the distances given by the left and right limits in the data file.
If the horizontal extent of the water layer is limited, the following value sets resistivity beyond those limits. Normally the resistivity of the leftmost and cells in the top layer of the inversion model are used to set the resistivity of of cells in the mesh to the left and right edges of the finite-element mesh. To higher resistivity value, set a higher value (such as 10.0) in the box below. resistivity of the leftmost and rightmost model cells will be multipled by this to set the resistivity of the mesh cells. Enter factor to multiply resistivity of mesh [1.0]
OK Cancel

Obr. 6.30 Zobrazenie okna pre meranie s elektródami pod vodnou hladinou (Loke, 2019)

# Modelové obmedzenia (Model Discretization)

Táto ponuka umožňuje prostredníctvom viacerých záložiek nastavenie modelu (obr. 6.30).



**Obr. 6.31** Zobrazenie položiek pre modelové obmedzenia (Loke, 2019)

# Zobrazenie modelových blokov (Display model blocks)

Táto možnosť zobrazí distribúciu modelových blokov a bodov zápisu (obr. 6.32). Body zápisu budú vykreslené v strednej hĺbke prieskumu (Edwards, 1977) pre použité usporiadanie. Program má maximum 24 modelových vrstiev.







#### Zmena hrúbky vrstiev (Change thickness of layers)

Pri zvolení tejto položky sa otvorí nasledujúce okno (obr. 6.33).

Change thickness of layers	$\times$
You can set the thickness of the layers in the inversion model by thickness of the first layer, and the rate at which the thickness of e subsequent deeper layer increases with depth.	ach
User model layer thickness settingsRatio of first layer thickness to the unit electrodeRate at which the layer thickness increases withUnit electrode spacing is 2.00	
Model parameters limit Allow number of model parameters to exceed number of data Yes C No	
The depth to the deepest layer will normally be set at the largest d investigation of the arrays used in the data set. However, you can the depth range of the model by changing the factor below. Factor to increase model depth range (1.0 to 1.0500	epth
OK Cancel	

Obr. 6.33 Zobrazenie možnosti zmeny hrúbky vrstiev (Loke, 2019)

V tomto okne je možné nastaviť hrúbku vrstiev použitých v inverznom modeli. Nastaví sa hrúbka prvej vrstvy a krok ako sa zväčšuje hrúbka každej nasledujúcej vrstvy. Štandardne pri povrchovom prieskume rozlíšenie klesá s hĺbkou, preto sa hrúbka vrstiev zväčšuje o 5 – 15% s každou hlbšou vrstvou.

V tomto okne je možné zväčšiť hĺbkové pokrytie modelu. Pre použitie modelu, s väčším rozsahom spodnej hĺbky, treba zmeniť faktor rozsahu hĺbky modelu, napr. z 1.0 na 1.3 pre zväčšenie rozsahu hĺbky modelu o 30%.

# Zmena hĺbok vrstiev (Modify depths to layers)

Týmto výberom môžeme zmeniť hĺbku vrstiev použitú v inverznom modeli. Môžeme upraviť hĺbky tak, aby sa hĺbka niektorých rozhraní zhodovala so známymi hĺbkami z vrtov alebo z iných informácií. Po zvolení tejto funkcie sa nám zobrazí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.34).

🔳 Mod	ify depth of laye	rs			×
Layer	New Depth	Present Depth	Layer	New Depth	Present Depth
1	1.50	1.50	21		None
2	3.00	3.00	22		None
3	4.65	4.65	23		None
4	6.47	6.47	24		None
5	8.46	8.46	25		None
6	10.7	10.7	26		None
7	13.1	13.1	27		None
8	15.7	15.7	28		None
9	18.7	18.7	29		None
10	21.9	21.9	30		None
11	25.4	25.4	31		None
12	29.3	29.3	32		None
13		None	33		None
14		None	34		None
15		None	35		None
16		None	36		None
17		None	37		None
18		None	38		None
19		None	39		None
20		None	40		None
Dept	h scaling fact	or 1.0	OK	Cance	

**Obr. 6.34** Zobrazenie okna pre zmenu hĺbky vrstiev (Loke, 2019)
## Použitie rozšíreného modelu (Use extended model)

Pri výbere tejto voľby sa rozbalí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.35). Ak vyberieme možnosť, že chceme použiť rozšírený model, tak táto možnosť pridá bunky do modelu na okrajoch profilu (obr. 6.36c).

By default, the	program sets the distribution of the model
so that they fa	ll within the area that contains the most
The resulting	model commonly has a trapezoidal shape that
annroximately	follows the distribution of the data points in the
approximatory	In this option, you can use a model with the
pseudoseculo	a de af the august l'ag
set up to the e	nds of the survey line.
Use extended	model? C Yes 🔍 No

**Obr. 6.35** Zobrazenie okna pre použitie rozšíreného modelu (Loke, 2019)

Použitie modelu s rovnakou šírkou blokov (Use model with blocks of same widhts)

Pri použití tejto voľby sa rozbalí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.36).

Jse model with blocks of same widths
You can specify that all the model blocks must be of equal This will avoid a model with wider blocks at the sides and in lower layers. Please select your choice. • All model blocks have equal widths.
C Model blocks need not have equal widths.
In some surveys, particularly 2-D data sets that are created a series of 1-D sounding lines, the distance between adjacent electrodes can vary greatly. This option enables you to model where the cells widths are approximately uniform the large changes in the distance between adjacent This option is only meant for a data set in the general array C Yes - use cells of approximately equal width
w wo - use the delaunt arrangement
OK Cancel



Výber prvej možnosti ponuky bude zabezpečovať, že všetky bunky budú mať rovnakú šírku rovnú najmenšej elektródovej vzdialenosti. Táto možnosť je určená pre 2D merania. Výber druhej možnosti bude produkovať model rozdelený na bloky rôznej šírky. Túto možnosť je vhodné použiť ak 2D meranie vzniklo spojením 1D meraní.

## Redukcia efektu postranných blokov (Reduce effect of side blocks)

Výber tejto možnosti (obr. 6.37) ovplyvňuje výpočet hodnôt Jacobyho matice pre modelové bloky po stranách a pod modelovým rezom.

Bežne sú k okrajom modelu pridané bloky, ktorých príspevky sú započítané k všetkým elementom siete spojených s pridaným blokom. To dáva väčšiu váhu postranným blokom v porovnaní s vnútornými blokmi. Zvolením možnosti "Redukcia efektu postranných blokov" sa v Jacobyho matici vynechá spomínaný príspevok siete postranných blokov

Reduce effect of s	ide blocks
In the inversion the finite-different relatively larged in the interior points, this co- left and botto the option to r	on model, the blocks at the sides and bottom extend to the edge rence or finite-element mesh used. As such, these blocks have le effect on the inversion process compared to neighbouring of the model. For some data sets, particularly those with noisy build result in unusually high or low resistivity values near the m-right corners of the model. You can reduce this effect by reduce the effect of the side blocks on the inversion process.
Reduce the ef	fect of the side blocks?
C None	<ul> <li>Slight C Severe C Very Severe</li> </ul>
lf you choose that you also widths. Make (* Yes - use	the option to reduce the effect of the side blocks, it is select the option option to make sure that all blocks have the sure all blocks have equal widths? e blocks with same widtl C No - use default arrangement

**Obr. 6.37** Zobrazenie výberu pre redukciu efektu postranných blokov (Loke, 2019)

## Použiť spresnenie modelu (Use model refinement)

Program RES2DINV štandardne používa model, kde šírka blokov vnútorného modelu je rovnaká ako vzdialenosť medzi elektródami. Vo väčšine prípadov to funguje dobre. V situáciách s veľkými zmenami rezistivity blízko povrchu zeme však možno dosiahnuť lepšie výsledky použitím užších modelových buniek. Existujú dva spôsoby, ako zmenšiť šírku buniek modelu. Prvým je použitie možnosti "Použiť spresnenie modelu" v ponuke "Inverzia". Kliknutím na túto možnosť sa zobrazí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.38), kde môžeme zvoliť modelové bunky so šírkou polovičnej vzdialenosti medzi elektródami (takmer vo všetkých prípadoch to poskytne optimálne výsledky).

Model refinement	
By default, the p same as the univariations near model cells. Thi -dipole and dipo variations. In get the unit electrod narrower cells for of the resistivity	program will set the width of the model cells to be it electrode spacing. If there are very large the ground surface, you can use a model with s is particularly important for arrays such as the le-dipole which are more sensitive to near surface eneral, using a model where the width of the cells be spacing gives the optimum results. A model requently results in 'ripples' in the near surface redent.
• Use normal i	model cells with widths of one unit spacing
C Use model c	ells with widths of half the unit spacing
	OK Cancel

Obr. 6.38 Zobrazenie nastavenia pre spresnenie modelu (Loke, 2019)

Druhou možnosťou je úprava dátového súboru priamo pomocou textového editora. Rozstup jednotkových elektród je uvedený v druhom riadku údajového súboru so zdanlivým odporom.

Nastavte l'avé a pravé ohraničenie modelu (Set left and right limits of model)

Pri použití tejto voľby sa rozbalí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.39).

Set left and right limits of model bloo	tks
This option allows you to set arrangement of the blocks in This allows you to force the p zone of interest. It is mainly i where the main area of focus particularly with sounding typ	the left and right limits for the the inversion model used by the program to concentrate on a specified intended for unusual survey setups is near the center of the survey line, be of setups.
Model left limit : -10.0	Model right limit 90.0
Do you want to use the above No, use default limits OK	e model limits? C Yes, use above limits Cancel

**Obr. 6.39** Zobrazenie možnosti pre nastavenie pravého a ľavého ohraničenia modelu (Loke, 2019)

Túto možnosť je možné použiť iba pre vstupné údaje vo všeobecnom formáte. Umožňuje užívateľovi manuálne určiť ľavý a pravý limit modelových buniek použitých v inverznom modely.

# 6.2.6 Možnosti topografie (Topography Options)

Ak je výrazný reliéf pozdĺž profilu, účinok topografie môže byť vypočítaný zo známych horizontálnych a vertikálnych súradníc bodov zápisu. Keď program načíta topografické údaje zo súboru s nameranými dátami, automaticky zvolí metódu konečných prvkov, ktorá zahŕňa topografiu pri modelovaní použitej siete. Topografické modelovanie bude programom realizované automaticky pri inverzii (obr. 6.40).

Záložka "Možnosti topografie (Topography Options)" (obr.6.40) má v ponuke možnosti pre: zobrazenie topografie (Display topography), výber spôsobu odstránenia trendu (Select type of trend removal) a výber typu topografického modelovania (Type of topographic modeling).



**Obr. 6.40** Zobrazenie položiek pre možnosti topografie (Loke, 2019)

## Zobrazenie topografie (Display topography)

Táto voľba zobrazí topografický povrch terénu, ako na obr. 6.41.



Obr. 6.41 Topografický lineárny trend posunutia pre hromadný dátový súbor (Loke, 2019)

Typ topografického modelovania (Type of topographic modeling).

Pri použití tejto voľby sa otvorí nasledujúce dialógové okno (obr. 6.42).

Type of topographic modelling		
Your data set has topography. In order to incorporate the topography into your inversion model, you can choose one of the methods listed below.		
© No topographic modelling, i.e. ignore the topography © Distorted finite-element grid with uniform distortion © Distorted finite-element grid with damped distortion		
Topography distortion damping factor 0.75 © S-C transformation with distorted finite-element grid		
OK Cancel		

**Obr. 6.42** Zobrazenie okna pre typ topografického modelovania (Loke, 2019).

Zobrazené dialógové okno nám ponúka nasledujúce možnosti:

- Táto metóda, spolu s ďalšími dvoma metódami, používa pri metóde konečných prvkov zakrivenie gridu prvkov tak, že povrchové uzly siete budú zodpovedať topografii. Uzly pod povrchom sú posunuté rovnako ako povrchové uzly (ako na obr. 4.8 b). To dáva presnejšie výsledky. Metóda zakrivenia gridu s rovnomerným zakrivením (Táto metóda) je pre výpočet korekčných faktorov homogénneho prostredia pri metóde konečných prvkov používaná častejšie (Fox et al., 1980). Môže zapríčiniť zakrivenie v prípadoch, keď sa blízko pri povrchu nachádza veľké rozpätie hodnôt odporu (Tong a Yang, 1990, Loke, 2000).
- Tlmené zakrivenie gridu. Pri tejto voľbe sú podpovrchové uzly posunuté v menšej miere v porovnaní s povrchovými uzlami, tj. efekt topografie je "tlmený" s hĺbkou (obr. 4.8 c, d). Túto možnosť je pravdepodobne rozumné použiť, ak amplitúda zakrivenia topografie je menšia než hĺbka spodnejších vrstiev modelu. Útlmový faktor, ktorý kontroluje stupeň utlmenie môže byť menený užívateľom.
- Schwarz-Christoffelovu transformácia. Táto metóda používa Schwarz-Christoffelovu transformačnú metódu pre výpočet zakrivenia vrstiev (obr. 4.8

e). Je to pravdepodobne najlepšia metóda, ktorá produkuje prirodzené modelové rezy, aj v prípadoch s pomerne veľkým topografickým zakrivením. Prístup tlmenej topografie môže pri veľkom topografickom zakrivení terénu produkovať neobvykle hrubé modelové vrstvy pod oblasťami, kde topografia stúpa. V niektorých neobvyklých prípadoch, keď má topografia veľmi ostré strmé vrcholy a topografické merania sú riedke, nemusí správne fungovať ani Schwarz-Christoffelova metóda. Ak sa to stane, je potrebné zadať niekoľko ďalších topografických údajov blízko vrcholov.

## 6.2.7 Zobrazenie inverzného výsledku

V tejto ponuke môžeme načítať dátový súbor alebo iný výstupný súbor produkovaný inverzným výpočtom a zobraziť namerané a vypočítané pseudorezy zdanlivého odporu, ako aj modelový rez. Táto záložka tiež ponúka možnosť zmeniť kontúrový interval pre vykreslenie pseudorezu a modelového rezu, upraviť vertikálnu mierku rezu, zahrnúť do modelového rezu topografiu a zmeniť nastavenú farebnú škálu používanú programom. V ponuke je tiež možnosť exportu modelu do formátu Surfer alebo XYZ.

# 7 Prípadové štúdie využitia elektrickej odporovej tomografie

Nasledujúce kapitoly opisujú príklady využitia ERT meraní v geologickom prieskume na overenie geologickej stavby a tektoniky, pri geologickom prieskume pre líniové a plošné inžinierske stavby, pri riešení problematiky svahových deformácií a environmentálnych záťaží.

### 7.1 Geologická stavba a tektonika

V základnom geologickom prieskume a výskume sa metóda ERT využíva prevažne pri overovaní kontaktov geologických štruktúr, relatívne malých stratigrafických štruktúr a pri štúdiu sedimentárnych štruktúr do malých hĺbok (cca 30-40 m, max. 50 m). Rozhodujúcim prvkom v tomto prípade je odporový kontrast litologických jednotiek (celkov) ako aj zvolená elektródová vzdialenosť, ktorá ovplyvní rozlišovaciu schopnosť merania. Dôležitým faktorom pre jednoznačnejšiu interpretáciu výsledkov meraní je správna voľba elektródového usporiadania podľa typu študovanej geologickej štruktúry. Nasleduje niekoľko príkladov z konkrétnych lokalít.

### Muránsky zlom

V rámci vedeckého projektu APVV bola realizovaná štúdia zistenia odporového obrazu Muránskeho zlomu, jeho časti pri obci Muráň, kde je na odkryve viditeľný kontakt mezozických Wettersteinských vápencov a dolomitov silickej jednotky a paleozoických kryštalických hornín tvorených rulami a amfibolitmi. Štúdia je publikovaná v práci Putiška et.al, 2012. Pri odkryve bolo na referenčnom profile realizované meranie metódou ERT s použitím štyroch elektródových usporiadaní, dipól-dipól, Wenner-alfa, Schlumberger a pól-dipól (obr.7.1). V inverzných odporových rezoch je dobre viditeľný odporový kontrast medzi geologickými jednotkami. Mezozoické vápence a dolomity predstavujú prostredie s hodnotami merného odporu nad 1000 Ohm.m, paleozoické kryštalické horniny sa prejavujú výrazne nižšími hodnotami merného odporu (do 250 Ohm.m). Odporový kontrast na zlomovom rozhraní je jednoznačný pri všetkých štyroch elektródových usporiadaniach, rozdielny je priebeh a tvar rozhrania smerom do hĺbky. Usporiadania Wenner-alfa a Schlumberger poukazujú na vertikálny priebeh rozhrania, usporiadania dipól-dipól a pól-dipól na subvertikálne. Podrobnejšie je tento problém riešený v spomínanej práci Putiška et.al, 2012.

Takýto výrazný odporový kontrast umožňuje vysledovať priebeh zlomovej štruktúry muránskeho zlomu aj v oblastiach so suťovým prekrytím. Pokusne boli realizované tri profilové merania neďaleko referenčného profilu (profil 1,2,3 na obr. 7.1). Výsledné odporové rezy pre jednotlivé elektródové usporiadania sa líšia vo viacerých aspektoch (obr. č. 7.2). Výrazné odporové rozhranie litologických celkov je jednoznačné do hĺbky cca 30 - 40 m, pro citlivejších usporiadaniach (ako pól-dipól) aj menej. V hlbších častiach odporových rezov je odporové rozhranie nekonzistentné a jeho interpretácia nejednoznačná. Sklon rozhrania je možné interpretovať len do hĺbky cca 20 m a to len pri usporiadaní dipól-dipól.



**Obr. 7.1** Odpový obraz muránskeho zlomu na referenčnom profile pod odkryvom pri obci Muráň (upravené podľa Putiška et. al., 2012).



**Obr. 7.2** Odpový obraz muránskeho zlomu na profiloch 1,2 a 3 pri obci Muráň (upravené podľa Putiška et. al., 2012).

# Geofyzikálny prieskum pre potreby vybudovania systému tepelného čerpadla

Cieľom geofyzikálnych prác bolo vybrať vhodné miesta pre situovanie vrtov systému tepelného čerpadla. Zvolený bol systém paralelných a kolmých profilových meraní metódou ERT na lokalizáciu a zistenie hrúbky štrkových polôh, ktoré obsahujú dostatočné množstvo podzemnej vody pre vybudovanie systému tepelného čerpadla. V postate sa jedná o prieskum geologických pomerov na relatívne malej ploche. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie Schlumberger a elektródová vzdialenosť 4,0 m. Výsledné odporové rezy sú zobrazené formou 3D vizualizácie (obr. 7.3). Pre posúdenie vhodnosti z hľadiska situovania vrtov pre tepelné čerpadlo bola zostrojená plošná mapa vymedzenia jednotlivých litologických typov hornín (obr. 7.4).

Plochy **A** na obrázku 7.4, reprezentujú štrkové polohy s vyšším merným odporom ako 300 Ωm, ktoré sa nachádzajú pri povrchu a ich hrúbka je cca 5 m. Tieto štrkové polohy sú pravdepodobne ešte nad hladinou podzemnej vody (vysoký merný odpor).

Plocha **B** na obrázku 7.4, ktorá prebieha z JZ časti skúmaného územia cez stred územia do S časti na mape, reprezentuje teleso tvorené ílom piesčitým (merný odpor 10-50 Ωm). Toto teleso sa nachádza v hĺbke cca 5 až 10 m.

Časť skúmaného prostredia tvorí štrk piesčitý (plocha **C** na obr. 7.4) s merným odporom 50-300 Ωm. Najväčšie hrúbky týchto hornín boli zistené v strede a JZ časti skúmaného územia.



**Obr. 7.3** 3D vizualizácia ERT odporových rezov na lokalizáciu a zistenie hrúbky štrkových polôh pre vybudovanie systému tepelného čerpadla.



**Obr. 7.4** Plošná mapa výskytov jednotlivýcj litologických typov hornín pre vybudovanie systému tepelného čerpadla.

# 7.2 Inžinierské stavby – líniové

Líniové inžinierske stavby (diaľnice, rýchlostné cesty, rôzne produktovody a pod.) sú charakteristické prevahou svojej dĺžky nad šírkou. Pri geologickom prieskume pre takýto typ stavieb sú potrebné informácie o relatívne plytkej geologickej

stavbe s čo najväčšou hustotou informácie v smere trasy líniovej stavby. Vrtné prieskumné práce poskytujú informácie o geologických pomeroch smerom do hĺbky a z plošného hľadiska sa jedná o bodové informácie. Líniové stavby často prechádzajú cez rôzne geologické prostredia a z ekonomického hľadiska nie je možné vrtnými prieskumnými prácami dostatočne husto pokryť skúmané prostredie. V takýchto prípadoch je využitie metódy ERT viac ako vhodné.

V nasledujúcich príkladoch budú prezentované a zhodnotené merania metódou ERT na viacerých lokalitách, realizované pri výstavbe cestných komunikácií v rôznych geologických podmienkach.

#### Prieskum pre diaľnicu a rýchlostnú cestu v oblasti Podunajskej nížiny

V skúmanej oblasti prevládajú kvartérne hlinito-piesčité sedimenty uložené na štrkových polohách s premenlivou hrúbkou. V ich podloží sa nachádzajú neogénne ílovito-piesčité až ílovité sedimenty. V kvartérnych štrkoch a pieskoch sa nachádzajú pozostatky starých riečnych ramien vyplnených ílovitými až hnilokalovými sedimentami. Tieto sú z hľadiska únosnosti nevhodné pre stavbu.

Geofyzikálny prieskum bol zameraný na zistenie litologických rozhraní v horizontálnom smere (zmeny pozdĺž trasy) ako aj vo vertikálnom smere (overenie hrúbky litologických celkov). Zmeny merného odporu v horizontálnom smere boli zistené pomocou metódy DEMP (dipólové elektromagnetické profilovanie), meraním v troch hĺbkových úrovniach. V anomálnych oblastiach boli realizované profilové merania ERT. Nasleduje niekoľko príkladov výsledkov meraní a interpretácie.

Na obrázku 7.5 je odporový a interpretovaný geologický rez v ktorom vidieť veľmi dobrú zhodu odporových rozhraní jednotlivých litologických celkov s informáciami z vrtných prieskumných prác. V odporovom reze bolo možné lokalizovať a vymedziť ílovité sedimenty zachytené vrtom M 204-13. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m.

Na obrázku 7.6 je geologická interpretácia odporového rezu, ktorým bolo zachytené výrazné staré riečne rameno vyplnené ílovitými a ilovito-piesčitými

sedimentami v strede so štrkovou šošovkou. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m.

Na obrázku 7.7 je výsledok ERT merania, ktoré bolo realizované na overenie hrúbku kvartérnych štrkov. V odporovom reze sa štrková poloha prejavila výrazne vysokou hodnotou merného odporu. V spodnej časti rezu je zachytený prejav neogénnych sedimentov. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m.



**Obr. 7.5** Oblasť Podunajskej nížiny, malé staré riečne rameno, inverzný odporový rez (hore) a geologická interpretácia (dole).



**Obr. 7.6** Oblasť Podunajskej nížiny, veľké staré riečne rameno, inverzný odporový rez (hore) a geologická interpretácia (dole).



**Obr. 7.7** Oblasť Podunajskej nížiny, hrubá poloha štrkov, inverzný odporový rez (hore) a geologická interpretácia (dole).

Na obrázku 7.8 je výsledok ERT merania a geologická interpretácia tenkej štrkovej vrstvy. Odporový prejav štrkovej vrstvy je slabší, prevláda prejav ílovitých sedimentov v nadloží a podloží s nízkou hodnotou merného odporu. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m.



**Obr. 7.8** Oblasť Podunajskej nížiny, tenká poloha štrkov, inverzný odporový rez (hore) a geologická interpretácia (dole).

Na obrázku 7.9 je výsledok ERT merania a geologická interpretácia kontaktu neogénnych sedimentov s kryštalinikom jadrového pohoria prekrytým suťovými sedimentami. Meraním sa upresnila poloha kontaktu dvoch geologických jednotiek zistených vrtným prieskumom. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipóldipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m.



**Obr. 7.9** Oblasť Podunajskej nížiny, kontakt neogén – kryštalimikum, inverzný odporový rez (hore) a geologická interpretácia (dole).

### 7.3 Inžinierske stavby – objekty

Pri inžinierskogeologickom prieskume tohto typu stavieb sa jedná o prieskum pod plošnými stavbami, záujmové územie je relatívne malé v závislosti od veľkosti objektu. Geofyzikálny prieskum sa orientuje na blízke okolie a samotné podložie stavby. Požiadavky na typ zisťovanej informácie sa väčšinou líšia podľa typu stavby. Nasleduje niekoľko príkladov využitia metódy ERT pri geologickom prieskume stavebných objektov.

### Prieskum pre úložisko nízko rádioaktívneho odpadu

Skúmané územie sa nachádza v oblasti neogénnej panvy vedľa existujúceho úložiska. Účelom geofyzikálneho prieskumu bolo zistiť geologicko-štruktúrne pomery kvartérnych a neogénnych sedimentov. Realizovaných bolo viacero profilových meraní, prezentované sú len niektoré, hlavne zaujímavé z hľadiska interpretácie odporových rezov. Hodnoty merných odporov v rezoch sa pohybujú od 1 do 100 Ohm.m. Obrázok 7.10 je ukážkou interpretácie komplexného horninového prostredia. Vrtné prieskumné práce zistili pestré striedanie litologických jednotiek kvartéru. V odporovom reze z merania usporiadaním Wenner-alfa nie je komplexnosť prostredia výrazná. V odporovom reze z merania usporiadaním dipól-dipól je komplexnosť prostredia zjavná a zhoda s informáciami z vrtných prác je výrazne vyššia. V obidvoch prípadoch bola použitá elektródová vzdialenosť 5.5 m.

Problémy pri interpretácii v odporovo málo kontrastných podmienkach sú časté a zostrojenie geologicko – geofyzikálneho rezu je bez informácií z vrtného prieskumu niekedy nemožné. Príkladom je profilové ERT meranie na obrázku 7.11, kde bez informácii z vrtných prieskumných prác by nebolo možné logicky interpretovať skúmané prostredie. Rozdiel pri použití elektródového usporiadania Wenner-alfa a dipól-dipól je zjavný. V obidvoch prípadoch bola použitá elektródová vzdialenosť 5.5 m.



**Obr. 7.10** Oblasť neogénnej panvy, zložité geologicko-štruktúrne pomery kvartérnych sedimentov. Inverzný odporový rez - elektródové usporiadanie Wenner-alfa (hore), inverzný odporový rez – elektródové usporiadanie dipól-dipól (v strede) a geologická interpretácia (dole).



**Obr. 7.11** Oblasť neogénnej panvy, interpretácia v odporovo málo kontrastných podmienkac. Inverzný odporový rez – elektródové usporiadanie Wenner-alfa (hore), inverzný odporový rez – el. usporiadanie dipól-dipól (v strede) a geologická interpretácia (dole).

### Inžinierskogeologický prieskum pre bytový dom

Účelom merania ERT bolo zistiť priebeh litologických rozhraní pod realizovanými profilovými meraniami. Meranie bolo realizované na dvoch navzájom kolmých profiloch (obr. 7.12). Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipóldipól a elektródová vzdialenosť 3.0 m. Na základe korelácie údajov z priamych prieskumných diel a ERT meraní, je možné charakterizovať jednotlivé litologické celky pomocou ich odporových vlastností. Na vertikálnych rezoch je potom možné sledovať priebeh, zmenu hrúbky, prerušenie alebo ukončenie jednotlivých litologických celkov.



Obr. 7.12 Inžinierskogeologický prieskum pre bytový dom, situácia ERT profilov a prieskumných diel.

Na základe informácií z vrtných prác a konzultácii s inžinierskym geológom bolo skúmané prostredie rozdelené na nasledovné litologické celky:

• íl s nízkou plasticitou s merným odporom 40 - 80 Ohm.m,

štrk s prímesou jemnozrnnej zeminy s merným odporom 80 - 200
 Ohm.m,

- piesok siltovitý s merným odporom 100 150 Ohm.m,
- íl piesčitý s merným odporom 60 80 Ohm.m,
- štrk ílovitý s merným odporom 50 60 Ohm.m,
- ílovec s merným odporom 10 50 Ohm.m.

**Profil ERT-P1** bol situovaný z JZ na SV s dĺžkou 132 m. Horninové prostredie na celom úseku profilu je zložené z troch litologických vrstiev (obr. 7.13): povrchová vrstva tvorená ílom s nízkou plasticitou s hrúbkou 3.0 – 5.0 m, vrstva tvorená štrkom s prímesou jemnozrnnej zeminy s hrúbkou 1.6 – 5.0 m a podložie tvorené palogénnym ílovcom. Na metráži 18 - 42 m sa nachádza pravdepodobne vrstva navážky tvorená štrkom alebo stavebným materiálom s vysokým merným odporom nad 300 Ohm.m.

**Profil ERT-P2** bol situovaný kolmo od cesty smerom do svahu s dĺžkou 69 m. Horninové prostredie na meranom úseku možno rozdeliť na dve samostatné časti (obr. 7.14). Na metráži 0 - 32 m (rovinatá časť) bola zistená prítomnosť prostredia s rovnakým zložením ako na profile ERT-P1. Na metráži 32 - 65 m (úsek na svahu) je prostredie tvorené deluviálnymi sedimentami (piesok siltovitý a íl piesčitý), ktorých hrúbka narastá smerom do svahu. Pod nimi sa nachádza vrstva štrku ílovitého s hrúbkou 1.0 – 2.0 m. Podložie je tvorené palogénnym ílovcom.



**Obr. 7.13** Inžinierskogeologický prieskum pre bytový dom, profil ERT-P1. Inverzný odporový rez (hore), a geologická interpretácia (dole).



**Obr. 7.14** Inžiniersko-geologický prieskum pre bytový dom, profil ERT-P2. Inverzný odporový rez (hore), a geologická interpretácia (dole).

### 7.4 Svahové deformácie (zosuvy)

Pri riešení problematiky svahových deformácií je možné metódu ERT využiť na stanovenie plošného a hĺbkového rozsahu zosuvného telesa, tvaru a priebehu šmykovej plochy, ako aj na určenie rozhraní litologických celkov. Úspešné stanovenie spomenutých parametrov závisí na dostatočnom odporovom kontraste zosuvného telesa voči okolitému neporušenému horninovému prostrediu. Pri aktívnej svahovej deformácii je možné vymedziť zosuvné teleso aj v odporovo málo kontrastnom prostredí. Dôležitým faktorom je tiež správna voľba elektródového usporiadania a elektródovej vzdialenosti profilového merania. Nasleduje niekoľko príkladov využitia metódy ERT pri prieskume svahových deformácií.

# Plošný zosuv nad obcou Chmiňany

Rozsiahly plošný zosuv nad obcou Chmiňany sa nachádza v prostredí deluviálnych sedimentov tvorených prevažne hlinami, piesčitými hlinami až hlinitými pieskami s úlomkami pieskovcov a ílovcov. Z odporového hľadiska je toto prostredie málo kontrastné. V aktívnej časti svahovej deformácie boli realizované geofyzikálne merania metódou ERT na štyroch profiloch (obr. 7.15). Účelom meraní bolo zistiť hĺbku a priebeh šmykovej plochy.



**Obr. 7.15** Situácia profilových meraní metódou ERT na plošnom zosuve nad obcou Chmiňany na podkladovej inžinierskogeologickej mape.

Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 5.5 m. Vo výsledných odporových rezoch (obr. 7.16) sa zosuvné teleso prejavilo ako prostredie s nízkou hodnotou merného odporu (do 40 Ohm.m), neporušené prostredie sa prejavilo ako prostredie s hodnotou merného odporu viac ako 60 Ohm.m.

3D vizualizácia odporových rezov poskytuje prehľadný a ucelený obraz o zosuvnom telese a priebehu šmykovej plochy (obr. 7.17).



Obr. 7.16 Inverzné odporové rezy štyroch profilových meraní na plošnom zosuve nad obcou Chmiňany.



**Obr. 7.17** Inverzné odporové rezy štyroch profilových meraní v 3D zobrazení na plošnom zosuve nad obcou Chmiňany.

## Lokalita Vranie

Na tejto lokalite sa riešil inžinierskogeologický prieskum pre domovú výstavbu a posúdenie územia z hľadiska svahových deformácií. Po geologickej stránke je územie budované flyšovým súvrstvím bradlového pásma (snežnické vrstvy), v ktorom sa striedajú tenké polohy jemnozrnných doskovitých pieskovcov so siltovitými ílovcami až slieňovcami. Kvartérny pokryv svahov tvoria deluviálne íly a kamenito-ílovité sute, ktoré sú aj hlavnou zložkou zosuvných delúvií. Realizované boli tri profilové merania (obr. 7.18) s elektródovým usporiadaním dipól-dipól a elektródovou vzdialenosťou 5.5 m (profil ERT-P1 a ERT-P3) a 3.0 m (profil ERT-P2).

Profil ERT-P1 bol situovaný pozdĺž asfaltovej cesty v oblasti existujúcej zástavby. Na odporovom reze (obr. 7.19, hore) sa preto prejavili hlavne antropogénne zásahy do horninového prostredia a prejav prípadného porušenia prostredia svahovou deformáciou nie je viditeľný.

Profily ERT-P2 a ERT-P3 (obr. 7.19) boli situované na území s plánovanou domovou výstavbou. Na odporových rezoch sa prejavil priebeh šmykových plôch svahovej deformácie ako teleso líniového tvaru z výrazne nižšou hodnotou merného odporu oproti svojmu okoliu. Nízka hodnota merného odporu je spôsobená prítomnosťou ílovitých hornín nasýtených vodou.



Obr. 7.18 Lokalita Vranie, situácia ERT profilovových meraní.



Obr. 7.19 Lokalita Vranie, inverzné odporové rezy.

#### Kaštieľ Záborské

Historická stavba kaštieľa v obci Záborské bola postihnutá prasklinami na múroch, ktoré pravdepodobne vznikli v dôsledku svahových pohybov. Merania metódou ERT boli realizované s cieľom zistiť priebeh litologických rozhraní a určiť priebeh predpokladanej šmykovej plochy svahovej deformácie. Realizovali sa 4 profilové merania (jedno cez pivničné priestory kaštieľa, profil ERT-P2). Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie dipól-dipól a elektródová vzdialenosť 2.0 m, keďže sa predpokladal plytký priebeh šmykovej plochy (obr. 7.20).



Obr. 7.20 Kaštieľ Záborské, situácia ERT profilovových meraní.

Výsledkom spracovania ERT meraní sú inverzné odporové rezy a interpretované geologické rezy (obr. 7.21 a 7.22). Na základe informácií z vrtných prác boli vyčlenené v interpretovaných geologických rezoch tri litologické celky:

- navážka charakteru ílu štrkovitého s merným odporom nad 25 Ohm.m,
- íl plastický svetlohnedý s merným odporom 2 10 Ohm.m,
- íl plastický sivý s merným odporom 2 25 Ohm.m.

V geologických interpretovaných rezoch sú červenou čiarkovanou líniou vyznačené pravdepodobné priebehy šmykových plôch, ako oblasti s veľmi nízkou hodnotou merného odporu.







**Obr. 7.21** Kaštieľ Záborské, profily ERT-P1 a ERT-P2. Inverzné odporové rezy a interpretované geologické rezy.


**Obr. 7.22** Kaštieľ Záborské, profily ERT-P3 a ERT-P4. Inverzné odporové rezy a interpretované geologické rezy.

## 7.5 Environmentálne záťaže (skládky)

Pri prieskume starých environmentálnych záťaží sa metóda ERT využíva na lokalizáciu kontaminácie unikajúcej z telesa skládky (pri dostatočnom odporovom kontraste kontaminantu a okolia), alebo na detekciu priepustných horninových komplexov (polohy štrkov a pieskov, v ktorých sa kontaminácia rýchlo šíri). Pri skládkach odpadov, ktoré sú v prevádzke sa metóda ERT dá využiť na kontrolu nepriepustnosti tesniacich stien, alebo na prieskum hĺbky nepriepustného podložia pre vybudovanie tesniacich stien. Nasleduje niekoľko príkladov využitia metódy ERT v environmentálnej problematike.

## <u>Skládka Malý Harčáš</u>

Skládka Malý Harčáš bola prevádzkovaná v rokoch 1986 – 1995. Ukladaný tu bol prevažne tuhý komunálny odpad z mesta Komárno, tuhý priemyselný odpad z miestnych priemyselných podnikov, zo zdravotníckych zariadení a z vojenských objektov – najmä pri vysťahovaní sa ruských vojsk. Skládka je voči okoliu tzv. nadúrovňovou skládkou, s rozmermi 250 x 70 m. Teleso má pozdĺžnu SV-JZ orientáciu (obr. 7.23). Skládkovanie v rámci riešenej skládky bolo uskutočňované ukladaním odpadu do priekopy (priemerná hĺbka priekopy je 3 m pod úrovňou okolitého terénu) bývalého predsunutého pevnostného systému Komárna, pričom neboli realizované žiadne technické bariéry proti vstupu vôd do telesa skládky, ani technické bariéry brániace prieniku výluhov zo skládky do jej okolia. Taktiež skládka nemala vybudovaný systém pre odvádzanie povrchových vôd, čistiareň priesakových vôd, ani monitorovacie sondy k sledovaniu znečistenia vôd, ani zariadenie pre účely monitoringu vplyvu skládky na ovzdušie. Plocha devastovaného územia dotknutého skládkovou činnosťou predstavuje 2.5 ha. V súčasnosti teleso skládky vyčnieva cca 11 m nad okolitý terén, povrch je miestami pokrytý zeminou a je zarastený burinou. V rámci prieskumu skládky boli realizované merania metódou ERT na troch profiloch

(obr. 7.23). Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie Shlumberger a elektródová vzdialenosť 5.5 m.

Z výsledných ERT rezov (obr. 7.24 až 7.26) a prieskumných geologických diel boli zostrojené interpretované geologické rezy. Z odporových rezov bolo možné identifikovať kontamináciu ako veľmi nízko odporové prostredie (menej ako 10 Ohm.m). Kontaminácia vzniká vylúhovaním skládkového materiálu a šíri sa v prostredí piesčitých štrkov pod hladinou podzemnej vody.



Obr. 7.23 Skládka Malý Harčáš, situácia ERT profilových meraní.



Obr. 7.24 Skládka Malý Harčáš, profil ERT-PF-1. Inverzný odporový rez a geologická interpretácia.



Obr. 7.25 Skládka Malý Harčáš, profil ERT-PF-2. Inverzný odporový rez a geologická interpretácia.



Obr. 7.26 Skládka Malý Harčáš, profil ERT-PF-3. Inverzný odporový rez a geologická interpretácia.

## Skládka Madzagoš

Skládka Madzagoš sa nachádza v blízkosti Komárna. Hlavné teleso skládky oválneho tvaru je ohraničené panelovou cestou a súčasne vyčnieva nad okolitý terén zhruba 3.0 m (obr. 7.27). Okolie je tvorené rôznorodým typom odpadu. Štyri profilové merania boli realizované za účelom overenia hrúbky skládkového materiálu v hlavnom telese ako aj jeho okolí. Pri meraní bolo použité elektródové usporiadanie Schlumberger a elektródová vzdialenosť 4.0 m.



Obr. 7.27 Skládka Madzagoš, situácia ERT profilových meraní.

Na profile P1 (obr. 7.28) vidieť časté striedanie odporových a vodivých polôh, čo sa pripisuje rôznorodosti skládkového materiálu, ktorý bol ukladaný do ílovitých sedimentov starého riečneho ramena. Na profile P2 (obr. 7.28) je povrchová vrstva homogénna, nepredpokladá sa tu prítomnosť skládkového materiálu s veľkou hrúbkou. Na profile P3 (obr. 7.28) je na metráži 80 – 120 m zachytený prejav hlavného telesa skládky. Skládkový materiál je vysoko vodivý, ale je izolovaný od podložia. Podobná situácia je aj na profile P4 (obr. 7.28), kde pod vysoko vodivým telesom skládky (metráž 20 – 165 m) je oblasť s výrazne vysokou hodnotou merného odporu. To spôsobuje nepriepustná fólia pod skládkou, ktorá bráni aj prieniku elektrického prúdu do prostredia. Tento predpoklad z výsledku ERT merania sa potvrdil aj vrtnými prácami, kde bola zachytená izolačná fólia pod telesom skládky.



Obr. 7.28 Skládka Madzagoš, inverzné odporové rezy 4 profilových meraní.

## Použitá literatúra:

Auken, E. and Christiansen, A.V., 2004. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. Geophysics, 69, 752-761.

Barker, R. and Moore, J., 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. The Leading Edge, 17, 1454-1458.

Bassei A. and Quezada J., 2001. Inversion of seismic data by a generalized maximum entropy method. 71st Ann. Internat. Meeting. Soc. Of Expl. Geophys. Expanded Abstract, 744- 747.

Claerbout, J.F. and Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. Geophysics, 38, 826- 844.

Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G., 1987. Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52, 289-300.

Dahlin T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. First Break 14, 275–283.

Dahlin T. and Loke M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modeling. Journal of Applied Geophysics 38, 237–249.

Daily, W. and Owen, E., 1991. Cross-borehole resistivity tomography. Geophysics, 56, 1228- 1235.

Daniels R. A. and Alberty F., 1966. Physical Chemistry, John Wiley and Sons.

DeGroot-Hedlin C. and Constable S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models from magnetotelluric data. Geophysics 38, 826–844.

Dey A. and Morrison H.F., 1979a. Resistivity modelling for arbitrary shaped twodimensional structures. Geophysical Prospecting 27, 1020-1036.

Dey A. and Morrison H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. Geophysics 44, 753-780.

Edwards, L., S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP, Geophysics, vol. 42, p. 1020-1036.

Ellis R.G. and Oldenburg D.W., 1994. Applied geophysical inversion. Geophysical Journal International 116, 5–11.

Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J. and Rijo, L., 1980. Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. Geophysics, 45, 75-93.

Gajdoš, V., 2013. Elektrické vlastnosti hornín, UK Bratislava, elektronické skriptá.

Griffiths D.H. and Barker R.D.,1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography, Geophysical Journal International, Volume 166, Issue 2, 506-517.

Inman J.R., 1975. Resistivity inversion with ridge regression. Geophysics 40, 798-817.

Karous M., 1989. Geoelektrické metody pruzkumu, SNTL, Alfa, Praha 1989

Keller G.V. and Frischknecht F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.

Kim, J.H., 2010. 4-D inversion of resistivity monitoring data using L1 norm minimization. Procs. 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6 - 8 September 2010, Zurich, Switzerland, A15.

LaBrecque, D., J., Ramirez, A. L., Daily, W. D., Binley, A. M., and Schima, S. A., 1996. Measurement Science and Technology, Volume 7, Number 3

Langer, R.E., 1933. An inverse problem in differential equations. Am. Soc. Math. J. 39, 14–28.

Li, Y. and Oldenburg, D. W., 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems, Geophys. J. Int., 109, 343-362

Li Y.G. and Oldenburg D.W., 2000. 3-D inversion of induced polarization data. Geophysics65, 1931-1945.

Lines L.R. and Treitel S., 1984, Tutorial : A review of last-squares inversion and its aplication to geophysical problems, Geophysical Prospecting, 32, 159-186

Loke M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.

Loke M.H., 2004, Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys, Geotomo Software, Malysia, <u>www.geoelectrical.com</u>.

Loke M.H., 2010. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.geoelectrical.com /downloads.php, 08.02.2011.

Loke M.H., 2019. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.geoelectrical.com /downloads.php, 08.01.2021.

Loke, M.H. and Barker, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics, 60, 1682-1690.

Loke M.H. and Barker R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, 131–152.

Loke, M.H. and Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics, 49, 149-162.

Loke, M.H., P. B. Wilkinson, P.B., Uhlemann, S.S., Chambers, J.E. and Oxby, L. S., 2014. Computation of optimized arrays for 3-D electrical imaging surveys. Geophysical Journal International, 199, 1751-1764.

Mareš, S., Gruntorád, J., Hrách, S., Karous, M., Marek, F., Matolín, M., Skopec, J., 1990. Úvod do užité geofyziky, SNTL, Alfa, Praha 1989.

McNeill, J.D., 1980. Electrical conductivity of soil and rocks, Geonics LTD.

Muiuane E.A. and Pedersen L.B., 2001. 1-D inversion of DC resistivity data using a qualitybased truncated SVD. Geophysical Prospecting 49, 387-394.

Mooney, H. M., Orellana, E., Pickett, H., and Tornheim, L., 1966. A resistivity computation method for layered earth models. Geophysics, 31(1), 192–203.

Oldenburg, D.W. and Yaoguo, Li, 1994. Inversion of induced polarization data. Geophysics 59, 1327–1341.

Olayinka, A.I. and Yaramanci, U., 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion: Journal of Applied Geophysics, 45, 63-82.

Park, S.K. and Van, G.P., 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. Geophysics, 56, 951-960.

Putiska, R., Dostal, I., Mojzeš, A., Gajdos, V., Rozimant, K., Vojtko, R., 2012. The resistivity image of the Muran fault zone (Central Western Carpathians) obtained by electrical resistivity tomography. In *Geologica Carpathica*, vol. 63, no.3, pp. 233-239.

Rodi W. and Mackie R.L., 2001. Non-linear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics 66, 174-187.

Roy, A., a Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods, Geophysics, vol. 36, p. 943-959.

Rucker, D.F., Levin, M.T. and Myers, D.A., 2007. Imaging beneath Hanford's Tank Farms with electrical resistivity geophysics - An innovative approach. WM '07 Conference, Feb. 25-March 1, 2007, Tuscon, AZ.

Rucker, D., Fink, J.B. and Loke, M.H., 2011. Environmental Monitoring of Leaks using Time Lapsed Long Electrode Electrical Resistivity. Journal of Applied Geophysics, 74, 242-254.

Rücker, C., Günther, T., Wagner, F. M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. Computers & Geosciences, Volume 109, December 2017, Pages 106-123,

Sasaki, Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipoledipole resistivity data. Geophysics 54, 254-262. Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-464.

Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. Geophysics 59, 1839.

Shima, H., 1992. 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data. Geophysics, 55, 682-694.

Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990. Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.). Cambridge University Press.

Slichter, L.B., 1933. The interpretation of the resistivity prospecting method for horizontal structures. Physics 4, 307–322.

Spiegel, R.J., Sturdivant, V.R. and Owen, T.E., 1980. Modeling resistivity anomalies from localized voids under irregular terrain. Geophysics, 45, 1164-1183.

Szalay S. and Szarka L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. Geophysical Prospecting, 2008, 56, 159–175.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E.,1990. Applied Geophysics. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770.

Tong, L. and Yang, C., 1990. Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. Geophysics, 55, 354-361.

Treitel S. and Lines L., 2001. Past present and future of geophysical inversion – A new millennium analysis. Geophysics 66, 21-24.

Wolke, R. and Schwetlick, H., 1988. Iteratively Reweighted Least Squares: Algorithms, Convergence Analysis, and Numerical Comparisons, SIAM J. on Scientific Computing, Volume 9, Issue 6, pp. 963-1132.

Zhang Z. and Zhou Z., 2002. Real-time quasi 2-D inversion of array resistivity logging data using neural networks. Geophysics 67, 517-524.

Elektronické zdroje: Neperiodické webové dokumenty a webové stránky :

Si, H., 2003. TETGEN: a 3d delaunay tetrahedral mesh generator, <u>http://tetgen.berlios.de</u>.

http://www.harbourdom.de/resi_tomo.htm [cit. 2021-01-16].

https://www.geoandsoft.com/english/geoelectrical_tomography.htm [cit. 2021-01-18].

http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html [cit. 2021-01-20].

www.geotomographie.de/html/2d.html [cit. 2021-01-21].

https://www.agiusa.com/agi-earthimager-2d [cit. 2021-01-08].

http://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondres2d/

[cit. 2021-01-24].

https://www.researchgate.net/publication/235978635_Boundless_Electrical_R esistivity_Tomography_BERT_v_20_Open_Access_Software_for_Advanced_ and_Flexible_Imaging____[cit. 2021-01-14].

<u>www.zonge.com</u> [cit. 2021-01-19].

www.geoelectrical.com [cit. 2021-01-25].

https://www.aarhusgeosoftware.dk/workbench-ert-ip-module [cit. 2021-01-27].