

CORSO IN GEOFISICA

Caratterizzazione dei suoli con varie tecniche attive e passive

**Albornoz Palace Hotel
Viale Giacomo Matteotti, Spoleto (PG)
2 – 3 Dicembre 2016**

Sismica a rifrazione
specifiche tecniche e pratica di acquisizione

Dott. Geol. Francesco Fiera

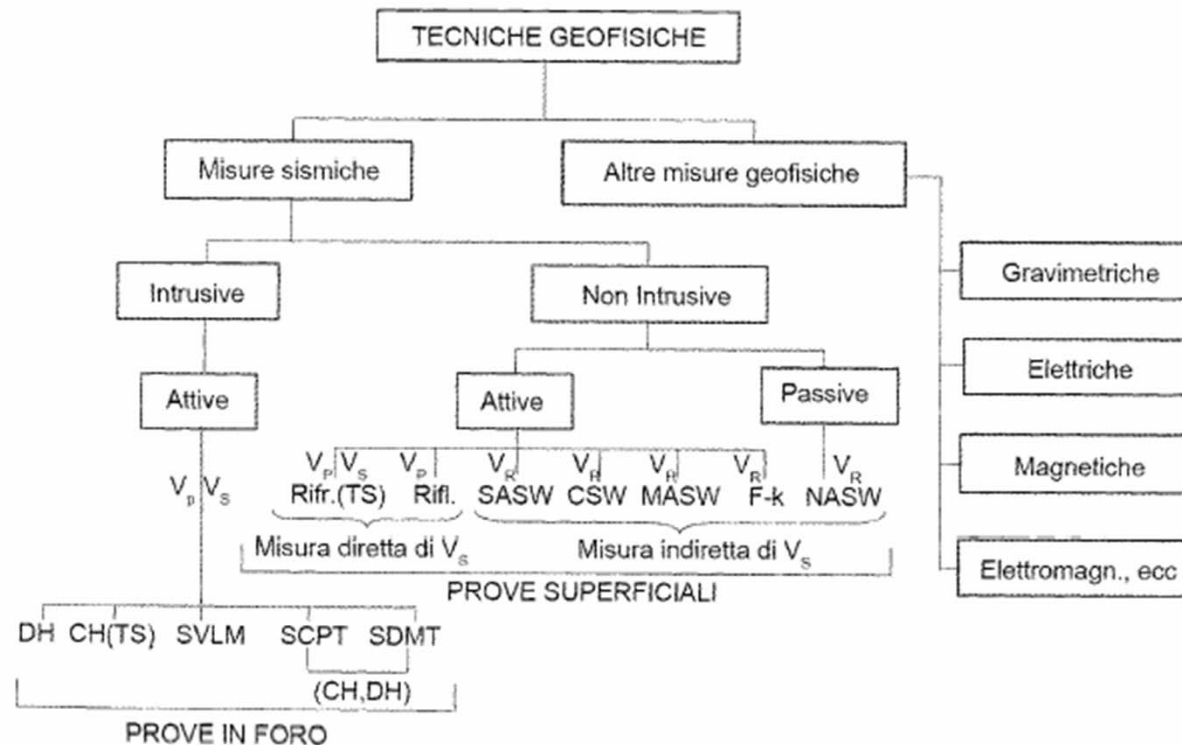
Geo-Ernergizers s.n.c
Via C. Battisti, 38 – 56021 Cascina (PI)

www.geoenergizers.it

393-9043743

RIFRAZIONE: significato

deviazione subita da una radiazione elettromagnetica, da un'onda sonora o elastica nel passare da un mezzo a un altro che presenta **differenti** caratteristiche di **rigidità** e **densità**



SISMICA A RIFRAZIONE

Il metodo sismico a rifrazione è un metodo **non invasivo** che si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo delle **onde sismiche** (P o S) generate in superficie da una **sorgente sismica** e captate da ricevitori, anch'essi in superficie, disposti su un **allineamento** a diverse distanze dalla sorgente.

I tempi di primo arrivo, correlati alle diverse distanze sorgente-ricevitore, permettono la stima (calcolo) delle geometrie del sottosuolo (topografia o disposizione morfologica delle interfacce) e delle velocità di propagazione delle onde sismiche.

PRINCIPI DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

il metodo di investigazione mediante sismica a rifrazione si classifica come:

- TECNICA DI INDAGINE “**IN SITO**”
- TIPOLOGIA DI INVESTIGAZIONE **NON INVASIVA**
- PROSPEZIONE DI TIPO **ATTIVO**
- INVESTIGAZIONE DI TIPO **DIRETTO**

si basa sullo studio della propagazione delle **onde elastiche** indotte o presenti nel sottosuolo, considerando che:

- i terreni sottoposti a stress si **deformano** e la propagazione delle deformazione, che costituisce l'onda elastica, dipende dalle **caratteristiche** dei materiali attraversati
- la **velocità** di propagazione, **l'attenuazione** ed il contenuto in **frequenza** della perturbazione, comunque indotta, dipende dalle **caratteristiche elastiche** dei terreni, dalla loro **densità** e dalla direzione di propagazione e dalle caratteristiche tecniche s.l. dei materiali

FINALITA' E APPLICABILITA' DELL'INDAGINE

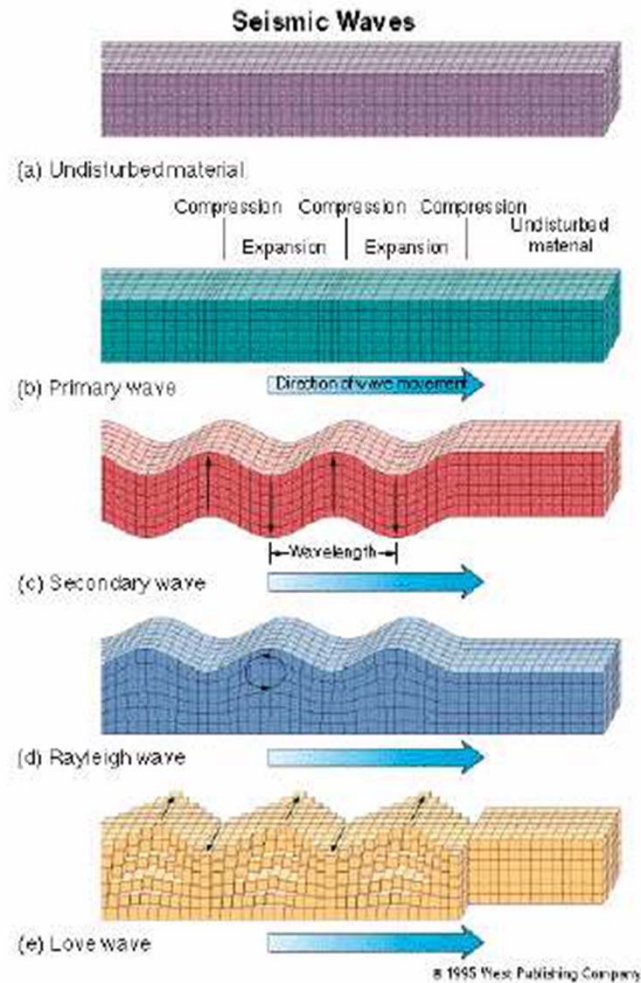
utile a definire il **modello stratigrafico** del terreno attraverso l'interpretazione delle informazioni derivanti dalla prospezione;

Permette la determinazione delle proprietà **fisico-meccaniche** ed **elastiche** dei terreni, relativamente ai parametri determinabili dalle deformazioni indotte in campo elastico;

necessaria è la condizione che sia applicabile la **teoria dell'elasticità**, che i mezzi di analisi risultino in prima istanza **omogenei** ed isotropi e che i parametri elastici siano **tempo-invarianti**;

necessaria è inoltre la **condizione di deformabilità del sottosuolo in campo elastico** (relazione lineare fra stress e strain).

MODALITA' DI PROPAGAZIONE E RELAZIONE TRA I VARI TIPI DI ONDE



$$\star v_p = (E/\rho)^{0.5}$$

$$\star v_s = (\mu/\rho)^{0.5}$$

$$\star v_R = 0.92 v_s, \text{ per } \sigma = 0.25$$

$$\star v_L \approx v_s$$

$$\text{SOLO per } \sigma = 0.25, v_p = v_s \sqrt{3}$$

NEI MEZZI SATURI LA VELOCITÀ DELLE ONDE P È FORTEMENTE INFLUENZATA DAL FLUIDO INTERSTIZIALE ED È QUINDI SCARSAMENTE SENSIBILE ALLE VARIAZIONI DELLE PROPRIETÀ DELLO SCHELETRO SOLIDO

LE ONDE S, LA CUI VELOCITÀ NON DIPENDE DAI FLUIDI INTERSTIZIALI, CONSENTONO QUINDI UNA MIGLIOR CARATTERIZZAZIONE DELLE FORMAZIONI SATURE ANCHE GRAZIE ALLA MIGLIOR RISOLUZIONE SPAZIALE CHE SI ORIGINA DALLA MINOR LUNGHEZZA D'ONDA

ASSUNZIONI SULLA VELOCITA' DELLE ONDE SISMICHE

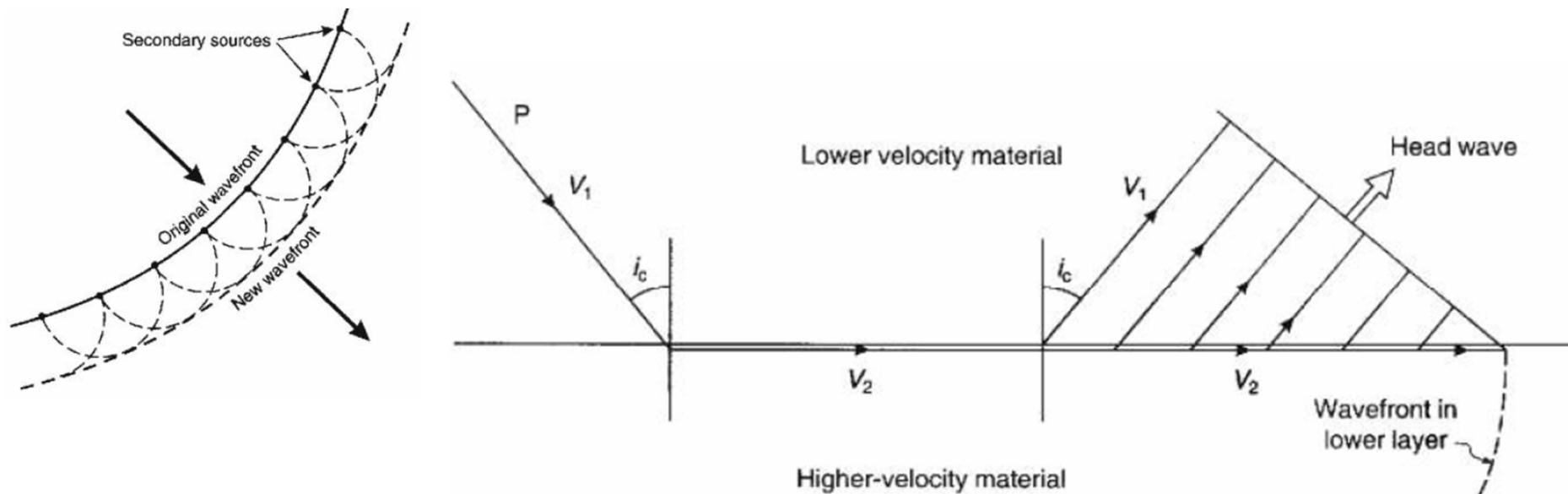
- la velocità di propagazione delle onde sismiche dipende dalle proprietà meccaniche del terreno, dalla stratigrafia e dalla morfologia e dalle caratteristiche e l'intensità della sorgente;
- la velocità delle onde di compressione (V_P) è sempre **maggiore** di quella delle onde di taglio (V_S) e comunque in entrambi i casi aumenta generalmente con la profondità in uno stesso strato.
- il rapporto V_P/V_S , nell'ipotesi di comportamento elastico lineare, **dipende solo** dal coefficiente di Poisson ν , varia tra $\sqrt{2}$ e ∞ , per ν variabile tra 0 e 0.5.
- le **onde di Love** hanno velocità generalmente comprese tra quelle delle onde S misurate alla base e in superficie dello strato
- La **velocità V_R delle onde di Rayleigh** risulta sperimentalmente assai prossima a quella delle onde di taglio V_S (variando in funzione del coefficiente di *Poisson* tra 0.86 e 0.95).
- **il grado di saturazione influenza la velocità delle onde P**: per $S_r < 99\%$, le vibrazioni si propagano esclusivamente tramite lo scheletro solido e la V_P è rappresentativa solo delle proprietà meccaniche dello scheletro solido, per $S_r > 99\%$ entra in gioco la compressibilità dell'acqua interstiziale e per terreni completamente saturi la propagazione avviene esclusivamente attraverso l'acqua e la V_P non è più rappresentativa delle proprietà meccaniche del terreno.
- la **velocità delle onde di taglio e di superficie è invece scarsamente influenzata dalla presenza del fluido interstiziale**, non potendo esso assorbire sforzi di taglio.

Nella sismica a rifrazione l'analisi si fonda sulle **modalità di propagazione** nel sottosuolo delle onde di volume, **P** ed **S**, secondo il **principio di Huygens**, approssimando le onde sferiche a **onde piane**;

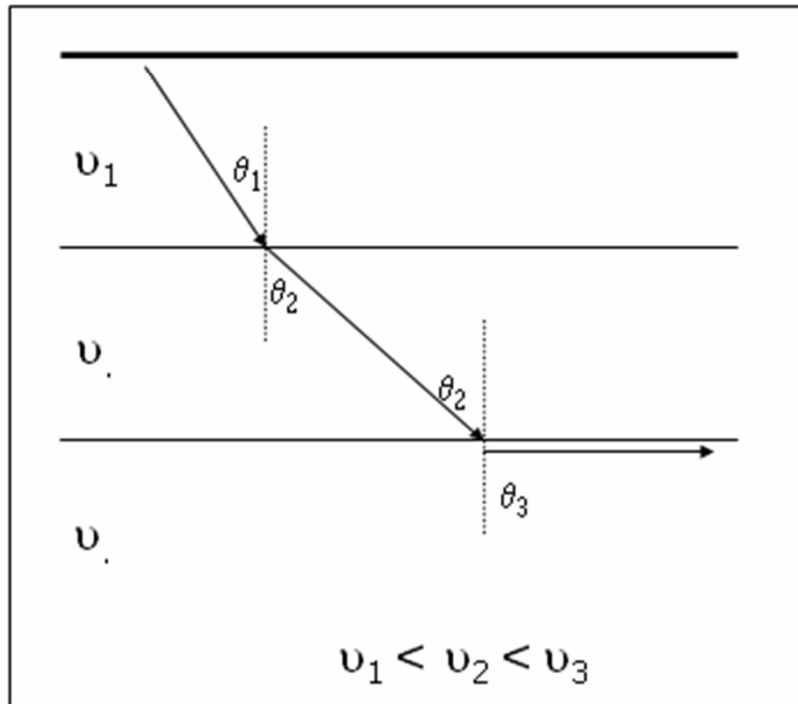
Il percorso di un'onda viene quindi ricondotto **alla perpendicolare** dei fronti d'onda ovvero al raggio sismico stesso. Ciò che viene preso in considerazione è di fatto **la traiettoria** seguita dal raggio sismico e le modalità con cui la sua traiettoria viene modificata dalle **variazioni di rigidità** del sottosuolo.

Dalla definizione di **interfaccia sismica** che separa due mezzi a diversa rigidità, si ricava in forma analitica l'angolo di "**incidenza critica**" per il quale si determina il fenomeno della **rifrazione**.

$$\sin i_c = V_1 \cdot \sin(90^\circ) / V_2 = V_1 / V_2$$

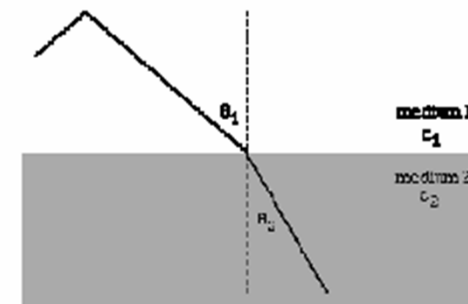


Secondo il **Principio di Fermat**, la traiettoria di ogni raggio sismico segue il percorso che impiega il **minor tempo possibile** dal punto di energizzazione a quello di registrazione.



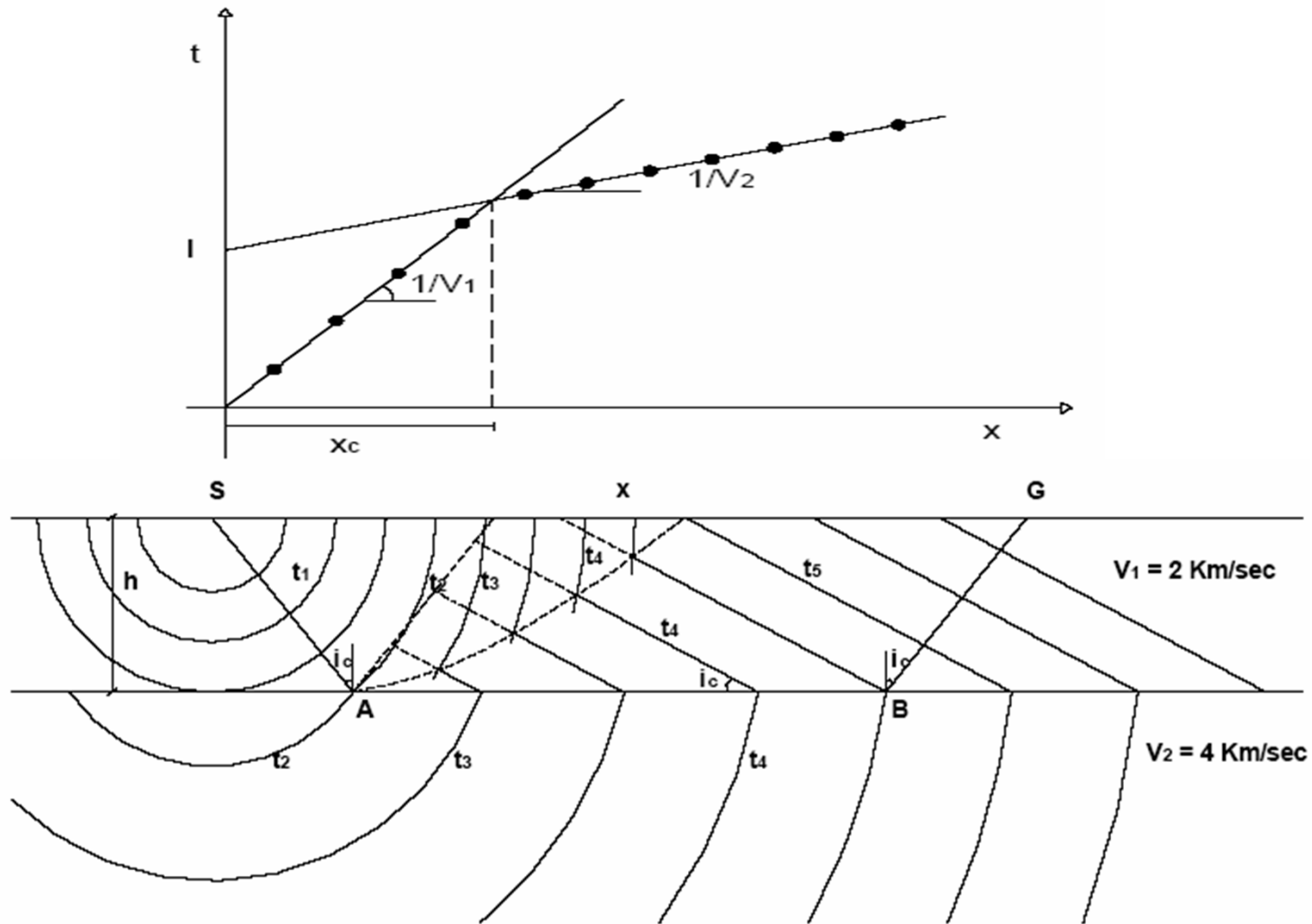
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} = \frac{\sin \theta_3}{v_3} = p$$

Secondo la **Legge di Snell**, all'interfaccia tra due mezzi differenti il **rapporto** tra il seno dell'angolo del raggio incidente e la sua velocità rimane costante.



$$\frac{\sin \vartheta}{v} = \text{cost}$$

Modello di propagazione della perturbazione sismica



Tipi di sorgenti sismiche

- impulsive **verticali**

- massa battente
- massa oscillante (vibroscis, minivib)
- grave in caduta libera
- cannoncino (Minibang / Isotta / ecc.)
- esplosivo

- impulsive **orizzontali**

- traversina “zavorrata” / sollecitazione laterale
- piastra infissa verticalmente / sollecitazione laterale
- cuneo infisso / sollecitazione verticale

α = attenuazione del terreno (dipendente dal terreno e dalla frequenza di vibrazione)

$$\alpha = 2 \pi f D / V$$

[Massarsch et al. 1995]

f = frequenza

D = fattore di smorzamento del terreno (damping ratio)

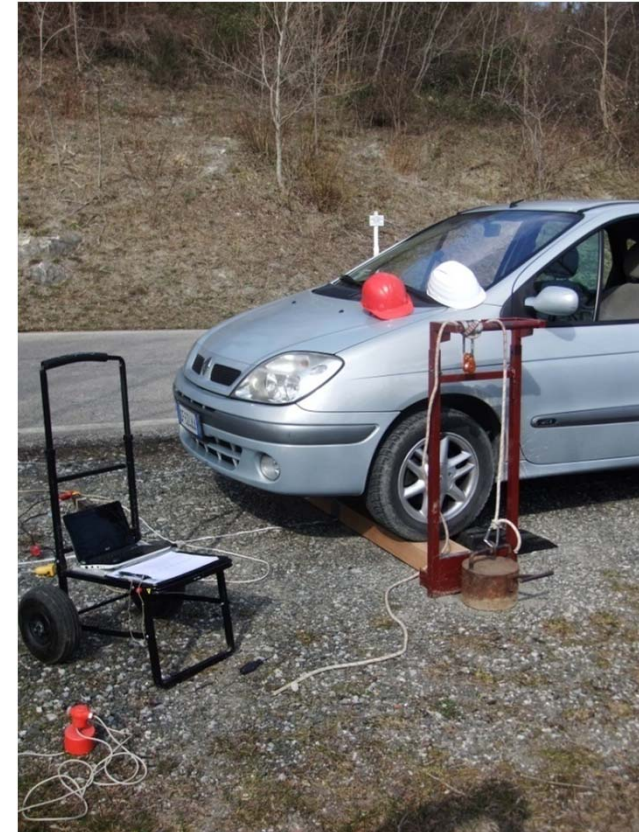
V = velocità di propagazione onda



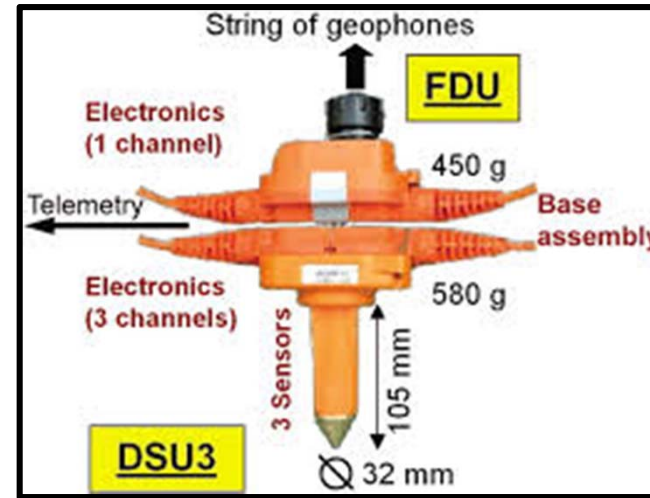
sorgenti sismiche verticali



sorgenti sismiche orizzontali



Ricevitori

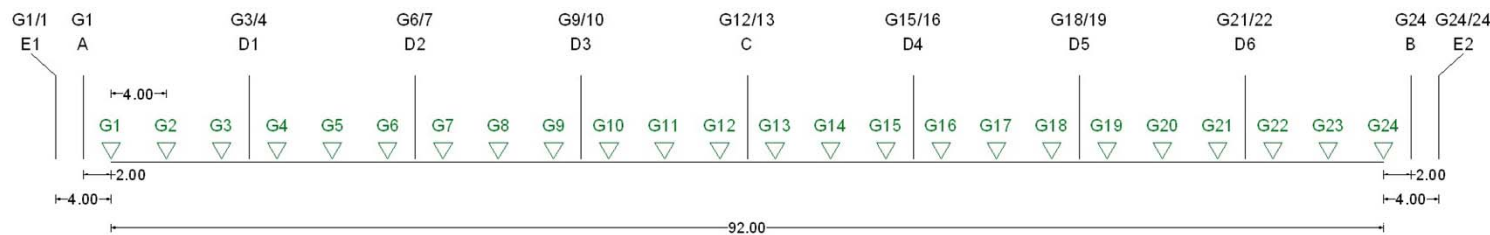


Geometria dello stendimento

E' importante operare con geometria il più possibile **lineare** e un intervallo geofonico **costante**, benché i software più recenti permettano di inserire qualsiasi tipo di geometria spaziale dei ricevitori e degli scoppi (x,y,z).

L'intervallo geofonico scelto deve essere **inversamente proporzionale** al grado di risoluzione che si vuole ottenere dalla prospezione sismica.

La **lunghezza** dello stendimento è sempre proporzionale alla **profondità** da raggiungere.



La profondità dell'indagine = lunghezza stendimento / 3-5

E' importante effettuare **minimo n.2 shot coniugati** (agli estremi dello stendimento) mentre il numero degli shots deve essere **proporzionale** al grado di **dettaglio** che si vuole raggiungere con l'investigazione.

Tipici parametri di acquisizione

Il numero di geofoni deve essere preferibilmente **superiore a 12**;

La **distanza intergeofonica** è solitamente compresa **tra 1 e 10 m**;

La tipologia dei sensori verticali (onde P) o orizzontali (onde S) è a **medio-bassa** frequenza di risonanza **4.5-14.0 Hz**;

La durata registrazione deve essere **non inferiore ai 250 ms**;

La frequenza di campionamento utilizzata è solitamente **superiore a 3000 Hz**;

Il numero di energizzazioni lungo la base può variare **da 7** per le elaborazioni in GRM **fino a 25** per quelle in tomografia;

Nel caso di registrazioni su profili **particolarmente estesi**, i canali richiedono un **guadagno crescente** dal punto di energizzazioni a quello più distante e l'impiego in fase di acquisizione o di processing di **operazioni di filtraggio** o procedure di **stacking** di differenti dataset (a volte è sufficiente anche la sola normalizzazione delle tracce al loro valore massimo).

Frequenza campionamento e risoluzione del rilievo sismico

La **frequenza** di campionamento del segnale, la **lunghezza** della registrazione e il **numero** di energizzazioni da eseguire lungo lo stendimento influenzano la risoluzione dei risultati dell'indagine sismica, e sono **progettate** in funzione dell'obiettivo da raggiungere.

Le caratteristiche strumentali, inoltre, sono scelte al fine di risolvere le informazioni del sottosuolo e per **superare le limitazioni** legate alla **bassa energia** della sorgente e ai fenomeni di **dissipazione** legati a fenomeni di ***spreading, attenuazione, scattering e aliasing***.

Frequenza di campionamento (f_c): viene scelta in modo da evitare il fenomeno dell'aliasing (es. con una frequenza di campionamento di 1000 Hz la frequenza di Nyquist risulta di 500 Hz, ben oltre l'intervallo di frequenze al di sopra delle quali generalmente si lavora [0-200 Hz]).

Intervallo di campionamento: $dt = 1/f_c$;

Durata di registrazione: $T = dt \cdot N$ (n° max di campioni);

Risoluzione spettrale: $df = 1/T$;

Frequenza di Aliasing: $F_{nyquist} = f_c/2 = 1/(2 \cdot dt)$.

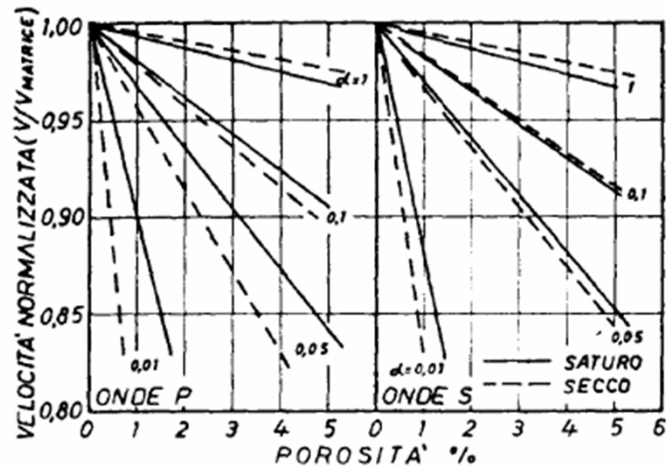
Velocità onde sismiche e parametri elastici

$$\begin{aligned}
 & \bullet E_v = \rho \cdot \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) & \frac{V_R}{V_S} &= \frac{0.862 + 1.14 \cdot \nu}{1 + \nu} & \nu &= \frac{0.5 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S} \right)}{\left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2} \\
 & \bullet E = 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu) & \frac{V_S}{V_p} &= \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}} & & \\
 & \bullet \frac{V_R}{V_S} = \frac{0.862 + 1.14 \cdot \nu}{1 + \nu} & E_{ed} &= \rho V_P^2 & G &= \rho V_S^2
 \end{aligned}$$

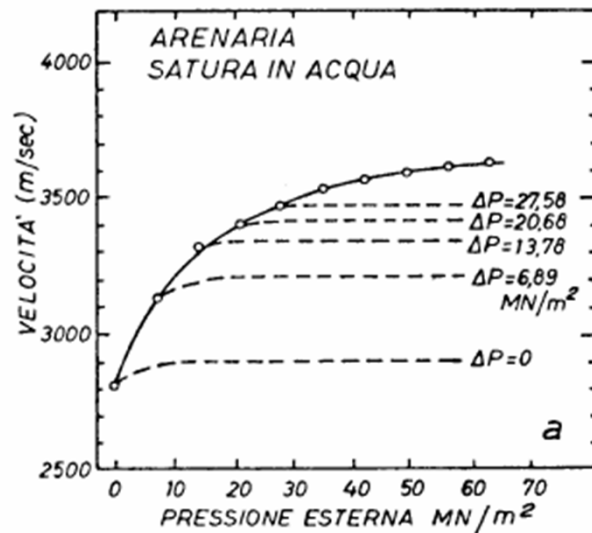
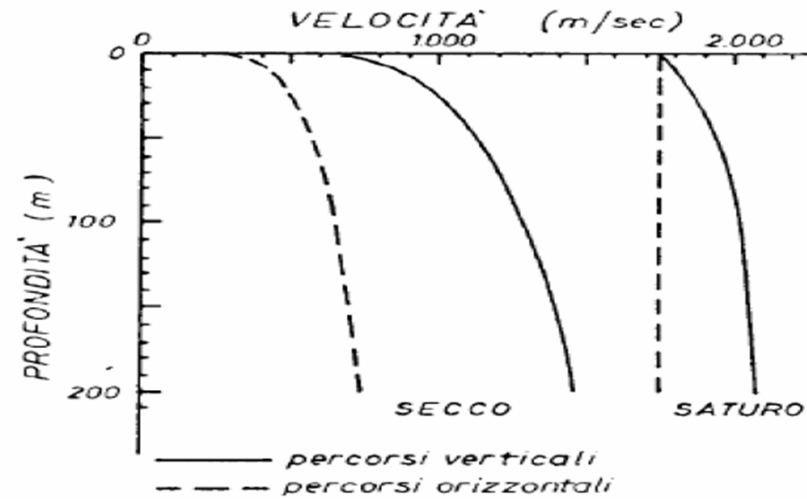
con

ρ = densità del mezzo; ν = coefficiente di Poisson; G = modulo di taglio

Variabilità delle velocità delle onde sismiche



DA TOKSOZ, CHENG E TINUR 1976



$$V = K(ZT)^{1/6}$$

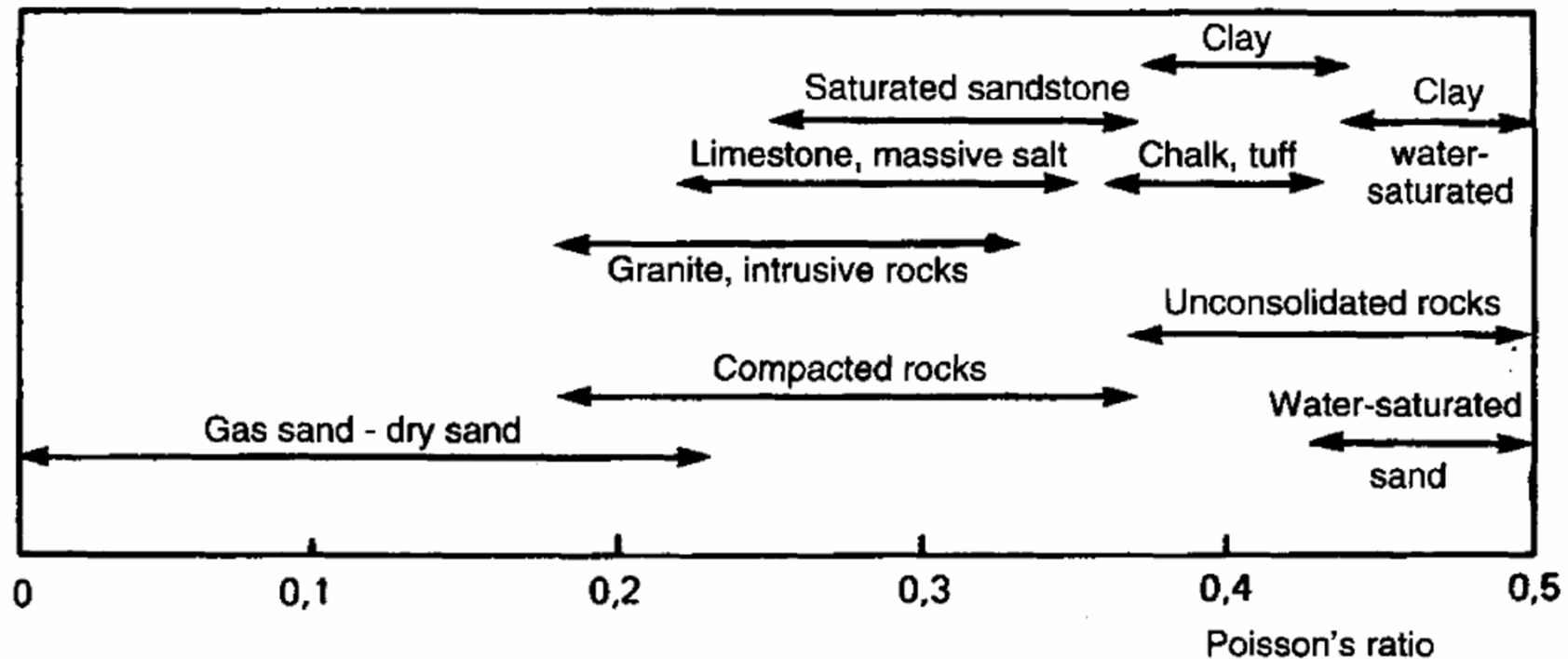
n cui Z è la profondità (in ft), T l'età della roccia in anni e K una costante

Valori caratteristici dei terreni (Head e Jardine, 1992)

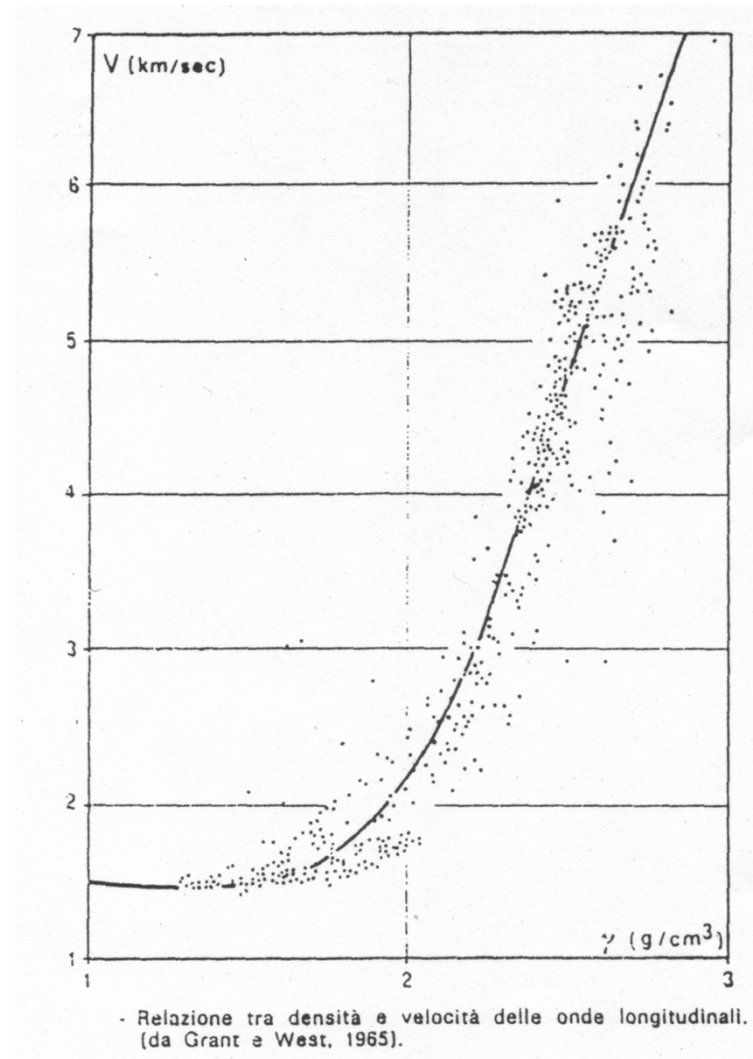
Materiale	Velocità sismiche in sito (a piccole deformazioni) (m/s)		Coefficiente di Poisson ν	Densità (g/cm^3) ρ	Modulo di elasticità tangenziale (MN/m^2) G	
	V_p	V_s				
Sabbia (in prossimità della superficie)	Sciolta	1450-1550 (180-450)	100-250	0.48-0.50 (0.3-0.35)	1.5-1.8	15-110
	Media	1500-1750 (320-650)	200-350	0.47-0.49 (0.2-0.3)	1.7-2.1	70-250
	Addensata	1700-2000 (550-1300)	350-700	0.45-0.48 (0.15-0.3)	1.9-2.2	230-1000
Argilla	Moder. consist.	1450-1550	80-180	0.47-0.5	1.6-2.0	10-65
	Consistente	1500-1700	180-300	0.47-0.5	1.7-2.1	55-190
	Molto consist.	1600-1900	300-500	0.47-0.5	1.8-2.3	160-450
Arenaria e scisti non alterati	1500-4000	800-2000	0.25-0.35	2.0-2.4	1300-9500	
Calcare	2000-6000	1200-3000	0.25-0.35	1.8-2.5	2600-20000	
Roccia cristallina o metamorfica non alterata	3500-7000	2000-3500	0.25-0.30	2.2-2.6	8500-32000	

Natura dei depositi in relazione a V_p , V_s e coefficiente di Poisson.

$$v = (1/2) [(V_p/V_s)^2 - 2] / [(V_p/V_s)^2 - 1]$$



Relazione velocità onde P – densità



SISMOGRAMMI DI CAMPAGNA



Comune di **Spoleto**



conspoieto
consorzio operatori turistici



ORDINE DEI GEOLOGI DELLA REGIONE UMBRIA

Tecniche di elaborazione e interpretazione dei dati

La corretta **restituzione grafica** dei sismogrammi agevola **l'interpretazione** del segnale attraverso tecniche che consentono di individuare l'istante di “**primo arrivo**” del treno d'onda.

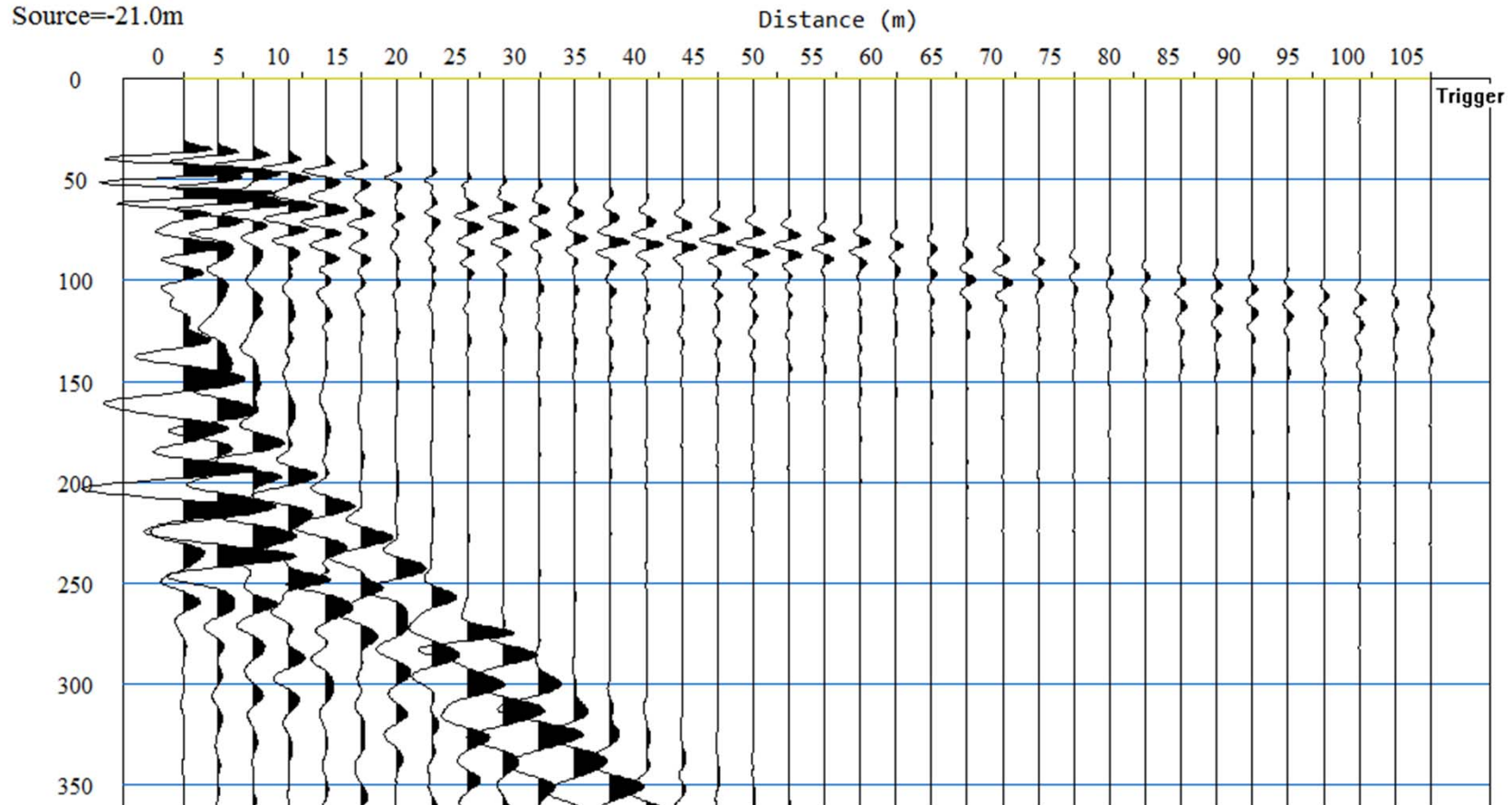
La scelta della **durata della registrazione** consente di individuare i primi arrivi anche a offset maggiori e deve essere dimensionato sulla base della **velocità** dei terreni e della **lunghezza** dello stendimento.

La **frequenza** di campionamento, opportunamente scelta, migliora la **risoluzione temporale** delle tracce sismiche e agevola la fase di **picking**.

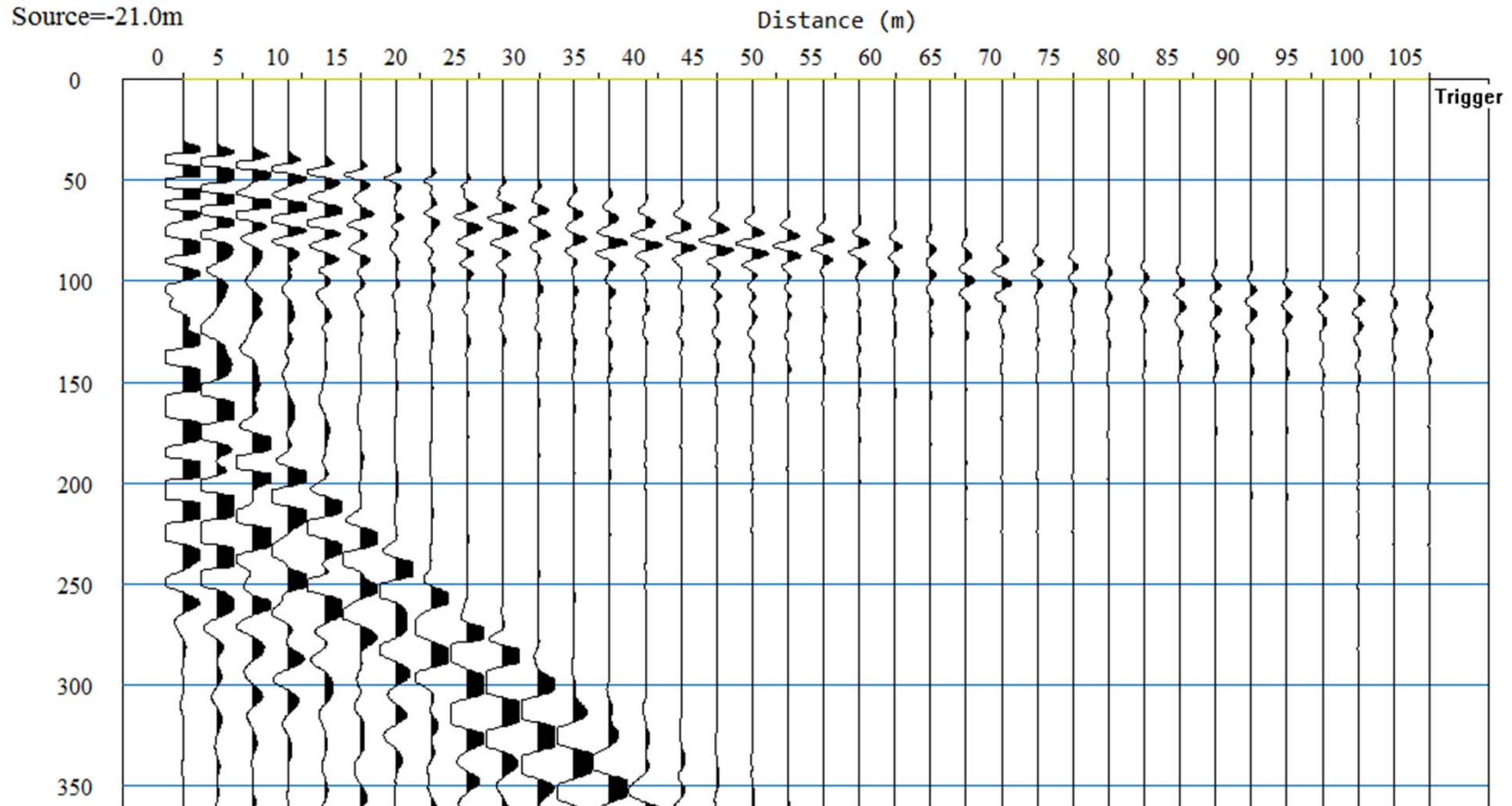
Altre funzioni come la **scalatura**, **l'amplificazione**, il **filtraggio**, lo **stacking**, la rappresentazione **cromatica** delle tracce di campagna etc, aiutano a porre in evidenza la porzione di segnale ricercata.

Onde P - Visualizzazione "normale"

(risalto della semionda positiva scalatura dei segnali sul valore massimo totale)

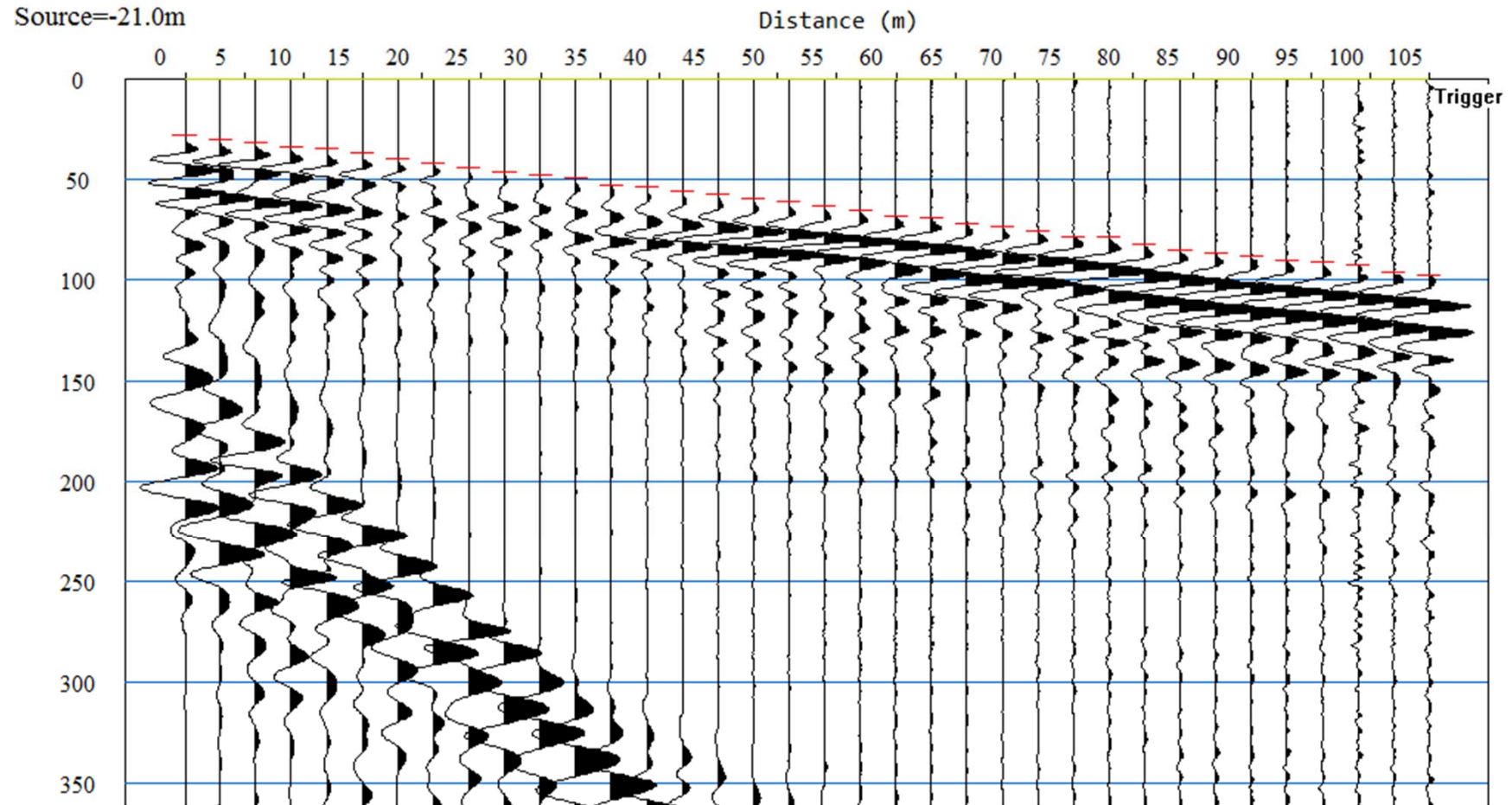


Onde P - Visualizzazione con “clipping” (risalto della semionda positiva taglio dei valori oltre una certa soglia)



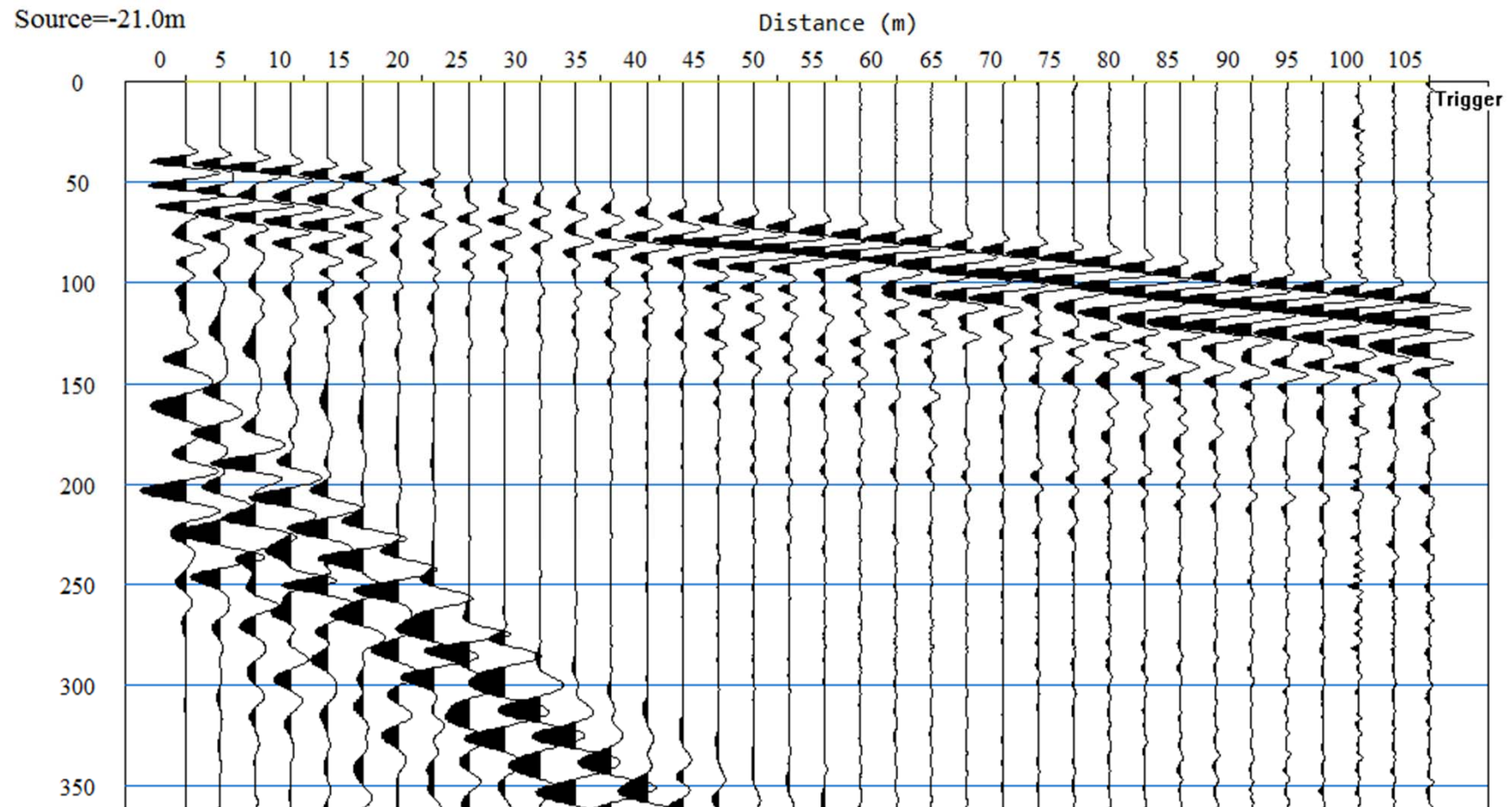
Onde P - Visualizzazione “normalizzata”

(risalto della semionda positiva scalatura segnali sul valore massimo di traccia)

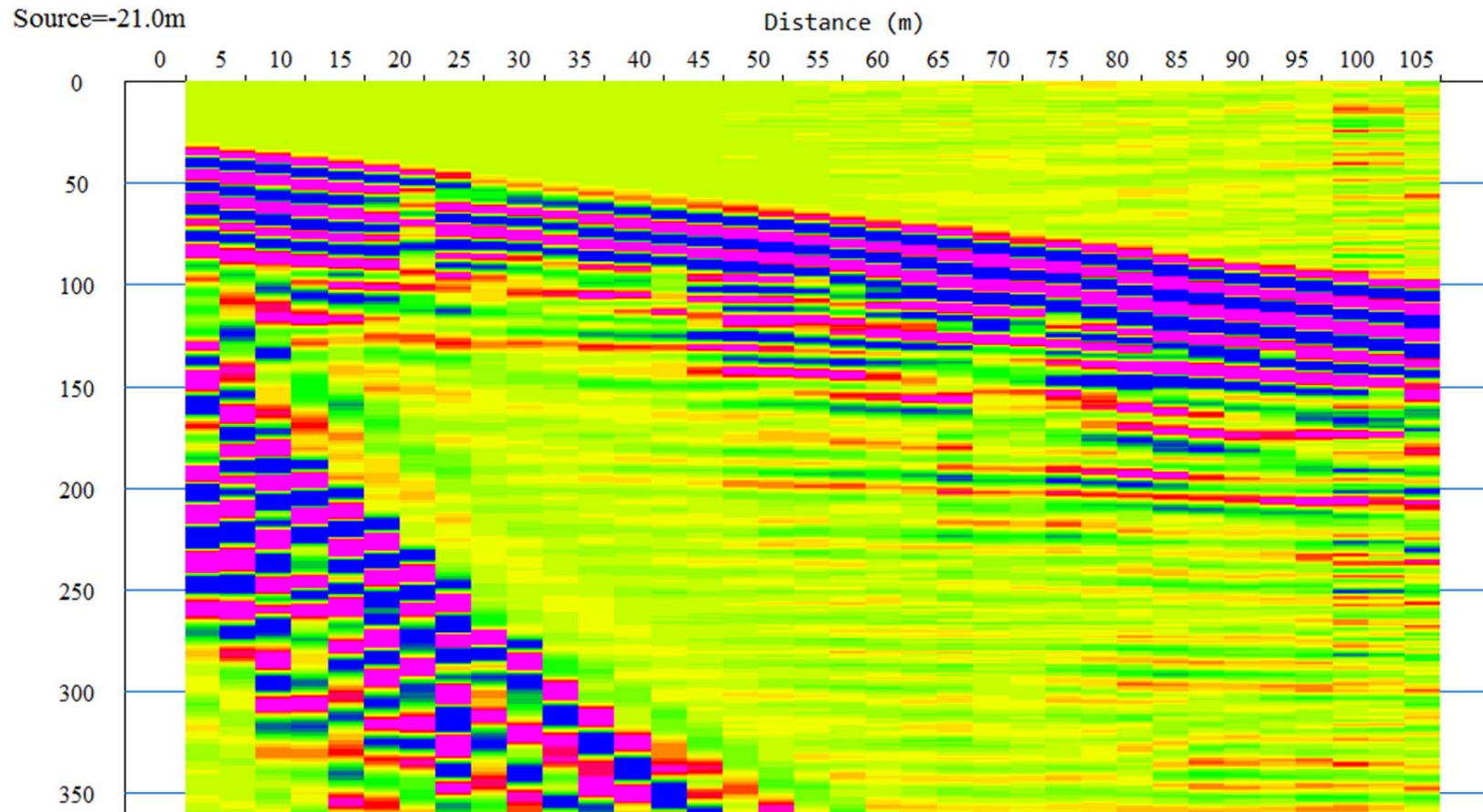


Onde P - Visualizzazione “inversa”

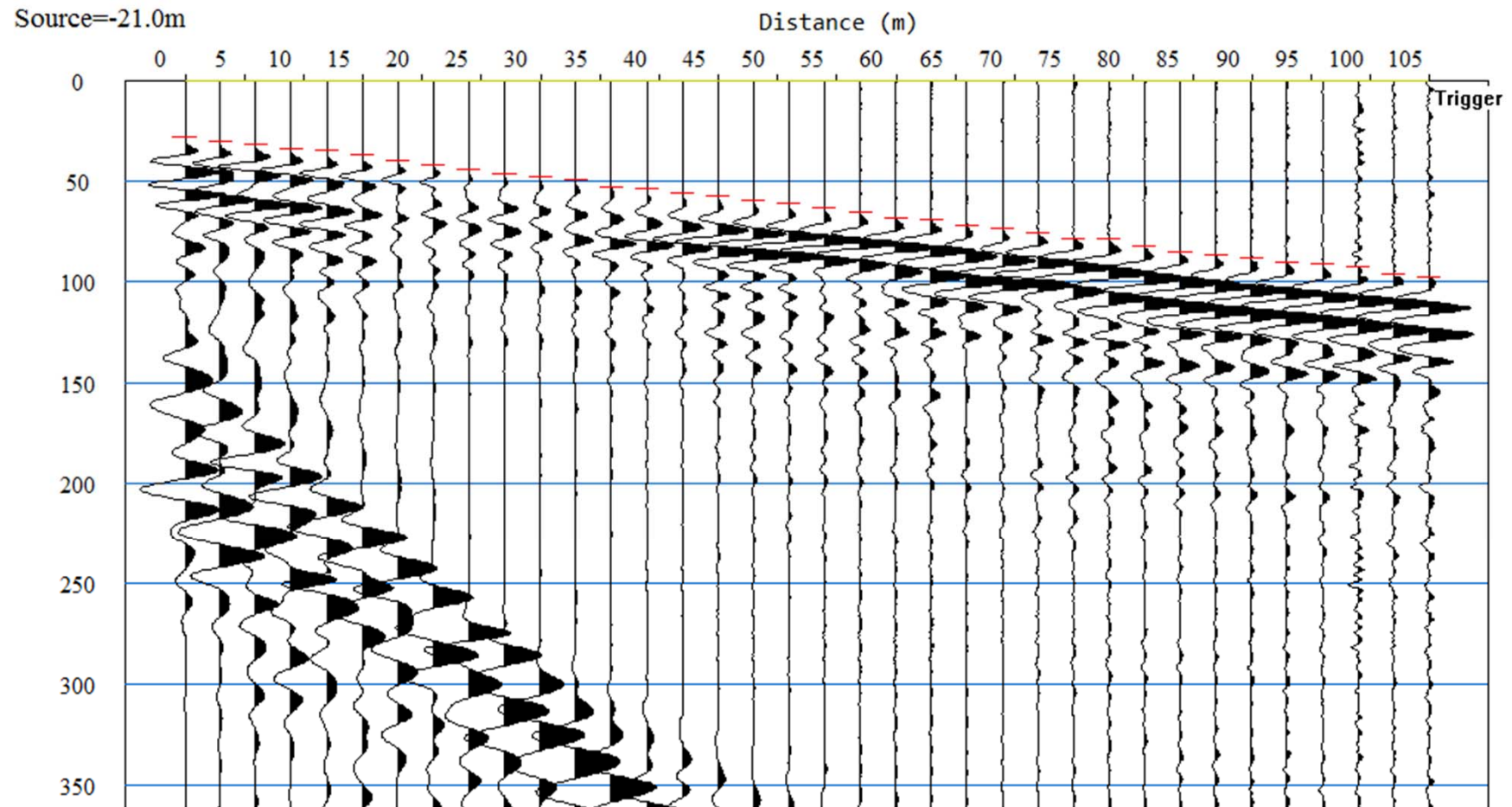
(risalto della semionda negativa scalatura segnali sul valore massimo di traccia)



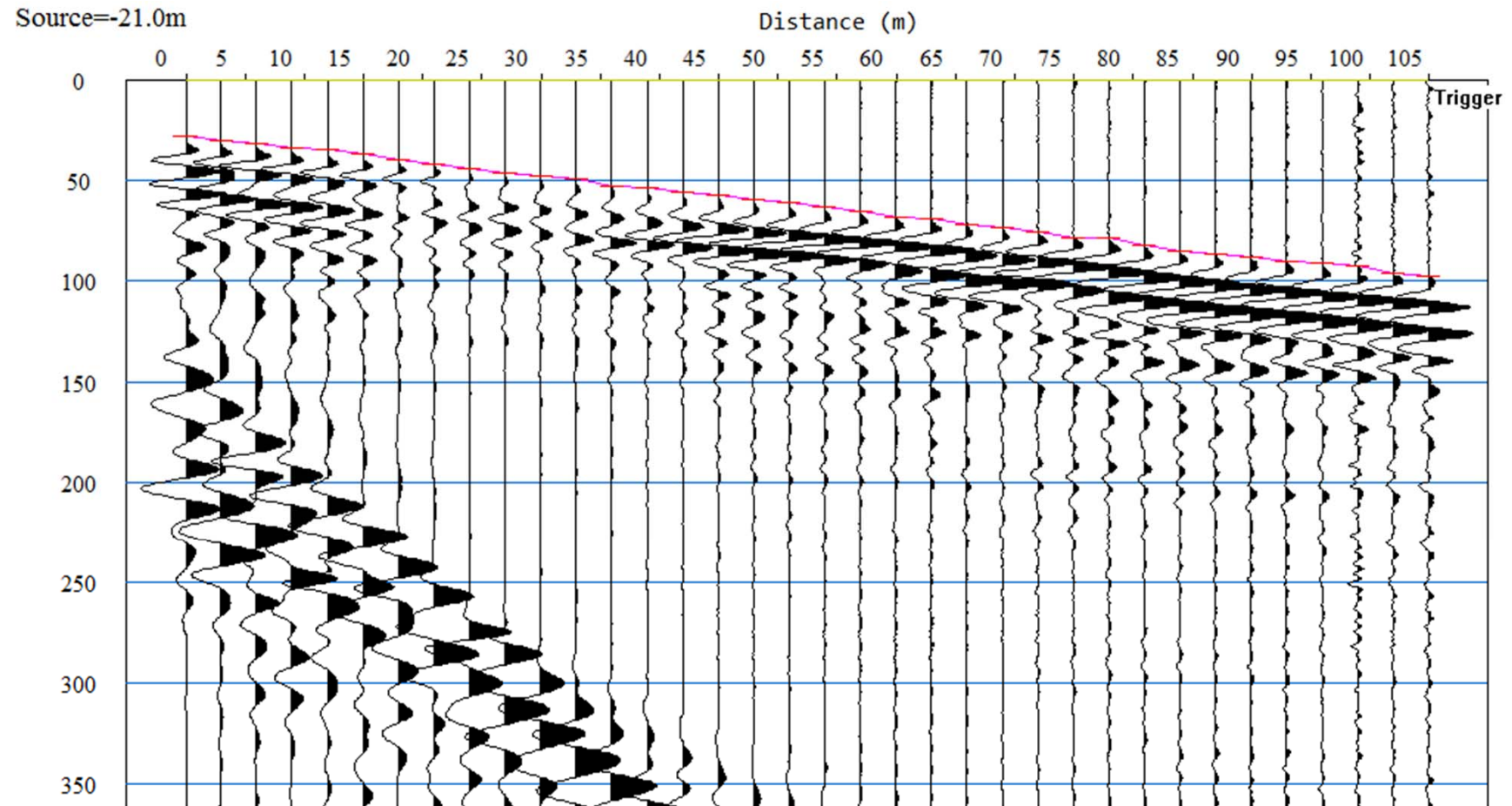
Onde P - Visualizzazione "point mode" (risalto delle fasi d'onda con colori differenti)



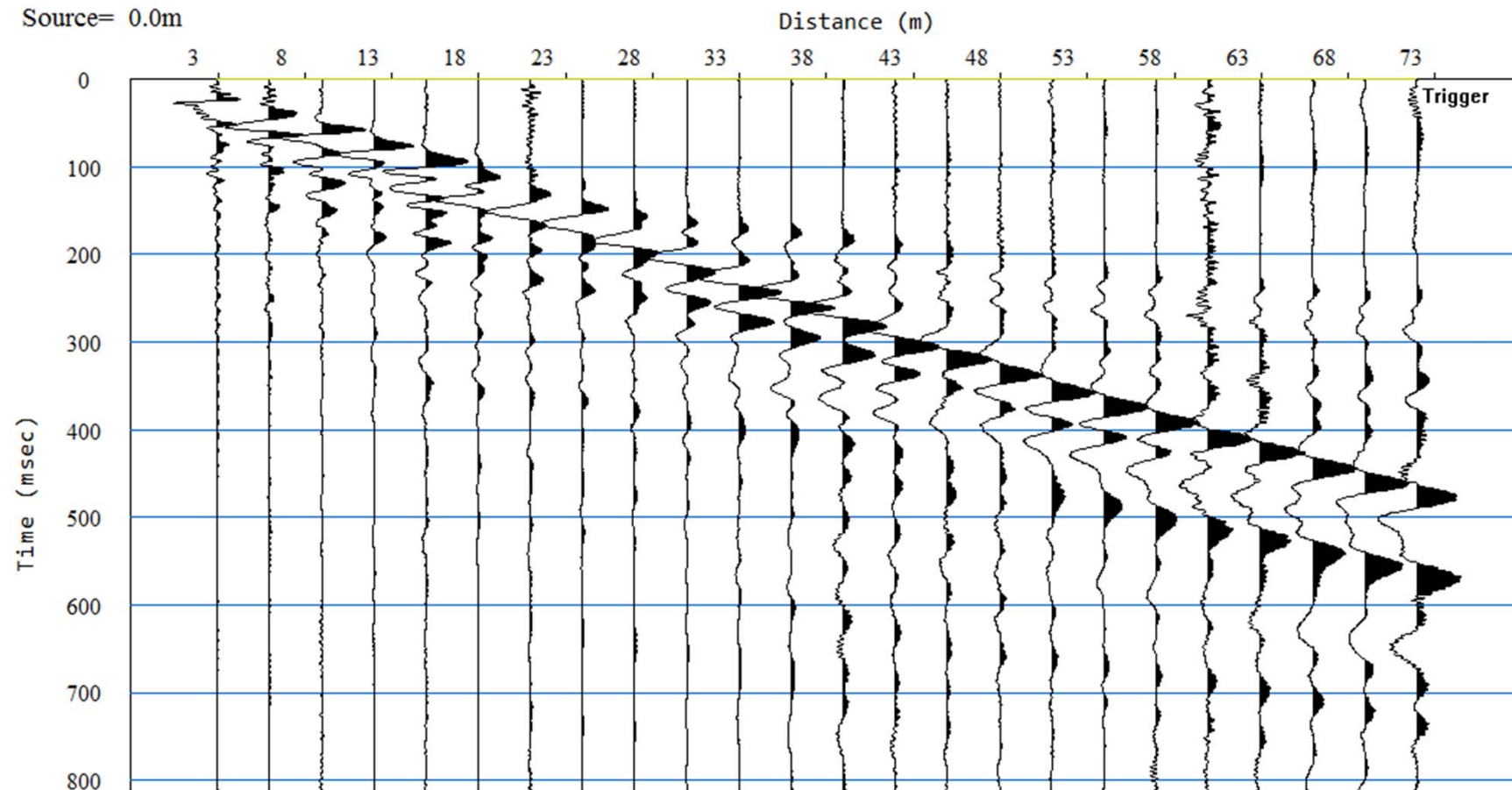
Onde P - PICKING



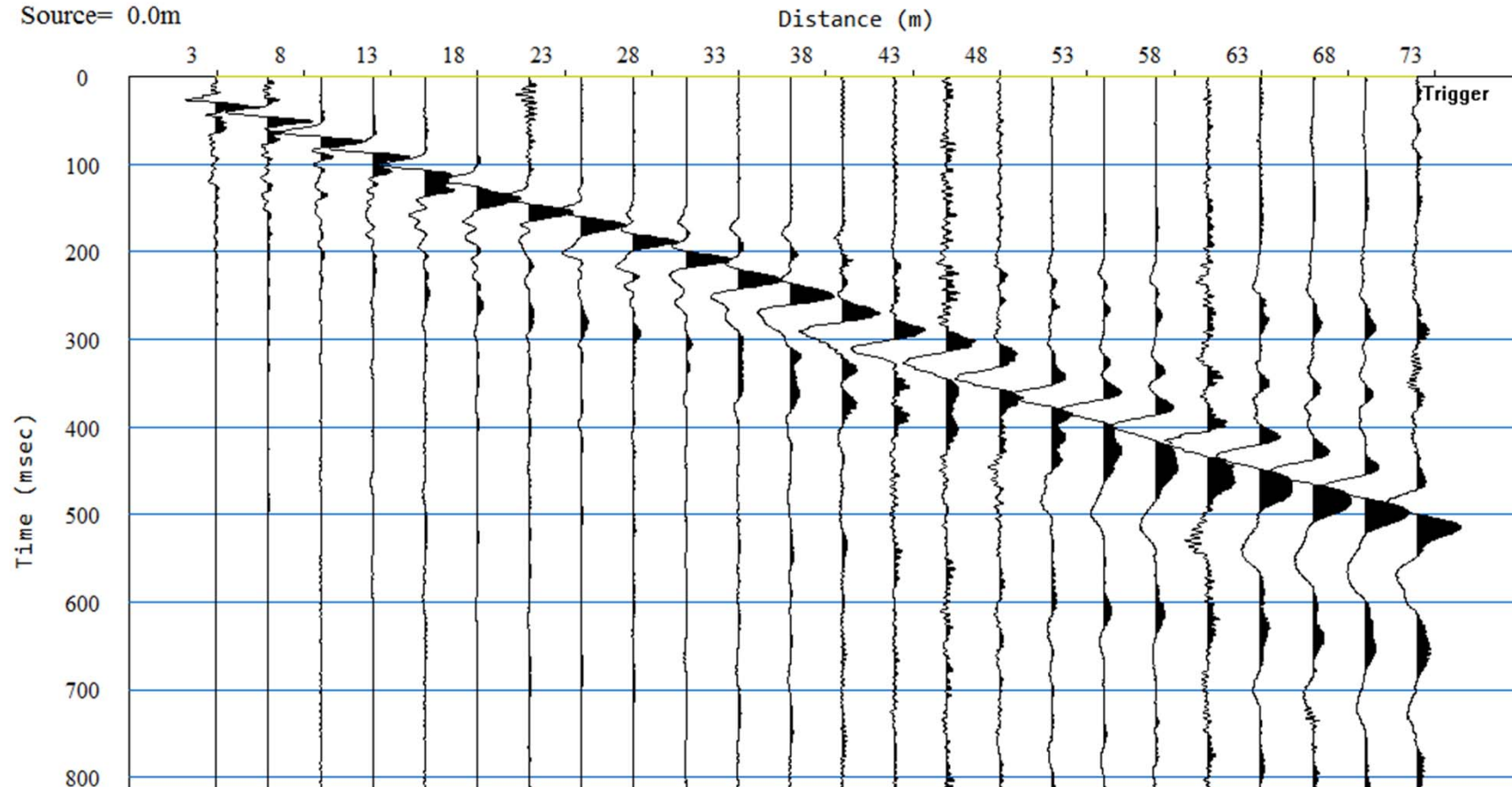
Onde P - DROMOCRONA



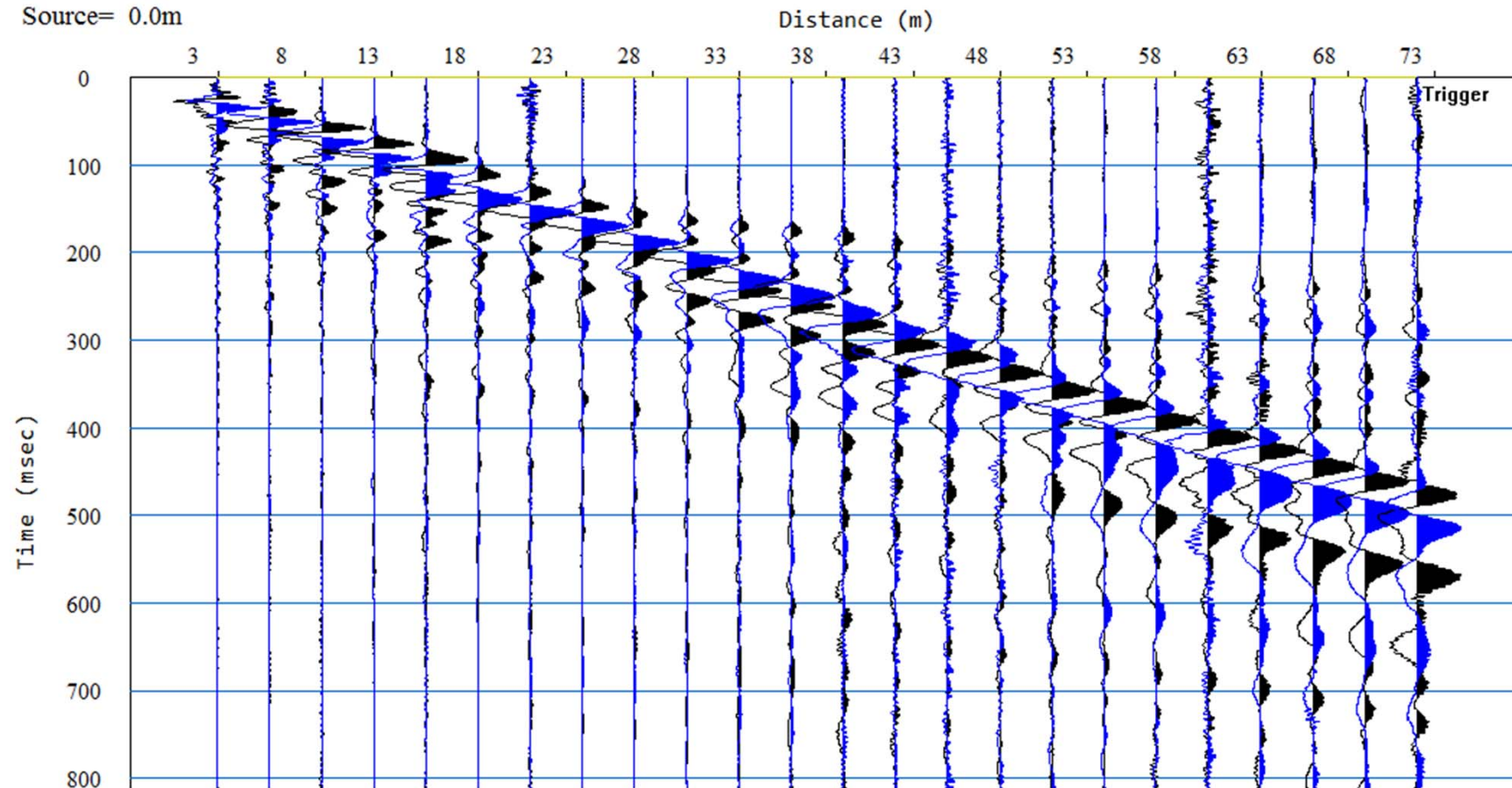
Onde SH - Visualizzazione “normalizzata” (sollecitazione destra – mazza su traversina)



Onde SH - Visualizzazione “normalizzata” (sollecitazione sinistra – mazza su traversina)



Onde SH - Visualizzazione “normalizzata” (sovrapposizione)



TECNICHE DI INTERPRETAZIONE GRAFICA SPEDITIVA



Comune di **Spoleto**



conspoletto
consorzio operatori turistici



ORDINE DEI GEOLOGI DELLA REGIONE UMBRIA

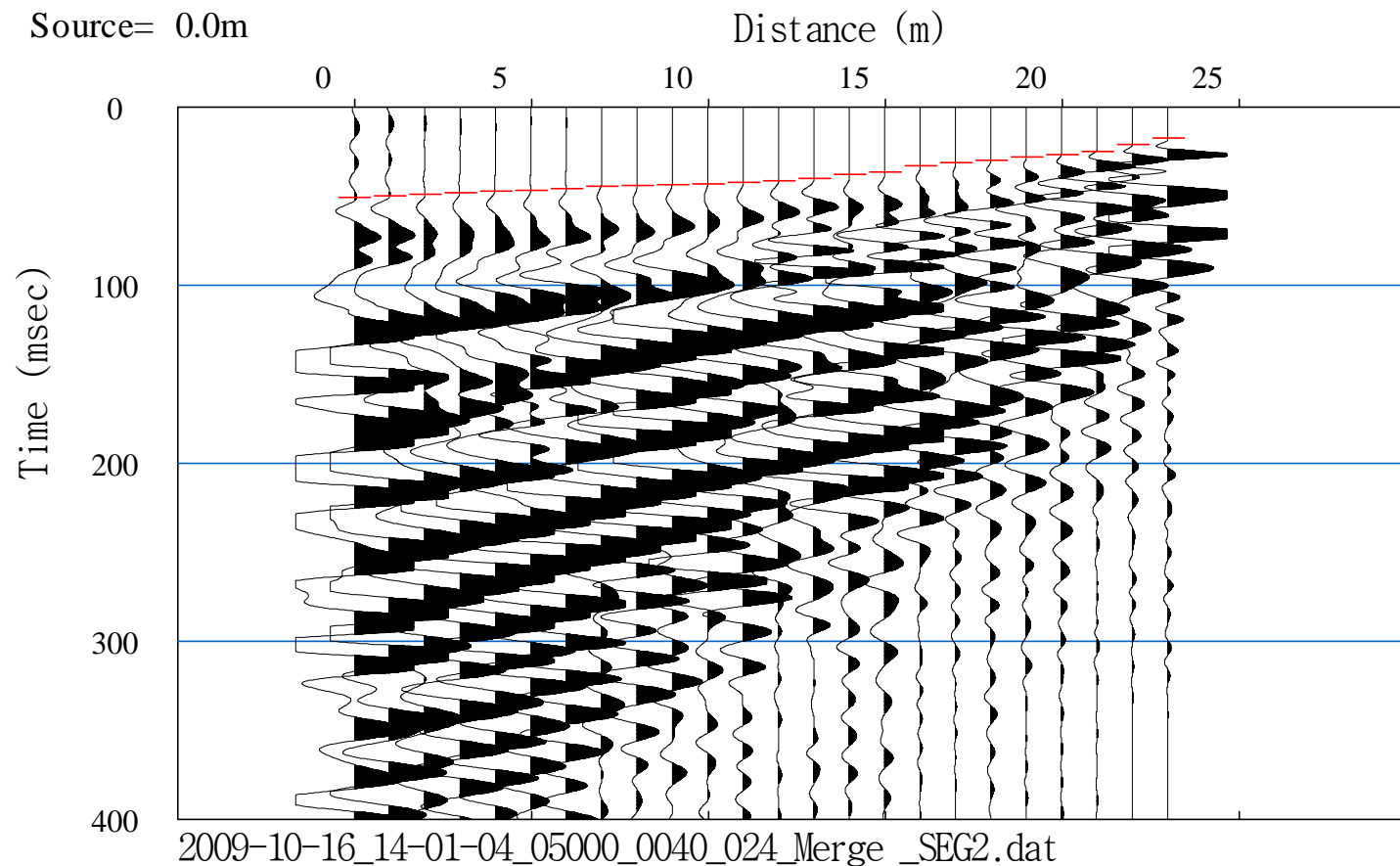
interpretazione “convenzionale”

METODO DELLE INTERCETTE

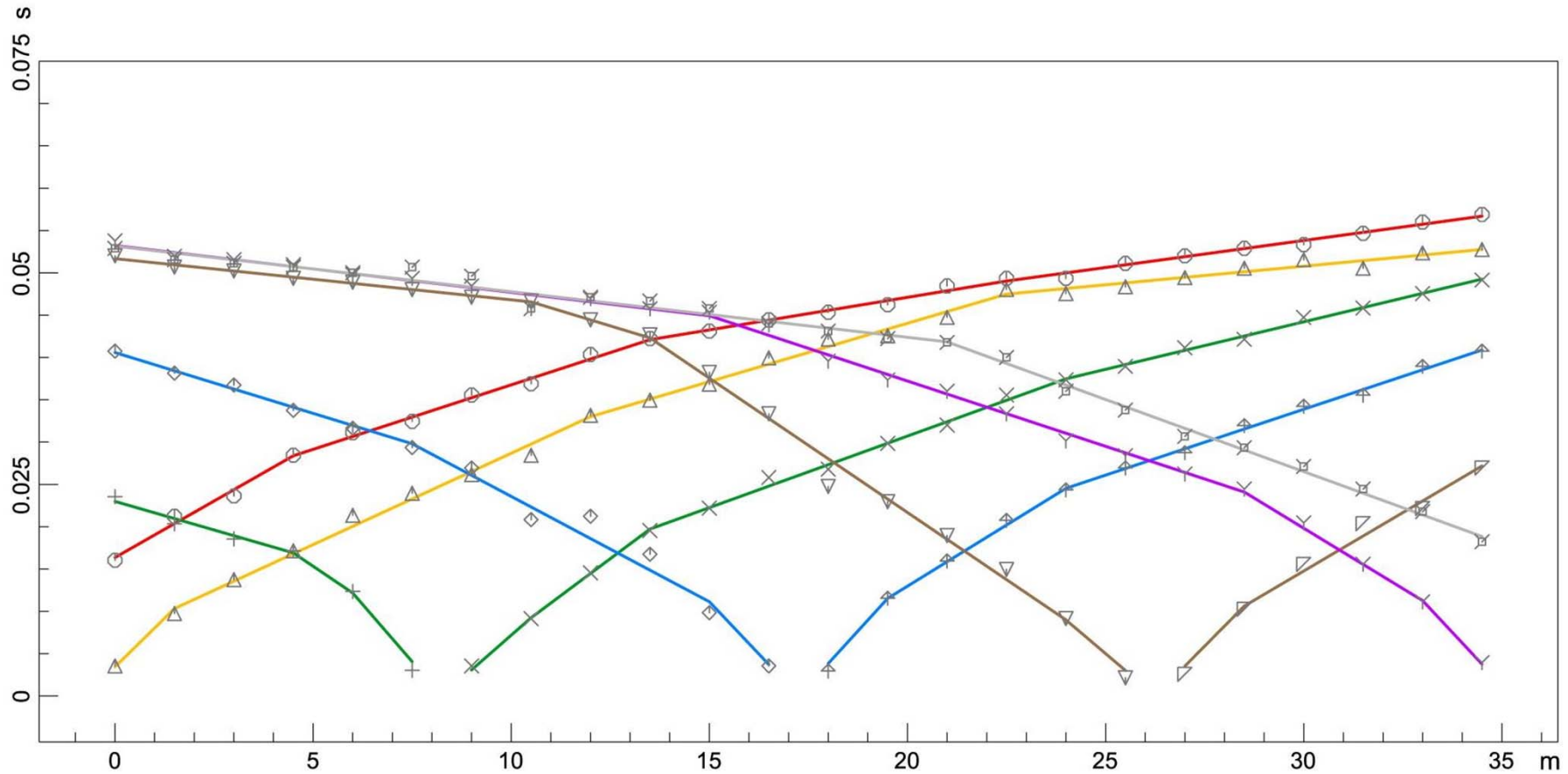
Condizioni:

- a) velocità crescenti con la profondità**
- b) rifrattori con limitata ed uniforme inclinazione**
- c) velocità degli orizzonti arealmente omogenea**

FASE 1 – picking dei sismogrammi



FASE 2 – costruzione dromocrone



FASE 3 – operazioni di calcolo

$$V_1 = m_1 = d_2 - d_1 / t_2 - t_1$$

V_1 velocità del primo orizzonte sismico

m_1 coefficiente angolare curva di interpolazione lineare della dromocrona di riferimento

d_1 e d_2 distanze geofoniche iniziale e finale di registrazione della dromocrona di riferimento

t_1 e t_2 tempi di ritardo iniziale e finale della dromocrona di riferimento.

$$V_2 = m_2 = d_3 - d_2 / t_3 - t_2$$

V_2 velocità del secondo orizzonte sismico

m_2 coefficiente angolare curva di interpolazione lineare della dromocrona di riferimento

d_2 e d_3 distanze geofoniche iniziale e finale di registrazione della dromocrona di riferimento

t_2 e t_3 tempi di ritardo iniziale e finale della dromocrona di riferimento.

$$H_1 = d_2/2 \times (V_2 - V_1 / V_2 + V_1)^{0.5}$$

H_1 spessore primo orizzonte sismico

d_2 distanza geofonica al punto di “ginocchio”

V_1 e V_2 velocità del primo e secondo orizzonte sismico

FASE 3 – operazioni di calcolo

$$V_3 = m_3 = d_4 - d_3 / t_4 - t_3$$

V_3 velocità del terzo orizzonte sismico

m_3 coefficiente angolare curva di interpolazione lineare della dromocrona di riferimento

d_3 e d_4 distanze geofoniche iniziale e finale di registrazione della dromocrona di riferimento

t_3 e t_4 tempi di ritardo iniziale e finale della dromocrona di riferimento

$$H_2 = d_3/2 \times (V_3 - V_2 / V_3 + V_2)^{0.5}$$

H_1 spessore primo orizzonte sismico

d_2 distanza geofonica al punto di “ginocchio”

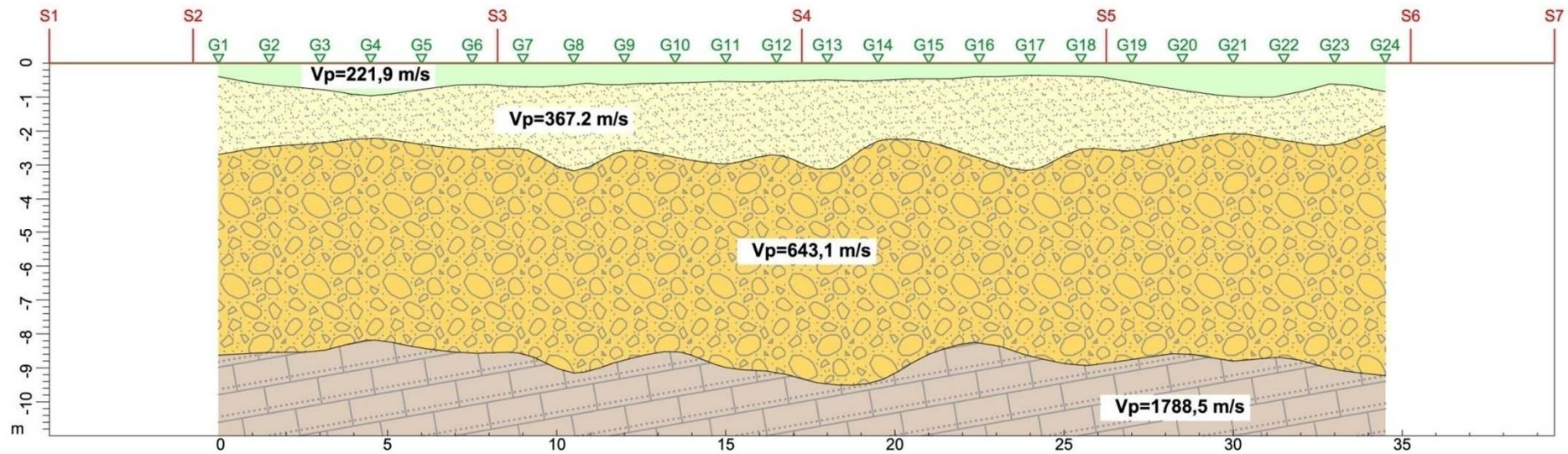
V_1 e V_2 velocità del primo e secondo orizzonte sismico

$$\text{Profondità II° rifrattore} = 5/6 \times H_1 + H_2$$

H_1 spessore primo orizzonte sismico

H_2 spessore secondo orizzonte sismico

FASE 4 – sezione sismostratigrafica



cenni su altre metodologie di analisi

metodo del DT – plus minus

VANTAGGI

-potenzialità di descrivere variazioni laterali di velocità degli orizzonti discriminati nel sottosuolo lungo la sezione di analisi

CONDIZIONI DI ANALISI

- velocità crescenti con la profondità
- rifratore di analisi con lievi inclinazioni ($< 10^\circ$)
- significativo contrasto di rigidità al substrato

metodo del delay-times

VANTAGGI

- potenzialità di descrivere in dettaglio morfologie del rifrattore di base delle coperture e di successivi orizzonti del sottosuolo
- possibilità di effettuare determinazioni di maggiore risoluzione del valore medio di velocità degli orizzonti di base ai rifrattori di analisi.

CONDIZIONI DI ANALISI

- velocità crescenti con la profondità
- rifrattore di analisi con inclinazione non superiore ai 20°
- velocità degli orizzonti arealmente omogenea
- significativo contrasto di rigidità al substrato

metodo reciproco

VANTAGGI

- potenzialità di descrivere in dettaglio morfologie del rifrattore di base delle coperture e di successivi orizzonti del sottosuolo
- possibilità di effettuare determinazioni di maggiore risoluzione del valore medio di velocità degli orizzonti di base ai rifrattori di analisi
- possibilità di descrivere differenze laterali del valore di velocità degli orizzonti discriminati nel sottosuolo in un medio range di variazione.

CONDIZIONI DI ANALISI

- velocità crescenti con la profondità
- rifrattore di analisi con inclinazione non superiore ai 20°

metodo reciproco generalizzato

VANTAGGI

- potenzialità di descrivere in dettaglio morfologie anche frastagliate del rifrattore di base delle coperture e di successivi orizzonti del sottosuolo
- possibilità di effettuare determinazioni del valore medio di velocità degli orizzonti e della loro variazione laterale lungo la sezione sismica.

CONDIZIONI DI ANALISI

- velocità crescenti con la profondità
- necessità di acquisire dati sovrabbondanti lungo il profilo di analisi

tecniche tomografiche

TIPOLOGIA

- analisi condotta mediante la definizione di un modello preliminare di velocità che si modifica iterativamente per approssimare il modello stratigrafico indagato
- restituzione di modelli sismo-stratigrafici “compatibili” ma non necessariamente “reali”

CONDIZIONI DI ANALISI

- necessità di acquisire dati sovrabbondanti lungo il profilo mediante energizzazioni multiple e/o impiego di un elevato numero di canali
- elevati tempi di processamento del dato per restituzioni di sufficiente compatibilità e necessità di validazione dei risultati mediante tecniche “tradizionali” di analisi
- tecnica dipendente dal grado di smoothing del segnale che influenza la reale geometria del rifrattore.

alcuni software di elaborazione

- Easy Refraction § www.radepro.com
- Geogiga DW Tomo * / Refractor # www.geogiga.com
- Geopsy (elab1D model) www.geopsy.org
- GRM § / Gremix # / IXRefrax www.interpex.com
- Intersism § www.geoandsoft.com
- Opendect www.opendect.org
- Plusdol \$ / Interdol \$ www.dolfrang.altervista.org
- PSLAB § www.mae-srl.it
- Rayfract * www.rayfract.com
- RefrexW www.sandmeier-geo.de
- RPeng § www.rp-eng.it
- SeisImager 2D * www.oyo.com
- SeisOpt Pro/2D * www.optimsoftware.com
- Smart Refract § www.vs30.it
- WinSism § www.geo2X.com

* elab.tomografica

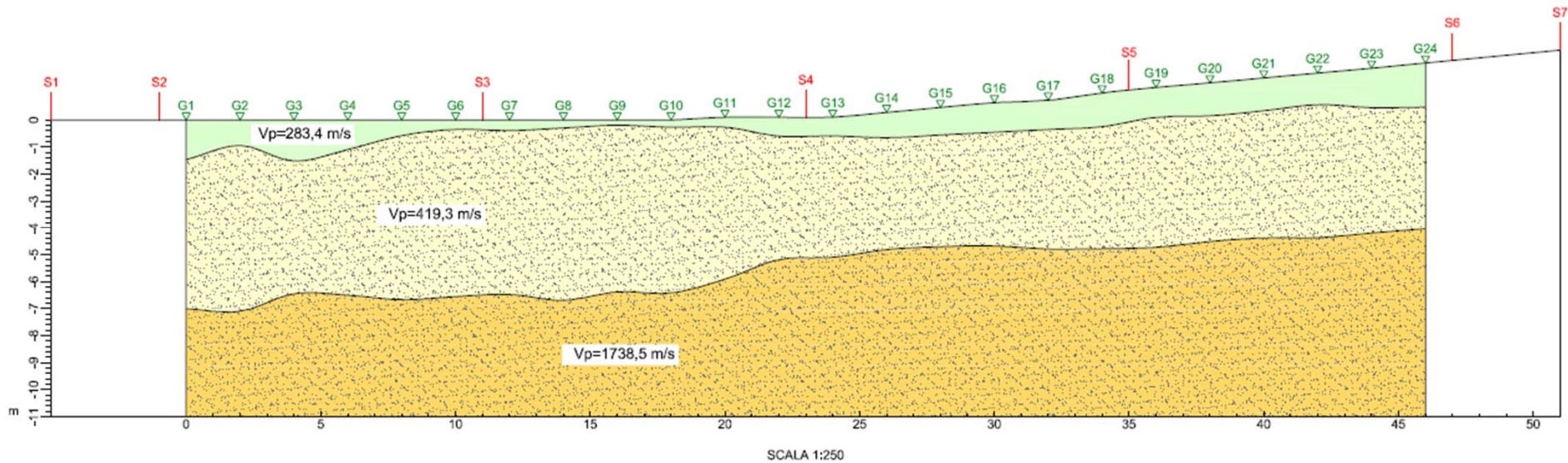
§ elab.GRM

\$ elab.intercette

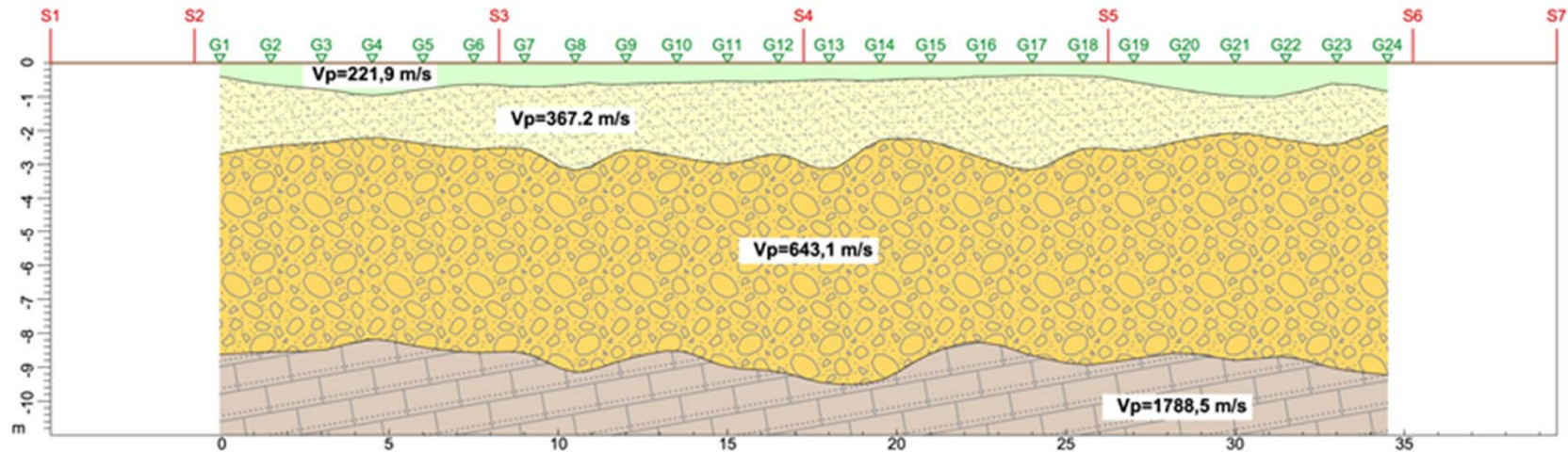
elab. intercette - delaytime – ABC – GRM

CASE HISTORIES

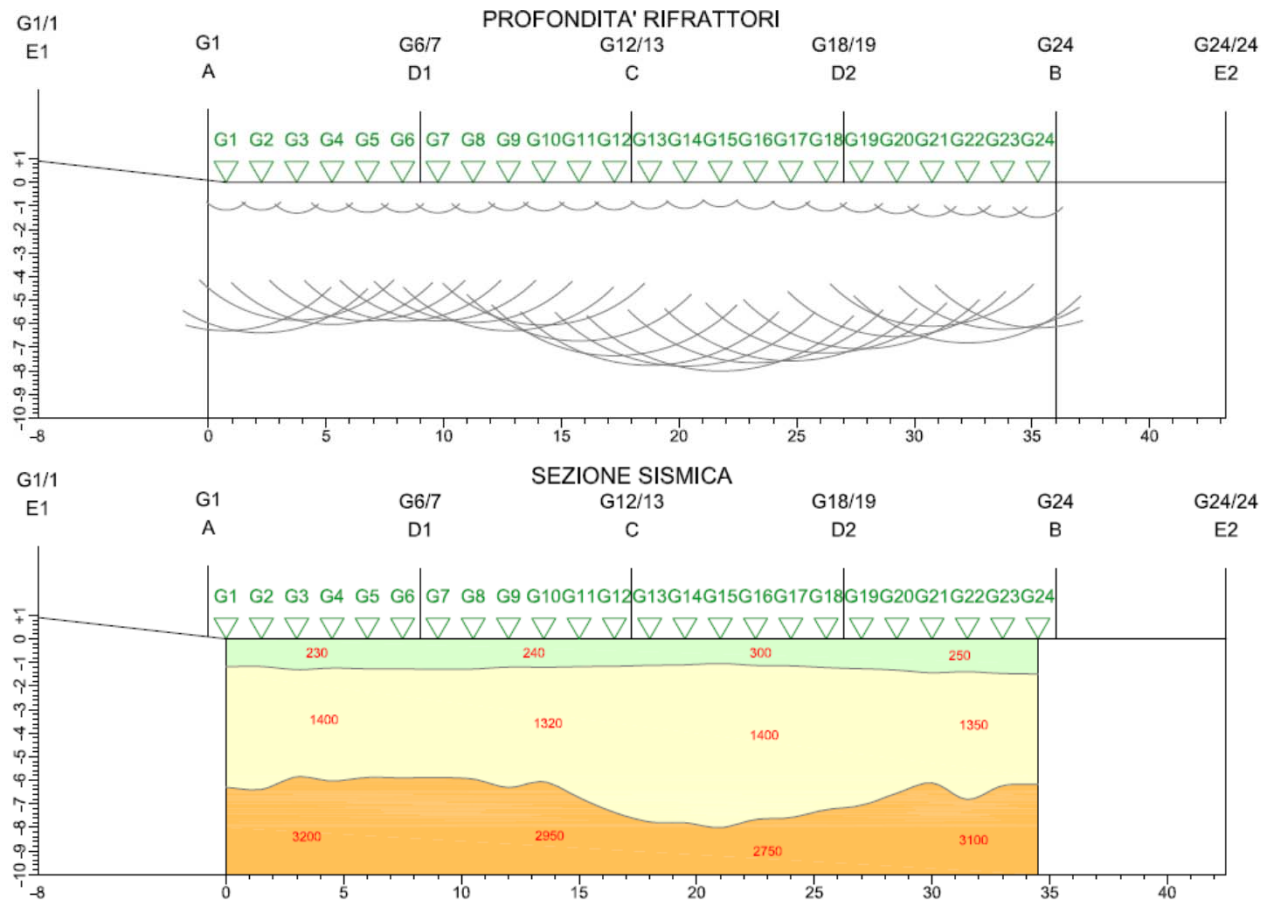
Analisi sismica su terreni sabbiosi pliocenici



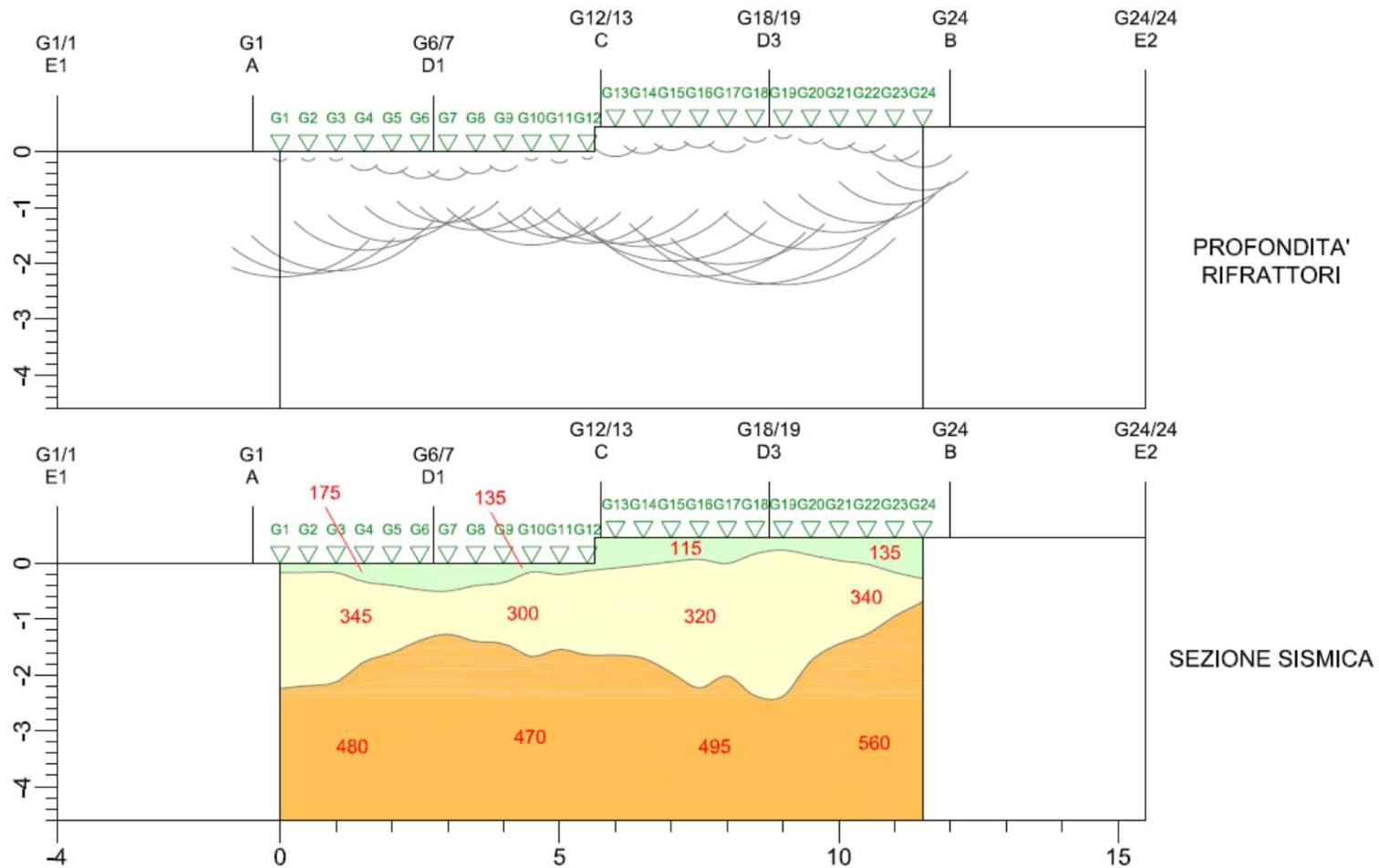
Analisi sismica su terreni sabbiosi di spiaggia ricoprenti ghiaie di versante su substrato arenaceo regolitico



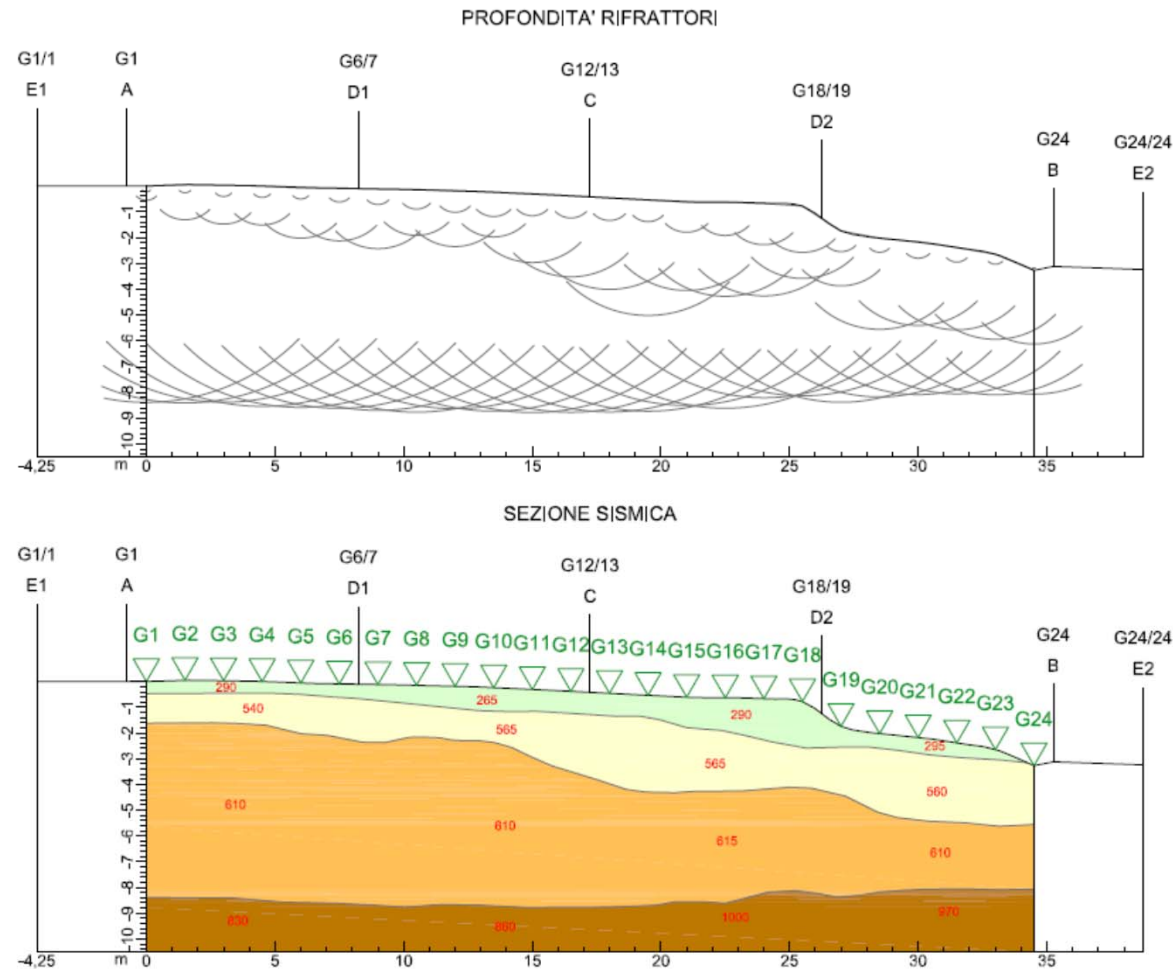
Analisi sismica su terreni sabbiosi ricoprenti un substrato di tipo arenaceo



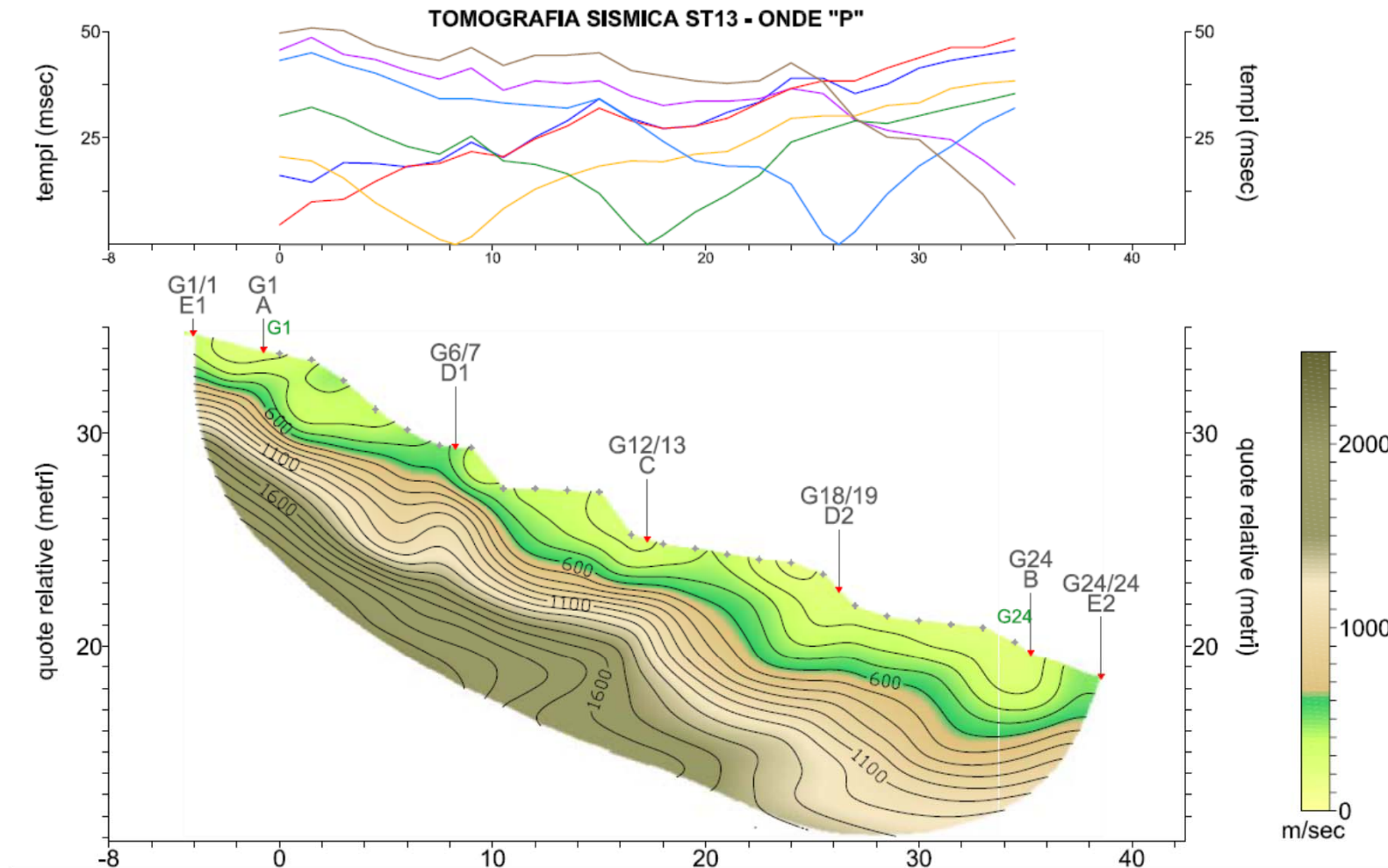
Analisi sismica su terreni sabbioso-argillosi ricoprenti ghiaie e sabbie di versante



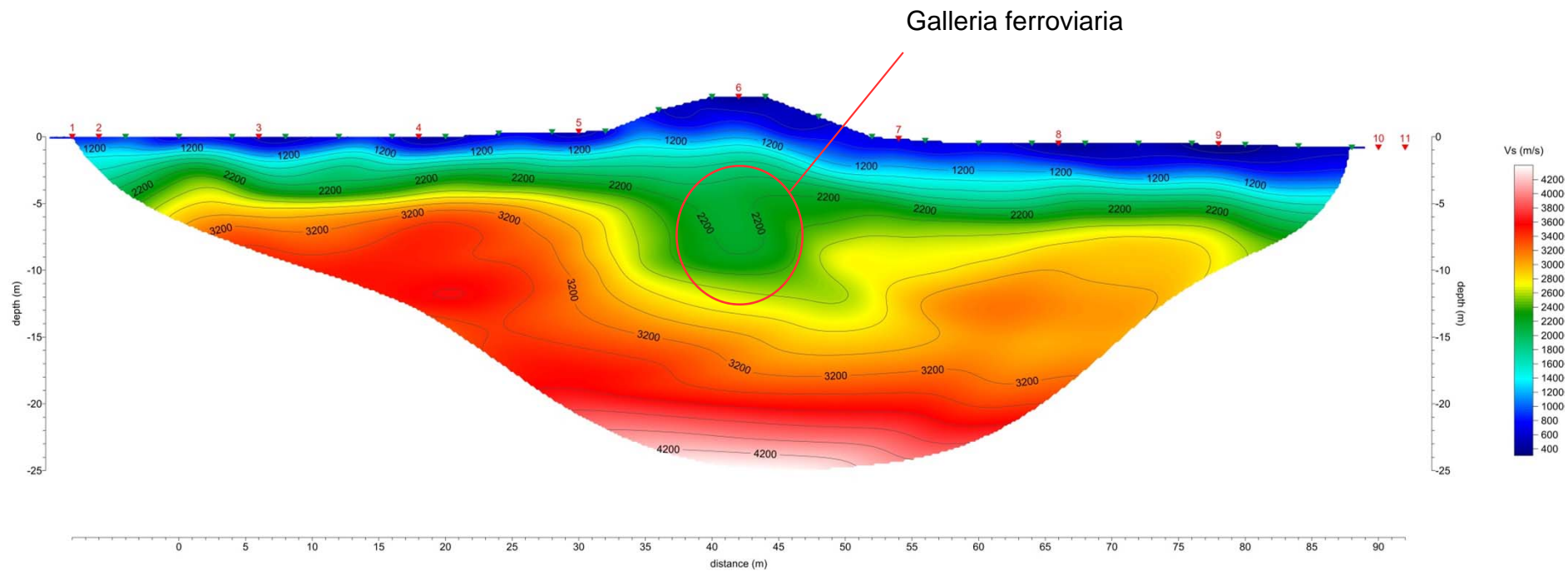
Analisi sismica su terreni ghiaioso-sabbiosi alternati ad argille sabbiose preconsolidate



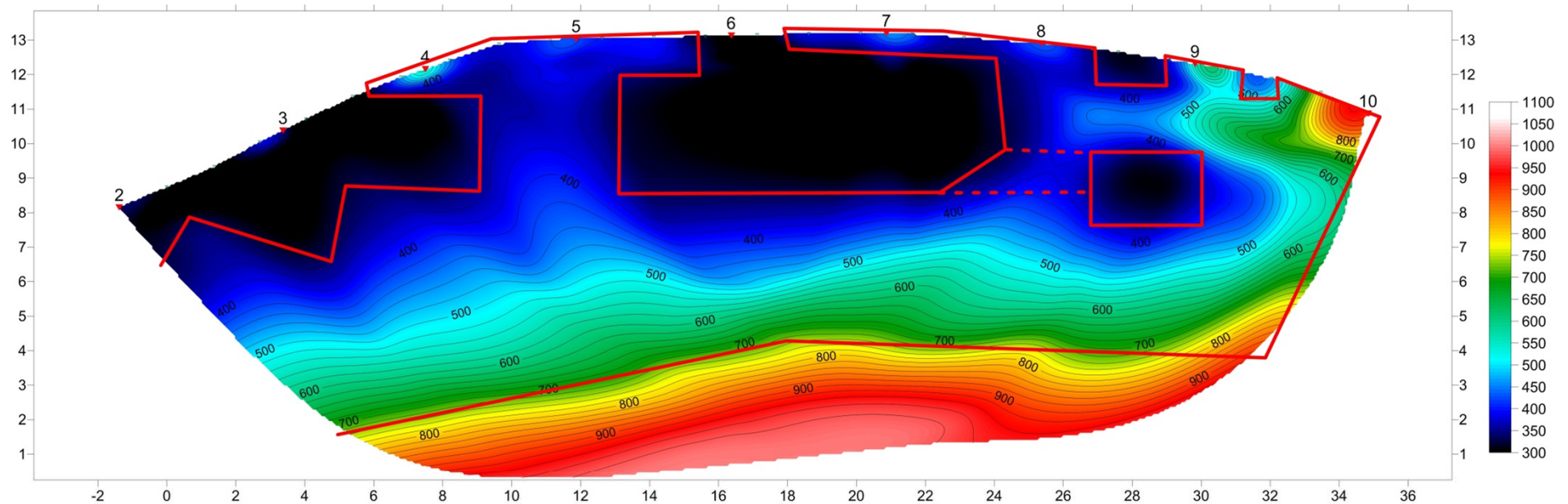
Tomografia onde P su una versante in frana



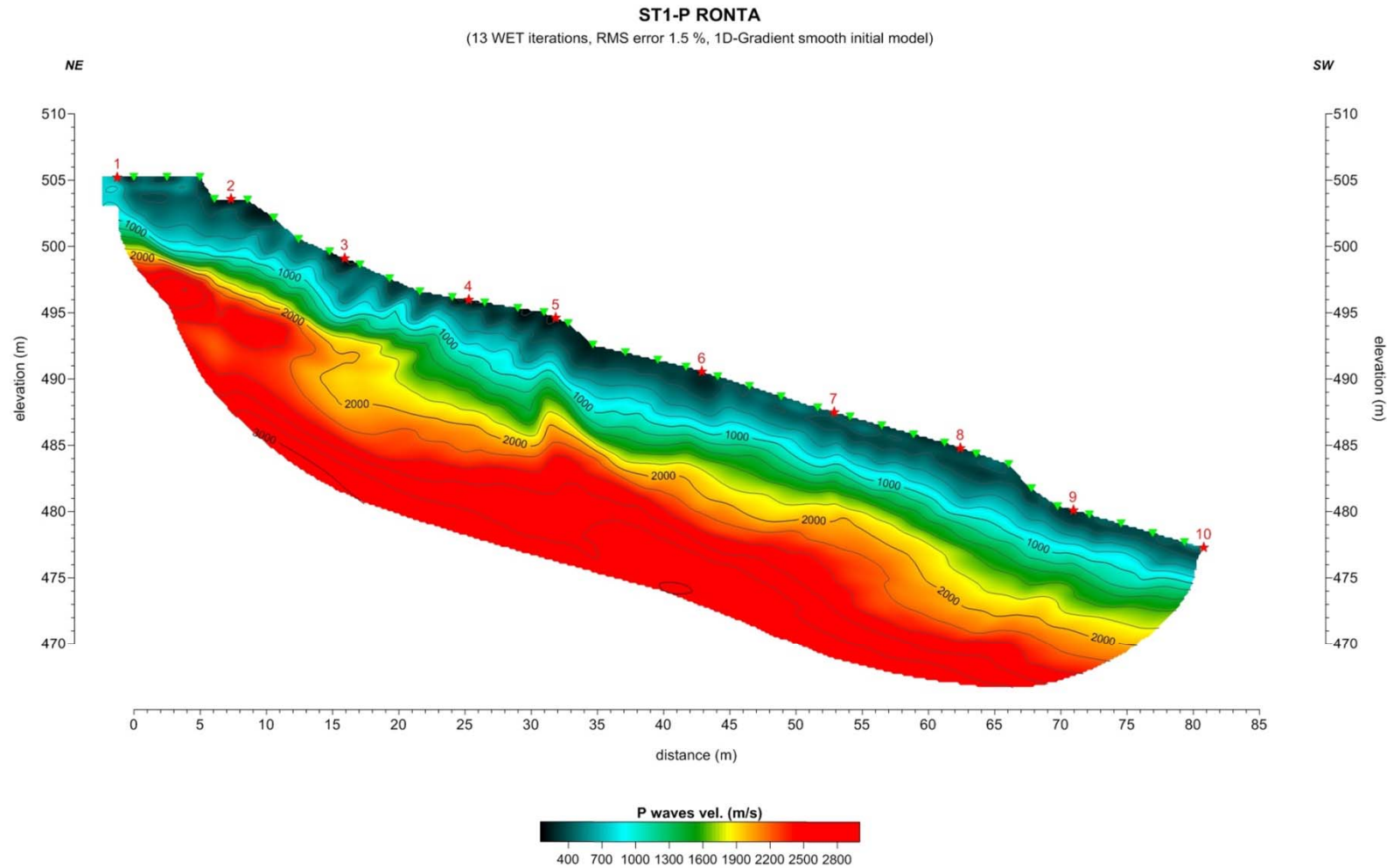
Tomografia onde P su materiali di riporto ricompenti il substrato per la ricerca di strutture sepolte e cavità



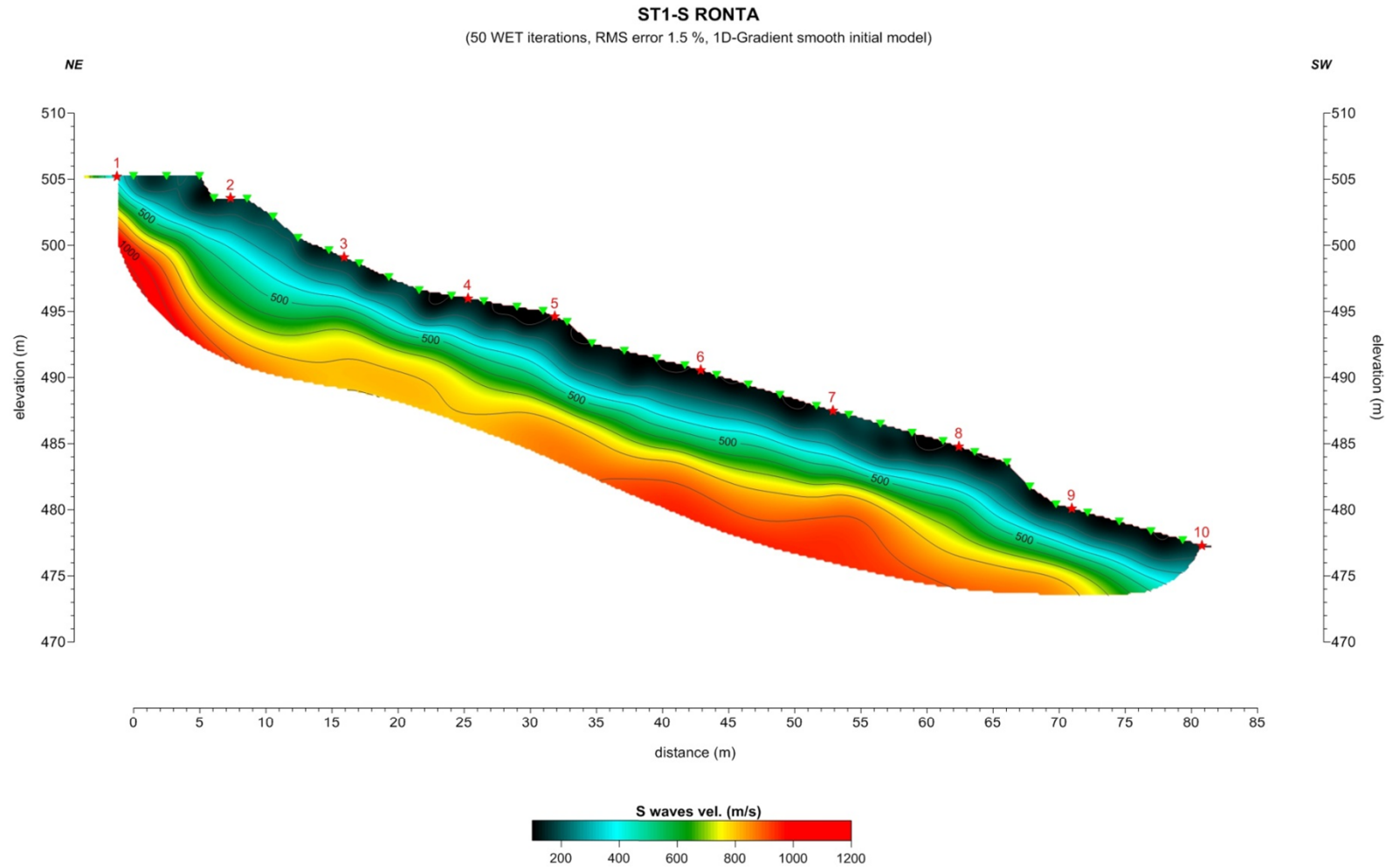
Tomografia onde P su una duna sabbiosa per la ricerca di strutture murarie sepolte e cavità



Tomografia onde P su una versante in frana

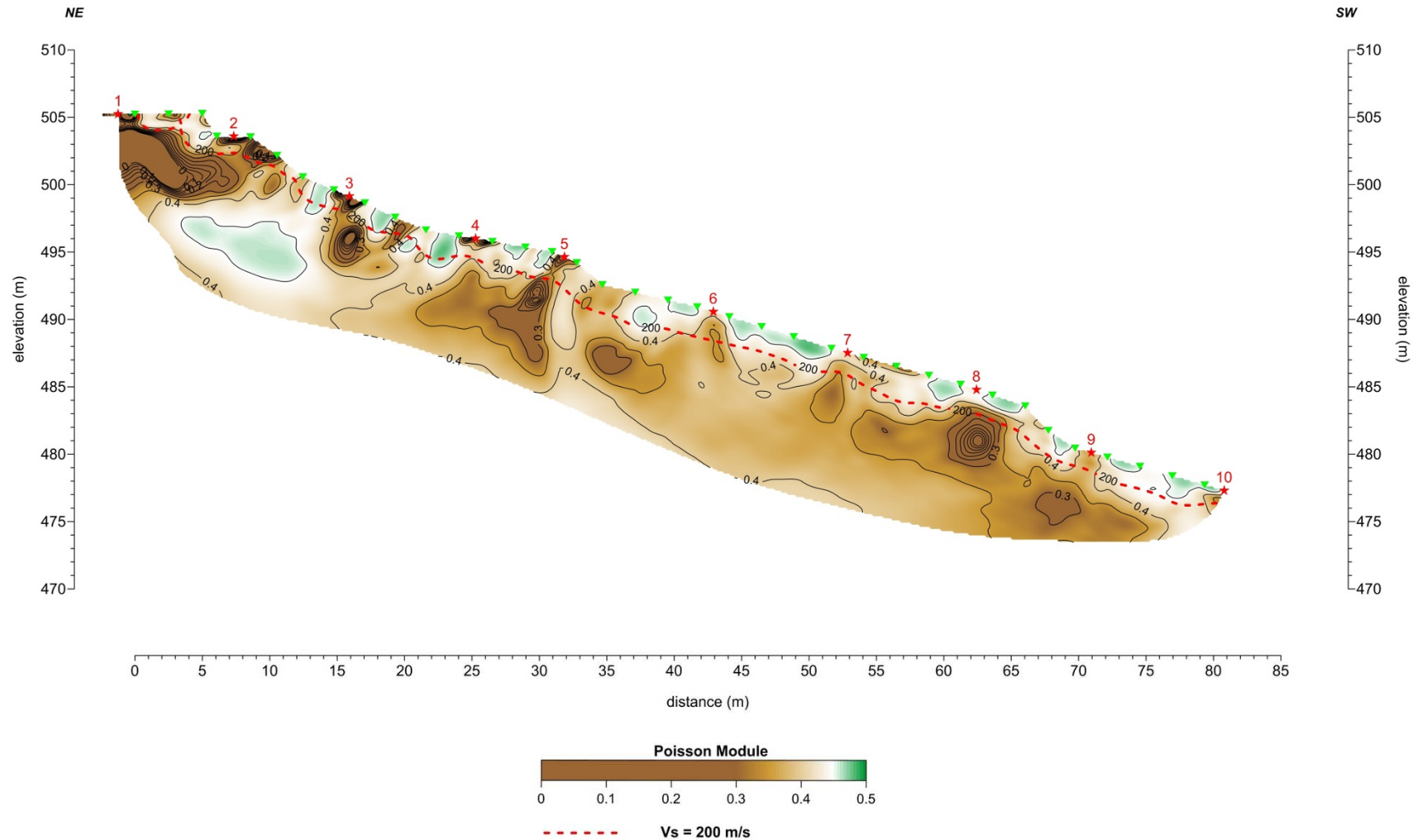


Tomografia onde SH su una versante in frana



Modulo di Poisson

ST1-RONTA - Modulo di Poisson
(Poisson < 0.3 suolo rigido)



Rapporto Vp/Vs

ST1-RONTA - Rapporto Vp/Vs
(Vp/Vs>3 elevata probabilità di saturazione)

