

# Aplicabilitatea Metodelor Geofizice de Suprafață în Ingineria Geotehnică

---

TEZĂ DE DOCTORAT

**Autor: Ing. Ungureanu Constantin, M.Sc.**  
**Conducător Științific: Prof. Dr. Ing. Anton Chirică**

**București**

**01/09/2017**

## CUPRINS

Cuprins .....	1
Cuprinsul figurilor.....	4
Cuprinsul tabelelor.....	12
1    Introducere.....	13
2    Stadiul cunoașterii .....	15
2.1    Metodele seismice.....	17
2.2    Metoda rezistivității electrice.....	21
2.3    Metode electromagnetice .....	23
2.4    Ground-Penetrating Radar ( <i>GPR</i> ).....	24
2.5    Metoda gravimetrică .....	26
2.6    Metoda magnetometrică.....	27
2.7    Aplicarea metodelor geofizice în investigarea terenului de fundare.....	28
3    Metoda rezistivității aparente .....	35
3.1    Principiul fizice ale metodologiei .....	35
3.2    Proprietățile electrice ale pământurilor .....	37
3.3    Metodologia determinării rezistivității aparente .....	38
3.4    Dispozitive de lucru .....	39
3.5    Metoda sondajului electric vertical ( <i>SEV</i> ).....	41
3.6    Metoda profilării .....	45
3.7    Tomografia (geo)electrică.....	46
4    Metode seismice .....	50
4.1    Elementele unei seismice .....	50
4.2    Principiile fizice ale metodei.....	51
4.2.1    Principiul lui Huygens .....	51
4.2.2    Principiul lui Fermat .....	51
4.2.3    Principiul superpoziției (suprapunerii efectelor).....	51
4.2.4    Principiul reciprocității .....	52
4.2.5    Legea reflexiei și refracției .....	52
4.3    Tipuri de unde seismice .....	53
4.3.1    Unde de volum .....	53
4.3.2    Unde de suprafață.....	54
4.4    Parametrii undelor seismice .....	55
4.4.1    Frecvența, perioada și lungimea de undă .....	55
4.4.2    Spectrul de frecvență. Transformata Fourier .....	57
4.5    Viteza de propagare a undelor seismice.....	60

4.6	Atenuarea undelor seismice .....	62
4.6.1	Divergența sferică: .....	63
4.6.2	Reflexia și refracția .....	63
4.6.3	Absorbția .....	65
4.6.4	Interferența undelor seismice .....	65
4.7	Rezoluția spațială .....	65
4.8	Metode de investigare seismică .....	66
4.8.1	Seismică de refracție .....	66
4.8.2	Seismică de reflexie .....	69
4.9	SASW.....	77
4.10	MASW .....	79
5	Studii de caz.....	83
5.1	Identificarea cavitațiilor în zone urbane - Studiu de caz privind zona bulevardului Coposu, București .....	83
5.1.1	Introducere .....	83
5.1.2	Achiziția datelor.....	83
5.1.3	Procesarea datelor și interpretarea rezultatelor .....	87
5.1.4	Discuții.....	91
5.2	Identificarea cavitațiilor în medii carstice - Studiu de caz privind Peștera Ponoarele.....	92
5.2.1	Introducere .....	92
5.2.2	Lucrări de investigare.....	93
5.2.3	Interpretare și discuții.....	95
5.3	Investigarea zonelor afectate de fenomene de instabilitate - Studiu de caz privind zona Mănăstirea Dealu, jud. Dâmbovița .....	98
5.3.1	Introducere .....	98
5.3.2	Investigații realizate .....	104
5.3.3	Discuții și interpretări.....	112
5.4	Utilizarea metodelor geofizice și geotehnice pentru caracterizarea suprafețelor de alunecare – Studiu de caz privind platforma generatorului eolian WT09, com. Babadag, jud. Tulcea.....	114
5.4.1	Introducere .....	114
5.4.2	Informații de arhivă și situația actuală .....	114
5.4.3	Achiziția datelor și investigațiile de teren.....	116
5.4.4	Analiza numerică .....	120
5.4.5	Discuții .....	123
5.5	Investigarea adâncimii și continuității spațiale a acviferelor de suprafață - Studiu de caz privind secțiunea 2A Ogra-Câmpia Turzii a Autostrăzii Brașov-Târgu Mureș .....	125
5.5.1	Introducere .....	125
5.5.2	Achiziția și procesarea datelor .....	127
5.5.3	Discuții .....	132

5.6	Investigații geofizice utilizate în determinarea parametrilor mecanici ai terenului de fundare – Studiu de caz privind zona Universitate, București .....	133
5.6.1	Introducere .....	133
5.6.2	Studiu comparativ MASW-SCPTu .....	135
5.6.3	Discuții .....	137
5.7	Utilizarea investigațiilor seismice de suprafață pentru identificarea stratificație de calcul. Studiu de caz Calea Dorobanților, Cluj-Napoca, jud. Cluj .....	138
5.7.1	Descrierea amplasamentului și investigații de teren .....	138
5.7.2	Rezultate obținute .....	139
5.7.3	Discuții .....	142
6	Contribuții personale .....	145
7	Concluzii și direcții viitoare de cercetare .....	148
	Bibliografie .....	151

## CUPRINSUL FIGURILOR

Fig. 2.1: Clasificare domeniilor de aplicabilitate ale metodelor geofizice după Reynolds, 1997 .....	15
Fig. 2.2: Încadrarea geofizicii geotehnice în domeniile de investigare geofizică (adaptat după Reynolds,1997) .....	17
Fig. 2.3: Propagarea radială a energiei mecanice dintr-un punct sursă într-un mediu izotrop .....	18
Fig. 2.4: Înregistrare seismică cu 24 de geofoane.....	19
Fig. 2.5: Exemplu de unde simplu reflectate .....	19
Fig. 2.6: Formarea undelor alunecătoare și frontale în cazul unghiului critic de incidență.....	20
Fig. 2.7: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență redusă.....	20
Fig. 2.8: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență medie .....	20
Fig. 2.9: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență mare .....	21
Fig. 2.10: Distribuția curentului în teren în cazul folosirii unui dispozitiv cu 4 electrozi ( dispozitiv ABMN) .....	21
Fig. 2.11: Principiul general al metodelor electromagnetice (după Grant și West 1965).....	23
Fig. 2.12: Principiul metodei GPR.....	24
Fig. 2.13 Prezentarea schematica a unei radargrame corespunzătoare cazului prezentat în Fig. 2.12 .....	25
Fig. 2.14: Principiul metodei gravimetrice .....	26
Fig. 2.15: Principiul metodei magnetometrice. Exemple de anomalii magnetice .....	28
Fig. 2.16: Metode geofizice recomandate pentru diferite aplicații (după ASTM D6429/99).....	29
Fig. 2.17 Numărul autorităților care au folosit investigații geofizice (nuanțe de verde) față de cele care nu au le-au folosit (nuanțe de roșu) (după Sirles 2006). .....	30
Fig. 2.18 Metodele geofizice ca metode de investigarea a mediului subteran (după Sirles 2006) .....	31
Fig. 2.19 Avantajele folosirii metodelor geofizice (după Sirles 2006).....	31
Fig. 2.20 Metodele geofizice aplicate în domeniul ingineriei drumurilor (după Sirles 2006).....	32
Fig. 2.21 Domenii în care au fost aplicate metodele geofizice (după Sirles 2006) .....	33
Fig. 2.22 Inconveniente ale aplicării metodelor geofizice .....	33
Fig. 3.1: A-simplificare schematică a trecerea curentului electric (I) printr-un mediu rezistiv( $\rho$ ) și înregistrarea unei diferențe de tensiune(V) între cele două fețe opuse, B- circuit electric echivalent (R- rezistență) (după Reynolds 1998) .....	36
Fig. 3.2: Distribuția suprafețelor echipotențiale în jurul unui punct sursă.....	36
Fig. 3.3: Distribuția suprafețelor echipotențiale.....	37
Fig. 3.4: Dispozitiv ABMN si distribuția curentului electric in pământ.....	38
Fig. 3.5: Intervale de variație a rezistivității pentru diferite tipuri de roci si pământuri (după Loke 2006)	39

Fig. 3.6: Schema dispozitivului Wenner .....	40
Fig. 3.7: Schema dispozitivului Schlumberger .....	40
Fig. 3.8: Schema dispozitivului Dipol-Dipol .....	41
Fig. 3.9: Partea Stângă - Etape de realizare a sondajului electric vertical, prin păstrarea poziție electrozilor de potențial (MN) și creșteri succesive ale distanței dintre electrozii de curent (AB); Partea Dreaptă - Obținerea valorilor rezistivității aparente și trasarea curbei SEV (după Marescot 2008). .....	42
Fig. 3.10: Partea Stângă – Zonă de investigare care cuprinde un singur strat de pământ; Partea Dreaptă – Zonă de investigare ce traversează două strate de pământ.....	43
Fig. 3.11: Curbe SEV pentru zone de investigare care interceptează trei strate cu rezistivități diferite.....	43
Fig. 3.12: Etape în procesarea unei SEV .....	44
Fig. 3.13: Etape de realizare a profilării electrice prin păstrarea geometriei dispozitivului de măsură și re poziționarea acestuia în nodurile unui caroi aj echidistant sau în lungul unui profil(după Marescot 2008). .....	45
Fig. 3.14: Variația profilurilor de rezistivitate cu adâncimea de investigare (adâncimea de investigare mărin du-se odată cu creștere intervalul de dispunere al electrozilor în dispozitivul de măsură) (după Marescot 2008). .....	46
Fig. 3.15: Dispunerea electrozilor (1-19) în lungul profilului de măsură și dispunere rezistivităților măsurate în pseudo secțiunea de rezistivitate aparentă .....	47
Fig. 3.16 Pseudo-sectiuni de rezistivitate ale aceluiași model geologic .....	48
Fig. 3.17: Modele geofizice rezultate in urma procesării pseudo-secțiunilor de rezistivitate .....	49
Fig. 4.1 Propagarea energiei seismice dintr-un punct sursă (după Telford 1967) .....	50
Fig. 4.2: Reprezentarea fronturilor de undă conform principiului lui Huygens .....	51
Fig. 4.3 Poziția frontului de undă la momentul $t_0$ .....	52
Fig. 4.4 Poziția frontului de undă la momentul $t_0+\Delta t$ .....	52
Fig. 4.5 Poziția frontului de undă la momentul $t_0+2\Delta t$ .....	52
Fig. 4.6 Poziția frontului de undă la momentul $t_0+3\Delta t$ .....	52
Fig. 4.7 Apariția fenomenului de reflexie și refracție .....	53
Fig. 4.8: Propagarea undei P .....	54
Fig. 4.9: Propagarea undei S .....	54
Fig. 4.10: Propagarea undei Rayleigh .....	55
Fig. 4.11: Propagarea undei Love .....	55
Fig. 4.12 Determinarea perioadei de oscilație a unei unde pe o înregistrare seismică .....	56
Fig. 4.13: Determinarea perioadei, T (pe o trasă seismică), și a vitezei de propagare, funcție de dx și dt (pe un grup de trase), pentru o undă seismică .....	57

Fig. 4.14 Trasă seismică reprezentată în domeniul timp.....	58
Fig. 4.15: Spectrul de amplitudine al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale.....	59
Fig. 4.16: Spectrul de amplitudine al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale, cu indicarea intervalelor de frecvență în care este concentrat semnalul. ....	60
Fig. 4.17: Spectrul de fază al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale .....	60
Fig. 4.18: Divergența sferică a energiei eliberată în sursă .....	63
Fig. 4.19: Unda incidentă, unda reflectată și unda refractată;.....	64
Fig. 4.20: Propagarea undelor la incidență critică .....	64
Fig. 4.21: Model de propagare a undelor seismice în cazul unei secvențe de trei strate orizontale .....	66
Fig. 4.22: Grafic teoretic obținut după procesarea înregistrărilor seismice corespunzătoare Fig. 4.21 .....	66
Fig. 4.23: Model de propagare a undelor seismice în cazul prezentei unui strat reflector înclinat .....	67
Fig. 4.24: Hodograf teoretic pentru cazul unei limite înclinate, graficul prezentând două înregistrări, cu împușcare la capăt.....	67
Fig. 4.25: Profil geologic și traseul undelor .....	68
Fig. 4.26: Hodograf corespunzător secțiunii litologice din Fig. 4.25 .....	68
Fig. 4.27: Hodograf corespunzător unei secvențe litologice strat superior cu viteză mare-strat inferior cu viteză redusă.....	68
Fig. 4.28: Hodograf corespunzător unei secvențe litologice strat superior cu viteză scăzută-strat inferior subțire cu viteză foarte mare .....	69
Fig. 4.29: Conversia datelor din format .dat in .seg-y .....	70
Fig. 4.30: Exemplu de seismograma prezentata în domeniul (t,x), stanga, si (f,k), dreapta. ....	71
Fig. 4.31: Exemplu de înregistrare seismică după aplicarea corecțiilor statice. ....	72
Fig. 4.32: Seismograma înainte (sus) si după (jos) aplicarea filtrului fk. ....	73
Fig. 4.33: Analiza de viteză efectuată pe o colecție de trase cu punct de reflexie comun.....	74
Fig. 4.34: Analiza de viteză si corecție NMO efectuate pe o colecție de trase cu punct de reflexie comun. ....	74
Fig. 4.35: Secțiune seismică obținută folosind viteza 500 m/s. ....	75
Fig. 4.36: Secțiune seismică obținută folosind viteza 600 m/s. ....	75
Fig. 4.37: Secțiune seismică obținută folosind viteza 700 m/s. ....	75
Fig. 4.38: Secțiune seismică obținută folosind viteza 800 m/s. ....	76
Fig. 4.39: Secțiune seismică obținută folosind viteza 900 m/s. ....	76
Fig. 4.40: Secțiune seismică nemigrată reprezentată în timp.....	77
Fig. 4.41: Secțiune seismică nemigrată reprezentată în adâncime.....	77

Fig. 4.42: Exemplu de dispunere a geofanelor și obținerea datelor dintr-o pereche de receptori. Unul din receptorii utilizați trebuie să se afle la mijlocul distanței dintre sursă și celălalt receptor pereche (Ólafsdóttir 2014) .....	78
Fig. 4.43 Modul de propagare al undelor Rayleigh .....	80
Fig. 4.44: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență redusă.....	80
Fig. 4.45: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență medie .....	80
Fig. 4.46: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență mare .....	81
Fig. 4.47: Exemplu de curba de dispersie .....	81
Fig. 4.48: Caracterul dispersiv al undelor de suprafață.....	81
Fig. 4.49: Exemplu de spectru de viteză de fază-frecvență .....	82
Fig. 4.50: Exemplu de distribuție a vitezelor undelor pe adâncime.....	82
Fig. 5.1: Dinamica zonei Piața Unirii în ultimii 50 de ani .....	83
Fig. 5.2: Dispunerea profilurilor de investigație electrică în cele două etape de achiziție .....	84
Fig. 5.3: Efectul soluției saline asupra rezistivității contactelor .....	84
Fig. 5.4: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 1 (se observă o bună corelație între cele 3 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliei de maxim fiind foarte apropiate).....	85
Fig. 5.5: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 2 (se observă o slabă corelație între cele 3 profile, poziția și dimensiunea anomaliei fiind foarte incerte).....	85
Fig. 5.6: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 3 (se observă o bună corelație între cele 4 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliei de maxim fiind foarte apropiate).....	86
Fig. 5.7: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 4 (se observă o bună corelație între cele 4 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliei de maxim fiind foarte apropiate).....	87
Fig. 5.8: Estimarea poziției cavității pe baza datelor achiziționate.....	88
Fig. 5.9: Comparație între distribuția orizontală estimată a cavității și dimensiunile reale .....	89
Fig. 5.10: Cavitare reală dezvelită în amplasament .....	89
Fig. 5.11: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 1 .....	90
Fig. 5.12: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 2 .....	90
Fig. 5.13: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 3 .....	91
Fig. 5.14: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 4 .....	91
Fig. 5.15: Schiță Complexului Carstic Ponoarele( <a href="http://www.cetateabaniei.com">www.cetateabaniei.com</a> ) .....	92
Fig. 5.16 Intrarea în Peștera Zăton.....	93
Fig. 5.17: Poziția profilurilor ERT.....	93
Fig. 5.18: Profil 1 – secțiune de rezistivitate electrică .....	94
Fig. 5.19: Profil 2 – secțiune de rezistivitate electrică .....	94



Fig. 5.20: Model sintetic de rezistivitate (jos) care aproximează în mod grosier secțiunea de rezistivitate obținută în urma procesării înregistrărilor de pe profilul 1 (sus) .....	95
Fig. 5.21: Secțiunea de rezistivitate aparentă a modelului sintetic .....	95
Fig. 5.22 Secțiune de rezistivitate obținută în urma inversiei pseudo-secțiunii prezentate în Fig. 5.21, cu reprezentarea conturilor corpurilor rezistive din modelul inițial .....	96
Fig. 5.23 Indicarea poziției posibilelor goluri carstice pe cele două secțiuni de rezistivitate electrică măsurate .....	96
Fig. 5.24: Model topografic 3D al Dealului Peșterii, cu indicarea (culoare roșie) a galeriilor de peșteră cartate prin tehnici speologice.....	97
Fig. 5.25 Suprapunerea secțiunilor de rezistivitate peste poziția cunoscută a golurilor subterane.....	97
Fig. 5.26: Poziția zonei analizate (Google Earth) .....	98
Fig. 5.27: Cadrul geologic al zonei studiate (Harta geologică a României 1:200.000 foaia Târgoviște, Institutul Geologic Român).....	98
Fig. 5.28 Tipuri litologice asociate vârstelor geologice (Harta geologică a României 1:200.000 foaia Târgoviște, Institutul Geologic Român).....	99
Fig. 5.29: Harta topografică a zonei studiate .....	99
Fig. 5.30: Porțiuni ale drumului afectate de alunecări de teren .....	100
Fig. 5.31: Detaliu morfologie „Zona 1” .....	100
Fig. 5.32: Detaliu – Suprafața de cedare „Zona 1” (poza este făcută în sensul de coborâre).....	101
Fig. 5.33: Detaliu – Suprafața de cedare „Zona 1” (poza este făcută în sensul de urcare).....	101
Fig. 5.34 Detaliu morfologic „Zona 2” .....	102
Fig. 5.35: Detaliu asupra zidului de sprijin și rigola din spatele acestuia.....	102
Fig. 5.36: Poziția stației de tratare.....	103
Fig. 5.37: Bazin de colectare al apelor uzate (volum aproximativ 300 mc) .....	103
Fig. 5.38: Nivelul apei în bazinul colector.....	103
Fig. 5.39: Stația de tratare .....	104
Fig. 5.40: Șiroi de apă ce se scurge pe versant de la stația de tratare .....	104
Fig. 5.41 Poziția forajelor geotehnice .....	105
Fig. 5.42 Realizarea forajului BH1 .....	105
Fig. 5.43 Litologia interceptată în cele două foraje suprapusă peste profilul topografic al terenului.....	106
Fig. 5.44: Poziția profilurilor realizate în zona afectată de fenomenele de instabilitate.....	106
Fig. 5.45 Profilul 1 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos) .....	107

Fig. 5.46 Profilul 2 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos) .....	107
Fig. 5.47 Poziționarea forajelor pentru interpretarea profilelor de tomografie electrică .....	107
Fig. 5.48 Foreză manuală 70 mm.....	108
Fig. 5.49 Umplutură eterogenă .....	108
Fig. 5.50 Secțiunea de rezistivitate a profilului 1, cu indicarea anomaliilor de maxim.....	109
Fig. 5.51 Secțiunea de rezistivitate a profilului 2 .....	109
Fig. 5.52 Litologia interceptată în forajele BH1, F4 și BH2 (prelungită cu informația din profilul electric 2) suprapusă peste profilul topografic al terenului .....	109
Fig. 5.53: Pozițiile profilurilor 3 și 4 .....	110
Fig. 5.54 Profilul 3 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos) .....	110
Fig. 5.55 Profilul 4 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos) .....	111
Fig. 5.56 Nisip mediu gălbui evidențiat în zona anomaliilor de maxim.....	111
Fig. 5.57 Argilă cafenie interceptată în zonele din exteriorul anomaliilor .....	111
Fig. 5.58: Dispunerea zonelor în care au fost interceptate depozitele nisipoase .....	112
Fig. 5.59: Schița modelului geologic .....	113
Fig. 5.60: Execuția platformei din umplutură necontrolată peste stratul de pământ vegetal .....	114
Fig. 5.61: Vedere laterală a platformei (linia roșie - limita platformei; liniile albastre – crăpături la suprafață) .....	115
Fig. 5.62: Crăpături dezvoltate perpendicular direcției de alunecare .....	115
Fig. 5.63: Dispunerea în plan a investigațiilor realizate (F – Foraj geotehnic, PDG – Penetrare dinamică grea; SEIS – profil seismic; ERT – tomografie electrică de rezistivitate) .....	116
Fig. 5.64: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 1 (tomografie electrică) ..	117
Fig. 5.65: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 2 (tomografie electrică) ..	117
Fig. 5.66: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 3 (tomografie electrică) ..	117
Fig. 5.67: Suprapunerea rezultatelor Penetrărilor Dinamice Grele (PDG 5, PDG2, PDG 1, respectiv PDG4, PDG5 și PDG6)și a profilurilor geo-electrice (ERT1 și ERT2) în zona platformei de lucru .....	118
Fig. 5.68: Profilul geo-electric ERT 3, situat la piciorul taluzului.....	119
Fig. 5.69: Diagramele de variație a numărului de bătăi cu adâncimea pentru încercările de Penetrare Dinamică Grea .....	119
Fig. 5.70: Profilurile de variație în adâncime a vitezei undelor secundare .....	120
Fig. 5.71: Geometria stratificației modelului tridimensional .....	121

Fig. 5.72: Geometria modelului tridimensional realizat și discretizarea acestuia .....	121
Fig. 5.73: Vedere izometrică a rezultatelor calculului (deformații specifice plastice – Roșu: 39.8%, Albastru: 0.0%) .....	122
Fig. 5.74: Secțiune transversală prin model prezentând rezultatele calculului (deformații specifice plastice – Roșu: 39.8%, Albastru: 0.0%) .....	122
Fig. 5.75: Vedere izometrică a rezultatelor calculului (deformații totale – Roșu: 0.64m, Albastru: 0.00m) .....	122
Fig. 5.76: Secțiuni transversale prin model prezentând rezultatele calculului (deformații totale – Roșu: 0.64m, Albastru: 0.00m) .....	123
Fig. 5.77 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 1 .....	124
Fig. 5.78 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 2 .....	124
Fig. 5.79 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 3 .....	124
Fig. 5.80: Amplasamentul zonei studiate (fragment hartă topografică 1:25.000) .....	125
Fig. 5.81 Plan de situație a captării Luduș; curbe hidroizohipse (Constantinescu 1980) .....	126
Fig. 5.82 Profil hidrogeologic prin terasa Mureșului (Constantinescu 1980).....	127
Fig. 5.83: Profilul profilului de tomografie electrică .....	127
Fig. 5.84: Modele de rezistivitate obținut .....	128
Fig. 5.85: Histograma distribuției valorilor de rezistivitate .....	129
Fig. 5.86: Model de distribuție a rezistivității electrice cu indicarea poziției probabile a stratului acvifer prin linii albe punctate .....	130
Fig. 5.87 Măsurarea nivelului piezometric .....	130
Fig. 5.88 Hartă reactualizată a variației nivelului piezometric cu indicarea poziției profilului electric realizat .....	130
Fig. 5.89 Poziția forajului realizat suprapus peste secțiunea de rezistivitate .....	131
Fig. 5.90 Litologia amplasamentul observată în foraj .....	131
Fig. 5.91 Clasificarea amplasamentelor în funcție de $V_{S30}$ conform Eurocod 8-1.1.....	133
Fig. 5.92 Amplasament tip A ( $V_{S30}=1200\text{m/s}$ ) .....	134
Fig. 5.93 Amplasament tip C ( $V_{S30}=190\text{m/s}$ ) .....	134
Fig. 5.94: Profil seismic vertical ( $V_s$ ) obținut prin metoda SCPTu.....	135
Fig. 5.95 Curba de dispersie caracteristică înregistrării seismice .....	136
Fig. 5.96: Profil seismic vertical ( $V_s$ ) obținut prin metoda MASW .....	136
Fig. 5.97 Profiluri seismice verticale ( $V_s$ ) obținute prin metoda SCPTu (negru) și MASW (roșu).....	137
Fig. 5.98: Disponerea punctelor de investigare în amplasament .....	138
Fig. 5.99 Curbele de dispersie selectate în cazul profilului MASW1 .....	139

Fig. 5.100 Profil de viteze $V_s$ obținut în urma procesării profilului MASW1 .....	139
Fig. 5.101 Curbele de dispersie selectate în cazul profilului MASW2.....	140
Fig. 5.102 Profil de viteze $V_s$ obținut în urma procesării profilului MASW2 .....	140
Fig. 5.103: Coloana litologică aferentă F01, suprapusă cu rezultatele PDG01 și profilul mediu MASW	141
Fig. 5.104: Coloana litologică aferentă F02, suprapusă cu rezultatele PDG02 și profilul mediu MASW	141
Fig. 5.105: Coloana litologică aferentă F03, suprapusă cu rezultatele PDG03 și profilul mediu MASW	141
Fig. 5.106: Coloana litologică aferentă F04, suprapusă cu rezultatele PDG04 și profilul mediu MASW	141
Fig. 5.107: Coloana litologică aferentă F05, suprapusă cu rezultatele PDG05 și profilul mediu MASW	142
Fig. 5.108: Coloana litologică aferentă F06, suprapusă cu rezultatele PDG06 și profilul mediu MASW	142
Fig. 5.109: Coloana litologică medie aferentă F01 ÷ F06, suprapusă cu rezultatele PDG01 ÷ PDG06 și profilul mediu MASW .....	143
Fig. 5.110: Coloana litologică medie aferentă F03&F04, suprapusă cu rezultatele PDG03&PDG04 și profilul mediu MASW .....	143
Fig. 5.111: Corelații între DPH și $V_s$ pe profilul mediu, calculate pe baza relațiilor din literatură.....	144
Fig. 5.112: Comparație între corelații din literatură și rezultatele MASW .....	144

## CUPRINSUL TABELELOR

Tab. 2.1 Constanta dielectrică ( $k$ ), conductivitatea electrică ( $\sigma$ ), viteza și atenuarea ( $\alpha$ ) observată în diferite medii de propagare, pentru frecvența de 100MHz.....	25
Tab. 2.2 Adâncime medie de investigare a metodei GPR în funcție de frecvența antenei .....	25
Tab. 4.1: Intervale de variație ale vitezei undei principale în funcție de tipul de rocă .....	61
Tab. 4.2: Intervale de variație ale vitezei undei principale pentru diferite medii de propagare .....	61
Tab. 5.1: Valorile caracteristice ale parametrilor fizico-mecanici ai straturilor întâlnite .....	121
Tab. 5.2: Parametrii Archie pentru estimarea factorului de formațiune .....	129
Tab. 5.3: Valori de rezistivitate calculate .....	129

## 1 INTRODUCERE

Investigarea terenului de fundare este un domeniu de foarte mare importanță în cadrul ingineriei geotehnice, fiind baza de plecare pentru orice decizie sau soluție inginerească. În mod clasic, fiind și reglementată de normativele în vigoare (NP074-2014), cercetarea terenului de fundare se bazează în special pe încercări pe probe de pământ sau rocă prelevate din foraje, respectiv încercări in situ, modelul geotehnic al terenului fiind obținut prin interpolarea sau extrapolarea datelor punctuale obținute lucrărilor de investigare. De cele mai multe ori, mai ales în cazul unor puncte de investigare îndepărtate sau a unui mediu geologic (sau antropic) foarte complex, aceste modele se îndepărtează foarte mult de situația reală din amplasament, rezultând soluții necorespunzătoare, costuri ridicate, dificultăți tehnice și tehnologice pe durata execuției, chiar și la punerea în pericol a celor care își desfășoară activitatea pe acel amplasament sau a obiectivelor învecinate.

În vederea reducerii diferențelor între modelul geotehnic extrapolat și cel real, teza de față consideră obținerea de noi informații pe baza metodelor geofizice, ce permite achiziția unor date distribuite atât în plan, cât și în adâncime, confirmate prin intermediul metodelor clasice. Acest tip de utilizare a metodelor geofizice poate fi încadrat sub denumirea de „geofizică geotehnică”, ramură a întregului ansamblu de tehnici de investigare geofizică de suprafață.

Prezenta lucrare, considerând metoda rezistivității electrice (tomografie de rezistivitate electrică), respectiv metoda seismică (reflexie, refracție și analiza spectrală a undelor de suprafață), analizează posibilitățile de utilizare ale acestora în vederea identificării unor obiective diferite, în condiții variate, discutând calitatea rezultatelor obținute, subliniind avantajele și dezavantajele fiecăreia funcție de obiectivul propus, precum și corelarea datelor cu cele obținute pe baza tehnicilor „clasice” de investigare.

Lucrarea este structurată în șapte capitole după cum urmează:

Capitolul 1 reprezintă o introducere în problematică investigațiilor geofizice de suprafață și prezintă structura lucrării

Capitolul 2 prezintă stadiul cunoașterii referitor la aplicabilitatea metodelor geofizice de suprafață în ingineria geotehnică. În acest capitol sunt prezentate succint metodele geofizice de suprafață, reglementările internaționale referitoare la acestea cât și un studiu referitor la experiența diverșilor specialiști ce au beneficiat de investigații geofizice.

Capitolele 3 și 4 tratează într-un mod amănunțit cele mai utilizate metode geofizice în ingineria geotehnica, respectiv metoda electrică și metoda seismică. În aceste două capitole sunt prezentate principiile teoretice ce stau la baza acestor metode, tehnici de achiziție și procesare a datelor, termenii specifici, domenii de aplicabilitate, avantaje, dezavantaje etc.

Capitolul 5 prezintă șapte studii de caz semnificative în care au fost aplicate cu succes metodele geofizice în diferite probleme inginerești cum ar fi :

- identificarea cavităților în zone urbane;
- identificarea cavităților în medii carstice;
- investigarea zonelor afectate de fenomene de instabilitate generate de cauze antropice;
- utilizarea metodelor geofizice și geotehnice pentru caracterizarea suprafețelor de alunecare;
- investigarea adâncimii și continuității spațiale a acviferelor de suprafață;
- investigații geofizice utilizate în determinarea parametrilor mecanici ai terenului de fundare;
- utilizarea investigațiilor seismice de suprafață pentru identificarea stratificație de calcul.

În ultimele două capitole, respectiv 6 și 7 sunt prezentate contribuțiile personale ale autorului și concluziile finale ale tezei de doctorat.

Bibliografia care a stat la baza lucrării se constituie dintr-un număr de optsprezece articole, treisprezece cărți și zece normative de specialitate

## 2 STADIUL CUNOAȘTERII

Geofizica, în sensul strict al cuvântului, este știința care aplică legile fizicii (ce stau la baza metodelor geofizice) pentru investigarea Pământului, interesul fiind direcționat către litosferă, partea solidă a Pământului (Ioane, 2006). Spre deosebire de geologie, care studiază Pământul pe baza observațiilor directe asupra diferitelor tipuri de roci, în aflorimente sau pe baza carotelor obținute din foraje, geofizica se bazează pe măsurarea indirectă (de cele mai multe ori de la suprafață terenului) a proprietăților fizice (Dobrin, 1976) (densitate, conductivitate/rezistivitate electrică, viteză de propagare a undelor mecanice, radioactivitate etc.) ale diferitelor tipuri petrografice. În urma procesării și interpretării datelor se obținâne un model geofizic.

În funcție de scara la care se realizează măsurătorile, geofizica este în mod tradițional separată în trei domenii majore (Ioane, 2006):

- a) **Geofizica planetară**, folosită în studii geofizice la scară regională, continentală și globală, această ramură a geofizicii stând la baza principiilor actuale ale geologiei teoretice.
- b) **Geofizica de explorare**, folosită în special pentru investigarea structurilor geologice de adâncime (adâncimi de ordinul kilometrilor) pentru localizarea și evaluarea acumulărilor de substanțe minerale utile. Ca urmare a creșterii continue a consumului de resurse energetice și metale la scara planetară, geofizica de explorare a avut o dezvoltare spectaculoasă în ultimii 50 de ani.
- c) **Geofizica de suprafață** (Near Surface Geophysics) care, după cum sugerează și numele, se referă la aplicarea metodelor geofizice pentru evidențierea structurilor geologice și a anomaliilor geofizice localizate în apropierea suprafeței terestre (mai puțin de 30m). Deși folosește aceleași principii fizice, se diferențiază de geofizica de explorare în primul rând prin natura corpurilor geologice (și/sau antropice) investigate, prin adâncimea zonei de investigare (adâncimi de ordinul zecilor de metri) și prin domeniul de aplicabilitate.

Reynolds (Reynolds, 1997) clasifică metodele de investigare geofizică din punctul de vedere al aplicabilității acestora (Fig. 2.1):

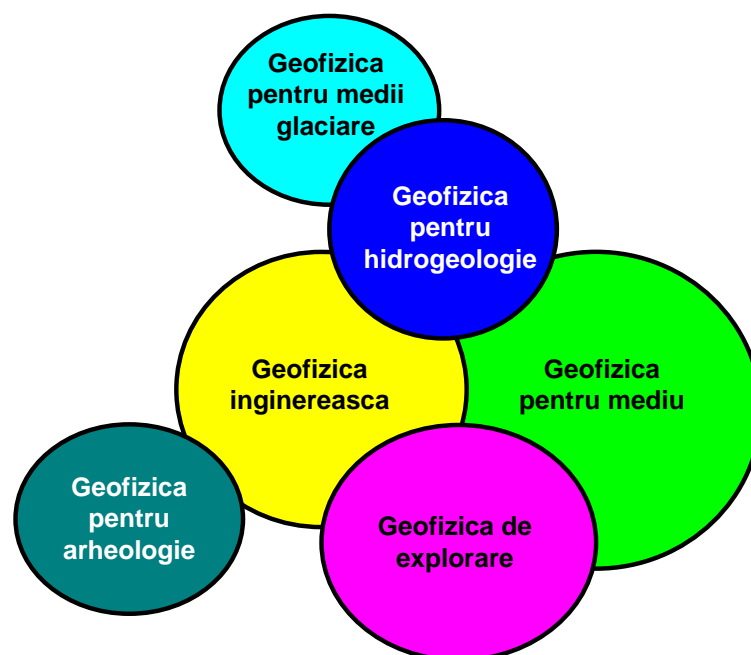


Fig. 2.1: Clasificare domeniilor de aplicabilitate ale metodelor geofizice după Reynolds, 1997



Geofizica de suprafață se poate clasifica la rândul ei în funcție de tipul măsurătorilor efectuate și de domeniul de aplicabilitate, în literatura de specialitate fiind utilizați următorii termeni:

- **Geofizică de mediu (Environmental Geophysics)** cu o mare aplicabilitate în domeniul protecției mediului și care se referă în general la identificarea surselor de contaminare și zonelor contaminate (pământuri, ape subterane), cât și la monitorizarea în timp a acestora.

- **Geofizică inginerască (Engineering Geophysics)** cu aplicabilitate în domeniul ingineresc, această ramură fiind orientată în special spre investigarea structurii geologice de suprafață și determinarea parametrilor fizico-mecanici (porozitate, umiditate, caracteristici de deformabilitate, grad de fisurare a rocilor etc.). În unele lucrări de specialitate apare și termenul „Geotechnical Geophysics” (Giovanni, 2008), dar este mai rar utilizat.

În literatura de specialitate din România nu se face distincție între cele două ramuri ale geofizicii de suprafață, termenul de „**geofizica mediului înconjurător**” sau „**geofizică ambientală**” incluzându-le pe amândouă.

- **Geofizică arheologică (Archaeo-geophysics)** caracterizată prin tehnici specifice utilizate în exclusivitate pentru investigarea siturilor arheologice.

Chiar dacă a fost folosită încă de la începutul secolului XX concomitent cu geofizica de explorare, geofizica de suprafață se diferențiază ca o ramură de sine stătătoare abia de la începutul anilor '90 datorită creșterii interesului pentru protecția mediului înconjurător. Metodele geofizice au fost intens folosite în special pentru identificarea zonelor contaminate cu diferiți poluanți, în scopul remedierii acestor areale. Primele utilizări ale metodele geofizice în inginerie (în special prin metode seismice) au fost considerate în vederea investigării amplasamentelor marilor baraje și a tunelurilor, în scopul determinării variației litologice și a gradului de fisurare ale masivelor de roci, iar mai apoi la monitorizarea acestora (Butler, Llopis, & Deaver, 1989).

Primii specialiști care au activat în domeniul geofizicii de suprafață au fost inginerii geofizicieni care au profesat inițial în domeniul geofizicii de explorare, reorientându-se apoi spre probleme de mediu sau ingineresti. În anul 1992 a fost înființată asociația profesională internațională „The Environmental and Engineering Society” (EEGS). Metodele geofizice existente au fost adaptate pentru adâncimi de investigare reduse și pentru identificarea unor obiective de dimensiuni mici, cele mai importante modificări ale aparaturii și ale dispozitivelor de măsură fiind în scopul creșterii rezoluției spațiale și temporale.

Spre deosebire de tehnicile clasice de investigare bazate pe informații punctuale obținute din foraje (tehnică invazivă pentru mediul înconjurător), metodele geofizice se bazează pe tehnici non-invazive cu ajutorul cărora se obțin informații cu o largă răspândire spațială (de obicei în lungul unor profiluri de achiziție), într-un timp relativ scurt. Fiind o metodă indirectă de investigare, datele obținute în etapa de achiziție (valorile brute ale măsurătorilor efectuate în teren) nu pot fi utilizate ca atare, ele trebuind procesate și apoi interpretate. Orice eroare care apare în primele două etape (achiziție și procesare) poate avea un caracter decisiv asupra corectitudinii modelului geofizic obținut, din acest motiv personalul care operează în acest domeniu trebuie să fie foarte bine instruit în aplicarea acestor metode.

Modelul geologic-geotehnic se obține prin interpretarea modelului geofizic (etapa a treia) acestea fiind echivalente în foarte puține situații. Chiar și în cazul unei foarte bune achiziții și procesări a datelor înregistrate, trecerea de la modelul geofizic la cel geologic nu este una ușoară, deoarece mai multe modele geologice pot fi soluții corecte pentru interpretarea aceluiași model geofizic, fapt cunoscut ca „ambiguitatea în interpretarea datelor geofizice” (Roy, 1962). Modelele geologice rezultate sunt asemănătoare, dar ne-

unicitatea soluției este uneori descurajatoare, mai ales pentru specialiștii obișnuiți doar cu datele exacte, obținute în urma măsurătorilor directe. Calibrarea modelului geofizic cu datele obținute din foraje reduce ambiguitatea interpretării, folosirea combinată a metodelor geofizice împreună cu cele clasice ducând la obținerea unor modele geologice cu un grad mare de încredere. De cele mai multe ori această metodă mixtă de investigare se dovedește a fi mai rapidă, mai economică și mult mai exactă față de folosirea exhaustivă a unei singure tehnici de investigare.

În domeniul ingineriei geotehnice utilizarea din ce în ce mai frecventă a investigațiilor geofizice a condus la formarea de specialiști și metode specifice, conturându-se astfel o nouă categorie a geofizicii de suprafață – **geofizica geotehnică** (geotechnical geophysics) – reprezentând o punte între ingineria geotehnică, geofizica ingineriască și geofizica pentru mediu Fig. 2.2).

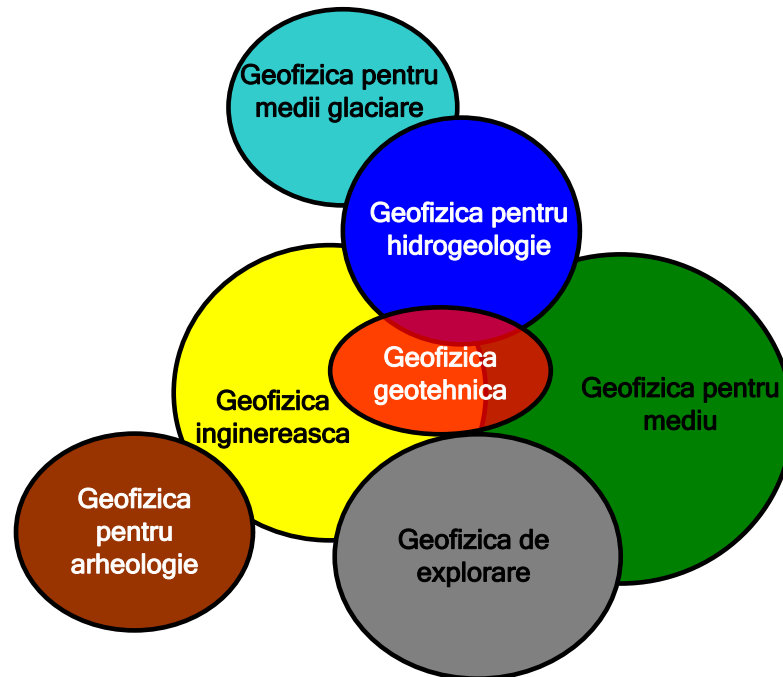


Fig. 2.2: Încadrarea geofizicii geotehnice în domeniile de investigare geofizică (adaptat după Reynolds,1997)

Pe lângă metodele de investigare împrumutate din celelalte domenii ale geofizicii de suprafață (e.g. tomografie electrică, seismică de refracție etc.), domeniul geofizicii geotehnice implică o serie de măsurători specifice precum metodele seismice down-hole, up-hole sau cross-hole. Totodată, scopul investigațiilor servește determinării caracteristicilor geometrice și fizico-mecanice ale corpurilor litologice în vederea susținerii calculului geotehnic și a executării lucrărilor în condiții de siguranță.

În cele ce urmează se va face o scurtă trecere în revistă a metodelor geofizice cu aplicabilitate în geofizica geotehnică.

## 2.1 Metodele seismice

Metodele seismice sunt cele mai utilizate metode de investigare ale geofizicii geotehnice, parametrii fiind vitezele de propagare ale undelor longitudinale și transversale prin diferitele straturi (corpuri) geologice, aceste viteze fiind în directă legătură cu proprietățile fizico-mecanice ale rocilor constituente.

Energia seismică este generată de obicei cu ajutorul unei surse de impact, ciocan cu greutatea de cel puțin 10 kg ce lovește o placă aflată în contact cu suprafața terenului, sau folosind mici cantități de dinamită detonată în niște foraje scurte (2-3 m). În ambele cazuri o cantitate mare de energie mecanică este eliberată punctual, aceasta răspândindu-se radial din zona de generare. La întâlnirea unei material cu impedanță

acustică (produsul dintre viteză și densitate) diferită, o parte din energie se reflectă și se întoarce spre suprafața terenului iar o parte din energie se refractă, propagându-se în adâncime, dând naștere unei noi reflexii la întâlnirea următorului strat cu impedanță acustică diferită. Energia care ajunge la suprafața terenului este înregistrată cu ajutorul geofoanelor verticale (cel mai des folosite) sau orizontale.

În timpul generării energiei se propagă sub forma mai multor tipuri de unde:

- unde de volum, care sunt alcătuite din undele principale (undele P) și undele secundare (undele S);
- unde de suprafață, alcătuite de undele Reyleigh și undele Love.

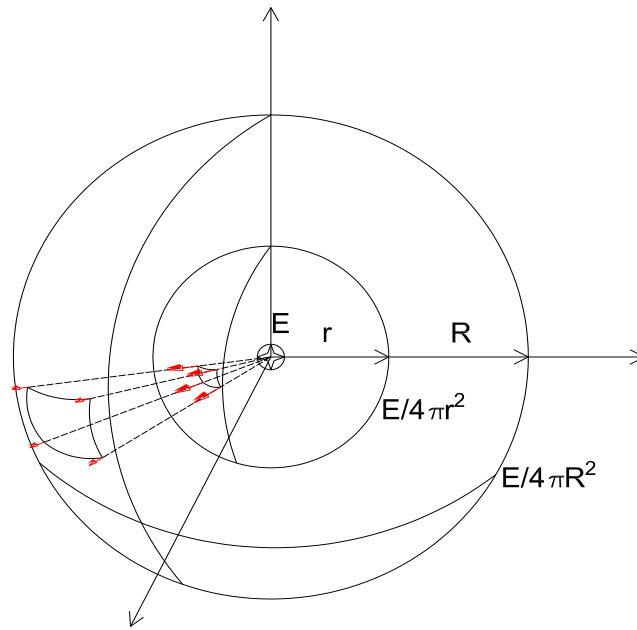


Fig. 2.3: Propagarea radială a energiei mecanice dintr-un punct sursă într-un mediu izotrop

Undele primare (undele P) poartă această denumire deoarece au cea mai mare viteză de propagare, acestea ajungând primele de la sursă la receptor (geofon). Undele P se propagă prin contracții și rarefieri succesive a mediului pe care îl traversează aceste mici deformări producându-se în lungul direcției de propagare a undei (undă longitudinală).

Undele secundare (undele S) sunt numite astfel deoarece au viteze mai mici de propagare față de undele primare (aproximativ 60% din viteza undelor primare), ele ajungând la receptor după sosirea undelor P. Propagarea energiei se face prin mici deformări pe direcție perpendiculară față de direcția de deplasare (undă transversală). Față de undele principale care se pot propaga prin toate mediile (solid, lichid, gazos), undele secundare se propagă doar prin solide.

Undele Love sunt foarte asemănătoare cu undele secundare fiind compuse în principal prin mișcări de forfecare în plan orizontal ce se propagă în apropierea suprafeței.

Undele Reyleigh au o propagare complexă (mișcare eliptică retrogradă) fiind asemănătoare cu mișcarea particulelor de apă antrenate de un val.

În studiile seismice de mică adâncime cea mai mare parte din energie se propagă sub forma undelor de suprafață. Datorită faptului că undele de suprafață au viteze de deplasare mai mici decât undele de volum, acestea se pot diferenția foarte ușor pe înregistrările seismice, cu atât mai bine cu cât distanța dintre sursă și receptor crește.

Echipamentul necesar realizării unei investigații seismice de mică adâncime este compus dintr-o sursă de generare a undelor mecanice, un seismograf (unitate de achiziție) și mai mulți receptori (geofone). Sursa seismică poate fi explozibil, o armă de foc, un ciocan sau o greutate care cade liber pe o placă metalică, variind în funcție de adâncime de investigare dorită, caracteristicile terenului și nivelul de zgomot din amplasament. Pentru fiecare înregistrare poziția sursei se identifică cu poziția „punctului de pușcare”, chiar dacă sursa nu este de natură explozivă.

Concomitent cu generarea energiei în punctul de pușcare receptorii încep să înregistreze oscilațiile verticale sau orizontale ale punctelor în care sunt fixați, oscilații generate de diferitele unde seismice (unde refractate, unde reflectate și unde de suprafață), în urma fenomenelor de reflexie, refracție și dispersie (Fig. 2.4).

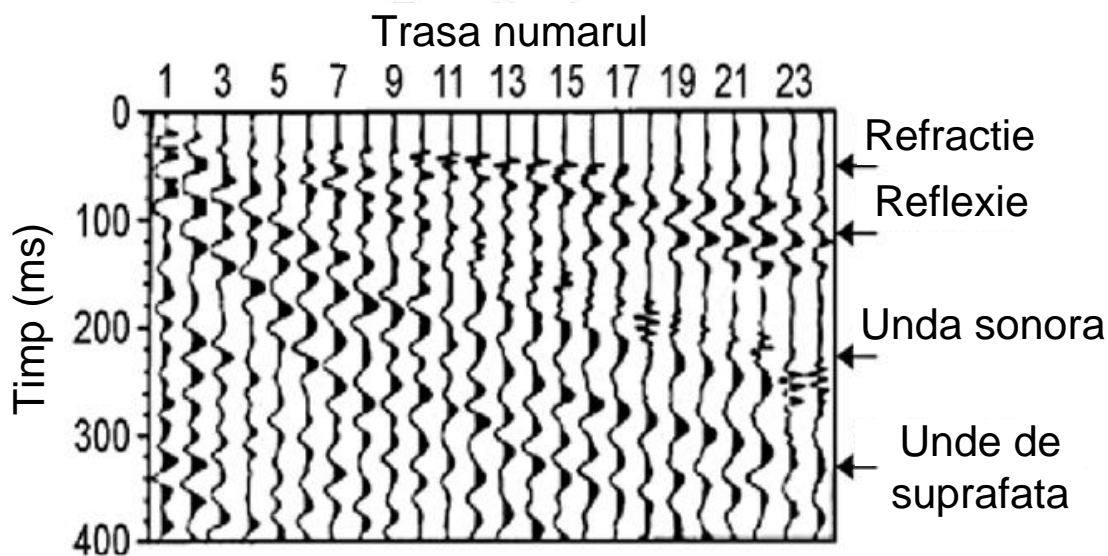


Fig. 2.4: Înregistrare seismică cu 24 de geofone

În funcție de timpul de undă analizat și de tehnicile specifice de procesare a datelor metodele seismice se împart în:

- seismică de reflexie;
- seismică de refracție;
- analiza spectrală a undelor de suprafață.  $\rho_1, v_1$

**Seismica de reflexie** se bazează pe informația conținută de undele simplu reflectate.

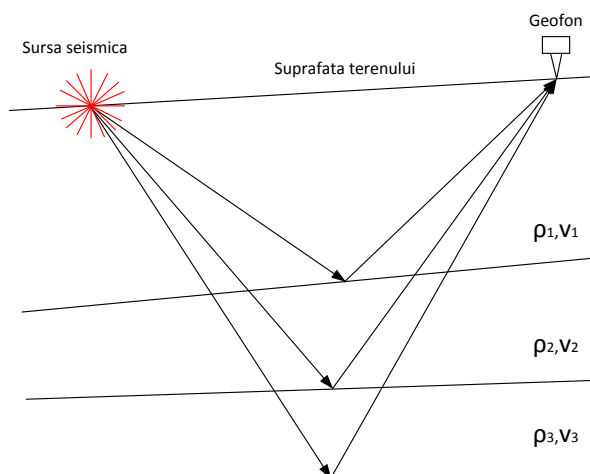


Fig. 2.5: Exemplu de unde simplu reflectate

Procesarea înregistrărilor seismice este foarte laborioasă și necesită programe specializate ce calculează, acest tip de măsurători fiind specifice în industria de explorare a zăcămintelor de hidrocarburi.

**Seismica de refracție** utilizează ca semnal util undele frontale rezultate în urma fenomenului de refracție critică.

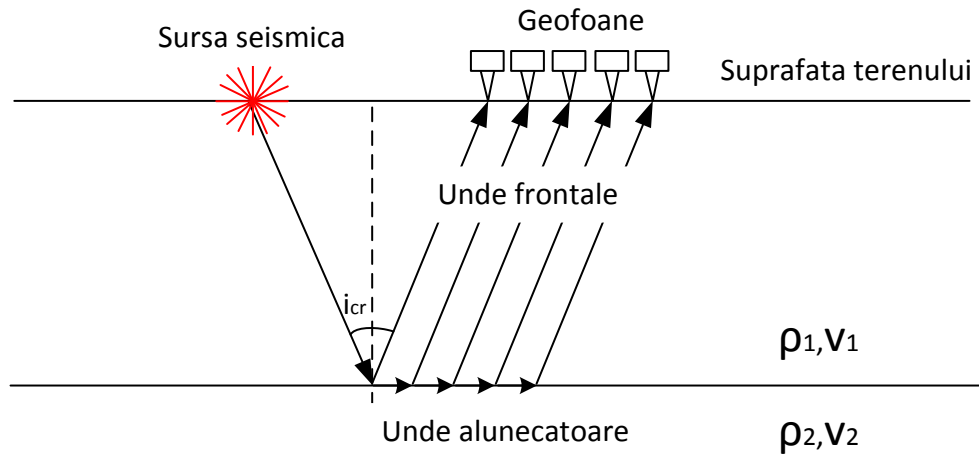


Fig. 2.6: Formarea undelor alunecătoare și frontale în cazul unghiului critic de incidență

Procesarea înregistrărilor seismice este foarte simplă, analizându-se doar timpii corespunzători primei sosiri a unei seismice pentru fiecare geofon în parte. Se pot folosi programe specializate de calcul sau se poate recurge și la calculul manual în cazul unui cadru geologic nu foarte complicat.

**Analiza spectrală a undelor de suprafață (multichannel analysis of surface waves – MASW)** analizează undele de suprafață și caracterul dispersiv al acestora (unde de frecvențe diferite au adâncimi și viteze de propagare diferite).

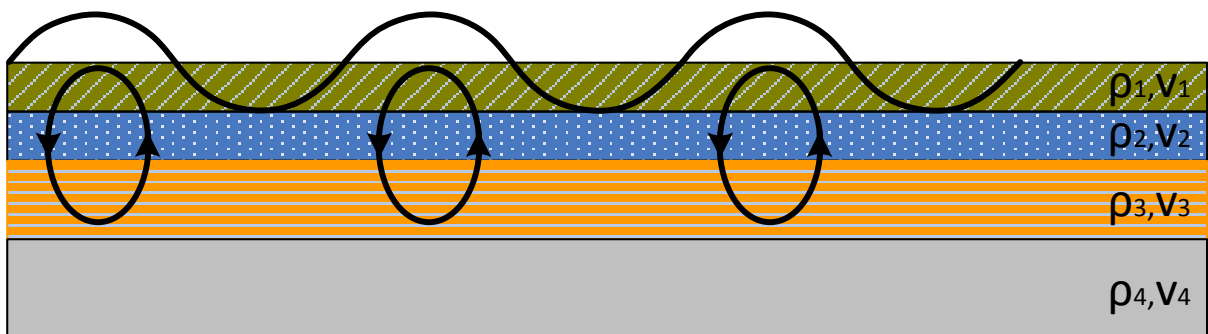


Fig. 2.7: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență redusă

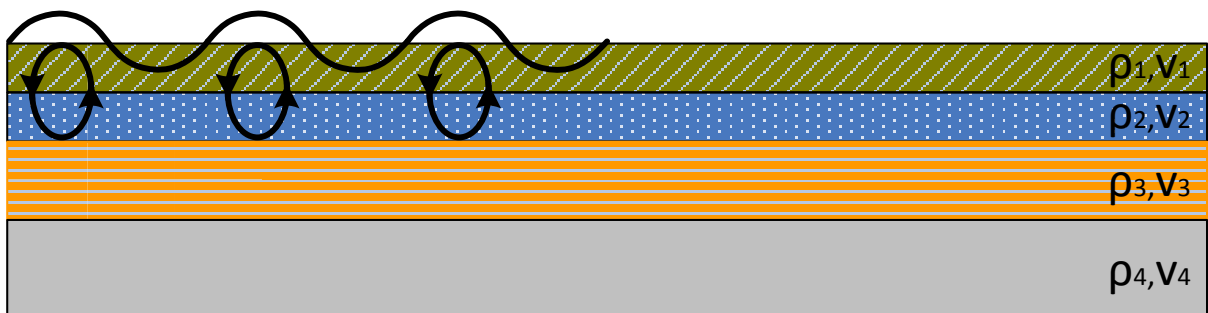


Fig. 2.8: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență medie

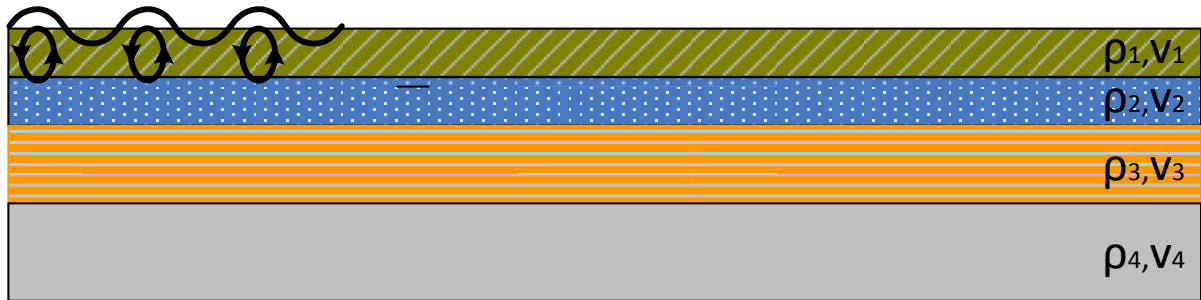


Fig. 2.9: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență mare

Procesare se efectuează doar cu programe specializate în procesarea semnalului seismic.

Această metodă este foarte des folosită în ingineria geotehnică pentru a estima viteza undelor de forfecare pe primii zeci de metri ai ternului de fundare.

Adâncimea de investigare este de aproximativ o jumătate de lungime de undă, aceasta fiind direct proporțională cu viteza de propagare a undelor secundare (viteza medie ponderată a pachetului de strate prin care unda se propagă) și frecvența oscilației.

## 2.2 Metoda rezistivității electrice

Metoda rezistivității electrice este folosită pentru determinarea variațiilor verticale și orizontale de rezistivitate electrică ale mediului subteran, acest tip de măsurători având foarte multe aplicații cum ar fi: determinarea nivelului freatic, diferențierea formațiunilor geologice, identificarea golurilor subterane etc.

Metoda are la bază legea lui Ohm și constă în măsurarea rezistivității aparente cu un dispozitiv de măsură format de obicei din 4 electrozi. În doi electrozi se introduce un curent (electrozi de injecție- A,B-) continuu de scurtă durată, iar în ceilalți doi se măsoară diferența de potențial electric (electrozi de potențial- M,N -).

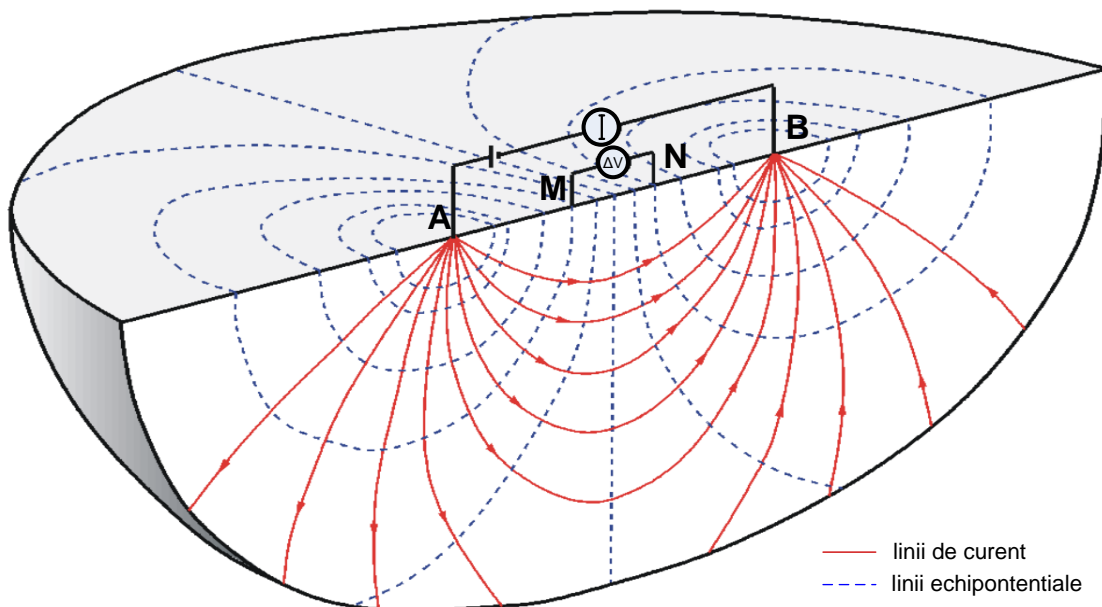


Fig. 2.10: Distribuția curentului în teren în cazul folosirii unui dispozitiv cu 4 electrozi ( dispozitiv ABMN)

În funcție de numărul de electrozi folosiți și de geometria dispozitivului există mai multe dispozitive de înregistrare (Schlumberger, Wenner, Dipole-Dipole etc), fiecare dispozitiv având rezoluții (verticală și orizontală) și adâncimi de investigare diferite.

În funcție de distribuția spațială a valorilor de rezistivitate aparentă măsurate, metodele de rezistivitate electrică se împart în :

- metoda sondajului electric vertical;
- metoda profilării;
- tomografie de rezistivitate electrică.

**Metoda sondajului electric vertical** se folosește pentru determinarea variațiilor verticale de rezistivitate electrică a mediului subteran și constă în efectuarea de măsurători repetate păstrând fixă poziția electrozilor de potențial și măririi succesiv distanța dintre electrozii de curent (de injecție). Odată cu creșterea lungimii dispozitivului de injecție crește adâncimea de penetrare a curentului electric, obținându-se informații de la adâncimi din ce în ce mai mari.

**Metoda profilării** este folosită pentru determinarea variațiilor orizontale ale rezistivității electrice, obținându-se un profil orizontal de rezistivitate aparentă specific pentru o anumită adâncime de investigare. În timpul efectuării măsurătorilor distanța dintre electrozii de măsură și cei de curent este păstrată constantă, măsurătorile efectuându-se în poziții succesive în lungul unui profil, translatându-se întreg dispozitivul de măsură. Adâncimea de investigare este direct proporțională cu lungimea dispozitivului de măsură, putându-se realiza hărți și profile de rezistivitate electrică aparentă pentru mai multe nivele de adâncime.

**Metoda tomografiei de rezistivitate electrică** este o metodă hibrid obținută prin combinarea metodei sondajului electric vertical cu cea a profilării, astfel se obțin informații cu bună distribuție atât verticală cât și orizontală. Datorită densității mari a punctelor de măsură (rezoluție spațială bună) această metodă este cel mai des utilizată în investigațiile specifice domeniului ingineresc.

### 2.3 Metode electromagnetice

La fel ca și metodele electrice, metodele electromagnetice măsoară în principal variații ale rezistivității mediului subteran, diferența esențială fiind înlocuirea dispozitivului de injectare a curentului în teren cu o emițător (antena) de unde electromagnetice. Această antea generează pentru un timp foarte scurt în mediul înconjurător un câmp electromagnetic numit câmp primar. Datorită prezenței acestuia în corpurile conductoare din subteran aflate în raza de influență a câmpului primar iau naștere cureni Foucault cunoscuți și sub numele de „*Eddy currents*” (curenți turbionari de inducție electromagnetică), aceștia generând la rândul lor un câmp electromagnetic secundar ce poate fi înregistrat cu ajutorul unui receptor (bobine).

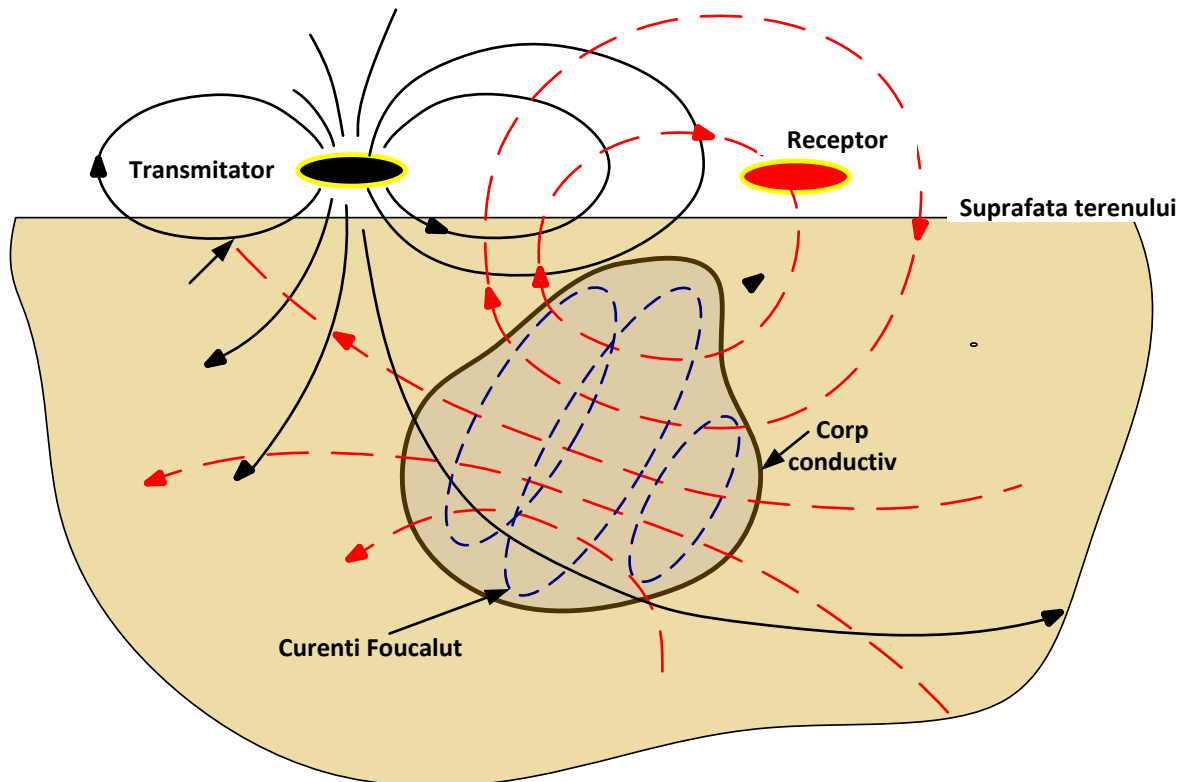


Fig. 2.11: Principiul general al metodelor electromagnetice (după Grant și West 1965)

Metodele în care antenele sunt alimentate cu un curent alternativ de diferite frecvențe poartă denumirea de „metode electromagnetice în domeniul frecvență” (FDEM „Frequency Domain Electromagnetic” sounding). Măsurătorile sunt realizate continuu, la bobina receptor înregistrându-se interferența dintre câmpul primar și cel secundar, adâncimea de investigare variind în funcție de frecvența antenei și de rezistivitatea terenului.

Metodele FDEM se pot împărți în două categorii:

- metode inductive, în care echipa care realizează măsurătorile folosește o antea și un receptor;
- metode radioelectrice, în care se folosește doar receptorul, câmpul primar fiind constituit de undele radioelectrice generate de antenele posturilor de radiofonice.

În cazul în care în locul curentului alternativ se folosesc pulsuri de curent continuu de mare intensitate metodele poartă numele de „metode electromagnetice în domeniul timp”. Generarea câmpului primar se face într-un timp scurt (20ms-40ms), după care curentul este oprit, în următoarele aproximativ 100ms măsurându-se câmpul secundar.



Față de metoda de rezistivității electrice metodele electromagnetice sunt mult mai rapide în achiziția datelor dar sunt mult mai sensibile la prezența liniilor de curent electric sau a unor corpuri conductive, acest lucru rezultând în măsurători foarte zgomotoase. Atât achiziția datelor cât și interpretarea acestora necesită personal mult mai calificat decât cel folosit în cazul metodelor electrice.

## 2.4 Ground-Penetrating Radar (GPR)

Metoda GPR se aseamănă principal foarte mult cu metoda seismică de reflexie, aceasta folosind unde electromagnetice în locul undelor seismice. Sursa este un emițător de înaltă frecvență (10MHz – 10 GHz), iar receptorul este o bobină. Unda electromagnetică generată de antenă se propagă în subsol, iar la întâlnirea unui mediu cu proprietăți dielectrice diferite apar fenomenele de reflexie și refracție. Unda reflectată se îndreaptă spre suprafață și este înregistrată de receptor iar unda refractată își continuă drumul în adâncime. Constanta dielectrică sau permitivitatea dielectrică a mediului geologic este influențată în cea mai mare parte de conținutul de apă, apa având o constantă dielectrică de 80.

Viteza de propagare a undelor electromagnetice este condiționată de constanta dielectrică ( $\epsilon$ ) a mediului aceasta fiind :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

unde  $c$  este viteza luminii. Această formulă este aplicabilă în cazul frecvențelor mari (10 MHz – 1000 MHz) și în medii cu conductivitatea mai mică decât 10mS/m.

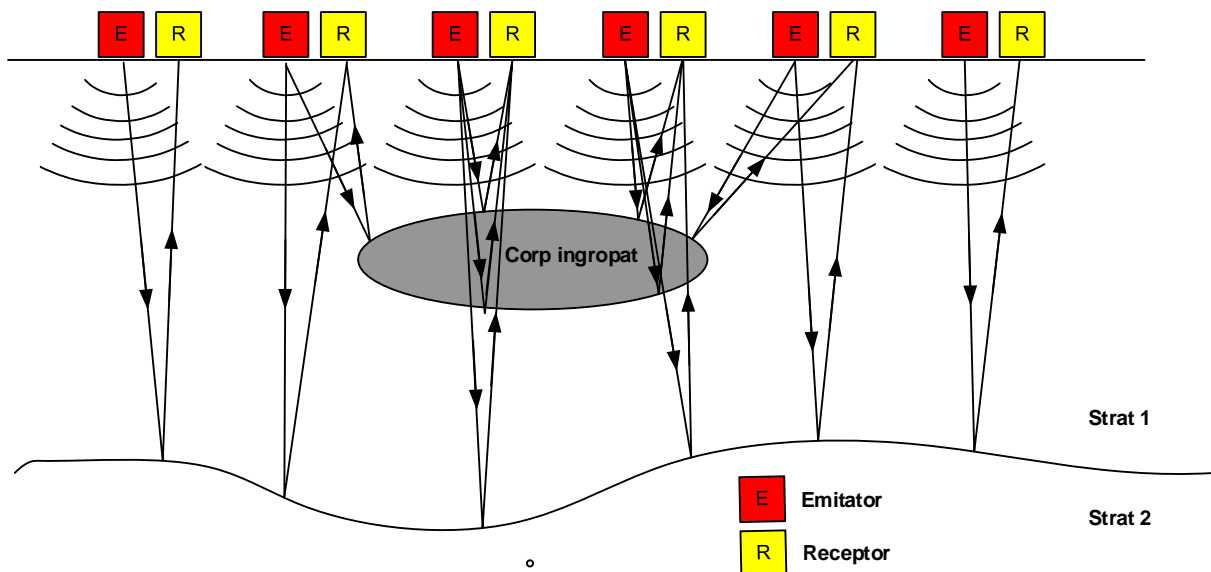


Fig. 2.12: Principiul metodei GPR

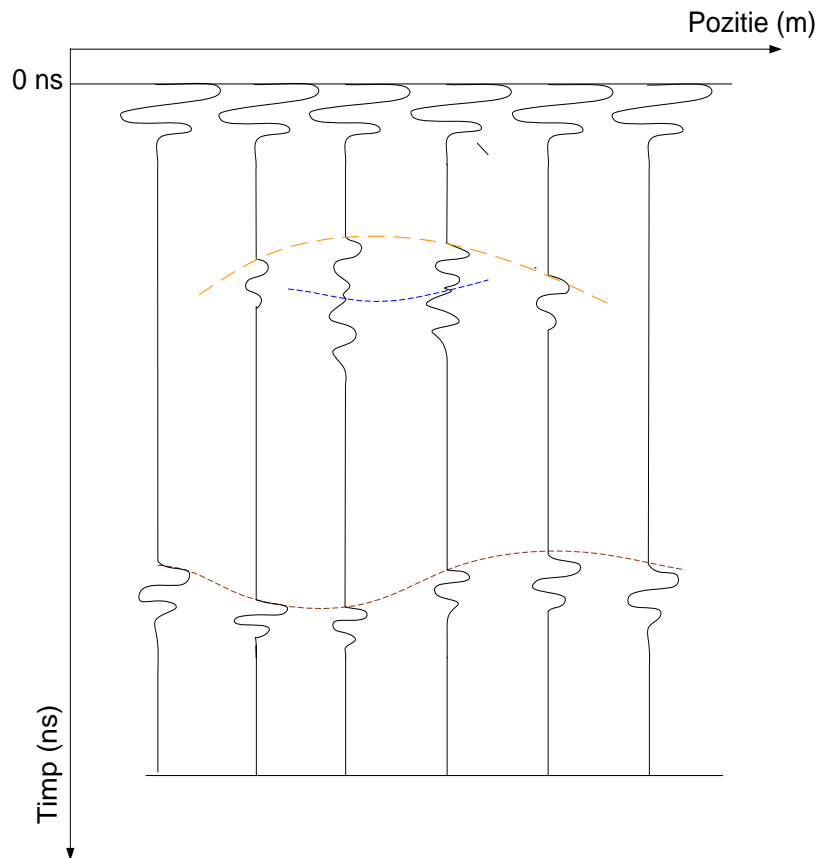


Fig. 2.13 Prezentarea schematica a unei radargrame corespunzătoare cazului prezentat în Fig. 2.12

În tabelul de mai jos sunt prezentate valoare constantei dielectrice, a vitezei de propagare și atenuarea undelor radar pentru diferite medii de propagare pentru o frecvență de 100 MHz.

Material	K	$\sigma$ (mS/m)	V(m/ns)	$\alpha$ (Db/m)
Apa distilată	1	0	0.3	0
Apa proaspătă	80	0.01	0.033	0.002
Apa marină	80	0.5	0.033	0.01
Nisip uscat	80	30000	0.01	1000
Nisip saturat	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Argilă	5-40	2-1000	0.06	1-300
Calcar	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sare masivă (uscată)	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Gheață	3-4	0.01	0.16	0.01

Tab. 2.1 Constanta dielectrică (k), conductivitatea electrică ( $\sigma$ ), viteza și atenuarea ( $\alpha$ ) observată în diferite medii de propagare, pentru frecvența de 100MHz

Adâncimea de investigare a metodei GPR este invers proporțională cu frecvența antenei, adâncimile medii de investigare fiind prezentate în tabelul de mai jos.

f(MHz)	2500	1000	500	200	100	50	25	10
h(m)	0.5	1	5	10	15	20	30	50

Tab. 2.2 Adâncime medie de investigare a metodei GPR în funcție de frecvența antenei

Odată cu creșterea adâncimii de investigare (alegerea unor frecvențe joase) se diminuează rezoluția spațială (capacitatea sistemului de a face diferența dintre două semnale apropiate din punct de vedere geometric), astfel existând un compromis între adâncimea de investigare și rezoluția sistemului GPR. Cu toate acestea metoda GPR prezintă cea mai mare rezoluție spațială dintre toate metodele geofizice.

Prelucrarea și interpretarea datelor sunt asemănătoare cu cele specifice seismicii de reflexie. Achiziția datelor este rapidă, într-un timp scurt acoperindu-se o suprafață considerabilă. Principalul dezavantaj al metodei GPR este adâncimea redusă de investigare, ea fiind cel mai des folosită în studii arheologice sau pentru punerea în evidență a obiectelor îngropate și a rețelelor de utilități din mediul urban.

## 2.5 Metoda gravimetrică

Metoda gravimetrică constă în măsurarea accelerației gravitaționale într-o rețea bine definită de puncte și în interpretarea hărților de variație ale acesteia. Accelerația gravitațională măsurată (de cele mai multe ori la suprafața terenului) este determinată de distribuția densității mediului geologic/antropic din vecinătatea punctului de măsură. Variația accelerației gravitaționale este foarte mică pentru punerea în evidență fiind nevoie de instrumente de măsură (gravimetre) de foarte mare precizie. Valoarea accelerației gravitaționale este de aproximativ 980 000 de miligali (unitate de măsură folosită în domeniul gravimetriei, 1 miligal=0,001cm/s<sup>2</sup>), iar precizia aparatelor de măsură depășește 0,001 miligali.

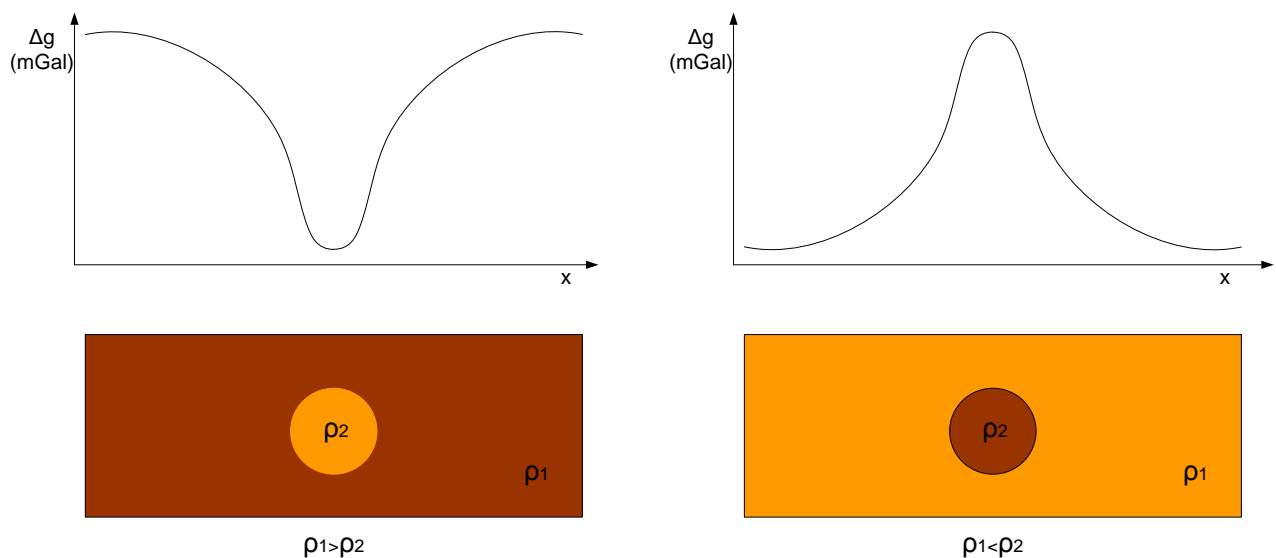


Fig. 2.14: Principiul metodei gravimetrice

Prospecțiunea gravimetrică este foarte folosită în studii geofizice la scară regională și planetară fiind considerată o „metodă structurală” datorită posibilității acesteia de a evidenția marile structuri geologice, prin această metodă putându-se obține informații de la zeci de kilometri adâncime.

În cadrul geofizicii geotehnice metoda gravimetrică se folosește în special pentru identificarea domurilor diapire și a golurilor subterane naturale (carstice) sau antropice (subsoluri îngropate, galerii de mină). Metoda nu este influențată de prezența unor obiecte sau rețele metalice îngropate, dar este foarte sensibilă la zgomot de natură mecanică, iar achiziția datelor necesită o foarte mare precizie a măsurătorilor (gravimetrice și topografice).

## 2.6 Metoda magnetometrică

Metoda magnetometrică se bazează pe măsurarea câmpului geomagnetic (câmpul magnetic terestru) în diferite puncte de măsură și interpretarea variației acestuia. Variațiile intensității câmpului magnetic măsurat sunt datorate distribuției neregulate ale corpurilor geologice sau antropice cu proprietăți magnetice diferite, astfel generându-se anomalii magnetice.

Prospecțiunile magnetice au fost folosite cu precădere în domeniul explorării substanțelor minerale solide feromagnetice și în studiile tectonice (măsurători la scară regională), dar au și o foarte mare aplicabilitate în detectarea obiectelor cu proprietăți magnetice îngropate (rezervoare, conducte, elemente din beton armat, ziduri de cărămidă etc).

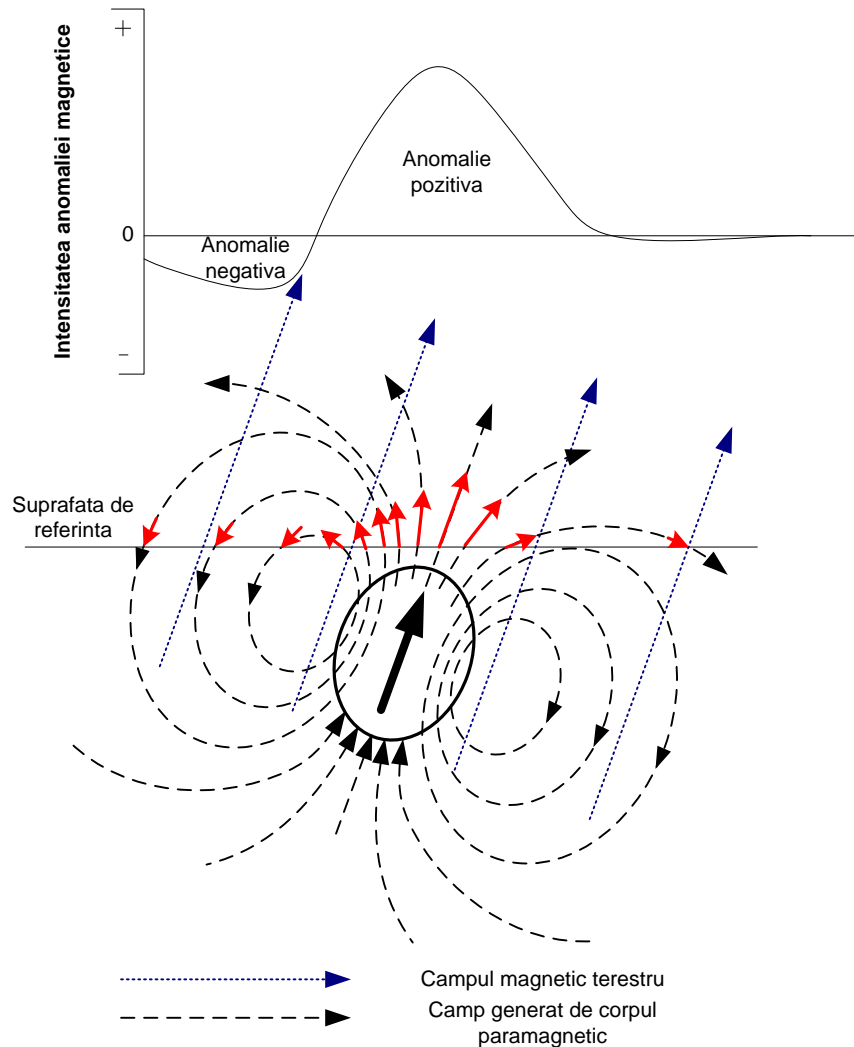
Măsurătorile se efectuează într-o rețea de puncte sau în lungul unor profiluri, achiziția datelor fiind una foarte rapidă, într-un scurt timp acoperindu-se o foarte mare suprafață de cercetare. În funcție de aparatura folosită se poate măsura intensitatea câmpului geomagnetic (măsurători absolute) sau variații ale componentei verticale și orizontale (măsurători relative) ale câmpului total, precizia uzuală a magnetometrelor fiind de 1 nanoTesla.

În cazul României valorile uzuale ale elementelor câmpului geomagnetic sunt (Ivan, 1994):

- mărimea câmpului geomagnetic normal, T:  $\sim 47000 - 48000$  nT;
- componenta orizontală a câmpului geomagnetic, H:  $\sim 20000 - 23000$  nT;
- componenta verticală a câmpului geomagnetic, Z:  $\sim 40000 - 43000$  nT.

Elementele câmpului geomagnetic pot avea variații diurne foarte mari iar pentru înlăturarea acestui fenomen în timpul achiziției se folosesc două magnetometre, unul fix, care înregistrează variația diurnă în amplasament și unul mobil care înregistrează valorile câmpului în diferite puncte de măsură. La sfârșitul sau în faza de procesare, înregistrările realizate cu magnetometrul mobil sunt corectate în funcție de variația diurnă înregistrată în stația de bază.

Prezență în subsol a unor corpuri cu proprietăți magnetice generează variații ale câmpului geomagnetic normal. Forma anomaliilor astfel rezultate depinde de orientarea și intensitatea câmpului geomagnetic cât și de ce al corpului magnetic îngropat (Fig. 2.15).



**Fig. 2.15: Principiul metodei magnetometrice. Exemple de anomalii magnetice**

Procesarea datelor implică folosirea de programe de calcul specializate și de personal instruit. Rezultatele obținute sunt reprezentate sub forma hărților sau poștelor de variație a diferitelor elemente ale câmpului geomagnetic. Interpretarea rezultatelor este preponderent calitativă, poziția în plan a corpului perturbator fiind precis determinată, dar dimensiunea acestuia și adâncimea de îngropare fiind greu de determinat cu exactitate. În geofizica inginerescă metoda magnetică se folosește în special pentru identificarea obiectelor sau rețelelor metalice îngropate.

## 2.7 Aplicarea metodelor geofizice în investigarea terenului de fundare

Începând cu anii 80 când interesul pentru geofizica inginerescă a început să crească și mai ales în anii 90, odată cu înființarea „The Environmental and Engineering Society” (EEGS), au fost publicate un număr însemnat de lucrări referitoare la aplicarea metodelor geofizice de suprafață (Mooney, Handbook of Engineering Geophysics, 1984; Mooney, Handbook of Engineering Geophysics, 1984; Giovanni, 2008; Ward, 1990; Wair, 2012; Reynolds, 1997; McCamm, 1997; Benson, 2000; Wightman W E, 2003), în unele lucrări făcându-se recomandări pentru folosirea anumitor metode în funcție de tipul obiectivului investigat, totuși, singurul document cu „caracter” de normativ fiind ASTM D6429/99 (Fig. 2.16).

Obiectivul investigat	Metode												
	Seismice		Electro-magnetice				Electrice		Altele				
	Tehnici de achiziție și procesare												
	Seismica de refracție	Seismica de reflexie	Tomografie seismică	Analiza undelor de forfecare	Analiza undelor de suprafață (MASW, SASW)	Analiza undelor EM în domeniul frecvență	Analiza undelor EM în domeniul timp	Metoda Very Low frequency	Rezistivitate electrică	Potential indus	Microgravimetrie	Magnetometrie	Ground Penetrating Radar (GPR)
Adancimea rocii de baza	P	P	P		P			s	s	s	s		
Excavabilitate	P		P	P									
Variatia vericcale sau laterale ale proprietatilor mecanice	P		P	P	P								
Localizare faliilor sau a zonelor fracturate	s	P	P	P	s	s		s	s	s	s	s	s
Investigarea zonelor carstice		s	P		P	s				P			
Prezenta anomaliilor situate la adancimi mici					s				s				
Caracteristici fizico mecanice si litologice			s	s	s	P		s	P	P			
Investigarea umpluturilor (gropi de deseuri, rezervoare ingropate)					s		P		P	P		P	P
Adancimea nivelului hidrostatic	s		s			P		P	P	P			
Calitatea apei (dulce-salina)						P		P	P	s			

P – metoda principala de lucru

s – metoda secundara sau alternativa de lucru

Fig. 2.16: Metode geofizice recomandate pentru diferite aplicații (după ASTM D6429/99)

După cum se specifică și în ASTM D6429/99, acest document nu este un normativ procedural propriu zis ci mai degrabă un ghid care sugerează doar ce fel de investigație pot fi folosite, reușita acestora fiind determinată de condițiile de teren, intuiția și priceperea în stabilirea rețelelor și profilurilor de măsură cât și mai ales de procesarea și interpretarea datelor.

În anul 2004, în Statele Unite ale Americii, în cadrul unei campanii naționale de informare și promovare a aplicabilității metodelor geofizice este publicat „Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems” (Aplicarea metodelor geofizice în probleme legate de construcția autostrăzilor), documentul fiind distribuit departamentelor de transporturi (Department of Transport – DoT) al fiecărui stat membru.

La doi ani după campania de promovare, în anul 2006, P.C. Sirles realizează un sondaj referitor la aplicarea metodelor geofizice în cadrul proiectelor de autostrăzi („Use of Geophysics for Transportation Projects - A Synthesis of Highway Practice”) la acest sondaj participând toate departamentele de transporturi (echivalentul ministerului transporturilor) din cele 50 de state membre SUA, 8 agenții canadiene și 3 agenții federale americane.

În urma sondajului a rezultat că 87% (Fig. 2.17) din autoritățile chestionate au folosit investigații geofizice în ultimii 5 ani (2001-2005), procentajul cel mai mare înregistrându-se în cazul departamentelor de transporturi din Statele Unite.

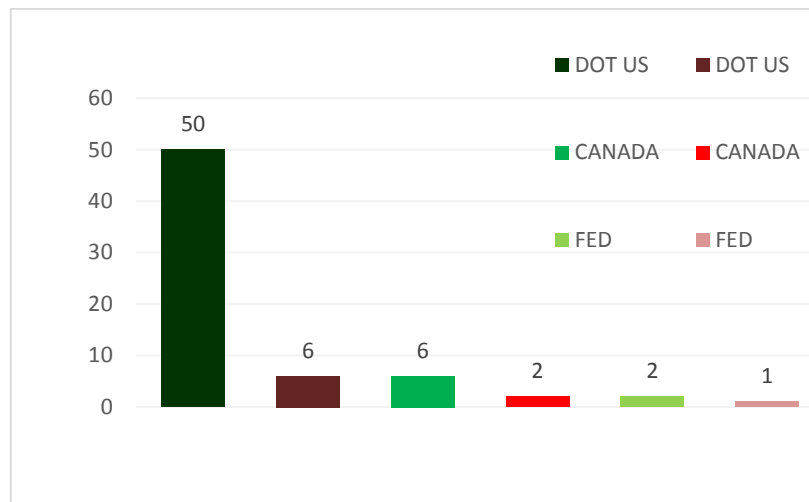


Fig. 2.17 Numărul autorităților care au folosit investigații geofizice (nuanțe de verde) față de cele care nu au le-au folosit (nuanțe de roșu) (după Sirles 2006).

Autoritățile care declarat că au utilizat investigații geofizice au fost rugate să răspundă la un chestionar format dint-un număr de 63 de întrebări referitoare la experiența acestora referitoare la aceste metode. Răspunsuri la cele mai reprezentative întrebări cu ar fi:

- (1) Metodele geofizice sunt folosite ca o metoda principală, secundară sau ocazională de investigare ?
- (2) Care este principalul avantaj în folosirea metodelor geofizice ?
- (3) Care sunt principalele domenii în care ați folosit metodele geofizice ?
- (4) Care sunt metodele cele mai utilizate ?
- (5) Care este ce cel mai mare impediment în folosirea metodelor geofizice ?
- (6) Cine e sugerat folosirea metodelor geofizice ?

sunt prezentate în cele ce urmează, sub formă de grafice, ele fiind reprezentative în special pentru ingineria drumurilor.

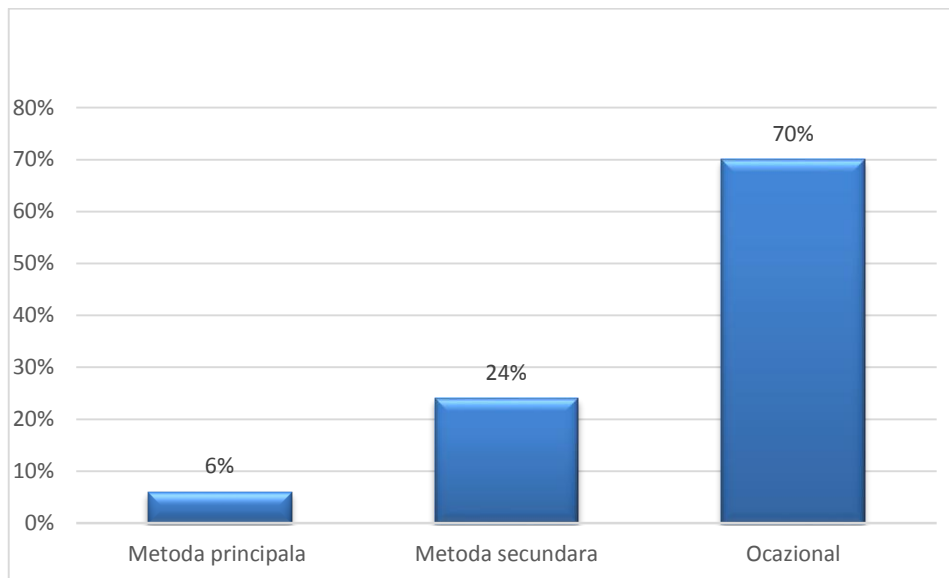


Fig. 2.18 Metodele geofizice ca metode de investigarea a mediului subteran (după Sirles 2006)

Analizând Fig. 2.17 și Fig. 2.18 se observă că, deși aproape 90% din autorități folosesc metodele geofizice, aplicarea acestora este de cele mai multe ocazională, recurgând-se la utilizarea lor în special în cazul în care o caracterizare a amplasamentului doar pe baza informațiilor rezultate din foraje nu este posibilă.

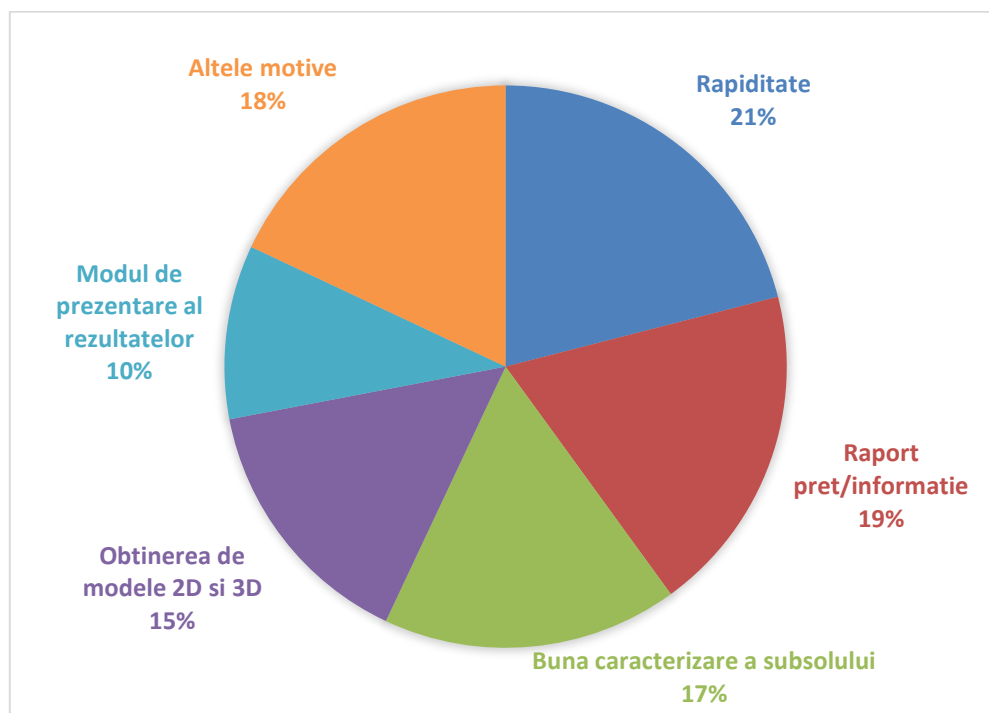


Fig. 2.19 Avantajele folosirii metodelor geofizice (după Sirles 2006)

Din punct de vedere al avantajelor pe care metodele geofizice le au față de cele clasice cel mai important este rapiditatea de realizare și procesare a măsurătorilor (Fig. 2.19), această caracteristică fiind extrem de importantă în cazul lucrărilor ce au caracter de intervenție, pentru care trebuie luate decizii în perioade foarte scurte de timp.

Alte caracteristici importante ale metodelor geofizice sunt: raportul scăzut între preț și cantitatea de informație oferită, buna caracterizare a mediului subteran, obținerea de profile 2D și 3D, modul eficient de prezentare a rezultatelor cât și posibilitatea aplicării acestor metode pe terenuri accidentate în care accesul cu utilaje mari nu este posibil.



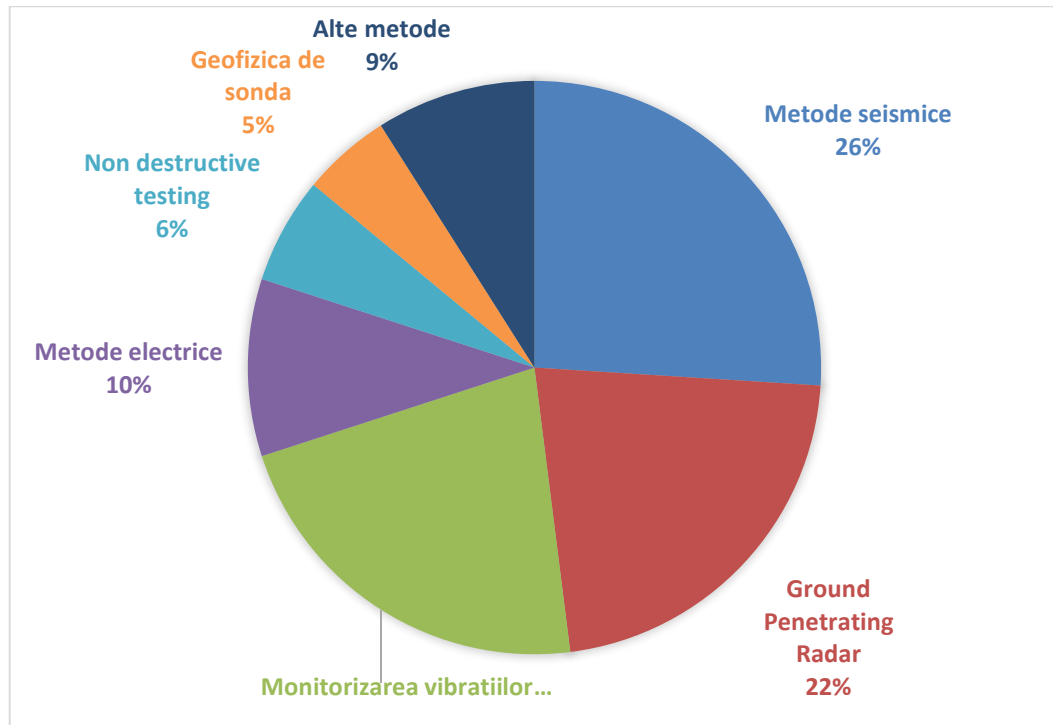


Fig. 2.20 Metodele geofizice aplicate în domeniul ingineriei drumurilor (după Sirles 2006)

Conform Fig. 2.20 se poate concluziona ca principala metoda de investigație geofizică este metoda seismică, ea fiind și cea mai vastă dintre metodele geofizice, cuprinzând seismica activă (reflexie, refracție, SASW, MASW), seismica pasivă și tehnicile seismice caracteristice ingineriei geotehnice (down hole, up hole, cross hole).

Făcând abstracție de GPR (Ground Penetrating Radar) care este cea mai folosită metodă pentru caracterizarea primilor metri de la suprafața terenului, în special în mediile antropizate și monitorizarea vibrațiilor care este impusă de legea în cazul șantierelor cu vecinătăți, se poate spune că a doua metodă în ordinea frecvenței în folosire pentru caracterizarea terenului de fundare este metoda electrică.

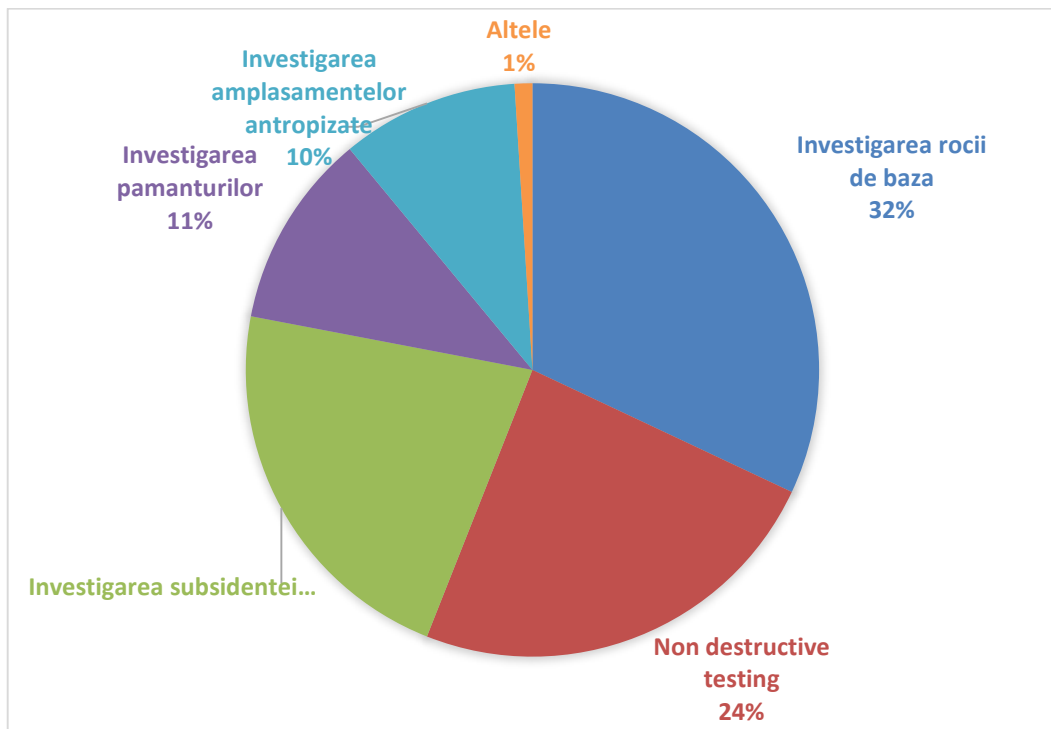


Fig. 2.21 Domenii în care au fost aplicate metodele geofizice (după Sirles 2006)

Analizând Fig. 2.21 se observă că cea mai mare parte a studiilor geofizice sunt atribuite investigării rocii de bază (adâncime și proprietăți mecanice) numărul acestora fiind de aproape trei ori mai mare față de numărul studiilor realizate în vederea investigării pământurilor. Acest lucru se explică prin:

- roca de bază se identifică foarte ușor deoarece prezintă proprietăți fizice puternic contrastante față de cele ale straturilor acoperitoare;
- proprietățile mecanice ale rocilor stâncoase, (mai ales a celor alterate/fisurate) sunt estimate mult mai bine pe baza măsurătorilor geofizice (metode seismice) decât pe baza carotelor prelevate din foraje;
- costurile de realizare a forajelor în roci stâncoase este mult mai mare față de cel în roci moi (pământuri).

Alte domenii de aplicabilitate, specifice pentru ingineria drumurilor sunt testele nedestructive (Non Destructive Testing – NDT) pentru controlul calității suprafețelor de rulare și investigarea zonelor afectate sau supuse riscului de subsidență.

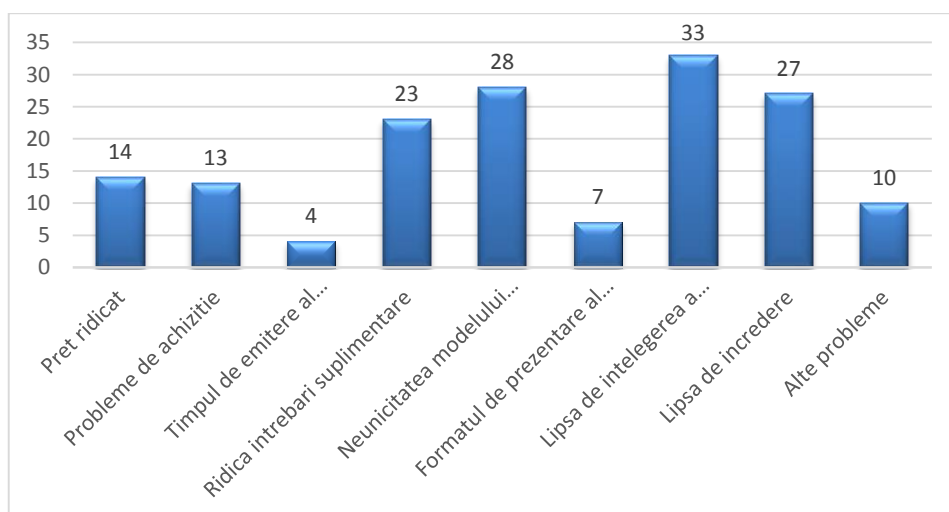
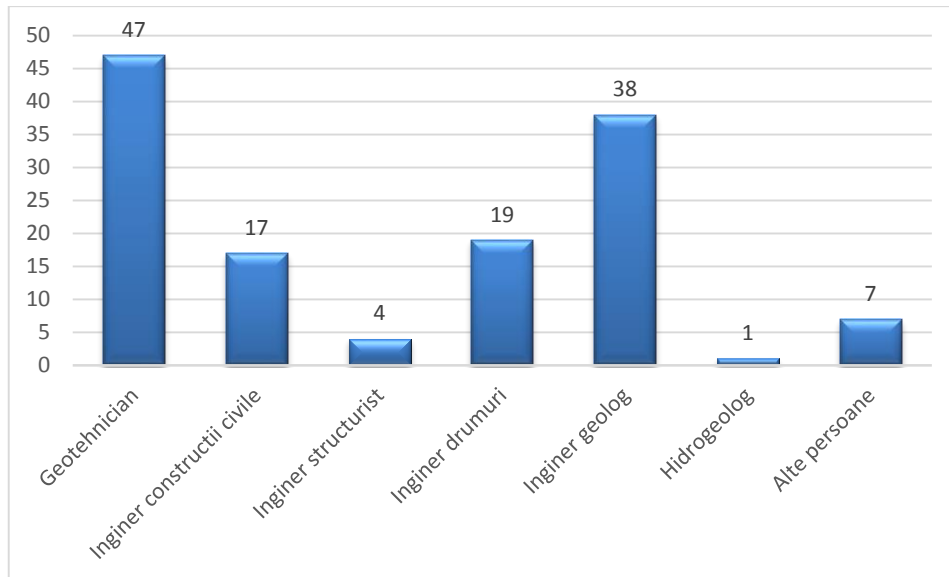


Fig. 2.22 Inconveniente ale aplicării metodelor geofizice

Dintre inconvenientele care apar la integrarea studiilor geofizice în cadrul diferitelor proiecte cel mai important se dovedește a fi lipsa de înțelegere a metodelor geofizice de către practicienii cu specializări diferite, fapt ce duce, în mod direct, la o lipsă de încredere în rezultatele obținute pe cale geofizică (Fig. 2.22).

Existența ambiguității în procesarea și interpretarea datelor geofizice este o altă problemă importantă, ceea ce duce din nou la o lipsă de încredere în aplicarea acestor metode. Prețul nu pare să fie un impediment.



Din punct de vedere al specialiștilor care au solicitat efectuarea studiilor geofizice pe primele locuri se află inginerii geotehnicieni și inginerii geologi fapt ce dovedește necesitatea aplicării acestor metode în investigarea terenului de fundare cât și necesitatea cunoașterii acestora de către specialiștii menționați anterior.

Sintetizând informația din singura publicație (Sirles, 2006) care se referă la părerea beneficiarilor lucrărilor de investigare geofizică se pot trage următoarele concluzii:

- deși cea mai mare parte din autorități folosesc investigații geofizice, la acestea se recurge doar ocazional, când informațiile din foraje și aflorimente nu sunt suficientă (situație diferită față de investigațiile din domeniul geologic în care poziționarea forajelor se face după realizarea prospecțiunilor geofizice);
- cele mai folosite metode geofizice pentru investigarea terenului de fundare sunt metoda seismică și metoda electrică;
- investigațiile geofizice sunt recomandate pentru rapiditatea lor, cantitatea mare de informații prezentată și distribuția spațială a acestora, posibilitatea de realizarea pe amplasamente cu suprafață topografică accidentată și faptul că sunt metode neinvazive;
- studii geofizice au fost realizate în principal pentru caracterizarea rocii de bază și controlul calității lucrărilor de drumuri și cu o frecvență redusă pentru investigarea pământurilor și a zonelor antropizate.
- chiar dacă a fost obținut un raport de reușită de 7 la 1, mulți dintre specialiști sunt încă sceptici referitor la aplicarea metodelor geofizice, lipsa de încredere venind din lipsa de înțelegere a principiilor geofizice și din neunicitatea modelelor obținute (fenomenul de ambiguitatea);
- specialiștii care recurg cu precădere la folosirea metodelor geofizice sunt geotehnicianul și inginerul geolog.

### 3 METODA REZISTIVITĂȚII APARENTE

Scopul acestei metode este acela de a reda distribuția rezistivității pământului în profunzimea lui prin efectuarea de măsurători la suprafața acestuia.

Rezistivitatea rocilor depinde de o multitudine de factori cum ar fi porozitatea, compoziția mineralogică, concentrația și chimismul fluidelor interstițiale, gradul de saturație al porilor sau fisurilor etc. Dintre toate proprietățile fizice (densitate, viteză de propagare a undelor mecanice, susceptibilitate magnetică etc) rezistivitatea electrică prezintă cea mai mare gamă de variație, aceasta acoperind mai bine de 20 de ordine de mărime, făcând astfel posibilă diferențierea tipurilor litologice, evidențierea zonelor contaminate, estimarea porozității etc.

Bazele acestei metode au fost puse de J. Wenner în anul 1915, tot el aplicând-o pentru prima dată. Mai târziu, frații Schlumberger în 1920 perfecționează aparatura și tehnica de lucru.

Inițial, această metodă a fost concepută pentru a putea fi aplicată în cadrul explorărilor geologice și geofizice, pentru evidențierea zăcămintelor de minerale utile și a acviferelor de adâncime. Începând cu anii 1940 metoda rezistivității aparente a fost folosită cu succes pentru investigații de mică adâncime în domeniul arheologiei, dovedindu-și puterea de rezoluție și aplicabilitatea pentru adâncimi reduse.

#### 3.1 Principiul fizice ale metodologiei

Legea lui Ohm reprezintă legea fizică fundamentală ce stă la baza aplicării metodei rezistivității:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (3.1)$$

unde:

- I – intensitatea curentului electric ce străbate materialul conductor;
- $\Delta V$  – diferența de potențial de la capetele materialului;
- R – rezistența electrică = voltaj/curent ( $R = \Delta V/I$ ).

Rezistența materialului la trecerea curentului electric este o constantă de material, altfel spus, rezistivitatea electrică măsurată este independentă de intensitatea curentului aplicat în timpul determinărilor.

Relația (3.1) este valabilă doar pentru circuite electrice, în cazul trecerii curentului printr-un mediu se folosește legea lui Ohm generalizată, folosind intensitatea câmpului electric ( $E$  [volți/m]) și densitatea de curent ( $J$  [ $A/m^2$ ]):

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (3.2)$$

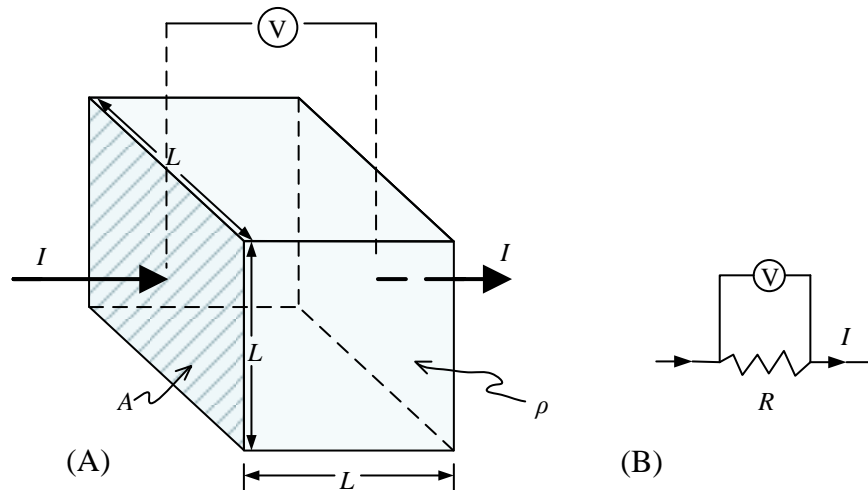


Fig. 3.1: A-simplificare schematică a trecerea curentului electric (I) printr-un mediu rezistiv(\$\rho\$) și înregistrarea unei diferențe de tensiune(V) între cele două fețe opuse, B- circuit electric echivalent (R-rezistență) (după Reynolds 1998)

Pornind de la legea generalizată a lui Ohm (3.1) și definiția fizică a câmpului electric:

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{3.3}$$

se poate determina valoarea potențialului electric într-un punct \$p\_1\$, aflat la o distanță \$D\$ față de un singur electrod sursă.

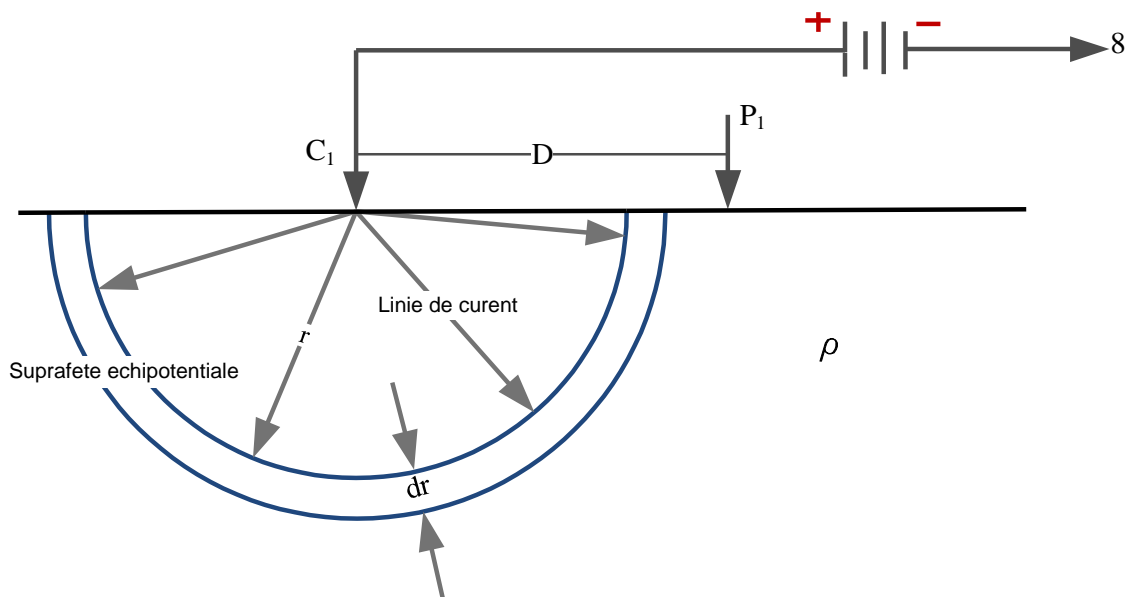


Fig. 3.2: Distribuția suprafețelor echipotențiale în jurul unui punct sursă

$$V = -\frac{C_1}{D} \tag{3.4}$$

$$I = -\frac{2\pi C_1}{\rho} \tag{3.5}$$

Pe baza ecuațiilor (3.4) și (3.5) rezultă:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi D} \quad (3.6)$$

Aplicând (3.6) pentru cazul descris în figura de mai jos în care potențialul electric este măsurat în 2 puncte aflate între 2 surse de curent electric (una pozitivă și cealaltă negativă), valorile acestuia vor fi:

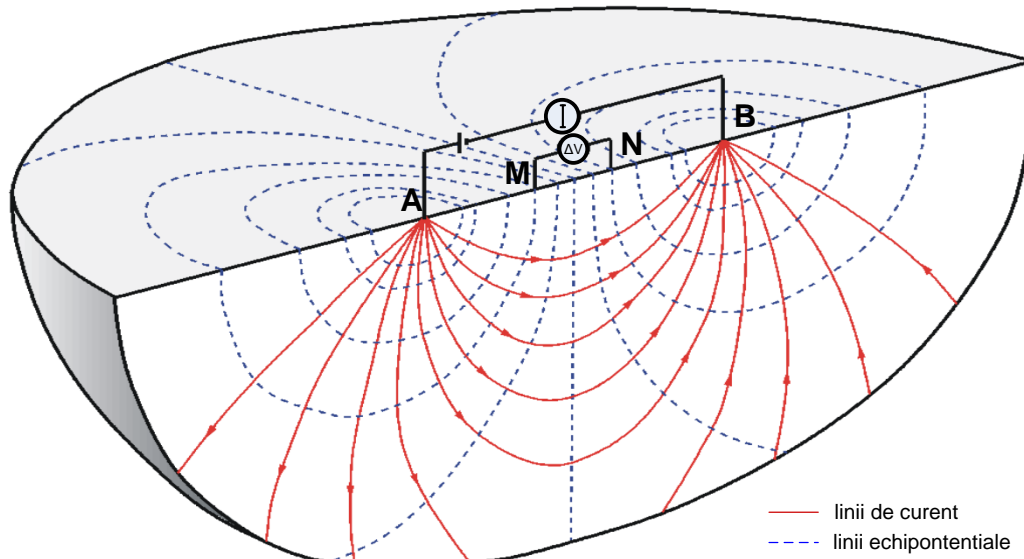


Fig. 3.3: Distribuția suprafețelor echipotențiale

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \quad (3.7)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \quad (3.8)$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right) \quad (3.9)$$

Rescriind ecuația (3.9) rezultă :

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \quad (3.10)$$

### 3.2 Proprietățile electrice ale pământurilor

La penetrarea solului de către un curent electric la adâncimi mici și medii apar două fenomene principale:

- conducția electronică;
- conducția electrolitică.

În cazul conducției electronice, deplasarea curentului electric prin materiale se face prin intermediul electronilor liberi, similar metalelor. Acest tip de conducție apare în cazul prezentei mineralelor de silfide metalice și grafitului în straturile de pământ.

Conducția electrolitică presupune deplasarea curentului electric cu ajutorul ionilor liberi, deplasarea acestora făcându-se prin intermediul apei în cazul în care materialele studiate au un anumit grad de hidratare. Acesta este cel mai comun fenomen de transport al curentului electric ce apare în cadrul măsurătorilor geofizice de rezistivitate electrică.

### 3.3 Metodologia determinării rezistivității aparente

Cel mai uzual mod de determinare rezistivității aparente este folosind un sistem cuadripolar format doi electrozi conectați la o sursă de tensiune prin intermediul căreia se injectează în subsol un curent continuu (A,B – electrozi de curent) și doi electrozi de potențial (M,N), conectați la un voltmetru, cu ajutorul căreia se măsoară diferența de potențial indusă de injectarea curentului în electrozii A,B.

Diferența de potențial înregistrată depinde de: distribuția spațială a rezistivității în subsol, intensitatea curentului injectat (I) și geometria dispozitivului AMNB.

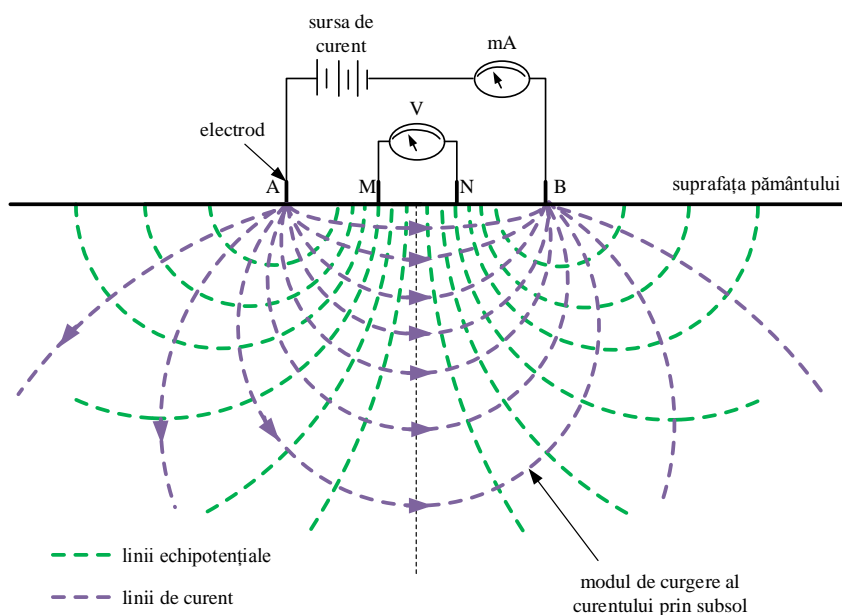


Fig. 3.4: Dispozitiv ABMN și distribuția curentului electric în pământ

Rezistivitatea aparentă ( $\rho_a$ ) măsurată se determină cu ajutorul formulei:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.11)$$

unde  $K$  reprezintă constanta dispozitivului de măsură (ABMN) și depinde de geometria acestuia.

Rezistivitatea aparentă astfel determinată reprezintă o medie complexă a rezistivităților din subsol situate în vecinătatea dispozitivului de măsură.

Rezistivitatea reală se obține din rezistivitatea aparentă prin modelare inversă, procesarea și interpretarea rezultatelor necesitând o foarte bună cunoaștere a relației dintre rezistivitatea aparentă măsurată la suprafața terenului și distribuția spațială a rezistivităților în subsol.

Majoritatea rocilor sedimentare prezintă conductibilitate electrolitică, rezistivitatea depinzând în principal de conținutul în fluide, concentrația și natura soluțiilor. Scheletul mineral, în cazul în care nu este alcătuit din minerale argiloase are valori foarte ridicate ale rezistivității electrice (izolator electric) acesta necontribuind la transportul curentului electric. Principalii factorii care determină rezistivitatea rocilor cu

conductivitate electrolică sunt: porozitatea, configurația geometrică a porilor, gradul de saturație, compoziția și concentrația electrolitului, temperatura, și conținutul în argilă (!).

Rocile magmatice și metamorfice au valori mari de rezistivitate electrică. Rezistivitatea acestor roci în principal de gradul de fisuratei, orientarea fisurilor și gradul de umplere al acestora cu fluide.

Din cauza faptului că rezistivitatea electrică este influențată de un număr mare de factori ( porozitate, grad de saturație, tipul fluidului etc.) limitele de variație a rezistivității rocilor sedimentare se întrepătrund (Fig. 3.5).

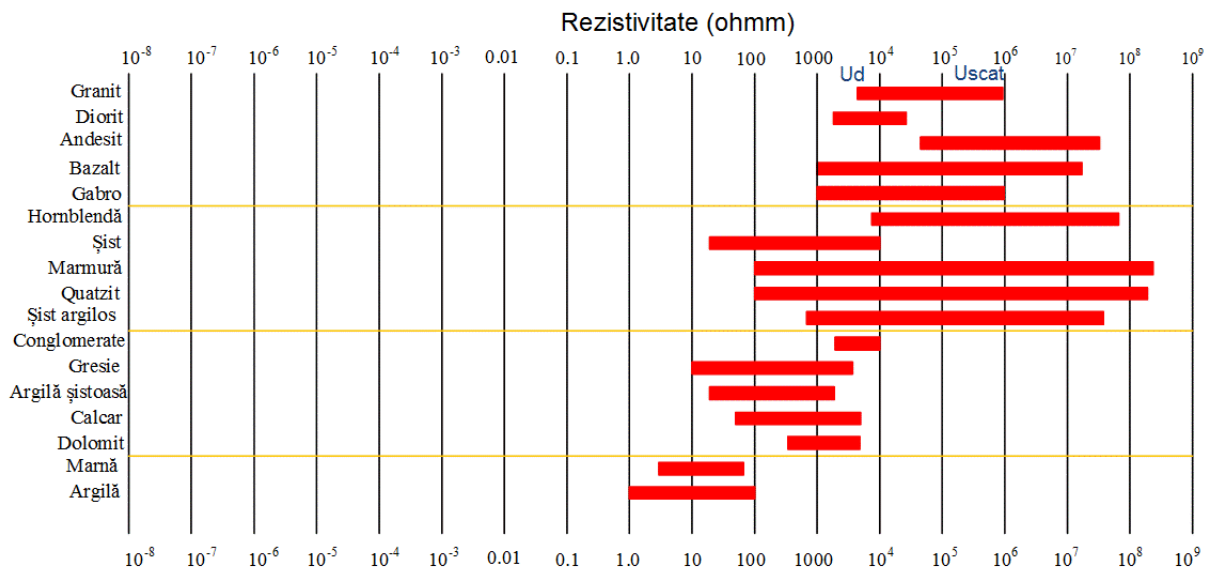


Fig. 3.5: Intervale de variație a rezistivității pentru diferite tipuri de roci și pământuri (după Loke 2006)

### 3.4 Dispozitive de lucru

Geometria sistemului măsură (AMNB) joacă un rol foarte important în modul de reflectare a distribuției reale a rezistivității în anomalia rezistivității aparente. Dintre numeroasele sisteme de măsură (dispozitive de lucru) cele mai des utilizate sunt: Wenner, Schlumberger și Dipol.

**Dispozitivul Wenner** este primul dispozitiv folosit, se caracterizează prin faptul că cei patru electrozi sunt echidistanți (Fig. 3.6). În comparație cu alte dispozitive, dispozitivul Wenner are o adâncime de investigație moderată însă intensitatea semnalului este ridicată, lucru extrem de util în cazul în care măsurătorile sunt efectuate într-un cadru foarte zgomotos. Dezavantajul principal al acestui dispozitiv este rezoluție laterală scăzută pe măsură ce crește distanța dintre electrozi.



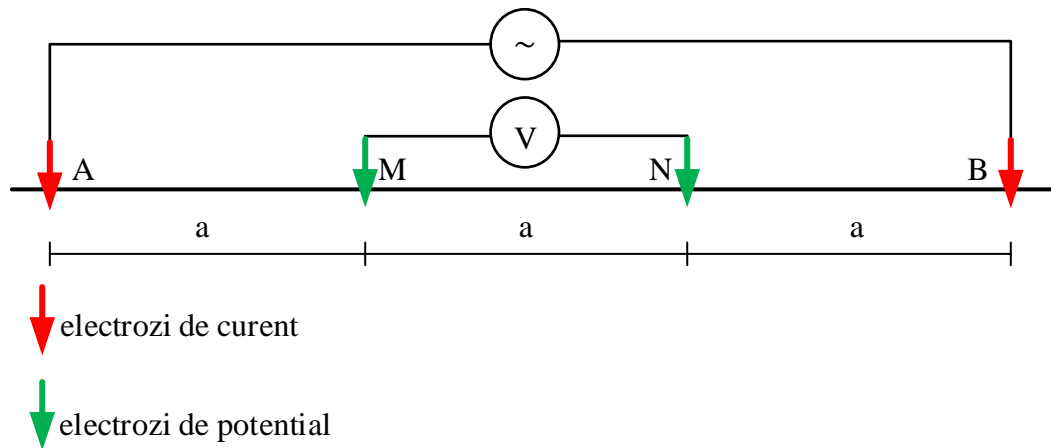


Fig. 3.6: Schema dispozitivului Wenner

**Dispozitivul Schlumberger** este tot un dispozitiv simetric care se caracterizează prin faptul ca distanța dintre electrozii de potențial M și N este mai mică decât distanța dintre electrozii de injecție A și B. (Fig. 3.7). Adâncimea medie de investigație este cu aproximativ 10% mai mare decât cea obținută cu un dispozitiv Wenner pentru aceeași distanță a liniei de emisie (AB), obținându-se totodată și o mai bună rezoluție laterală.

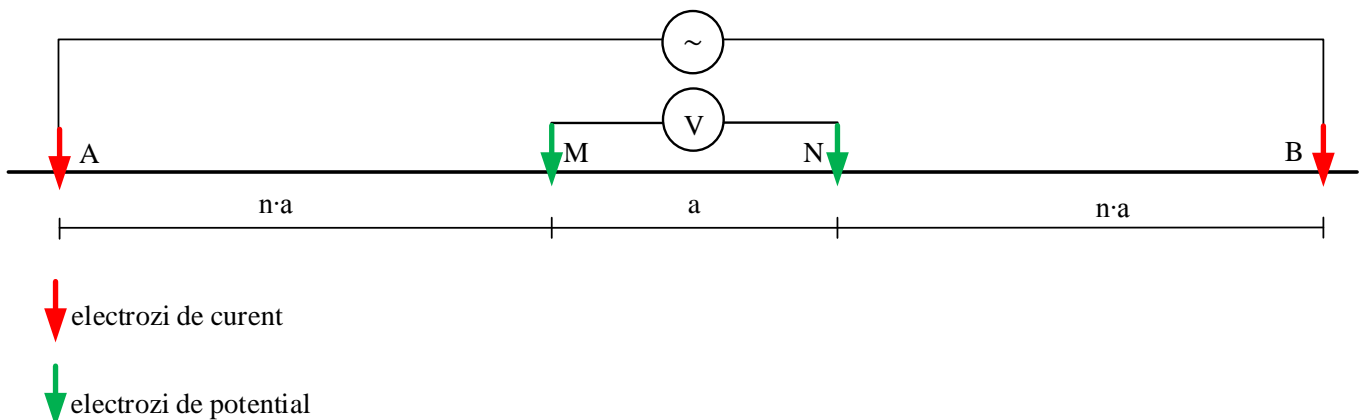


Fig. 3.7: Schema dispozitivului Schlumberger

**Dispozitivul dipol-dipol** (Fig. 3.8) se caracterizează prin faptul că linia de curent (AB) nu mai are punctul central comun cu linia de măsură (MN) ca în cazurile precedente. Distanța dintre punctele centrale ale celor două linii este mult mai mare decât distanța liniei de emisie sau a celei de măsură. Acest dispozitiv are o adâncime de investigație mai mică decât dispozitivul Wenner (pentru aceeași lungime a dispozitivului de lucru), însă are o rezoluție laterală foarte bună, fiind recomandat pentru investigarea structurilor 2D. Dezavantajul acestui sistem este intensitatea scăzută a semnalului la nivelele mari de adâncime.

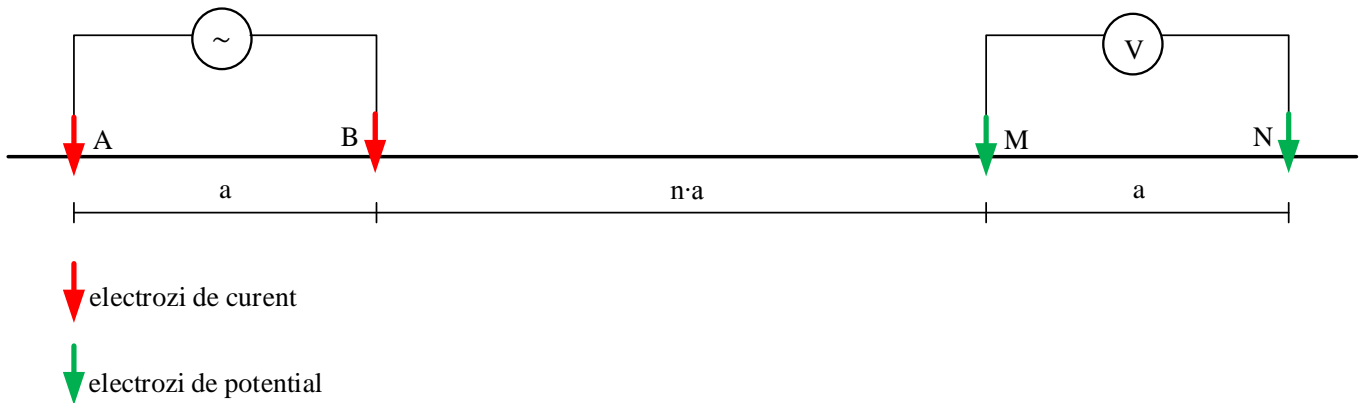


Fig. 3.8: Schema dispozitivului Dipol-Dipol

În funcție de distribuția spațială a valorilor de rezistivitate aparentă măsurate, metodele de rezistivitate electrică se împart în :

- metoda sondajului electric vertical;
- metoda profilării;
- tomografie de rezistivitate electrică.

**Metoda tomografiei de rezistivitate electrică** este o metodă hibrid obținută prin combinarea metodei sondajului electric vertical cu cea a profilării, astfel se obțin informații cu bună distribuție atât verticală cât și orizontală. Datorită densității mari a punctelor de măsură (rezoluție spațială bună) această metodă este cel mai des utilizată în investigațiile specifice domeniului ingineresc.

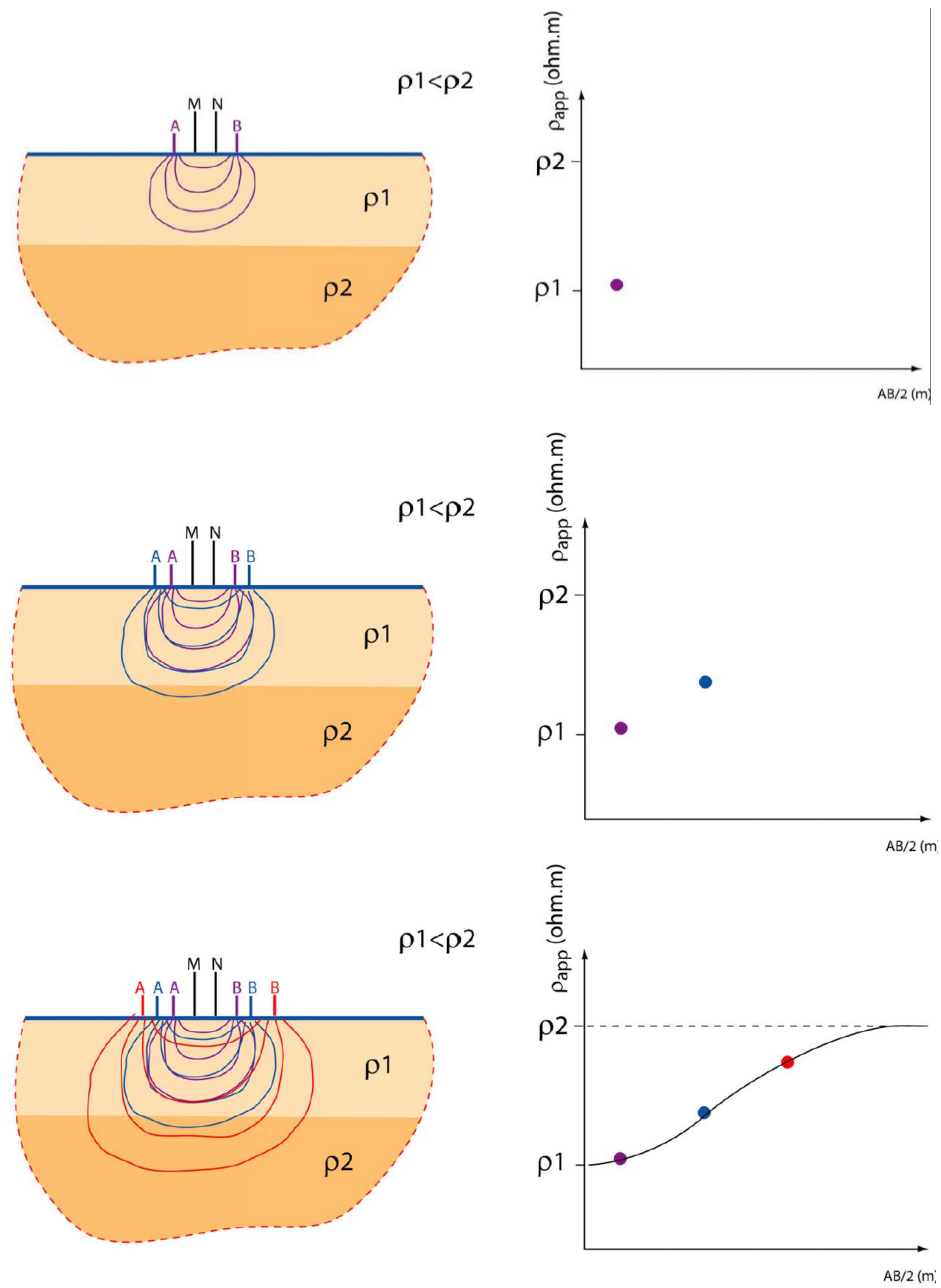
### 3.5 Metoda sondajului electric vertical (SEV)

**Metoda sondajului electric vertical** se folosește pentru determinarea variațiilor verticale de rezistivitate electrică a mediului subteran și constă în efectuare de măsurători repetate păstrând fixă poziția electrozilor de potențial și măbind succesiv distanța dintre electrozii de curent (de injecție). Odată cu creșterea lungimii dispozitivului de injecție crește adâncimea de penetrare a curentului electric, obținându-se informații de la adâncimi din ce în ce mai mari (Fig. 3.9).

Prin urmare, determinând variația rezistivității aparente în funcție de lungimea liniei de emisie AB se poate estima variația rezistivității reale în adâncime. Reprezentarea valorilor măsurate în cadrul unui SEV se face sub forma unei curbe de variație a rezistivității aparente raportate la jumătate din lungimea dispozitivului de emisie ( $AB/2$ ).

Pentru interpretarea curbelor SEV, este necesară determinarea curbei teoretice corespunzătoare structurii geologice cercetate.

Pentru o structură orizontal stratificată, adâncimea de investigație a metodei SEV poate fi mai precis exprimată în funcție de lungimea liniei de emisie și de particularitățile modului de variație a rezistivității în adâncime. Astfel, valoarea  $AB/2$  nu trebuie confundată cu adâncimea de investigare care este influențată de valoarea rezistivității mediului, cea de-a doua fiind de regulă mai mică.



**Fig. 3.9: Partea Stângă - Etape de realizare a sondajului electric vertical, prin păstrarea poziție electrozilor de potențial (MN) și creșteri succesive ale distanței dintre electrozii de curent (AB); Partea Dreaptă - Obținerea valorilor rezistivității aparente și trasarea curbei SEV (după Marescot 2008).**

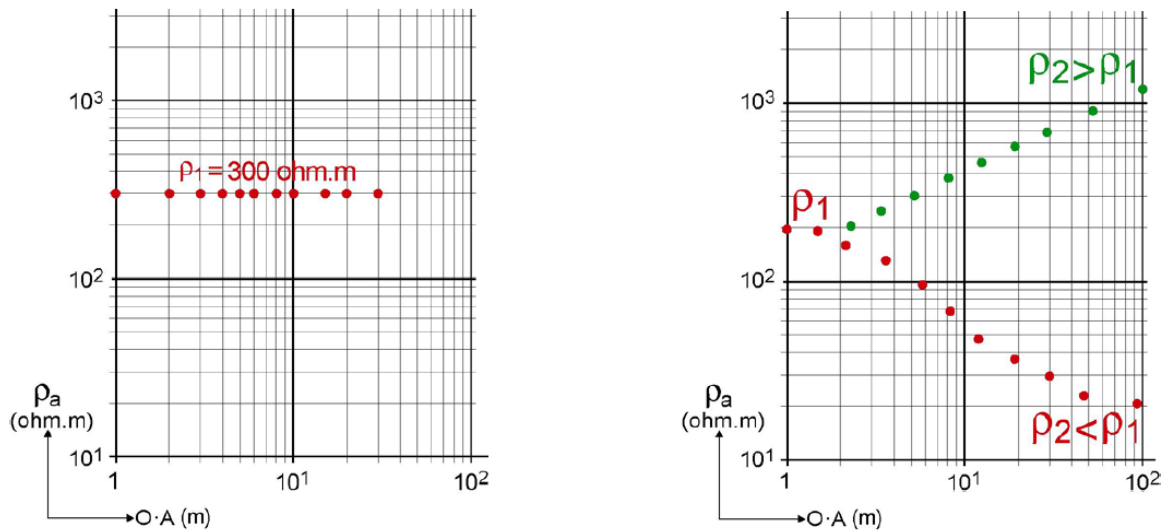


Fig. 3.10: Partea Stângă – Zonă de investigare care cuprinde un singur strat de pământ; Partea Dreaptă – Zonă de investigare ce traversează două strate de pământ.

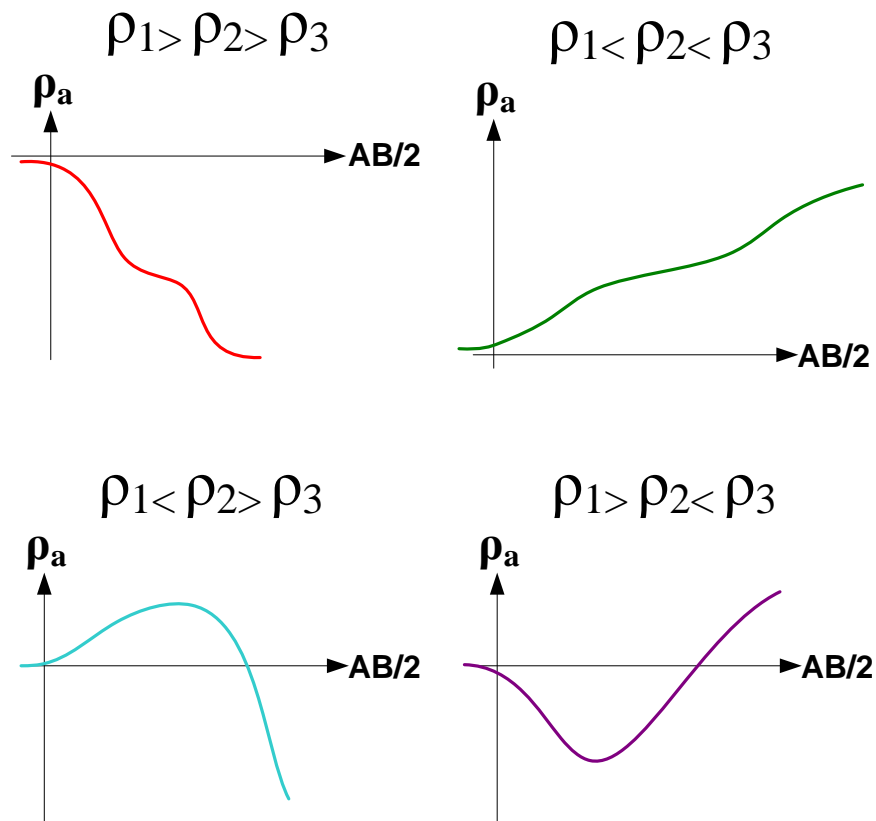


Fig. 3.11: Curbe SEV pentru zone de investigare care interceptează trei strate cu rezistivități diferite

Determinarea adâncimii de investigare și a distribuției rezistivității în subsol se face prin interpretarea și procesarea curbelor SEV. Numărul de strate și rezistivitățile relative ale acestora se pot determina în mod intuitiv din forma curbei SEV, urmărind numărul pantelor distincte și unghiul de înclinare al acestora. În schimb, pentru determinarea limitelor litologice este nevoie de mai mult decât intuiție.

În trecut, curbele obținute se raportau la curbe teoretice, antecalulate, găsirea unui corespondent satisfăcător fiind un proces foarte laborios și costisitor. În ultimele decenii se folosesc programe specializate

de calcul care generează automat curbe teoretice SEV din diverse litologii impuse de utilizator (Fig. 3.12). Se pleacă de la interpretarea grosieră a curbei SEV și se ajustează modelul până ce se obține o curbă a rezistivității cât mai apropiată de curba SEV măsurată.

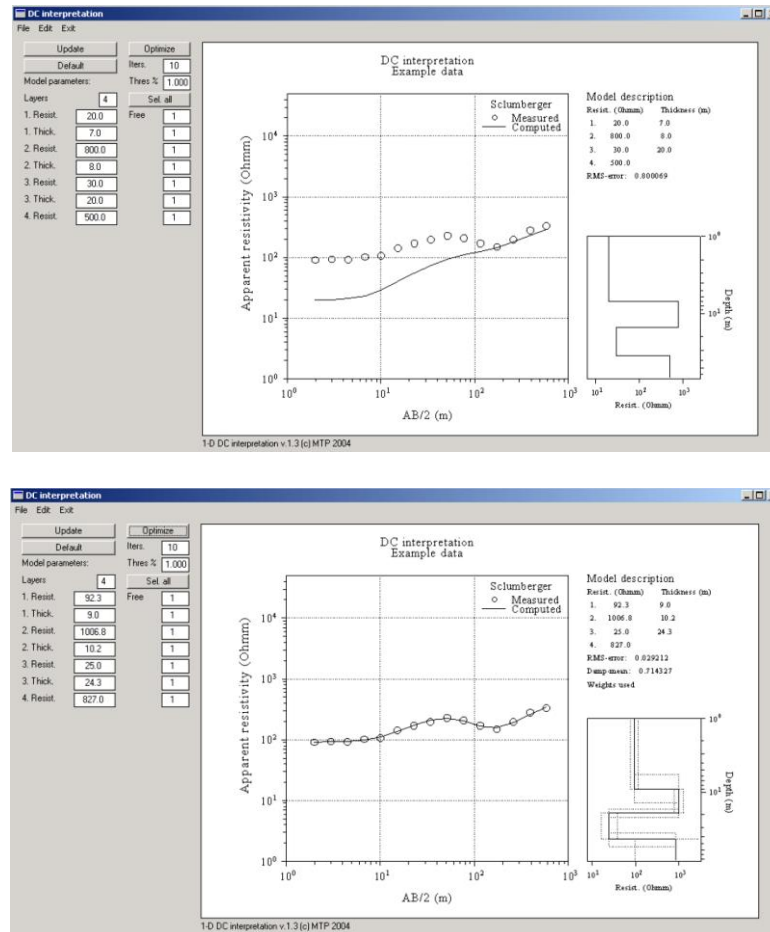


Fig. 3.12: Etape în procesarea unei SEV

Deși suprapunerea dintre curba teoretică și cea reală este aproape perfectă, soluția obținută nu este neapărat foarte exactă datorită unui număr practic infinit de modele (perechi de rezistivități și grosimi ale stratelor) care ar putea genera aceeași curbă teoretică. Chiar dacă valoare rezistivității unui material poate varia doar între anumite limite „firești”, domeniul intervalului de variație este foarte mare, ceea ce duce la erori de estimare a grosimii stratelor. Din acest motiv, de cele mai multe ori, valorile rezistivității reale ale stratelor sunt măsurate pe eșantioane prelevate din foraje geotehnice sau metoda este calibrată pe fiecare nou amplasament pe o litologie bine cunoscută.

Realizarea măsurătorilor de teren pentru achiziția datelor de tip SEV este reglementată în normativele naționale și internaționale în următoarele standarde:

**STAS 11156-78** Teren de fundare. Geofizica ingineriasca. Terminologie

**STAS 1242/8-75** Teren de fundare. Principii de cercetare geofizica a terenului de fundare prin metode electrometrice in current continuu

**ASTMD 6431-99(2010)** Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation

**ASTM G57-95A(2001)** Standard Test Method for Field Measurements of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method

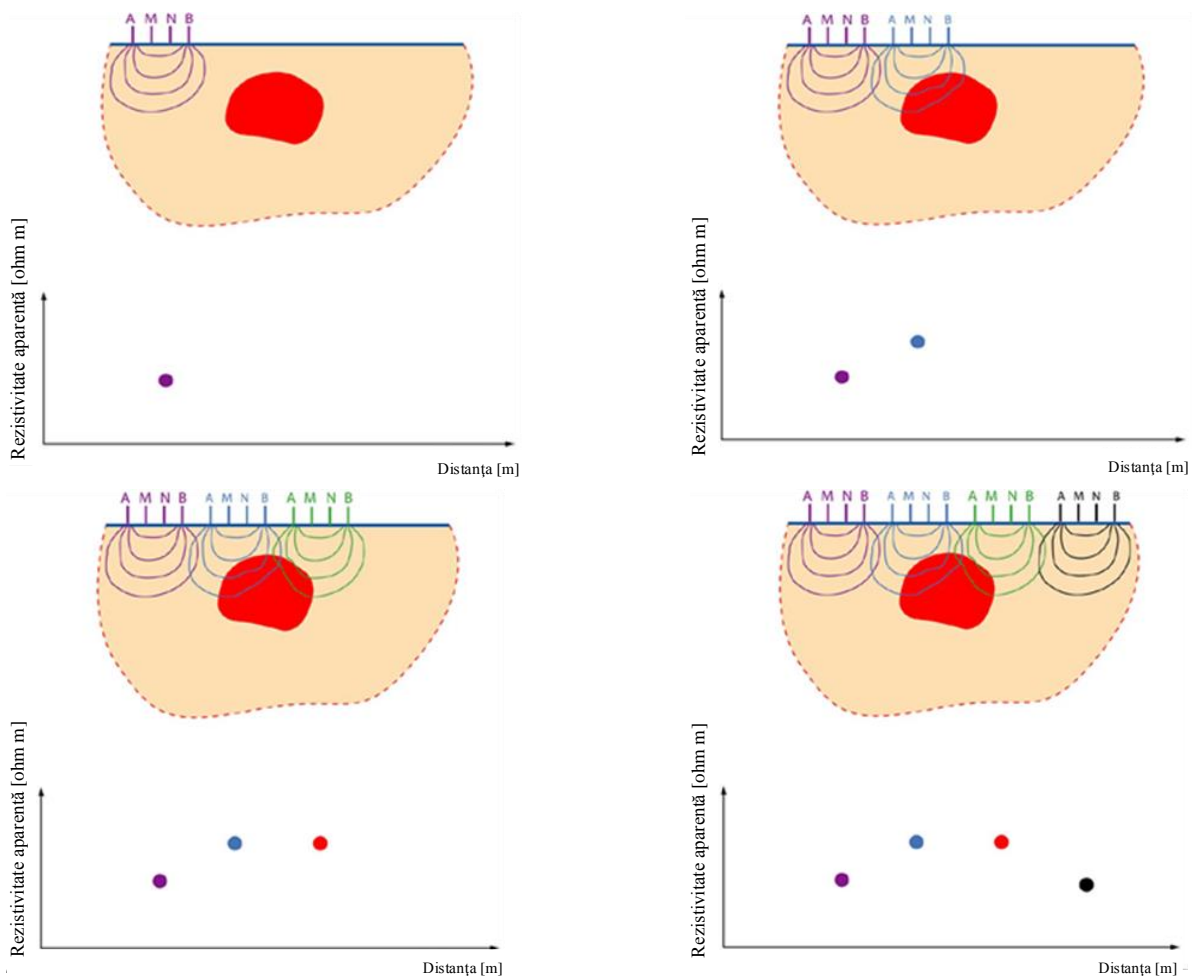
**BS 1377-9 1990** Methods for test for soils for civil engineering purposes. In-situ tests

### 3.6 Metoda profilării

**Metoda profilării** este folosită pentru determinarea variațiilor orizontale ale rezistivității electrice, obținându-se un profil orizontal de rezistivitatea aparentă specific pentru o anumită adâncime de investigare. În timpul efectuării măsurătorilor distanța dintre electrozii de măsură și cei de curent este păstrată constantă, măsurătorile efectuându-se în poziții succesive în lungul unui profil, translătându-se întreg dispozitivul de măsură. Adâncime de investigare este direct proporțională cu lungimea dispozitivului de măsură, putându-se realiza hărți și profiluri de rezistivitate electrică aparentă pentru mai multe nivele de adâncime.

Metoda profilării geoelectrice folosește același tip de dispozitive ca și cele pentru sondaj electric vertical (SEV) numai că interesul este focalizat pe unul sau mai multe nivele de adâncime, de obicei de maxim 2-3 metri. În timpul efectuării măsurătorilor, distanța dintre electori este păstrată constantă, iar întreg dispozitivul este deplasat în puncte succesive ale profilului de investigare.

Această metodă este ideală atunci când dorim să cunoaștem caracteristicile subsolului la adâncimi relative mici, dar pe distanțe mari. Metoda este aplicată în special în arheologie începând cu anii '50, dar poate fi aplicată cu succes și în geofizica mediului, pentru evidențierea obiectelor îngropate (conducte sau cabluri electrice) și urmărirea poluanților de la suprafața terenului.



**Fig. 3.13: Etape de realizare a profilării electrice prin păstrarea geometriei dispozitivului de măsură și re poziționarea acestuia în nodurile unui caroi aj echidistant sau în lungul unui profil (după Marescot 2008).**

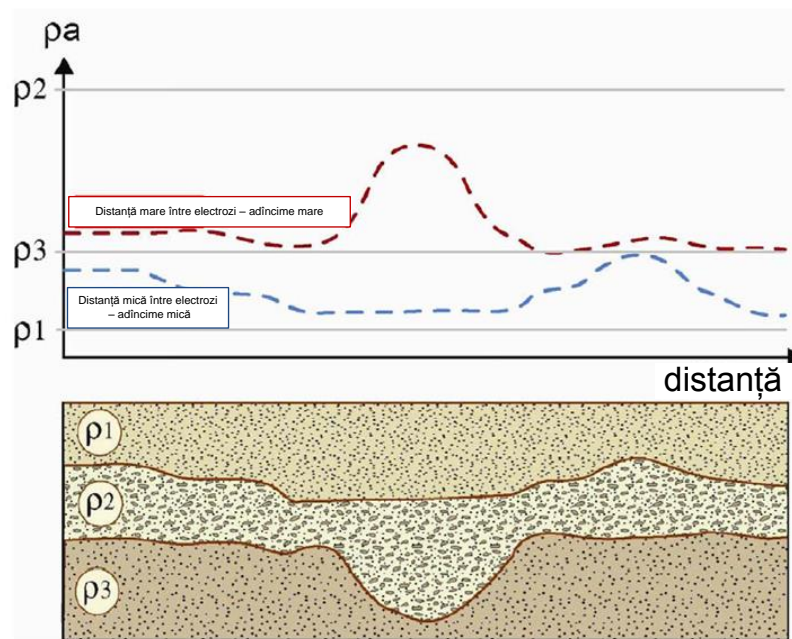


Fig. 3.14: Variația profilurilor de rezistivitate cu adâncimea de investigare (adâncimea de investigare mărindu-se odată cu creșterea intervalului de dispunere al electrozilor în dispozitivul de măsură) (după Marescot 2008).

### 3.7 Tomografia (geo)electrică

Tomografia electrică reprezintă o combinație a metodei sondajului electric vertical cu cea profilării electrice, practic putând fi văzută ca un număr mare de SEV-uri efectuate la o distanță mică între ele în lungul unui profil sau ca o profilare electrică pentru mai multe adâncimi de investigare.

Sistemul de achiziție constă într-un număr mare de electrozi plasați echidistant în lungul unui profil, conectați la un sistem de injecție/achiziție care efectuează toate măsurătorile posibile (toate combinațiile posibile de doi electrozi de curent și doi electrozi de potențial) pentru un anumit tip de dispunere a electrozilor (Schlumberger, Wenner, Dipol, etc.). În timpul efectuării măsurătorilor rolul unui electrod poate fi: de curent, de potențial sau nul (exemplul electrodului 4), în funcție de algoritmul de măsurare a sistemului de injecție/achiziție.

După efectuarea măsurătorilor, rezistivitățile înregistrate sunt corelate într-o pseudo-secțiune de rezistivități aparente, fiecare ocupând o poziție bine stabilită, având ca ordonată mijlocul dispozitivului de măsură, iar ca abscisă jumătatea din distanța liniei de emisie (Fig. 3.15).

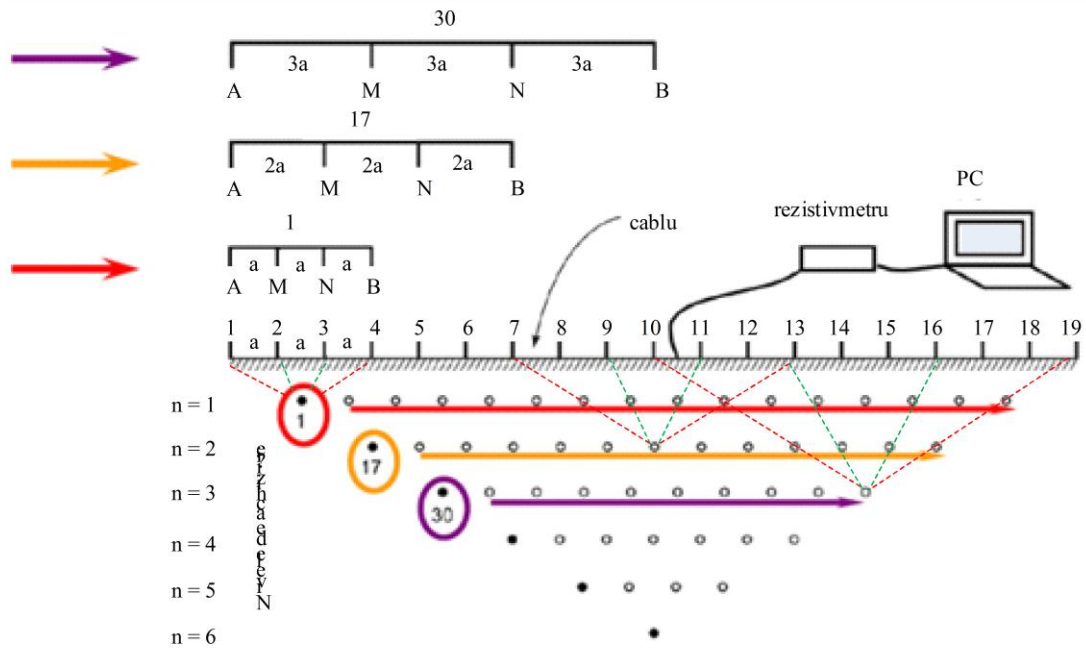


Fig. 3.15: Dispunerea electrozilor (1-19) în lungul profilului de măsură și dispunere rezistivităților măsurate în pseudo secțiunea de rezistivitate aparentă

O astfel de secțiune nu reprezintă fidel distribuția de rezistivitate reală deoarece valoarea rezistivității aparente corespunzătoare unei anumite lungimi AB nu este egală cu rezistivitatea reală de la adâncimea  $AB/2$ . Chiar în cazul mediilor stratificate orizontal, rezistivitatea aparentă nu poate fi asociată unui anumit punct din mediul cercetat ci unui volum cuprins între suprafața și un plan orizontal situat la adâncimea  $AB/2$ . De fapt, rezistivitatea aparentă reprezintă rezistivitatea longitudinală a volumului de material mai sus menționat.

Cu atât mai mult, fiecare dispozitiv „vede” într-un anumit fel structura cercetată (Fig. 3.16). Prin urmare, aceeași structură apare în secțiunile de rezistivitate aparentă sub diferite forme în funcție de caracteristica de sensibilitate/directivitate a dispozitivelor utilizate. Așadar, interpretarea, chiar în termeni calitativi, nu poate fi realizată în absența unor informații directe.



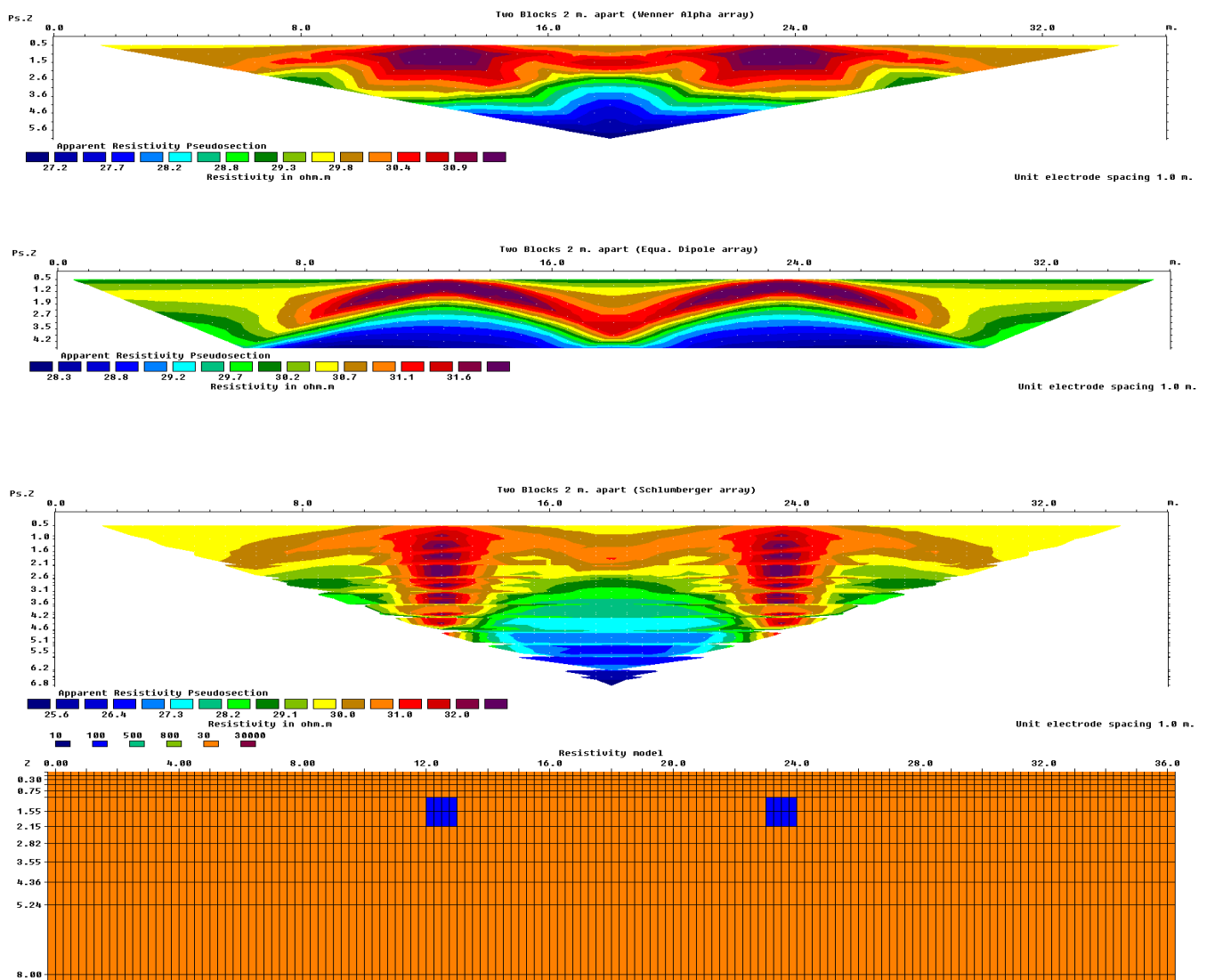


Fig. 3.16 Pseudo-sectiuni de rezistivitate ale aceluiași model geologic

Interpretarea pseudo-secțiunilor de rezistivitate se realizează cu ajutorul unor programe specializate de analiză inversă, rezultând în secțiuni litologice asemănătoare cu cea reală. Acest fapt se datorează ,ca și în cazul interpretării curbelor SEV, unui număr infinit de secțiuni teoretice care pot să genereze o pseudo-secțiune de rezistivitate asemănătoare cu cea obținută din măsurătorile reale.

Așadar, chiar și după ce secțiunile au fost procesate cu ajutorul programelor dedicate, tot este nevoie de o prelucrare ulterioară a rezultatelor obținute.

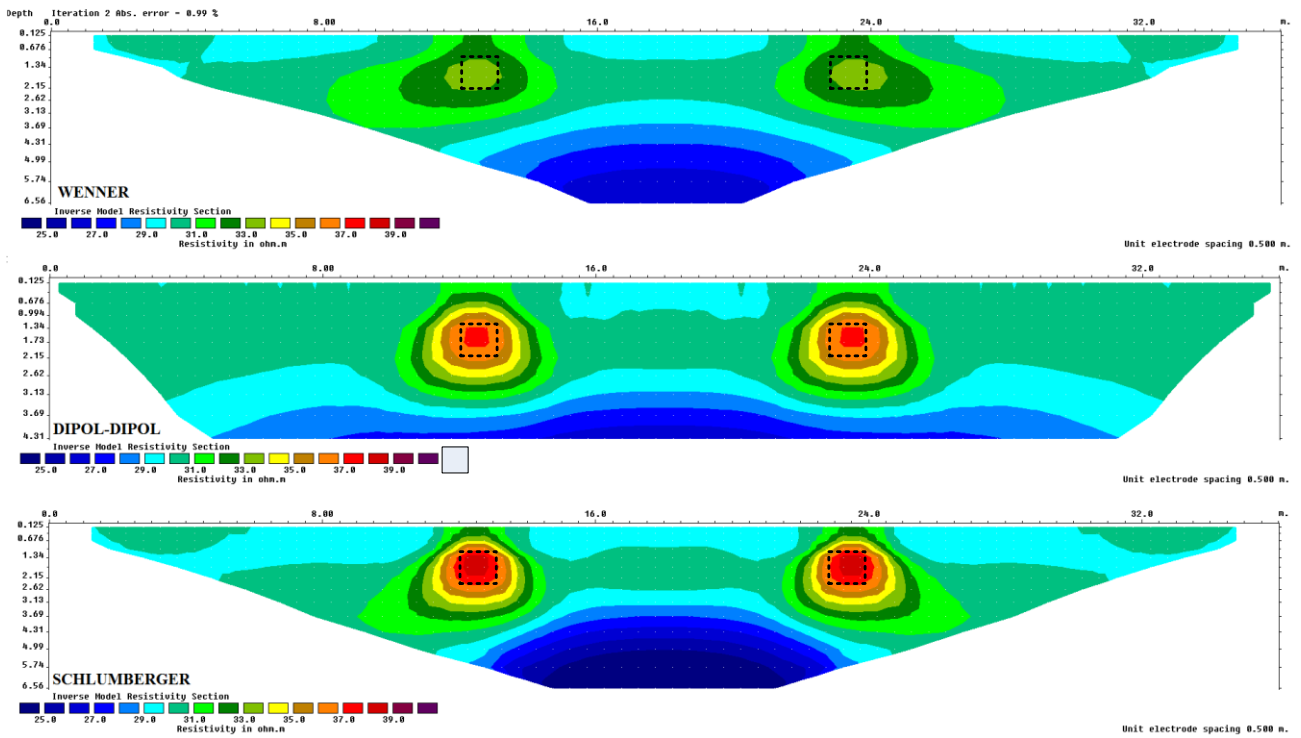


Fig. 3.17: Modele geofizice rezultate in urma procesării pseudo-secțiunilor de rezistivitate

Există și posibilitatea realizării tomografiilor electrice 3D folosind același principiu ca la cele 2D, doar că electrozii vor fi dispuși într-o rețea spațială. Această metodă oferă o rezoluție mult mai bună a măsurătorilor, dar necesită o procesare mult mai laborioasă, fiind mai rar folosită și doar la studiile de mare detaliu.

## 4 METODE SEISMICE

Metodele seismice se bazează pe măsurarea timpilor parcurăși din punctul de generare (sursă) la receptori (geofone) a energiei mecanice generate în punctul sursă. În cazul în care mediul subteran ar fi constituit dintr-un singur material omogen și izotrop energia mecanică ar ajunge de la sursă la receptor prin propagare directă între cele două puncte, geofonul înregistrând un singur eveniment .

În cazul unui mediu stratificat receptorul înregistrează o multitudine de evenimente (refracții, reflexii, difracții etc) cu timpi diferiți de sosire, înregistrarea acestora în domeniul timp purtând denumirea de trasă seismică. În cazul în care pentru aceeași generare seismică este înregistrată de un număr mai mare de receptori (fiecare receptor înregistrează o trasă) se formează un grup de trase ce poartă denumirea de înregistrare seismică.

Pentru a putea face distincție între evenimentele seismice de pe o trasă și pentru a putea procesa semnalul seismic este nevoie de o înțelegere foarte bună a fenomenelor care apar la propagarea energiei mecanice printr-un mediu stratificat. În cele ce urmează sunt prezentate succint principiile care stau la baza propagării energiei mecanice, fenomenele ce apar la interfața dintre medii cu impedanță acustică diferită, cât și particularitățile diferitor metode de procesare a înregistrărilor seismice

### 4.1 Elementele undei seismice

Dacă într-un punct al unui mediu omogen și izotrop este generată o excitație mecanică, aceasta se va propaga radial din punctul sursă în mediul adiacent sub forma de unde mecanice ce produc mici deformații în mediul prin care se propagă.

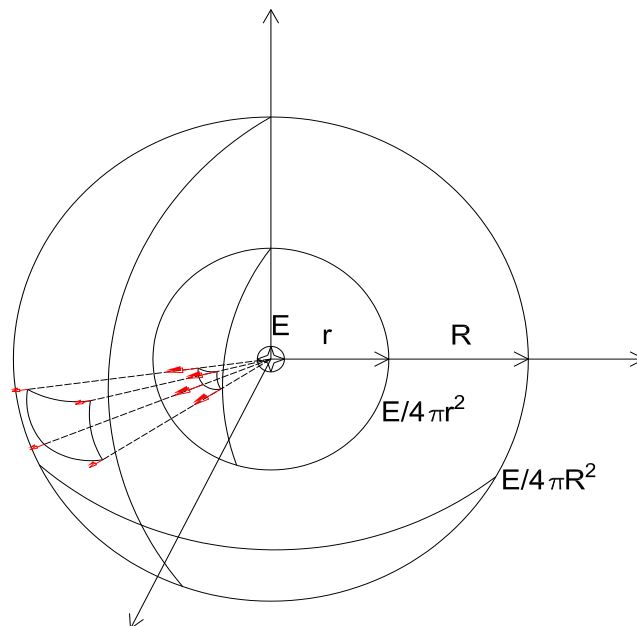


Fig. 4.1 Propagarea energiei seismice dintr-un punct sursă (după Telford 1967)

În orice moment, pentru o undă seismică se pot defini: domeniul undei, frontul și spatele undei, viteza de propagare, direcția de propagare și raza seismică.

Domeniul undei este un domeniu din spațiu în care, la un anumit moment de timp mediul este deformat.

Suprafața care separă domeniul undei de mediul prin care unda încă nu s-a propagat se numește front de undă, iar domeniul prin care unda s-a propagat deja numindu-se spatele undei.

Viteza de propagare (viteza reală) a unei unde este viteza cu care aceasta se propagă pe direcția normală pe frontul de undă. Viteza de propagare măsurată pe orice altă direcție în afară de cea perpendiculară pe frontul de undă fiind o viteză aparentă.

Raza seismică este distanța dintre sursă și frontul undei, fiind normală pe acesta..

Unda sferică este unda al cărei front de undă este o suprafață sferică, fiind caracteristică propagării în medii omogene și izotrope. În cazul în care frontul de undă poate fi considerat o suprafață plană, unda se definește ca undă plană și este caracteristică fenomenului de refracție critică sau distanțelor foarte mari față de punctul sursă și receptor.

## 4.2 Principiile fizice ale metodei

### 4.2.1 Principiul lui Huygens

„Fiecare punct de pe un front de undă poate fi considerat ca punct de plecare a unei unde elementare, care se propagă cu aceeași viteză și lungime de undă ca și unda inițială. Noul front de undă este creat prin însumarea tuturor acestor unde elementare.”, acest principiu stând la înțelegerea fenomenelor de reflexie, refracție și la estimarea pozițiilor succesive ale frontului de undă.

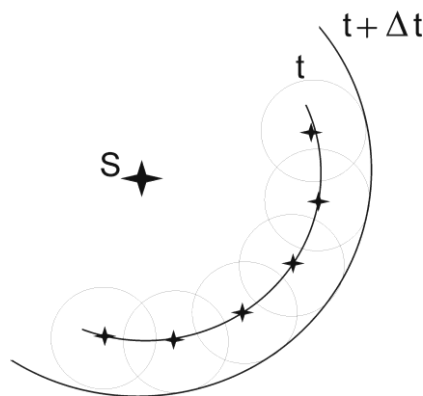


Fig. 4.2: Reprezentarea fronturilor de undă conform principiului lui Huygens

### 4.2.2 Principiul lui Fermat

„La trecerea unei raze de lumină prin medii cu densități diferite, aceasta va urma traiectoria pe care va putea să o parcurgă în cel mai scurt timp”.

Chiar dacă observațiile inițiale au fost făcute pentru unde electromagnetice, s-a observat că acest principiu este valid și în cazul propagării undelor mecanice prin mediul geologic, principiul putând fi reformulat ca: „Propagarea unei seismice se face pe drumul corespunzător timpului minim”.

### 4.2.3 Principiul superpoziției (suprapunerii efectelor)

Dacă într-un punct se manifestă efectul unor excitații mecanice provenite din diferite cauze, excitația totală este rezultatul însumării excitațiilor mecanice individuale.

#### 4.2.4 Principiul reciprocității

Dacă se schimbă poziția sursei cu ce a receptorului timpul de propagare, drumul parcurs și forma oscilației rămâne neschimbată. Cu toate că în condițiile geologice reale s-au observat mici abateri de la acest principiu el este folosit în etapa de procesare a înregistrărilor.

#### 4.2.5 Legea reflexiei și refracției

Principiul lui Huygens este folosit în studiul fenomenelor de reflexie și refracție. Pentru a demonstra legea reflexiei se pornește de la analiza frontului unei unde plane ce incide pe o suprafață orizontală, considerată limita de separație dintre două medii, caracterizate de valori diferite ale vitezei de propagare a undelor. Viteza de propagare în mediul de deasupra limitei este egală cu  $V_1$ , iar viteza în mediul de sub limită este  $V_2$ , cu condiția ca  $V_2 > V_1$ .

În (Fig. 4.3-Fig. 4.6) sunt prezentate fronturile de undă generate din patru puncte de pe suprafața de separație dintre cele două medii, poziția frontului de undă la un anumit timp fiind reprezentată prin culoarea roșie. Se observă că datorită vitezei mai mari de propagare din mediul 2 arcul de cer determinat frontul de undă este mai mare. Astfel folosind principiul lui Huygens și făcând înfășurătoarea fronturilor de undă obținem frontul de undă al unde reflectate ce se întoarce înapoi în mediul 1 și unda refractată ce se propagă în mediul 2 (Fig. 4.7). Se observă că direcția unde (care este perpendiculară pe frontul de undă) se schimbă la trecere în mediul 2 (curbându-se spre orizontală), iar în cazul unde reflectate aceasta face același unghi cu normala suprafeței de separație ca și direcția unde incidente (unghiul de reflexie este egal cu unghiul de incidență)

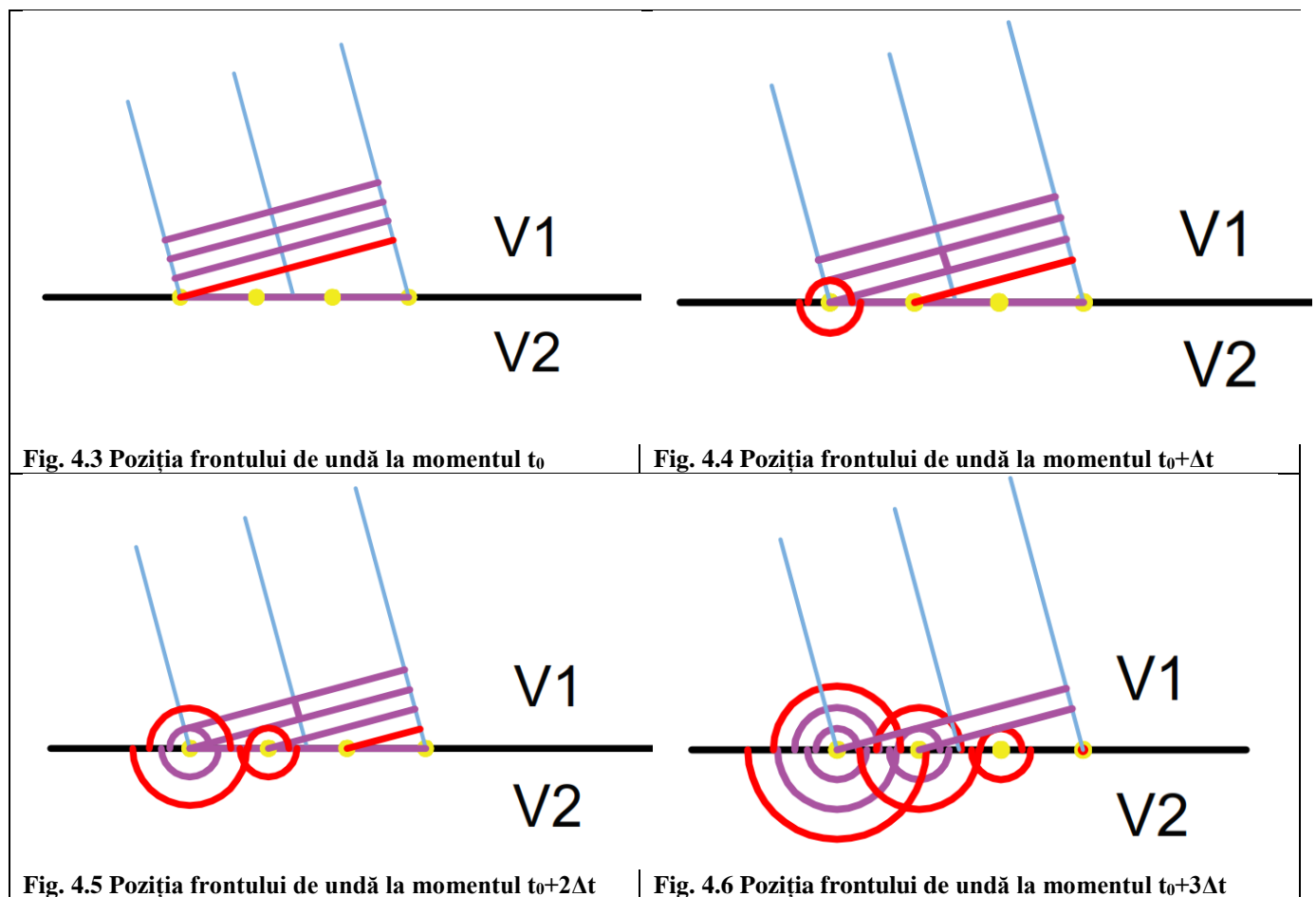


Fig. 4.3 Poziția frontului de undă la momentul  $t_0$

Fig. 4.4 Poziția frontului de undă la momentul  $t_0 + \Delta t$

Fig. 4.5 Poziția frontului de undă la momentul  $t_0 + 2\Delta t$

Fig. 4.6 Poziția frontului de undă la momentul  $t_0 + 3\Delta t$

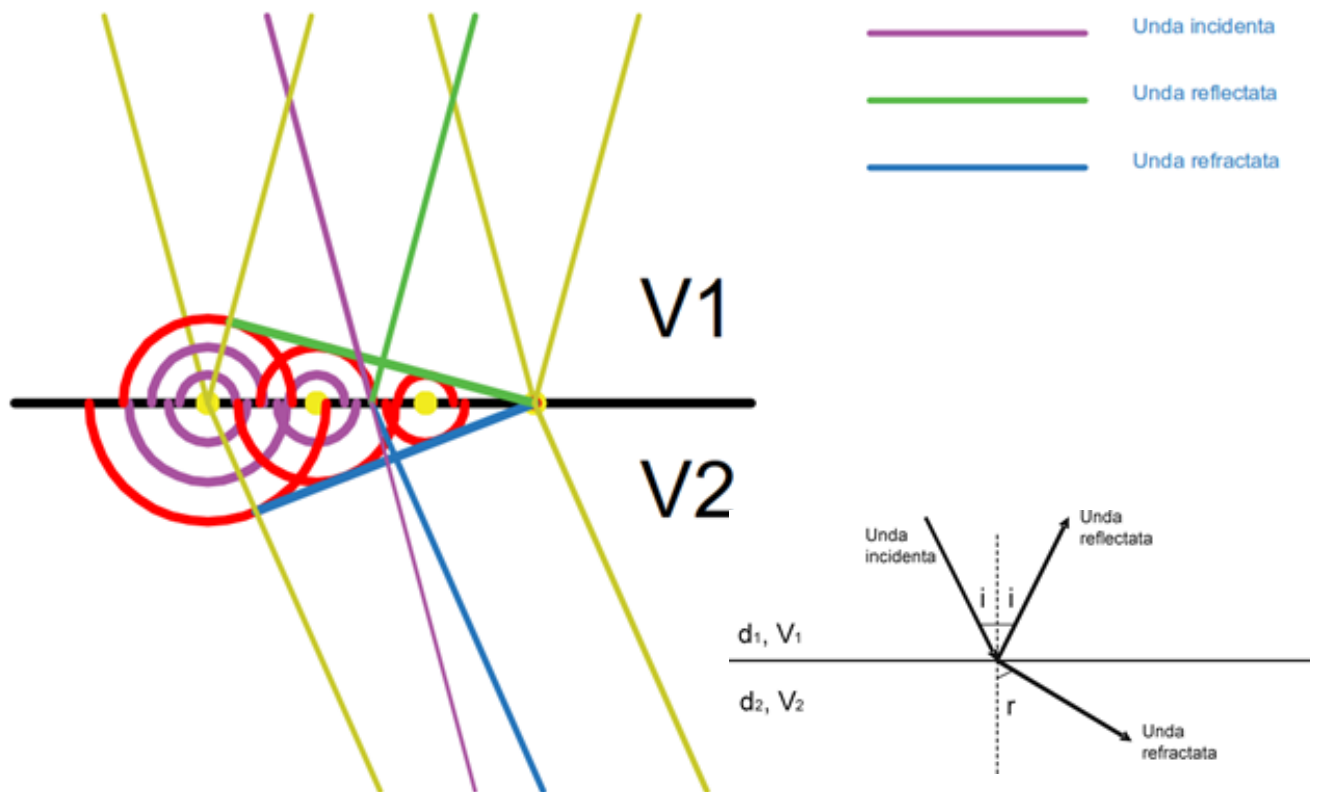


Fig. 4.7 Apariția fenomenului de reflexie și refracție

### 4.3 Tipuri de unde seismice

În timpul generării energiei se propagă sub forma mai multor tipuri de unde:

- unde de volum, care sunt alcătuite din undele principale (undele P) și undele secundare (undele S);
- unde de suprafață, alcătuite de undele Reyleigh și undele Lowe.

#### 4.3.1 Unde de volum

Undele de volum sunt undele care se propagă în interiorul Pământului. În funcție de sensul de deplasare a particulelor solului față de direcția de propagare a undei avem unde longitudinale (P) și transversale (S).

Unda P este unda a cărei propagare se face prin deplasarea particulelor mediului prin dilatări și comprimări succesive în lungul direcției de propagare (Fig. 4.8). Undele P se propagă prin orice fel de mediu (solid, lichid și gazos). Viteza în aer este de 330 m/s, iar în apă este de 1450 m/s. În cazul în care undele P apar datorită producerii unor cutremure, acestea sunt considerate mai puțin destructive comparativ cu undele S și cele de suprafață.

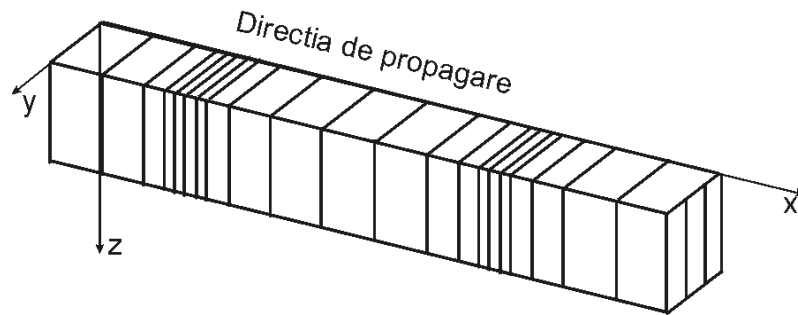


Fig. 4.8: Propagarea undei P

Unda S este unda a cărei propagare se face prin deplasarea particulelor mediului pe direcție transversală față de direcția de propagare (Fig. 4.9). Undele S sunt cunoscute sub numele de unde secunde, deoarece ele ajung la receptor după undele P, considerate unde prime, având o viteză mai mică decât cea a undelor P.

Spre deosebire de undele P, undele S nu se propagă prin medii fluide și gazoase, deoarece în aceste medii modulul de forfecare este egal cu 0. Pornind de la această observație, seismologii au ajuns la concluzia că nucleul extern al globului terestru este lichid.

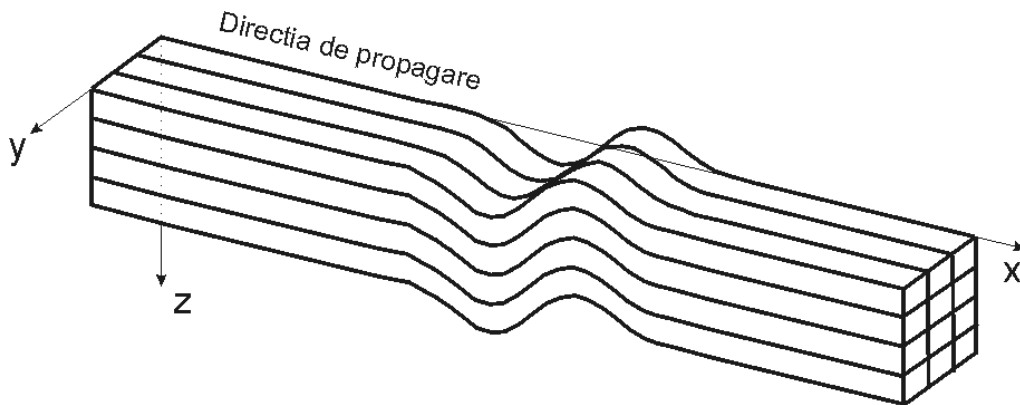


Fig. 4.9: Propagarea undei S

Valorile vitezelor de propagare ale undelor P și S depind de valorile constantelor elastice. Cum aceste constante sunt întotdeauna pozitive, viteza undei P va fi întotdeauna mai mare decât viteza undei S.

#### 4.3.2 Unde de suprafață

Undele de suprafață sunt undele care se propagă în apropierea suprafeței solului. Viteza de propagare a acestora este mult mai mică decât aceea a undelor de volum. Din cauza valorilor scăzute de frecvență și a perioadei și amplitudinii mari, aceste unde sunt considerate cele mai periculoase, efectele lor distructive fiind mai mari comparativ cu cele ale undelor de volum.

În funcție de modul în care se deplasează particulele mediului în timpul propagării undelor de suprafață distingem unda Rayleigh și unda Love.

Unda Rayleigh este o undă de suprafață a cărei propagare se face prin mișcarea particulelor în plan vertical, în lungul și perpendicular pe direcția de propagare a undei seismice (Fig. 4.10). Această undă ia naștere prin suprapunerea oscilațiilor neomogene longitudinale și transversale. Existența acestor unde a fost descoperită de către Lord Rayleigh (1885). Undele Rayleigh sunt unde dispersive, ceea ce înseamnă că viteza lor de propagare depinde de frecvență. Amplitudinea deplasării particulelor scade cu adâncimea. Se consideră că în medii elastice omogene, viteza lor de propagare este cu 10% mai mică decât cea a undelor S.

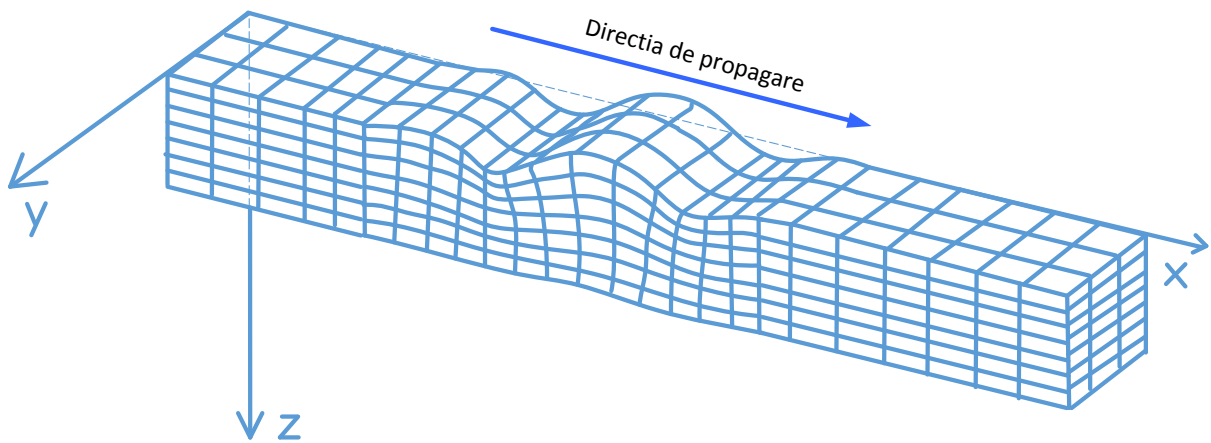


Fig. 4.10: Propagarea undei Rayleigh

Unda Love este o undă de suprafață care se propagă prin mișcarea particulelor în plan orizontal și perpendicular pe direcția de propagare a undei seismice (Fig. 4.11). Ca și undele Rayleigh, undele Love sunt un tip de unde dispersive iar amplitudinea mișcării particulelor scade cu creșterea adâncimii. Viteza lor de propagare este puțin mare decât cea a undelor Rayleigh. Unda Love a fost numită după A.E.H. Love (1911).

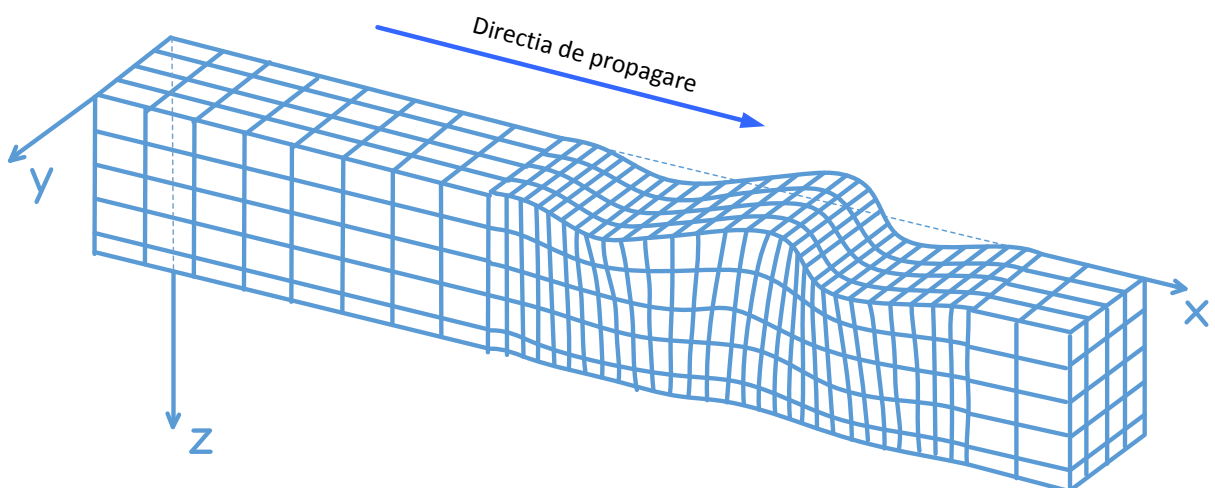


Fig. 4.11: Propagarea undei Love

#### 4.4 Parametrii undelor seismice

##### 4.4.1 Frecvența, perioada și lungimea de undă

Orice undă seismică se caracteriză prin: frecvență ( $f$ ), perioadă ( $T$ ) și viteză aparentă de propagare ( $V$ ). Lungimea de undă ( $\lambda$ ) se pot obține înmulțind viteza de propagare a undei, cu perioada, acești parametrii putându-se determina pe baza înregistrărilor seismice în domeniul timp (seismograme).

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$



$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{f} \quad (4.2)$$

unde,  $f$  este frecvența, exprimată în Hz, iar  $T$  este perioada, exprimată în secunde, iar  $\lambda$  este lungimea de undă exprimată în metri.

Perioada de oscilație se măsoară direct pe trasa seismică, fiind perioada de timp în care are loc o oscilație completă (Fig. 4.12). Determinând viteza de propagare a unei analizate putem calcula lungimea de undă.

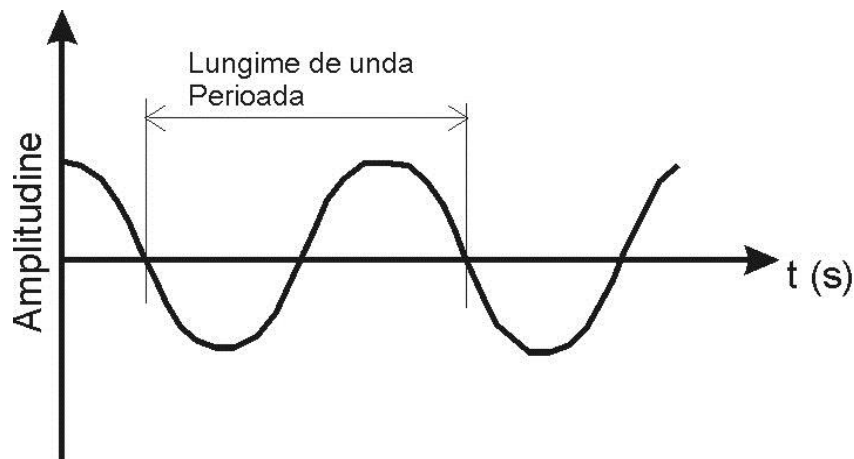


Fig. 4.12 Determinarea perioadei de oscilație a unei unde pe o înregistrare seismică

O estimare a valorilor aparente ale perioadei și vitezei de propagare a unei unde seismice se poate face grafic direct pe înregistrarea seismică. În (Fig. 4.13) este reprezentată o înregistrare seismică obținută folosind 36 de geofoane amplasate în lungul unui profil seismic la distanța (dintre geofoane) de 2 m. Poziția sursei este la metru 38 al profilului iar intervalul de eșantionare în timp este de 1 ms.

Viteza aparentă de propagare a unei analizate,  $V_a$ , se calculează împărțind distanța geofoanelor care înregistrează această undă ( $dx$ ) la diferența dintre timpii de sosire ai undeii ( $dt$ ) la geofoanele respective (Fig. 4.13). Pentru forma de undă ce face parte din unda analizată perioada se citește pe o singură trasă seismică, frecvența fiind determinată din inversarea perioadei.

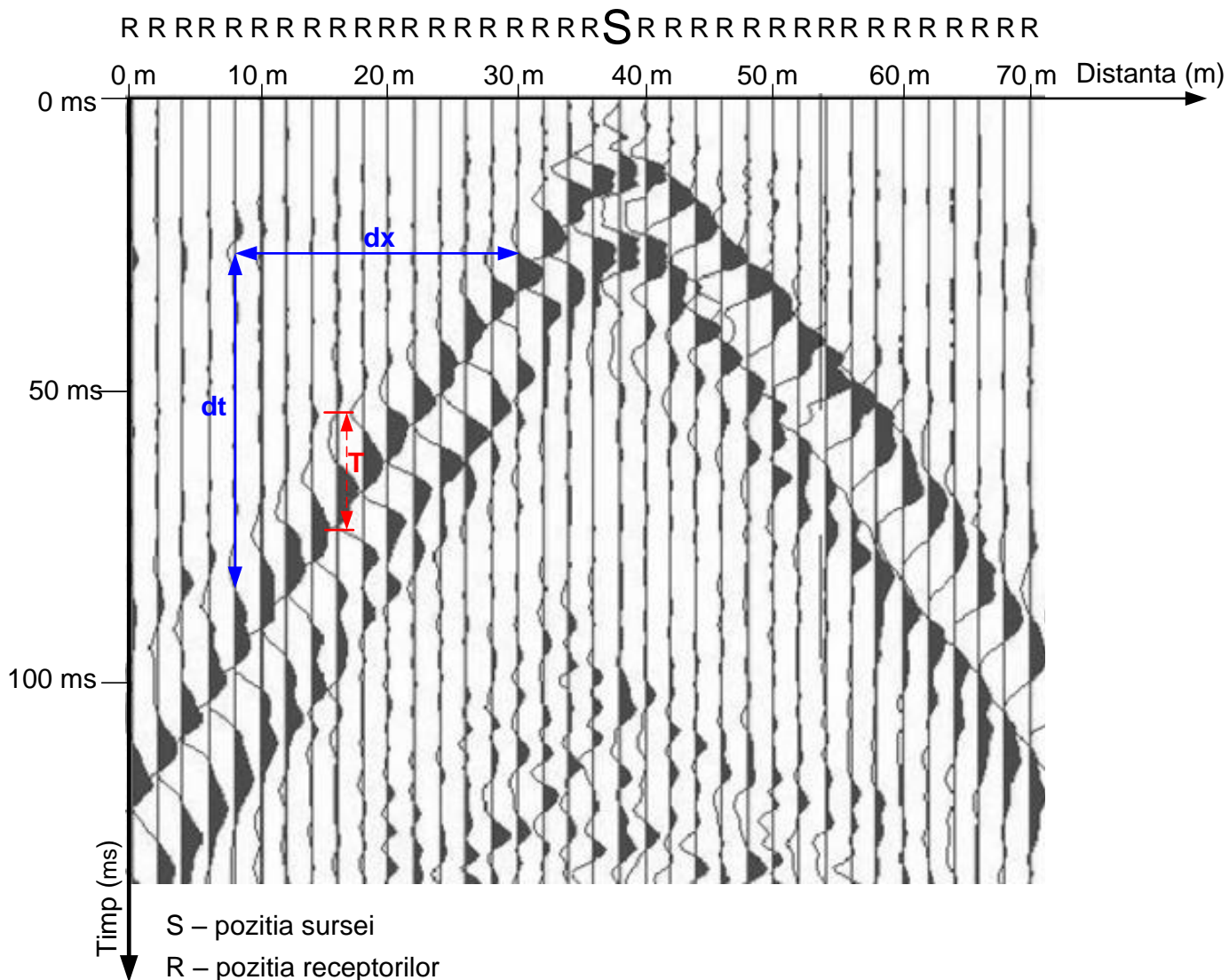


Fig. 4.13: Determinarea perioadei,  $T$  (pe o trasă seismică), și a vitezei de propagare, funcție de  $dx$  și  $dt$  (pe un grup de trase), pentru o undă seismică

#### 4.4.2 Spectrul de frecvență. Transformata Fourier

Înregistrările seismice brute sunt înregistrate și reprezentate în domeniul timp. Pentru o analiză mai bună a undelor înregistrate de un receptor este foarte util să reprezentăm înregistrarea în domeniul frecvență. Pentru a transforma o înregistrare seismică din domeniul timp în domeniul frecvență se apelează la transformata Fourier, care descompune semnalul complex înregistrat de receptor în mai multe unde sinusoidale de frecvențe diferite. Această descompunere este foarte utilă în faza de filtrare și procesare ulterioară a semnalului.

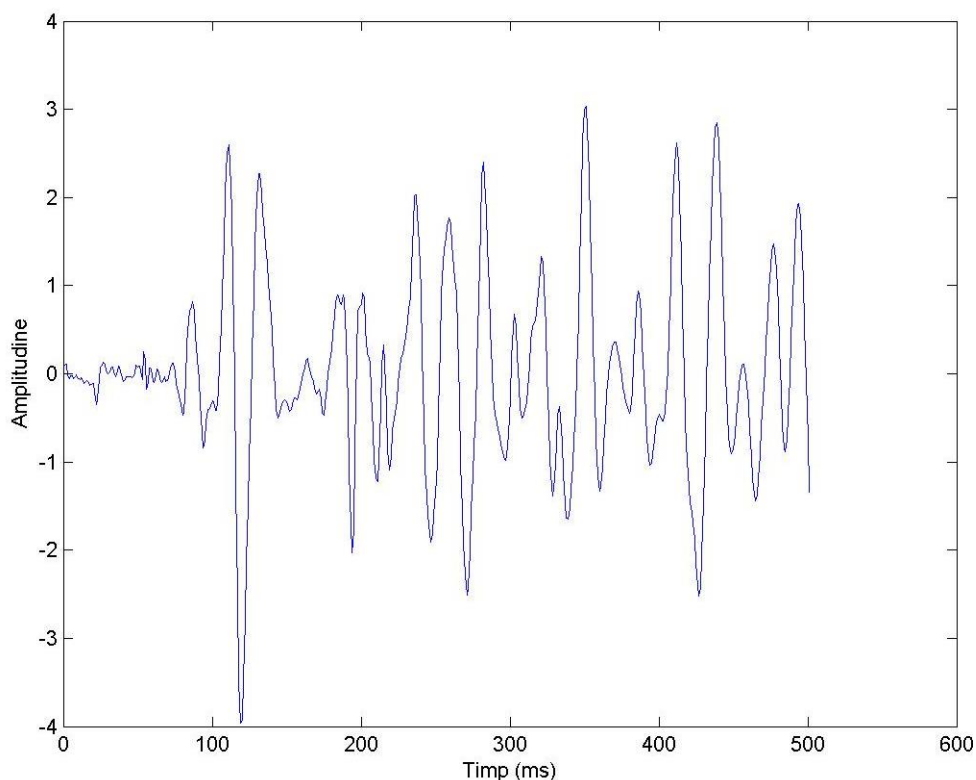
După aplicarea transformatei Fourier unei trase se obține un spectru de frecvențe din care este format semnalul inițial. În funcție de numărul de trase analizat se obțin spectre de frecvență 1D (când se analizează o singură trasă) și 2D (când se analizează mai multe trase).

Transformata Fourier 1D este folosită pentru a transforma un semnal reprezentat în domeniul timp,  $g(t)$ , într-unul reprezentat în domeniul frecvență,  $G(f)$ :

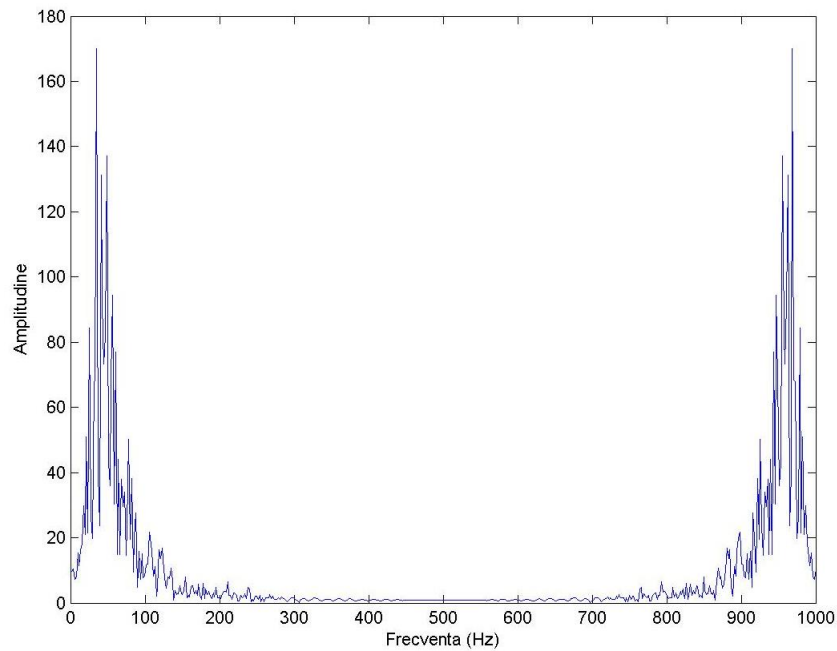
$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.3)$$

În (**Error! Reference source not found.**) este reprezentată o trasă seismică; înregistrată cu un interval de eșantionare în timp de 1 ms.

Aplicând acestei trase transformata Fourier 1D (4.8) obținem spectrul de frecvență (Fig. 4.15, Fig. 4.16) și spectrul de fază (Fig. 4.17) al undelor ce formează (prin însumare) trasa inițială



**Fig. 4.14** Trasă seismică reprezentată în domeniul timp

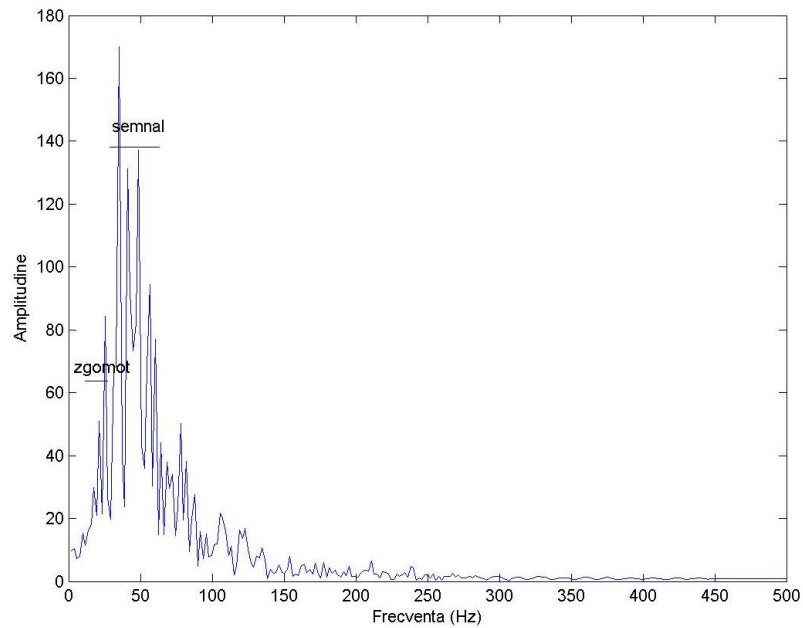


**Fig. 4.15: Spectrul de amplitudine al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale**

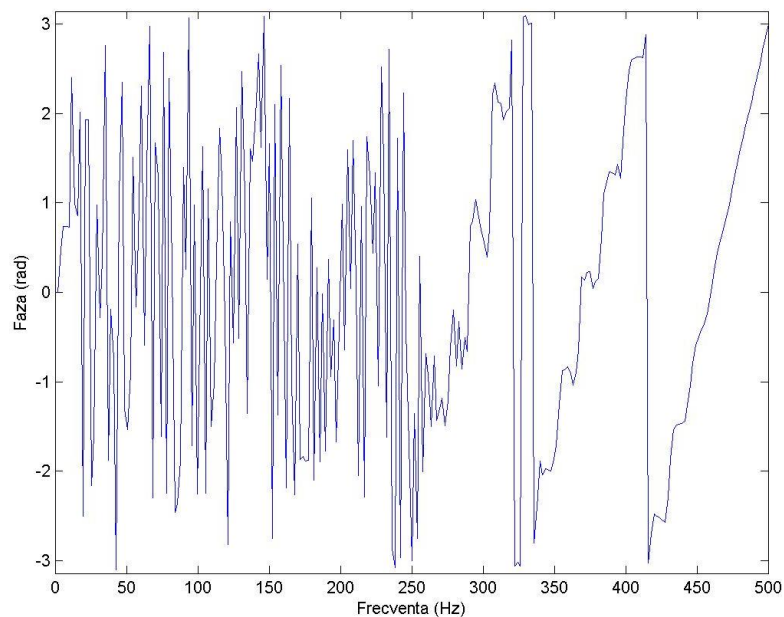
În Fig. 4.15 se observă o simetrie a spectrului de frecvență față de frecvența centrală, de 500Hz. Această valoare este corespunzătoare frecvenței Nyquist care are valoarea de jumătate din frecvența de eșantionare în timp a semnalului înregistrat de geofon. În cazul de față, intervalul de eșantionare este de 1 ms (1000 de citiri pe secundă), deci o frecvență de eșantionare în timp de 1000Hz având o frecvență Nyquist corespunzătoare de 500 Hz ( $1000\text{Hz}/2$ ).

În funcție de frecvența Nyquist frecvențele se împart în frecvențe pozitive (0-500Hz), care pot conține semnal util și frecvențe negative (500-1000Hz) care reprezintă zgomot rezultat în urma aplicării transformatei Fourier.

După înlăturarea frecvențelor negative se poate trece la separarea semnalului util față de zgomot, diferențierea făcându-se în funcție de amplitudinea semnalului din spectrul de frecvență (Fig. 4.16).



**Fig. 4.16: Spectrul de amplitudine al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale, cu indicarea intervalelor de frecvență în care este concentrat semnalul.**



**Fig. 4.17: Spectrul de fază al transformatei Fourier aplicate trasei inițiale**

#### 4.5 Viteza de propagare a undelor seismice

Viteza de propagare este cea mai importantă caracteristică a unei unde seismice, aflarea acesteia fiind principalul obiectiv al măsurătorilor seismice de mică adâncime.

Vitezei de propagare a undelor seismice printr-un anumit mediu este în directă legătură proprietățile fizico-mecanice ale mediului geologic și de omogenitatea acestuia.

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.4)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (4.5)$$

unde:

- $V_P$  este viteza undei P;
- $V_S$  este viteza undei S;
- E este modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young);
- $\rho$  este densitatea rocii;
- $\nu$  este coeficientul lui Poisson;

Valoarea vitezelor de propagare ale undelor seismice ce pot fi măsurate în studiile seismice de mică variație între 100 m/s și 7000 m/s, obținerea unei anumite valori fiind condiționată de (Enescu și Orban, 1979):

- proprietățile fizico-chimice și cristalo-chimice ale rocilor, compoziția petrografică, gradul de cimentare și adâncimea în cazul rocilor magmatice, metamorfice și a rocilor sedimentare cimentate.
- porozitatea și gradul de saturație în apă în cazul pământurilor.

**Tab. 4.1: Intervale de variație ale vitezei undei principale în funcție de tipul de rocă**

<i>Tip de rocă</i>	<i>Viteza <math>V_p</math> (m/s)</i>
Roci sedimentare:	
- Terigene	200 – 4000
- Carbonatate	2600 – 6200
- De precipitație chimică	3500 – 6400
Roci metamorfice	3800 - 7000
Roci eruptive:	
- Acide	4000 – 5700
- Bazice	4500 – 6000

**Tab. 4.2: Intervale de variație ale vitezei undei principale pentru diferite medii de propagare**

<i>Tip de material</i>	<i>Viteza <math>V_p</math> (m/s)</i>
Aer (20 °C)	343
Apă	1400 – 1600
Gheață	3100 - 4200
Sol	200 – 700
Loess	375 – 400
Nisip uscat, pietriș	300 – 800

<i>Tip de material</i>	<i>Viteza Vp (m/s)</i>
Nisip umed (în funcție de gradul de saturație)	500 – 1800
Argilă nisipoasă	350 – 900
Argilă	1100 – 2500
Marnă	2000 – 3500
Gresie friabilă	1500 – 2500
Gresie	1800 – 4000
Șisturi argiloase	2700 – 4700
Cretă	1800 – 3800
Calcar	2600 – 6200
Dolomit	5000 – 6200
Sare gemă, anhidrit	4100 – 6400
Gips	3500 – 4500
Granit	4200 – 5700
Bazalt	4400 – 6000
Petrol	1300 – 1400

În cazul rocilor care au porii saturați cu diferite fluide, viteza de propagare prin acest mediu este în funcție de viteza de propagare prin materialul solid, viteza de propagare prin fluid și porozitatea materialului.

$$\frac{1}{V_{R+F}} = \frac{1-n}{V_R} + \frac{n}{V_F} \quad (4.6)$$

unde:

- $V_{R+F}$  este viteza într-o rocă saturată cu fluid;
- $V_R$  este viteza în matricea minerală;
- $V_F$  este viteza în fluidul din spațiul poros,
- $n$  este porozitatea.

#### 4.6 Atenuarea undelor seismice

Energia undelor seismice scade cu cât ne îndepărtăm de punctul de generare, la receptor ajungând doar o foarte mică parte din energia inițială. Fenomenele principale care influențează diminuarea energiei inițiale sunt:

- divergența sferică;
- reflexie și refracție;
- absorbție;
- interferența undelor seismice;

#### 4.6.1 Divergența sferică:

Presupunând cazul unui mediu omogen și izotrop în care energia se propagă radial din punctul de generare fără a fi absorbită (amortizată) de mediu, ea fiind concentrată în frontul de undă, energia inițială trebuie să fie egală în orice moment cu produsul dintre densitatea energetică a frontului de undă și suprafața frontului de undă. Divergența sferică este fenomenul de scădere densității de energie pe unitate de suprafață odată cu creșterea frontului de undă.

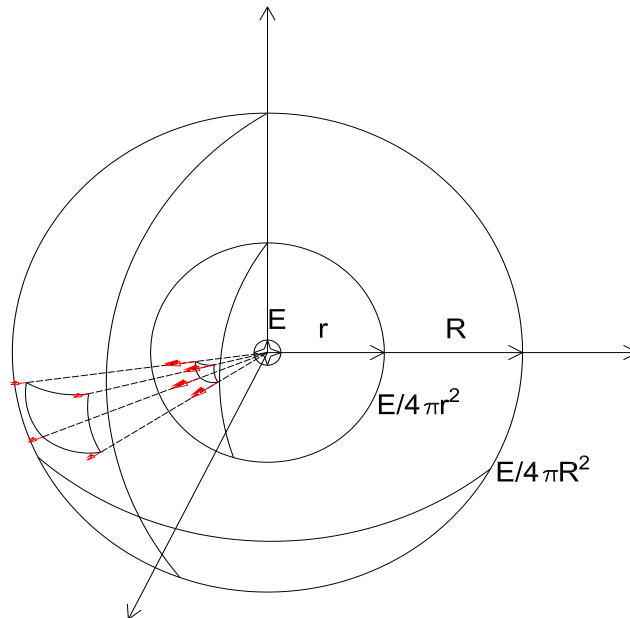


Fig. 4.18: Divergența sferică a energiei eliberată în sursă

$$E_r = \frac{E_0}{4\pi r^2} \quad (4.7)$$

unde:

- $E_r$  energia într-un punct plasat la distanța  $r$  față de sursă;
- $E_0$  energia generată de sursă.

Analizând formula (4.12) se observă că energia este afectată de creșterea distanței cu un factor de  $1/r^2$  fapt ce duce la o scădere a amplitudinii măsurate de receptor cu un factor de  $1/r$ .

#### 4.6.2 Reflexia și refracția

Reflexia și refracția sunt fenomene ce apar atunci când o undă mecanică întâlnește suprafața de separație dintre două medii cu impedanțe acustice diferite. Presupunând că unda se propagă inițial prin mediu 1 ( $\rho_1, v_1$ ) și ajunge pe limita de separație cu mediul 2 ( $\rho_2, v_2$ ), o parte din energie se întoarce în mediul 1 (reflexie), iar o parte se propagă în mediul 2 (refracție), cantitățile de energie reflectată și refractată fiind condiționate de coeficienții de reflexie și transmisie (refracție).

În (Fig. 4.19) este prezentată descompunerea unei incidente ( $i$ ) ce are amplitudinea  $A_i$ , într-o undă reflectată ( $r$ ), cu amplitudinea  $A_r$  și o undă transmisă ( $t$ ), cu amplitudinea  $A_t$ .



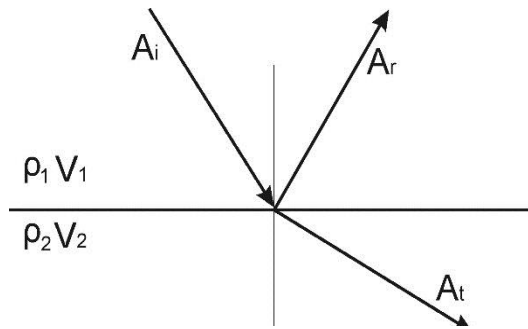


Fig. 4.19: Unda incidentă, unda reflectată și unda refractată;

Presupunând că nu avem pierderi de energie în timpul fenomenelor de reflexie și refracție atunci :

$$A_i = A_r + A_t = A_i R + A_i T \quad (4.8)$$

unde R și T sunt coeficienții de reflexie și transmisie definiți astfel:

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (4.9)$$

$$T = 1 - R \quad (4.10)$$

În cazul special al incidenței critice, întreaga energie a unei incidente este transmisă în mediul 2, aceasta propagându-se în lungul limitei dintre cele două medii, cu viteza  $v_2$ , dând naștere undelor frontale.

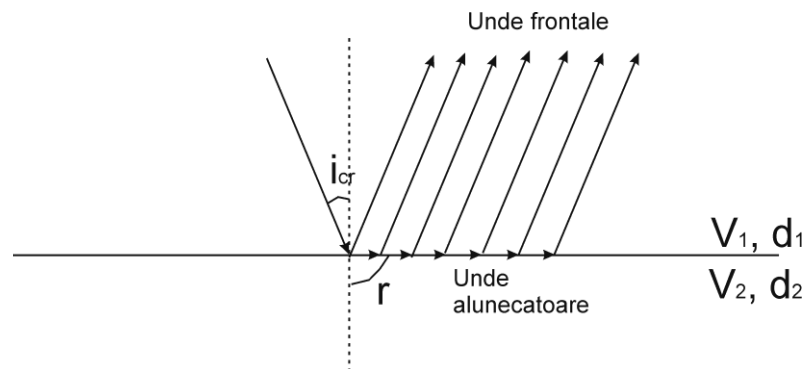


Fig. 4.20: Propagarea undelor la incidență critică

În funcție de tipul contrastelor realizate pe o limită geologică, acestea se împart în (I. Panea, 2013):

- Limite reflectatoare: limitele pe care se realizează un contrast de impedanță acustică (produsul dintre densitate și viteză);
- Limite refractoare: limitele pe care se realizează numai contrast de viteză de propagare.

Un contrast de impedanță acustică mare face ca o limită geologică să reflecte o mare cantitate de energie, ea fiind foarte vizibilă pentru seismica de reflexie, dar „lăsând” să treacă o foarte mică cantitate de energie. În cazul seismicii de suprafață prezența unui limite cu coeficient de reflexie foarte mare, la o

adâncime mică limitează adâncimea de investigare la acea limită.

#### 4.6.3 Absorbția

Fenomenul de absorbție se referă la disiparea energiei prin frecare internă în timpul propagării undelor seismice printr-un anumit mediu, determinându-se experimental următoarele lege de variație a amplitudinii unde în funcție de distanță:

$$a_r = a_0 e^{-\alpha(f)r} ; \quad (4.11)$$

unde:

- $a_r$  este amplitudinea la distanța  $r$ ;
- $a_0$  este amplitudinea în punctul inițial;
- $\alpha$  este coeficientul de absorbție;
- $f$  este frecvența.

Din măsurătorile efectuate s-a observat că coeficientul de absorbție poate avea valori cuprinse în intervalul 0,001 – 0,1, valorile maxime întâlnindu-se în zona de suprafață, în rocile cu viteze mici de propagare. Este foarte important de observat faptul că coeficientul de absorbție ( $\alpha$ ) este dependent de frecvență, de obicei frecvențele înalte având un coeficient de absorbție mai mare față de frecvențele joase.

#### 4.6.4 Interferența undelor seismice

În cazul în care printr-un punct al mediului geologic se propagă concomitent mai multe unde, excitația în acest punct va condiționată de interferența acestora conform principiul superpoziției. În funcție de efectul pe care îl are asupra amplitudinii și formei de undă interferența poate fi de două tipuri (I. Panea 2013)

:

- Interferența distructivă, atunci când amplitudinea formei de undă scade iar forma oscilației se modifică semnificativ; interferența distructivă fiind întâlnită în medii geologice ce conțin strate foarte subțiri.
- Interferența constructivă, atunci când amplitudinea formei de undă este păstrată sau chiar îmbunătățită.

### 4.7 Rezoluția spațială

Rezoluția spațială este proprietate de a identifica două obiecte plasate pe o limită seismică.

Parametrul care influențează rezoluția spațială este distanța dintre geofoane. Dacă presupunem existența a două obiecte pe o limită seismică, pentru a le identifica pe secțiunea seismică avem nevoie de cel puțin două puncte de reflexie pentru fiecare obiect. Informațiile primite de la un punct de reflexie se regăsesc pe o singură trasă seismică (recepționată la un singur receptor seismic). Astfel, pentru o mai bună vizualizare a fiecărui obiect avem nevoie de mai multe trase seismice/obiect ceea ce înseamnă că trebuie să folosim o distanță mai mică între geofoane pentru a permite acoperirea cu mai multe trase a obiectului analizat.

## 4.8 Metode de investigare seismică

### 4.8.1 Seismică de refracție

Seismica de refracție implică măsurarea timpului de sosire a primei unde înregistrate de fiecare geofon din linia seismică activă. Aceasta are la bază legea lui Snell (a unghiului critic de incidență), formarea undelor alunecătoare și generarea undelor frontale.

Datorită traseului simplu al primelor unde sosite (prima rupere) și a hodografului ce poate fi descompus în componente liniare (care au panta egală cu inversul vitezei stratului pe care alunecă), acestea pot fi interpretate foarte ușor în cazul unei structuri litologice simple (Fig. 4.22).

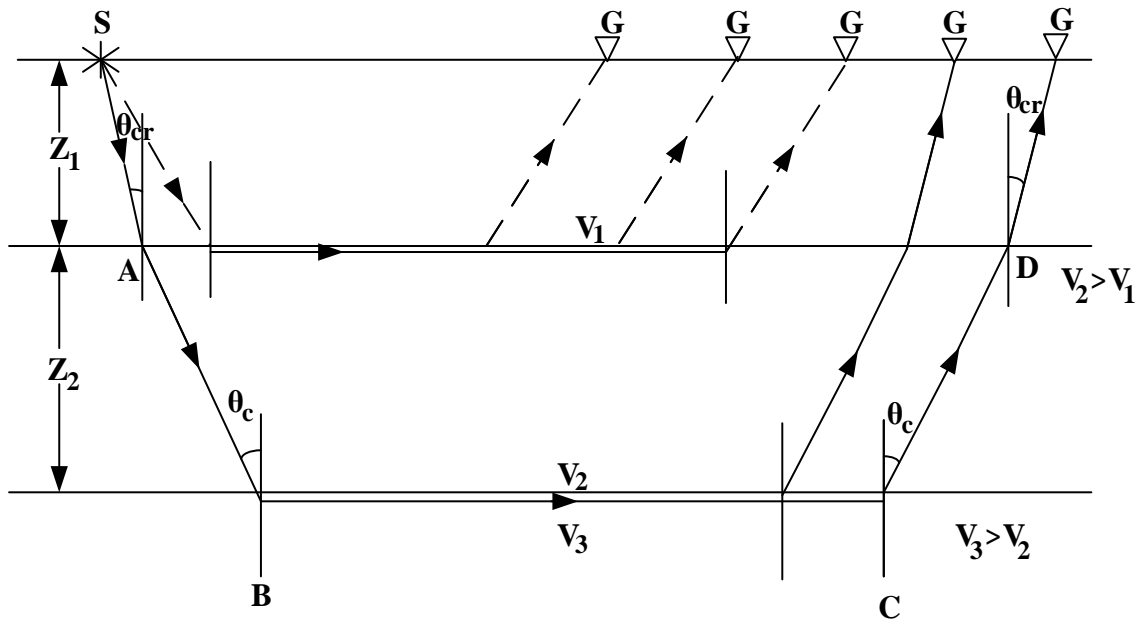


Fig. 4.21: Model de propagare a undelor seismice în cazul unei secvențe de trei strate horizontale

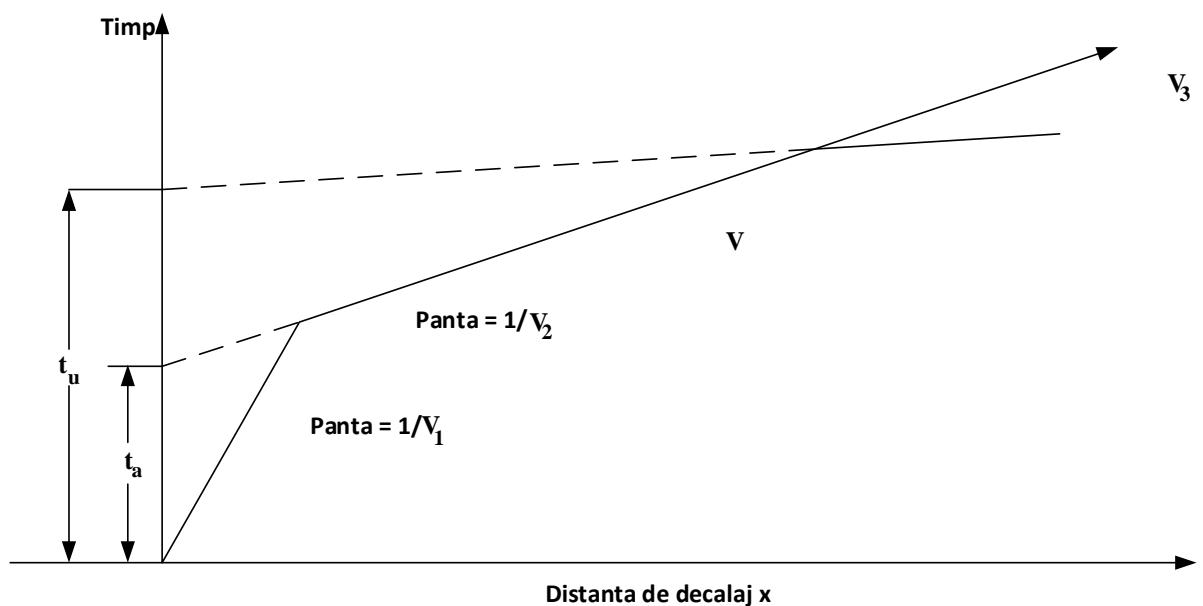


Fig. 4.22: Grafic teoretic obținut după procesarea înregistrărilor seismice corespunzătoare Fig. 4.21

În cazul în care secțiunea litologică prezintă strate înclinate, apar pante diferite ale hodografilor undelor frontale. Din acest motiv, măsurătorile se efectuează cu cel puțin trei (3) puncte de împușcare, situate – două la capete și unul central, înclinarea stratelor și vitezele acestora fiind determinate prin intermediul procesării.

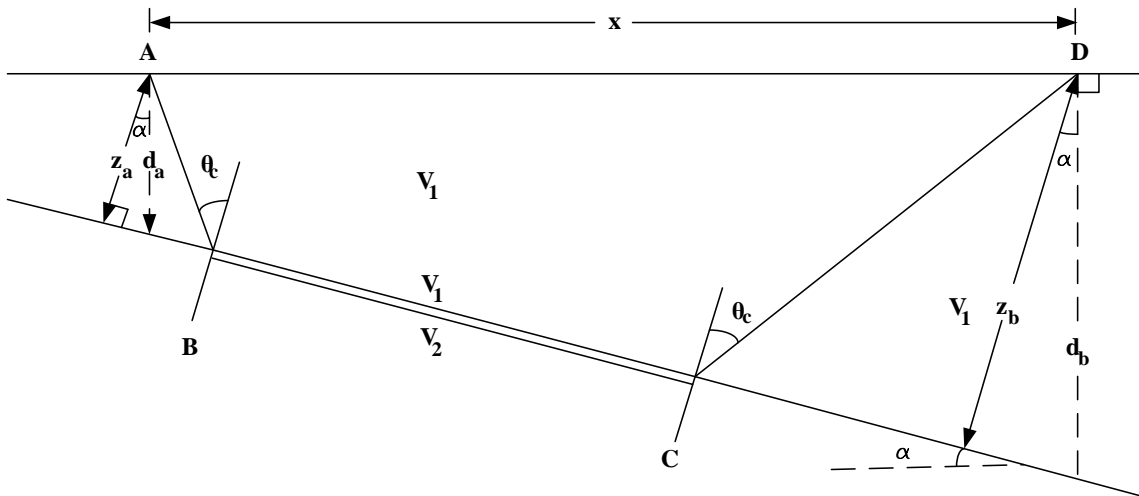


Fig. 4.23: Model de propagare a undelor seismice în cazul prezentei unui strat reflector înclinat

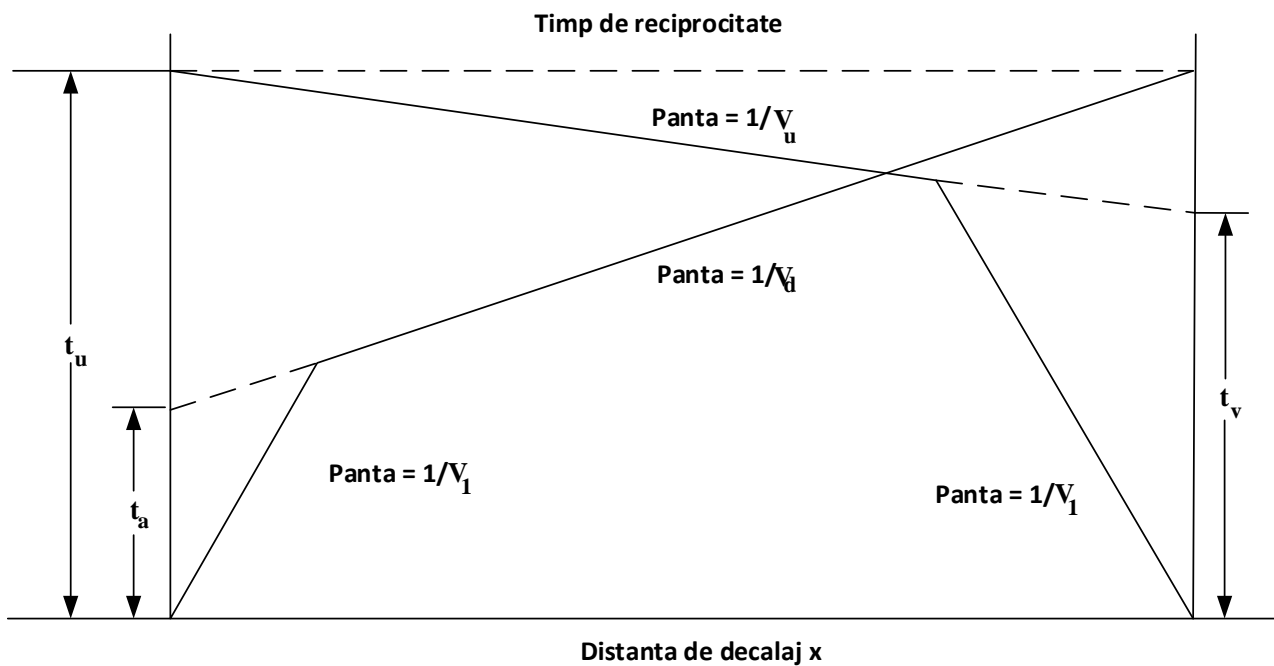


Fig. 4.24: Hodograf teoretic pentru cazul unei limite înclinate, graficul prezentând două înregistrări, cu împușcare la capăt

Aceste cazuri simple se pot procesa manual, fără a fi nevoie de programe specializate de inversie.

Tehnica de achiziție și interpretare sunt reglementată de normativele: ASTM D7128 - 05(2010) Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation și pe plan național de STAS 11156-78 Teren de fundare. Cercetarea geofizică a terenului de fundare prin metode seismice.

În cazul structurilor geologice mai complicate, ce prezintă falii, cute, efilări de strate etc. se folosesc programe dedicate, care prin calcul invers, pot reproduce hodografi neliniari (Fig. 4.25 și Fig. 4.26).

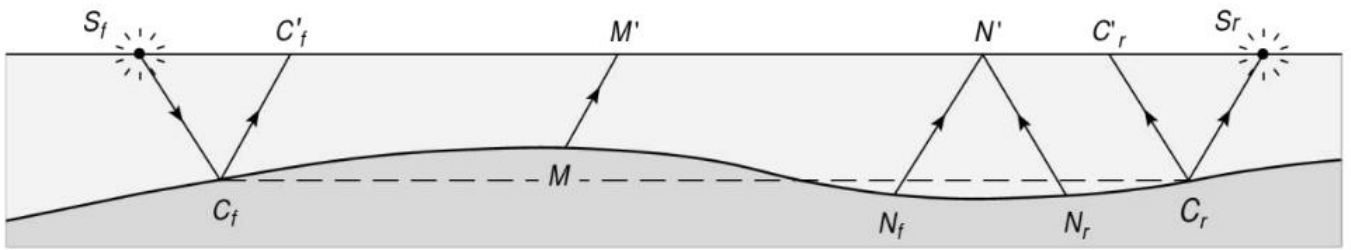


Fig. 4.25: Profil geologic și traseul undelor

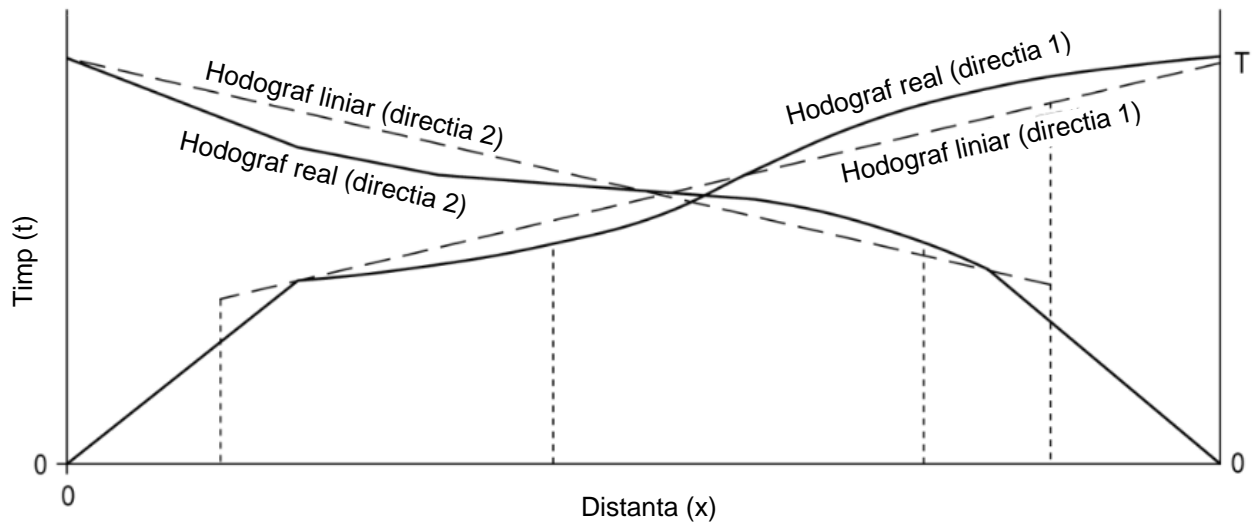


Fig. 4.26: Hodograf corespunzător secțiunii litologice din Fig. 4.25

Metoda se aplică cu succes în cazul mediilor stratificate relativ omogene din punctul de vedere al vitezelor laterale, cu variații importante de impedanță acustică pe direcție verticală, ce crește cu adâncimea. În cazul în care există un strat care are o viteză a undelor principale inferioară celui aflat deasupra acestuia, limita dintre cele două nu poate fi observată deoarece undele alunecătoare și frontale se formează doar la trecerea dintr-un mediu cu o viteză inferioară într-unul cu o viteză superioară (Fig. 4.27).

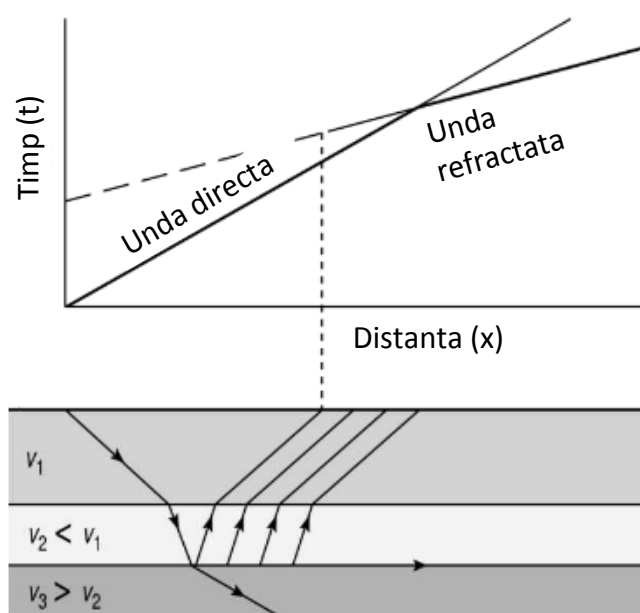


Fig. 4.27: Hodograf corespunzător unei secvențe litologice strat superior cu viteză mare-strat inferior cu viteză redusă

În cazul unui mediu alcătuit dintr-un strat superior cu viteză mult mai scăzută decât cel pe care reazemă, acesta din urmă având o grosime redusă, prima sosire care va intersecta unda directă va fi cea asociată unei unde refractate de la baza stratului 2 (ne-evidențiindu-se limita dintre cele două straturi) (Fig. 4.28), aceste două aspect prezentate mai sus fiind principalele limitări ale acestei metode seismice.

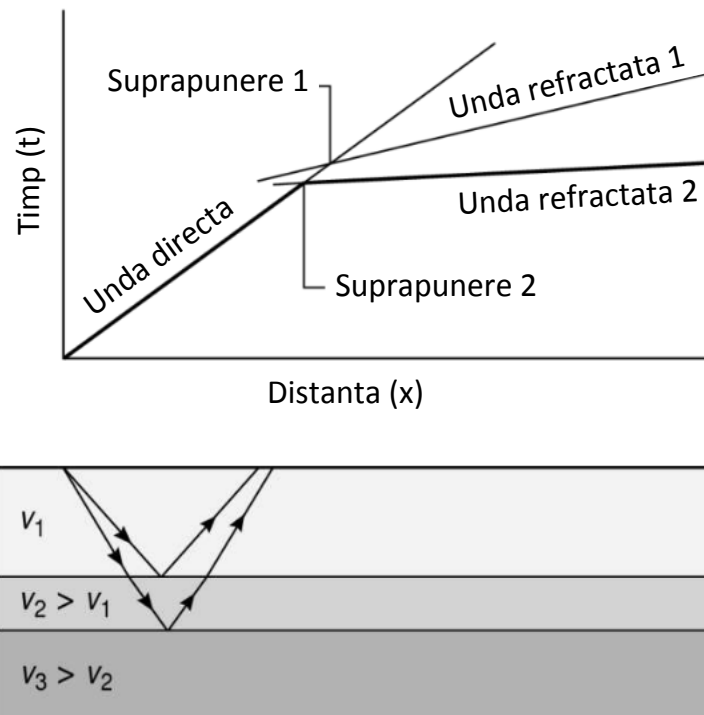


Fig. 4.28: Hodograf corespunzător unei secvențe litologice strat superior cu viteză scăzută-strat inferior subțire cu viteză foarte mare

#### 4.8.2 Seismică de reflexie

Rezultatul etapei de achiziție a datelor seismice de reflexie este reprezentat de o colecție de seismograme cu punct de generare comun. Aceste seismograme se prelucrează cu scopul de a obține secțiuni seismice de timp și/sau adâncime care să ofere informații despre structura geologică din zona analizată. Prelucrarea standard a datelor seismice de reflexie se efectuează urmând pașii descriși în acest capitol, fiind asemănătoare celei descrise în ASTM D7128 - 05(2010) Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation.

##### 4.8.2.1 Încărcarea seismogramelor în format SEG-Y

În general, în studiile seismice de mică adâncime, seismogramele sunt salvate în formatul stației seismice cu care se efectuează măsurătorile seismice, de exemplu formatul .dat, atunci când măsurătorile sunt efectuate folosind Geode (Geometrics). Procesarea înregistrărilor de seismică de reflexie se realizează cu programe foarte specializate, specifice industriei de explorare pentru hidrocarburi. Din acest motiv, încărcarea seismogramelor în programul folosit pentru prelucrarea datelor seismice se face după conversia acestora din formatul .dat în formatul .seg-y. (Fig. 4.29), formatul standard agreat de Society of Exploration Geophysicists (SEG).

```

C:\Command Prompt - seg2segy
          SEG2SEGY U3.0b - MSDOS
          Seismic Data Conversion Utility
          Copyright Kansas Geological Survey 1987-1994
          WELCOME OPERATOR TO THE SEG-2 -> SEG-Y PRE-PROCESSOR

This program converts the SEG-2 data files to SEG-Y file format
NOTE:SEG-Y file is in fixed 32 bit int & byte reversed for main-frames

Program assumes there are 1 or more files to convert
with similar names containing ASCENDING numbers, i.e.
  SEG00001.DAT , SEG00002.DAT , ... SEG00099.DAT

Press RETURN when ready to proceed, CTRL C to abort

Enter the PREFIX name of the files, (i.e. SEG) ->

Please enter the EXTENSION of the files if present. i.e. .DAT
Include the . <PERIOD> in name! -> .dat

Next enter the file numbers for the records to be
changed. For instance, if there are to be 3 files
converted named SEG00014, SEG00015 , AND SEG00016, the first
number you should enter is 00014 , then when asked for ending
enter 00016.
  REMEMBER TO ENTER LEADING 0's i.e. 00014 not 14

Please enter STARTING number, ENTER LEADING 0's! 1
Please enter ENDING number, ENTER LEADING 0's! 1

You have chosen files :
1.dat through 1.dat
Is this correct? <y/n> -> y
Please enter the name of the output file sh_1.sgy

Do you want the input files deleted as they are converted? <n/y>

Working on 1.dat
Data revision number = 1
Number of traces = 48
trace-1- trace-2- trace-3- trace-4- trace-5- trace-6- trace
trace-9- trace-10- trace-11- trace-12- trace-13- trace-14-
e-16- trace-17- trace-18- trace-19- trace-20- trace-21- tra
3- trace-24- trace-25- trace-26- trace-27- trace-28- trace-
trace-31- trace-32- trace-33- trace-34- trace-35- trace-36-
ace-38- trace-39- trace-40- trace-41- trace-42- trace-43- t
-45- trace-46- trace-47- trace-48-
C:\MANAST~1\Utils>_

```

Fig. 4.29: Conversia datelor din format .dat in .seg-y

#### 4.8.2.2 Definierea geometriei și încărcarea acesteia în baza de date și header-ul traselor

În această etapă sunt introduse/corectare poziția (x,y,z) geofoanelor și a sursei din toate înregistrările seismice folosite în cadrul procesării.

#### 4.8.2.3 Analiza raportului semnal-zgomot al seismogramelor

Această analiză se efectuează în domeniul (t, x) și (f, k) pentru a se obține primele informații despre conținutul de frecvență al undelor seismice și despre valorile vitezelor aparente ale acestora. Valorile de frecvență se determină din inversul perioadei citite în milisecunde pe seismograma prezentată în domeniul (t, x). Valorile vitezelor aparente se determină folosind raportul dx/dt, determinat în domeniul (t, x), sau df/dk, determinat în domeniul (f, k). În Fig. 4.30 este prezentat un exemplu de seismogramă în domeniul (t, x) și (f, k) pentru cazul în care generarea energiei seismice a fost făcută în centrul întinderii de geofoane.

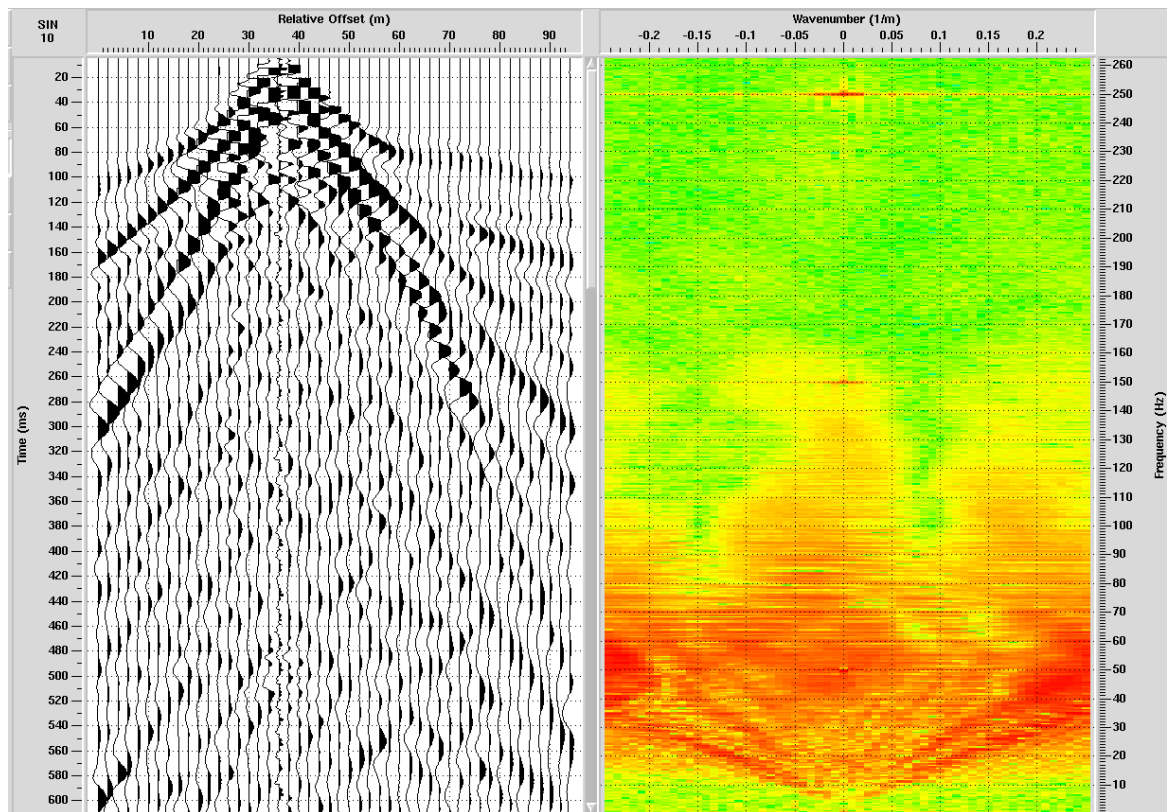


Fig. 4.30: Exemplu de seismograma prezentată în domeniul  $(t,x)$ , stanga, și  $(f,k)$ , dreapta.

#### 4.8.2.4 Calculul și aplicarea corecțiilor statice

Corecțiile statice sunt calculate și aplicate pe fiecare seismogramă în parte pentru a elimina efectul reliefului și al variațiilor laterale de viteză în zona de viteză mică (parte superioară a terenului ce este caracterizată de viteze de propagare mai mici de 1000m/s) din timpul de propagare al undelor seismice. Corecția pentru punct de generare este aceeași pentru toate trasele din seismograma obținută pentru acest punct. Corecția pentru geofon diferă de la geofon la geofon.

Corecția statică aplicată fiecărei trase este dată de suma corecției pentru sursă și cea pentru geofon. În Fig. 4.31 este prezentat un exemplu de seismogramă pentru care s-au calculat corecțiile statice (reprezentate în partea de sus a seismogramei). În general, valorile acestor corecții sunt foarte mici, de ordinul milisecundelor.



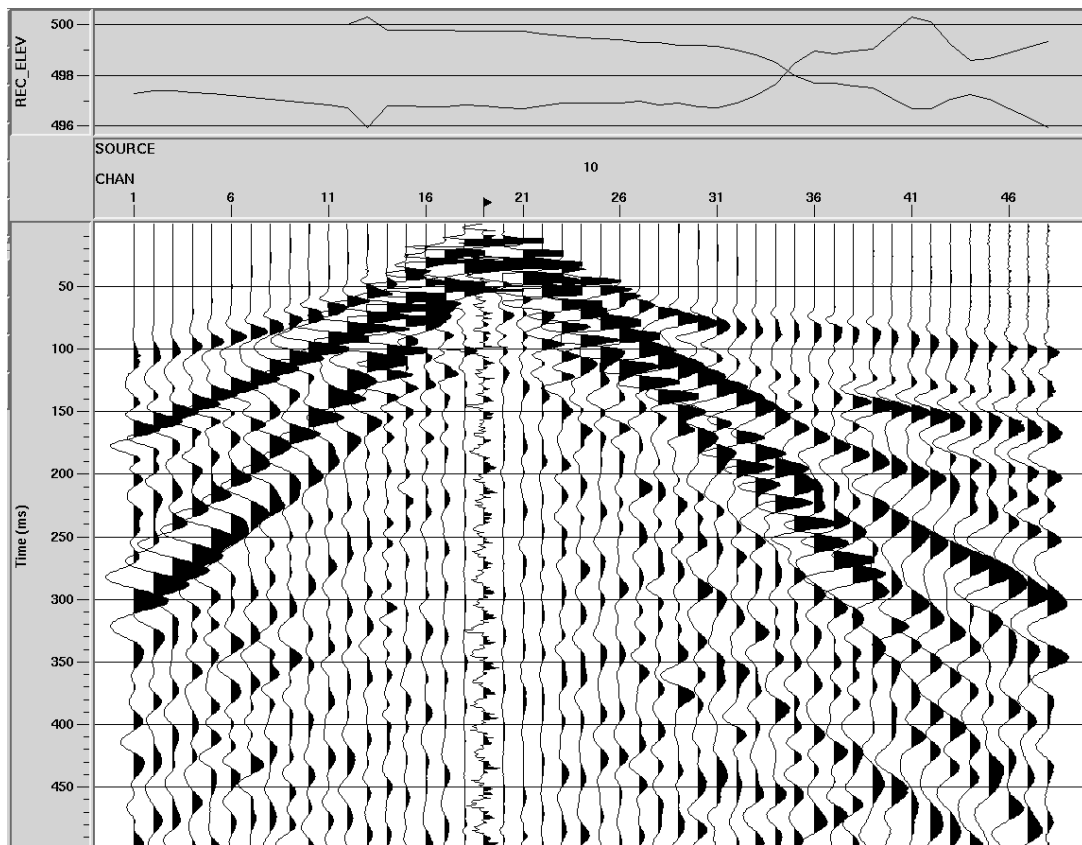


Fig. 4.31: Exemplu de înregistrare seismică după aplicarea corecțiilor statice.

#### 4.8.2.5 Filtrarea de frecvență

Eliminarea/atenuarea zgomotului coerent, reprezentat de undele de suprafață, este realizată prin aplicarea unor filtre de frecvență. Filtrul trece-bandă de frecvență nu se poate aplica pe seismogramele obținute în orice fel de studiu seismic de mică adâncime din cauza suprapunerii conținutului de frecvență al undelor de suprafață cu cel al undelor reflectate. Filtrul fk permite cea mai bună atenuare a zgomotului coerent deoarece folosește vitezele aparente ale undelor în construirea și aplicarea filtrului fk. În Fig. 4.32 este prezentat un exemplu de seismogramă înainte și după aplicarea filtrului fk.

Undele de suprafață caracterizate de anumite viteze aparente se pot elimina/atenua folosind filtre care acționează pentru acele valori de viteză, de exemplu filtrul „surface wave noise attenuation”; acest filtru se aplică după filtrul fk sau trece-bandă de frecvență pentru a atenua undele de suprafață reziduale, ramase după filtrarea aplicată.

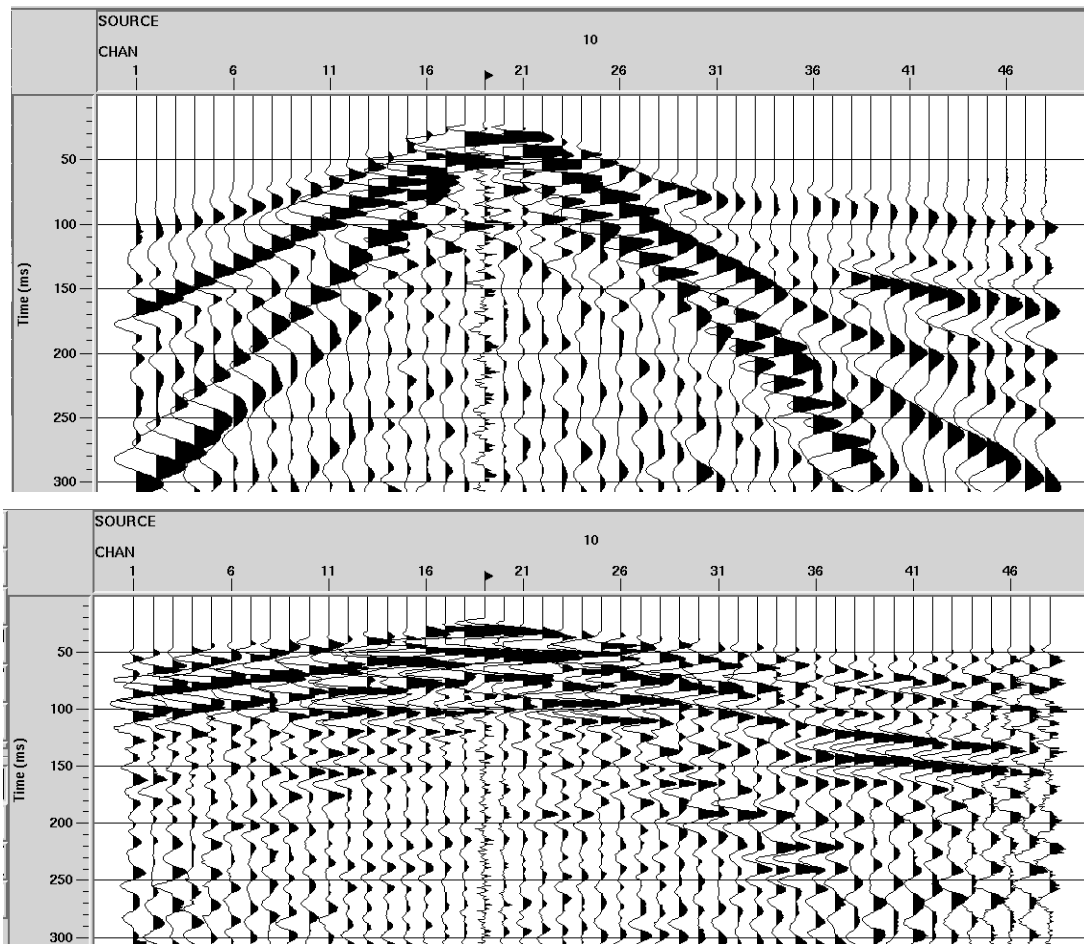


Fig. 4.32: Seismograma înainte (sus) și după (jos) aplicarea filtrului fk.

#### 4.8.2.6 Analiza de viteză și corecția Normal Move-Out

Datele de intrare în acest pas de prelucrare sunt reprezentate de colecții de trase sortate după punct comun de reflexie (CDP – common depth point). Acestea sunt obținute din seismogramele filtrate. Analiza de viteză constă în căutarea valorilor de viteză pentru care se elimină efectul offset-ului din timpul de propagare al undelor reflectate (se orizontalizează hiperbolele); procesul de eliminare al efectului acestui offset se numește corecție Normal Move-Out (NMO). În Fig. 4.33 este prezentat un exemplu de analiza de viteză fără aplicarea corecției NMO. Valorile pentru care se orizontalizează cel mai bine hiperbolele sunt salvate într-un model final de viteză (Fig. 4.34).

În studiile seismice de mică adâncime, o astfel de analiză de viteză este dificil de realizat din cauza lipsei reflexiilor pe colecțiile de trase cu punct de reflexie comun. Un alt mod de a obține modelul de viteză necesar, mai departe, în prelucrarea datelor este să însumăm datele seismice pentru valori constante de viteză și să alegem perechile (punct reflexie, timp, viteză) care să fie salvate într-un model final de viteză.

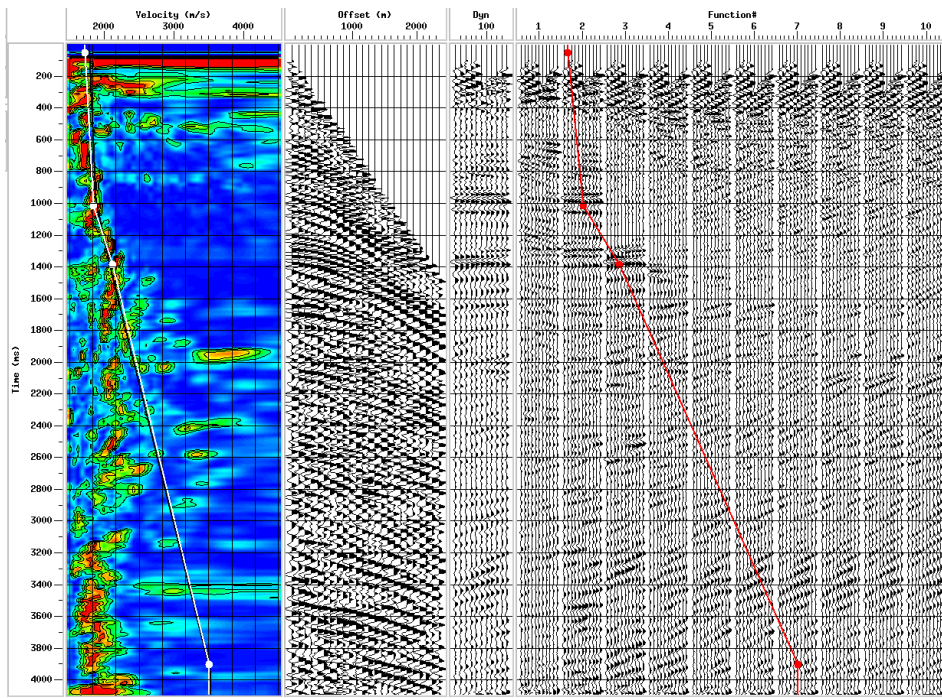


Fig. 4.33: Analiza de viteză efectuată pe o colecție de trase cu punct de reflexie comun.

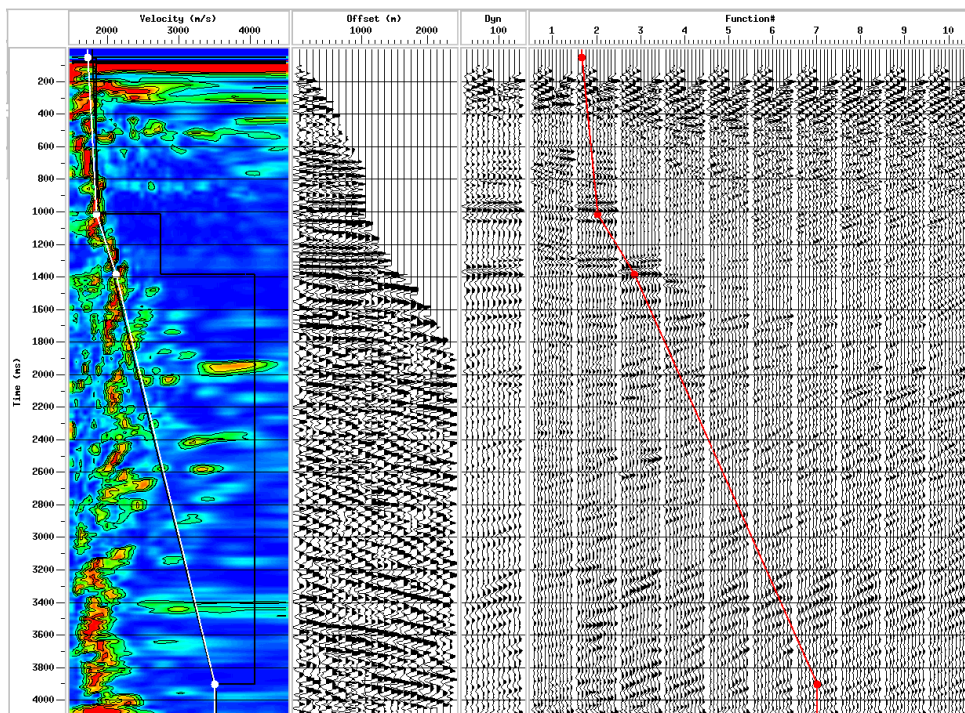


Fig. 4.34: Analiza de viteză și corecție NMO efectuate pe o colecție de trase cu punct de reflexie comun.

Exemple de secțiuni seismice obținute prin însumări pentru viteze constante sunt prezentate în Fig. 4.35÷Fig. 4.39.

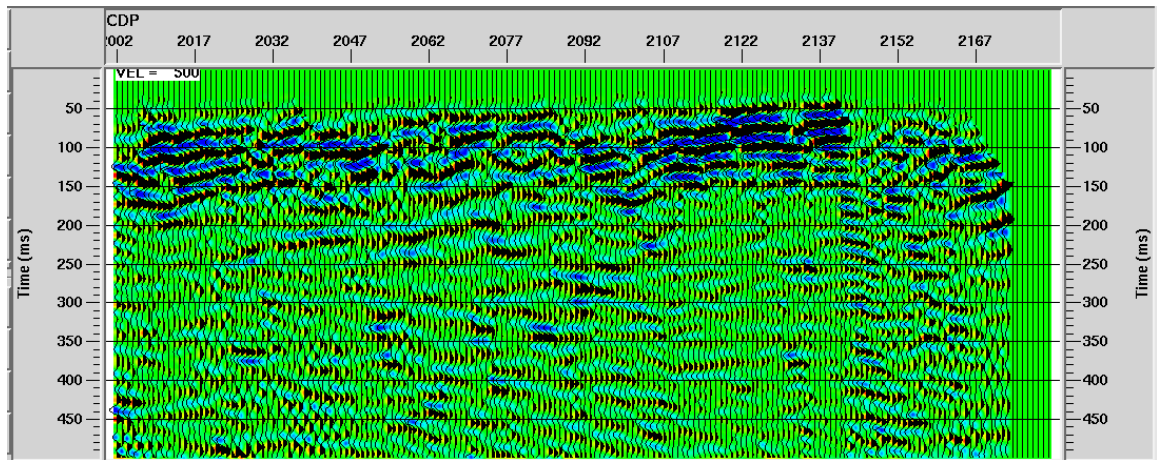


Fig. 4.35: Secțiune seismică obținută folosind viteza 500 m/s.

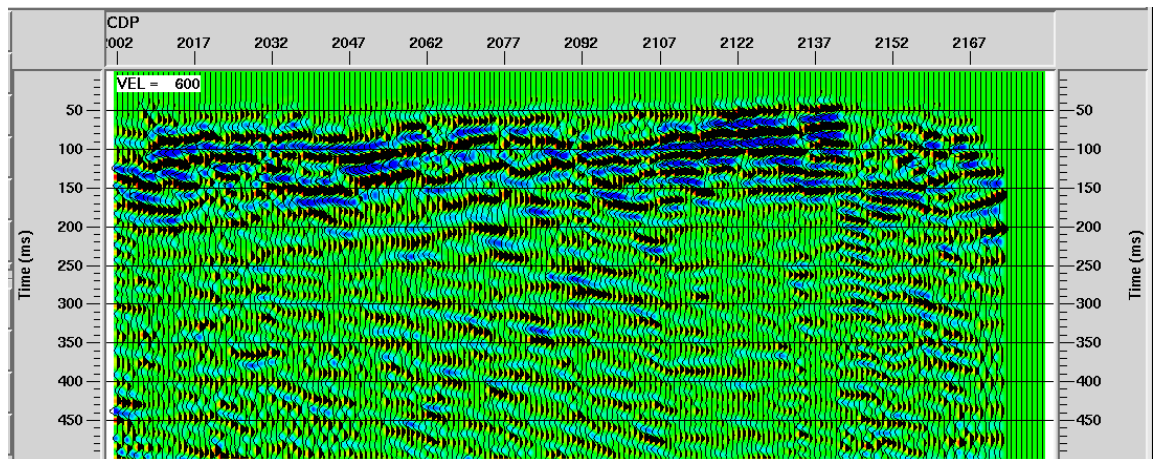


Fig. 4.36: Secțiune seismică obținută folosind viteza 600 m/s.

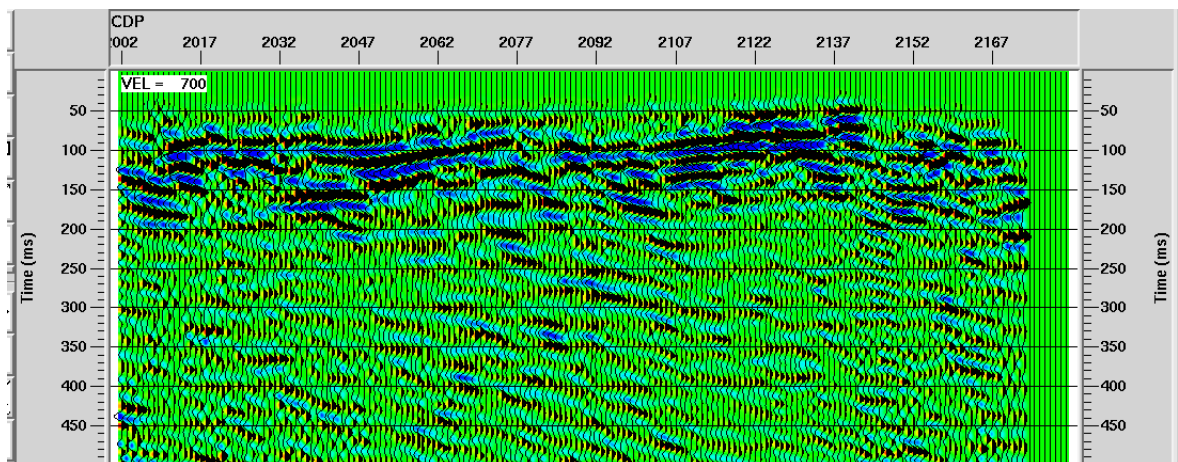


Fig. 4.37: Secțiune seismică obținută folosind viteza 700 m/s.

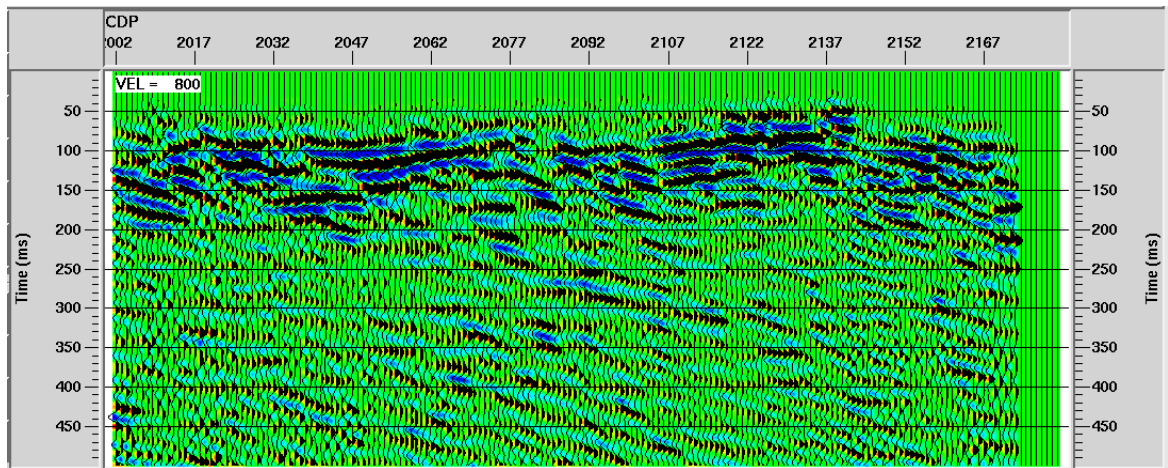


Fig. 4.38: Secțiune seismică obținută folosind viteza 800 m/s.

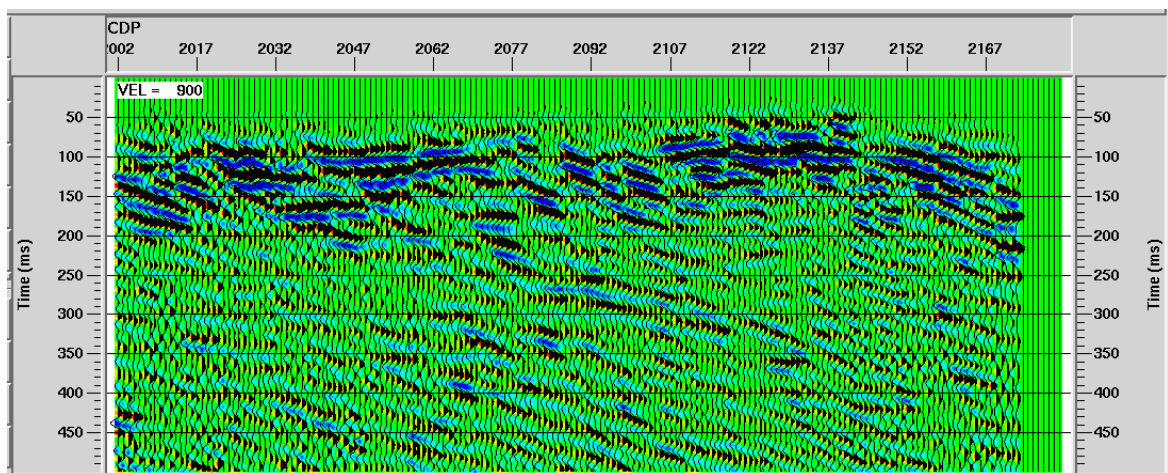


Fig. 4.39: Secțiune seismică obținută folosind viteza 900 m/s.

#### 4.8.2.7 Însușirea traselor seismice

În acest pas se însușește trasele din colecțiile cu punct de reflexie comun, după aplicarea corecției NMO. Însușirea îmbunătățește raportul semnal-zgomot, atenuează zgomotele rămase după filtrarea de frecvență și îmbunătățește continuitatea reflexiilor observate pe secțiunile seismice. În Fig. 4.40 am prezentat un exemplu de secțiune seismică obținută prin însușirea traselor sortate după punct de reflexie comun.

Migrarea este procesul care mută reflexiile din poziția în care au fost înregistrate în poziția lor reală din subsol (Yilmaz, 2001). Migrarea se poate aplica pe date însușite (secțiuni seismice) sau ne însușite (colecții de trase sortate după punct de generare, de reflexie etc).

În studiile seismice de mică adâncime, migrarea este foarte rar folosită deoarece poate distruge secțiunea seismică, din cauza numărului redus de trase seismice implicat în migrare și a reflexiilor slabe ca amplitudine.

#### 4.8.2.8 Conversia timp-adâncime

Secțiunile seismice, migrate sau nu, sunt convertite în adâncime folosind vitezele de la însumarea traselor seismice. În Fig. 4.41 am prezentat varianta convertită în adâncime a secțiunii seismice prezentate în Fig. 4.40.

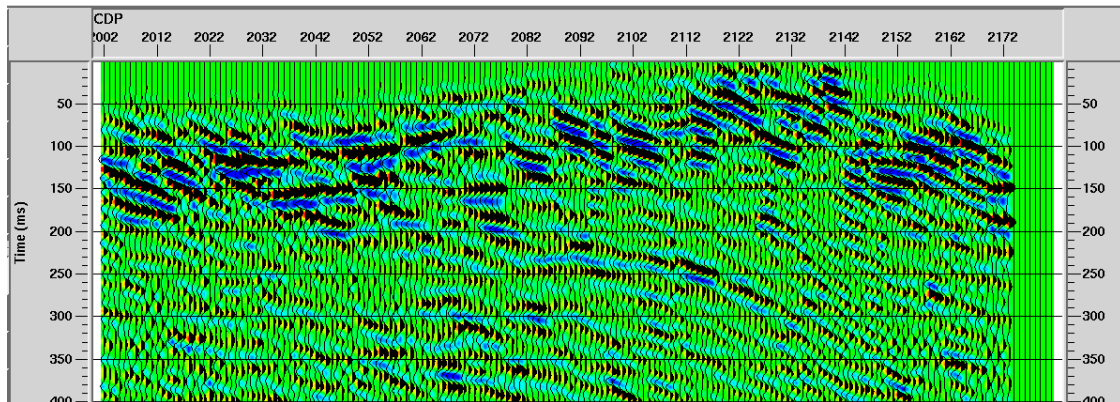


Fig. 4.40: Secțiune seismică nemigrată reprezentată în timp.

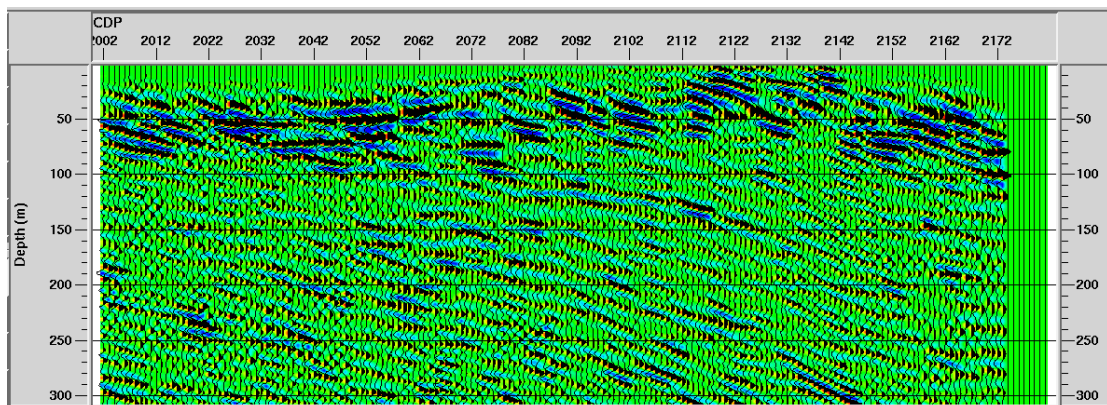


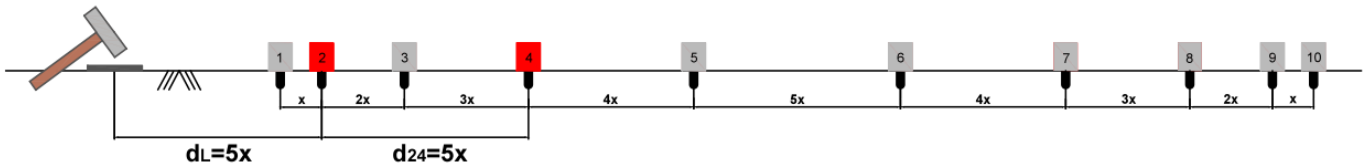
Fig. 4.41: Secțiune seismică nemigrată reprezentată în adâncime.

Seismica de reflexie are o putere de rezoluție mult mai mare față de seismica de refracție dar din cauza achiziției și procesării foarte laborioase se folosește cu precădere în industria de explorare pentru hidrocarburi.

## 4.9 SASW

Metoda SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) a fost dezvoltată la începutul anilor '80 și utilizează caracteristicile de dispersie ale undelor Rayleigh în medii multi-strat pentru estimarea vitezelor undelor de forfecare ale straturilor aflate la adâncimi reduse. Undele de suprafață de tip Rayleigh sunt generate într-un domeniu mare de frecvențe cu un dispozitiv de generare a impulsului, e.g. ciocan sau greutatea în cădere. Vibrațiile induse sunt măsurate în diverse puncte de pe suprafața terenului prin intermediul unor geofoane, iar semnalele colectate sunt transformate în domeniul frecvențelor utilizând transformări Fourier (FFT) pentru obținerea spectrului de unghiuri relative de fază. Spectrul obținut este utilizat pentru construirea curbei de dispersie a amplasamentului. Profilul de rigidități este calculat invers în mod iterativ prin calibrare pe baza curbelor teoretice și experimentale de dispersie. Curbele teoretice sunt calculate pentru rigidități presupuse ale materialului utilizând teoria propagării undelor în medii stratificate orizontal.

Ca urmare a proprietăților dispersive ale undelor Rayleigh, componente cu diferite frecvențe se propagă până la diferite adâncimi astfel că furnizează informații cu privire la stratele aflate la diferite adâncimi. La procesarea măsurătorilor SASW sunt utilizate serii de timp obținute din două geofoane în același timp.



**Fig. 4.42: Exemplu de dispunere a geofoanelor și obținerea datelor dintr-o pereche de receptori. Unul din receptorii utilizați trebuie să se afle la mijlocul distanței dintre sursă și celălalt receptor pereche (Ólafsdóttir 2014)**

Pentru un amplasament dat, trebuie realizate mai multe seturi de măsurători, variind defazarea sursei sau utilizând diferite tipuri de surse, pentru a genera unde cu un conținut diferit de frecvențe. În plus, procesul este repetat de la celălalt capăt al șirului de geofoane pentru a elimina posibilele efecte ale deplasărilor interne de fază cauzate de receptoare. Când undele de suprafață sunt generate cu o sursă ce poate fi manevrată de om, e.g. ciocan, o estimare corectă a vitezelor de undă pentru undele de forfecare poate fi făcută până la adâncimi de aproximativ 20m.

Deoarece sunt necesare măsurători repetate cu diferite dispuneri ale aparatului, achiziția de date este solicitantă din punct de vedere al efortului depus și al timpului necesar. De asemenea, procesarea datelor este foarte îndelungată. Calculele trebuie repetate pentru fiecare pereche de receptori, iar rezultatele trebuie examinate manual pentru evaluarea calității acestora. Deoarece sunt utilizate serii de timp de la doar doi receptori în același timp, pot apărea dificultăți în distingerea corectă între undele de suprafață și zgomot, precum undele de volum sau moduri superioare. Se pot produce astfel erori în curbele de dispersie, iar în cele din urmă în profilul vitezelor undelor de forfecare.

Utilizarea spectrelor unghiurilor relative de fază pentru construirea curbelor de dispersie experimentale poate fi realizată doar pentru amplasamente unde există un singur mod dominant de propagare ale undelor de suprafață în întregul domeniu de frecvențe. Această situație este întâlnită de obicei în amplasamente unde rigiditatea crește cu adâncimea. Pentru amplasamente neomogene însă, multiple moduri ale undelor de suprafață pot participa în câmpul undelor, astfel că nu poate fi identificat un mod dominant. În consecință, utilizarea spectrelor de unghiuri relative de fază poate duce la obținerea unor curbe de dispersie nereprezentative.

Pentru a rezolva aceste limitări a fost propusă o procedură de calcul invers bazată pe curbe de disperse sintetice. Calculul se realizează prin calibrarea curbelor de dispersie obținute analitic sau numeric pe baza simulărilor 3D ale testelor SASW de teren, cu ajutorul curbelor de dispersie obținute experimental. Deși curba de dispersie experimentală poate fi afectată de erori, acestea sunt reproduse implicit în curbele simulate. Cu toate acestea, procedura de simulare a curbelor de dispersie poate fi complicată și costisitoare din punct de vedere al calculului.

Metoda SASW a fost aplicată până la adâncimi de 45m, însă cel mai adesea estimări precise pot fi făcute până la aproximativ 20m adâncime. Este însă necesar ca suprafața terenului să prezinte o zonă accesibilă cu o lungime cel puțin egală cu adâncimea până la care se dorește investigarea. Cu toate acestea, nu se impune ca suprafața terenului să nu fie construită, putând fi utilizată și în zone pavate, deși precizia determinării grosimii și rigidității straturilor scade în aceste cazuri.

#### 4.10 MASW

Metoda MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) a fost introdusă de Park et al. în 1999 și reprezintă o tehnică de investigare pentru estimarea profilurilor vitezelor undelor de forfecare prin materialele aflate la adâncimi reduse (aproximativ 30 m). Metoda utilizează înregistrări pe multiple canale și principii de procesare larg utilizate în seismologia de suprafață, precum și în investigațiile seismice de reflexie.

În general, metodele MASW pot fi clasificate în două categorii – active și pasive – în funcție de modul de generare al undelor de suprafață. Metoda activă are la bază generarea undelor prin surse seismice cu impuls sau vibrații, în timp ce metoda pasivă utilizează unde de suprafață generate de unde naturale sau antropice necontrolate, precum traficul.

MASW a fost dezvoltat pentru a întâmpina unele din dezavantajele metodei SASW. Literatura de specialitate și practica inginerescă au raportat o serie de avantaje ale metodei MASW:

- Achiziția datelor pe teren necesită mai puțin timp decât în cazul SASW. Metoda MASW necesită o singură serie de măsurători pentru o configurație sursă-receptori.
- Analiza de dispersie este mult mai facilă și poate fi automatizată. Procesarea datelor se face de la toți receptorii simultan, înlocuind calculele multiple realizate în perechi de receptori cu metoda SASW.
- Sursele de zgomot pot fi identificate mult mai ușor, îndepărtând astfel zgomotul din datele colectate. Reducerea zgomotului conduce la o creștere a acurateții în analiza de dispersie, rezultând într-un profil de viteze ale undelor mult mai precis.
- Metoda MASW poate acoperi o adâncime de investigare mai mare decât SASW folosind aceeași sarcină de impact. Adâncimea maximă până la care se poate utiliza în general SASW este de 20m, în timp ce MASW poate fi utilizat cu ușurință până la 30m, atâta vreme cât sursa este suficient de puternică.
- Metoda MASW face posibilă observarea caracteristicilor de dispersie multi-modală ale undelor de suprafață.
- Evaluarea vitezelor undelor de forfecare în două sau trei dimensiuni utilizând MASW este eficientă din punctul de vedere al costurilor și al timpului.
- Metoda MASW poate fi utilizată pentru analizarea undelor de suprafață generate pasiv. Acestea au frecvențe mai mici decât cele generate activ, prin încărcări de impact. Utilizarea undelor pasive poate îmbunătăți adâncimea de investigare.

Undele Rayleigh determină particulele din mediul pe care îl traversează să se deplaseze în traiectorii eliptice în plan vertical, conform direcției de propagare a undei. Mișcarea particulelor este retrograd eliptică (Fig. 4.43) aproape de suprafață, devenind prograd eliptică odată cu creșterea adâncimii. Amplitudinea undelor Rayleigh scade exponențial cu adâncimea. La o adâncime de penetrare egală cu o lungime de undă, deplasarea mediului devine sub 30% din valoarea sa la suprafață. Dacă este generată de o sursă punctuală, energia undei scade la  $1/r$ , unde  $r$  este distanța până la sursa seismică.



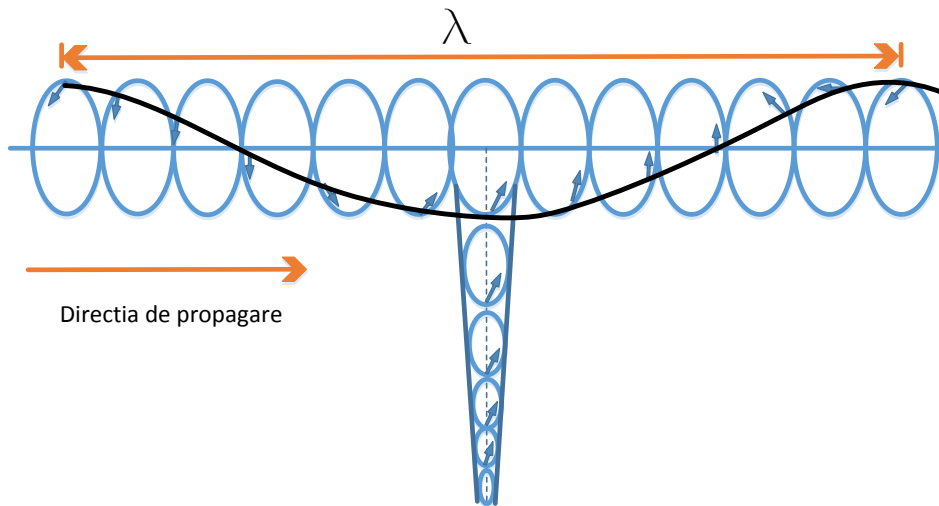


Fig. 4.43 Modul de propagare al undelor Rayleigh

Dispersia undelor Rayleigh poate fi examinată studiind o sursă seismică vibrantă, idealizată, vibrând la o singură frecvență  $f$  la suprafața unui mediu elastic multistratificat. Lungimea de undă  $\lambda$  ale undelor Rayleigh rezultate este constantă și poate fi determinată prin măsurarea distanței dintre vârfuri succesive de undă. O sursă de frecvență redusă generează lungimi de undă mari, ce se propagă prin diverse medii simultan, în timp ce sursele de frecvență înaltă generează unde care au adâncimi mai mici de propagare Fig. 4.44 ÷ Fig. 4.46.

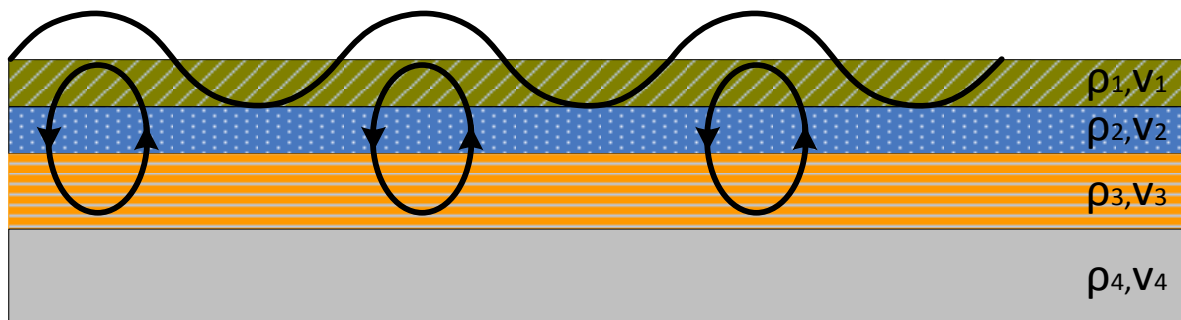


Fig. 4.44: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență redusă

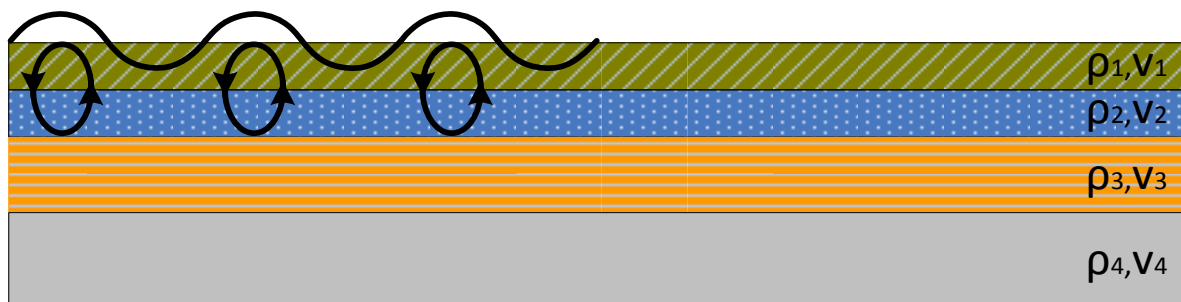


Fig. 4.45: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență medie

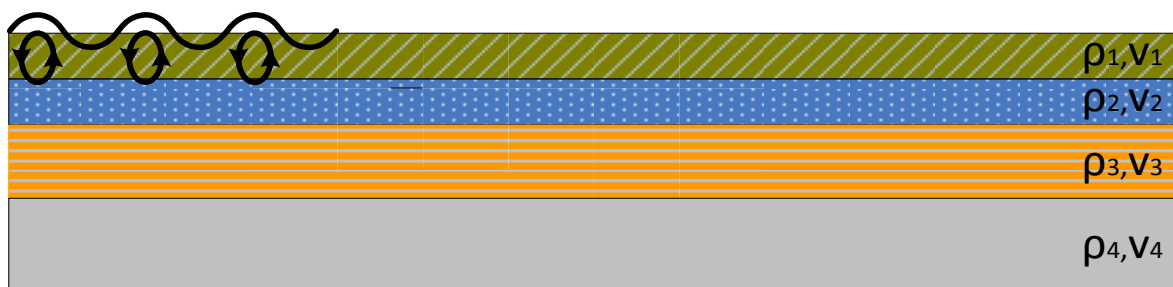


Fig. 4.46: Adâncimi de penetrare pentru unde de frecvență mare

Prin folosirea mecanismului clasic de generarea a energiei seismice în seismica de suprafață (ciocan ce lovește o placă) se generează concomitent un spectru foarte larg de frecvență (1Hz - >300Hz) (Keiswetter & Steeples, 1995) ce se propagă în subsol, în cazul analizei de tip MASW analizându-se undele Rayleigh cu frecvențe cuprinse în intervalul de 5-30Hz.

Datorită comportamentului dispersiv (Fig. 4.48) a undelor Rayleigh fiecărei frecvențe îi va corespunde o anumită viteză de propagare numită *viteză de fază* ( $V_R$ ). Curba de variație a vitezelor de fază cu frecvențele asociate se numește *curbă de dispersie* (Fig. 4.47).

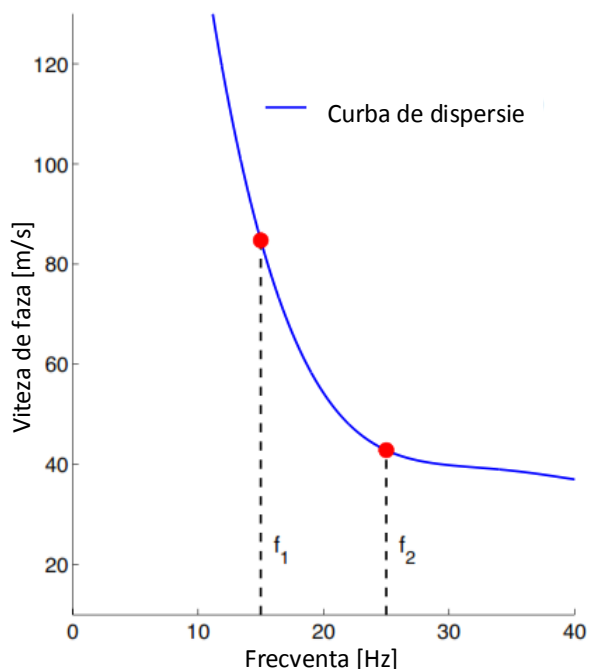


Fig. 4.47: Exemplu de curba de dispersie

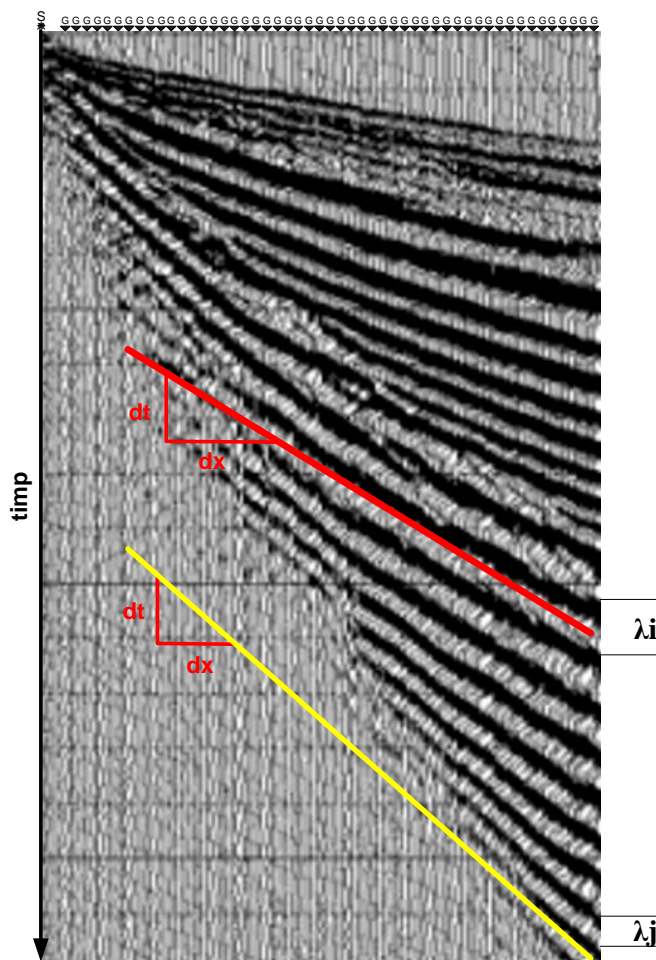


Fig. 4.48: Caracterul dispersiv al undelor de suprafață

Din cauza complexității procesării datelor, această metodă necesită utilizarea unui program specializat de procesare și inversie.

După încărcarea înregistrării, se indică zona semnalului util și se aplică filtre de frecvență, semnalul astfel obținut fiind descompus cu transformata Fourier și apoi calculându-se spectrele de viteză de fază -

frecvență. Pe acest spectru se identifică de către utilizator curba de dispersie, din care programul calculează prin modelare inversă distribuția vitezelor undelor de forfecare în adâncime.

Dintre factorii ce influențează forma curbei de dispersie, cel mai important este reprezentat de viteza undelor S, fiind urmat de grosimea stratului, densitatea acestuia și de viteza undelor principale.

În Fig. 4.49 și Fig. 4.50 sunt prezentate selectarea curbei de dispersie și distribuția pe verticala a undelor de forfecare corespunzătoare acestei curbe de dispersie în cazul unui mediu orizontal stratificat.

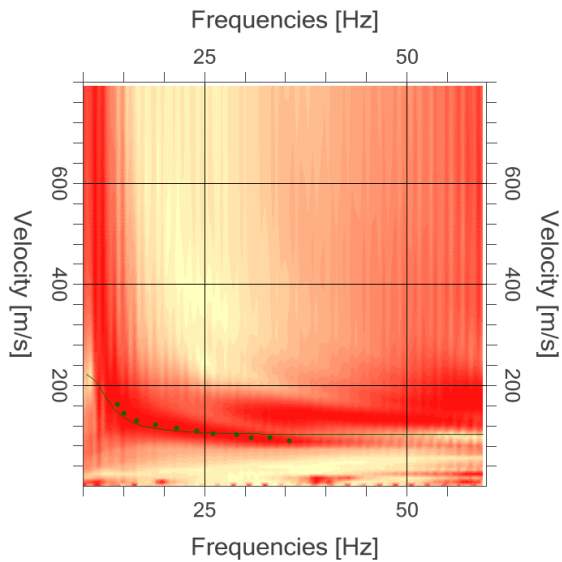


Fig. 4.49: Exemple de spectru de viteză de fază-frecvență

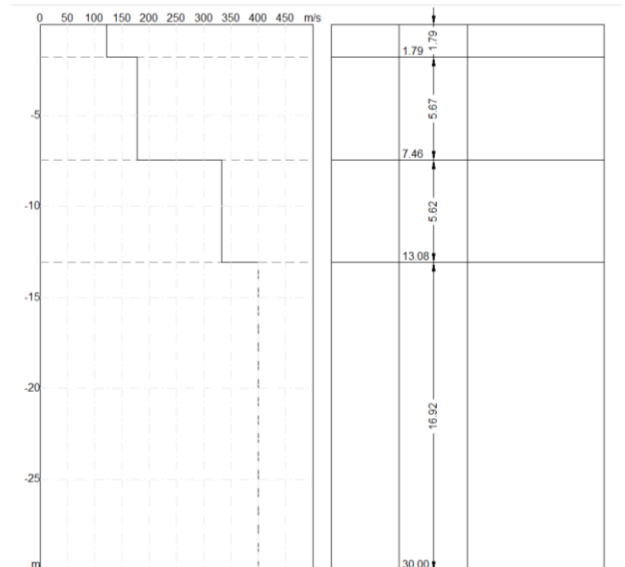


Fig. 4.50: Exemple de distribuție a vitezelor undelor pe adâncime

## 5 STUDII DE CAZ

În vederea sublinierii aplicabilității metodelor geofizice în ingineria geotehnică pentru rezolvarea diverselor probleme, prezenta lucrare abordează diverse cazuri uzuale, oferind inginerului geotehnician informații suplimentare asupra diferitelor amplasamente.

### 5.1 Identificarea cavitațiilor în zone urbane - Studiu de caz privind zona bulevardului Coposu, București

#### 5.1.1 Introducere

Prezentul studiu de caz descrie utilizarea investigațiilor geofizice de tip ERT pe un șantier de construcții dintr-o zonă urbană în scopul identificării golurilor subterane ce pot afecta siguranța personalului și a echipamentelor de construcții. Investigațiile geofizice sunt general acceptate ca fiind printre cele mai bune metode de identificare a cavitațiilor subterane, în mod special în zone urbane. Aceste cavitații prezintă un risc major în special în cazul în care echipamente de mare tonaj sunt dispuse pe șantier pentru realizarea noilor construcții, astfel că identificarea cavitațiilor trebuie desfășurată înaintea începerii execuției. Golurile pot fi umplute cu aer, cu apă, sau parțial cu apă, fiecare dintre aceste situații conducând la obținerea unui contrast de rezistivitate electrică față de pământul înconjurător. În plus, investigațiile ERT prezintă o metodă robustă, cu un cost redus și rapiditate în execuție, fiind astfel utilizate adesea în asemenea aplicații.

Studiul de caz a fost realizat pe un șantier din zona Cartierului Evreiesc din București, acesta fiind o zonă rezidențială și comercială compactă construită la sfârșitul secolului XIX. Cartierul este situat pe malul stâng al râului Dâmbovița, în apropierea Pieței Unirii. În anii '80, în perioada regimului comunist, cartierul a fost demolat aproape în întregime, fiind înlocuit de mari clădiri rezistențiale și administrative, conform planului urbanistic al perioadei respective. Astfel, zona a suferit o activitate antropică intensă (Fig. 5.1) aflându-se în prezent într-un nou stadiu de dezvoltare, ceea ce implică o serie de riscuri în fazele de execuție, cauzate în principal de prezența golurilor subterane.

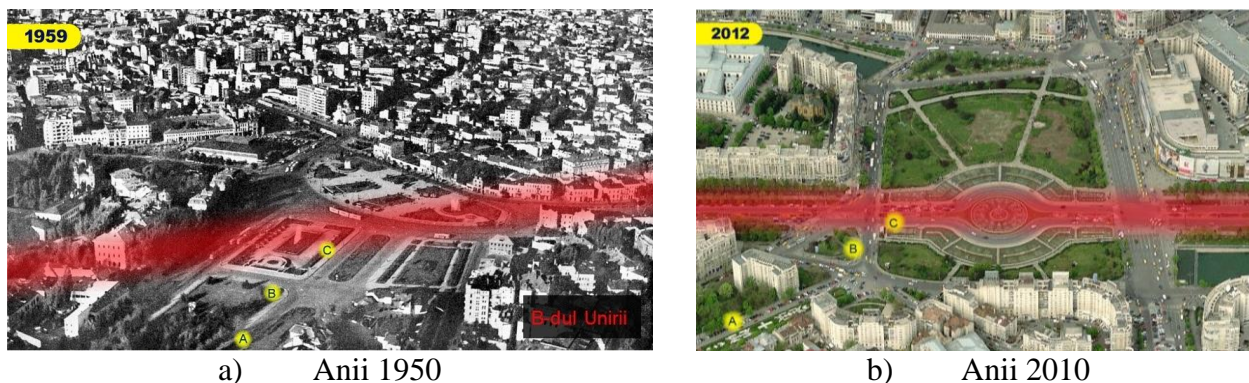


Fig. 5.1: Dinamica zonei Piața Unirii în ultimii 50 de ani

#### 5.1.2 Achiziția datelor

Achiziția datelor s-a bazat pe 4 profiluri de investigație electrică (ERT) dispuse în zonele în care cavitațiile subterane erau anticipate, pe baza hărților vechi ale zonei. Atât în achiziție cât și în procesare au fost identificate o serie de probleme, acestea fiind comentate împreună cu soluțiile propuse pentru remedierea acestora. Achiziția a fost realizată în 2 etape (Fig. 5.2) utilizând echipament IRIS Electric Pro, cu dispunerea electrozilor la interval de 1.0m. Inversia datelor a fost efectuată cu software-ul RES2DINV (Geotomo Software, [www. geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)).

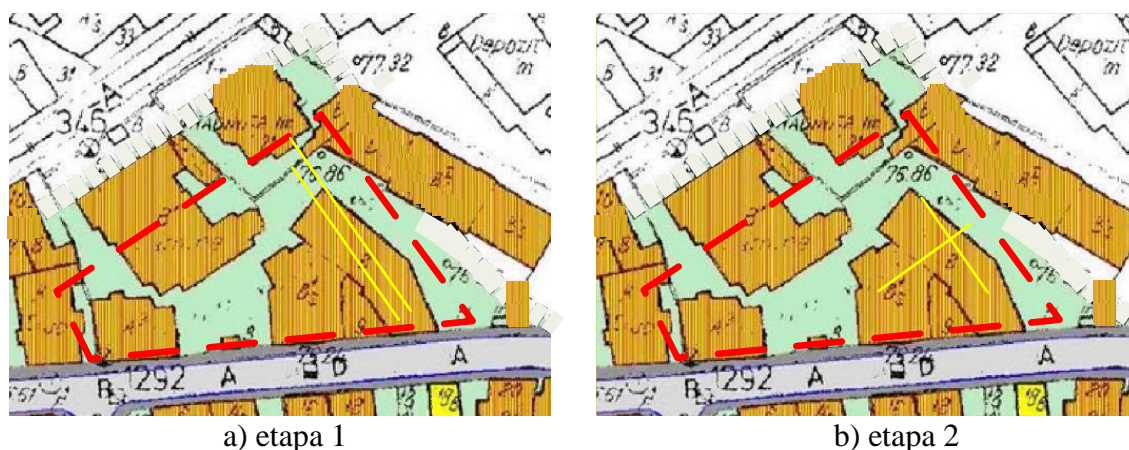


Fig. 5.2: Dispunerea profilurilor de investigație electrică în cele două etape de achiziție

Suprafața terenului consta în principal din deșeuri de construcții provenite de la clădirile anterioare, astfel că electrozii au fost introduși în găuri preforate  $\varnothing 6\text{mm} \times 20\text{cm}$ , iar contactul electric pământ-electrozi a fost îmbunătățit cu soluție salină. Efectul adăugării soluției saline a fost analizat în prima etapă de măsurători, prin compararea pe același profil a calității contactului electric înainte și după adăugarea apei cu sare. Fig. 5.3 prezintă rezistența contactelor între perechi de electrozi adiacenți în starea inițială, precum și după adăugarea soluției saline. Se poate observa că efectul sării este semnificativ, în special în cazul electrozilor ce fuseseră dispuși în zone foarte rezistive. În plus, informațiile din figură arată că stratul superficial este puternic eterogen, ca urmare a deșeurilor de construcții, ce pot afecta major variația rezistenței electrice în lungul profilului. Adăugarea soluției saline a ajutat nu doar la îmbunătățirea contactelor pământ-electrod, dar a redus dispersia rezistivității contactelor în lungul profilului, reducând astfel „zgomotul” de achiziție.

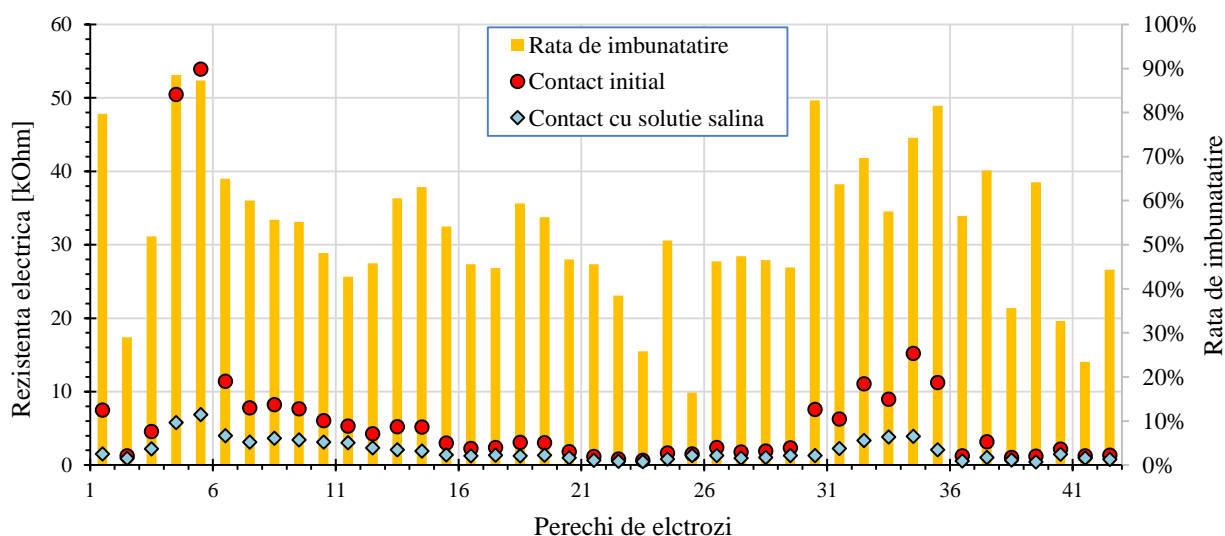


Fig. 5.3: Efectul soluției saline asupra rezistivității contactelor

Prima etapă de achiziție a fost efectuată folosind dispozitivele Wenner și Schlumberger, ca urmare a eterogeneității stratului superficial. Pazdîrek și Bláha au arătat că aceste metode oferă bune rezoluții de rezistivitate atât pe verticală cât și pe orizontală, având în același timp un semnal puternic. Fig. 5.4 și Fig. 5.5 prezintă rezultatele obținute pentru primele două profiluri, indicând probabila prezență a unor cavități, dar caracterizarea exactă în ceea ce privește dimensiunile și poziția cavității este dificil de realizat, după cum rezultă din corelarea slabă a rezultatelor în profilul 2 (Fig. 5.5). În plus, se poate observa că stratul superficial prezintă variații mari ale rezistivității orizontale în ambele profiluri, acest lucru putând fi cauza corelației slabe între înregistrările de pe profilul 2 (folosind dispozitive diferite).

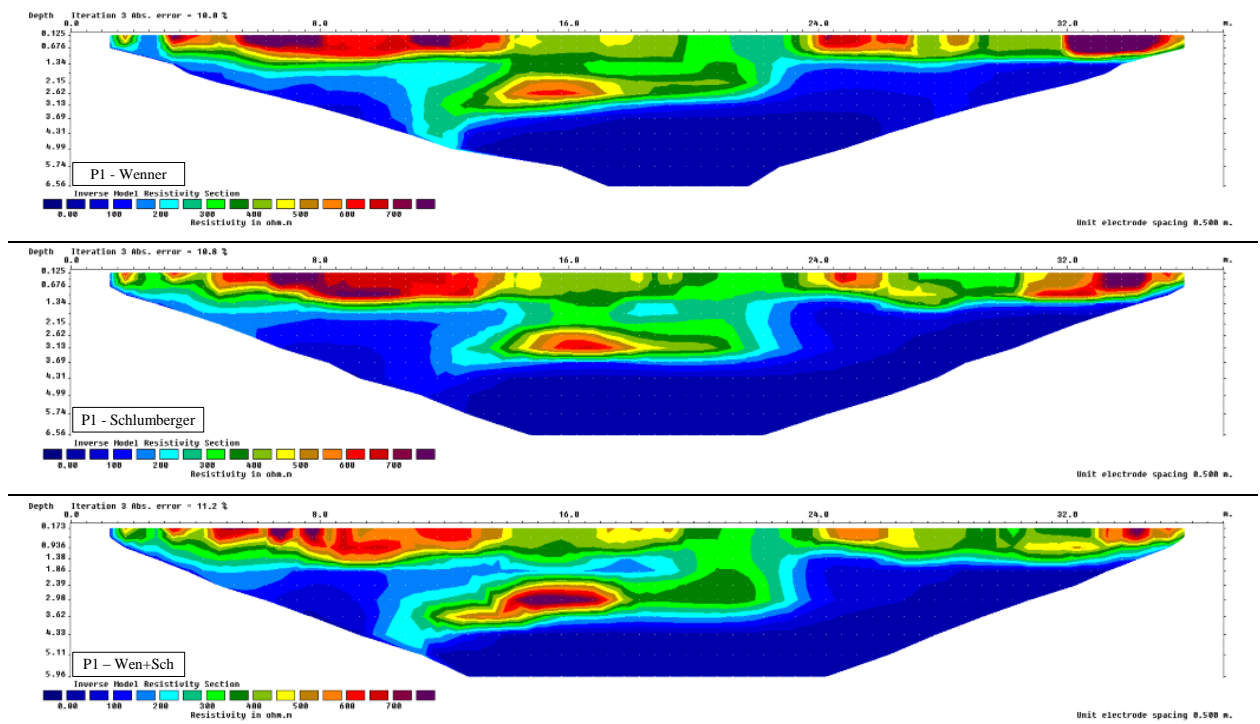


Fig. 5.4: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 1 (se observă o bună corelație între cele 3 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliilor fiind foarte apropiate)

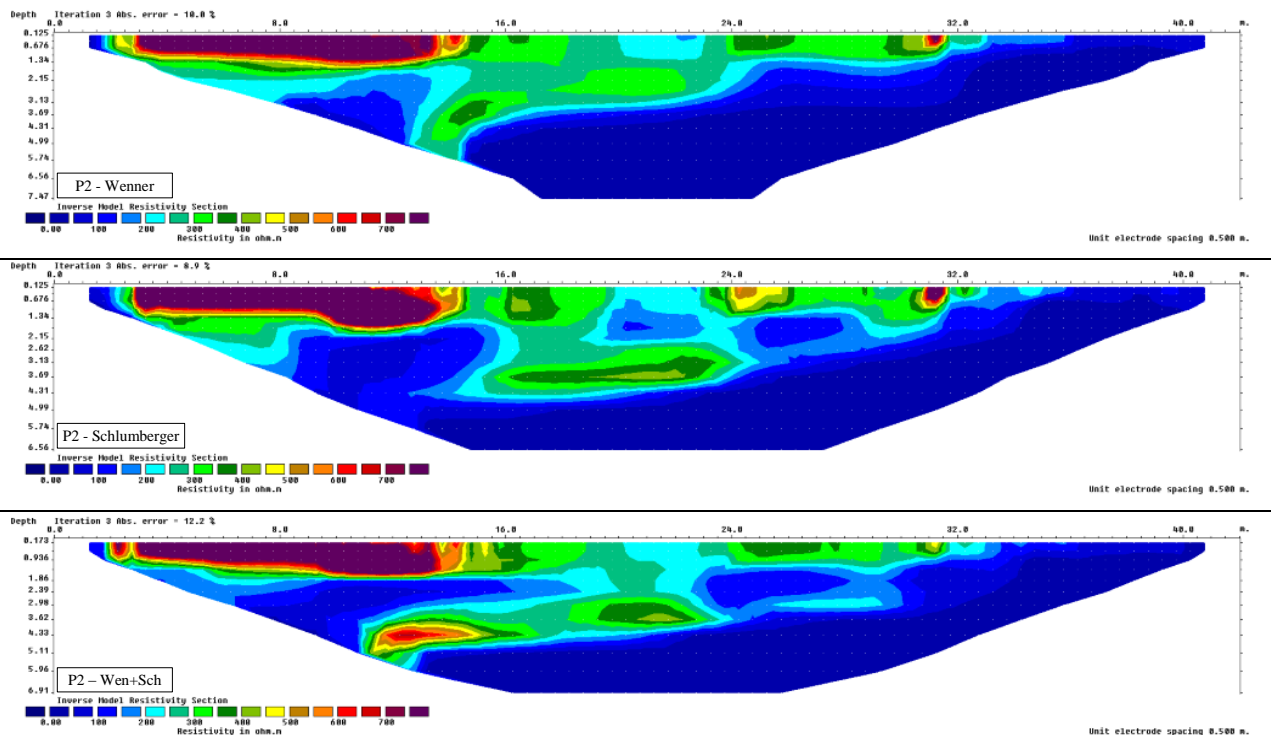


Fig. 5.5: Secțiune de rezistivitate obținută pentru profilul 2 (se observă o slabă corelație între cele 3 profile, poziția și dimensiunea anomaliilor fiind foarte incerte)

Ca urmare a rezultatelor obținute din interpretarea datelor din prima etapă de achiziție, o nouă etapă (Fig. 5.2b) a fost realizată la interval de două săptămâni față de prima, după creșterea umidității stratului superficial cauzată de topirea zăpezii. Pentru estimarea calității comparative a achiziției din cele două etape, profilul 3 a fost realizat pe același aliniament ca și profilul 2 din prima etapă. În etapa a doua, metoda Dipole-Dipole a fost utilizată în plus față de metodele folosite în primele etape, pentru îmbunătățirea rezoluției orizontale a profilurilor de rezistivitate .

Fig. 5.6 și Fig. 5.7 prezintă o corelare foarte bună a anomaliilor de rezistivitate mare între toate secțiunile obținute prin diferite metode de achiziție. În același timp, se poate observa o scădere a valorilor rezistivității și variației laterale, ca urmare a creșterii umidității. Îmbunătățirea corelației din etapa a doua de achiziției față de prima etapă arată că schimbări apărute în condițiile de mediu pot avea un efect important asupra datelor colectate, ceea ce indică eterogenitatea și rezistivitatea mare a stratului superficial ca fiind cauza zgomotului inițial de achiziție.

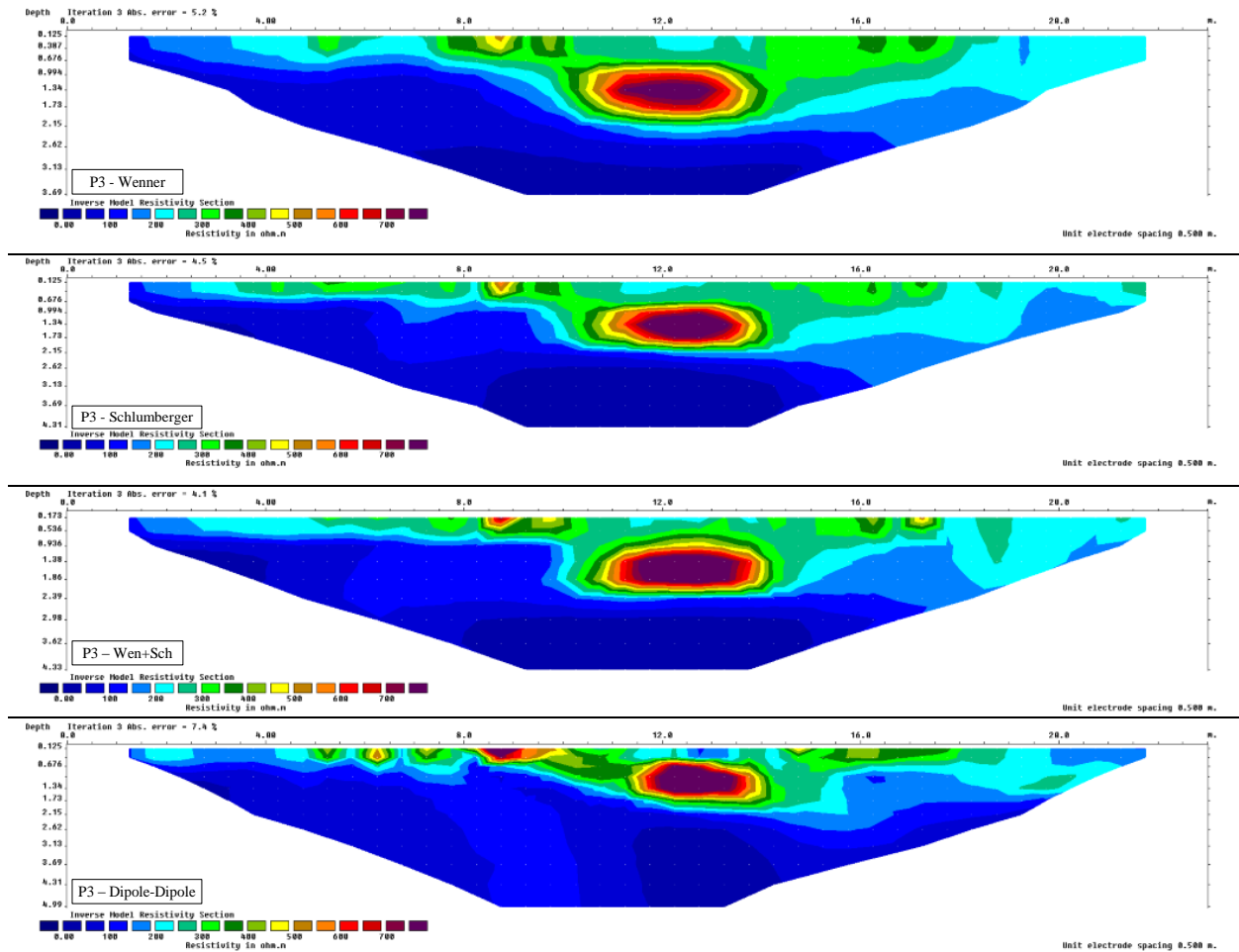
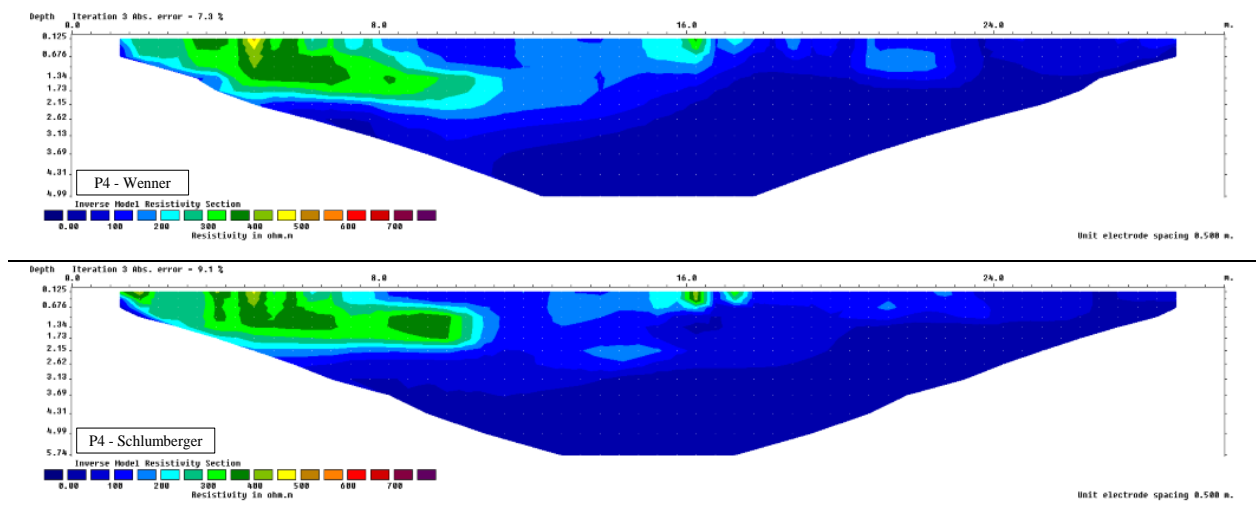


Fig. 5.6: Secțiuni de rezistivitate obținută pentru profilul 3 (se observă o bună corelație între cele 4 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliilor de maxim fiind foarte apropiate)



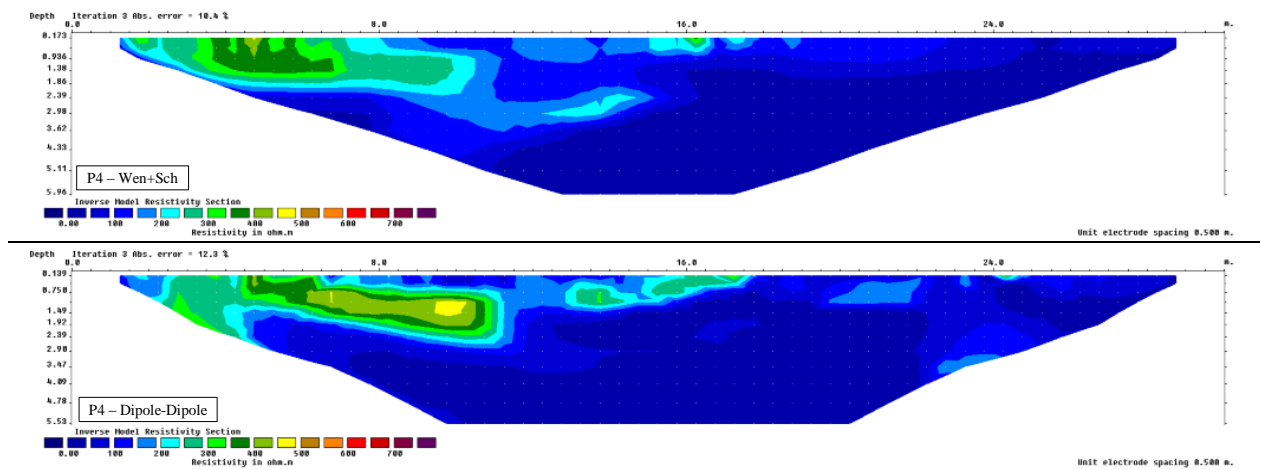


Fig. 5.7: Secțiuni de rezistivitate obținută pentru profilul 4 (se observă o bună corelație între cele 4 secțiuni de rezistivitate, dimensiunea și poziția anomaliei de maxim fiind foarte apropiate)

### 5.1.3 Procesarea datelor și interpretarea rezultatelor

Inversia a fost realizată cu programul RES2DINV utilizând opțiunile „use model refinement” și „robust inversion” asupra datelor filtrate automat cu programul PROSYS II, iar rezultatul inversat obținut este bazat pe optimizare neliniară prin metoda celor mai mici pătrate. Făcând abstracție de profilul 2, ce prezintă un nivel ridicat de zgomot, și utilizând rezultatele obținute din profilurile 1, 3 și 4, a fost creat un set de două suprafețe indicând estimarea distribuției în plan a cavității, cu probabilitate ridicată, respectiv redusă. Pentru fiecare profil, a fost estimată poziția cavității pe baza distribuției rezistivității în lungul secțiunilor. Metoda utilizată este descrisă grafic în Fig. 5.8, indicând modul în care zonele de probabilitate minimă, respectiv maximă, au fost determinate pe baza profilului 3. Aceeași procedură a fost repetată pentru profilurile 1 și 4, rezultând o estimare a poziției în plan a cavității, descrisă în Fig. 5.9.



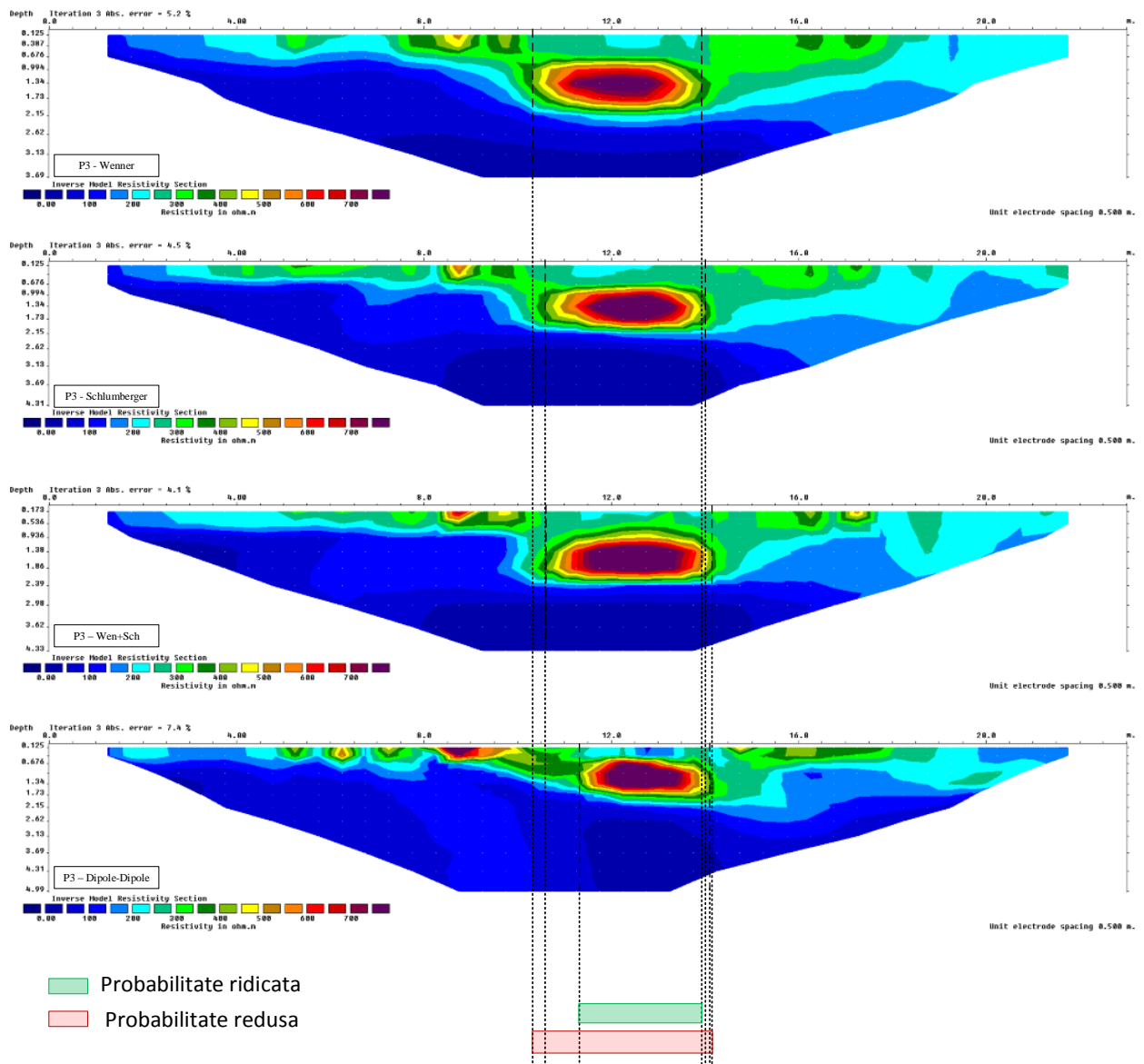


Fig. 5.8: Estimarea poziției cavității pe baza datelor achiziționate

Distribuțiile în plan astfel obținute sunt descrise comparativ în Fig. 5.9, alături de distribuția reală a cavității, rezultatele măsurătorilor și interpretării fiind în bună concordanță cu cele cavitata reală. Aria estimată a golului este cu aproximativ 20% mai mică în cazul distribuției cu probabilitate mare, respectiv cu 30% mai mare pentru cea cu probabilitate redusă. Media dintre acestea se află la aproximativ 5% față de dimensiunile reale, observându-se astfel că o estimare medie a dimensiunilor cavității se poate realiza cu un grad înalt de acuratețe. Estimarea exactă a poziției nu se poate face cu aceeași ușurință, ca urmare a erorilor ce pot fi create nu doar de procesarea datelor, ci mai degrabă de măsurători inexacte cu privire la pozițiile electrozilor în timpul achiziției. Poziția cavității reale a fost determinată cu precizie topografică, în timp ce dispunerea electrozilor instalați in-situ a fost stabilită prin metode mai puțin exacte.

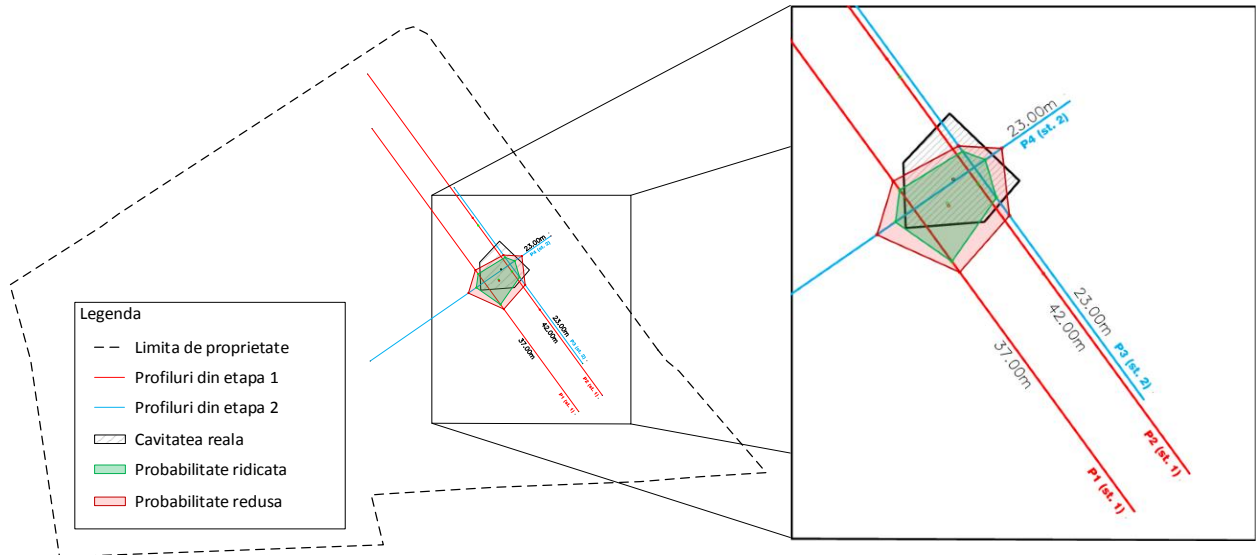
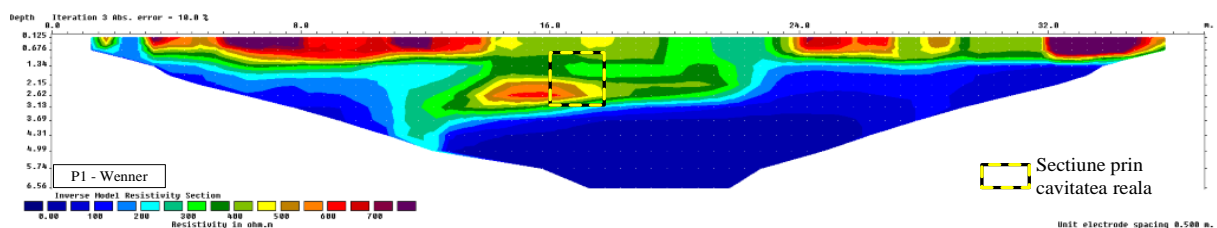


Fig. 5.9: Comparație între distribuția orizontală estimată a cavității și dimensiunile reale



Fig. 5.10: Cavitate reală dezvelită în amplasament

Pentru a caracteriza în plus acuratețea profilurilor electrice, dimensiunea cavității reale a fost suprapusă peste fiecare din profilurile obținute (Fig. 5.11 ÷ Fig. 5.14). Prima etapă de achiziție nu prezintă estimări foarte exacte ale poziției cavității, dar indică totuși semnale cu privire la existența acesteia. În a doua etapă însă au fost obținute rezultate concordante cu prezența și poziția golului.



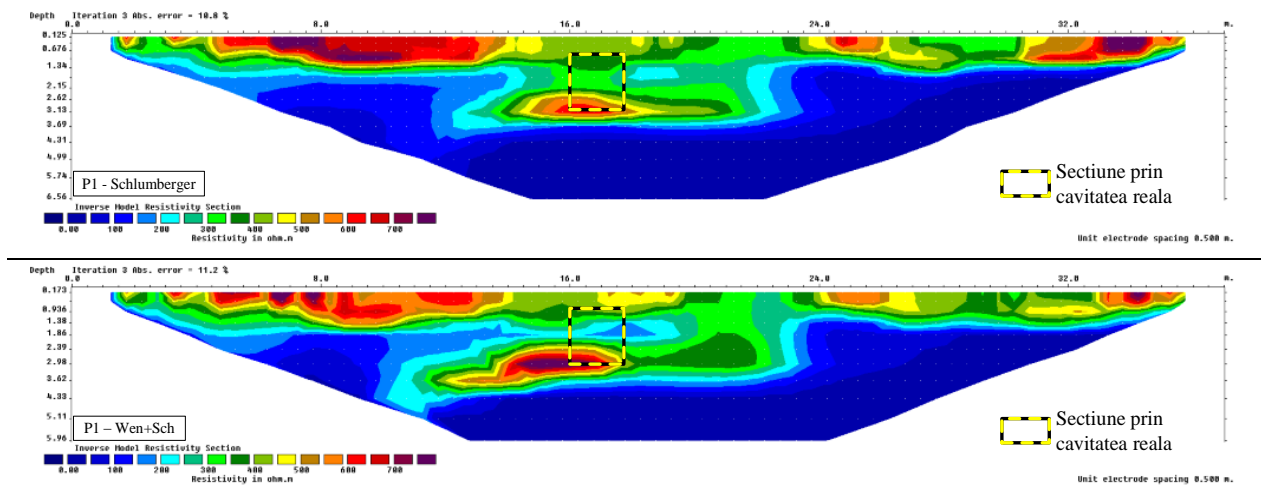


Fig. 5.11: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 1

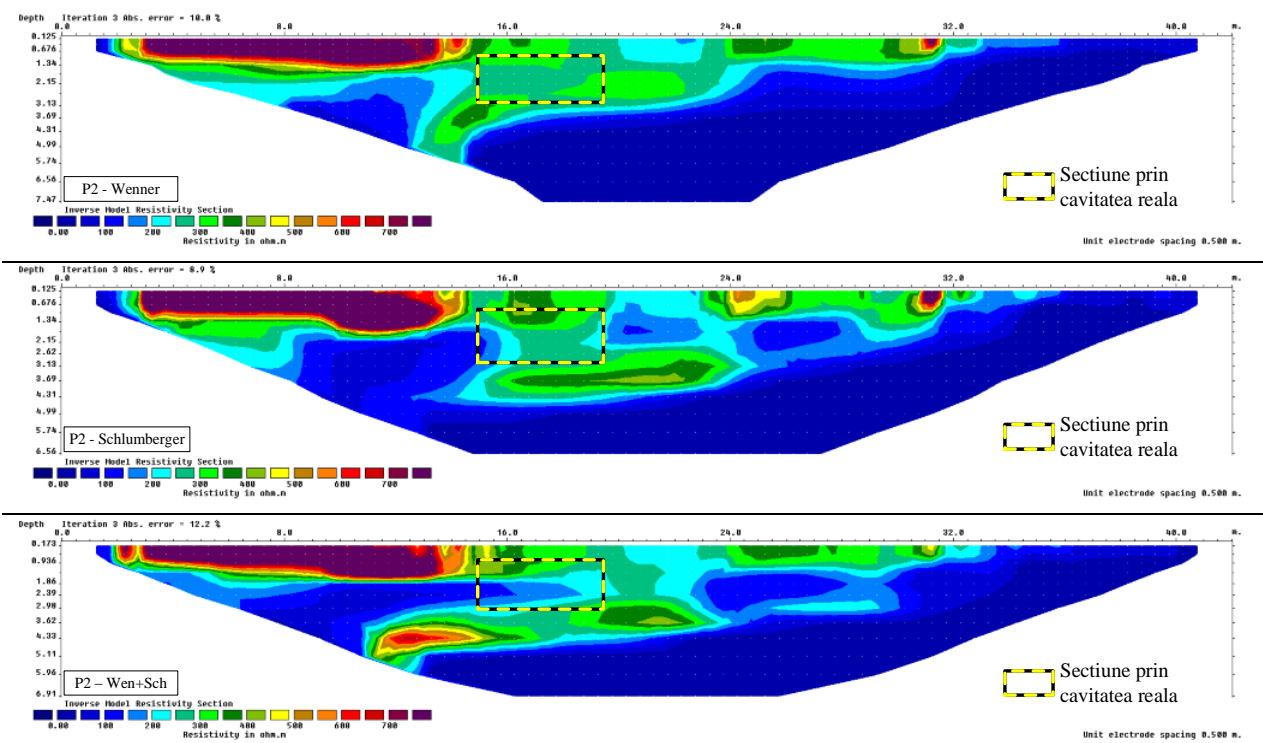
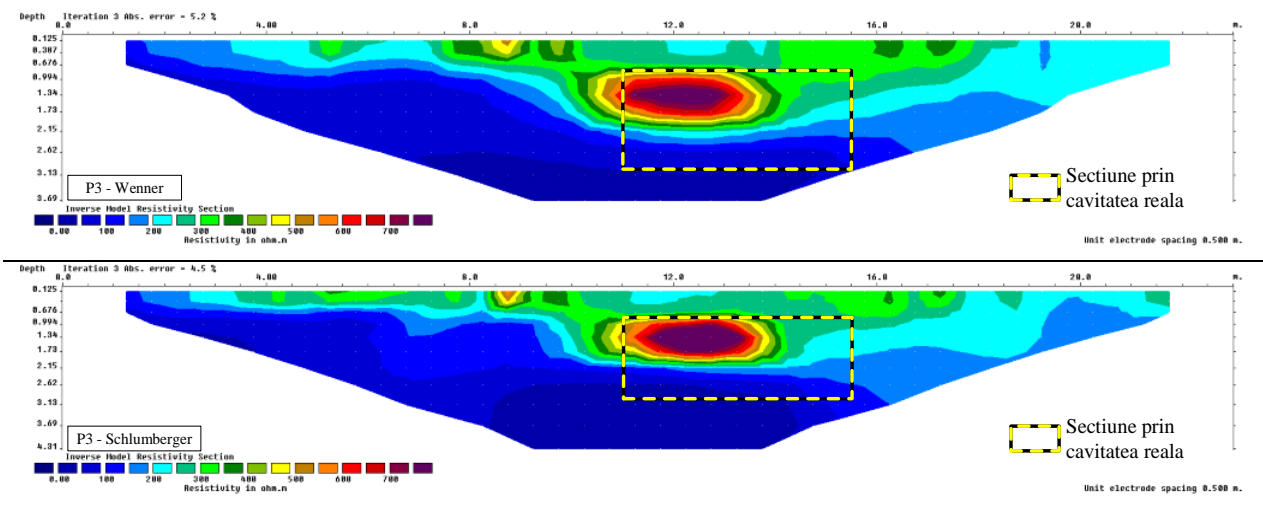


Fig. 5.12: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 2



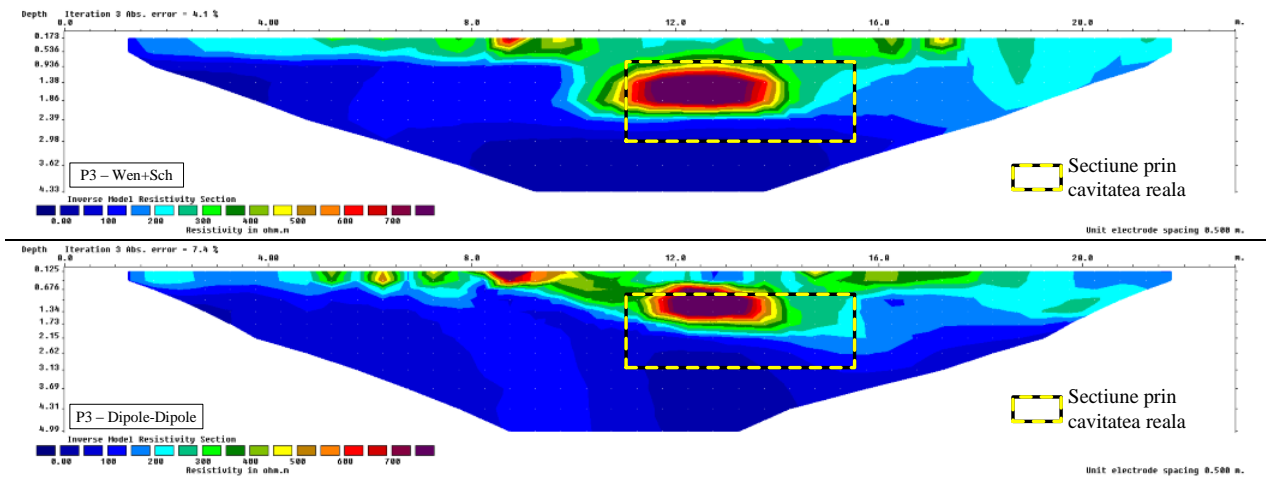


Fig. 5.13: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 3

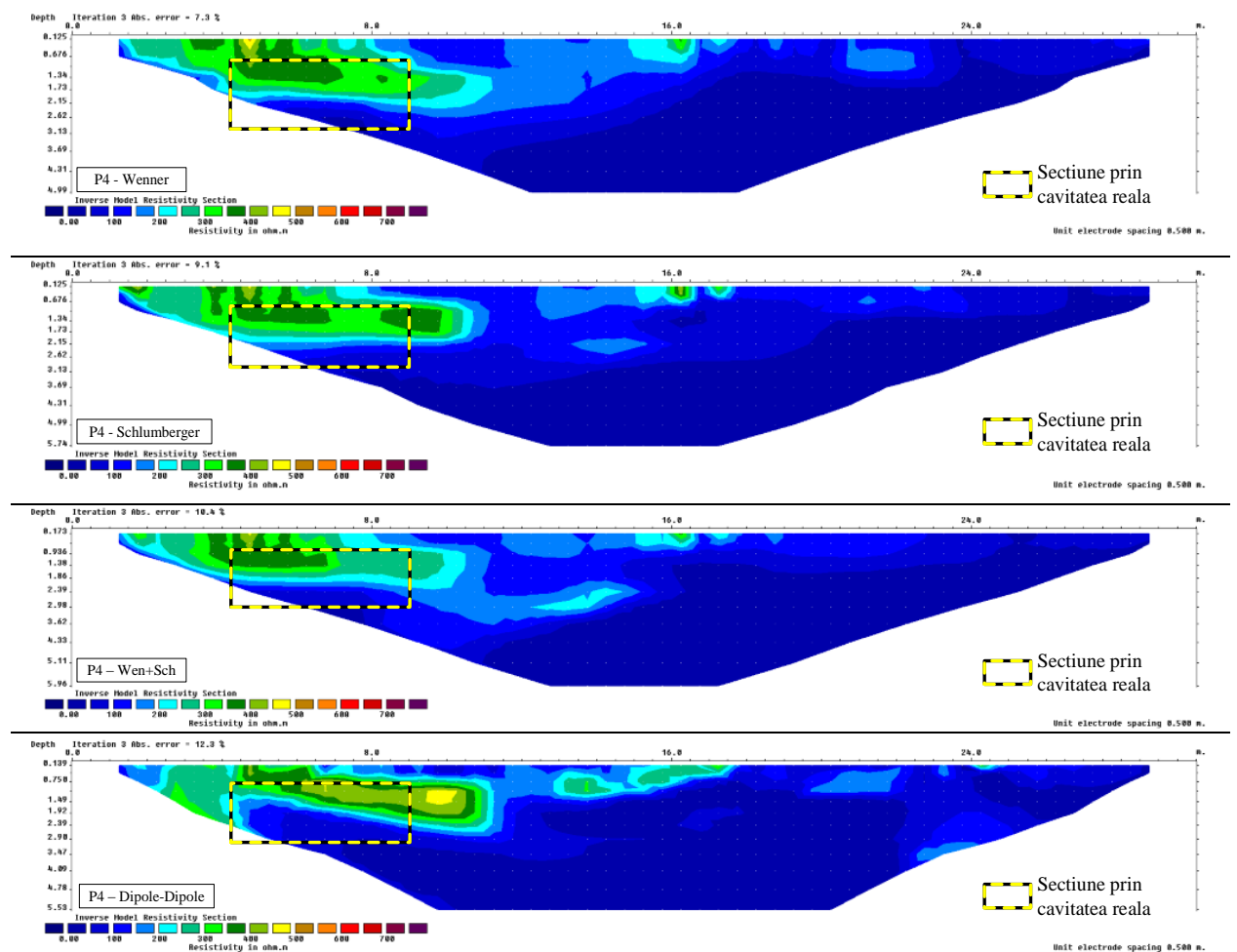


Fig. 5.14: Distribuția cavității reale suprapusă peste profilul 4

### 5.1.4 Discuții

Investigațiile geofizice de tip ERT sunt considerate în comunitatea de specialitate ca fiind metode eficiente pentru identificarea cavităților subterane. Cu toate acestea, prezentul studiu de caz a arătat că rezultate cu acuratețe ridicată pot fi obținute doar în condiții favorabile in-situ. Aplicarea metodei în zone puternic antropizate este supusă unor provocări cu privire la achiziția datelor, dar utilizarea diverselor tehnici de achiziție crește probabilitatea de a obține rezultate semnificative, după cum a fost prezentat în cadrul acestui

studiu. Măsurătorile efectuate au fost suficiente nu doar pentru a indica poziția cavitații, ci și pentru a estima dimensiunea probabilă a acesteia.

Utilizarea programelor de inversie 2D pentru cartarea corpurilor tridimensionale atrage după sine în mod inevitabil o serie de inconsecvențe, în special pentru adâncimi de investigare mari. Se vor obține astfel rezultate cu acuratețe mai scăzută referitoare la partea inferioară a țintei, dar suficient de bune în ceea ce privește limitele orizontale. Astfel, adâncimea țintei este mult mai dificil de estimat.

Deși condițiile de achiziție din prima etapă nu au fost optime, rezultatele au indicat în mod evident prezența unei anomalii ce poate reprezenta un gol îngropat, însă este dificil de estimat forma sau volumul acestuia, ca urmare a zgomotului prezent în secțiunile obținute. Măsurătorile din a doua etapă au oferit indicații mult mai exacte cu privire la dimensiunile cavitații datorită creșterii generale a umidității pământului și implicit a conductivității electrice a acestuia. După cum s-a arătat în profilul 3, obținând secțiuni de rezistivitate similare prin metode de achiziție diferite pentru același profil este un indicator al unui bun raport semnal-zgomot pentru măsurătorile efectuate, crescând gradul de încredere în rezultatele obținute.

## 5.2 Identificarea cavitațiilor în medii carstice - Studiu de caz privind Peștera Ponoarele

### 5.2.1 Introducere

Peștera Ponoare este situată în comuna Ponoare, la 5 km de Baia de Aramă, județul Mehedinți și mai este cunoscută și sub numele de Peștera Podului datorită situării acesteia lângă Podul lui Dumnezeu sau Podul Natural.

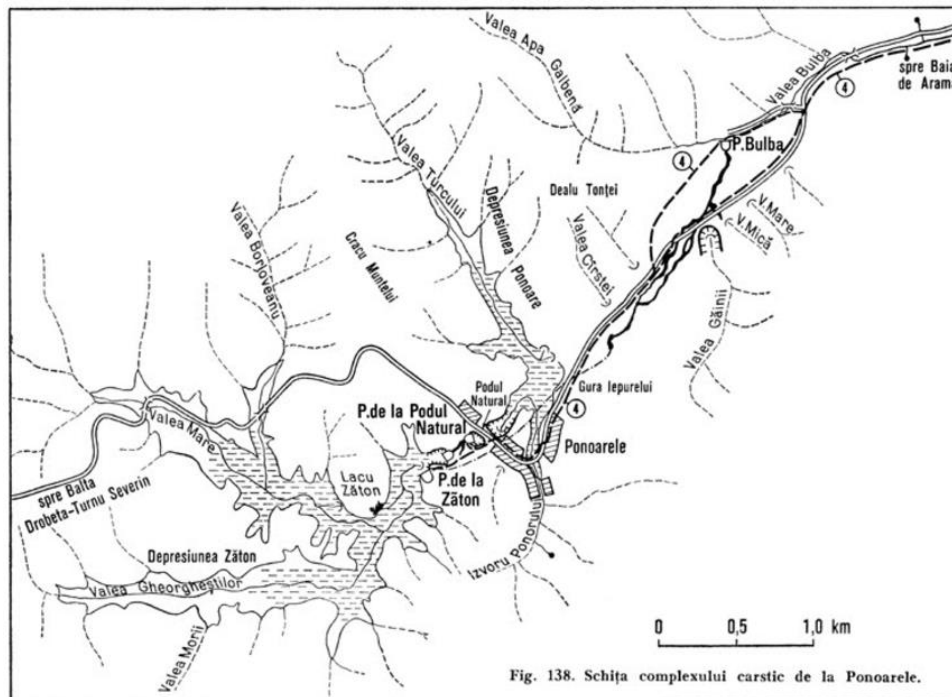


Fig. 138. Schița complexului carstic de la Ponoarele.

Fig. 5.15: Schiță Complexului Carstic Ponoarele(www.cetateabaniei.com)

Fiind inclusă în rezervația naturală „Complexul Carstic Ponoarele”, orice tehnică invazivă de studiere a acesteia este interzisă prin lege.



Fig. 5.16 Intrarea în Peștera Zăton

Pentru cartarea peșterilor se folosesc tehnici topografice specifice, iar aplicarea acestora este de foarte multe ori limitată de îngustări (gâtuiuri) ale galeriilor, ce duc la cartarea parțială a acestora.

### 5.2.2 Lucrări de investigație

În cadrul unui studiu hidrogeologic de investigație a sistemului carstic al peșterii Ponoarele, s-a încercat folosirea metodei ERT pentru evidențierea golurilor subterane.

Au fost realizate 2 profiluri paralele având lungimea de 188m respectiv (48 de electrozi, la distanță inter ax de 4.00m), achiziția efectuându-se în sistemul Wenner (Fig. 5.17). Direcția profilurilor a fost aleasă astfel încât acestea să fie perpendiculare pe direcția deja cunoscută a galeriilor, măsurătorile efectuându-se într-o perioadă în care peștera nu era umplută cu apă. Acest aspect influențează posibilitatea identificării golurilor subterane, aerul prezentând un contrast mare de rezistivitate (rezistivitatea electrică a aerului fiind teoretic infinită) față de masivul din jurul acestuia, astfel conducând la o probabilitate mai mare de a identifica ținta.



Fig. 5.17: Poziția profilurilor ERT

Secțiunile de rezistivitate obținute pentru cele două profiluri (Fig. 5.18, Fig. 5.19) evidențiază prezența a două anomalii de maxim cu rezistivități de ordinul zecilor de mii de  $\Omega \cdot m$  pe un fond geologic de aproximativ  $5000 \Omega \cdot m$ , anomalii asociate cu existența unor goluri carstice.

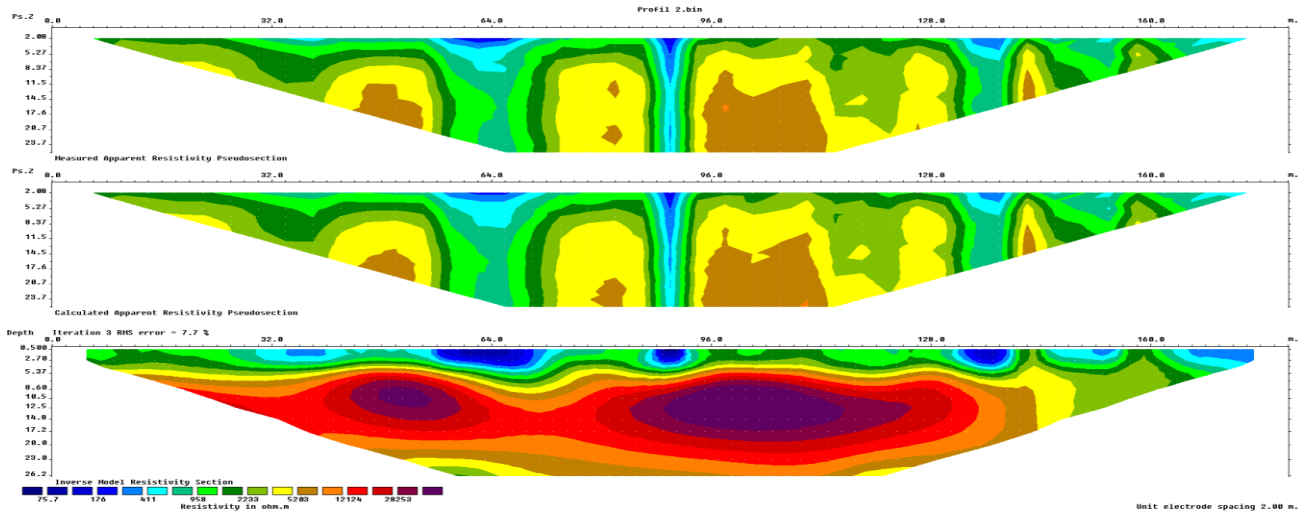


Fig. 5.18: Profil 1 – secțiune de rezistivitate electrică

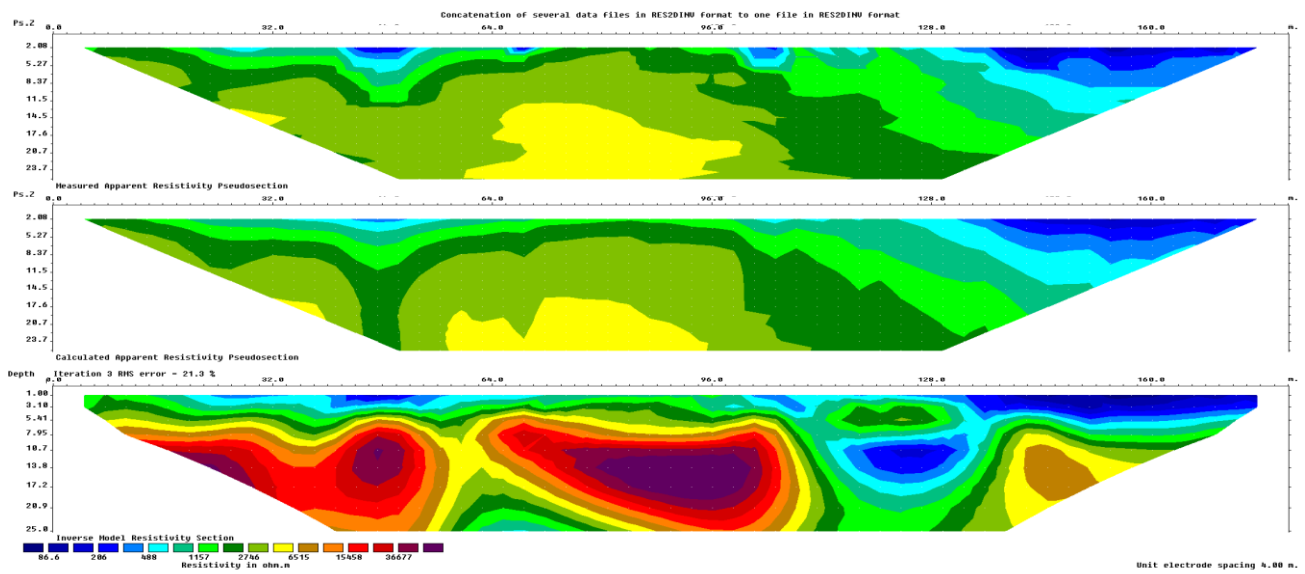


Fig. 5.19: Profil 2 – secțiune de rezistivitate electrică

### 5.2.3 Interpretare și discuții

Pentru interpretarea cât mai corectă a secțiunilor de rezistivitate în vederea estimării poziției și dimensiunii structurilor carstice a fost realizată o modelare directă pornind de la un model simplificat de rezistivitate apropiat de cel obținut în lungul profilului 1 (Fig. 5.20). Mediului geologic i s-a alocat o valoare de rezistivității electrice de  $5'000 \Omega \cdot m$ , iar golului subteran una de  $1'000'000 \Omega \cdot m$ , aceasta fiind valoare maximă ce poate fi atribuită în programul de calcul.

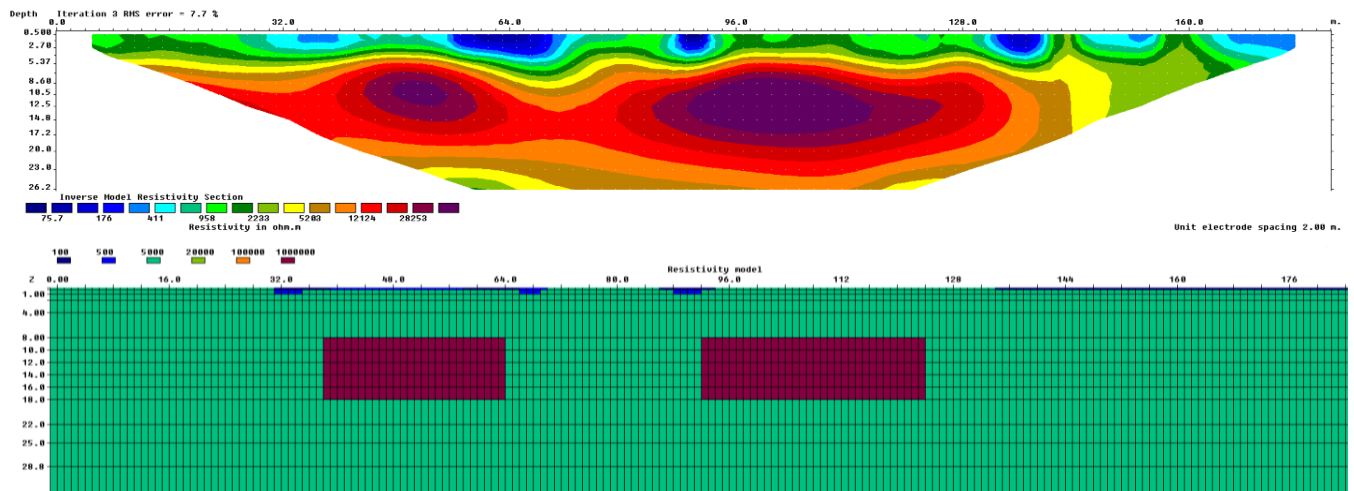


Fig. 5.20: Model sintetic de rezistivitate (jos) care aproximează în mod grosier secțiunea de rezistivitate obținută în urma procesării înregistrărilor de pe profilul 1 (sus)

Folosind programul RES2DMOD s-a obținut, prin modelare directă, secțiunea de rezistivitate aparentă a modelului din Fig. 5.20, în cazul realizării unui profil de tomografie electrică în sistemul Wenner cu 48 de electrozi, cu distanța dintre electrozi de 4m (aceleași condiții de achiziție cu cele din profilurile 1 și 2).

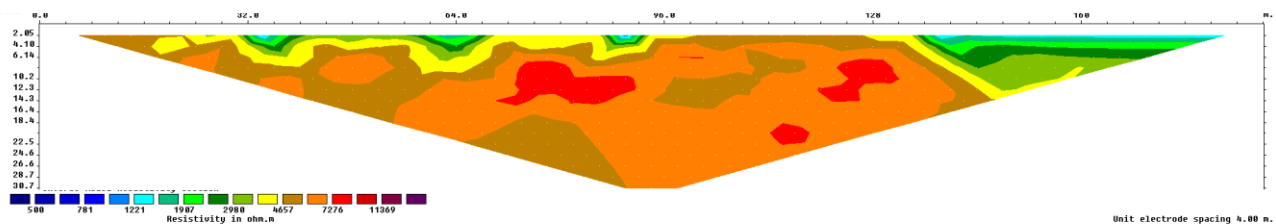
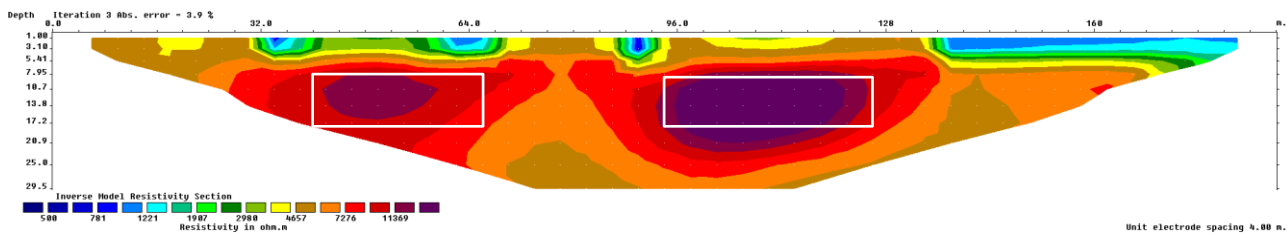


Fig. 5.21: Secțiunea de rezistivitate aparentă a modelului sintetic

Secțiunea sintetică de rezistivitate aparentă a fost supusă unui proces de inversie cu ajutorul programului RES2DINV, astfel obținându-se un model de rezistivitate electrică. Cum a fost arătat și în capitolul 3.7, procesul de inversie nu admite soluție unică acest lucru observându-se în diferența dintre modelul prezentat în Fig. 5.20 și secțiune de rezistivitate prezentată Fig. 5.22. Practic, modelul sintetic a fost supus unui proces de modelare directă și apoi unuia de modelare indirectă, modelul final prezentând unele diferențe față de modelul inițial.

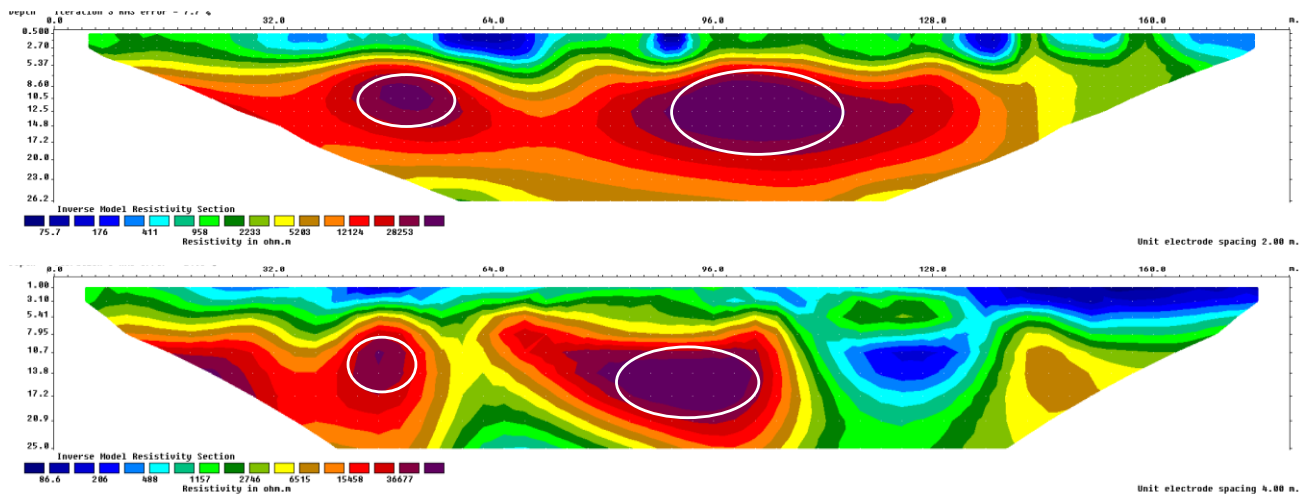




**Fig. 5.22** Secțiune de rezistivitate obținută în urma inversiei pseudo-secțiunii prezentate în Fig. 5.21, cu reprezentarea contururilor corpurilor rezistive din modelul inițial

Analizând Fig. 5.22 se poate observa că cea mai bună estimare a poziției și dimensiunii corpului rezistiv (reprezentat pe secțiune prin dreptunghiuri de culoare albă) este dată de o valoare a rezistivității de aproximativ  $15.000 \Omega \cdot m$ , aceasta reprezentând o rezistivitate de 3 ori mai mare față de mediul geologic.

Având în vedere faptul că în programul de modelare directă golului i s-a atribuit o valoare de  $1'000'000 \Omega \cdot m$ , iar rezistența sa electrică este incomparabil mai mare (teoretic infinită), s-a considerat că poziția conturului golului subteran pe secțiune reală de rezistivitate se află în jurul valori de  $30.000 \Omega \cdot m$  (o valoare de 6 ori mai mare față de mediul geologic) (Fig. 5.23).



**Fig. 5.23** Indicarea poziției posibilelor goluri carstice pe cele două secțiuni de rezistivitate electrică măsurate

Poziția și geometria golurilor identificate au fost comparate cu galeriile (Fig. 5.24) cartate de speologi prin tehnici topografice specifice, trei dintre golurile evidențiate fiind în foarte bună corelație cu traseul galeriilor cunoscut anterior, iar una dintre ele indicând o galerie bănuită, dar necartată din cauza imposibilității pătrunderii pe aceasta (Fig. 5.25).

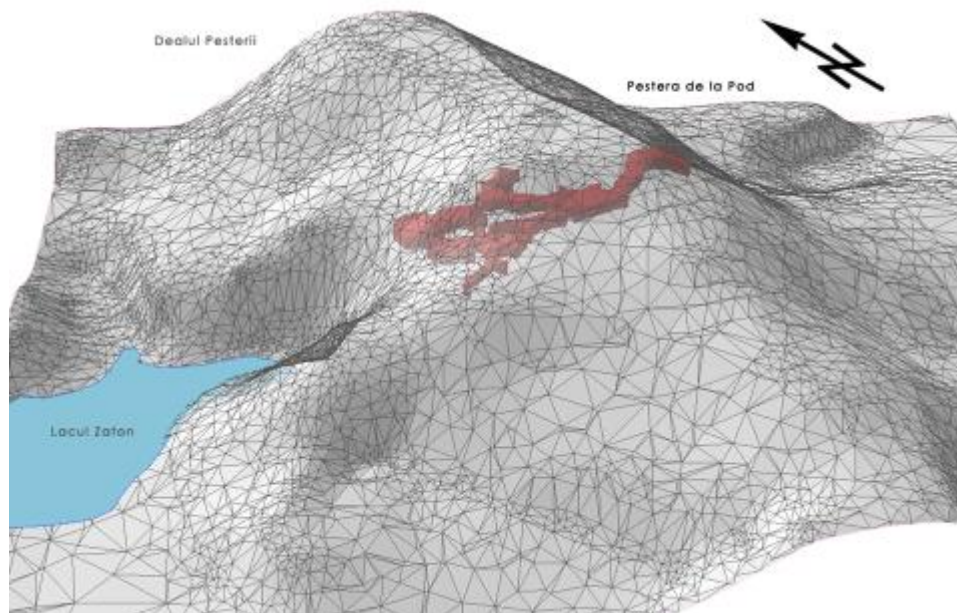


Fig. 5.24: Model topografic 3D al Dealului Peșterii, cu indicarea (culoare roșie) a galeriilor de peșteră cartate prin tehnici speologice

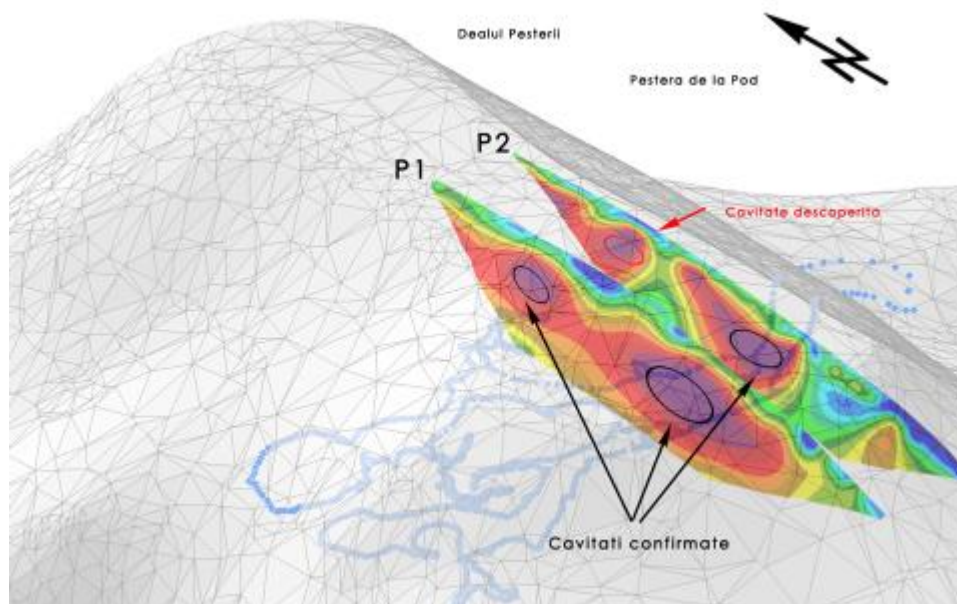


Fig. 5.25 Suprapunerea secțiunilor de rezistivitate peste poziția cunoscută a golurilor subterane

## 5.3 Investigarea zonelor afectate de fenomene de instabilitate - Studiu de caz privind zona Mănăstirea Dealu, jud. Dâmbovița

### 5.3.1 Introducere

Prezentul studiu de caz are ca scop caracterizarea geologică și geotehnică a unui amplasament din zona Mănăstirii Dealu afectat de alunecări de teren. Cauzele fenomenelor de instabilitate au fost inițial stabilite printr-un studiu geotehnic solicitat de Consiliul Județean Dâmbovița în anul 2006, concluziile acestuia indicând prezența unor falii de alunecare cu extinderi de până la 20m adâncime. Investigatiile realizate pentru prezentul studiu de caz scot în evidență problemele specifice locale ce nu au putut fi identificate în studiile realizate anterior, măsurătorile geofizice având un rol determinant în obținerea unui model geologic reprezentativ. Măsurătorile și interpretările au fost întocmite de autorul acestei lucrări, în scopuri de cercetare, fiind complet independente de orice autoritate externă.

Mănăstirea Dealu este una dintre marile vechi mănăstiri din România. Aceasta se află în localitatea Viforâta, comuna Aninoasa, la șase kilometri nord-vest de Târgoviște, pe un deal din apropierea cursului Ialomiței. (Fig. 5.26). Prima biserică de pe acest loc datează de la sfârșitul secolului al XIV-lea sau începutul celui de al XV-lea, mănăstirea fiind cea mai mare necropolă domnească din țară.

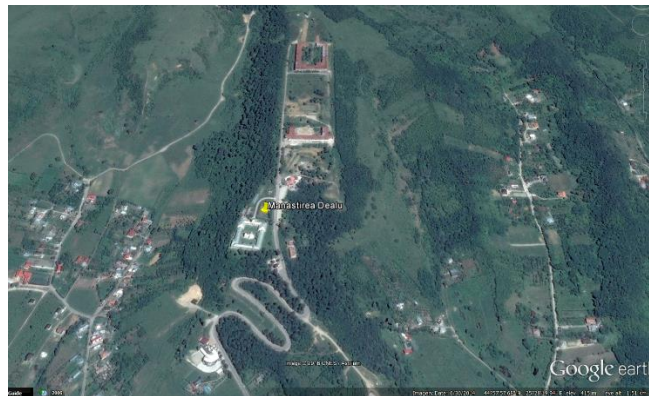


Fig. 5.26: Poziția zonei analizate (Google Earth)

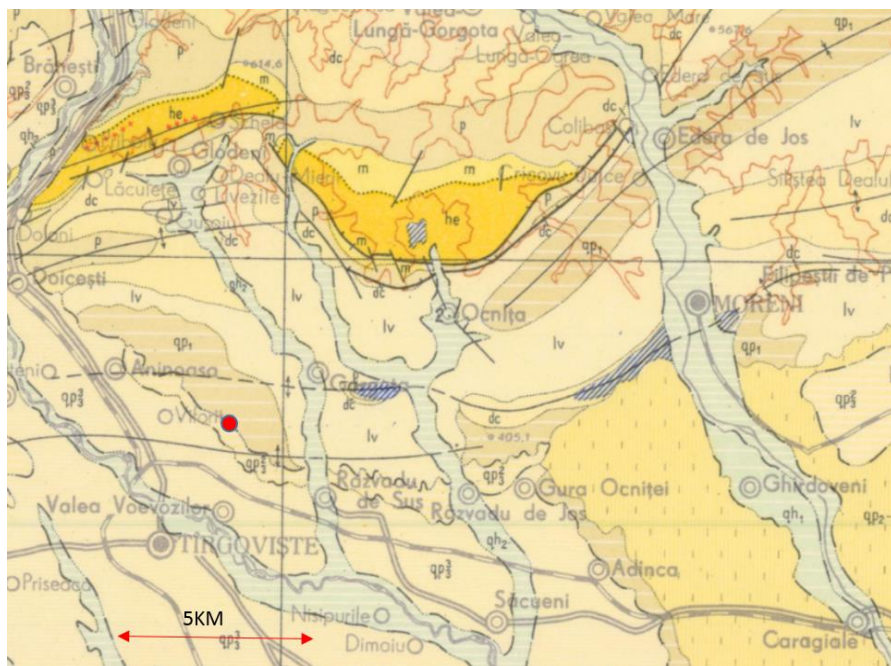


Fig. 5.27: Cadrul geologic al zonei studiate (Harta geologică a României 1:200.000 foaia Târgoviște, Institutul Geologic Român)

Din punct de vedere geologic amplasamentul se află situat pe flancul unui anticlinal diapir ce află la Gorgota (3km Nord-Est de amplasament) și la Moreni (10km Est de amplasament). Analizând poziția amplasamentului în Fig. 5.27, acesta se află la contactul dintre formațiuni de vârstă Pleistocen Inferior ( $qp_1$ ) alcătuit din pietrișuri, nisipuri și argile (Fig. 5.28) și formațiuni de vârstă Pleistocen Superior ( $qp^2_3$ ) alcătuite din pietrișuri și nisipuri. Totuși, din cauza scării mici (1:200.000) la care este făcută harta și inexistența altor hărți geologice mai detaliate ale zonei, nu se poate spune cu exactitate care este vârsta formațiunilor acoperitoare din acest amplasament ( $qp_1$  sau  $qp^2_3$ ) și nici nu se pot remarca cute sau falii cu extindere spațială mică.

1	$qh_2$	$qp-sch$	Pietrișuri, nisipuri, argile nisipoase
2	$qh_1$		Pietrișuri, nisipuri, depozite loessoide
3	$qp^3_3$		Pietrișuri, nisipuri, depozite loessoide
4	$qp^2_3$		Pietrișuri, nisipuri
5	$qp^1_3$		5 Pietrișuri, nisipuri
6			6 Pietrișuri, nisipuri, depozite loessoide
7	$qp_2-qp_3$		Depozite loessoide
8	$qp_1$		Pietrișuri, nisipuri, argile, (Strate de Cindești și Strate de Frățești

Fig. 5.28 Tipuri litologice asociate vârstelor geologice (Harta geologică a României 1:200.000 foaia Târgoviște, Institutul Geologic Român)

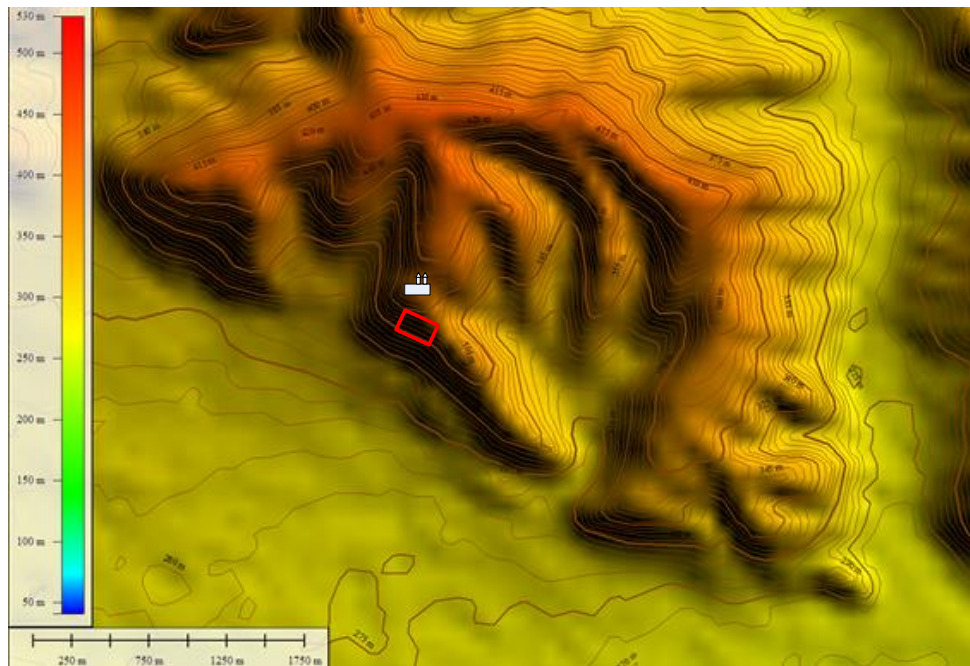


Fig. 5.29: Harta topografică a zonei studiate

Drumul de acces spre Mănăstirea Dealu este construit pe o panta generală de aproximativ 15% și este frecvent afectat de alunecări de teren acesta fiind supus aproape anual reparațiilor la partea carosabilă. În septembrie 2015 se puteau observa două zone extinse afectate de fenomene de instabilitate a maselor de pământ (Fig. 5.30).



Fig. 5.30: Porțiuni ale drumului afectate de alunecări de teren

Din punct de vedere morfologic, prima zonă este caracterizată spre sud-vest de un relief lin cu panta de sub  $5^\circ$ . În partea de nord-est (pe partea dreaptă a sensului de urcare), este amplasat un zid de sprijin de greutate (având lungimea de aproximativ 60m), în spatele acestuia relieful fiind mai abrupt, având o pantă de aproximativ  $15^\circ$ . Zidul de sprijin nu prezintă semne de fisurare sau deformații excesive.

Suprafața de cedare din „Zona 1” se dezvoltă pe o lungimea de aproximativ 70% din lungimea zidului de sprijin, la baza acestuia.



Fig. 5.31: Detaliu morfologie „Zona 1”



Fig. 5.32: Detaliu – Suprafața de cedare „Zona 1” (poza este făcută în sensul de coborâre)



Fig. 5.33: Detaliu – Suprafața de cedare „Zona 1” (poza este făcută în sensul de urcare)

Din punct de vedere morfologic, „Zona 2” prezintă o situație complet diferită față de „Zona 1”, fiind caracterizată de o pantă lină în partea de nord-est și o pantă foarte abruptă pe partea de sud-vest (Fig. 5.34

**Fig. 5.34 Detaliu morfologic „Zona 2”**

).

De asemenea, în zona de sud-vest este amplasat un zid de sprijin cu înălțime variabilă (1.0-1.5m), panta terenului fiind de aproximativ  $30^\circ$  în spatele zidului și de aproximativ  $10^\circ$  în fața acestuia.



Fig. 5.34 Detaliu morfologic „Zona 2”

În Fig. 5.34 se mai pot observa copaci cu înclinări diferite față de verticală, care semnalează foste alunecări de teren. Din orientarea copacilor din amplasament se pot distinge trei elemente care dau indicații cu privire la geometria masei alunecate:

- Copacul marcat cu litera A are vârful înclinat spre creasta alunecării sugerând amplasarea acestuia în masa alunecată;
- În piciorul alunecării se observă copacul marcat cu B, înclinat în sens opus față de A, situându-se într-o zonă de ebulment;
- Copacii marcați cu C confirmă stabilitatea zonei în care sunt amplasați, având trunchiurile verticale.

Indiciile bio-morfologice prezentate converg către stabilirea unei foste suprafețe de alunecare marcată schematic în Fig. 5.34.

Pe aproape toată lungimea zidului de sprijin se poate observa o deformare pe direcția sud-vest, manifestându-se prin rotirea zidului în plan transversal și apariția unor deschizături de 10-15 cm între spatele zidului și rigola colectoare (Fig. 5.35).



Fig. 5.35: Detaliu asupra zidului de sprijin și rigola din spatele acestuia

În vecinătatea „zonei 2” se află o stație dezafectată de tratare a apelor menajere (Fig. 5.36). Bazinul colector neetanș (Fig. 5.37, Fig. 5.38) și rețeaua de transport fisurată creează o zonă de băltire a apelor de suprafață și o scurgere continuă pe versanți. Bazinul se află în spatele stației de tratare, lipit de aceasta, dar fiind în mare parte îngropat și acoperit de vegetație nu este observabil în Fig. 5.36.



Fig. 5.36: Poziția stației de tratare



Fig. 5.37: Bazin de colectare al apelor uzate (volum aproximativ 300 mc)



Fig. 5.38: Nivelul apei în bazinul colector



În ciuda faptului că aduce o încărcare verticală de aproximativ 3000kN și că se află într-o zonă de băltire pe un versant pe care apa șiroiește în mod continuu (Fig. 5.40), stația de tratare nu prezintă nici o fisură importantă (Fig. 5.39) și versantul nu prezintă indicii de instabilitate.



Fig. 5.39: Stația de tratare



Fig. 5.40: Șiroi de apă ce se scurge pe versant de la stația de tratare

### 5.3.2 *Investigații realizate*

Investigațiile pentru caracterizarea amplasamentului au debutat cu 2 foraje geotehnice (Fig. 5.41) amplasate de o parte și de alta (amonte și aval) a drumului afectat de fenomene de instabilitate. Forajele, cu diametru de 120 mm, au fost realizate manual (Fig. 5.42), din acestea prelevându-se probe tulburate la pungă și probe netulburate (la fiecare 1,5m) cu ajutorul unei geale,

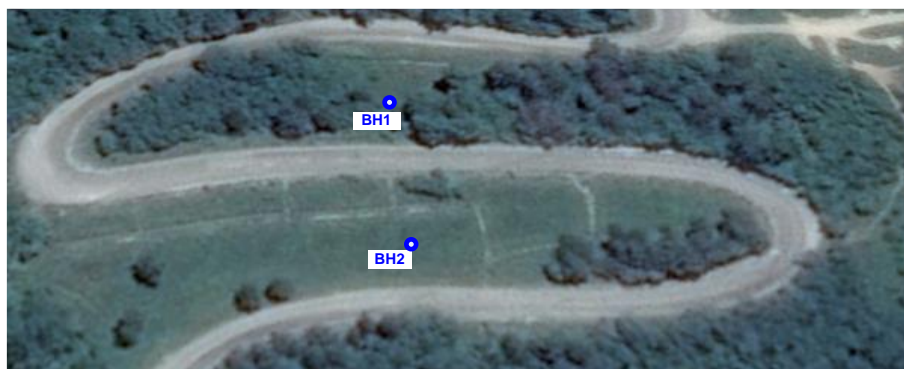


Fig. 5.41 Poziția forajelor geotehnice



Fig. 5.42 Realizarea forajului BH1

În forajul BH1 a fost evidențiată următoarea litologie:

- 0m - 4,40 m - argila prăfoasă la praf argilos cafeniu, plastic vârtos la plastic consistent
- 4,40 m - 12,5 - m nisip la nisip prăfos gălbui, slab cimentat
- nivelul apei subterane a fost interceptat la 12,0 m

În forajul BH2 au fost evidențiate următoarele:

- 0m - 2,20 m - umplutură compusă din pământ vegetal, argilă și resturi de materiale de construcție
- 2,20 m - 8,0 m - argilă la argila prăfoasă cafeniu, plastic văroasă la plastic consistentă
- nivelul apei subterane nu a putut fi estimat deoarece de la adâncimea de 2m au apărut infiltrații ce proveneau scurgerea pe versant a apei de la stația de tratare.

Din cauza lipsei de corelare a informațiilor rezultate din cele două foraje (Fig. 5.43) lucrările de investigație s-au suplimentat cu două profiluri de tomografie electrică. Drumul intens circulat și vegetația deasă au constrâns poziționarea acestor două profile în partea aval a drumului, în lung cu acesta (Fig. 5.44).

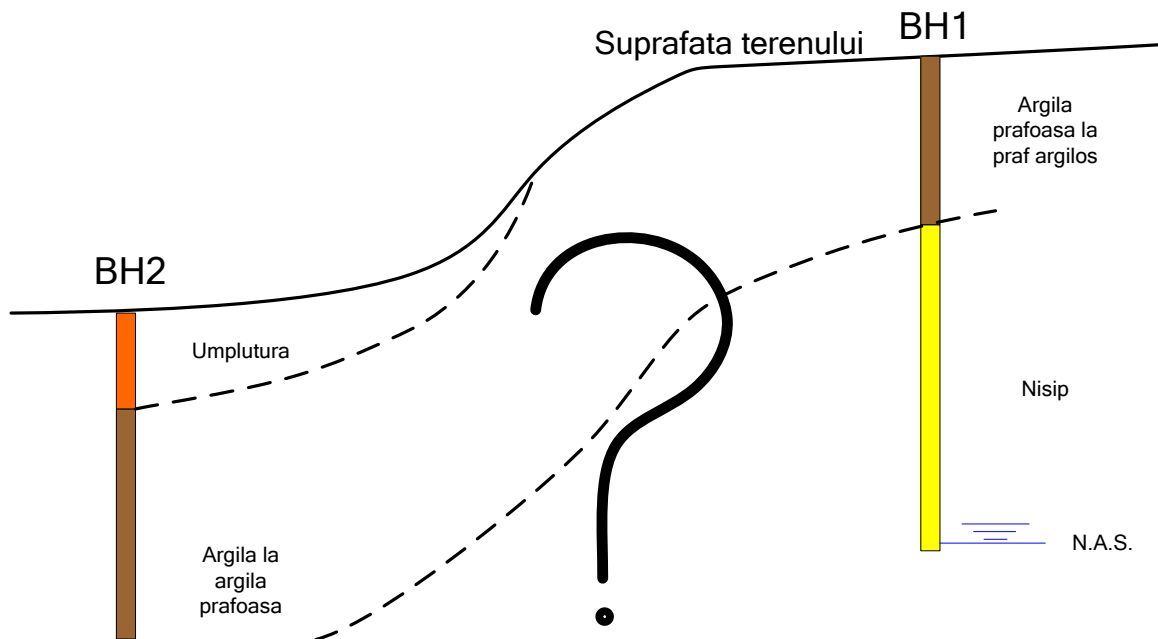


Fig. 5.43 Litologia interceptată în cele două foraje suprapusă peste profilul topografic al terenului



Fig. 5.44: Poziția profilurilor realizate în zona afectată de fenomenele de instabilitate

Profilurile de tomografie electrică au fost realizate folosind dispozitivul Wenner, cu distanța între electrozi de 3m, pentru profilul 1 folosindu-se 48 de electrozi iar pentru profilul 2, 39 de electrozi. Măsurătorile de rezistivitate aparentă au fost efectuate cu un echipament IRIS Electric Pro, iar inversia pseudo-secțiunilor înregistrate (secțiuni de rezistivitate aparentă) a fost realizată cu ajutorul programului RES2DINV. Secțiunile de rezistivitate obținute în urma modelării inverse a datelor, cât și pseudo-secțiunile măsurate și modelate sunt prezentate în Fig. 5.45 și Fig. 5.46, în care se observă o similitudine ridicată între valorile măsurate și cele modelate numeric.

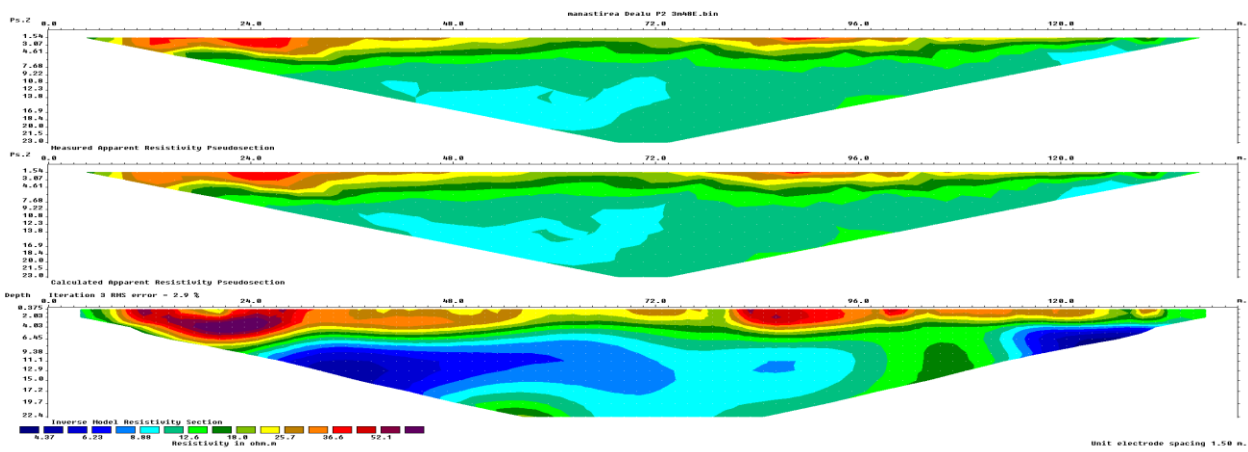


Fig. 5.45 Profilul 1 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos)

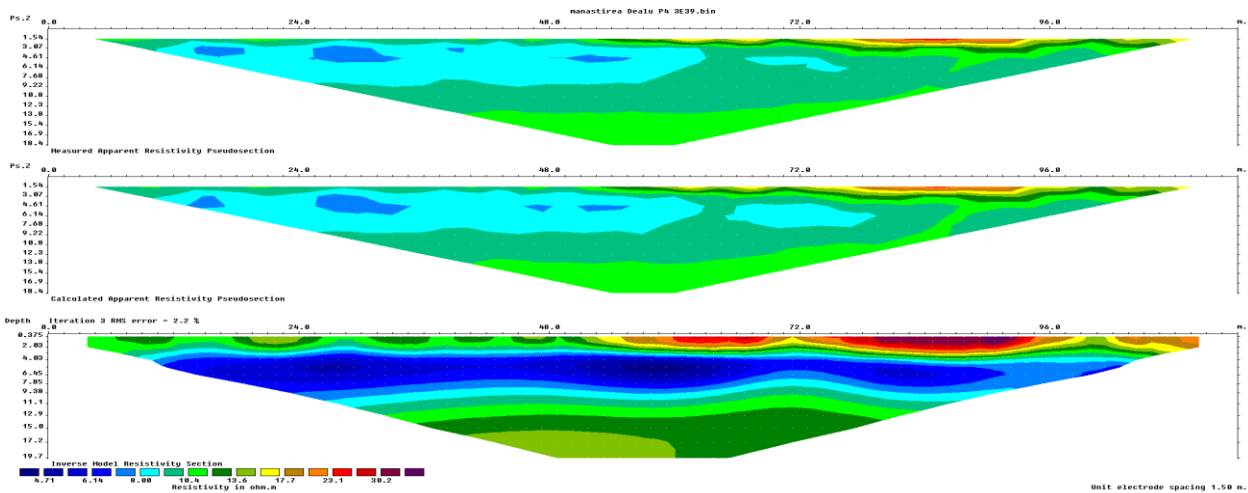


Fig. 5.46 Profilul 2 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos)

Pe ambele secțiuni de rezistivitate se observă anomalii de maxim de rezistivitate electrică la partea superioară și o variație laterală considerabilă pe primii metri (în special în cazul profilului 1). Pentru explicarea corectă a cauzelor ce au dus la această variație au fost efectuate foraje scurte (Fig. 5.47) cu o foreză manuală (Fig. 5.48) de diametru mic (70 mm) cu ajutorul căreia s-au extras doar probe tulburate.



Fig. 5.47 Poziționarea forajelor pentru interpretarea profilelor de tomografie electrică



Fig. 5.48 Foreză manuală 70 mm



Fig. 5.49 Umplutură eterogenă

În aceste foraje suplimentare au fost identificate următoarele litologii:

a) F1

0.00 – 1.80m: umplutură din material argilos amestecat cu sol și moloz de construcții (Fig. 5.49);  
1.80m – 2.00m: pietriș mediu (dren al zidului de sprijin).

b) F2

0.00 – 1.80m: umplutură din material argilos amestecat cu sol și moloz de construcții (Fig. 5.49);  
1.80 – 2.00m: pietriș mediu (dren al zidului de sprijin).

c) F3

0.00 – 1.80m: umplutură din material argilos de consistență scăzută amestecat cu sol;  
1.80 – 2.20m: pietriș mediu (dren al zidului de sprijin).

d) F4

0.00 – 2.00m: argilă cafenie plastic vârtoasă;  
0.0 – 3.00m: nisip mediu uscat.

e) F5

0.00 – 3.50m: umplutură din argilă de consistență scăzută și sol.

f) F6

0.00 – 4.00m: argilă cafenie plastic vârtoasă

În urma comparației cu forajele realizate în lungul profilului 1, anomaliile de rezistivitate (A1-A5) au fost interpretate după cum urmează (Fig. 5.50):

- A1 este generată de un material de umplutură care conține cantități semnificative de sol și de moloz de construcții;
- A2 și A4 generate de un material de umplutură argilos, de consistență redusă;
- A3 este generată de prezența unui material nisipos uscat, la suprafață. În această zonă nu au fost executate lucrări de umplutură
- A5 poate fi un artefact generat de prezența la suprafața a unei rigole colectare de mari dimensiuni.
- Materialul de sub adâncimea de aproximativ 4 metrii, având rezistivitatea cuprinsă în intervalul 5-10 $\Omega$ ·m este cel mai probabil constituit din argilă.

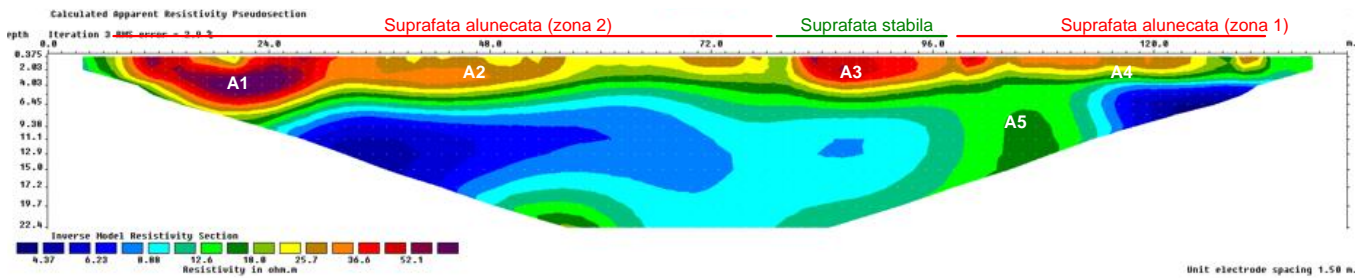


Fig. 5.50 Secțiunea de rezistivitate a profilului 1, cu indicarea anomaliilor de maxim

În cazul secțiunii electrice caracteristice profilului 2 (Fig. 5.51) se observă prezența unui pachet argilos continuu (evidențiat în foraj BH2 după adâncimea de 3m și în forajul F6) sub acesta găsindu-se probabil un strat de argilă prafoasă având rezistivitatea cuprinsă între 10-15Ω·m. Acest lucru a permis interpretarea stratului coeziv din baza forajului BH2 ca fiind extins până la adâncimea profilului electric, cel puțin 15m.

Umpluturile antropice (interceptate în forajul BH2) se disting prin valori mai ridicate de rezistivitate de peste 25Ω·m.

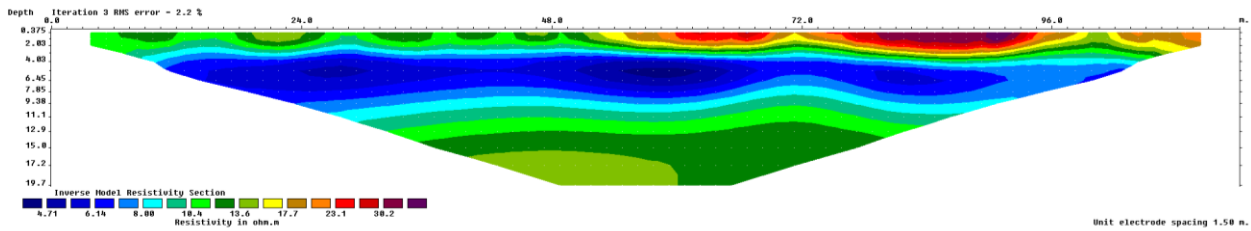


Fig. 5.51 Secțiunea de rezistivitate a profilului 2

Chiar și în urma integrării informațiilor rezultate din cele două profile electrice și 6 foraje de suprafață în secțiunea transversală compusă din cele două foraje geotehnice (BH1, BH2) tot nu s-a ajuns la posibilitatea realizării unei secțiuni transversale cu un grad ridicat de încredere. S-a stabilit

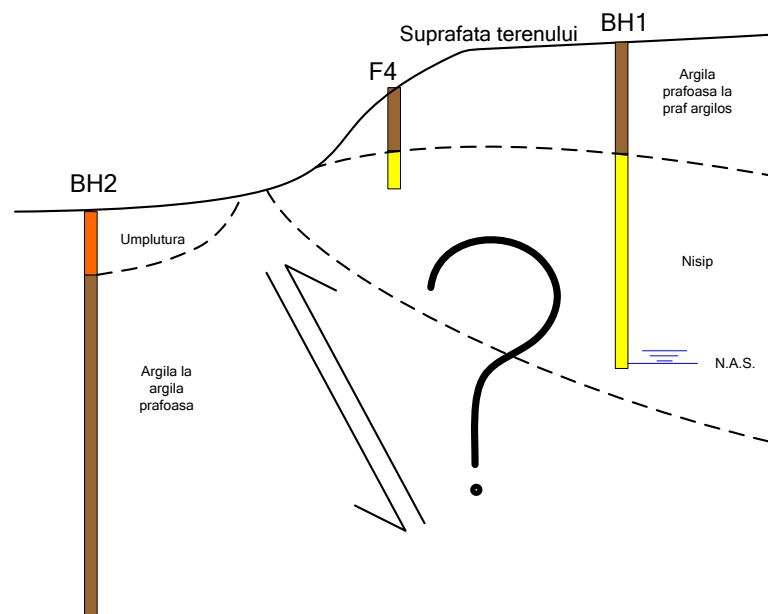


Fig. 5.52 Litologia interceptată în forajele BH1, F4 și BH2 (prelungită cu informația din profilul electric 2) suprapusă peste profilul topografic al terenului

Astfel, din cauza imposibilității obținerii unui profil litologic de încredere pe linia de cea mai mare pantă a amplasamentului (critic în orice analiză de stabilitate) s-a optat pentru realizarea unor profile electrice

paralele cu acesta, în locurile în care condițiile de amplasament au permis întinderea unei linii de măsură suficient de mari (Fig. 5.53).



Fig. 5.53: Pozițiile profilurilor 3 și 4

Profilurile 3 și 4 au fost realizate folosindu-se 46 de electrozi amplasați la distanța de 3m achiziția datelor efectuându-se în sistemul Wenner, rezultatele obținute fiind prezentate în continuare.

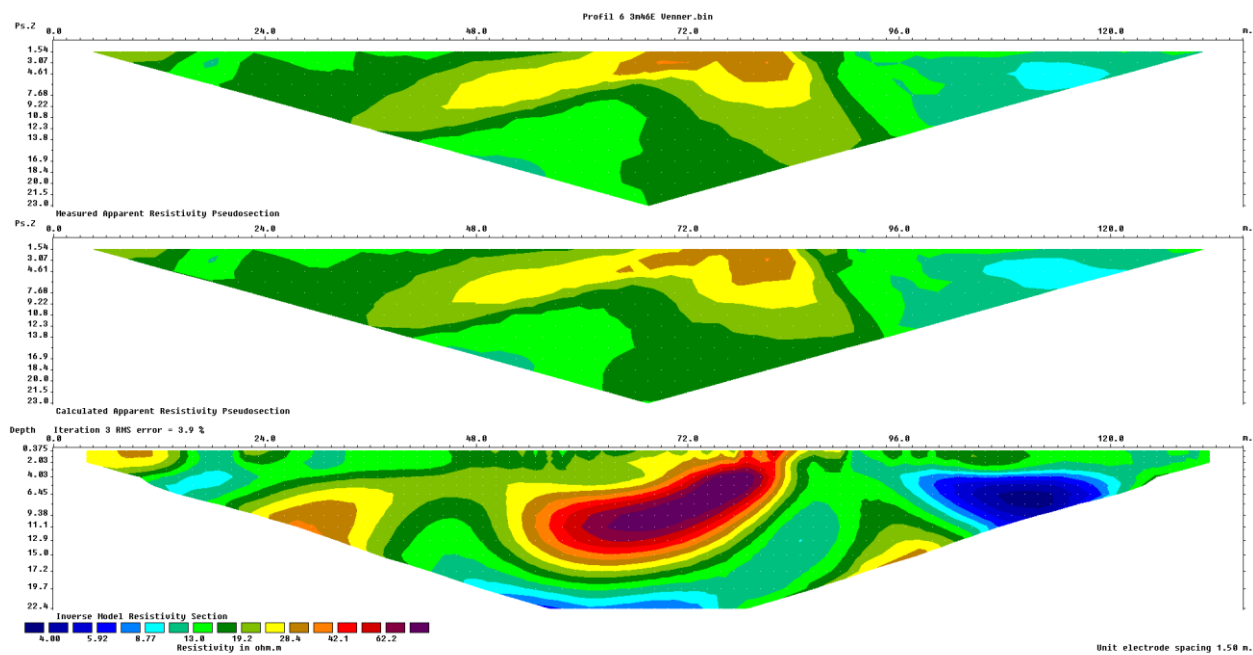
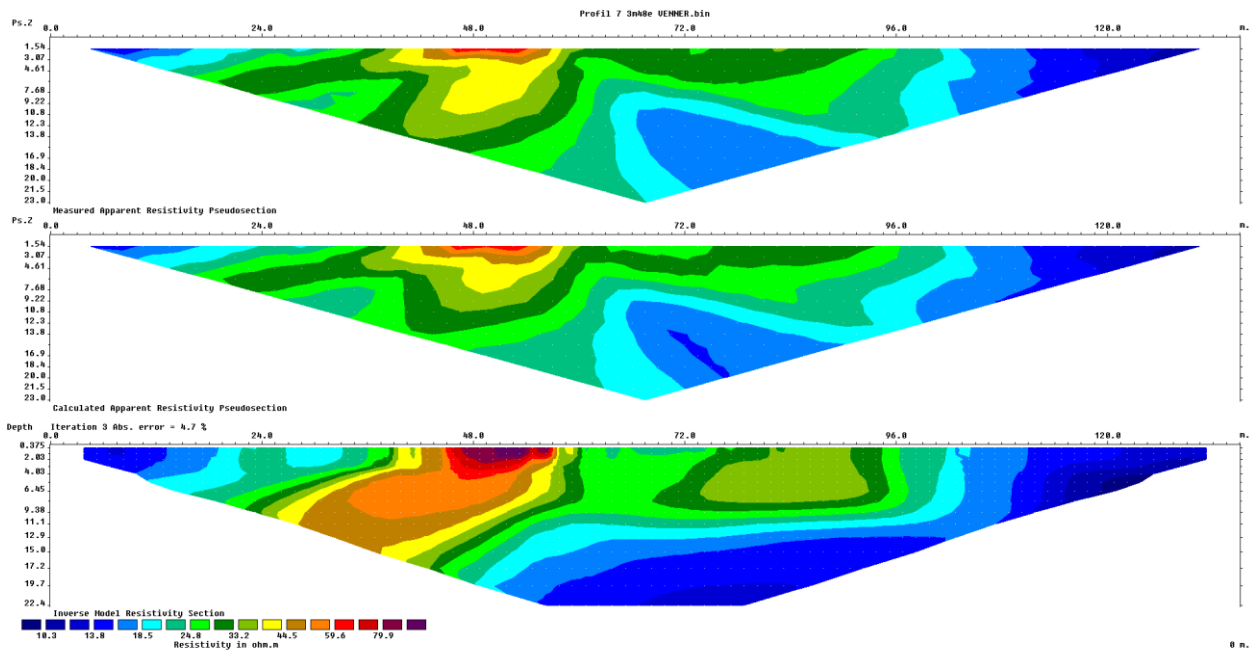


Fig. 5.54 Profilul 3 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos)



**Fig. 5.55** Profilul 4 - secțiune de rezistivitate aparentă măsurată (sus), secțiune de rezistivitate aparentă modelată (mijloc), secțiune de rezistivitate (jos)

Pe ambele secțiuni de rezistivitate (Fig. 5.54, Fig. 5.55) se observă prezența unei anomalii de maxim de peste  $60 \Omega\text{m}$  pe un fond geologic de aproximativ  $10\text{--}15 \Omega\text{m}$ , valoare fondului geologic fiind similară cu cea din profilul 2.

Pentru identificarea sursei anomaliilor s-au realizat câte două foraje de 3m pe fiecare profil, unul în zona anomaliilor și celălalt în exteriorul acesteia. În forajele amplasate în dreptul anomaliilor a fost evidențiat un nisip mediu gălbui (Fig. 5.56), similar ca granulozitate, culoare și textură cu cel interceptat în forajul BH1. În zonele caracterizate de rezistivități mici au fost evidențiate argile (Fig. 5.57) și argile prăfoase, cafenii la gălbui, similare cu cele interceptate în BH1 și BH2.



**Fig. 5.56** Nisip mediu gălbui evidențiat în zona anomaliilor de maxim



**Fig. 5.57** Argilă cafenie interceptată în zonele din exteriorul anomaliilor

În urma investigațiilor realizate și a observațiilor aflorimentelor din amplasament se poate concluziona că din punct de vedere litologic zona este alcătuită la parte superioară preponderent din argile și argile



prăfoase, nisipul mediu regăsindu-se doar în zone restrânse. Analizând poziția zonelor în care a fost interceptat materialul necoeziv și forma anomaliai din profilul 3 (în profilul 4 anomalia a fost interceptată la capătul profilului, forma acesteia fiind deformată în urma procesului de inversie) se poate afirma că cea mai probabilă interpretare a originii acestuia este că nisipul constituie o formațiune depozitată într-un canal fluvial (channel-fill).

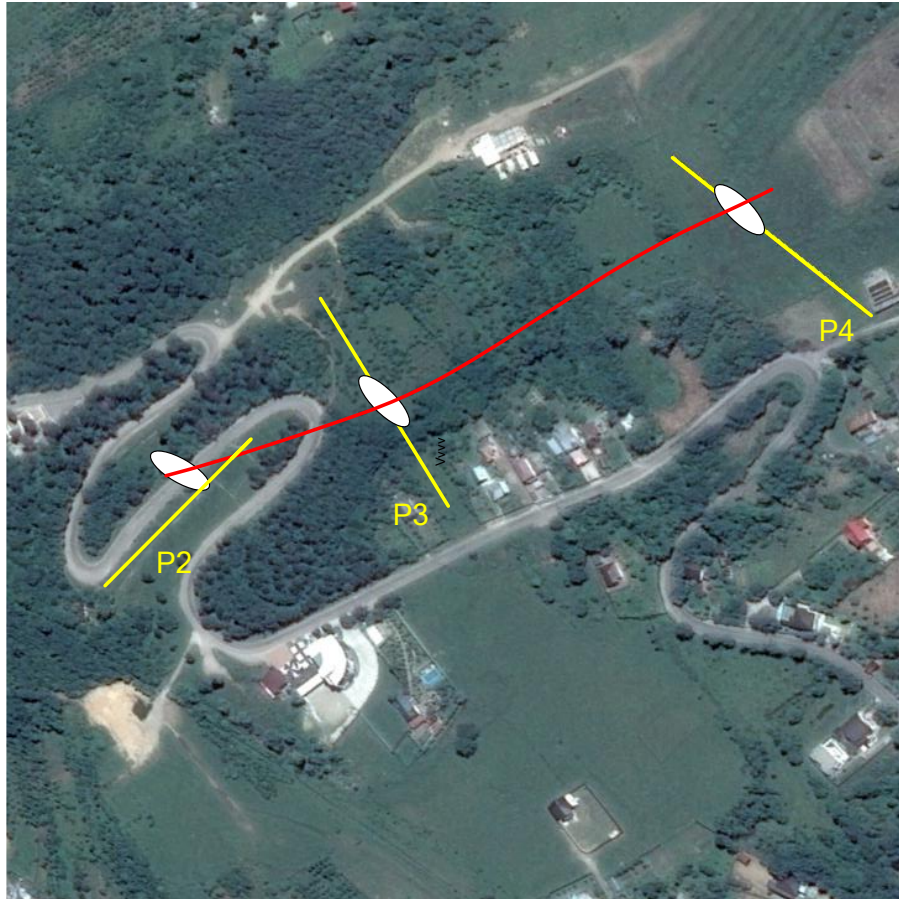


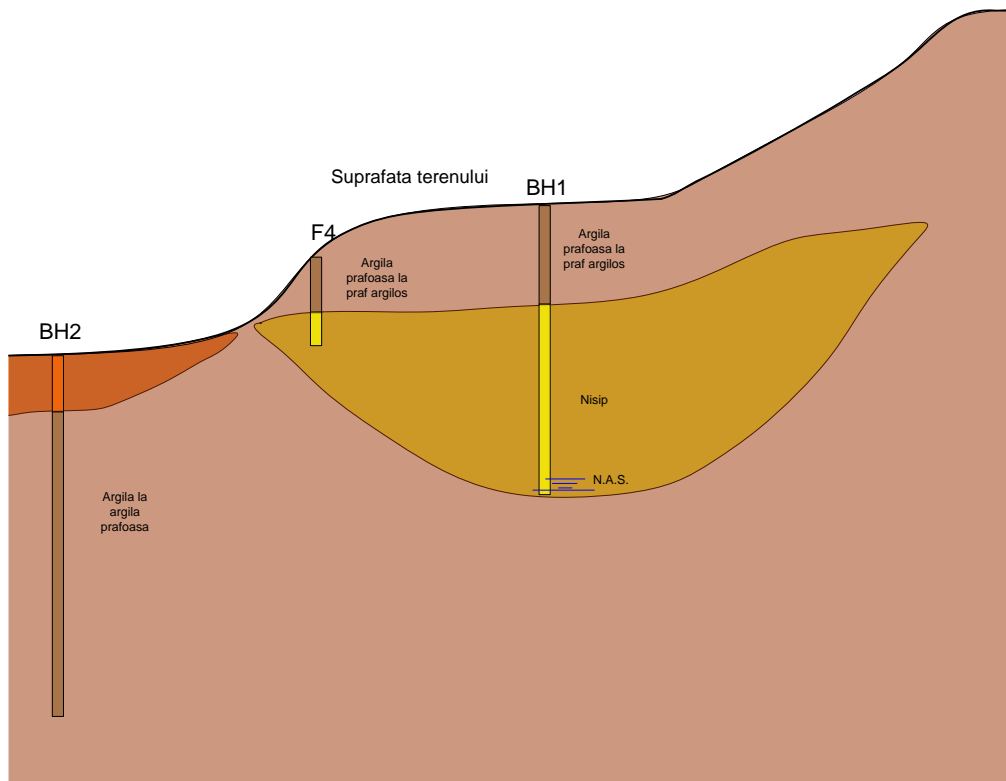
Fig. 5.58: Dispunerea zonelor în care au fost interceptate depozitele nisipoase

### 5.3.3 Discuții și interpretări

Prezentul studiu nu a avut ca scop identificarea cauzelor alunecării de teren sau discutarea acestora comparativ cu studiile geotehnice realizate anterior, ci evidențierea importanței folosirii metodelor geofizice pentru stabilirea unui model geologic corect, pe baza căruia să poată fi stabilite cauzele alunecărilor de teren.

Pe baza investigațiilor realizate în zonele accesibile a rezultat un model geologic redat în Fig. 5.59. Se observă faptul că discontinuitate prezumată inițial a fi o falie de-a lungul axului drumului din cauza decorelării forajelor de o parte și de alta a zonei carosabile, s-a dovedit a fi o albie veche de râu colmatată cu nisip. Acest lucru este dovedit atât de poziția anomaliilor de maxim cât și de forma acestora.

Se poate observa că în acest caz identificarea particularității reale a amplasamentului a putut fi realizată numai după un proces iterativ în care s-a început prin foraje, s-a continuat cu profiluri de tomografie electrică, după procesarea datelor, s-au prelevat probe din punctele anormale și în ultimă instanță, au fost făcute două noi profiluri de completare în afara amplasamentului.



**Fig. 5.59: Schița modelului geologic**

Un aspect important al acestei investigații îl reprezintă rolul esențial al măsurătorilor geofizice în interpretarea corectă a condițiilor de amplasament. Concluziile studiului geotehnic realizat inițial s-au bazat exclusiv pe investigații geotehnice clasice punctuale, care nu au permis cartarea corectă a structurii geologice. În cazul de față, identificarea corespunzătoare a stratului de material necoeziv a fost posibilă doar prin extinderea investigațiilor pe o suprafață mare, cu ajutorul măsurătorilor geofizice, care a depășit cu mult aria afectată de fenomenele de instabilitate. Astfel, s-a observat geometria stratului granular, aceasta fiind compatibilă cu a unui depozit aluvionar. Măsurătorile clasice nu pot acoperi o suprafață considerabilă, ca urmare a costurilor ridicate de realizare și a zonei restrânse de investigare.

## 5.4 Utilizarea metodelor geofizice și geotehnice pentru caracterizarea suprafețelor de alunecare – Studiu de caz privind platforma generatorului eolian WT09, com. Babadag, jud. Tulcea

### 5.4.1 Introducere

Prezentul studiu de caz are ca obiectiv identificarea prin utilizarea în paralel a metodelor geofizice și geotehnice de investigare a unui taluz antropoc, afectat de fenomene de instabilitate generală.

Deși pe baza investigațiilor geotehnice informațiile obținute oferă o imagine clară asupra parametrilor fizico-mecanici ai terenului prin intermediul forajelor, respectiv starea de consistență a straturilor întâlnite, considerând încercările de penetrare dinamică, datele au un caracter punctual. Determinarea sau estimarea extinderii spațiale a unui strat a cărui importanță este ridicată, precum cel ce reprezintă suprafața de cedare în cazul unei alunecări de teren, poate deveni dificilă, chiar și în cazul unor investigații geotehnice numeroase. Acestui aspect i se adaugă imposibilitatea de a realiza investigații în zone inaccesibile, precum pante abrupte sau cu vegetație foarte deasă.

Pentru a compensa lipsa de informație în aceste zone, pot fi utilizate metodele geofizice, bazate pe instrumentări flexibile și oferă date continue în lungime și adâncime sub forma unor profiluri. În acest sens, au fost considerate metodele geo-electrice (Tomografie Electrică de Rezistivitate), respectiv geo-seismice (MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves; Analiză pe multiple canale a undelor de suprafață; metoda refracției). Ceea ce este demn de menționat este caracterul calitativ pronunțat al acestor metode, necesitând corelarea cu informațiile obținute pe baza investigațiilor geotehnice clasice.

Lucrările de investigație geotehnică și geofizică din prezentul capitol au ca scop determinarea gradului de instabilitate a unui taluz al unei platforme aferente unui generator eolian, prin identificarea geometriei stratului ce formează suprafața de cedare.

### 5.4.2 Informații de arhivă și situația actuală

În cazul prezentului obiectiv, au fost obținute imagini de arhivă ce prezintă parțial situația la momentul execuției (Fig. 5.60), ce descriu modul execuției și stratificația pe secțiunea reprezentativă a taluzului.

Se poate observa că panta terenului natural este paralelă cu cea a stratului de calcar degradat și că stratul vegetal nu a fost decapat, iar corpul platformei a fost executat peste linia naturală a terenului, fără măsuri de conlucrare între masiv și umplutură.



Fig. 5.60: Execuția platformei din umplutură necontrolată peste stratul de pământ vegetal

În timp, prin intermediul unui fenomen de curgere lentă ce a pornit din zona de contact dintre pământul vegetal și stratul de umplutură, la baza taluzului, au rezultat mișcări ale corpului platformei ce au generat la suprafața acesteia fisuri și crăpături perpendiculare pe direcția de alunecare, paralelă cu direcția pantei naturale (Fig. 5.61 și Fig. 5.62).



Fig. 5.61: Vedere laterală a platformei (linia roșie - limita platformei; liniile albastre – crăpături la suprafață)



Fig. 5.62: Crăpături dezvoltate perpendicular direcției de alunecare

Apariția și dezvoltarea în timp a acestor crăpături a condus la favorizarea infiltrațiilor apelor meteorice în corpul umpluturii până în zona suprafeței de cedare, amplificând gradul de instabilitate prin reducerea parametrilor rezistenței la forfecare.

Un aspect important pe care adâncimea acestor crăpături îl reprezintă în cazul utilizării tomografiei electrice de rezistivitate constă în realizarea unei bariere electrice în timpul măsurătorilor, cauzată de discontinuitatea materialului, ceea ce conduce la determinarea clară a mărimii acestora. În cazul de față, acestea nu au prezentat adâncimi peste 50cm, fiind dezvoltate doar în zona superioară a platformei – o „crustă” uscată și sfărâmicioasă, alcătuită din piatră concasată în matrice prăfos-argiloasă, ceea ce a rezultat în imposibilitatea determinării adâncimii de propagare a crăpăturilor.

Deși inițial, conform proiectului, taluzul trebuia protejat cu geocelule, iar panta medie a acestuia redusă prin intermediul unor berme aflate la o echidistanță de 3.00m, în realitate acesta (taluzul) prezenta o singură pantă de aproximativ 60°, acoperită cu un strat geotextil.

### 5.4.3 Achiziția datelor și investigațiile de teren

Din punct de vedere geotehnic, au fost realizate două foraje de la cota platformei, având baza în stratul de calcar degradat, pe baza cărora au fost determinate atât litologia în amplasament, cât și parametri fizico-mecanici ai straturilor întâlnite, prin intermediul probelor prelevate. De asemenea, a fost realizat un număr de șase (6) Penetrări Dinamice Grele, cu scopul de a prezenta litologia în special în zona adiacentă crăpăturilor, precum și de a determina poziția, grosimea și extinderea în plan a suprafeței de cedare.

Din punct de vedere geofizic, au fost realizate trei (3) profiluri seismice și trei (3) profiluri electrice, situate la cota platformei, respectiv în zona piciorului taluzului acesteia (Fig. 5.63) ([1], [2]). Dezavantajul major pe care îl prezenta amplasamentul studiat consta în dezvoltarea redusă a acestuia în plan, ceea ce a condus la imposibilitatea atingerii unor adâncimi de investigare importante utilizând metodele geofizice.

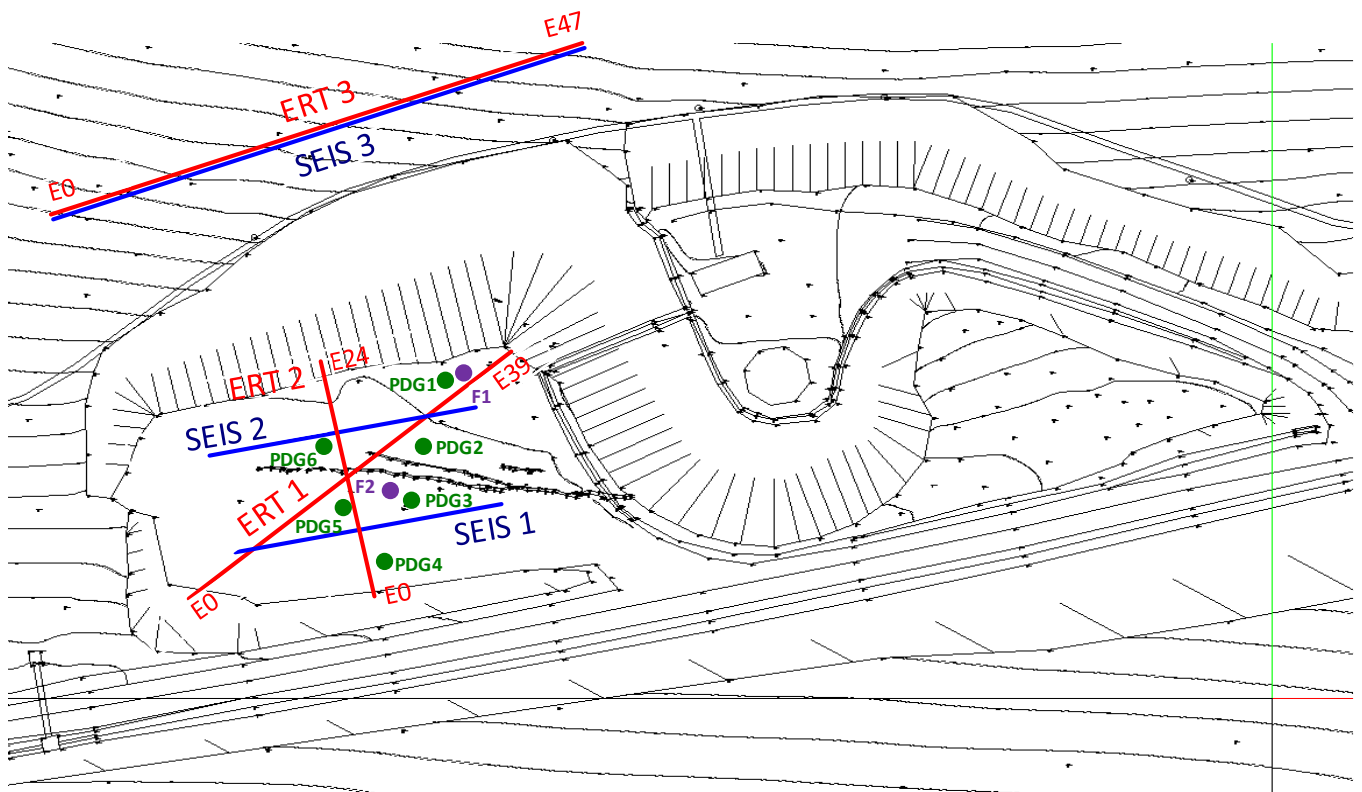


Fig. 5.63: Dispunerea în plan a investigațiilor realizate (F – Foraj geotehnic, PDG – Penetrare dinamică greă; SEIS – profil seismic; ERT – tomografie electrică de rezistivitate)

#### Măsurători geofizice prin metode electrice – tomografie electrică

Pentru a obține informații suplimentare în zona de suprafață (aproximativ primii 5m adâncime), au fost realizate trei (3) profiluri geo-electrice, ce au evidențiat zonele de umiditate ridicată și implicit rezistivitate scăzută, respectiv zona de afloriment a calcarului, determinată prin valori ridicate ale rezistivității.

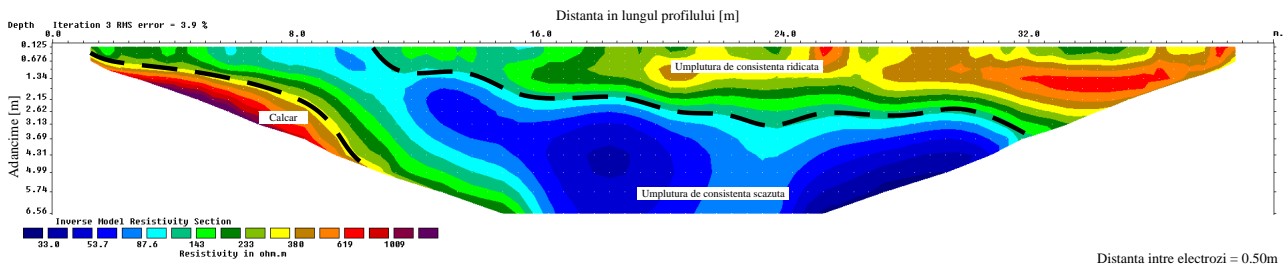


Fig. 5.64: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 1 (tomografie electrică)

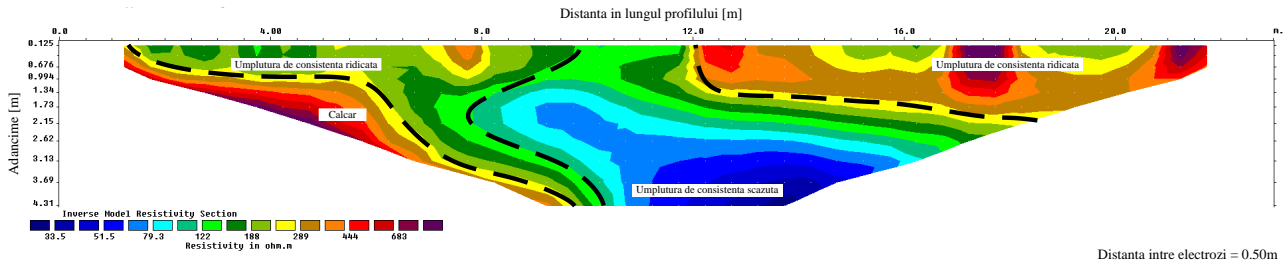


Fig. 5.65: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 2 (tomografie electrică)

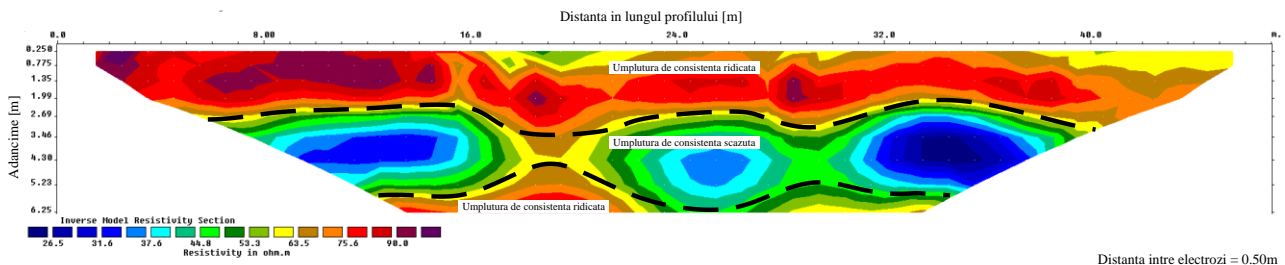


Fig. 5.66: Diagrama de variație a rezistivității în secțiunea profilului electric 3 (tomografie electrică)

Pentru a confirma și corela informațiile obținute, atât pe baza metodelor geotehnice, cât și geofizice, profilurile electrice au fost suprapuse cu rezultatele obținute pe baza penetrărilor dinamice (Fig. 5.67). Se poate observa o corelare foarte bună a stratificației identificate în fiecare caz, în special în zona centrală a profilului electric, unde adâncimea și gradul de încredere asupra informațiilor înregistrate ating valorile maxime.

Considerând suprapunerea celor două profiluri realizate la baza taluzului, se poate observa o zonă de consistență redusă în ambele cazuri (adâncime și grosime similare), caracterizată printr-o rezistivitate electrică de aproximativ  $35 \Omega \cdot m$  și o viteză a undelor secundare de aproximativ  $250m/s$ , pe care o putem asimila suprafeței de cedare ce iese la suprafață.

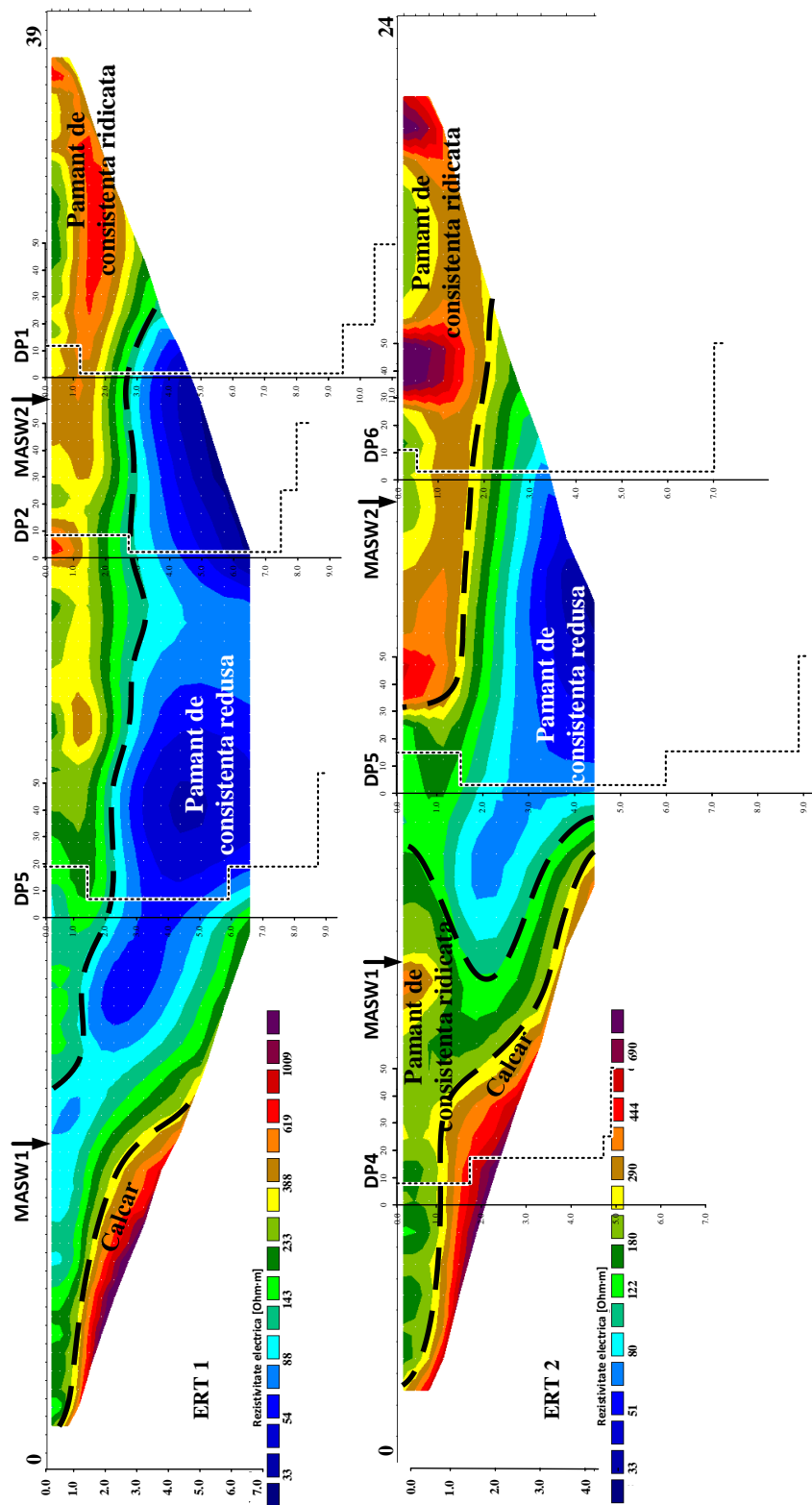


Fig. 5.67: Suprapunerea rezultatelor Penetrărilor Dinamice Grele (PDG 5, PDG2, PDG 1, respectiv PDG4, PDG5 și PDG6) și a profilurilor geo-electrice (ERT1 și ERT2) în zona platformei de lucru

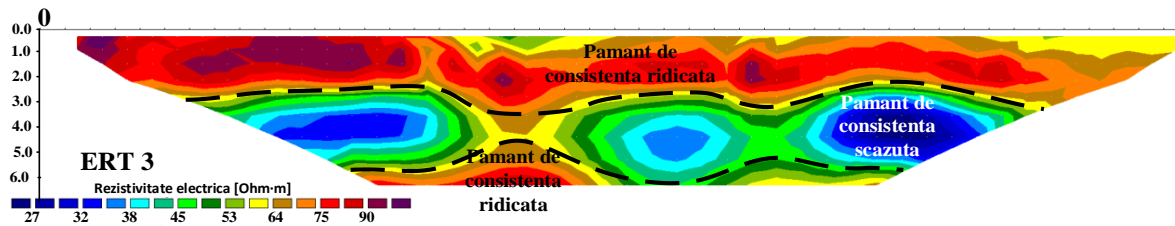


Fig. 5.68: Profilul geo-electric ERT 3, situat la piciorul taluzului

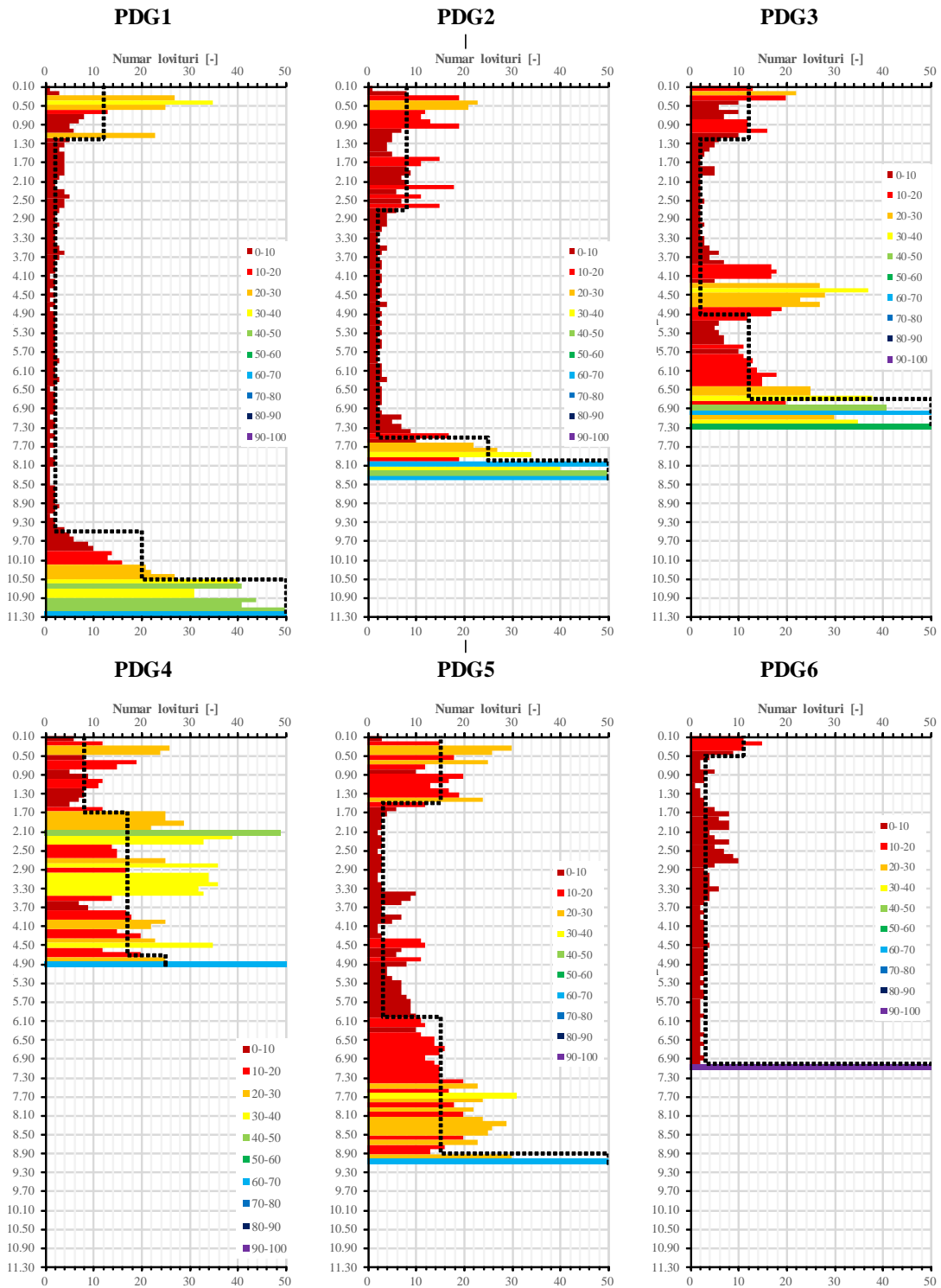


Fig. 5.69: Diagramele de variație a numărului de băți cu adâncimea pentru încercările de Penetrare Dinamică Grea



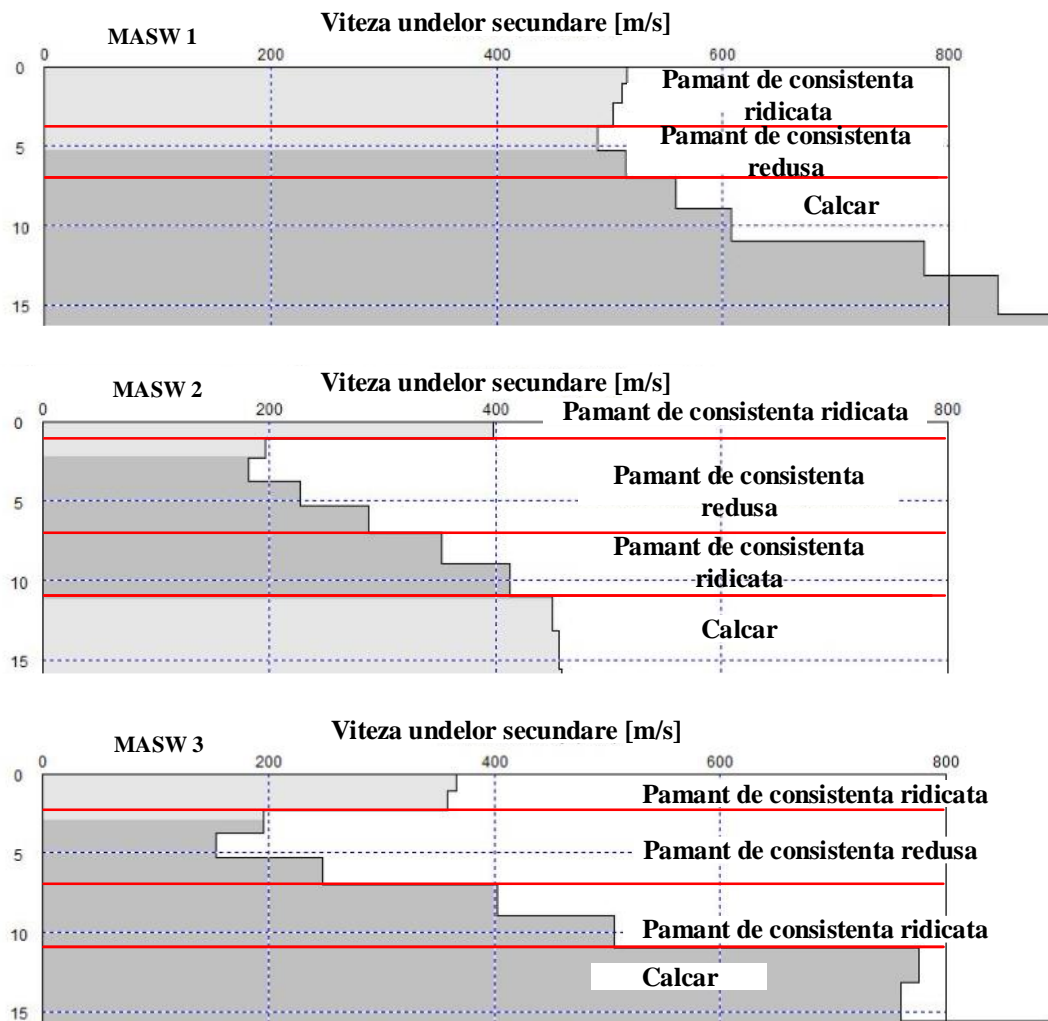


Fig. 5.70: Profilurile de variație în adâncime a vitezei undelor secundare

#### 5.4.4 Analiza numerică

Analizând informațiile punctuale (foraje geotehnice și penetrări dinamice), de profil (geofizice) și de suprafață (ridicare topografică) obținute în urma investigațiilor, precum și considerând datele de arhivă, a fost realizat un model tridimensional al amplasamentului (Fig. 5.71 și Fig. 5.72), caracterizat de existența a trei tipuri de straturi: I. umplutură/teren natural de consistență ridicată, II. umplutură de consistență scăzută și III. calcar.

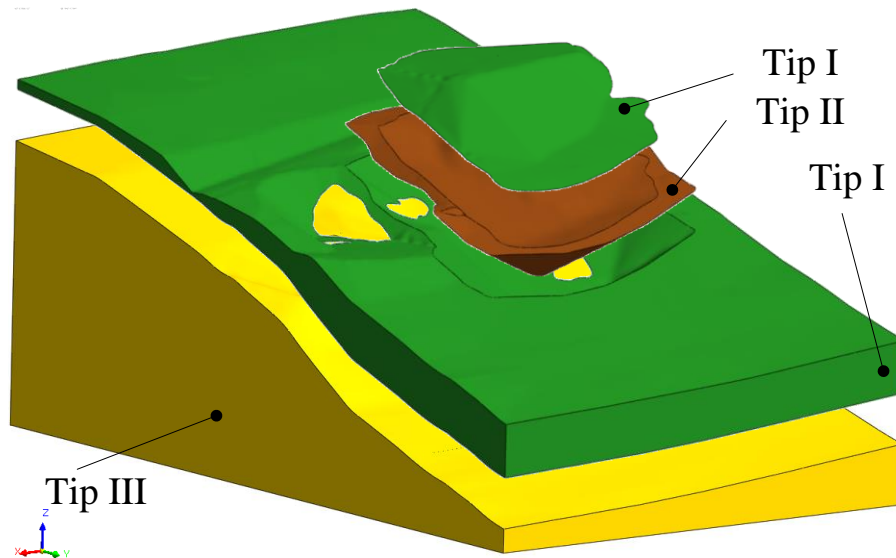


Fig. 5.71: Geometria stratificației modelului tridimensional

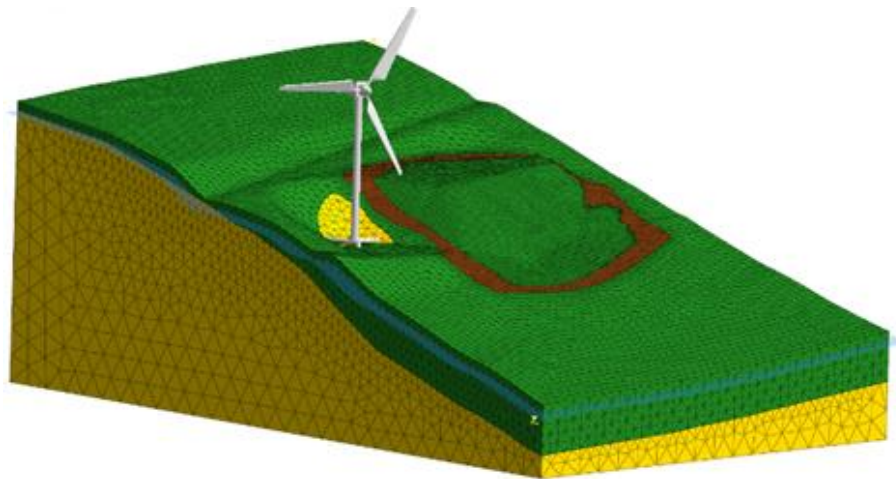


Fig. 5.72: Geometria modelului tridimensional realizat și discretizarea acestuia

Aceste straturi au fost caracterizate de următoarele valori ale parametrilor fizico-mecanici, prezentate în Tab. 5.1. În vederea caracterizării parametrilor rezistenței la forfecare a stratului alunecător (Tip II), au fost realizate încercări de forfecare rotațională (Bromhead).

Tab. 5.1: Valorile caracteristice ale parametrilor fizico-mecanici ai straturilor întâlnite

Strat	$\gamma$	$\gamma_{\text{sat}}$	E	$\nu$	$k_0$	c	$\phi$
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[-]	[-]	[kPa]	[°]
<b>Tip I</b>	18.0	20.0	12.5	0.35	0.54	30	24
<b>Tip II</b>	19.5	20.5	5.0	0.39	0.67	1	19
<b>Tip III</b>	23.0	23.0	200.0	0.25	0.33	-	-

În urma analizei numerice a modelului tridimensional utilizând Metoda Elementului Finit, în cadrul căreia au fost utilizate valorile caracteristice ale parametrilor geotehnici, a rezultat o corelare foarte bună din punct de vedere al tendințelor de deplasare (Fig. 5.73 - Fig. 5.76). Din punctul de vedere al valorilor absolute a deplasărilor estimate prin calcul, este posibil ca acestea să fie supra-estimate, însă o corelare cantitativă este greu de realizat, având în vedere că nu au fost executate lucrări de monitorizare.

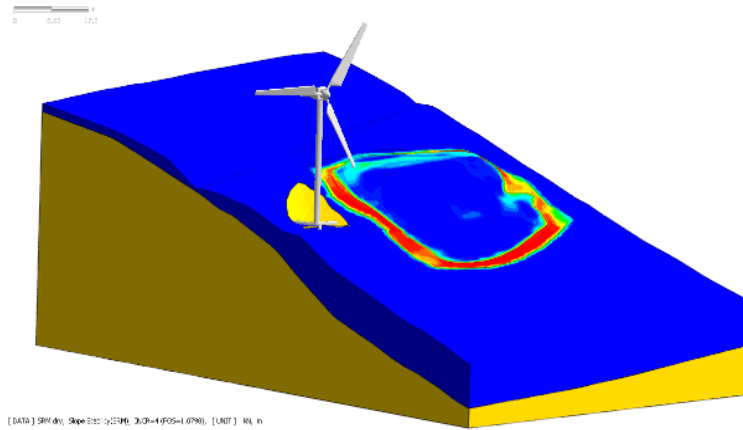


Fig. 5.73: Vedere izometrică a rezultatelor calculului (deformații specifice plastice – Roșu: 39.8%, Albastru: 0.0%)

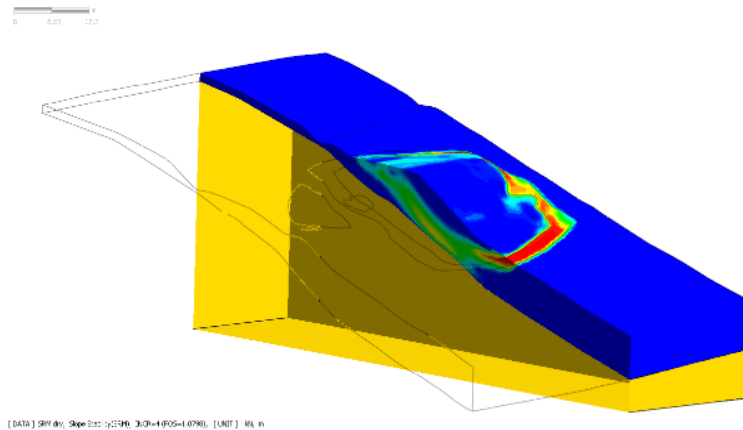


Fig. 5.74: Secțiune transversală prin model prezentând rezultatele calculului (deformații specifice plastice – Roșu: 39.8%, Albastru: 0.0%)

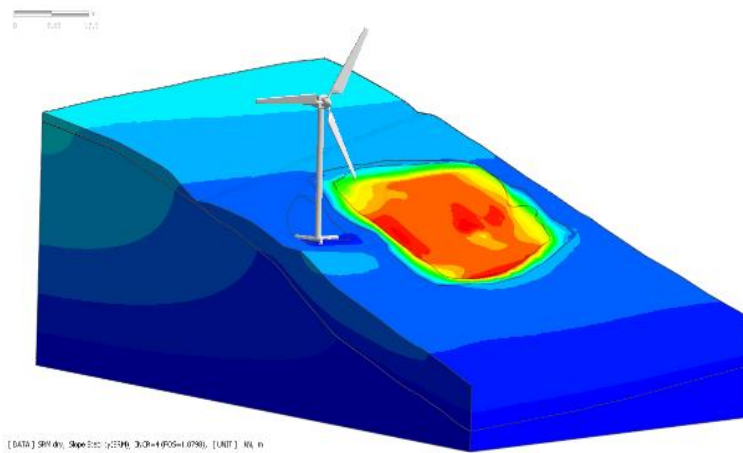


Fig. 5.75: Vedere izometrică a rezultatelor calculului (deformații totale – Roșu: 0.64m, Albastru: 0.00m)

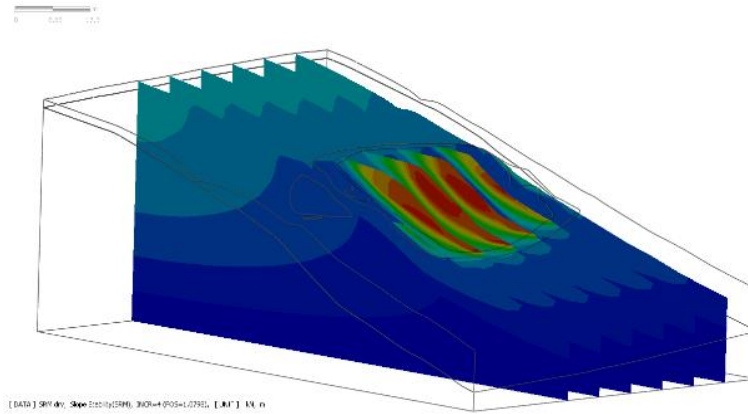


Fig. 5.76: Secțiuni transversale prin model prezentând rezultatele calculului (deformații totale – Roșu: 0.64m, Albastru: 0.00m)

### 5.4.5 Discuții

Una dintre cele mai importante dificultăți în cadrul ingineriei geotehnice este determinarea geometriei (extindere în plan și în adâncime) a suprafețelor de cedare. Pornind de la modele simple bidimensionale ce consideră suprafața de cedare de formă circular-cilindrică și terminând cu cele bazate pe modelare complexă (element finit) cu plastifiere progresivă, modul de evoluție în teren a fenomenului depinde de o serie de factori mai mult sau mai puțin ușor a fi determinați, precum discontinuitatea straturilor sau variațiile fizico-mecanice ale aceluiași material. În plus, în cazul unei analize tridimensionale, aspectele devin mai complexe, ținând cont că trebuie determinată și extinderea în plan a suprafeței de cedare.

Modul de determinare a acestor aspecte considerând metodele geotehnice (foraje și penetrări) clasice pot conduce la informații precise, însă punctuale, a căror densitate ridicată necesară obținerii unei variații spațiale implică costuri mari. În vederea compensării acestui dezavantaj, se pot utiliza metodele geofizice care acoperă distanțe și adâncimi de investigare semnificative, însă oferă informații calitative, necesar a fi corelate cu informațiile dobândite pe baza forajelor geotehnice.

Prezentul studiu de caz a oferit o imagine asupra modului în care cele două abordări: cea geotehnică și cea geofizică, pot fi utilizate, corelate și adaptate nevoilor inginerilor, în vederea obținerii unei viziuni de ansamblu asupra unei probleme clasice a ingineriei geotehnice.

Realizarea investigațiilor de seismică de refracție în lungul aceluiași profile pe care s-au realizat investigațiile de tipul MASW au dus la obținerea unor modele geofizice eronate prezentate în Fig. 5.77, Fig. 5.78 și Fig. 5.79. Aceste modele nu pot fi corelate cu informațiile obținute pe baza forajelor și încărcărilor de penetrare dinamică, acest lucru fiind asociat în primul rând existenței stratului de consistență redusă între cele două strate de consistență ridicată, situație în care metoda refracției nu poate fi folosită cu succes, după cum s-a arătat în capitolul 4.8.1

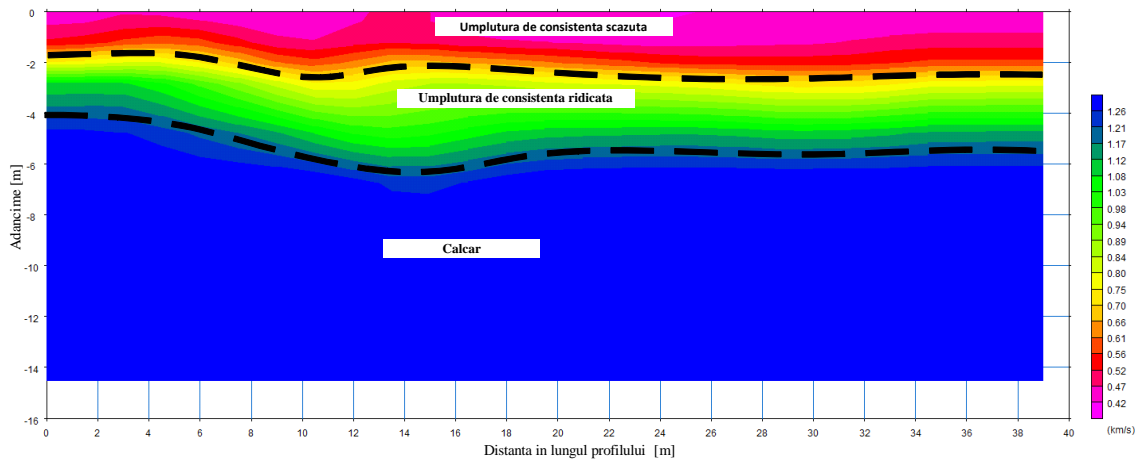


Fig. 5.77 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 1

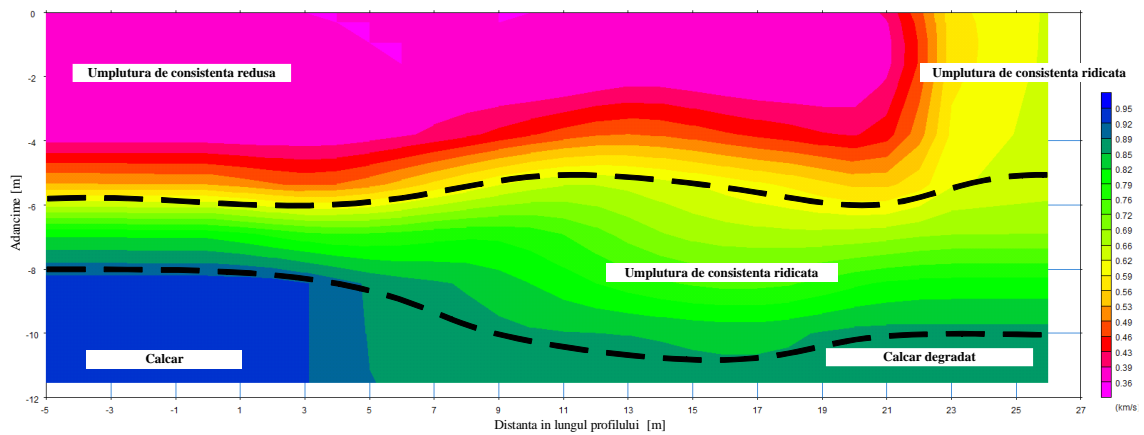


Fig. 5.78 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 2

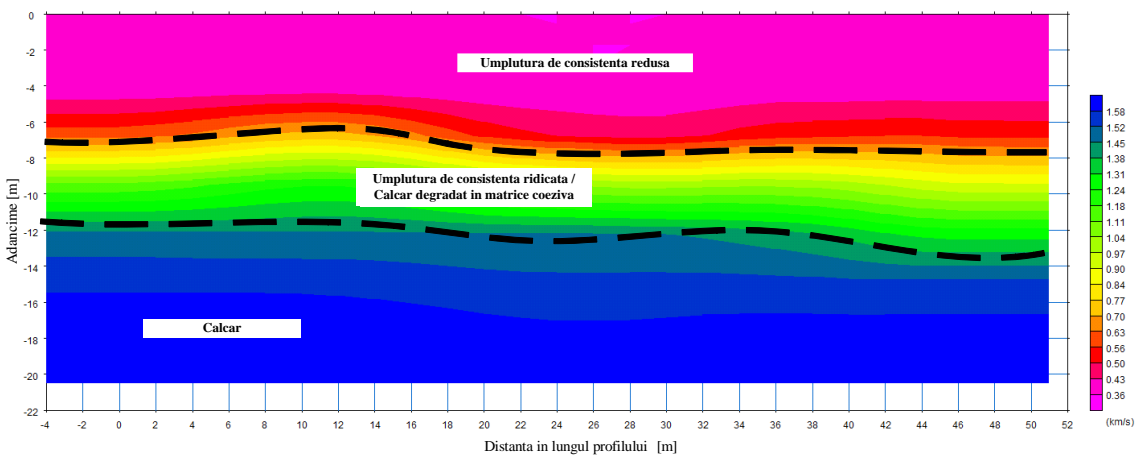


Fig. 5.79 Profil de refracție realizat în lungul profilului MASW 3

## 5.5 Investigarea adâncimii și continuității spațiale a acviferelor de suprafață - Studiu de caz privind secțiunea 2A Ogra-Câmpia Turzii a Autostrăzii Brașov-Târgu Mureș

### 5.5.1 Introducere

Scopul acestui studiu a avut ca scop investigarea condițiilor hidrogeologice de suprafață, în vederea proiectării alimentării cu apă a viitoarea parcuri de scurtă durată ce se află situată la km 3+600-21+500 al autostrăzii Brașov-Târgu Mureș-Cluj-Oradea, Secțiunea 2A: Ogra-Câmpia Turzii Lot 2, Iernut-Chetani.

Din punct de vedere geografic zona amplasamentului se află situată pe malul stânga al râului Mureș (Fig. 5.80), pe cea de a doua terasă a acestuia, și la sud de Municipiul Luduș (la o distanță de aproximativ 1 km față de extremitatea sudică).

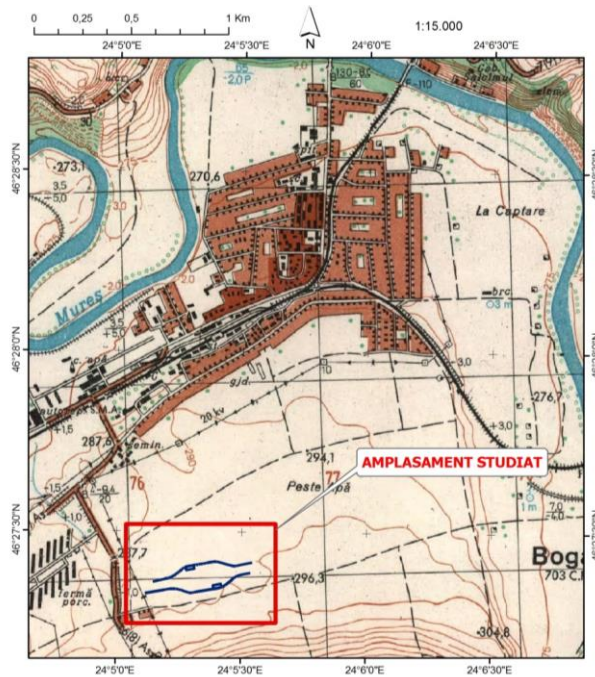


Fig. 5.80: Amplasamentul zonei studiate (fragment hartă topografică 1:25.000)

Amplasamentul este situat la o altitudine absolută (față de nivelul Mării Negre) de aproximativ 293m și la o altitudine relativă față de talvegul râului Mureș de aproximativ 20m.

Pentru analiza hidrogeologică preliminară au fost prelucrate informațiile bibliografice și informațiile și observațiile culese pe teren.

Principalele surse bibliografice utilizate au fost cele două lucrări de hidrogeologie a României: Pascu, M.R., (1983), Apele subterane din România și Constantinescu G. P., (1980), Captările de ape subterane din România, precum și harta geologică 1:200.000 a României.

În lucrarea lui Constantinescu G.P. (1980) este descrisă lucrarea de alimentare cu apă a Mun. Luduș și a fabricii de zahăr din aceeași localitate. Aceasta lucrare este constituită ca o prezentare negativă a unei lucrări hidrotehnice în care dimensionarea alimentării cu apă s-a realizat defectuos tocmai supradimensionării parametrilor hidrogeologici.

Alimentarea cu apă a fost executată în anii 1960 și s-a realizat printr-un dren paralel cu râul Mureș, pe prima terasă a acestui, cu o lungime de 700 m la o adâncime de pozare de aprox. 6 m. Studiul hidrogeologic și proiectul au prevăzut că drenul va debita 6-20 l/s, dar după execuție au fost obținut un debit de 4-5 l/s

(Constantinescu, 1980). Pentru acest studiu au fost realizate foraje până la 5-7 m adâncime ce au interceptat următoarea succesiune litologică:

- o 0,00 - 2,00 m: prafuri nisipoase;
- o 2,00 - 5,00 m : stratul acvifer al terasei constituit din prafuri argiloase, nisipuri argiloase și rareori nisipuri și pietrișuri în masa prafurilor;
- o 5,00 - 7,00 m: fundamentul regiunii de vârstă miocenă, reprezentat din marne impermeabile.

Pe baza acestor foraje a fost realizată o secțiune hidrogeologică și o hartă piezometrică (Fig. 5.81) cu distribuția hidroizohipselor. Harta realizată prezintă o neconcordanță evidentă, neconcordanță repetată și în profilul hidrogeologic (Fig. 5.82), acesta fiind nivelul topografic (fiind cu 10 m mai scăzut decât valorile curbelor de nivel din harta topografică). Această eroare a fost repetată și în lucrarea lui Pascu (1983). În analiza noastră valorile piezometrice au fost ridicate corespunzător cu 10 m, valori ce se corelează și cu informațiile din teren.

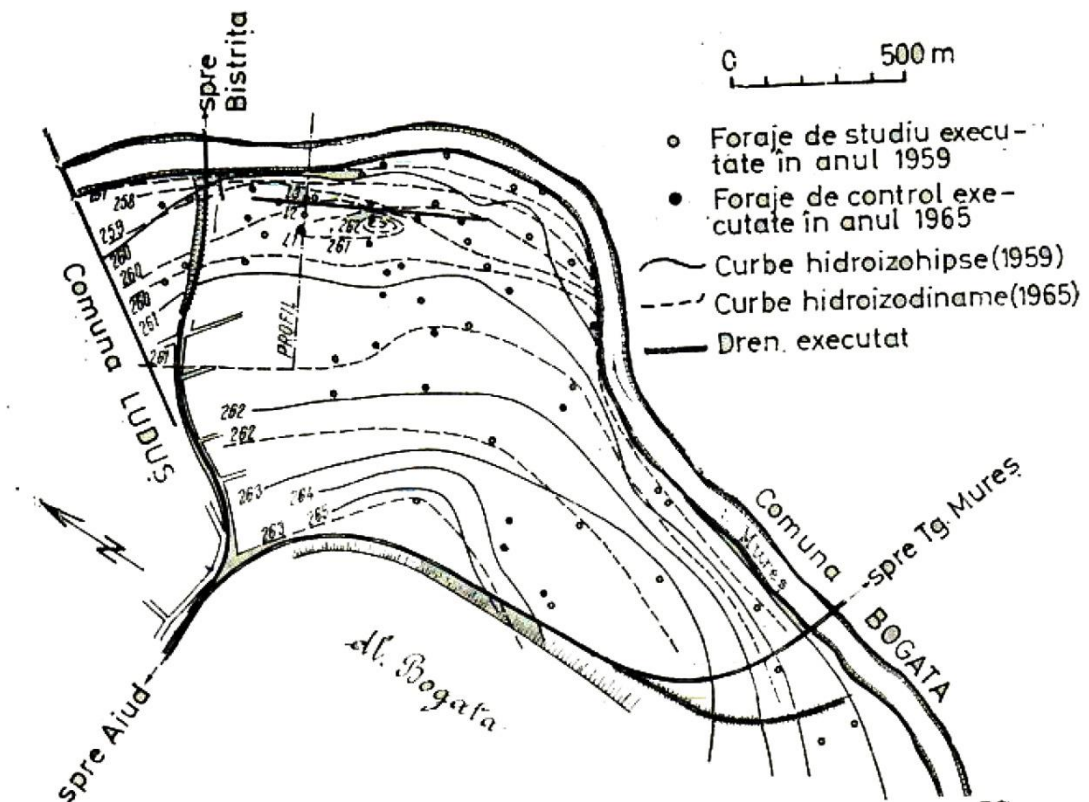


Fig. 5.81 Plan de situație a captării Luduș; curbe hidroizohipse (Constantinescu 1980)

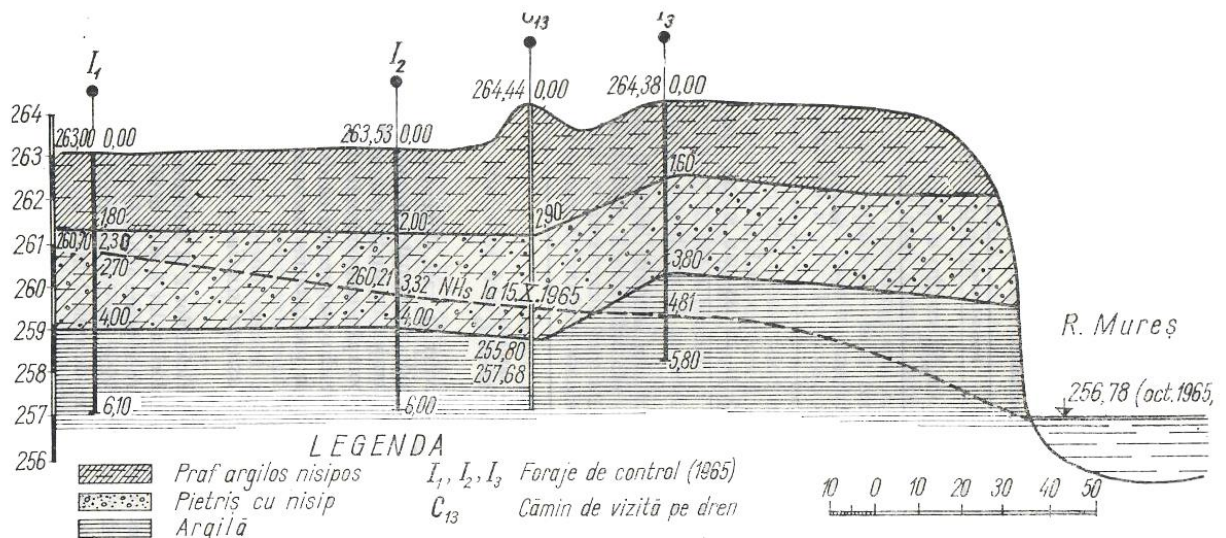


Fig. 5.82 Profil hidrogeologic prin terasa Mureșului (Constantinescu 1980)

În analiza hidrogeologică au fost utilizate alături și valorile hidroizohipselor din anul 1959 (anterior executării și exploatării drenului). Acest lucru se datorează faptului că în momentul de față alimentarea cu apă a Mun. Luduș se realizează (excepție fac unele alimentări prin fântâni individuale) din surse de suprafață (râul Mureș). Informațiile referitoare la alimentarea cu apă a Mun. Luduș au fost folosite pentru construcția hărții piezometrice a zonei (împreună cu datele culese din teren) și la nivel orientativ cu privire la succesiunea litologică (trebuie ținut cont că amplasamentul parcarii se află situat la o distanță de aprox 2 km de Mun. Luduș, și se află situat pe cea de a doua terasă a râului Mureș).

### 5.5.2 Achiziția și procesarea datelor

Investigațiile de teren au constat în măsurarea nivelului apei subterane în diferite foraje și fântâni din apropierea amplasamentului și realizarea unui profil de rezistivitate electrică cu lungimea de 235m și orientare N-S (perpendiculară pe direcția de curgere a apei) (Fig. 5.83). Datele au fost achiziționate cu un aparat de tomografie electrică IRIS Electric Pro, folosind-se sistemul de achiziție Schlumberger, distanța dintre electrozi fiind de 5m.

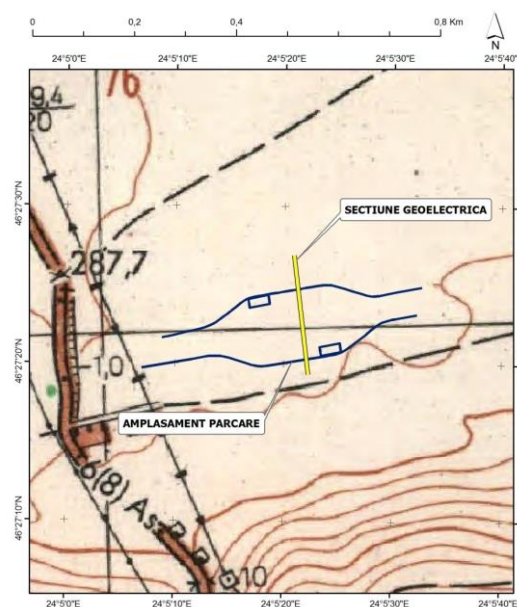


Fig. 5.83: Profilul profilului de tomografie electrică



Datele obținute au fost procesate cu ajutorul programului RES2DINV, obținându-se o bună corelare între profilul măsurat și cel obținut prin modelare directă.

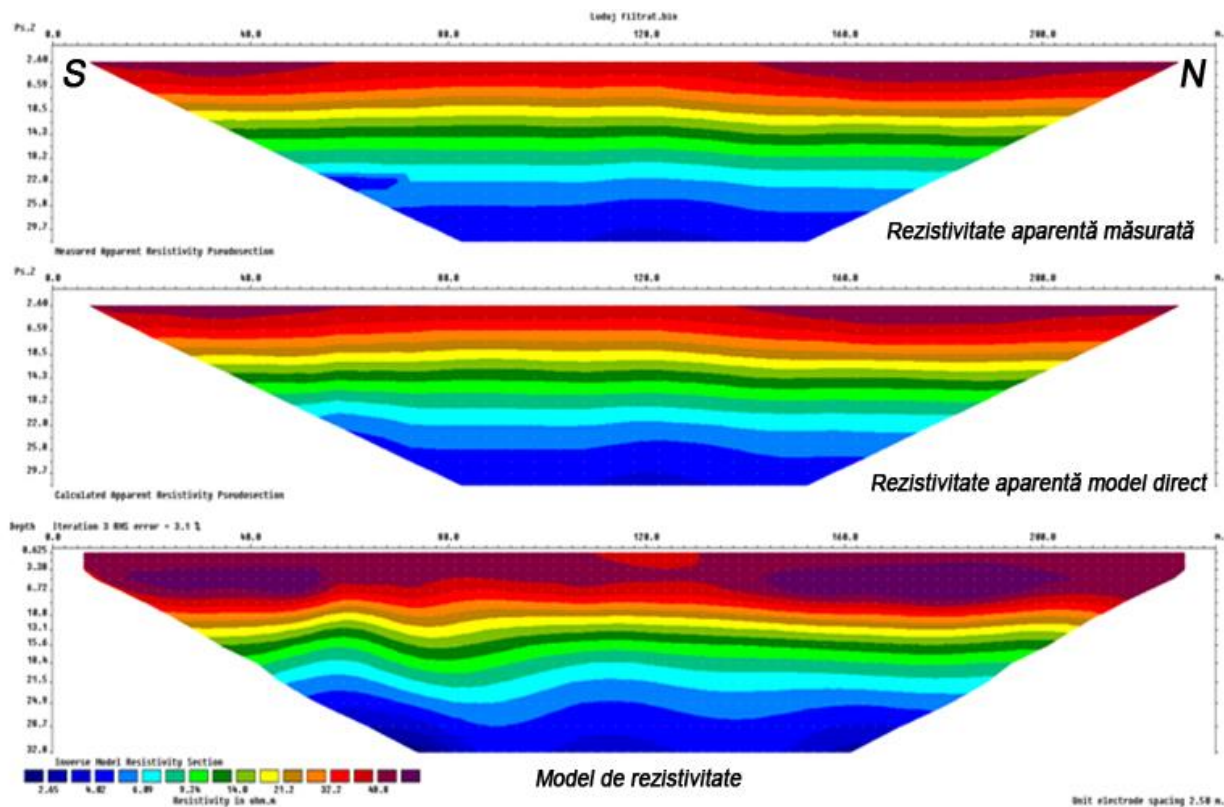


Fig. 5.84: Modele de rezistivitate obținut

Analizând secțiunea de rezistivitate din Fig. 5.84 se poate observa o distribuție orizontală a rezistivității electrice, valori acestea scăzând cu adâncimea, modelul geofizic obținut fiind conform cu modelul unui acvifer cu nivel liber, în care valorile ridicate ale rezistivității sunt atribuite zonei nesaturate, valorile mici culcușului acvifer format din argile, iar valorile medii stratului acvifer.

Cunoscându-se valoarea rezistivității apei subterane ( $\varphi_{ai}$ ),  $7 \Omega \cdot m$  (cantonată în acviferul freatic) din măsurători realizate pe probe de apă prelevate din fântânile din apropiere (300 m amonte față de amplasament) s-a încercat estimarea rezistivității stratului acvifer ( $\varphi_R$ ), folosind relația lui Archie (Archie, 1942) specifice pentru acvifere necoezive „curate” (fără conținut de fracție argiloasă).

$$F = a * P^{-m} \tag{5.1}$$

$$\varphi_R = F * \varphi_{ai} \tag{5.2}$$

unde:

- $\varphi_{ai}$  este valoarea rezistivității apei interstițiale;
- $\varphi_R$  este valoare rezistivității stratului acvifer (apa + matrice minerală)
- F este factorul de formațiune;
- a este factorul litologic;
- m este factorul de cimentare;

Pentru determinarea factorului de formațiune s-au folosit 4 seturi de parametrii Archie sugerați în literatura de specialitate specifică geofizicii de sondă și trei valori ale porozității (30%, 35%, 40%) caracteristice pentru pământuri necoezive uniforme.

Tab. 5.2: Parametrii Archie pentru estimarea factorului de formațiune

Tipologii litologice	Model empiric	a	m	0.4	0.35	0.3
		Factor de formațiune				
nisipuri/gresii slab cimentate	Winsauer, 1952	0.62	2.15	4.45	5.92	8.25
nisipuri/gresii argiloase	Carothers, 1968	1.65	1.33	5.58	6.67	8.18
nisipuri/gresii calcaroase	Carothers, 1968	1.45	1.54	5.95	7.30	9.26
nisipuri/gresii	Timur, 1972	1.13	1.73	5.51	6.95	9.07

Folosirea îngrășămintelor chimice în zona investigată poate duce (prin infiltrație) la o creștere a mineralizației apei subterane și la o scădere a rezistivității electrice a acesteia. Acest factor a fost luat în considerare prin folosirea a trei valori posibile ale rezistivității apei subterane:  $7\Omega\cdot m$ ,  $6\Omega\cdot m$  și  $5\Omega\cdot m$ .

Tab. 5.3: Valori de rezistivitate calculate

Valori rezistivitate formațiune	Valori rezistivitate apă interstițială								
	$7\Omega\cdot m$			$6\Omega\cdot m$			$5\Omega\cdot m$		
	0.40	0.35	0.30	0.40	0.35	0.30	0.40	0.35	0.30
	31.12	41.47	57.77	26.68	35.55	49.51	22.23	29.62	41.26
	39.07	46.66	57.28	33.49	40.00	49.10	27.91	33.33	40.92
	41.62	51.12	64.82	35.67	43.82	55.56	29.73	36.52	46.30
	38.60	48.63	63.50	33.09	41.69	54.43	27.57	34.74	45.36

Fig. 5.85: Histograma distribuției valorilor de rezistivitate

Valorile au fost procesate statistic, cea mai probabilă valoare a rezistivității acviferului fiind de  $41\Omega\cdot m$ .

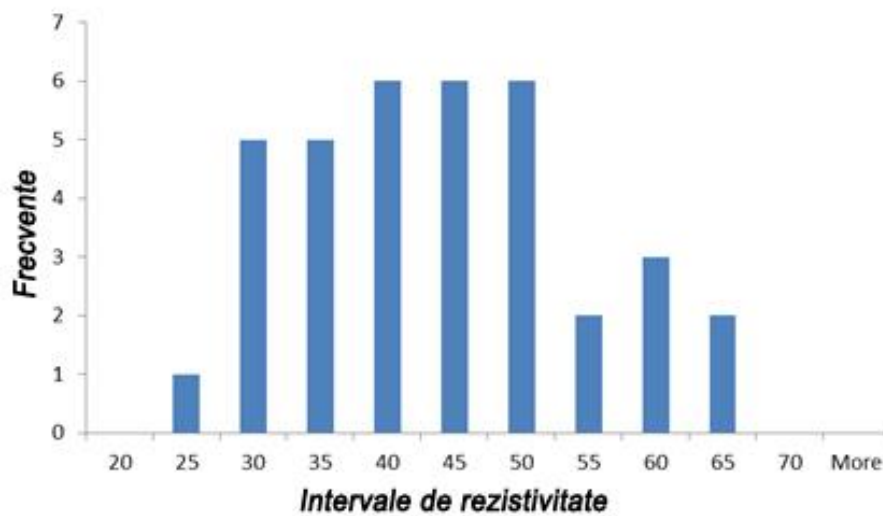
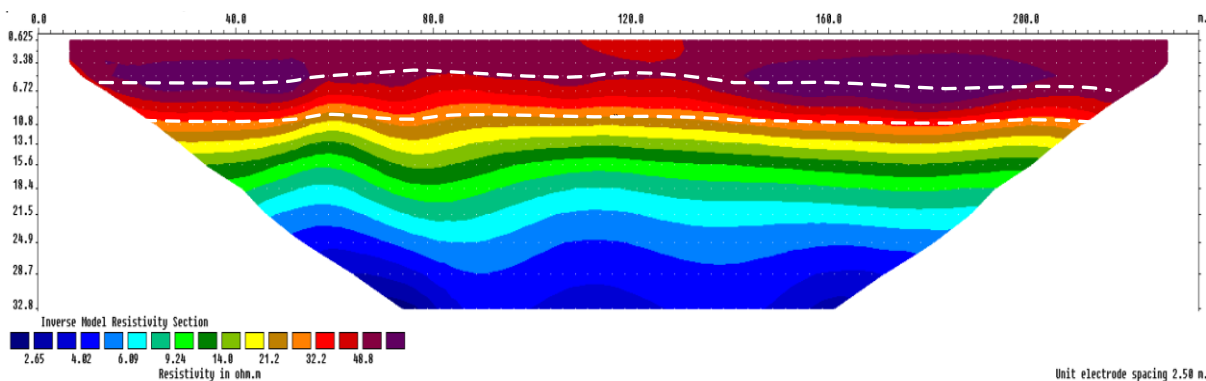


Fig. 5.85: Histograma distribuției valorilor de rezistivitate



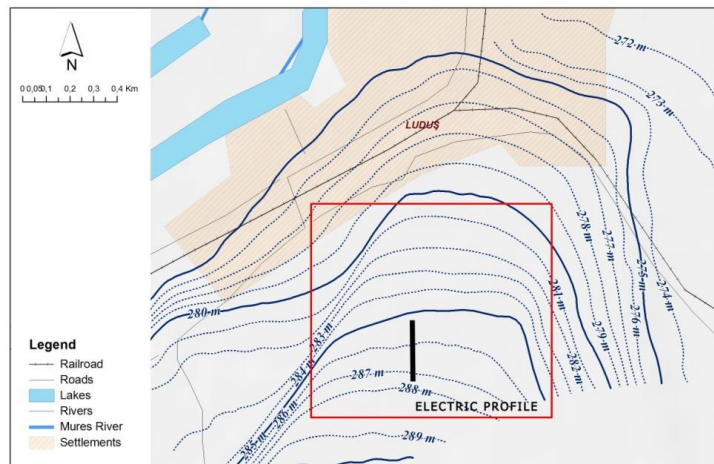
**Fig. 5.86: Model de distribuție a rezistivității electrice cu indicarea poziției probabile a stratului acvifer prin linii albe punctate**

În urma studiului parametric anterior se poate concluziona că zona acviferă are cea mai mare probabilitate de a fi reprezentată pe secțiunea de rezistivitate electrică în jurul valorii de  $41 \Omega \cdot m$ , zona cuprinsă între 6 m și 11 m (cuprinsă între liniile albe discontinue). Valorile mai mari de rezistivitate aflate deasupra stratului potențial acvifer sunt atribuite zonei vadoase, iar valorile mai mici, aflate sub acesta sunt asociate cu existența unui strat de argilă.

În urma determinării nivelului piezometric în 7 fântâni și un foraj de monitorizare, din apropierea amplasamentului și pe baza hărții prezentate în Fig. 5.81, s-a realizat o hartă reactualizată a variației nivelului piezometric (Fig. 5.88)



**Fig. 5.87 Măsurarea nivelului piezometric**



**Fig. 5.88 Hartă reactualizată a variației nivelului piezometric cu indicarea poziției profilului electric realizat**

Din Fig. 5.88 se observă că media nivelului piezometric din zona profilului măsurat este de 287m, această valoare fiind obținută și din interpretarea secțiunii de rezistivitate, acviferul fiind estimat ca începând de la adâncimea de 6m față de cota de 293m specifică suprafeței terenului.

Corelația dintre valorile nivelului piezometric măsurat prin cele două metode (directă și indirectă) au confirmat modelul geofizic, iar observarea unei bune continuități a valorii specifice acviferului pe secțiune de rezistivitate au indicat o continuitate a acestuia în lungul profilului măsurat. Astfel, condițiile din amplasament au fost considerate ca fiind favorabile pentru realizarea unui foraj de alimentare cu apă care să capteze acviferul cu nivel liber investigat.

Rezultatele au fost confirmate de forajul executat în amplasament (Fig. 5.89), stratul acvifer fiind prezent deasupra zonei marnoase, între cotele 6.00 și 8.00m (Fig. 5.89). În urma testelor de pompaj debitului optim rezultat a fost de 0.6l/s, valoare suficientă pentru asigurarea necesarului de apă nepotabilă al parcării și a umplerii în mai puțin de 24 de ore a rezervorului folosit pentru stingerea posibilelor incendii.

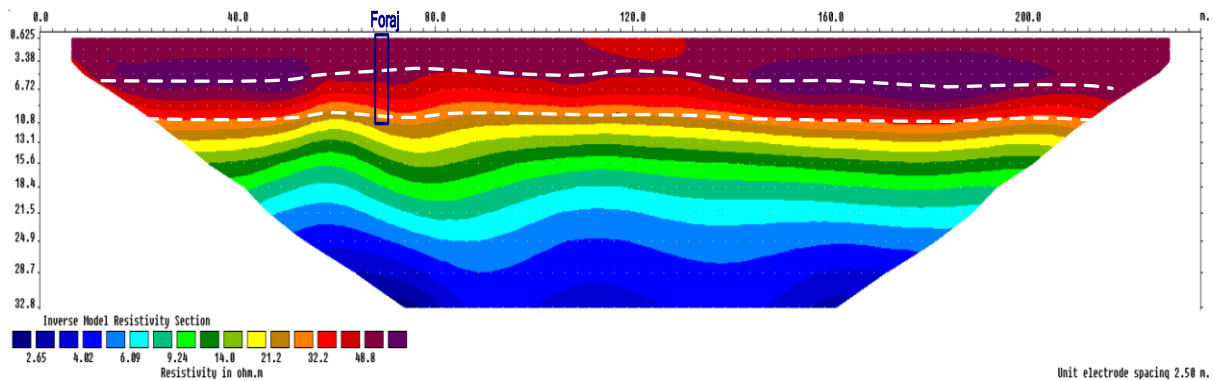


Fig. 5.89 Poziția forajului realizat suprapus peste secțiunea de rezistivitate

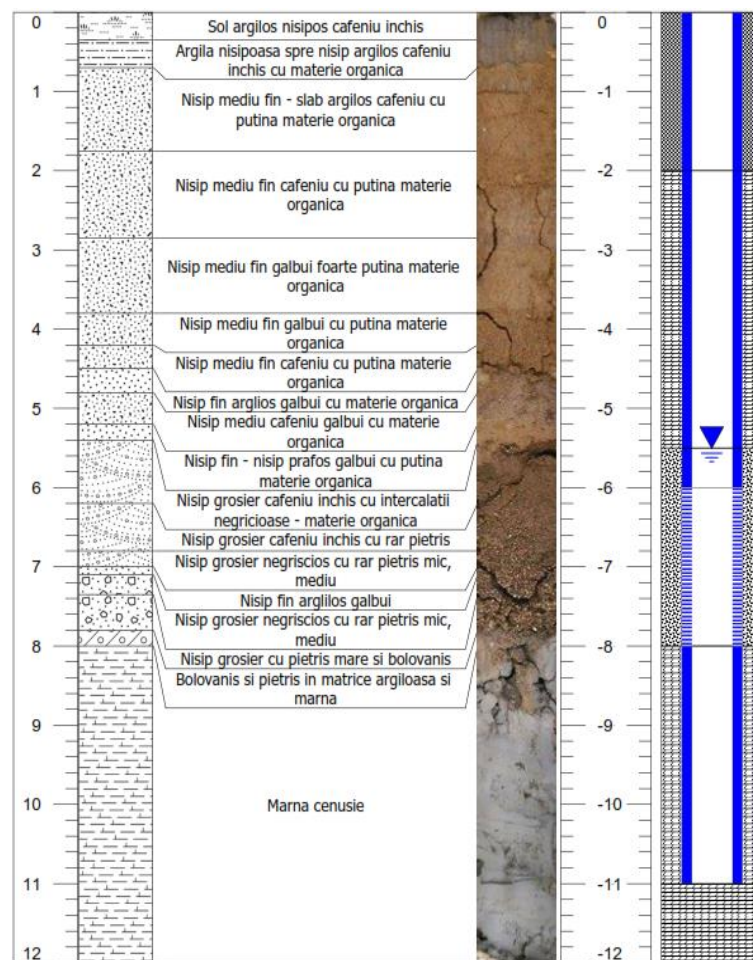


Fig. 5.90 Litologia amplasamentul observată în foraj

### 5.5.3 *Discuții*

După cum a fost indicat prin studiul de caz al Municipiului Luduș, prezentat în cele două lucrări de referință în domeniul alimentărilor cu apă din România, determinarea distribuției spațiale a stratelor acvifere este imposibil de realizat în cazul folosirii exclusive a informațiilor punctuale din foraje.

Prin intermediul investigațiilor de tomografie electrică se obțin secțiuni de variație a rezistivității care printr-o procesare și interpretare corectă a datelor pot duce la determinarea poziției și geometriei stratelor acvifere de suprafață, chiar și în cazul acviferelor de grosime redusă.

Buna corelare a informațiilor rezultate în urma măsurărilor electrice cu cele obținute din foraje duc la confirmarea modelului geofizic și la creșterea gradului de încredere în acest tip de informații indirecte.

## 5.6 Investigații geofizice utilizate în determinarea parametrilor mecanici ai terenului de fundare – Studiu de caz privind zona Universitate, București

### 5.6.1 Introducere

Spre deosebire de viteza undelor primare care în cazul pământurilor este dependentă în principal de gradul de saturație, viteza undelor secundare (de forfecare) este un indicator direct al indicilor de consistență și îndesare și a proprietăților mecanice ale pământurilor, acest parametru fiind agreat și de Eurocod 8-1.1 pentru caracterizarea diferitelor tipuri de amplasamente în funcție de viteza medie a undelor de forfecare pe primii 30m ( $V_{S30}$ ).

Clasă de teren	Descriere a profilului stratigrafic	Parametri		
		$V_{s,30}(m/s)$	$N_{SPT}$ (lovituri/30cm)	$c_u(kPa)$
A	Stâncă sau altă formațiune geologică de acest tip, incluzând cel mult 5 m de material slab la suprafață.	>800	—	—
B	Depozite de nisip foarte dens, pietriș sau argilă foarte rigidă, de cel puțin câteva zeci de metri în grosime, caracterizate de o creșterea progresivă a proprietăților mecanice cu adâncimea.	360 - 800	>50	>250
C	Depozite adânci de nisip de densitate mare sau medie, de pietriș sau de argilă rigidă cu grosimea de la câteva zeci până la mai multe sute de metri.	180 - 360	15 - 20	70 - 250
D	Depozite de teren necoeziv de densitate mică până la mijlocie (cu sau fără unele straturi moi coezive) sau de teren predominant coeziv, de la moale la tare	<180	<15	<70

Fig. 5.91 Clasificarea amplasamentelor în funcție de  $V_{S30}$  conform Eurocod 8-1.1

Metoda MASW și-a dovedit în ultimii 20 ani capacitatea de a estima  $V_{S30}$ : (Park & Miller, 1999), (Kanli & Peter, 2006), (Park C. , 2016), fiind la ora actuală printre cele mai folosite metode pentru identificarea acestui parametru foarte important (și obligatoriu în cazul construcțiilor din Categoria Geotehnică 3) în special în cazul amplasamentelor situate în zone seismice.

Chiar dacă nu avem informații litologice pe amplasamentul pe care se realizează testul MASW și nu putem obține o distribuție exactă a vitezelor pe verticală, acest lucru are o influență neglijabilă când este vorba de calculul vitezei medii și astfel la clasificarea amplasamentului.

Cunoașterea chiar și estimativă a  $V_{S30}$  este un avantaj în planificarea lucrărilor de teren (tipul de teste in-situ, tipul utilajului de foraj, durata lucrărilor, etc.) în estimare tipului de încercări de laborator ce urmează a fi efectuate, cât și mai ales în estimarea întregului cost al lucrărilor. În Fig. 5.92 este prezentat profilul vertical de distribuție al vitezei undelor de forfecare pentru un teren stâncos ce este caracterizat prin viteze de propagare de peste 800m/s, acest tip de amplasament necesitând tehnici de specifice de forare, prelevare și încercare a probelor, tehnici caracteristice rocilor tari (stâncoase). Fig. 5.93 prezintă variația pe verticală a vitezei undelor secundare pentru un amplasament de tip C ( $180\text{m/s} < V_{S30} < 36\text{m/s}$ ), caracterizat de viteze de propagare reduse ( $V_{S30} = 190\text{m/s}$ ), pentru caracterizarea acestuia fiind necesare tehnologii și metode specifice investigării rocilor moi (pământurilor). Astfel, pot fi obținute economii semnificative prin planificarea adecvată a lucrărilor, pe baza unei investigații preliminare pentru determinarea vitezei undelor secundare.

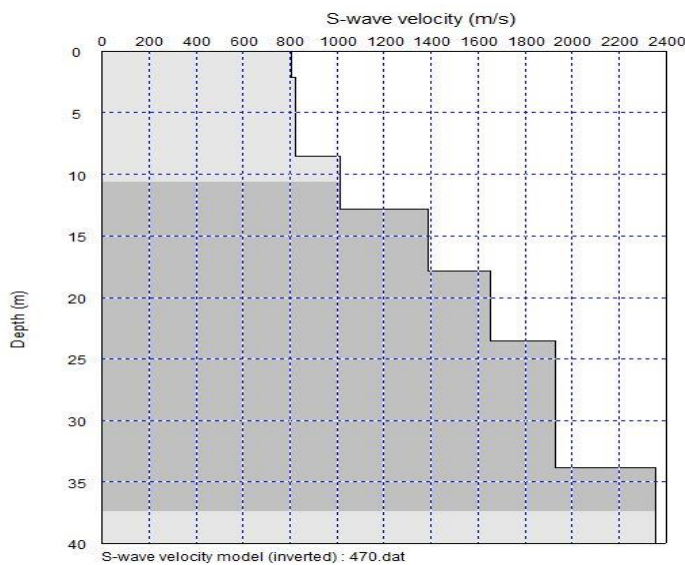


Fig. 5.92 Amplasament tip A ( $V_{S30}=1200\text{m/s}$ )

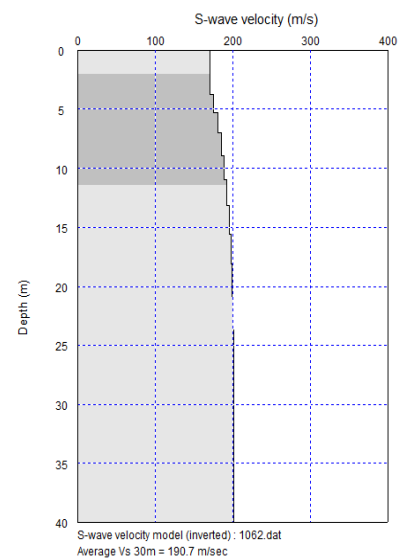


Fig. 5.93 Amplasament tip C ( $V_{S30}=190\text{m/s}$ )

Metoda MASW poate fi efectuată pe orice tip de suprafață (teren natural, umpluturi, pavele, platforme betonate, etc), rezultatele nefiind influențate de condiția suprafeței terenului.

Folosind ca semnal util unda de suprafață care conține aproximativ 70% din energia generată în sursă (ciocan și placă) metoda se bucură de un raport semnal-zgomot foarte bun, putând fi utilizată cu succes și în zonele urbane.

### 5.6.2 Studiu comparativ MASW-SCPTu

Prezentul studiu este o comparație între profilurile seismice verticale obținute prin măsurare directă (SCPTu) și prin metoda indirectă MASW. Încercările au fost realizate pe același amplasament (zona Universitate) la o distanță de 15m între ele, în două zile consecutive.

Încercările SCPTu au fost realizate folosind un con instrumentat cu diametrul de 35.7mm (aria bazei de 10cm<sup>2</sup>) conectat la un sistem seismic de achiziție produs de compania Pagani. Conul a fost introdus în teren cu ajutorul unei prese hidraulice lestate de masa camionului de 30 de tone. Energia seismică a fost generată prin lovirea în plan orizontal a unei plăci metalice presate pe suprafața terenului de unul dintre pistoanele de calare al camionului CPT, modelul rezultat în urma procesării înregistrărilor seismice fiind prezentat în Fig. 5.94.

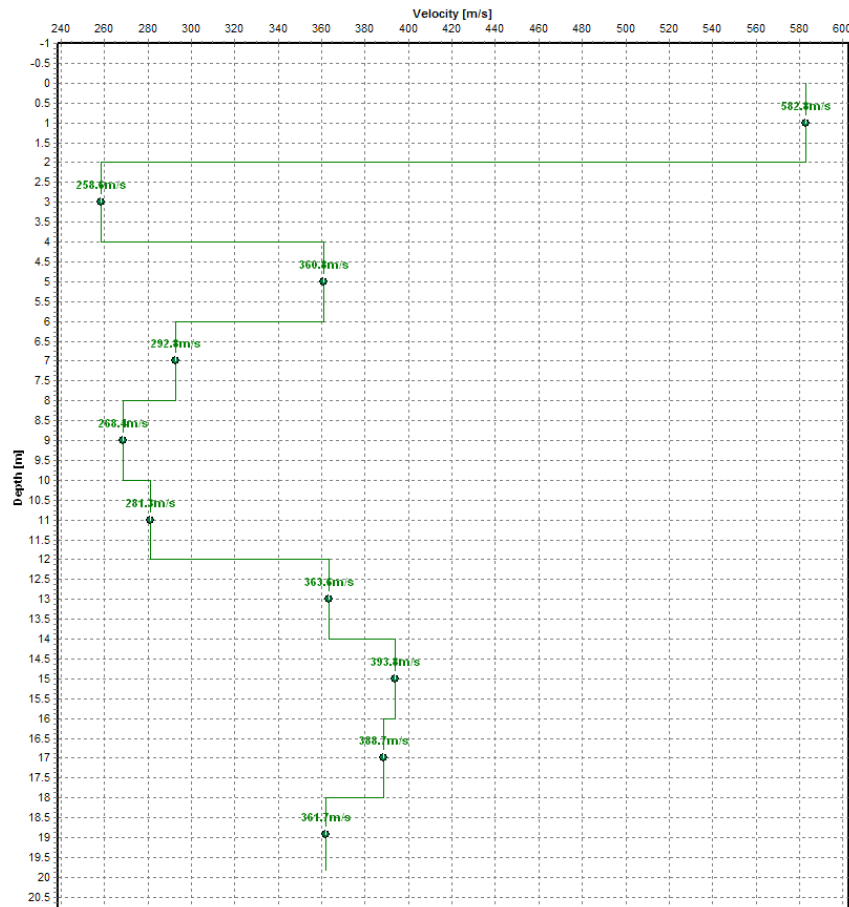


Fig. 5.94: Profil seismic vertical (Vs) obținut prin metoda SCPTu

Investigațiile seismice de tip MASW au fost realizate în ziua următoare încercării SCPTu, folosind un seismograf cu 24 de canale active. Dimensiunile restrânse ale amplasamentului au limitat lungimea profilului seismic la 46 m (24 de geofoane la interdistanță de 2 m). Curba de dispersie obținută în urma procesării datelor și modelul de viteze rezultat sunt prezentate în Fig. 5.95 și Fig. 5.96.



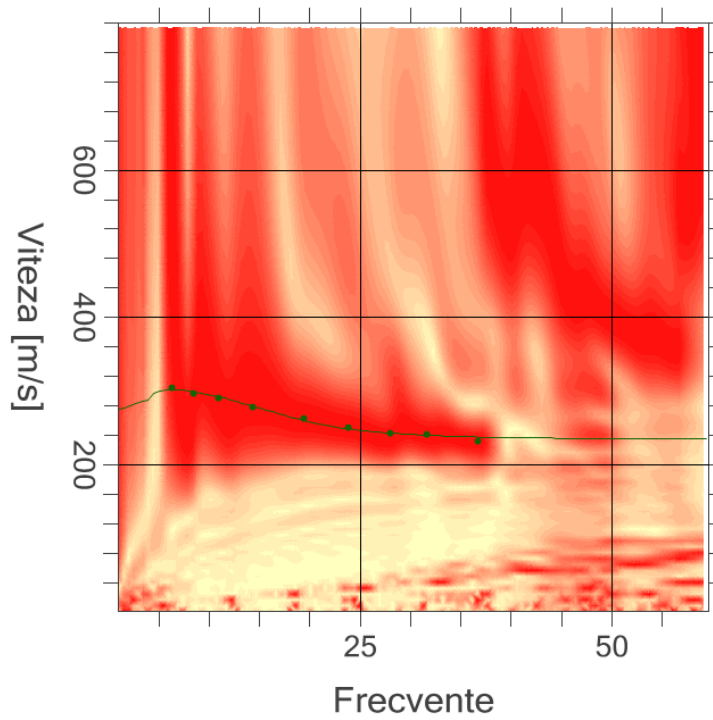


Fig. 5.95 Curba de dispersie caracteristică înregistrării seismice

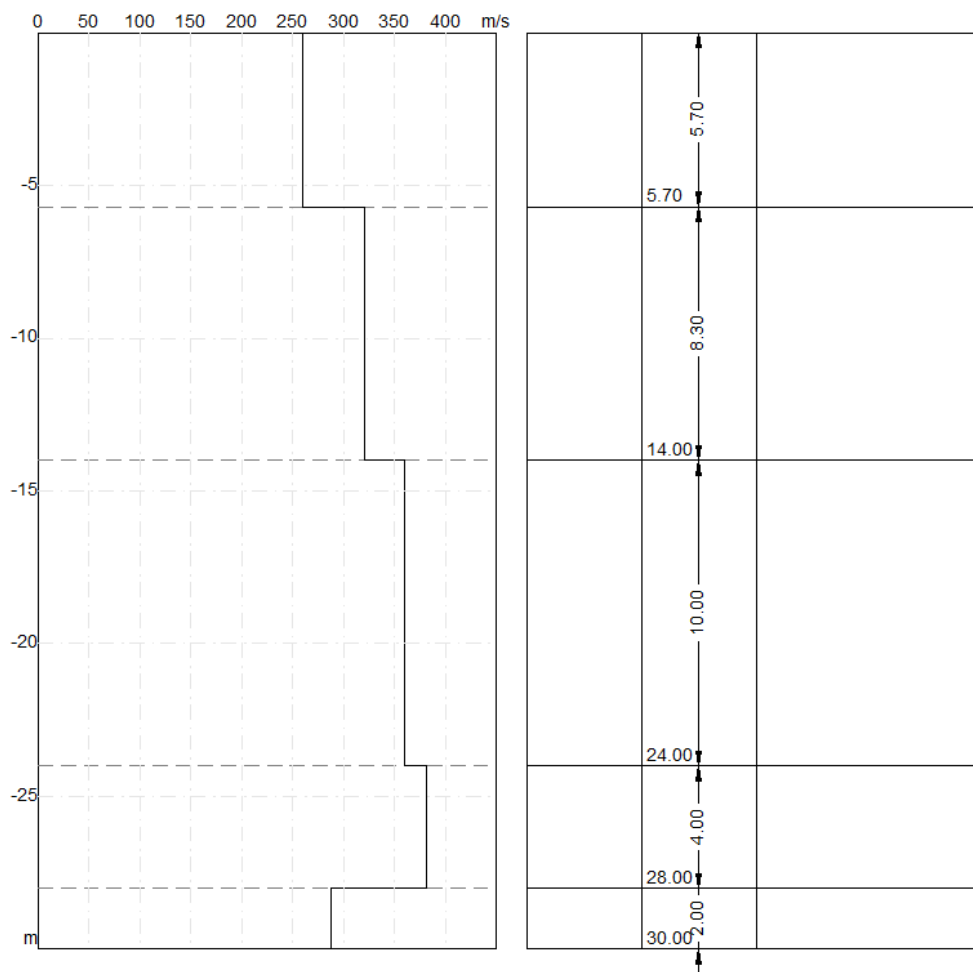


Fig. 5.96: Profil seismic vertical ( $V_s$ ) obținut prin metoda MASW

### 5.6.3 Discuții

Prin compararea celor două profiluri obținute (Fig. 5.97) se poate observa o corelare destul de bună între acestea, variația medie dintre vitezele înregistrate fiind de sub 20m/s (sub 10%), iar în cazul în care am calcula viteza medie pe primii 20m,  $V_{s20}$  am obține valori foarte apropiate.

Se mai observă că variațiile vitezei în cazul măsurătorilor SCPTu sunt foarte mari, aceste fiind puternic influențate de variații locale ale proprietăților mecanice. Prin metoda MASW se obțin parametri medii pentru întreaga întingere de geofoane (în cazul acesta 46m) obținându-se o estimare mai generală a vitezelor în raport cu adâncimea.

Din cauza interceptării unui strat de pietriș îndesat ce nu a putut fi penetrat de SCPTu acesta a trebuit să finalizeze testul la adâncime de 20m, cu 10m mai puțin față de adâncimea investigată prin metoda MASW.

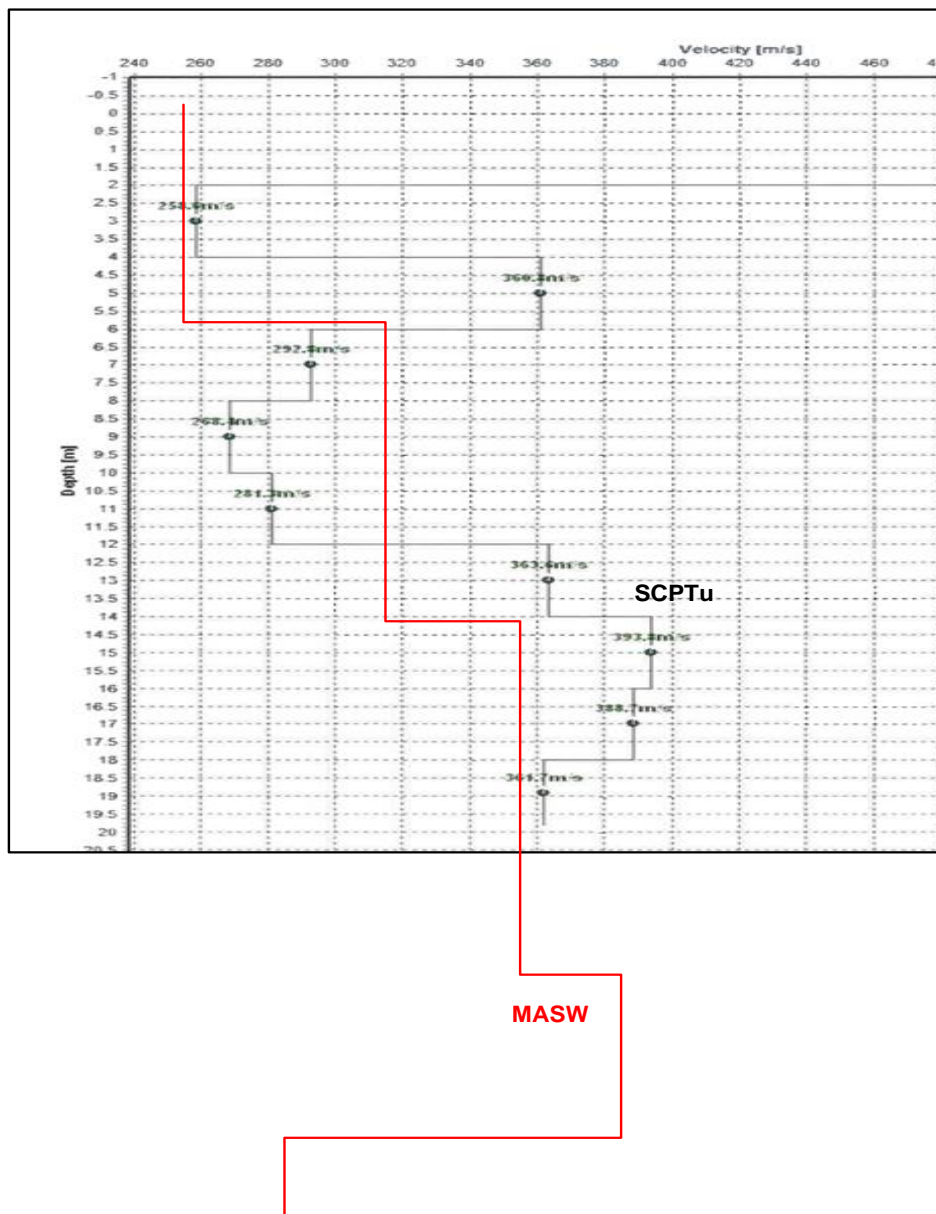


Fig. 5.97 Profiluri seismice verticale ( $V_s$ ) obținute prin metoda SCPTu (negru) și MASW (roșu)

## 5.7 Utilizarea investigațiilor seismice de suprafață pentru identificarea stratificație de calcul. Studiu de caz Calea Dorobanților, Cluj-Napoca, jud. Cluj

### 5.7.1 Descrierea amplasamentului și investigații de teren

Amplasamentul studiat este situat în mun. Cluj-Napoca, la contactul între trei mari unități geografice: Câmpia Transilvaniei, Podișul Someșan și Munții Apuseni. Din punct de vedere geologic, regiunea este caracterizată de marne peste care apar strate aluvionare de vârstă cuaternară, formate din pietrișuri cu nisipuri peste care s-au depus argile nisipoase – nisipuri argiloase.

Investigațiile geotehnice de teren au costat în 10 foraje geotehnice cu adâncimi de 20.00m și 10 penetrări dinamice de tip PDG, cu adâncimi cuprinse între 7.50m și 16.00m. În scopul determinării modului de forfecare tangent a terenului ( $G_0$ ), pe baza vitezei de propagare a undelor de forfecare ( $V_s$ ) a fost realizat un profil de investigare seismică de suprafață, dispus conform Fig. 5.98. Lungimea profilului a fost de aproximativ 69.00m, având 24 de receptori verticali la o interdistanță de 3.00m.



Fig. 5.98: Dispunerea punctelor de investigație în amplasament

Pe baza forajelor geotehnice a fost identificată punctual litologia amplasamentului, constând în:

- Orizont antropic compus din umplutură ceozivă negricioasă, cu grosimea de 0.0-3.0m;
- Orizont aluvionar grosier: pietriș / pietriș cu nisip, mediu îndesat la îndesat, ce se extinde până la 9.00 ÷ 12.80m;
- Orizont coeziv: marnă cenușie, vârtoasă la tare; acest strat fiind interceptat până în baza forajelor geotehnice realizate.

Ținând cont de deschiderile amplasamentului, precum și de variațiile cotelor, a fost realizat un singur profil seismic, conform Fig. 5.98, care acoperă stratificația medie a zonei cuprinse între punctele F01 ÷ F06. Din acest motiv, rezultatele obținute nu au ținut cont de datele obținute din restul forajelor geotehnice și încercărilor in-situ.

### 5.7.2 Rezultate obținute

Energia seismică a fost generată la o distanță de 12m față de ambele capete ale profilului, obținându-se astfel două înregistrări distincte ce au fost procesate individual prin metoda MASW. Astfel au rezultat două variații independente, însă similare atât din punct de vedere al adâncimii stratificației identificate, cât și al rigidității acestora, denumite în continuare – MASW1, respectiv MASW2. Procesarea înregistrărilor a fost făcută cu ajutorul programului EasyMASW (Geostru), curbele de dispersie selectate și modelele de distribuție a vitezei undelor de forfecare fiind prezentate în Fig. 5.99-Fig. 5.102.

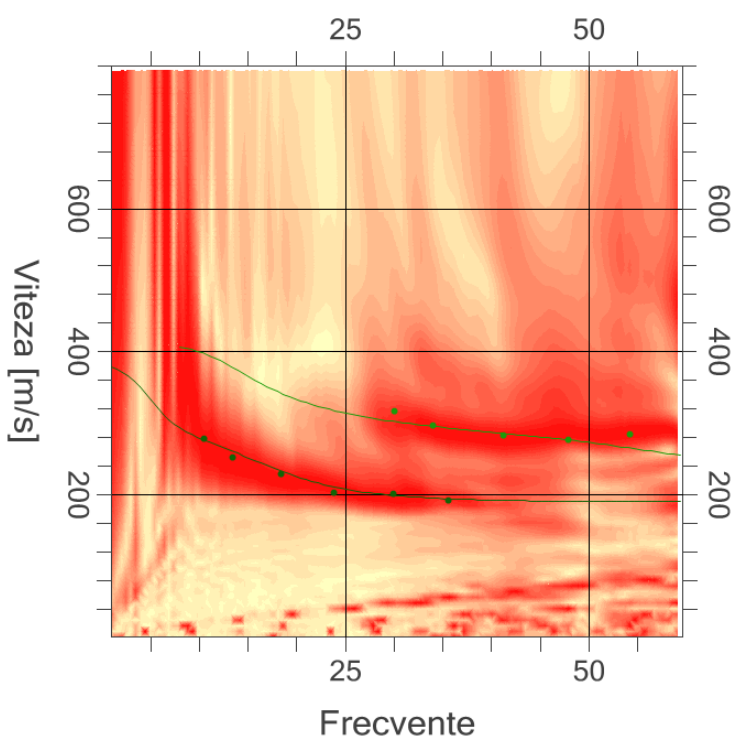


Fig. 5.99 Curbele de dispersie selectate în cazul profilului MASW1

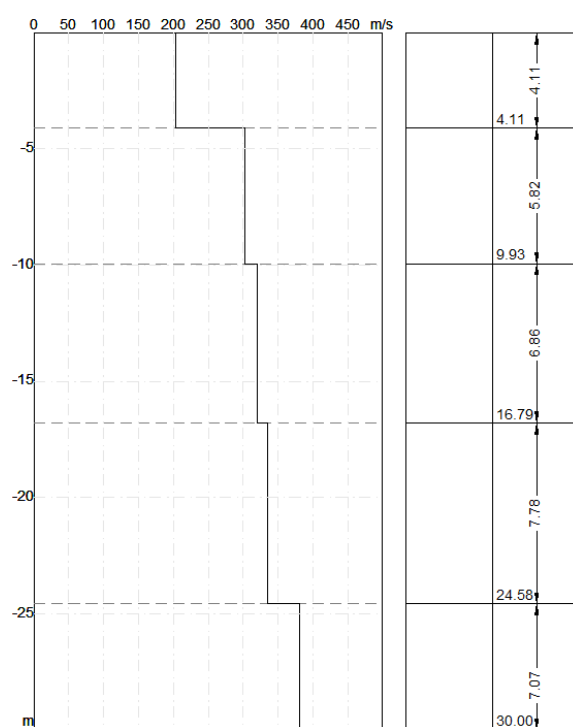


Fig. 5.100 Profil de viteze Vs obținut în urma procesării profilului MASW1

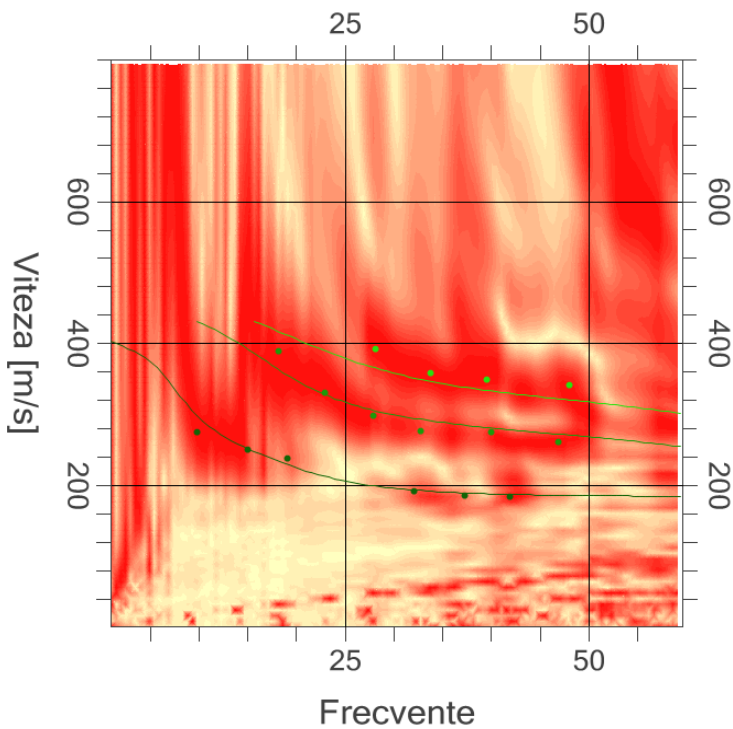


Fig. 5.101 Curbele de dispersie selectate în cazul profilului MASW2

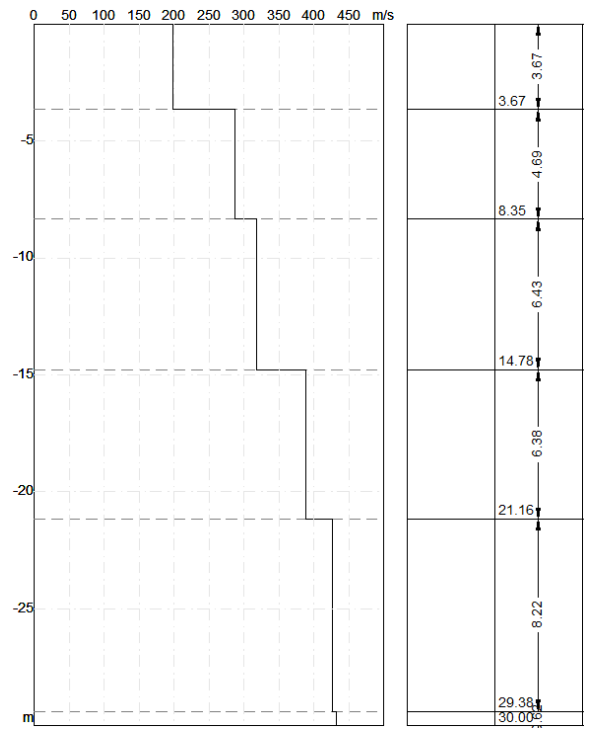


Fig. 5.102 Profil de viteze Vs obținut în urma procesării profilului MASW2

În vederea determinării gradului de încredere asupra rezultatelor obținute pornind de la ipoteza că rigiditatea unui strat de pământ, determinată indirect prin intermediul Penetrărilor Dinamice Grele (regim dinamic) este proporțională cu variația vitezelor secundare prin același material, au fost realizate suprapunerile din Fig. 5.103 ÷ Fig. 5.108, ce cuprind: litologia identificată și valorile de penetrare aferente perechii de foraj geotehnic și încercare de Penetrare Dinamică Grea, respectiv cele două profiluri seismice.

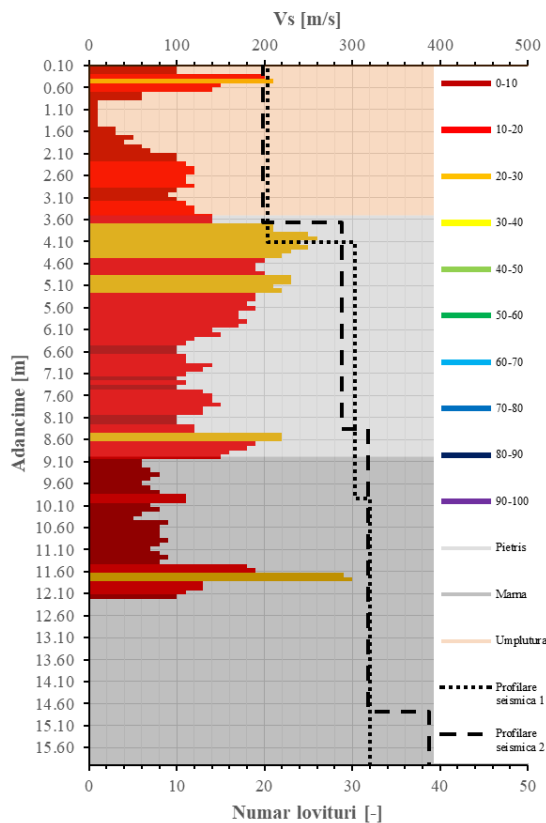


Fig. 5.103: Coloana litologică aferentă F01, suprapusă cu rezultatele PDG01 și profilul mediu MASW

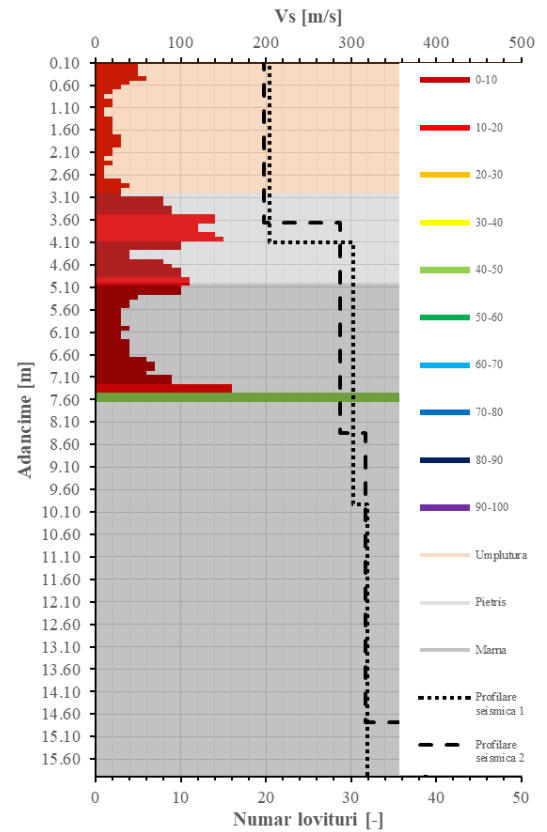


Fig. 5.104: Coloana litologică aferentă F02, suprapusă cu rezultatele PDG02 și profilul mediu MASW

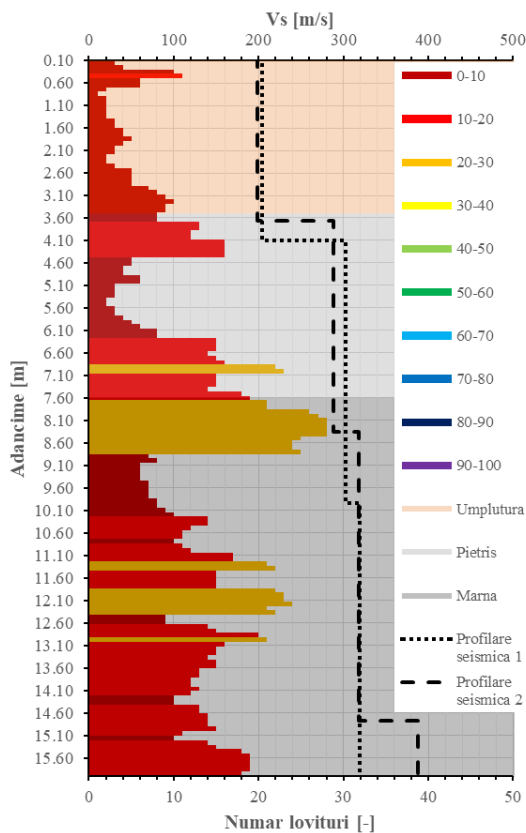


Fig. 5.105: Coloana litologică aferentă F03, suprapusă cu rezultatele PDG03 și profilul mediu MASW

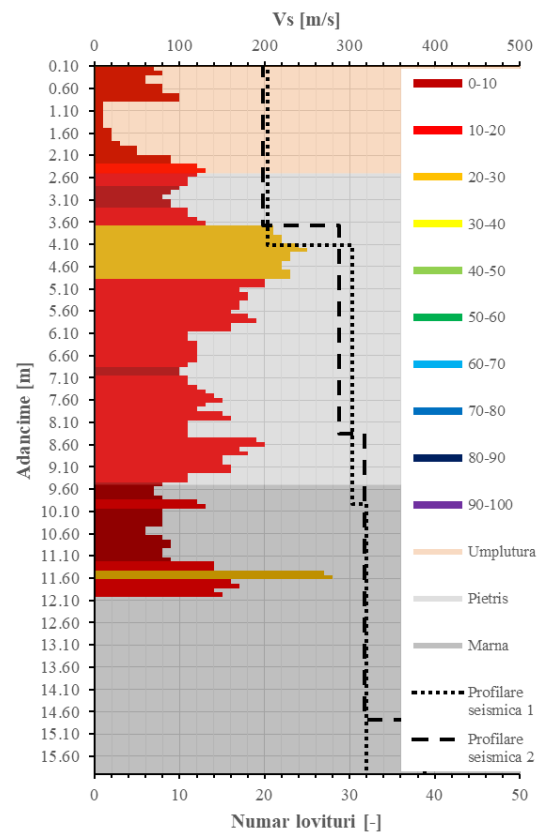


Fig. 5.106: Coloana litologică aferentă F04, suprapusă cu rezultatele PDG04 și profilul mediu MASW

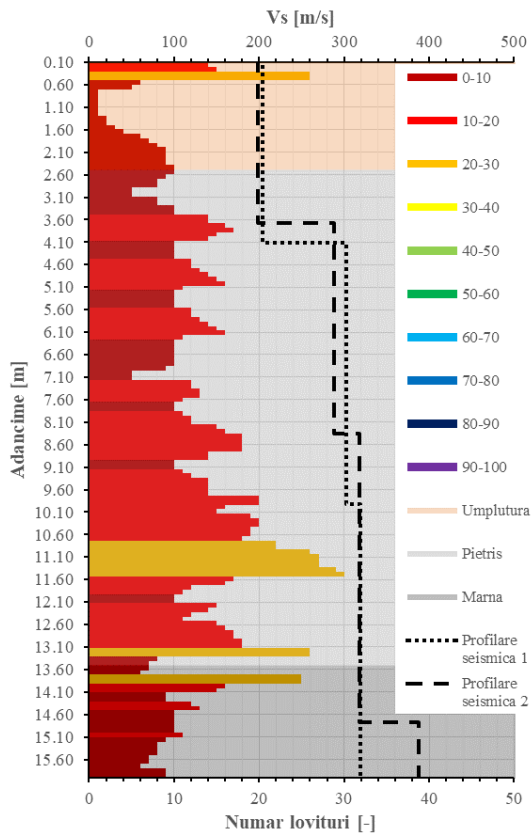


Fig. 5.107: Coloana litologică aferentă F05, suprapusă cu rezultatele PDG05 și profilul mediu MASW

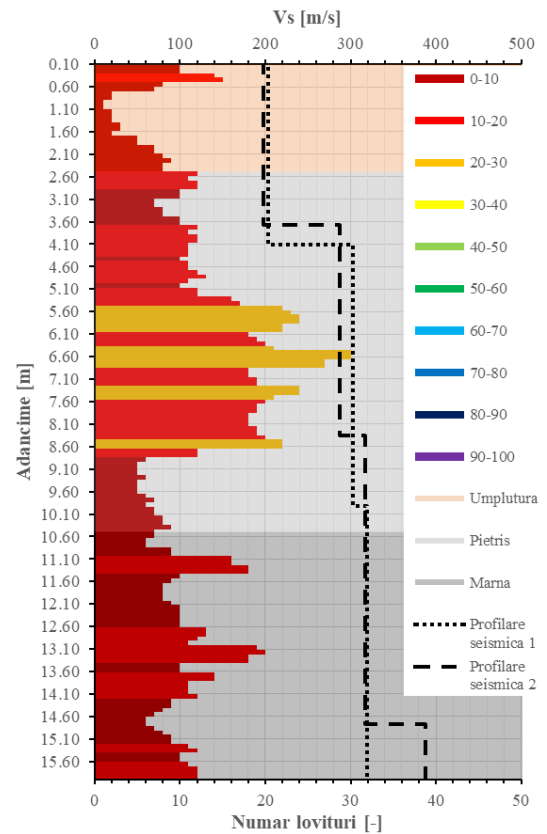


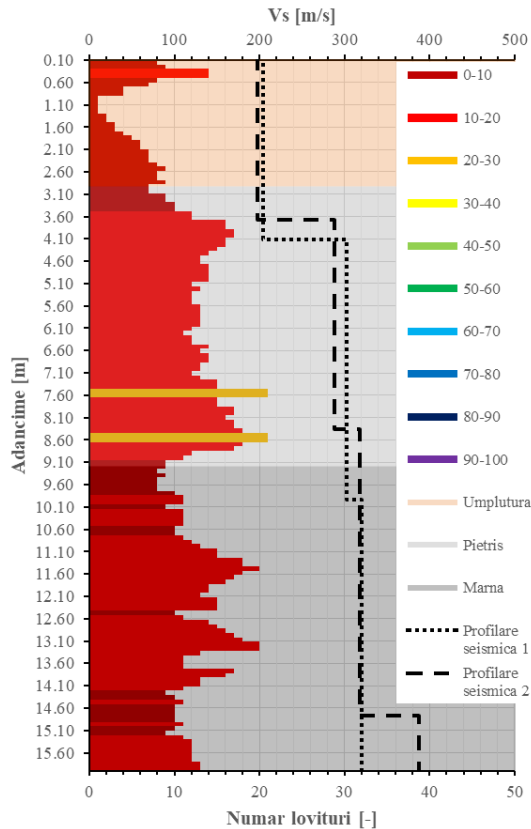
Fig. 5.108: Coloana litologică aferentă F06, suprapusă cu rezultatele PDG06 și profilul mediu MASW

### 5.7.3 Discuții

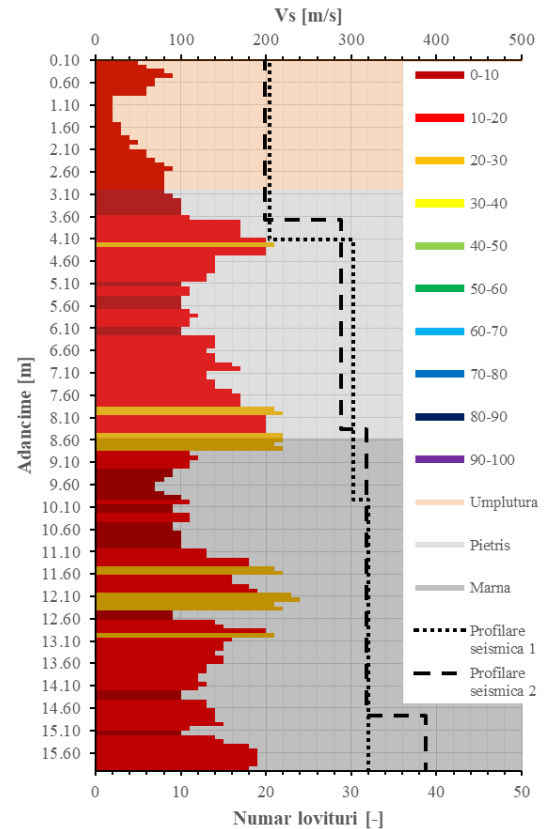
În urma observării datelor obținute, prin prisma suprapunerii în cât mai mare măsură a informațiilor geotehnice și geofizice disponibile, au rezultat următoarele concluzii:

- stratificația identificată prin intermediul forajelor geotehnice este îndeaproape corelată cu rezultatele PDG, în limite rezonabile generate de eterogeneitatea terenului și de variația litologiei în domeniul de distanțe orizontale dintre cele două metode de investigare de  $\pm 2.00 \dots 5.00$  m;
- schimbările de rigiditate observate prin intermediul metodei MASW prezintă o foarte bună corelare cu unele dintre punctele de investigare geotehnică, însă variabilitatea terenului în plan și adâncime, generează neconcordanțe față de altele; ținând cont de metodologia realizării profilării geo-seismice, precum și a prelucrării de tip MASW, profilurile obținute reprezintă **medieri litologice pe direcția dispozitivului utilizat**;
- de asemenea, se poate observa o corelare strânsă între natura necoezivă sau coezivă a stratelor și necesarul de energie de a penetra dinamic stratul (număr de lovituri pentru o lungime constantă); metoda MASW nu face distincție clară între cele două tipuri majore de pământ (pietriș cu nisip, respectiv marnă, în cazul de față), deoarece viteza undelor secundare prin cele două medii are o variație redusă, funcție de compactitatea materialului, respectiv de conexiunile dintre particule și natura acestora.

În vederea determinării corectitudinii concluziei de la punctul b), au fost realizate două profilări geotehnice medii: unul realizat între toate cele șase puncte de investigare între care a fost desfășurat profilul geo-seismic, respectiv un al doilea, care să surprindă litologia medie a forajelor F03 și F04, reprezentative pentru o mare parte din lungimea dispozitivului geo-fizic considerat. Pe baza Fig. 5.109 și Fig. 5.110, se poate observa o creștere substanțială a gradului de corelare între MASW și informațiile geotehnice, în special considerând media generală a punctelor de investigare  $F / PDG01 \div F / PDG06$ .



**Fig. 5.109: Coloana litologică medie aferentă F01 ÷ F06, suprapusă cu rezultatele PDG01 ÷ PDG06 și profilul mediu MASW**



**Fig. 5.110: Coloana litologică medie aferentă F03&F04, suprapusă cu rezultatele PDG03&PDG04 și profilul mediu MASW**

Pornind de la caracteristica metodei MASW ce presupune determinarea **vitezelor medii de propagare** a undelor de forfecare în lungul profilului analizat, această tehnică ajută la stabilirea unei stratificații medii de calcul, nefiind sensibilă la mici variații locale ce pot fi evidențiate în foraj sau pe baza încercărilor in-situ.

Din graficele prezentate se observă o oarecare neconcordanță între numărul mediu de lovituri și viteza medie a undelor, între stratul de marnă și cel de pietriș. Deși în marnă au fost înregistrate valori mai mici ale numărului de lovituri, viteza undelor a avut o ușoară creștere. Pentru a interpreta aceste observații, au fost utilizate relațiile descrise de (Wair, 2012), care prezintă corelații între numărul de lovituri SPT și viteza undelor seismice de forfecare în diferite materiale:

$$V_s = 1.12 \cdot 26 \cdot N_{SPT}^{0.17} \cdot \sigma'_v{}^{0.32} \text{ pentru argile și prafuri pre-holocene} \quad (5.3)$$

$$V_s = 53 \cdot N_{SPT}^{0.19} \cdot \sigma'_v{}^{0.18} \text{ pentru pietrișuri holocene} \quad (5.4)$$

Trecerea de la numărul de lovituri  $N_{DPH}$  la  $N_{SPT}$  a fost realizată cu relația descrisă de Spagnoli (2008):

$$N_{DPH_{10}} = 0.5 \cdot N_{SPT} \quad (5.5)$$



Astfel, pe baza relațiilor descrise mai sus, a fost realizată o estimare a vitezelor undelor de forfecare în comparație cu profilul mediu DPH. În Fig. 5.111 se poate observa că la trecerea în stratul de marnă, deși numărul de lovituri DPH scade, viteza undelor secundare crește.

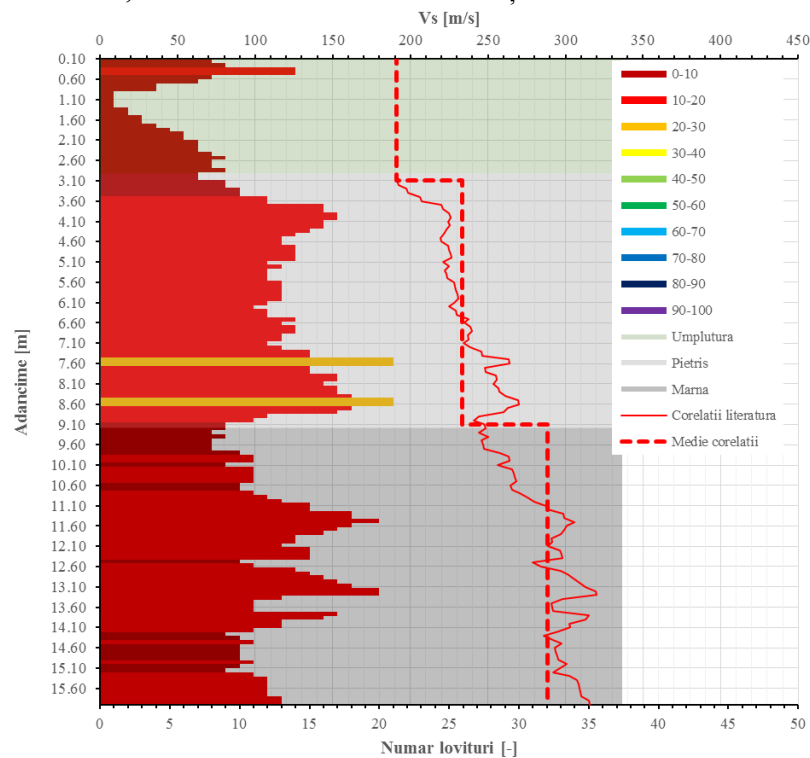


Fig. 5.111: Corelații între DPH și  $V_s$  pe profilul mediu, calculate pe baza relațiilor din literatură

Fig. 5.112 prezintă o comparație între calculele realizate prin corelații din literatură (valori medii pe strat) și rezultatele obținute prin măsurătorile MASW. Se confirmă creșterea vitezei în stratul coeziv, în pofida scăderii rezistenței la penetrare a conului.

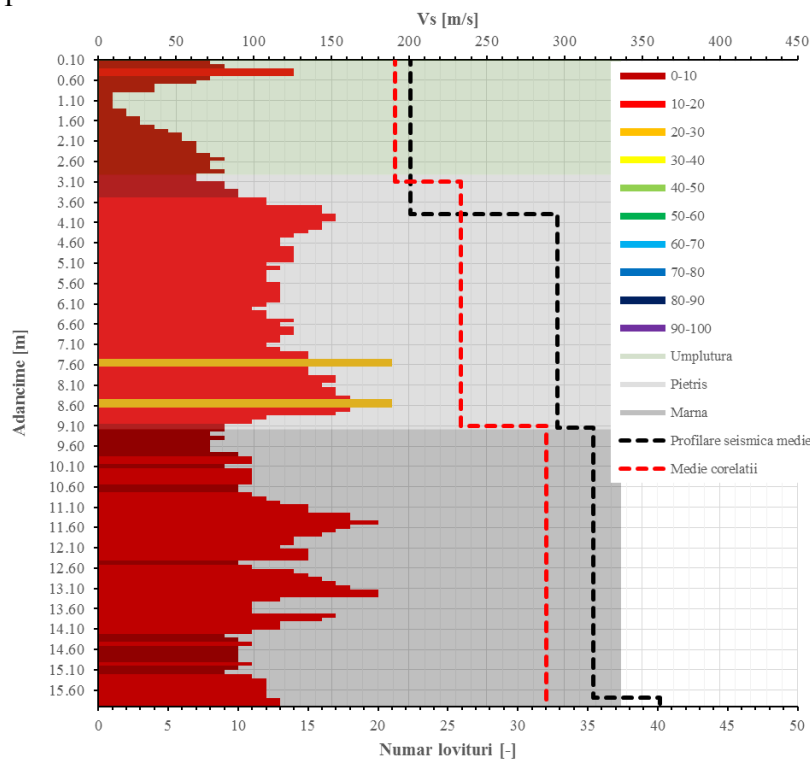


Fig. 5.112: Comparație între corelații din literatură și rezultatele MASW

## 6 CONTRIBUȚII PERSONALE

Teze și-a propus să elaboreze și să verifice acuratețea unor proceduri și metodologii pentru identificarea unor incluziuni (goluri, formațiuni lenticulare cu naturi și stări diferite de cele ale masivului de fundare, structuri îngropate). În acest scop o primă contribuție personală a fost ilustrarea prin exemple a faptului că procesul de investigare este unul iterativ, care nu se limitează la aplicarea unei rețete general valabile, a unei singure metode sau chiar și a unei singure campanii de teren. Este necesară o succesiune de tape de analiză, la sfârșitul fiecăreia rezultând indicații privind tipul și poziția lucrărilor ulterioare.

O a doua contribuție a constat în integrarea determinărilor geofizice în cartarea geotehnică pentru evidențierea aspectelor geologice și antropice particulare sau pentru confirmarea continuității structurilor litologice ce nu pot fi identificate prin sondaje punctuale.

Cea de-a treia contribuție personală a fost elaborarea unei proceduri pentru identificarea variabilității spațiale și caracteristicilor straturilor acvifere de suprafață pentru exploatare în vederea alimentării cu apă. Metoda a pornit de la identificarea rezistivității potențiale a apei subterane și calculului rezistivității mediate a stratului acvifer (sistemului apă-matrice minerală) folosind relații de calcul specifice din domeniile Ingineriei Geotehnice și Geofizicii de Sondă. Campania ulterioară de măsurători geofizice a arătat distribuția și continuitatea formațiunii acvifere căutate, valori confirmate ulterior prin foraj și teste de pompare.

O a patra contribuție personală a fost extinderea procedurilor de identificare a vitezelor undelor de forfecare pe primii 30m,  $v_{s30}$ , la cartarea geotehnică a amplasamentelor având întindere mare (cum ar fi cazul celor de dezvoltare a infrastructurii transporturilor), pornind de la zonarea aplicată amplasamentelor de clădiri pentru care se aplică normativul P100-1/2013. Practic, folosind metoda MASW pentru determinarea  $v_{s30}$ , se obține o distribuție caracteristică mult mai apropiată de cea reală față de cea obținută prin metode punctuale (încercări de laborator pe probe din foraj sau metodele de teren cross-hole, down-hole, SCPTu etc.) deoarece mediază extremele locale rezultând în valori ponderate cu variabilitate scăzută.

O altă contribuție se referă la folosirea metodelor de investigare geofizică, în special MASW, înaintea campaniilor de sondare pentru alegerea zonelor adaptate unor anumite capacități de echipamente de foraj (de exemplu, pentru valori mari ale  $v_{s30}$  se vor mobiliza numai utilaje de putere mare și sisteme de eșantionare adecvate, în timp ce pentru valori mici, se pot mobiliza și echipe cu foreze manuale sau semi-mecanizate). Alte metode geofizice arată poziția discontinuităților geologice astfel încât planul de sondare să fie adresat corespunzător ca poziție și adâncime. Cartarea inițială poate conduce și la o planificare corespunzătoare a tipului și cantității de determinări de laborator, știut fiind faptul că metodele și timpii tehnologici de procesare a probelor tari sunt radical diferiți de cei pentru probe moi.

Toate aceste contribuții nu ar fi putut fi posibile fără o documentare riguroasă în decursul perioadei în care am fost student al secției de Inginerie Geologica (2011-2015), precum și secției de Geofizică (2011-2016) ale Facultății de Geologie și Geofizică din cadrul Universității București, în paralel cu studiile doctorale. Astfel am avut ocazia să studiez un număr mare de documente reprezentative celor trei domenii (Inginerie de Construcții, Inginerie Geologică și Geofizică) ce m-a ajutat, prin alcătuirea unui state-of-the-art cuprinzător, la realizarea prezentei lucrări, care acoperă o mare parte din problemele cu care ne confruntăm în practica curentă a Ingineriei Geotehnice. Pe baza acestei documentări am ales să dezvolt și/sau adaptez cele mai potrivite metode pentru investigarea geotehnică, fără a acoperi metode cu aplicabilitate în alte domenii.

Pe baza lucrărilor de cercetare realizate în cadrul studiilor doctorale, am publicat următoarele articole:

Constantin Ungureanu, Adrian Priceputu, Manole-Stelian Șerbulea, Anton Chirica – LANDSLIDE FAILURE SURFACE CHARACTERIZATION USING A COMBINED APPROACH OF GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SURVEYS, SGEM Albena 2017 (în curs de indexare)

Constantin Ungureanu, Adrian Priceputu, Adrian Liviu Bugea, Anton Chirica – USE OF ELECTRIC RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT) FOR DETECTING UNDERGROUND VOIDS ON HIGHLY ANTHROPIZED URBAN CONSTRUCTION SITES, Suburban Conference 2017 (în curs de indexare)

Constantin Ungureanu, Cristina Mihaela Iliescu, Ștefan-Dragoș Găitănar, Anton Chirică – INTEGRATED HYDRO GEOLOGICAL - GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS TO DETERMINE THE CHARACTERISTICS OF A SHALLOW AQUIFER IN TRANSYLVANIA DEPRESSION, Geoscience 2016, București (în curs de indexare)

Adrian Liviu Bugea, Adrian Priceputu, Adrian Andronic, Constantin Ungureanu, Ștefan Ardelean, Radu Barbu, Nicoleta Rădulescu, Manole Stelian Șerbulea –REFLECTOARE LOW-COST PENTRU MONITORIZARE SATELITARĂ DE TIP InSAR, Conferința națională de geotehnică și fundații 2016

Adrian Andronic, Manole-Stelian Șerbulea, Cosmin-Victor Roșu, Constantin Ungureanu - STUDIU PARAMETRIC AL CAPACITĂȚII PORTANTE A PILOȚILOR SOLICITATI ORIZONTAL FOLOSIND SECVENȚE DE COD IMPLEMENTATE ABAQUS Conferința națională de geotehnică și fundații 2016

Alexandra Constantin, Constantin Ungureanu, Erik Kuikman, Dan V. Palcu, Izabela Mariș, - MINERALOGICAL, GEOCHEMICAL AND TEXTURAL CHARACTERIZATION OF SILICICLASTIC DEPOSITS OF ULMEȚ VALEY, ROMANIA, , International Geosciences Student Conference, 13 – 16 July 2015, Prague

C. Ungureanu<sup>1</sup>, V. Buzuleac<sup>1</sup>, R. Buzuleac<sup>1</sup>, A. Damian<sup>1</sup>, I. Panea<sup>1</sup> SEISMIC MEASUREMENTS FOR LANDSLIDES INVESTIGATIONS – GEO 2015

M.S. Șerbulea, A. Andronic, C. Roșu, C. Ungureanu - MODELAREA FENOMENELOR DE UPLIFT FOLOSIND MODELUL CUPLAT EULER-LAGRANGE - INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE Road Research and Administration, “CAR 2015” Bucharest, 9-11 July 2015

D.M. Manoli, A. Priceputu, C. Ungureanu, A. Andronic - THREE DIMENSINAL ORTHOTROPIC CONSOLIDATION MODEL FOR WELL POINT NETWORKS - 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, 2014 (indexat ISI)

Manole-Stelian Șerbulea, Radu Gogu, Delia Teleaga, Daniel Marcel Manoli, Adrian Priceputu, Dragoș Ștefan Găitănar, Constantin Ungureanu, Alexandra Anghel, Adrian Andronic, Alexandru Niculescu Adrian Liviu Bugea (2013) - InSAR IMAGERY PATTERN MATCHING VALIDATION FOR LANDSLIDE ASSESSMENT, European Geosciences Union General Assembly (EGU). Viena, Austria. 07-12 aprilie 2013 (indexat Google Scholar, Copernicus.org, Harvard.org)

Manole-Stelian Șerbulea, Radu Gogu, Daniel-Marcel Manoli, Dragoș Ștefan Găitănar, Adrian Priceputu, Adrian Andronic, Alexandra Anghel, Adrian Liviu Bugea, Constantin Ungureanu, Alexandru Niculescu (2013) – PROPOSED METHOD FOR HAZARD MAPPING OF LANDSLIDE PROPAGATION ZONE, European Geosciences Union General Assembly (EGU). Viena, Austria. 07-12 aprilie 2013 (indexat Google Scholar, Copernicus.org, Harvard.org)



## 7 CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Pornind de la problemele modului de investigare a terenului de fundare conform metodelor clasice ale ingineriei geotehnice, au fost propuse metode geofizice cu rol de completare a informațiilor punctuale obținute, astfel încât erorile de interpolare, respectiv extrapolare față de contextul cunoscut să fie minime.

Suportul teoretic a demonstrat și studiile de caz au confirmat gradul de utilizare, avantajele, dezavantajele și limitările fiecărei metode geofizice utilizate, considerând probleme tipice ale ingineriei geotehnice precum instabilitatea masivelor de pământ cu origine naturală sau antropică, identificarea litologiei și a condițiilor hidrologice în diverse amplasamente sau punerea în evidență a discontinuităților (goluri, formațiuni lenticulare sau structuri îngropate) ale terenului de fundare.

Metodele geo-electrice – tomografie electrică a rezistivității pământului, sub diferitele moduri de realizare și analiză (Dipol-Dipol, Schlumberger, Wenner) pot oferi informații importante asupra dezvoltării în adâncime și pe lungimea profilului considerat a litologiei în amplasament. Adâncimea de penetrare a acestor metode este direct proporțională cu dispozitivul considerat, fiind caracterizată de valori cuprinse între  $1/6$  (0.167) și  $1/8$  (0.125) din lungimea acestuia, însă rezoluția sa este invers proporțională cu distanța dintre doi electrozi consecutivi.

În acest sens, dacă scopul determinărilor este acela de a identifica cu precizie maximă a grosimilor unor straturi diferite din punct de vedere electric (nisipuri sau pietrișuri față de argile și prafuri; straturi de consistență redusă față de cele de consistență ridicată, sau forme cât mai precise ale structurilor îngropate), se poate utiliza unul sau mai multe dispozitive a căror distanță interax dintre electrozi să fie redusă, însă pentru obținerea unei adâncimi semnificative de investigare trebuie considerat un număr ridicat de puncte de injecție/citire. Dimpotrivă, dacă este necesar a se determina existența unei discontinuități în terenul de fundare al unui amplasament, se poate considera utilizarea unei distanțe mari a întregului dispozitiv, ce oferă o imagine grosieră, pentru ca apoi aceasta să fie rafinată prin folosirea unei dispunerii mai dese a electrozilor în zona de interes.

Metodele geo-seismice – MASW (analiza pe multiple canale a undelor de suprafață) și refracția, oferă atât informații calitative privind limitele straturilor, cât și cantitative, legate de rigiditatea acestora în domeniul dinamic, utile atât în cadrul studiilor preliminare ale amplasamentelor, cât și în modelarea numerică a lucrărilor de fundare indirectă și a lucrărilor de sprijin, unde deformațiile mici și foarte mici sunt de mare interes.

Dacă metoda MASW s-a dovedit, prin prisma rezultatelor obținute, o soluție robustă în determinarea litologiei unui amplasament, fiind utilizabilă pe orice tip de suprafață (pământ vegetal, straturi de uzură – pavele, platforme betonate etc.) și oferind un raport între semnal și zgomot foarte bun, fiind ușor de realizat în special în mediul urban, metoda refracției este mai sensibilă conformației litologiei. În acest caz, limitările sunt generate de condițiile litologice și hidrologice – existența unui strat moale sub unul tare nu poate fi observată, iar prezența unui strat acvifer poate conduce la erori importante, vitezele undelor principale la contactul cu acesta fiind foarte mari.

În prezenta lucrare au fost tratate unele dintre cele mai populare metode de investigare geofizică de suprafață cu aplicații directe în ingineria geotehnică prin intermediul unor studii de caz menite să evidențieze utilitatea acestora.

Investigațiile geofizice de tip ERT au fost utilizate în cadrul următoarelor tipuri de aplicații ingineresti:

- identificarea golurilor subterane în medii antropice și naturale;
- identificarea suprafețelor de cedare în cazul taluzurilor și a pantelor naturale supuse fenomenelor de instabilitate;

- identificarea acviferelor de suprafață, pornind de la valoarea rezistivității electrice a apei în amplasament.

Au fost puse în evidență dificultăți ce pot apărea în etapa de achiziție, afectând calitatea datelor, precum zonele puternic antropizate ce creează amplitudini mari de rezistivități și diminuează contrastul între mediu și ținta urmărită.

Totodată, a fost analizat impactul pe care îl are în achiziția datelor, utilizarea soluției saline pentru îmbunătățirea contactului dintre electrozi și teren, observându-se îmbunătățirea semnificativă a răspunsului măsurat, ceea ce a condus la obținerea unui profil geo-electric valid. De asemenea, a fost subliniat impactul condițiilor de mediu ce au caracterizat un moment al achiziției asupra datelor, recomandându-se evitarea perioadelor friguroase extreme sau perioada imediat ulterioară ploii care transformă semnificativ rezistivitatea stratului superficial al terenului.

În cazul investigării cavitațiilor carstice în mediu natural, metoda s-a dovedit utilă nu doar pentru confirmarea informațiilor deținute cu privire la existența peșterilor în zona studiată, ci și pentru identificarea de la suprafață și cartarea unor zone inițial neexplorate speologic.

O altă aplicație a metodelor geo-electrice constă în identificarea suprafețelor de alunecare, atât în materiale antropice, cât și naturale, acestea fiind caracterizate, în general, de valori reduse ale rezistivității electrice. Formarea suprafețelor de cedare conduce la apariția fisurilor în suprafață, ceea ce facilitează infiltrarea apelor meteorice, amplificând dinamica fenomenului. Măsurătorile de tip ERT, bazându-se pe variația rezistivității electrice a masivului de pământ, pot identifica geometria suprafeței de cedare în secțiunea realizată, datorită contrastului ridicat oferit de apa acumulată în aceasta.

Investigațiile geofizice de tip seismic – MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), au fost utilizate în cadrul prezentei lucrări în aplicații privind:

- identificarea zonelor de cedare în masivele de pământ;
- determinarea litologiei și a rigidității în regim dinamic a straturilor componente.

În cazul zonelor de cedare, acestea sunt caracterizate de o consistență scăzută, cauzată de prezența apei în exces, astfel încât vitezele undelor secundare sunt diminuate în funcție de rigiditatea stratului parcurs. Metoda se folosește, de obicei, împreună cu alte tipuri de investigații, în vederea corelării răspunsului obținut. În cadrul studiului de caz privind fenomenele de instabilitate ale platformei generatorului eolian WT09 Babadag, au fost suprapuse informații provenind din măsurători de tip ERT, foraje geotehnice, precum și penetrări dinamice de tip greu. Avantajul utilizării MASW în acest caz a constat în adâncimea importantă de investigare, făcând posibilă identificarea rocii de bază și/sau a stratului suport în situațiile în care celelalte măsurători nu au reușit a le evidenția.

În cadrul proiectării fundațiilor de adâncime, respectiv a structurilor de sprijin ce utilizează elemente fișate, un aspect foarte important îl reprezintă determinarea rigidității inițiale a straturilor de pământ, în vederea estimării cât mai precise a stării de eforturi generate în zona deformațiilor mici. În acest sens, metoda MASW poate oferi date privind atât grosimea straturilor de calcul, pe lungimea profilurilor considerate, cât și parametrii mecanici ( $V_s$ ) ce caracterizează acest domeniu de comportare. Comparativ cu metoda SCPTu, MASW oferă o imagine similară asupra terenului de fundare, atât din punct de vedere al grosimii straturilor, cât și al parametrilor fizico-mecanici ai acestora.

Metodele geofizice reprezintă unelte prin care inginerul geotehnician își poate completa informațiile dobândite prin intermediul lucrărilor de investigare clasice (foraje, decopertări, penetrări), obținând o imagine de ansamblu asupra diferitelor probleme întâlnite în practica curentă cum ar fi: fenomene de instabilitate și identificarea suprafețelor de cedare, determinarea golurilor în masivul de pământ,

identificarea stratificației și a comportamentului fizico-mecanic al acesteia sau a nivelului acviferelor de suprafață.

Deși au fost folosite cu o bună aproximare de corelații între valorile de penetrare standard și viteza undelor de forfecare a diferitelor tipuri litologice, se observă că există situații, s-a observat că ar fi necesară aprofundarea acestor relații empirice pentru o paletă mai largă de stări ale diferitelor pământuri astfel încât în relațiile de calcul să intre mai mulți parametri de stare. Această direcție viitoare de cercetare ar trebui să pornească de la tipuri clasice de pământuri pentru România (e.g. nisipurile de Colentina și Mostiștea, argila de Bahlui, argila de Constanța, loessurile de Dobrogea etc.), urmând ca ulterior, să se poată generaliza pentru microzonarea seismică a României.

O altă direcție de cercetare ar fi cartarea teritoriului național pentru stabilirea unor domenii de variație caracteristice parametrilor geofizicii geotehnice. Acest obiectiv s-ar putea atinge prin conlucrarea grupurilor de specialiști care lucrează independent în țara noastră.

Deși există unele normative Românești în domeniul geofizicii, acestea au o vechime mai mare de treizeci de ani și s-ar impune ca în urma unor teme de cercetare pe tipuri de metode, să se treacă la actualizarea acestora, pentru echipamente moderne.

## BIBLIOGRAFIE

- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Technology*.
- ASTM D5777 - 00(2011) Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. (2011).
- ASTM D6429 - 99(2011) Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. (2011).
- ASTM D7128 - 05(2010) Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation. (2010).
- ASTM G57-95A(2001) Standard Test Method for Field Measurements of Soil . (2001).
- ASTMD 6431-99(2010) Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity . (2010).
- Benson, R. C. (2000). An Overview of Methods and Strategies Assessing Subsurface Geologic Conditions and Structural Testing of Roads and Bridges. *the First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation Facilities and Infrastructure*. St. Louis.
- BS 1377-9 1990 Methods for test for soils for civil engineering purposes. In-situ tests. (1990).
- Butler, D. K., Llopis, J., & Deaver, C. (1989). Comprehensive geophysical investigation of an existing dam foundation. *The Leading Edge*, 10-18.
- Carothers, J. E. (1968). A statistical study of the formation factor. *The Log Analyst*.
- Constantinescu, G. P. (1980). *Captările de apă din Romania*. București: Editura tehnică.
- Dobrin, M. (1976). *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw.
- Giovanni, S. (2008). An Empirical Correlation Between Different Dynamic Penetrometers. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, 10.
- Ioane, D. (2006). *Geofizica pentru mediu*. București: Verghiliu.
- Ionelia, P. (2013). *Seismica de explorare - Note de curs*. București.
- Ivan, M. (1994). *Magnetic Prospecting (in Romanian)*. București: Universitatea din București.
- Kanlı, A. I., & Peter, T. (2006). VS30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey. *Geophysics*.
- Keiswetter, D. A., & Steeples, D. (1995). A field investigation of source parameters for the sledgehammer. *GEOPHYSICS*.
- Loke, M. H. (2016). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
- McCamm, D. M. (1997). *Modern Geophysics in Engineering Geology*. London: The Geological Society.
- Mooney, H. M. (1984). *Handbook of Engineering Geophysics (Vol. I: Seismic)*. Minneapolis: Bison Instruments.
- Mooney, H. M. (1984). *Handbook of Engineering Geophysics (Vol. II: Electrical Resistivity)*. Minneapolis: Bison Instrument.
- NP 074-2014 Normativ privind documentațiile geotehnice pentru construcții. (2014).
- P 100-1/2013 Cod de proiectare seismică - Prevederi de proiectare pentru clădiri. (2013).
- Park, C. (2016). MASW Analysis of Bedrock Velocities (Vs and Vp). *SEG annual meeting (Dallas, Texas)*.
- Park, C. B., & Miller, R. D. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS*, 64.
- Pascu, M. R. (1983). *Apele subterane din Romania*. București: Editura Tehnică.
- Reynolds, J. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Roy, A. (1962). Ambiguity in geophysical interpretation. *Geophysics*. doi:doi:10.1190/1.1438985
- Sirles, P. C. (2006). *Use of Geophysics for Transportation Projects*. Colorado: THE NATIONAL ACADEMIES PRESS.
- STAS 11156-78 Teren de fundare. Cercetarea geofizică a terenului de fundare prin metode seismice. (n.d.).
- STAS 1242/8-75 Teren de fundare. Principii de cercetare geofizica a terenului de fundare prin metode electrometrice in current continuu. (1975).
- Telford, W. M. (1976). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- tests, B. 1.-9.-s. (n.d.).



- Timur, A., & Hemphkins, W. (1972). Porosity and Pressure Dependence of Formation Resistivity Factor for Sandstones. Calgary: Canadian Well Logging Society.
- Ungureanu, C., Ilescu, C., Gaitanaru, D., & Chirica, A. (2016). INTEGRATED HYDRO GEOLOGICAL - GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS TO DETERMINE THE CHARACTERISTICS OF A SHALLOW AQUIFER IN TRANSYLVANIA DEPRESSION. *Geoscience 2016*. București.
- Ungureanu, C., Priceputu, A., Bugea, L. A., & A, C. (2017). USE OF ELECTRIC RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT) FOR DETECTING UNDERGROUND VOIDS ON HIGHLY ANTHROPIZED URBAN CONSTRUCTION SITES. *Suburban Conference 2017*.
- Ungureanu, C., Priceputu, A., Șerbulea, M. S., & Chirică, A. (2017). LANDSLIDE FAILURE SURFACE CHARACTERIZATION USING A COMBINED APPROACH OF GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SURVEYS. *SGEM*. Albena.
- Wair, B. R. (2012). *Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity*. Pacific Earthquake Engineering Research Center California.
- Ward, S. H. (1990). *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Okla: Society of Exploration Geophysicists.
- Wightman W E, J. F. (2003). *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems*. Washington: Federal Highway Administration.
- Winsauer, W. O., & Shearing, H. M. (1952). Resistivity of brine saturated sands in relation to pore geometry. *AAPG Bulletin*.