

# INDAGINE SISMICA

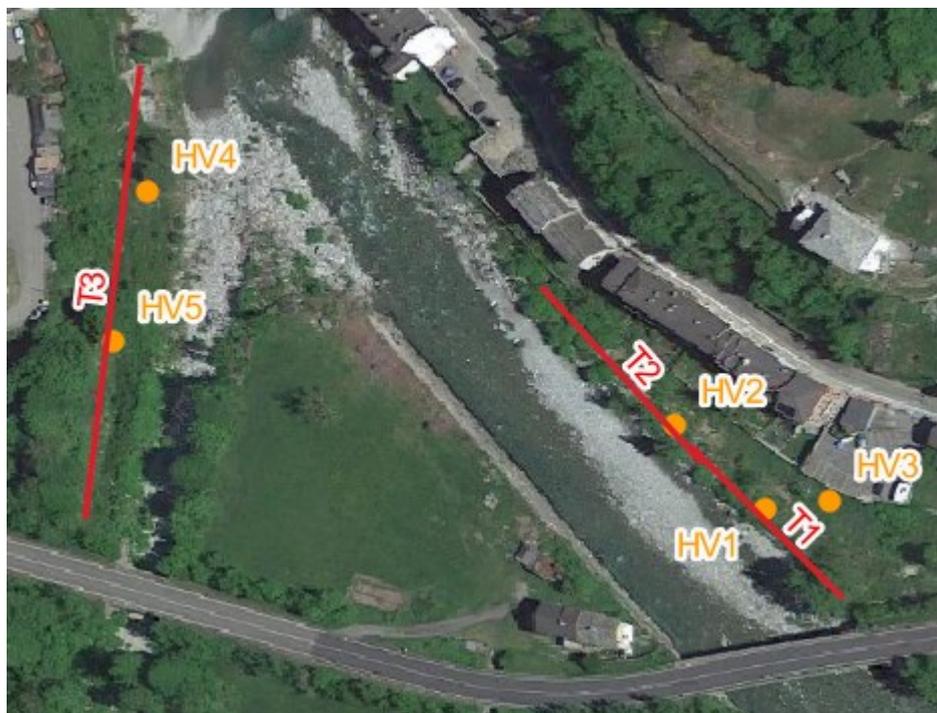
## Modello sismico

Al fine di caratterizzare il sito dal punto di vista geofisico, è stata eseguita una caratterizzazione sito specifica della litostratigrafia del sottosuolo, nonché una valutazione delle condizioni sismostratigrafiche locali.

Per la comprensione dell'assetto sismostratigrafico locale sono state eseguite le seguenti indagini:

n° 3 stendimenti di sismica attiva con interpretazione di tomografia sismica;

n° 5 acquisizioni di sismica passiva HVSR.



### Indagine di TOMOGRAFIA SISMICA

La tomografia sismica permette di costruire un'immagine della distribuzione in profondità della velocità delle onde sismiche e delle sue anomalie con un alto potere risolutivo. In particolare, l'indagine sismica a rifrazione è un'indagine sismica indiretta e attiva che utilizza le onde rifratte generate dai contrasti di velocità di propagazione delle onde sismiche per ricostruire le caratteristiche del sottosuolo. La velocità delle onde sismiche dipende dalla densità e dalle proprietà elastiche del materiale attraversato, ovvero da proprietà riconducibili alle caratteristiche litologiche del substrato indagato. La direzione di propagazione delle onde in profondità rispetta la legge di Snell e ad ogni interfaccia si originano fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione. Nelle indagini a rifrazione, come dice il nome stesso, verranno considerate solo le onde rifratte. La tomografia sismica a rifrazione consente di ottenere un'immagine della distribuzione di velocità nel sottosuolo mettendo in evidenza le variazioni continue di velocità piuttosto che un modello a strati tipico delle elaborazioni a rifrazione (Intercette, delaytime, plus minus, GRM).

Lo svolgimento dell'indagine sismica a rifrazione consiste nel generare un'onda sismica di compressione (energizzazione) e registrarne l'arrivo ai geofoni disposti in linea ad intervalli noti. L'interpretazione delle misure registrate si basa sull'analisi del tempo impiegato dall'onda generata con le energizzazioni a raggiungere ciascun geofono. Per poter ricostruire la variazione di velocità delle onde di compressione nel sottosuolo è necessario eseguire più energizzazioni in posizioni differenti.

Le misure effettuate con la tecnica a rifrazione possono essere elaborate con la procedura tomografica al fine di evidenziare in dettaglio le variazioni locali di velocità.

La tecnica tomografica prevede la creazione di un modello sintetico iniziale del sottosuolo e la sua perturbazione alla ricerca del minimo scarto tra le misure effettuate sul terreno e le misure "virtuali" registrate sul modello sintetico attraverso una procedura iterativa che alterna le due seguenti fasi.

Nella fase “diretta” vengono calcolati sul modello sintetico i tempi di arrivo dell’impulso sismico (smartTomo è basato sul lavoro di Moser, T. J. “Shortest path calculation of seismic rays.” Geophysics 56.1 (1991): 59-67). Il modello di velocità iniziale è suddiviso in una griglia le cui celle hanno assegnato un valore di velocità iniziale. Sui lati della cella sono presenti più nodi (il numero è scelto dall’utente) che costituiscono i nodi della rete di ipotetici raggi sismici che connettono tutte le sorgenti e tutti i ricevitori che sono anche essi dei nodi. Ogni nodo è connesso con i nodi delle celle adiacenti. Aumentando il numero di nodi aumenta il dettaglio e la precisione nel percorso dei raggi sismici ma aumenta anche l’uso di memoria.

Il percorso delle onde rifratte corrisponde al percorso che impiega il minor tempo a percorrere il tragitto tra la sorgente ed il ricevitore.

Nella fase “inversa” i tempi sintetici calcolati nel passo “diretto” vengono confrontati con i tempi misurati sui sismogrammi; le differenze tra i tempi sono usate per aggiornare il modello sintetico (smartTomo impiega un algoritmo riconducibile alla famiglia delle “Simultaneous Iterative Reconstruction Technique”). Nell’applicazione di questo metodo la velocità viene sostituita dal suo inverso, la lentezza. Ad esempio, considerando un generico raggio sismico  $j$  tra la sorgente ed il ricevitore la lentezza media può essere espressa come:

$$S_{ij} = \frac{t_{0j}}{t_{ij}}$$

dove  $t_{0j}$  rappresenta il tempo misurato tra la sorgente ed il ricevitore e  $l_j$  rappresenta la lunghezza del raggio sismico  $j$ -esimo. Pertanto, conoscendo i tempi di percorso misurato  $t_m$  e il tempo di percorso calcolato  $t_c$  per il raggio  $j$ -esimo si può calcolare il residuo del tempo di percorso:

$$\Delta t_j = t_{mj} - t_{cj}$$

Il residuo dei tempi di percorso viene proiettato su ciascuna cella  $k$  su cui si calcola anche il fattore di correzione della lentezza:

$$\Delta S_k = \frac{\sum \Delta t_{jk}}{\sum \Delta l_{jk}}$$

L’indice  $i$  rappresenta ciascun raggio sismico incidente sulla cella  $k$ -esima. Il fattore di correzione della lentezza verrà utilizzato per aggiornare il modello di velocità alla fine di ogni iterazione del ciclo di risoluzione. Questa procedura consente

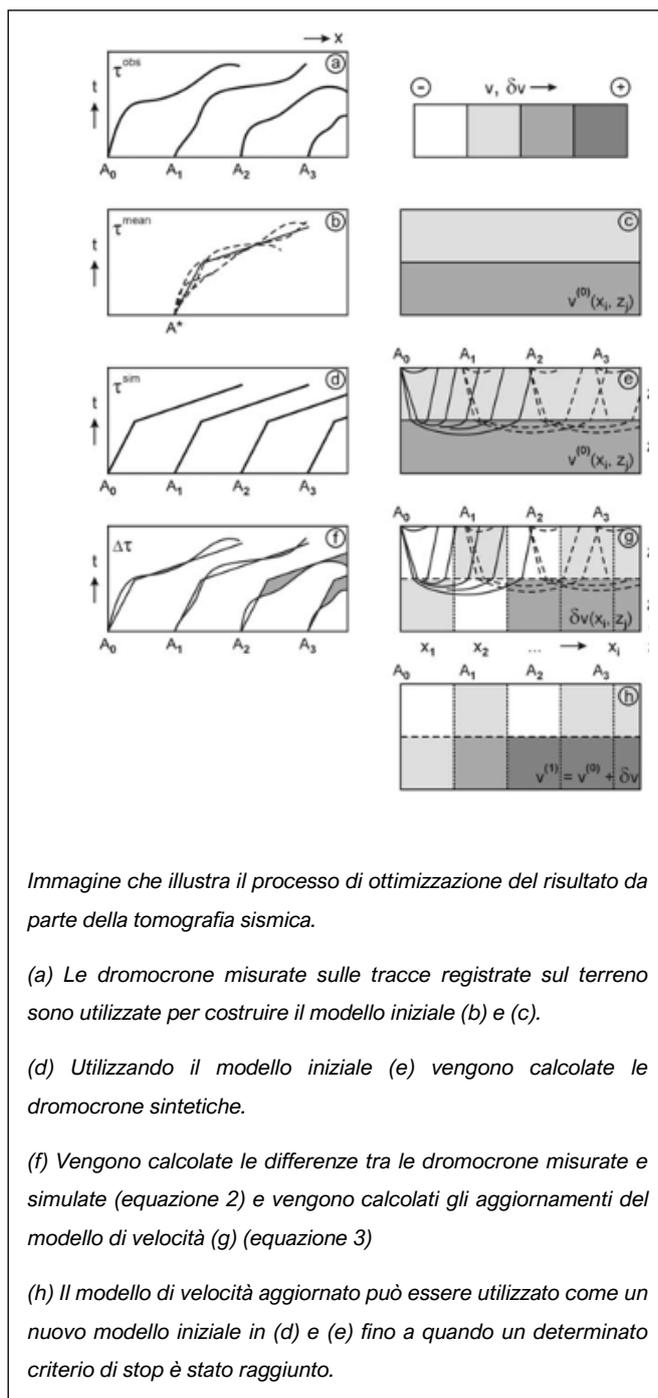


Immagine che illustra il processo di ottimizzazione del risultato da parte della tomografia sismica.

(a) Le dromocrone misurate sulle tracce registrate sul terreno sono utilizzate per costruire il modello iniziale (b) e (c).

(d) Utilizzando il modello iniziale (e) vengono calcolate le dromocrone sintetiche.

(f) Vengono calcolate le differenze tra le dromocrone misurate e simulate (equazione 2) e vengono calcolati gli aggiornamenti del modello di velocità (g) (equazione 3)

(h) Il modello di velocità aggiornato può essere utilizzato come un nuovo modello iniziale in (d) e (e) fino a quando un determinato criterio di stop è stato raggiunto.

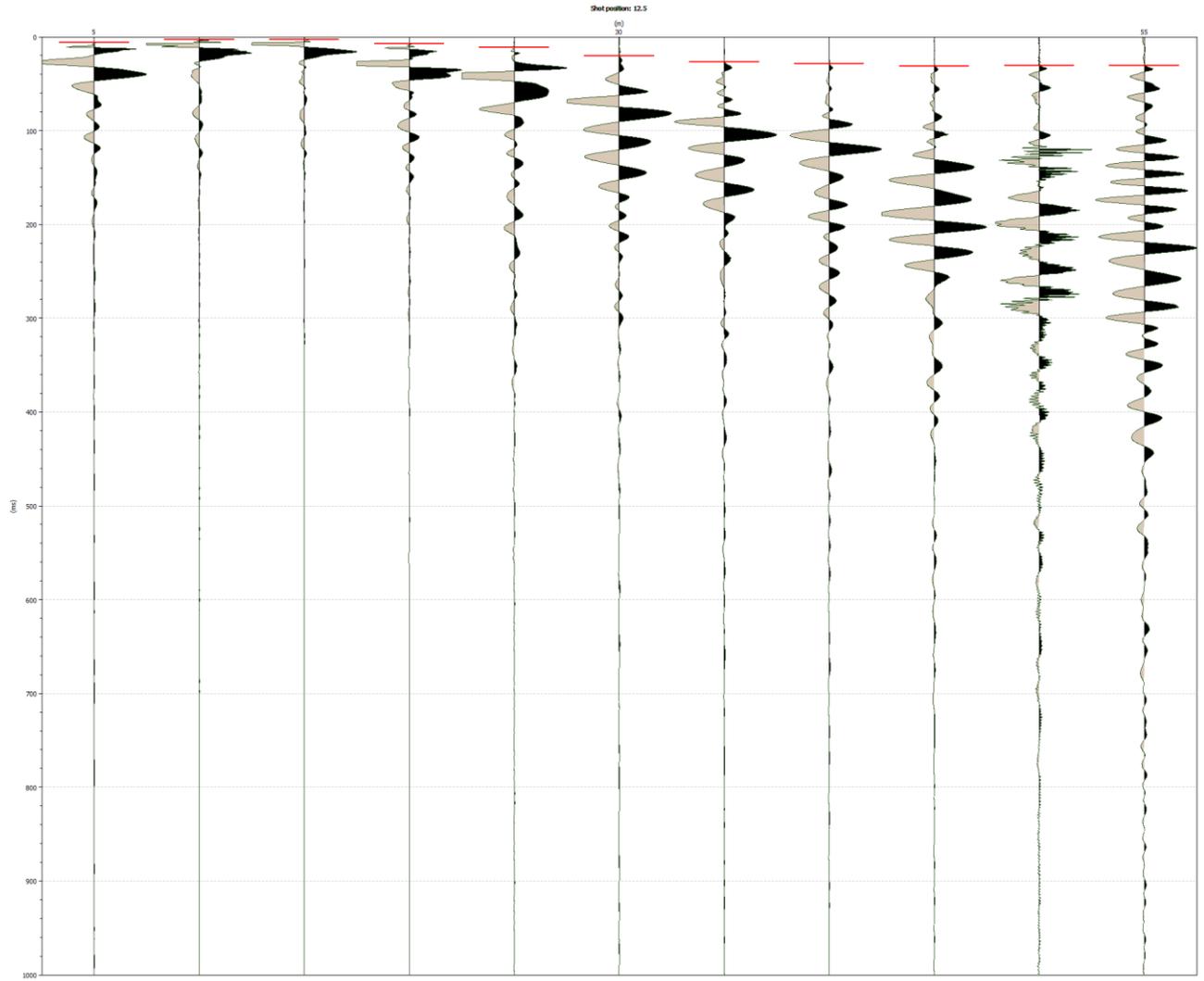
di ottenere un modello, con variazioni di velocità continue e non necessariamente vincolato alla presenza di rifrattori.

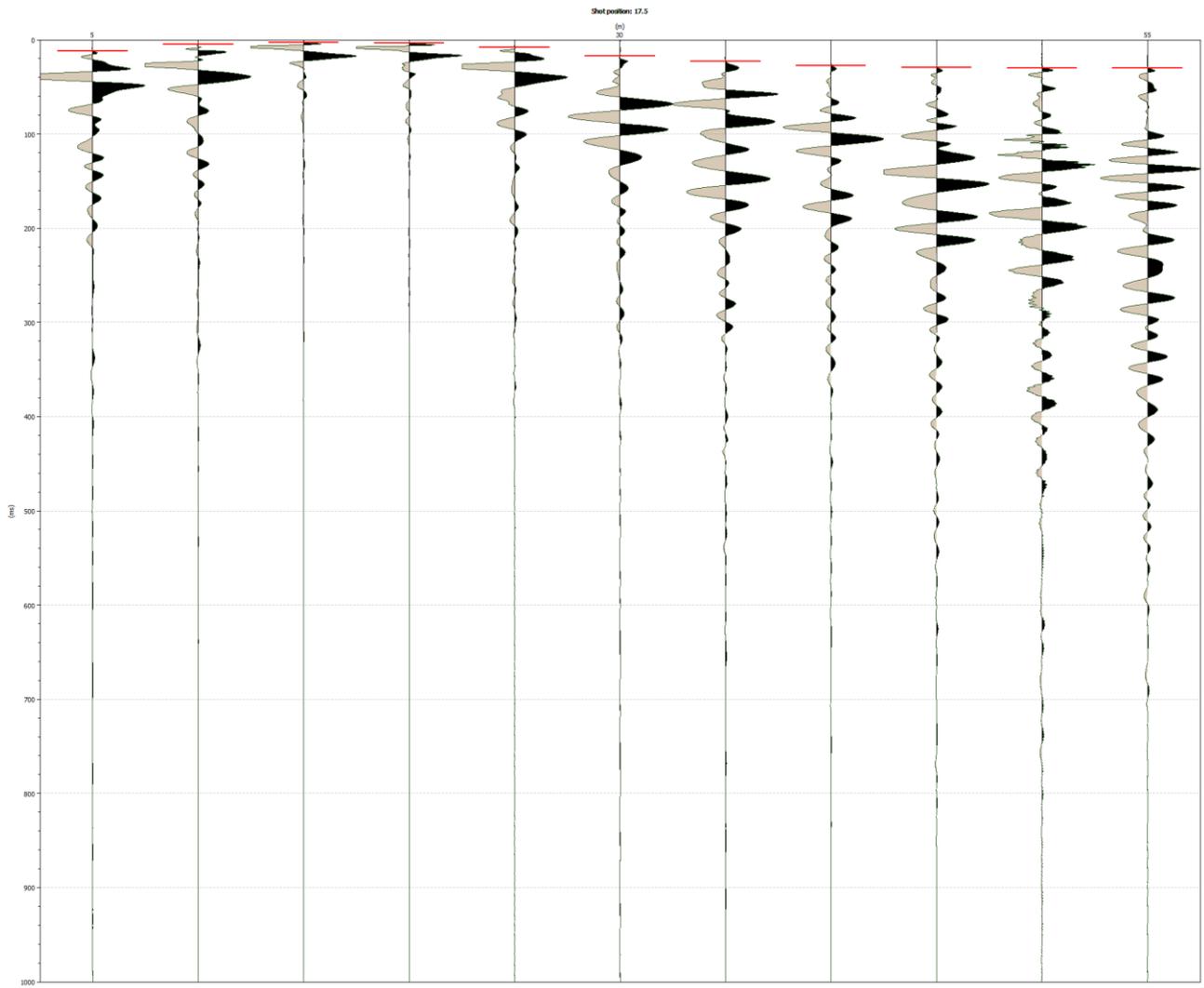
Ad ogni ciclo di aggiornamento segue una fase di smoothing del risultato per rendere più omogeneo il modello mediante operazioni di distribuzione della velocità alle celle adiacenti a quelle attraversate dai raggi sismici che non verrebbero aggiornate, garantendo maggiore stabilità alle procedure di calcolo e un risultato interpretabile più facilmente.

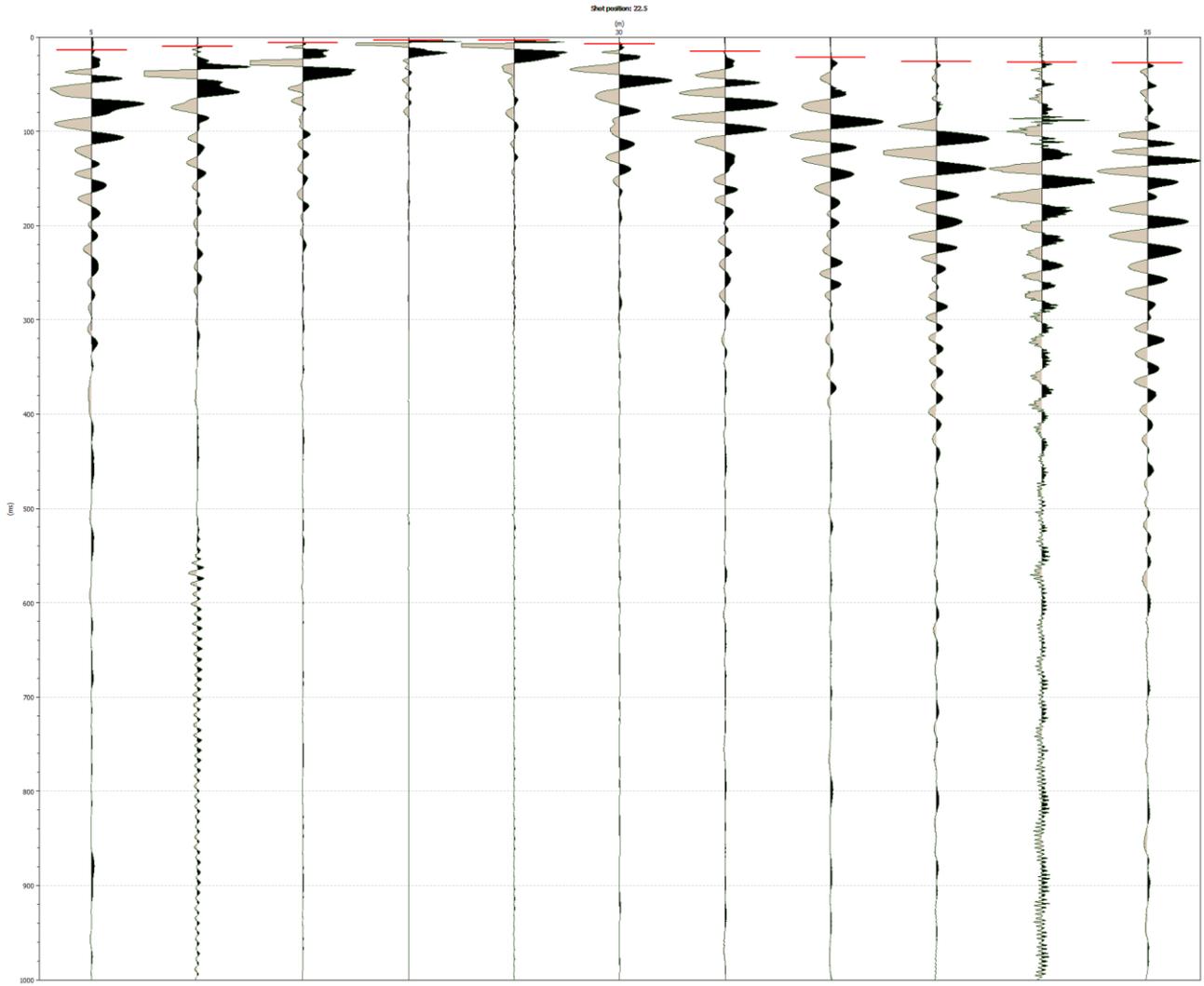
Il funzionamento della procedura è illustrato nella Figura 2 tratta da Reinhard Kirsch, "*Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*" Springer 2006.

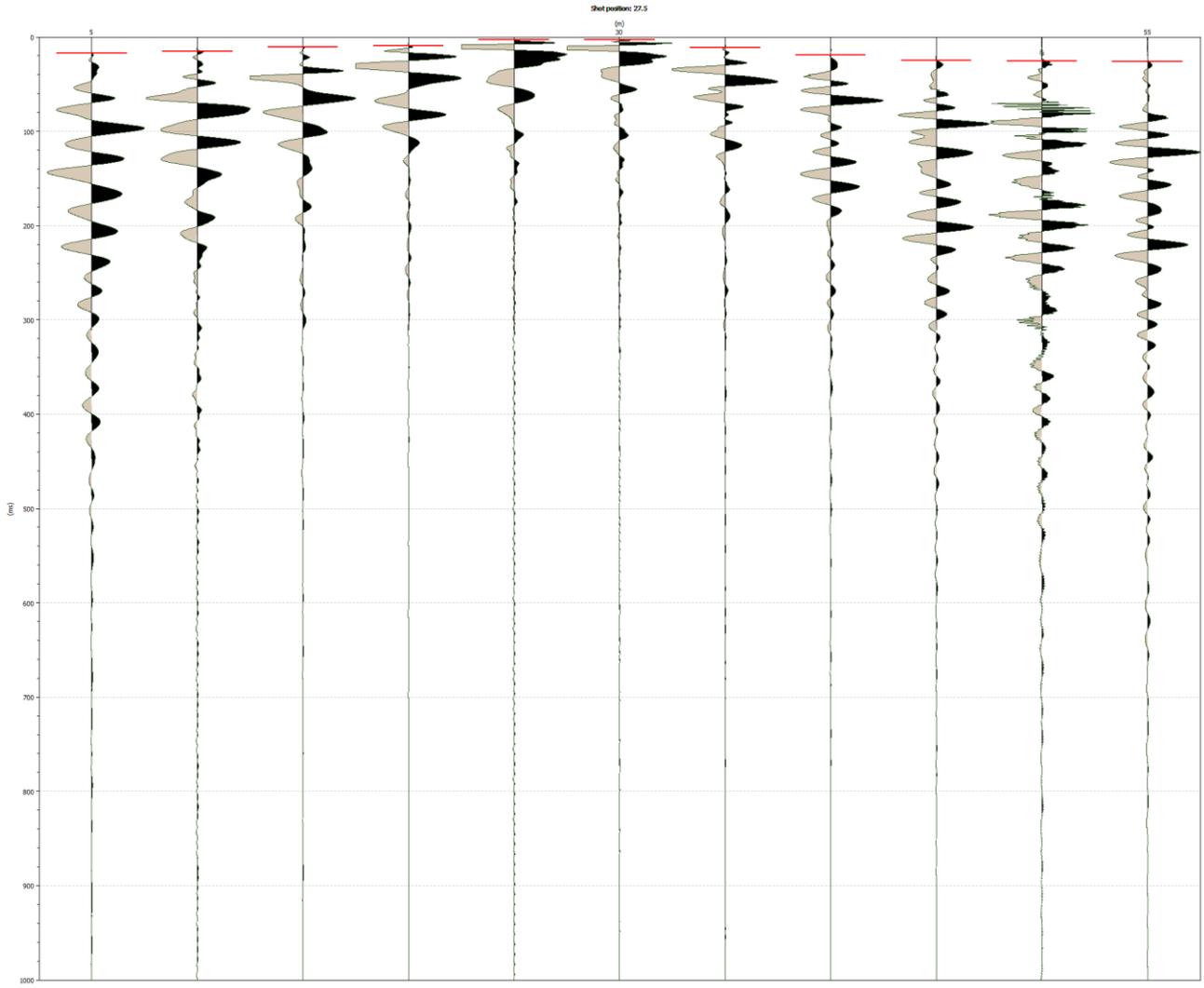
Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la tomografia sismica; da una prima analisi si può osservare la buona qualità del segnale acquisito che ha permesso un buon picking dei primi arrivi; è inoltre stata riscontrata la corrispondenza dell'indagine con l'andamento sismostratigrafico delle altre indagini eseguite.

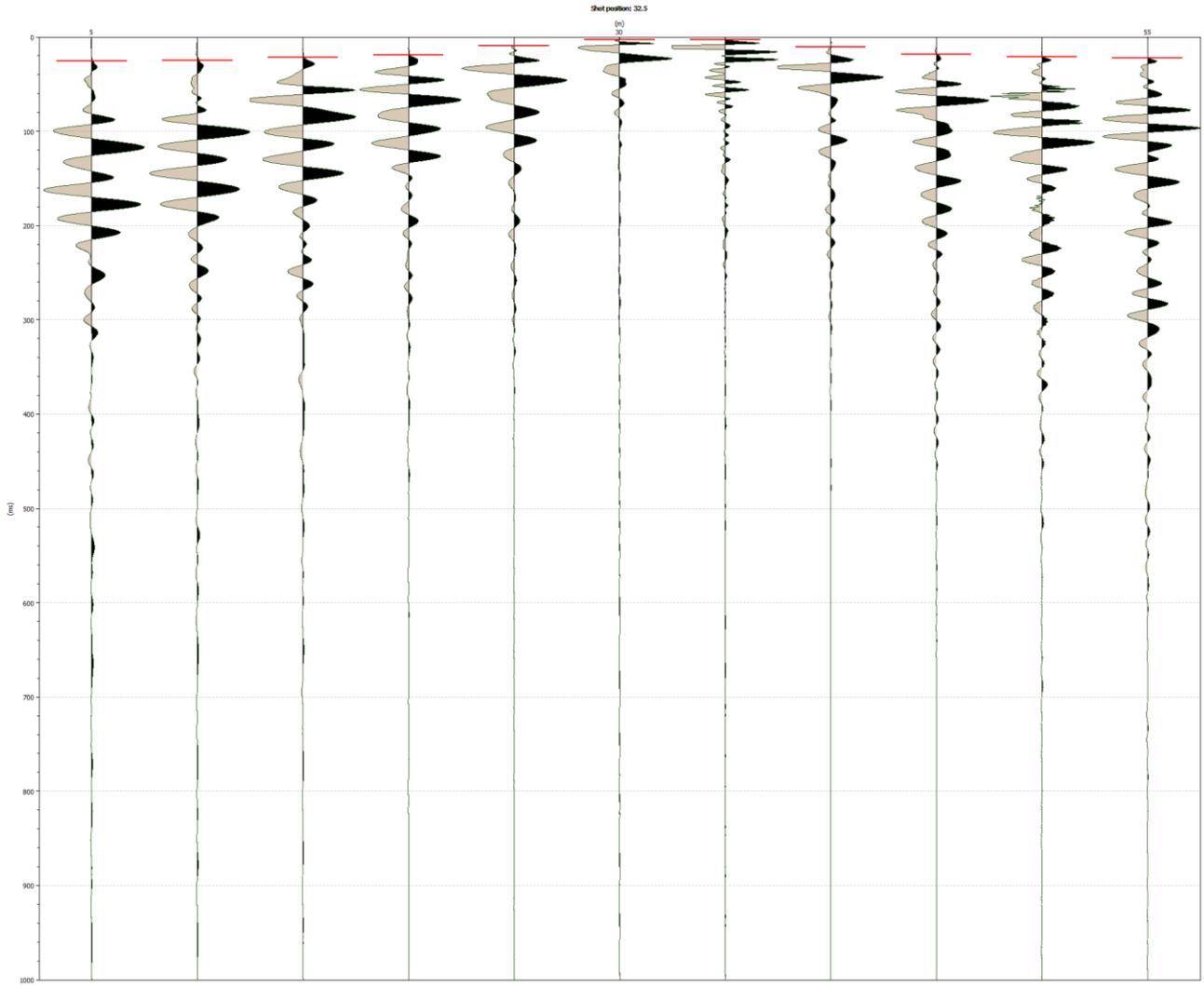
### **Indagine T1**

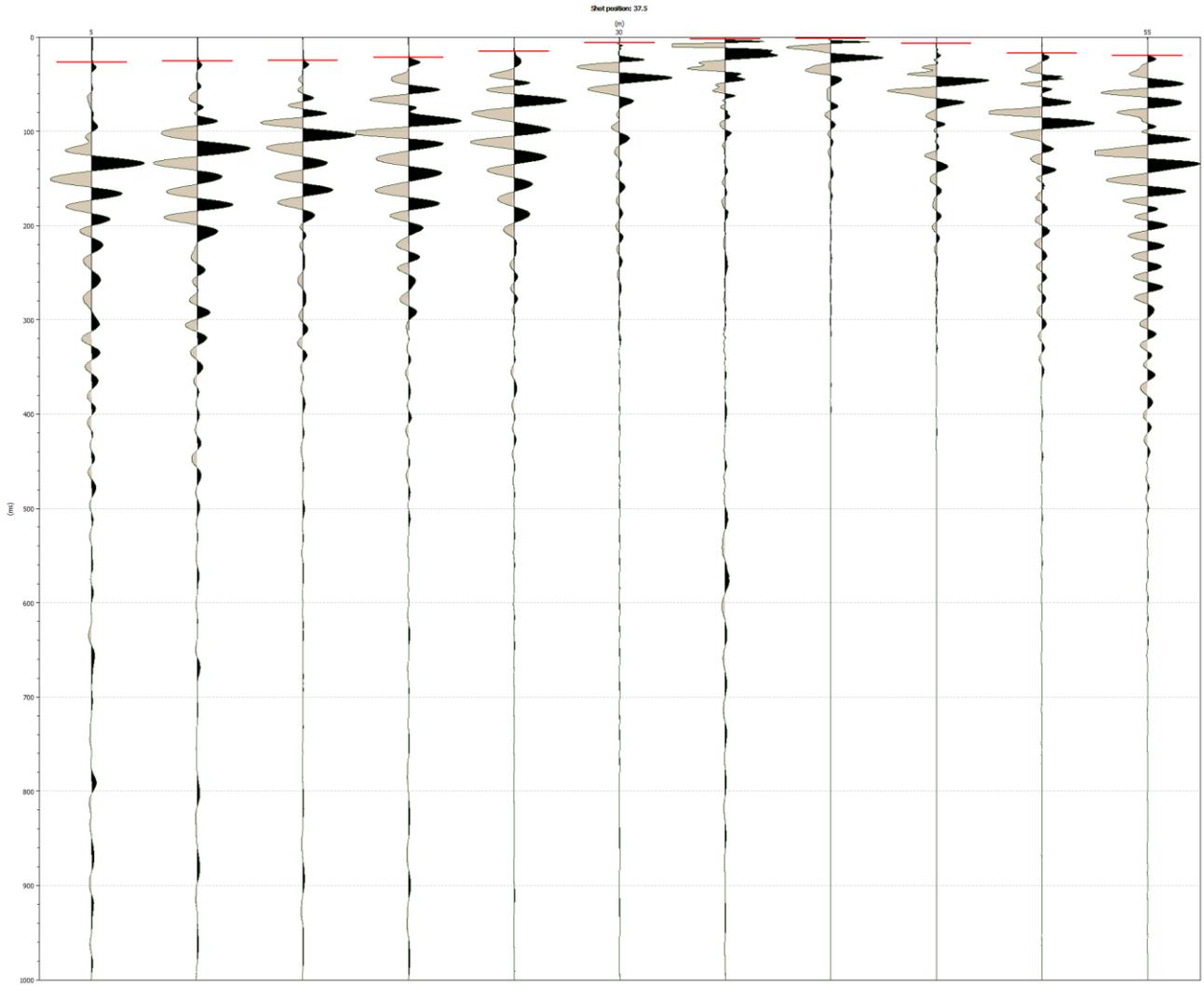


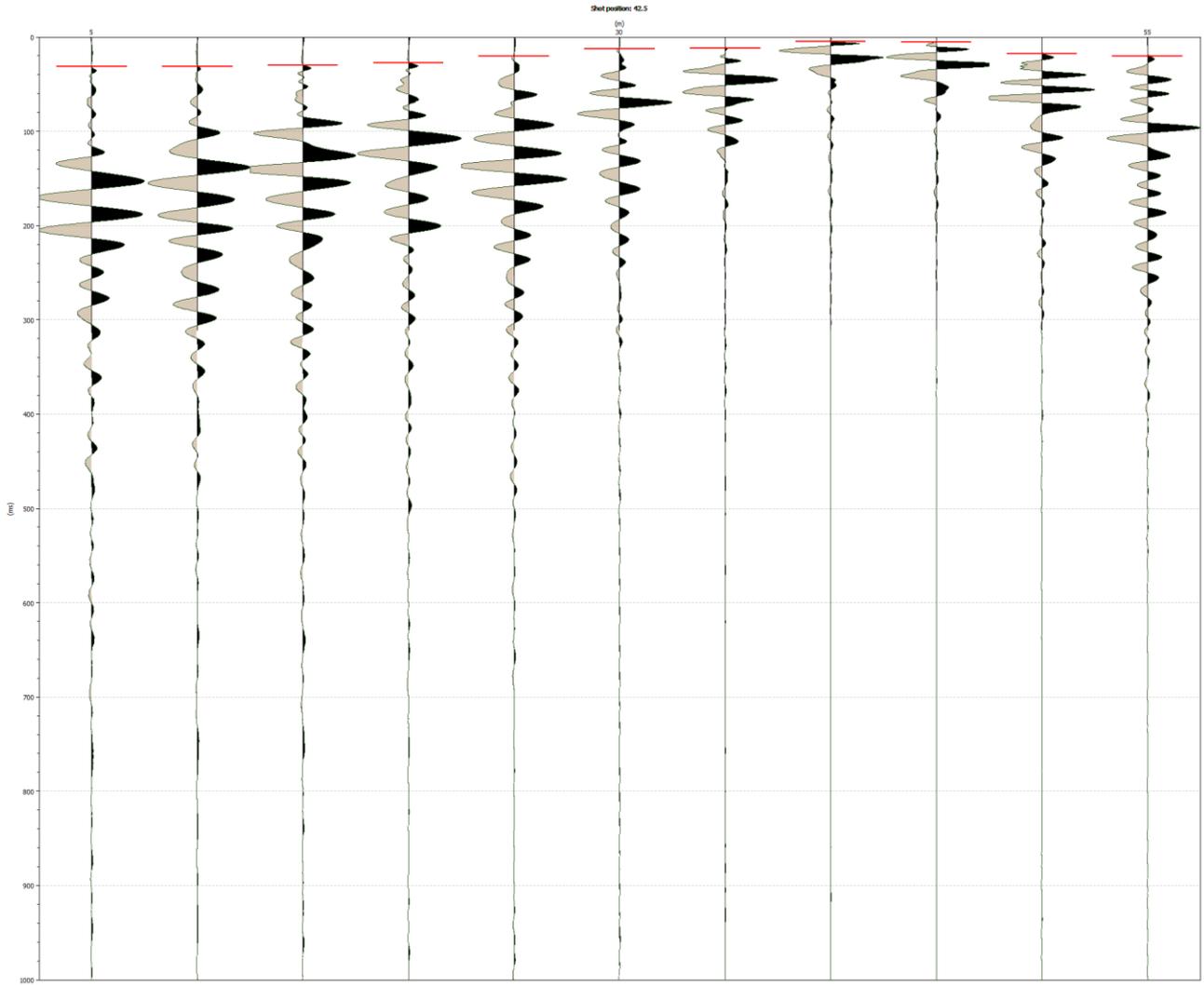


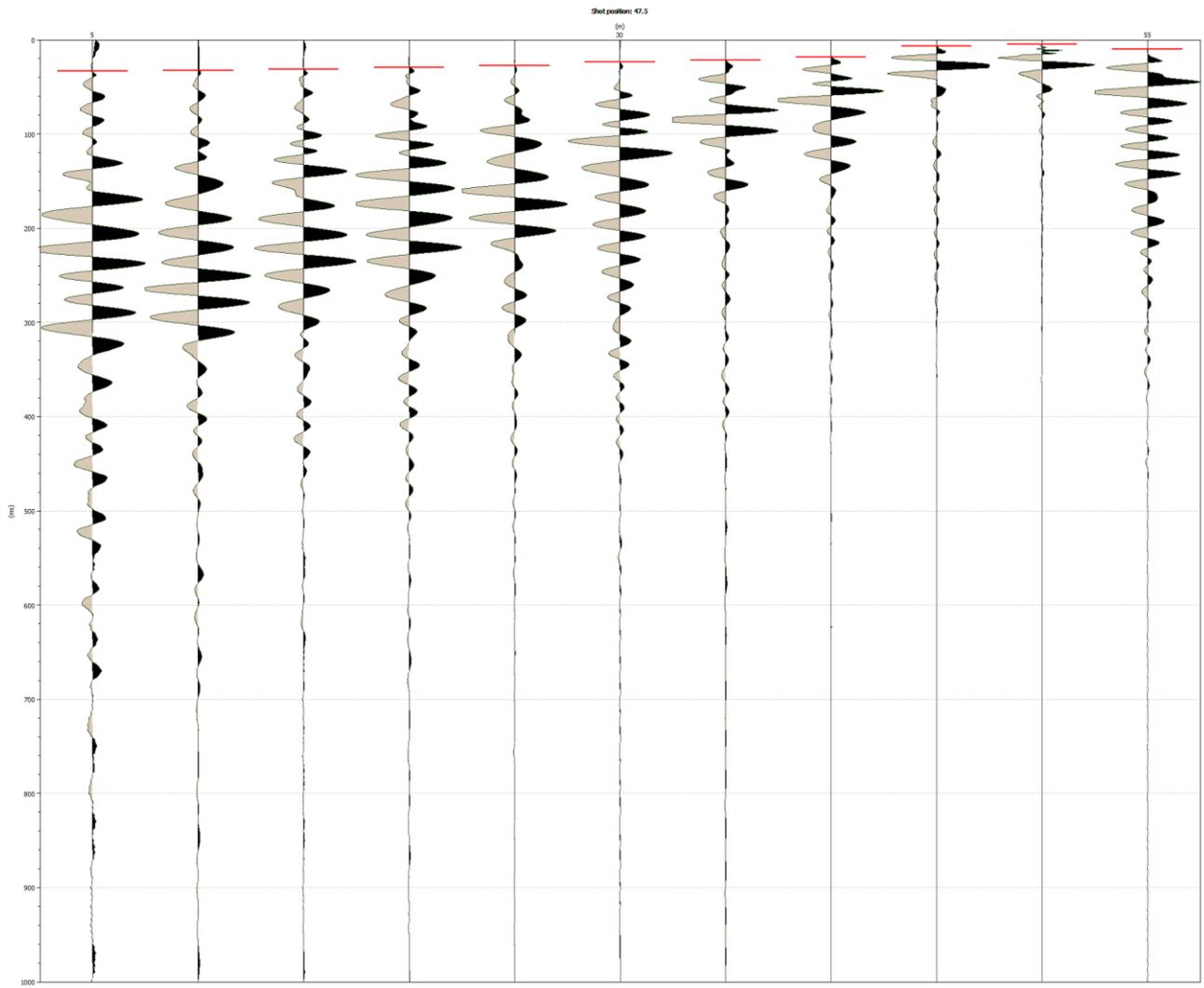


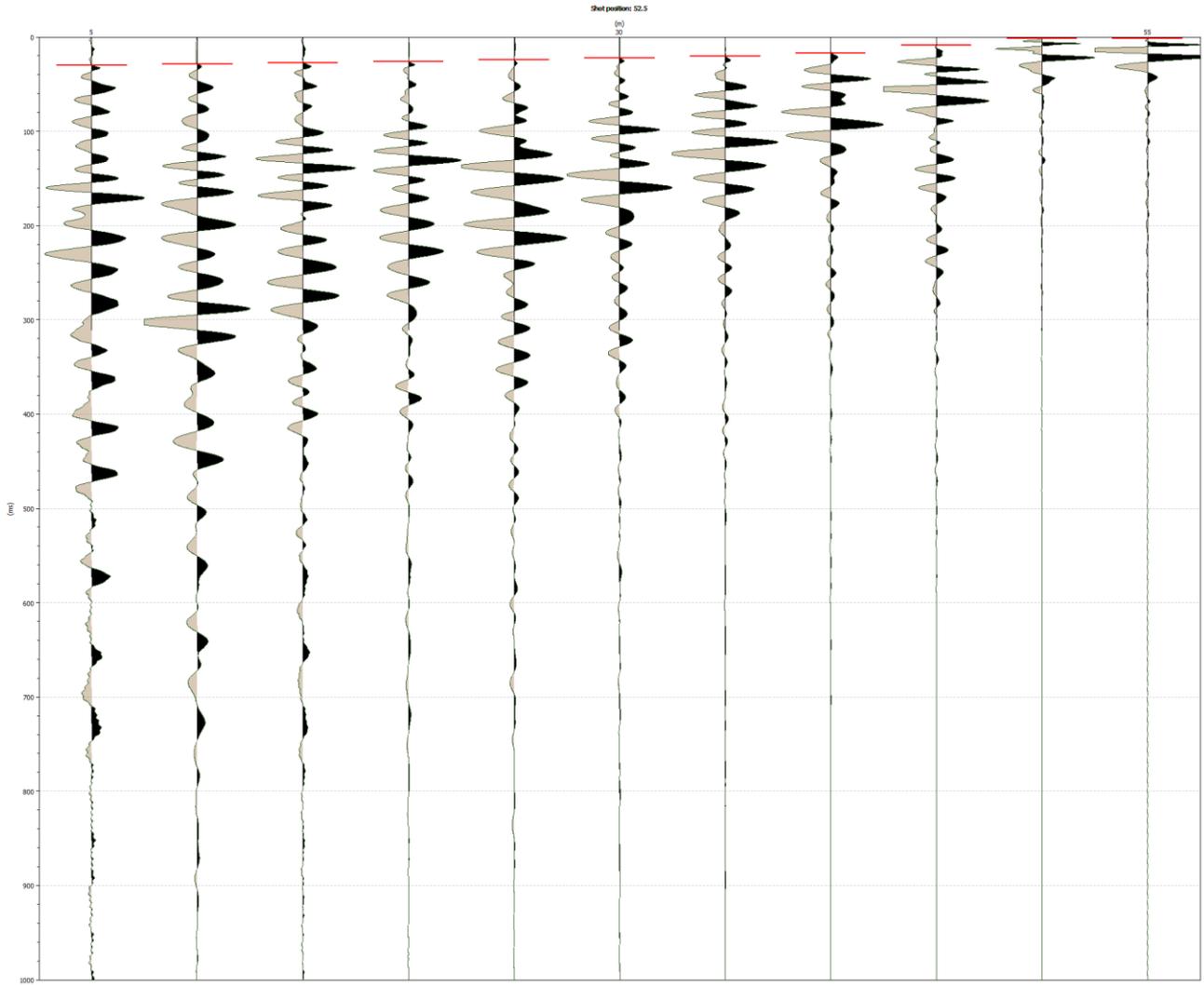


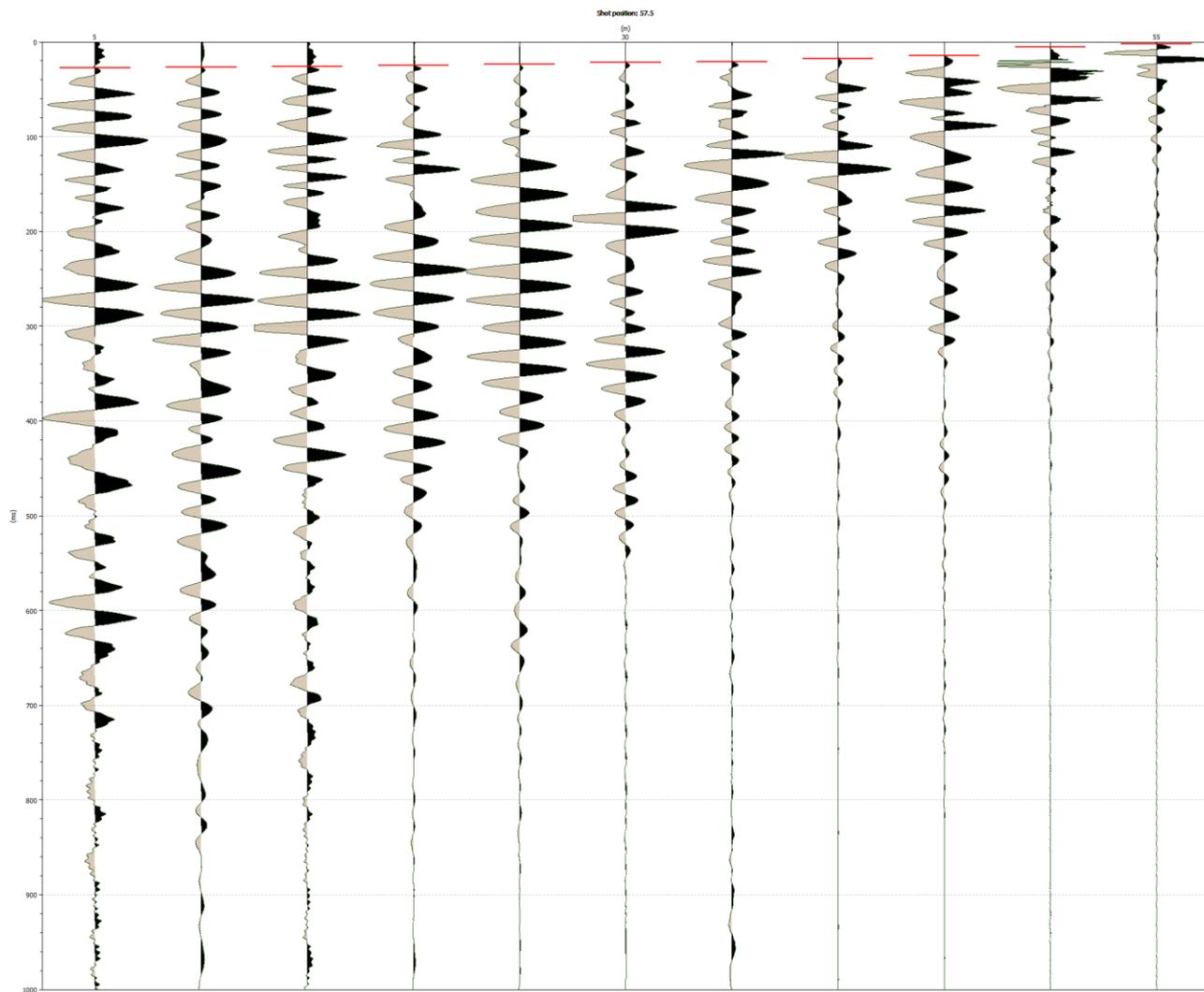


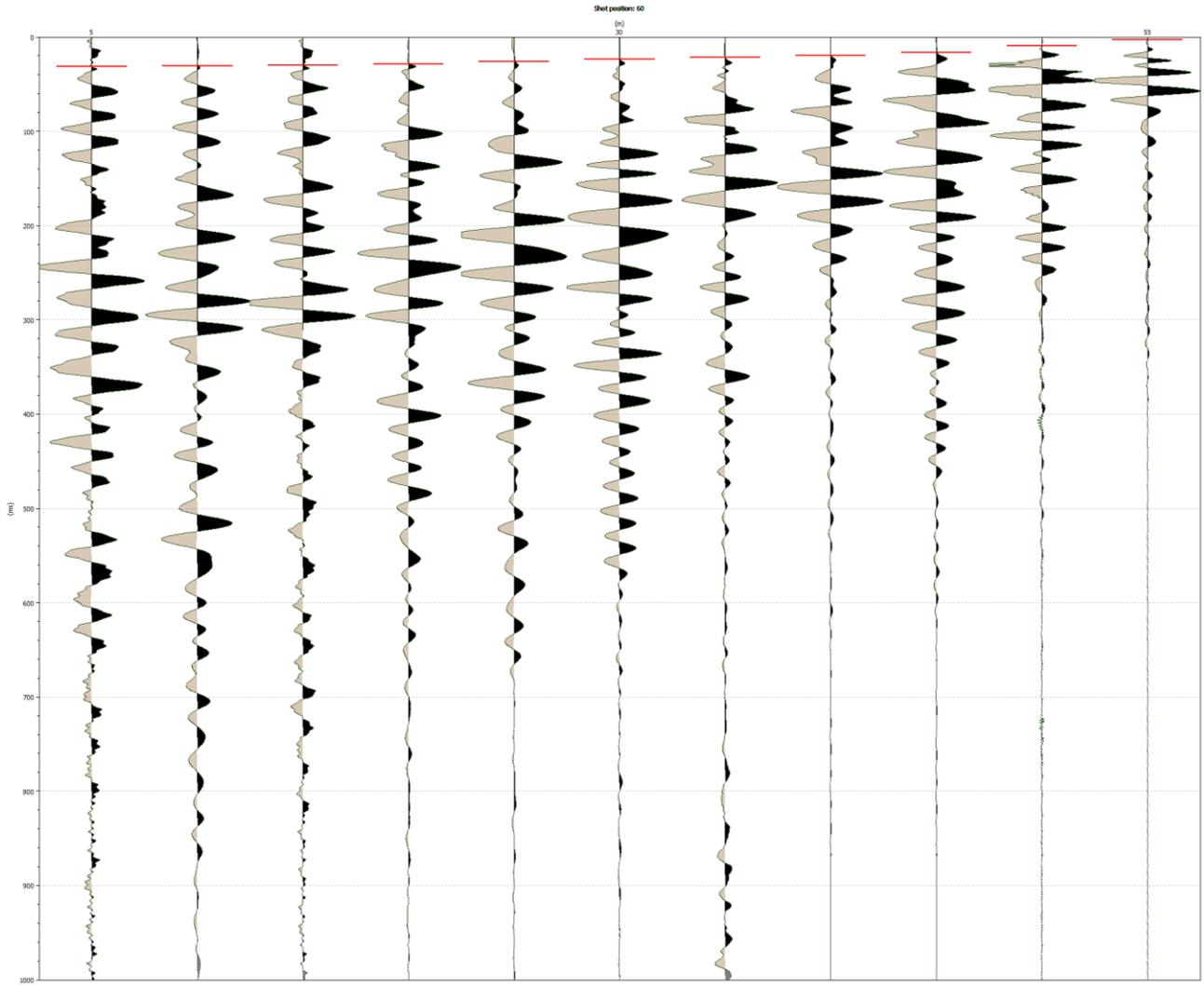


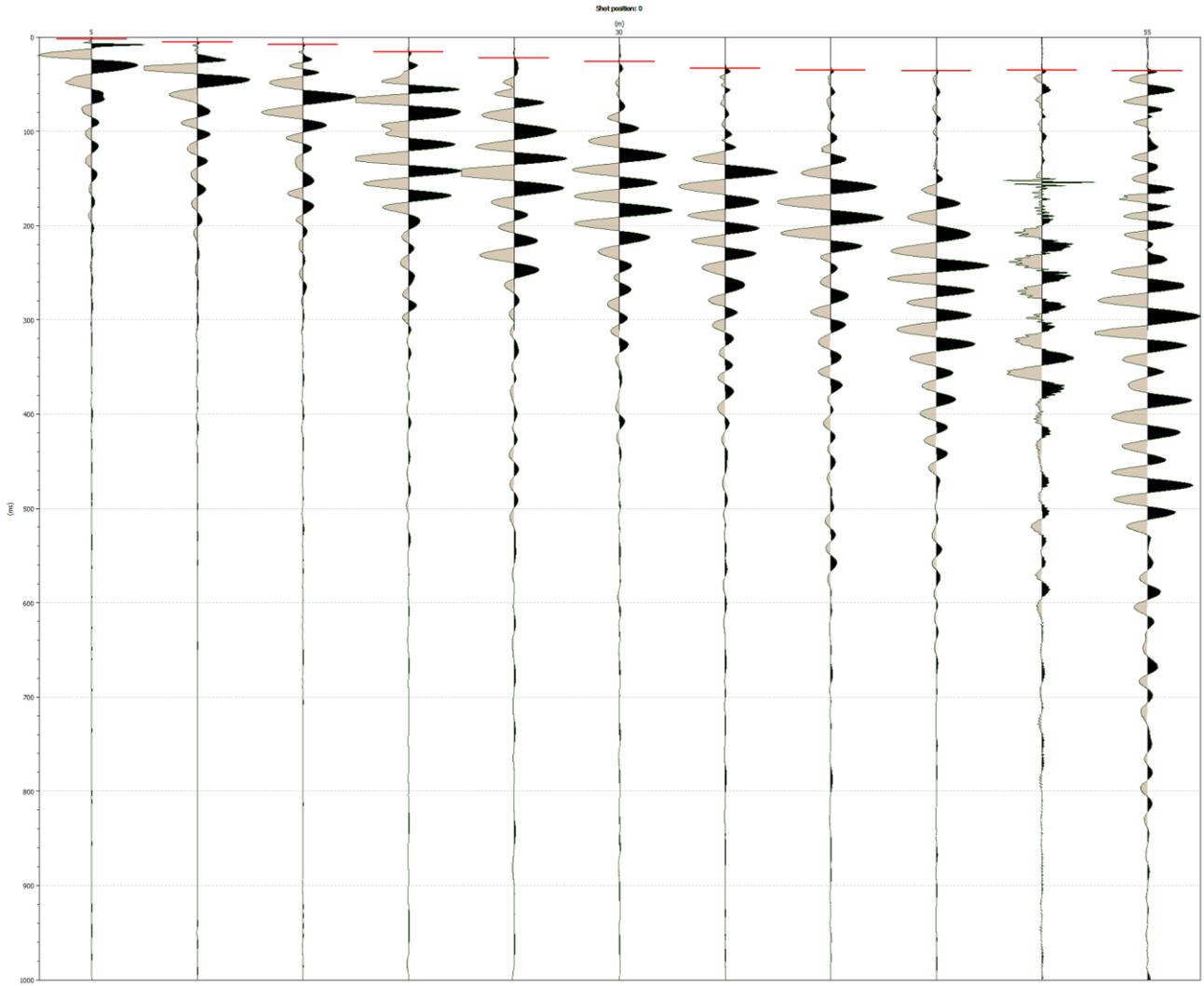


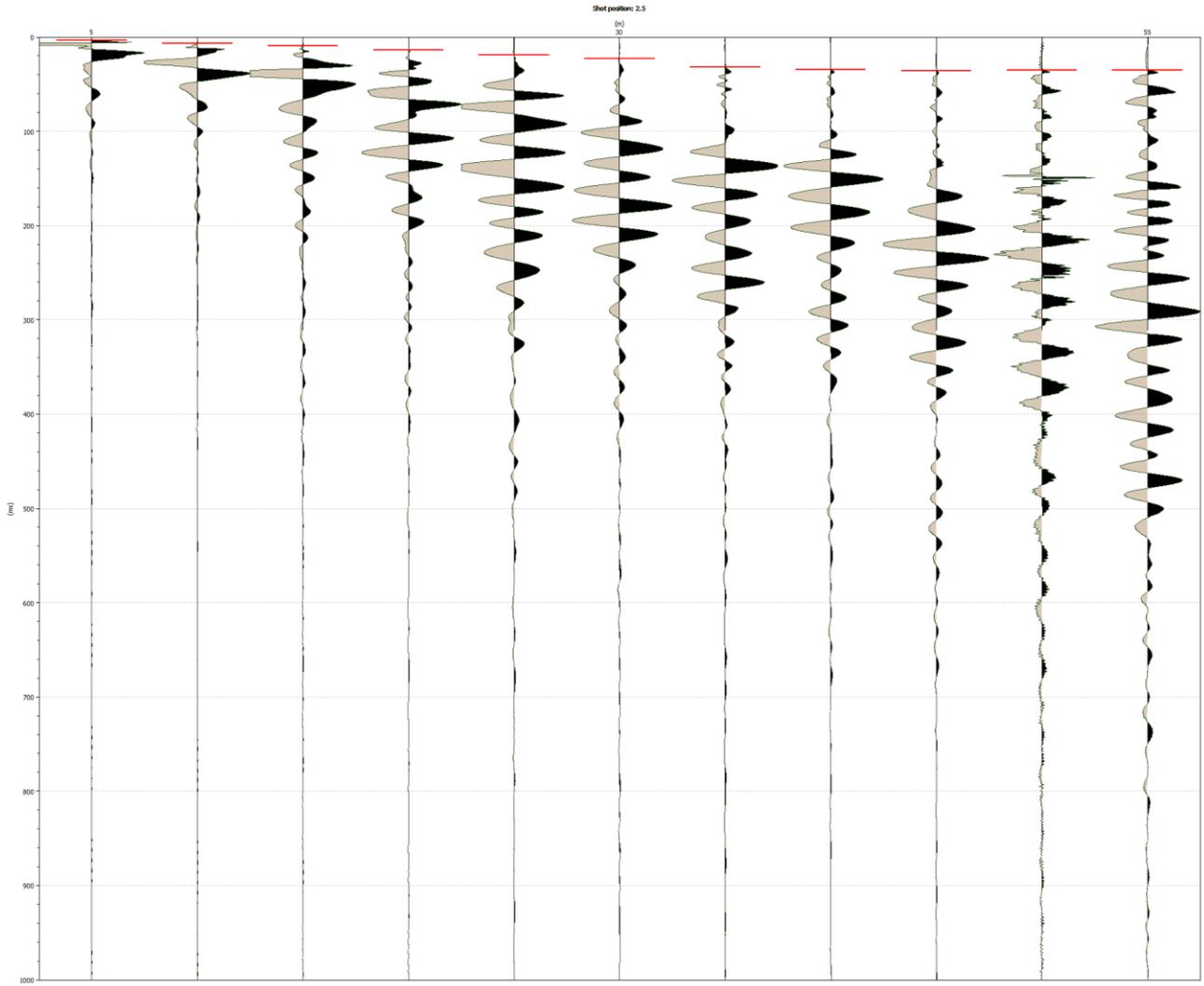


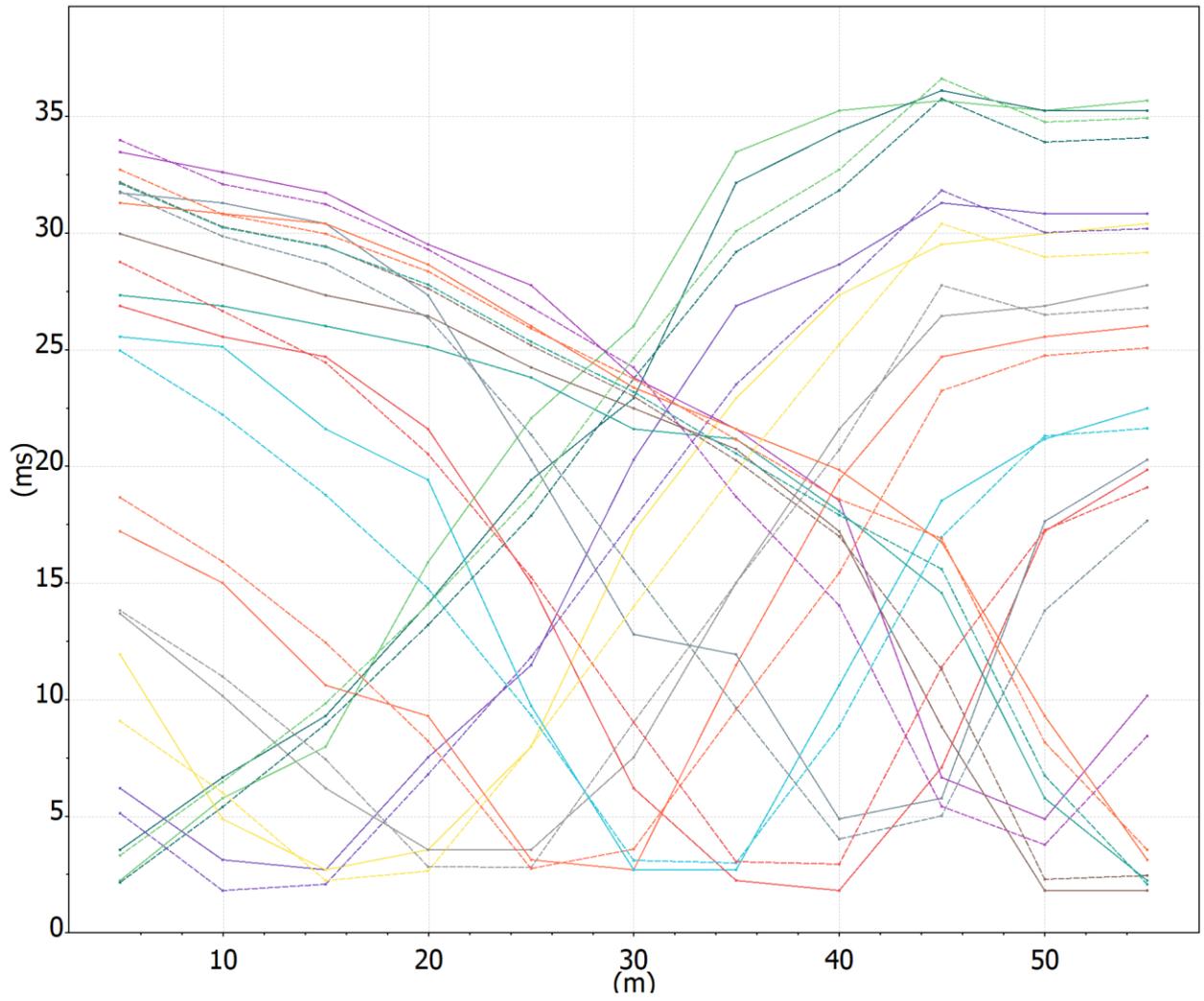




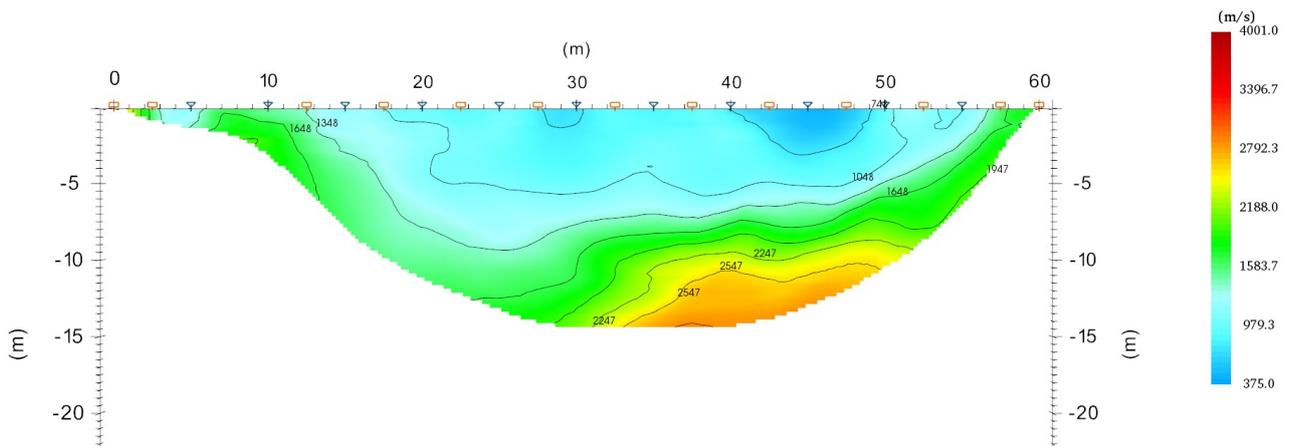




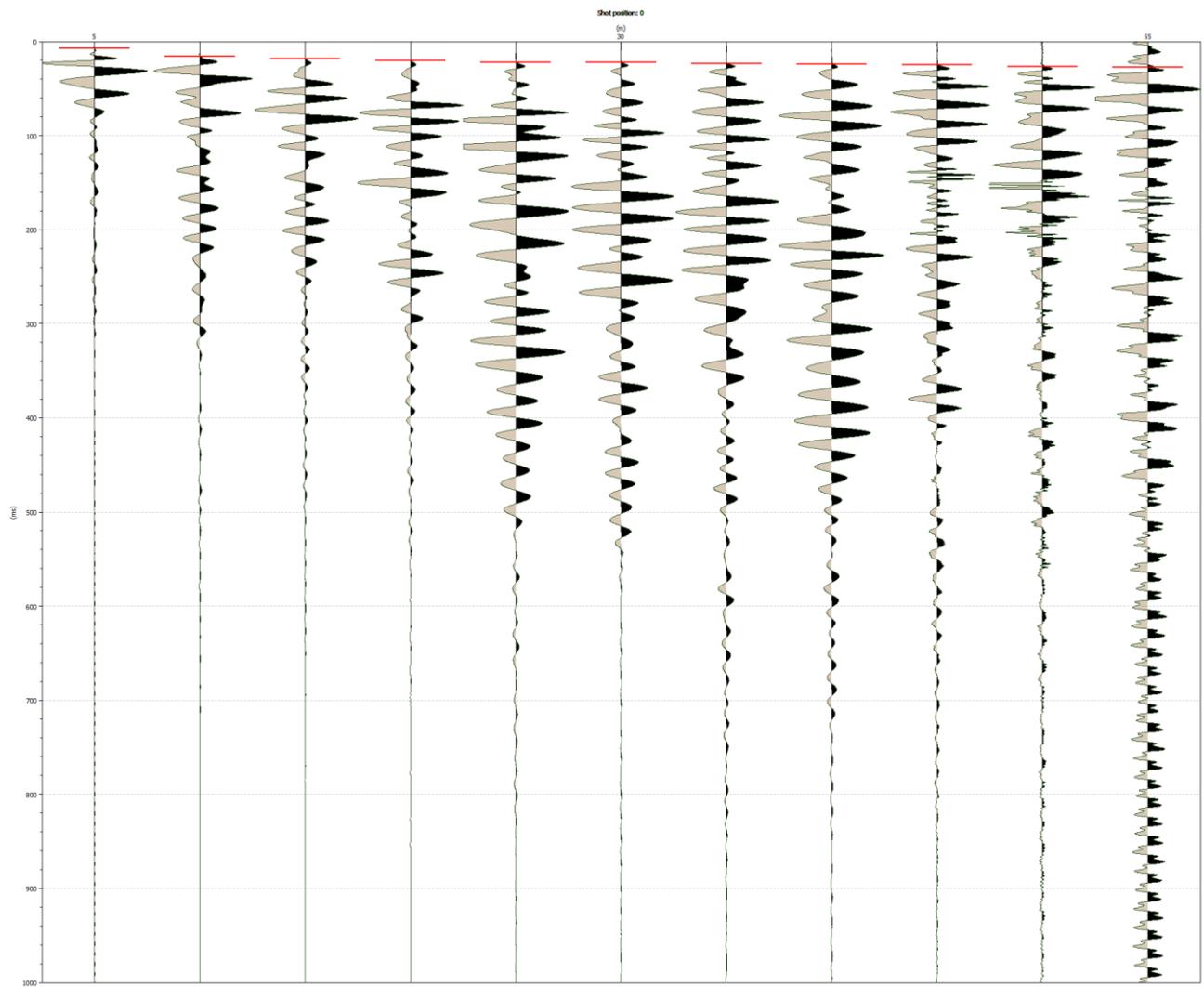


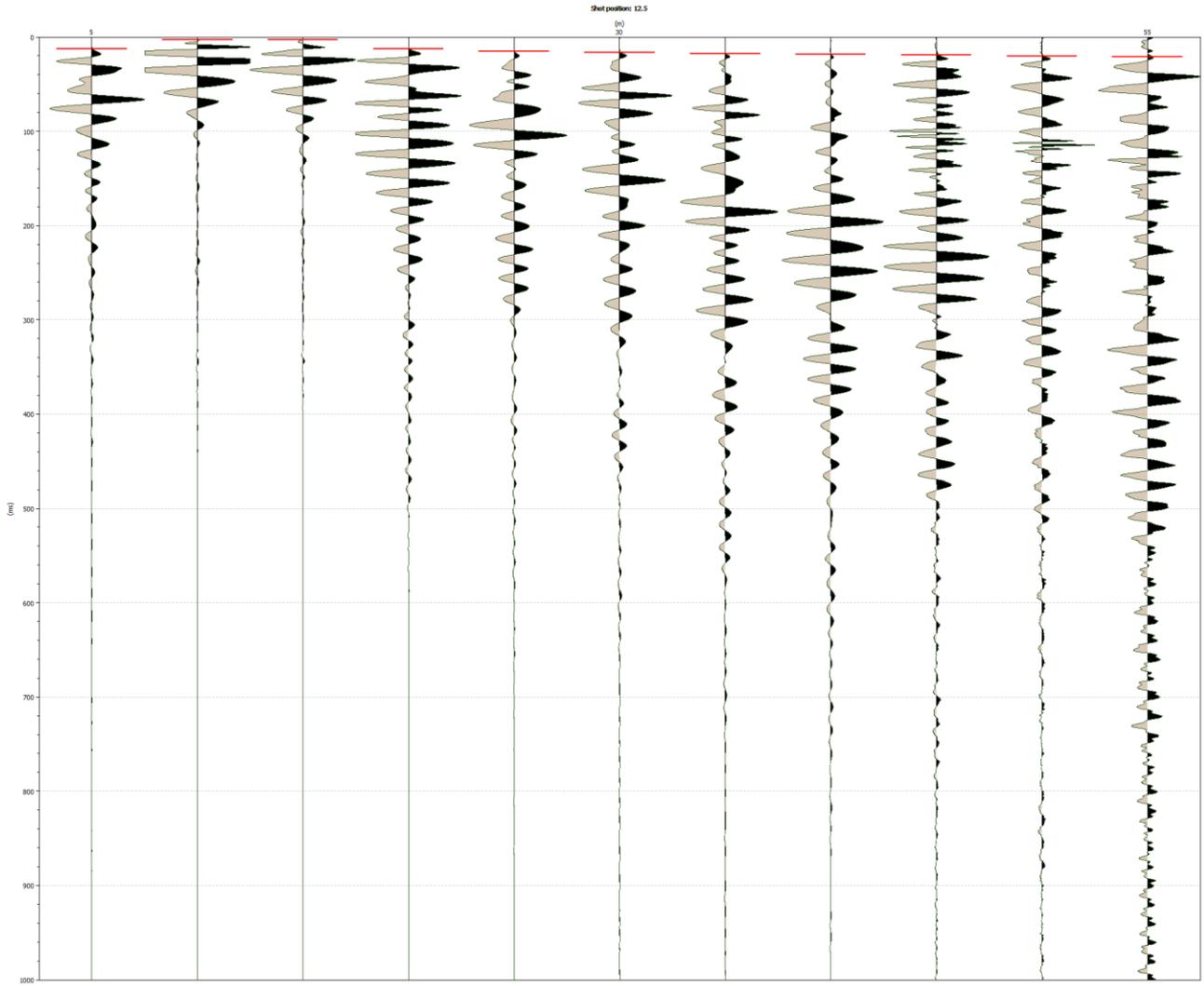


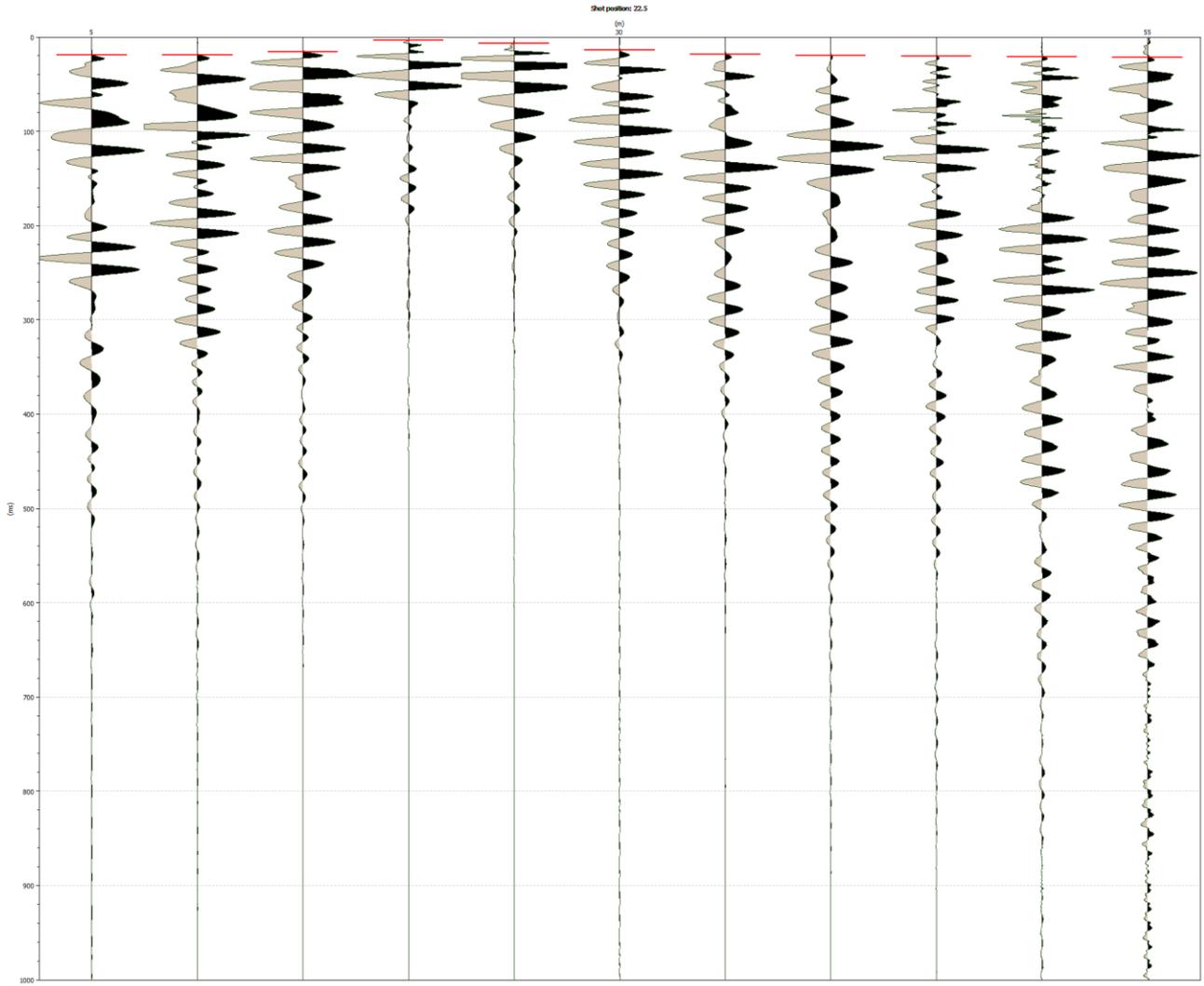
BALMUCCIA T1 - Profilo tomografico - velocità con isolinee - RMSE 9.730499 %

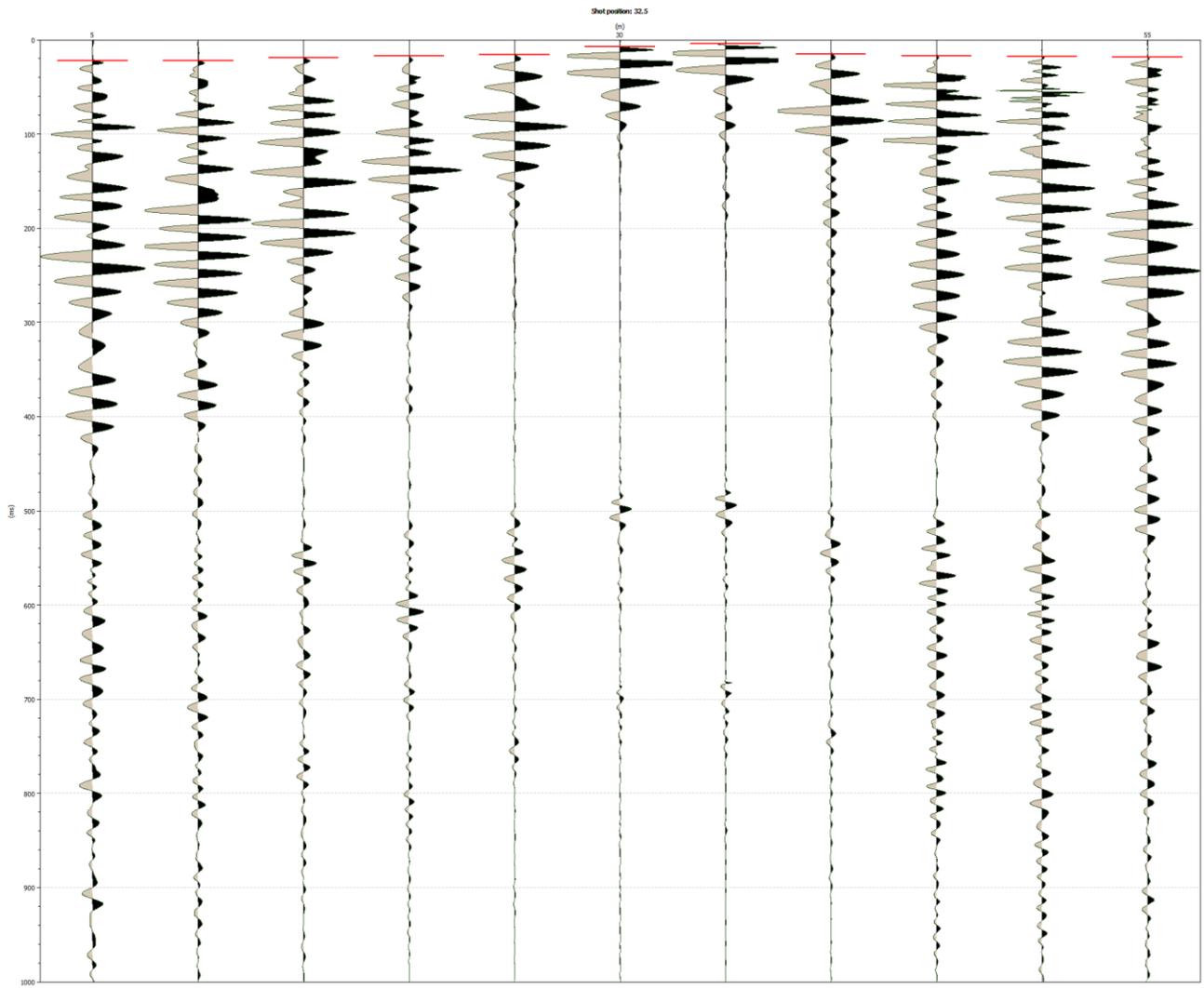


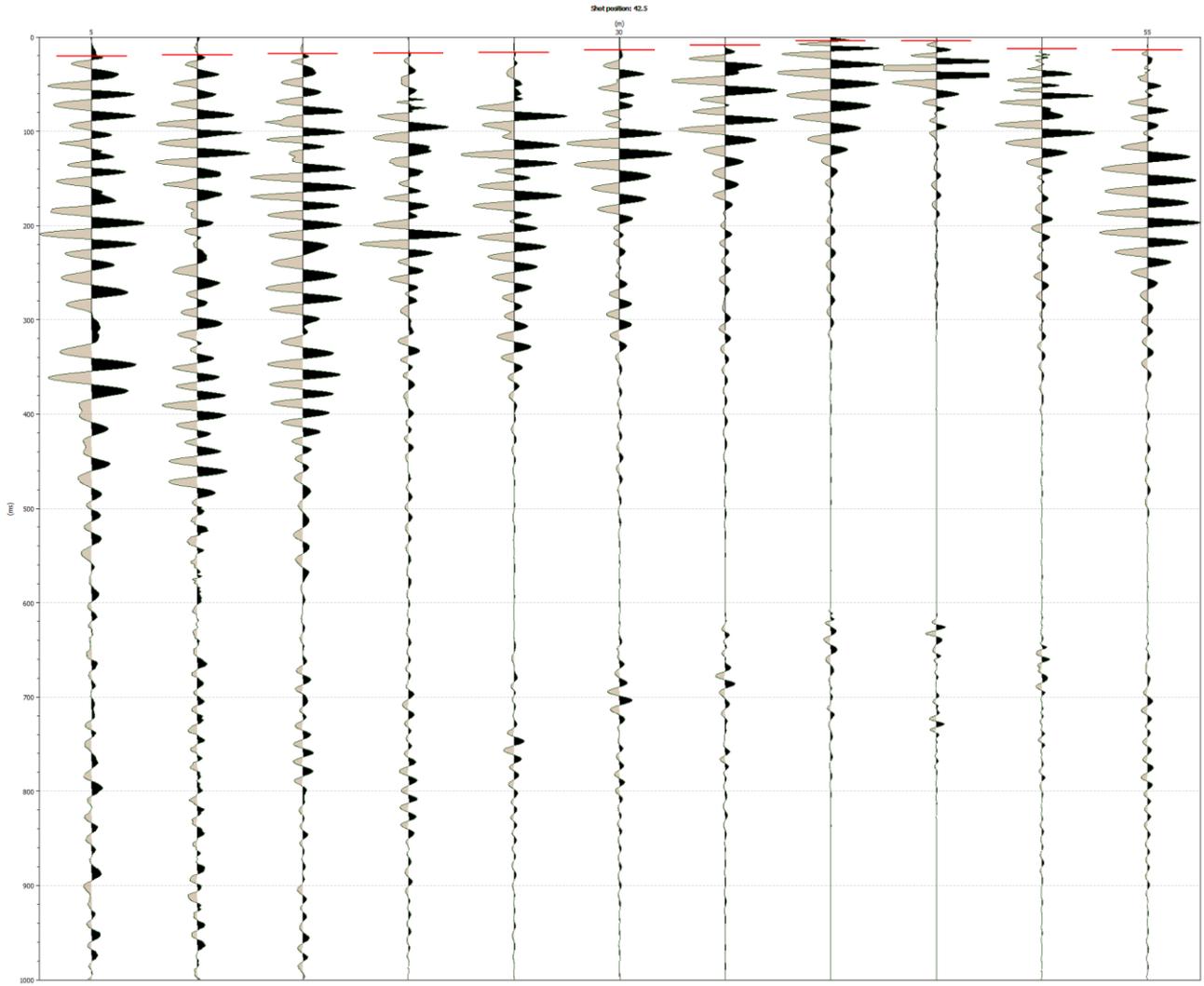
**Indagine T2**

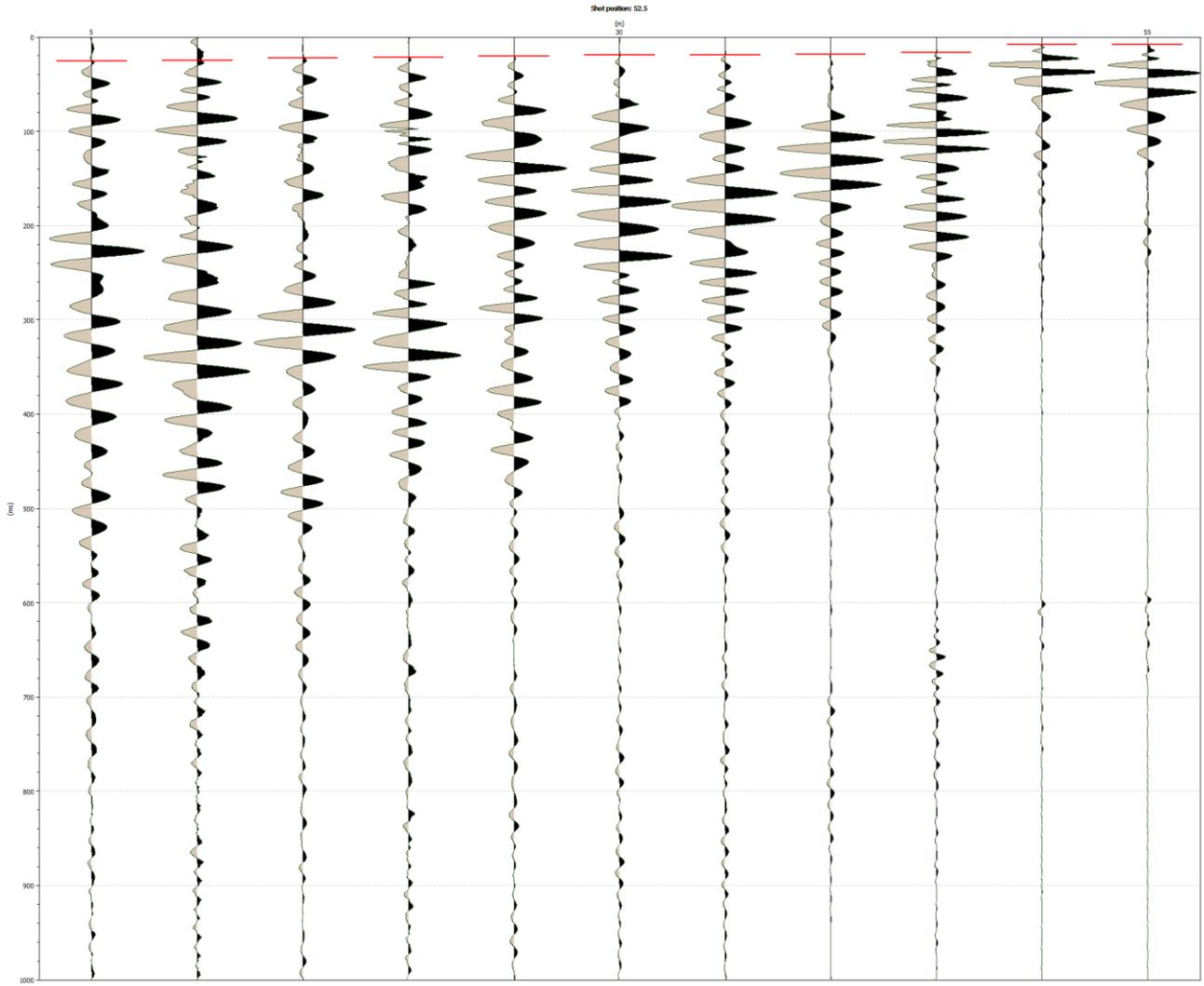


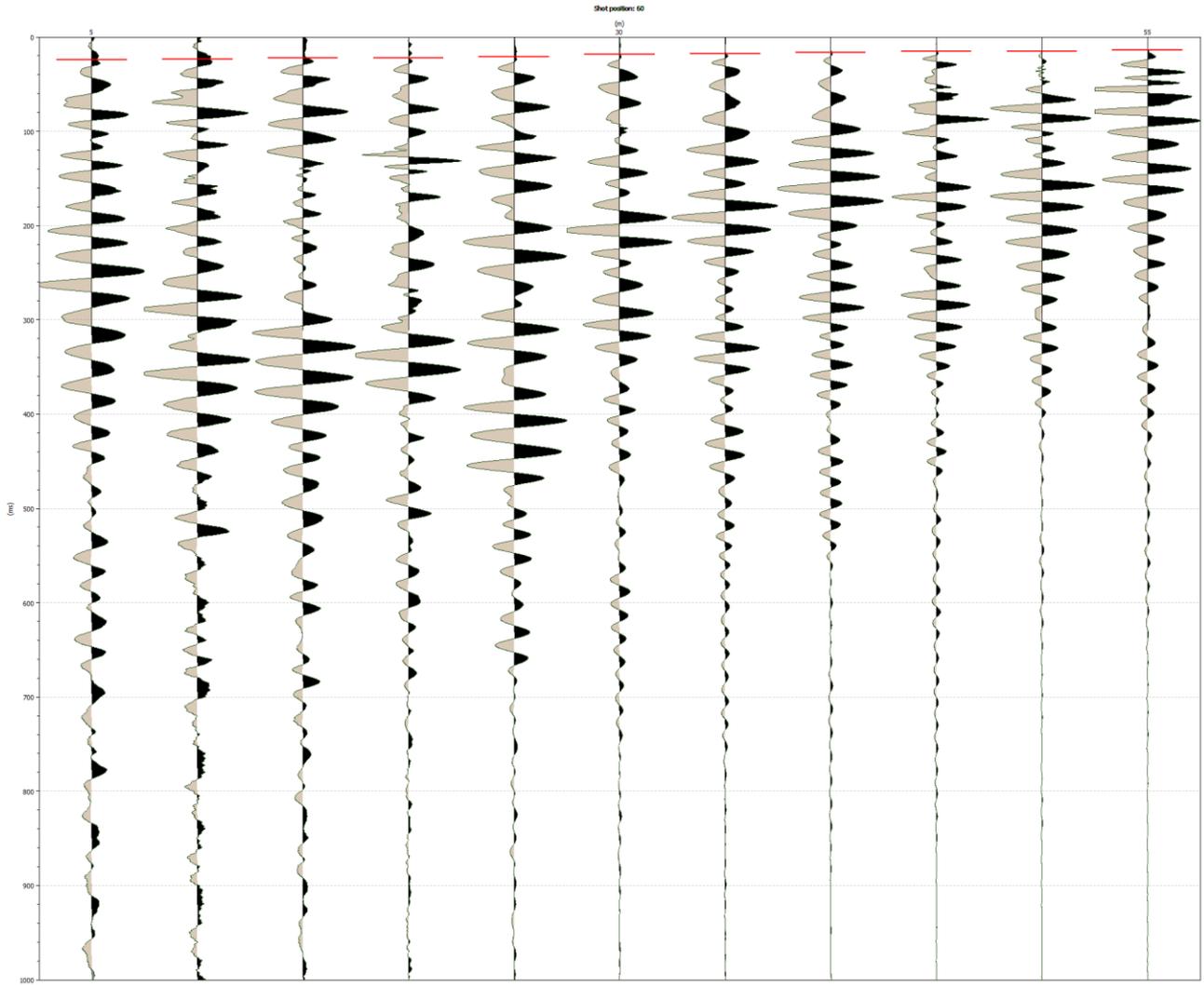


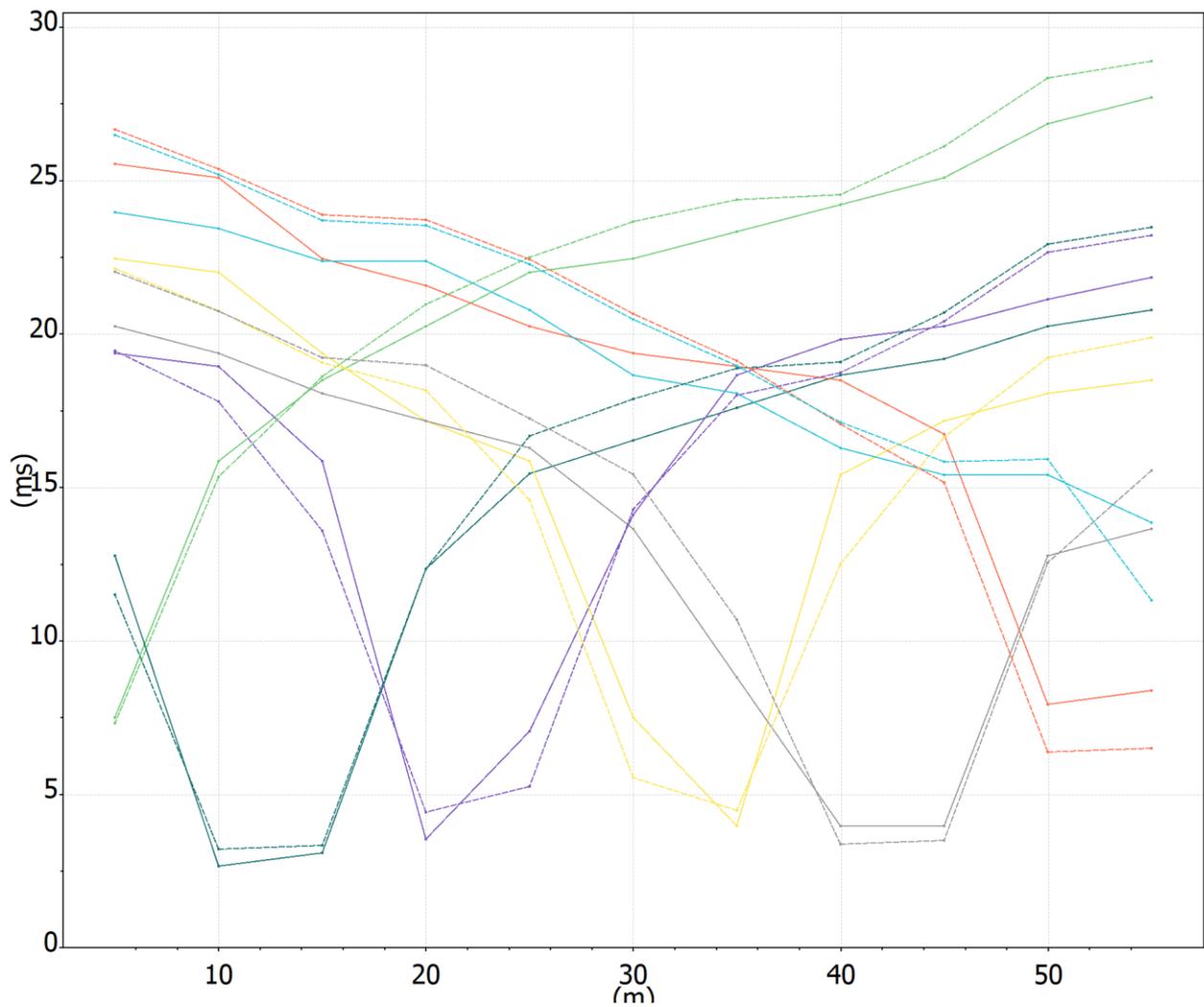




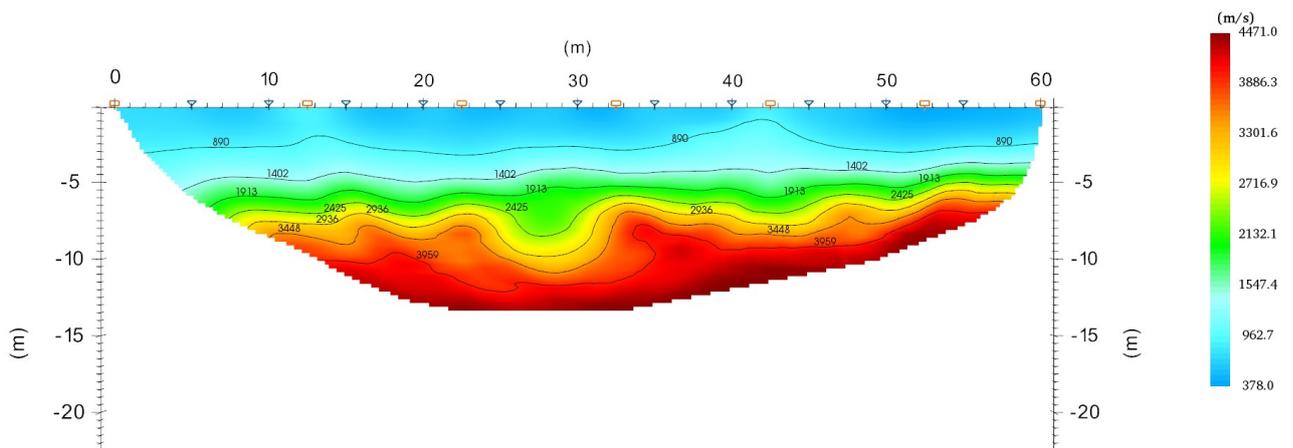




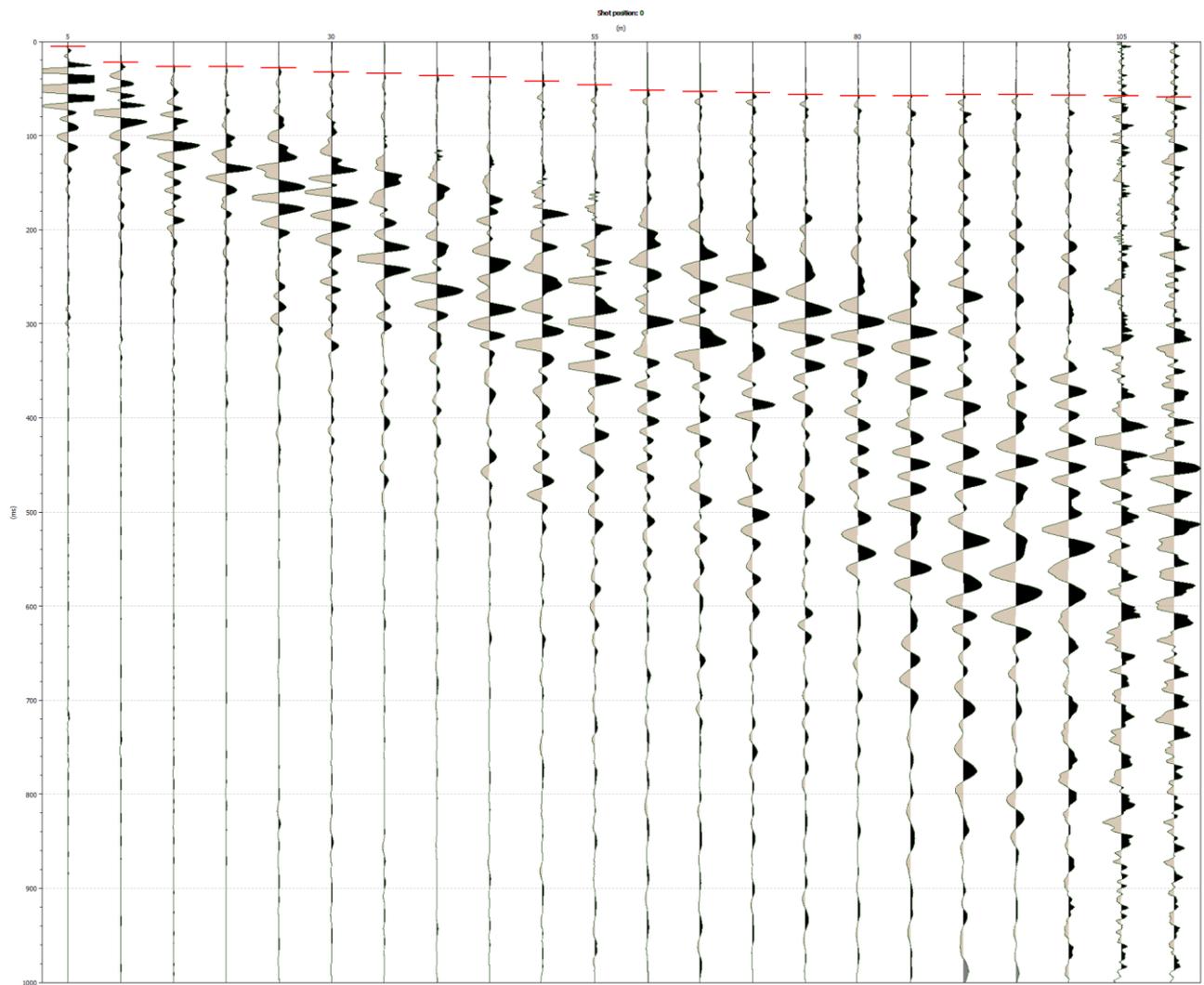


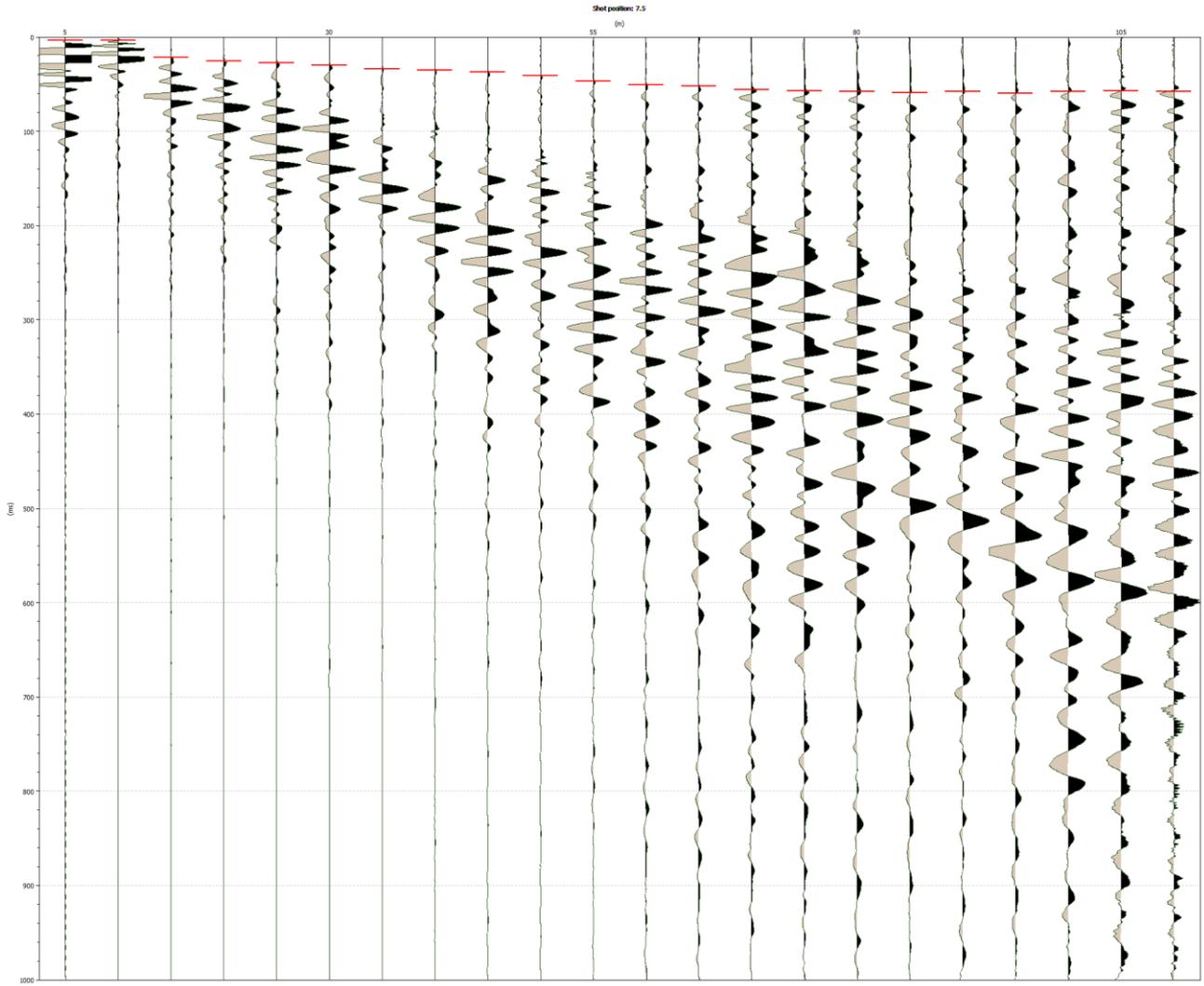


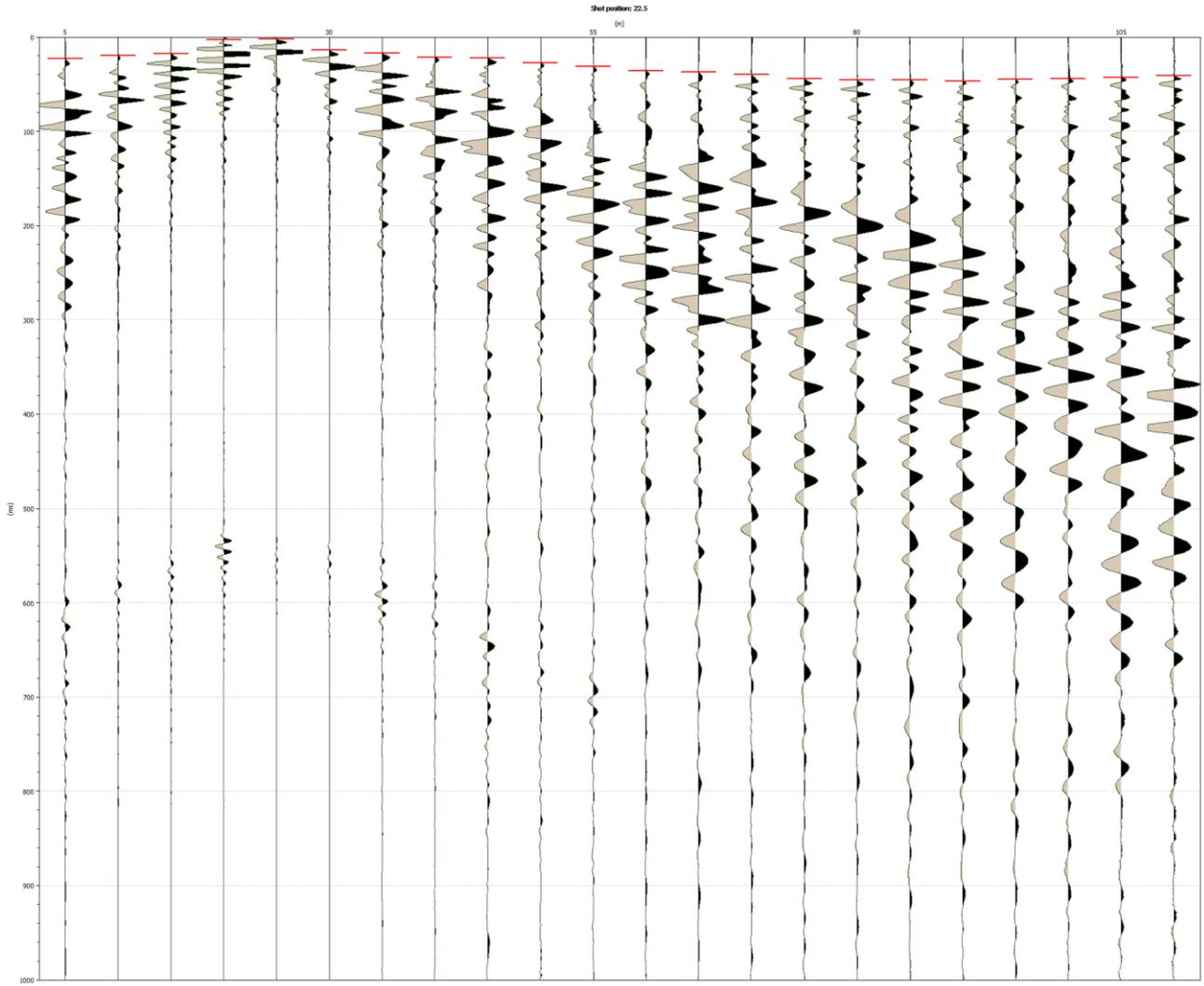
BALMUCCIA T2 - Profilo tomografico - velocità con isolinee - RMSE 0.862691 %

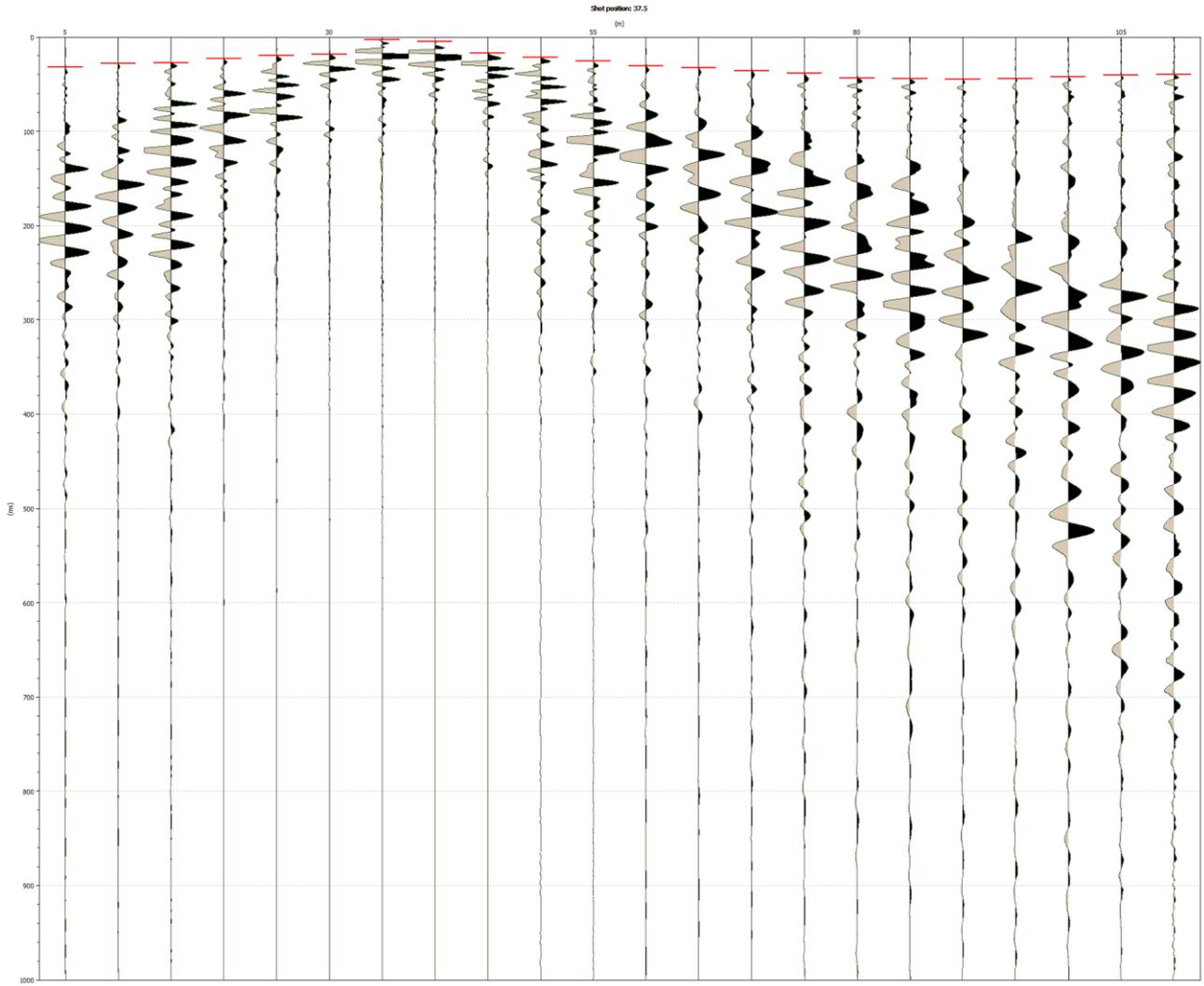


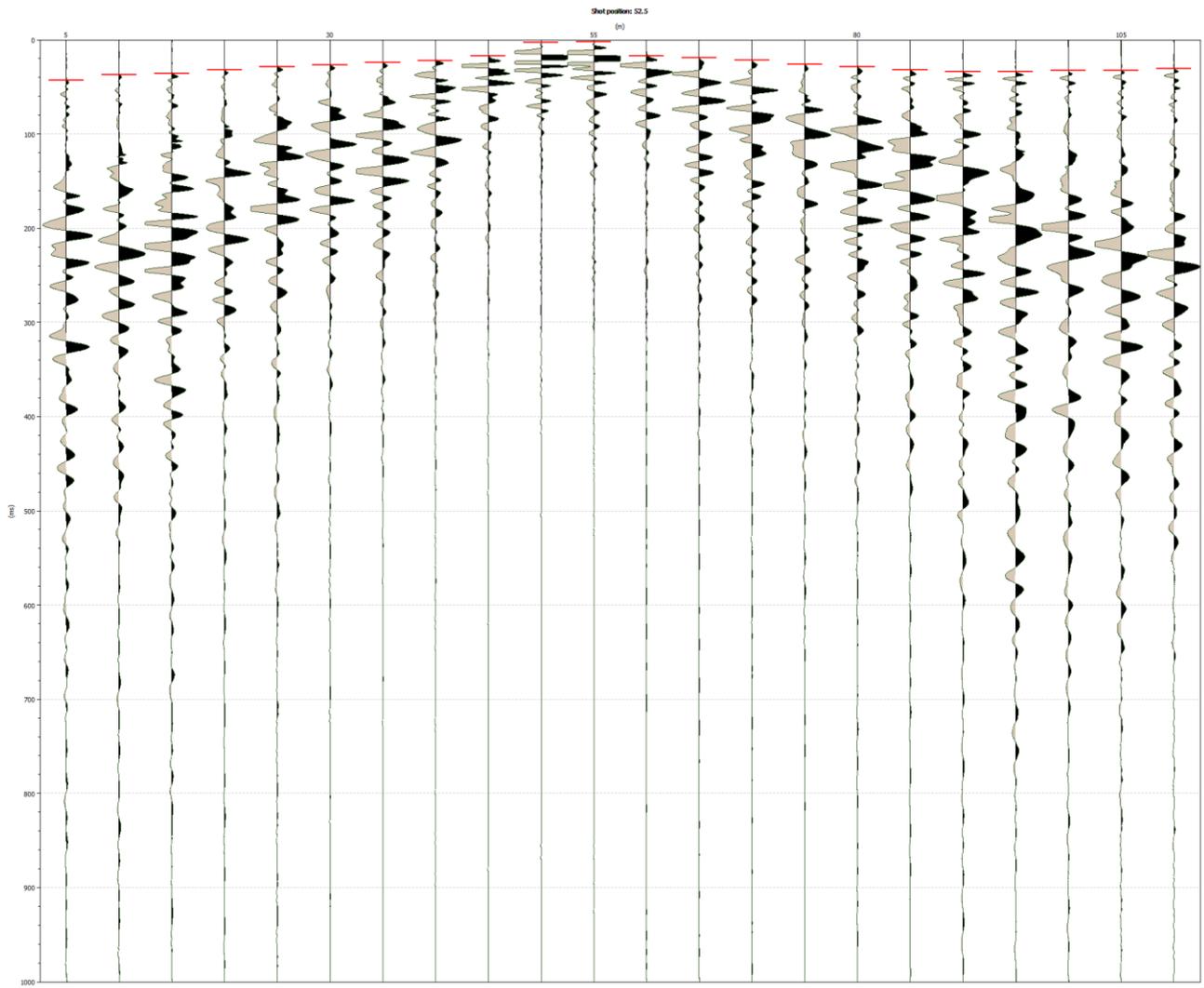
**Indagine T3**

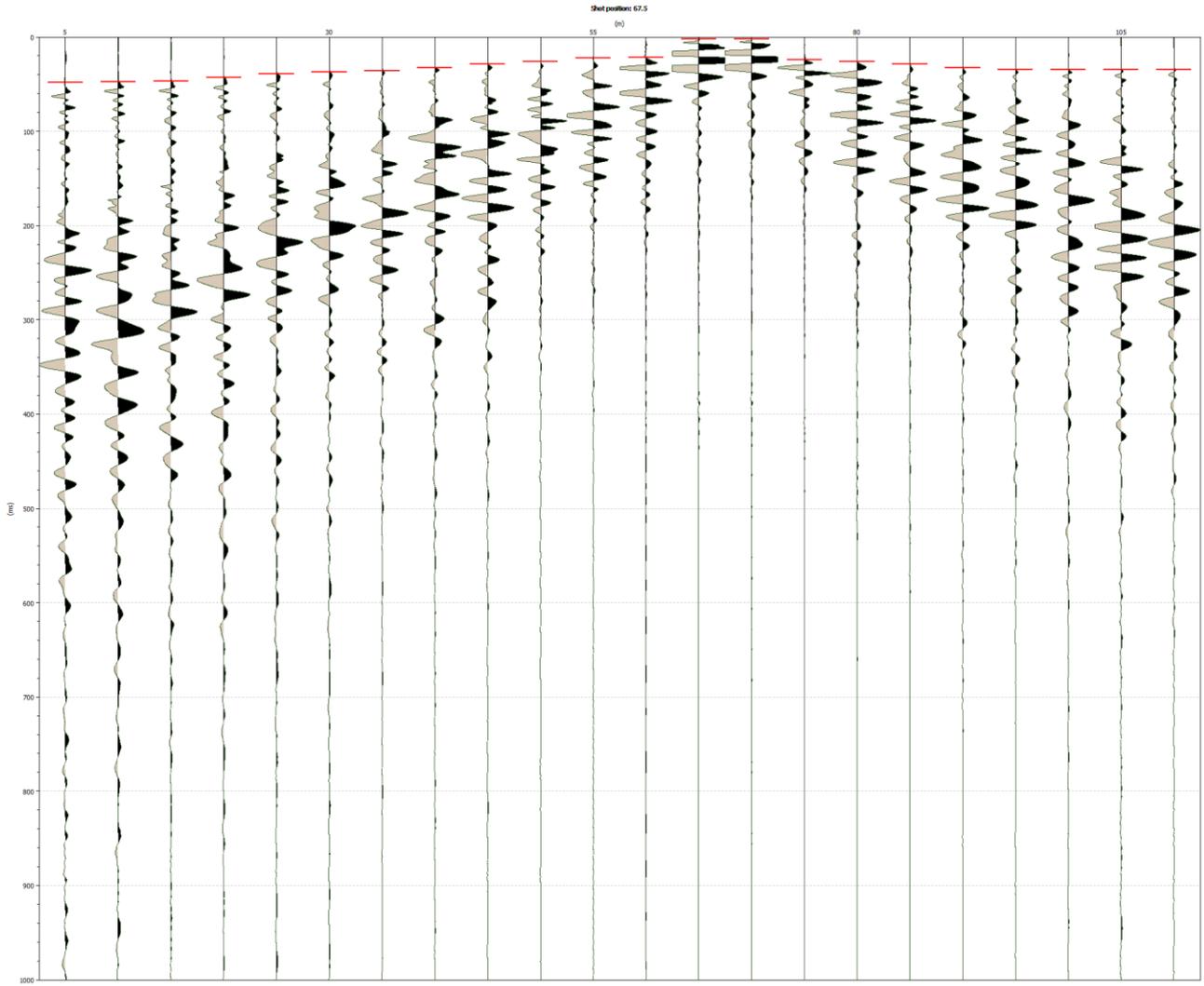


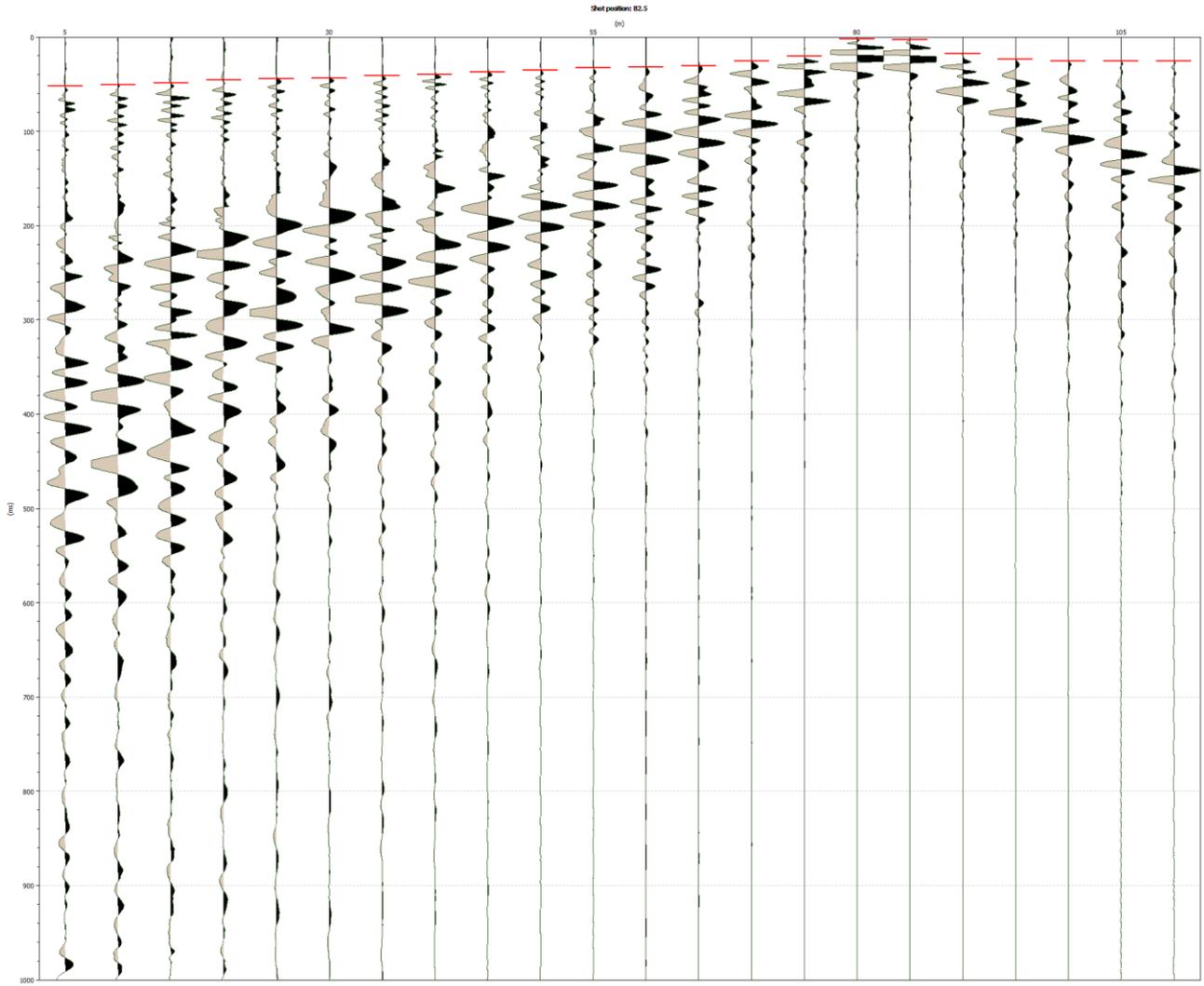


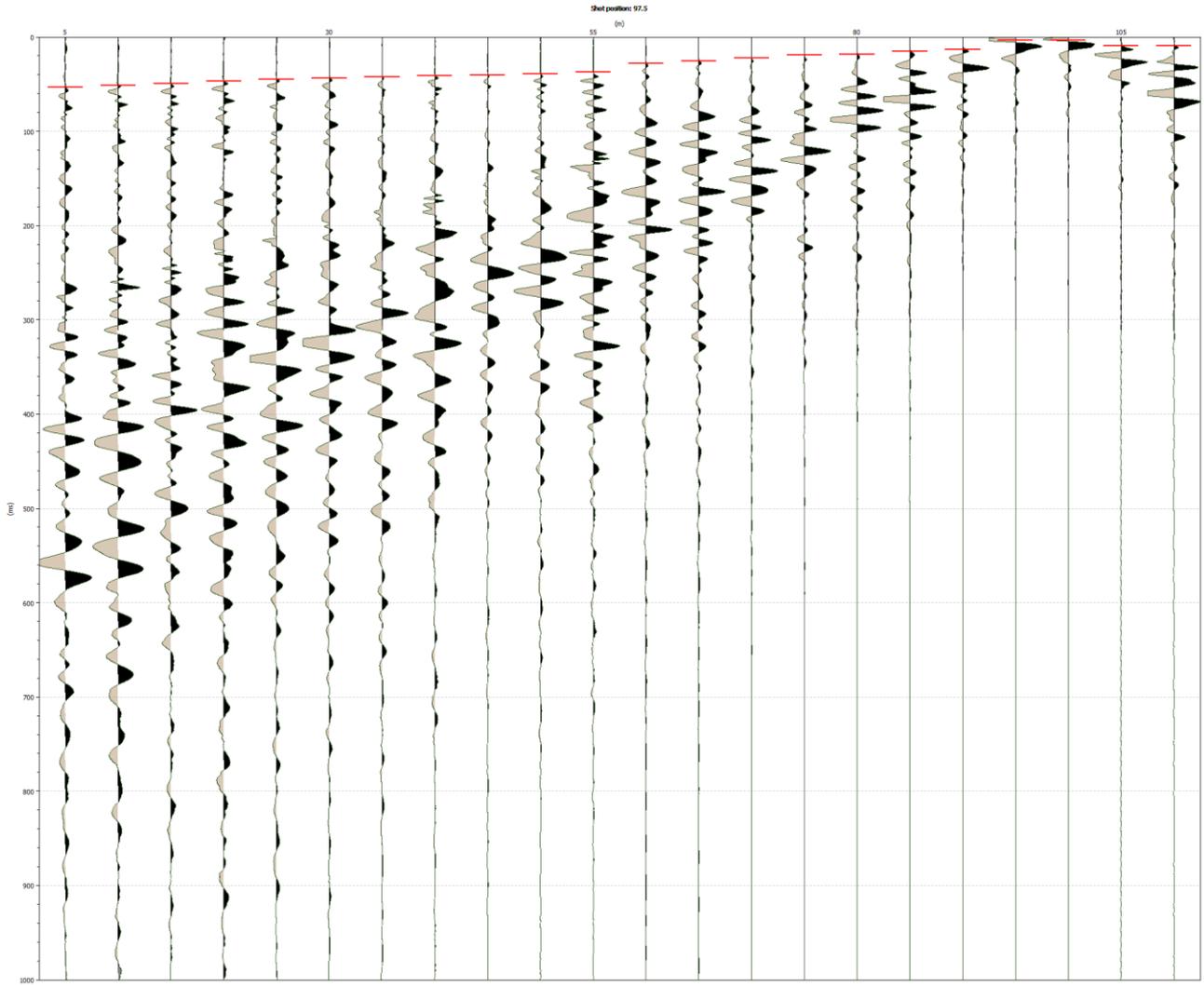


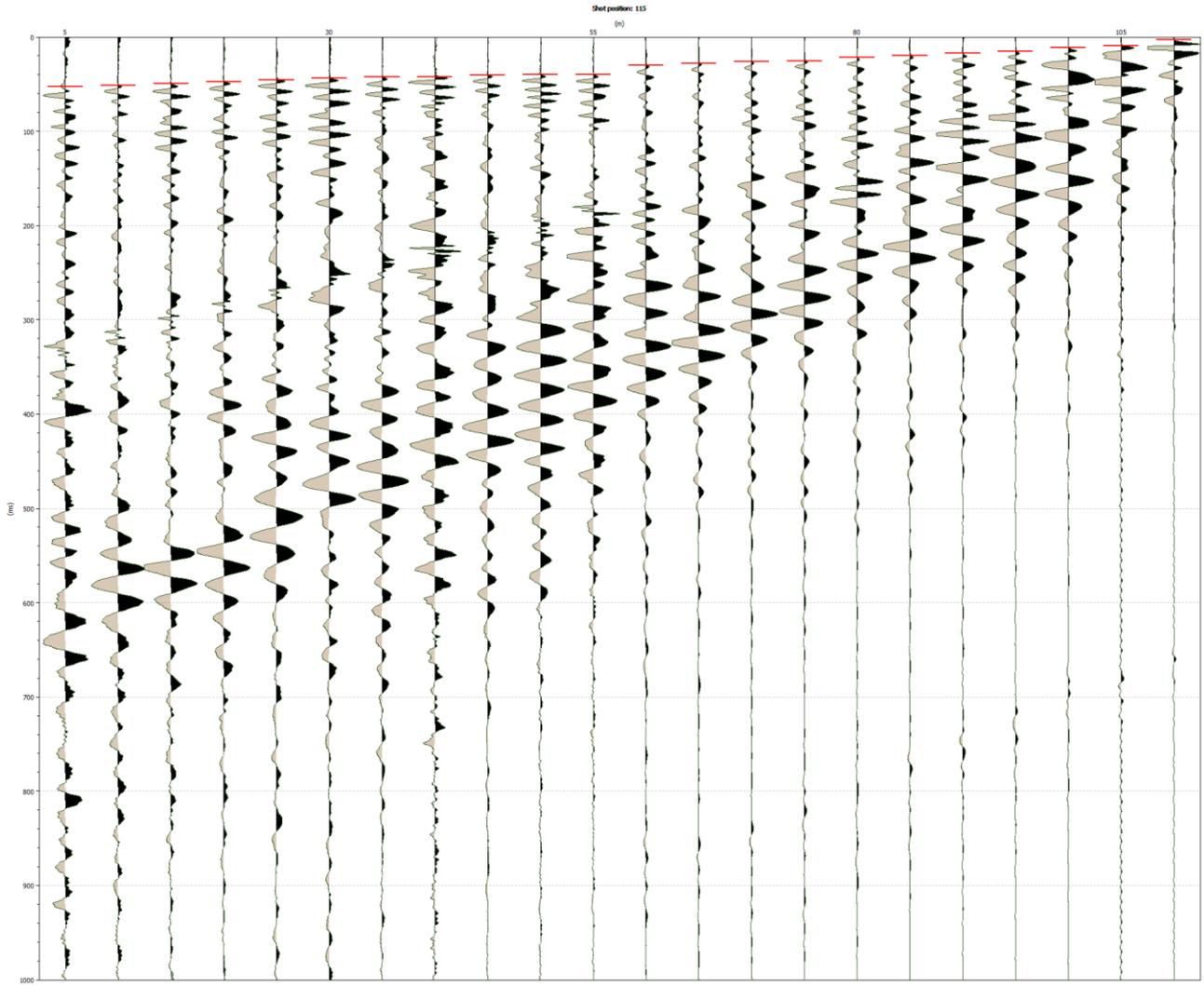


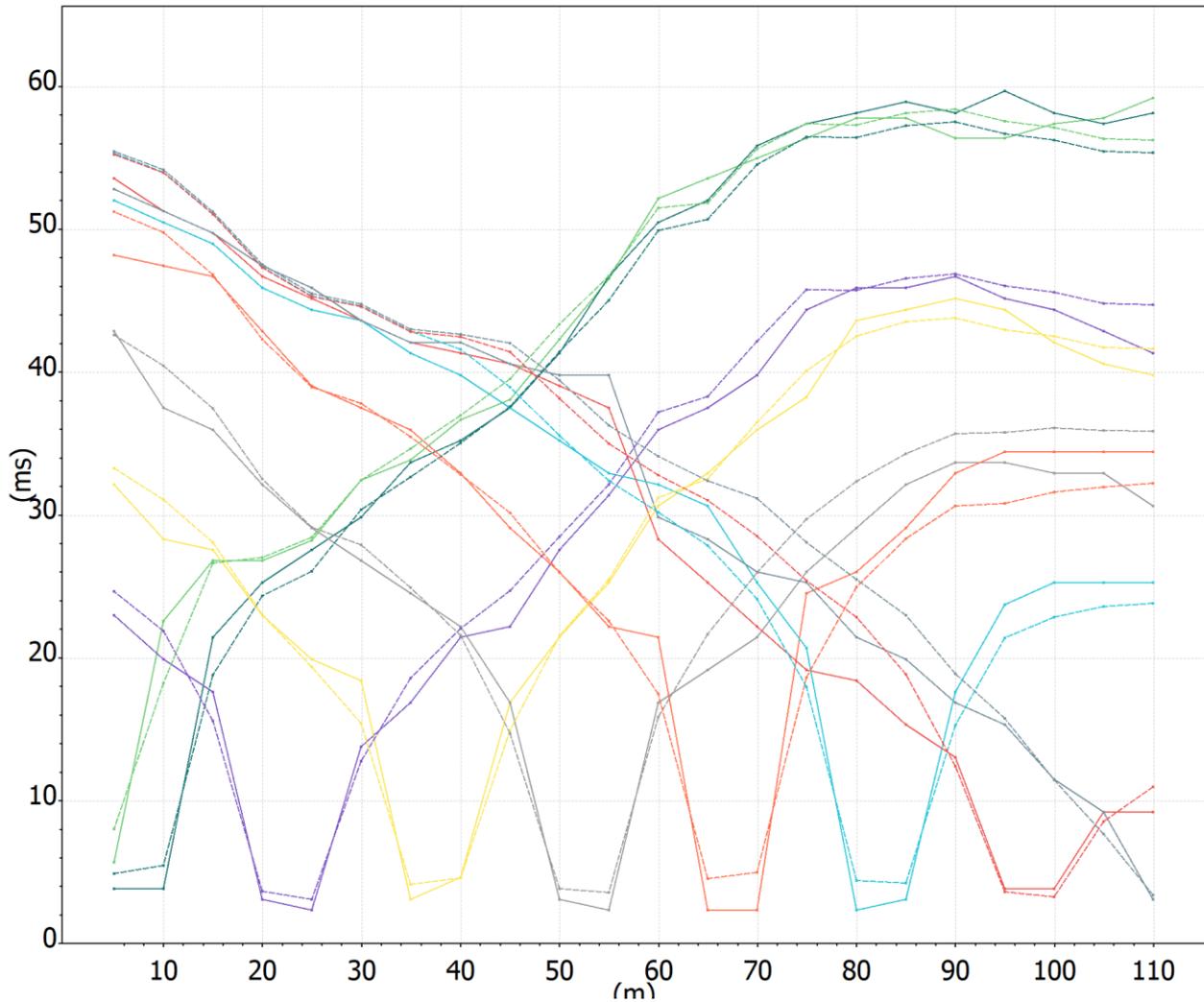




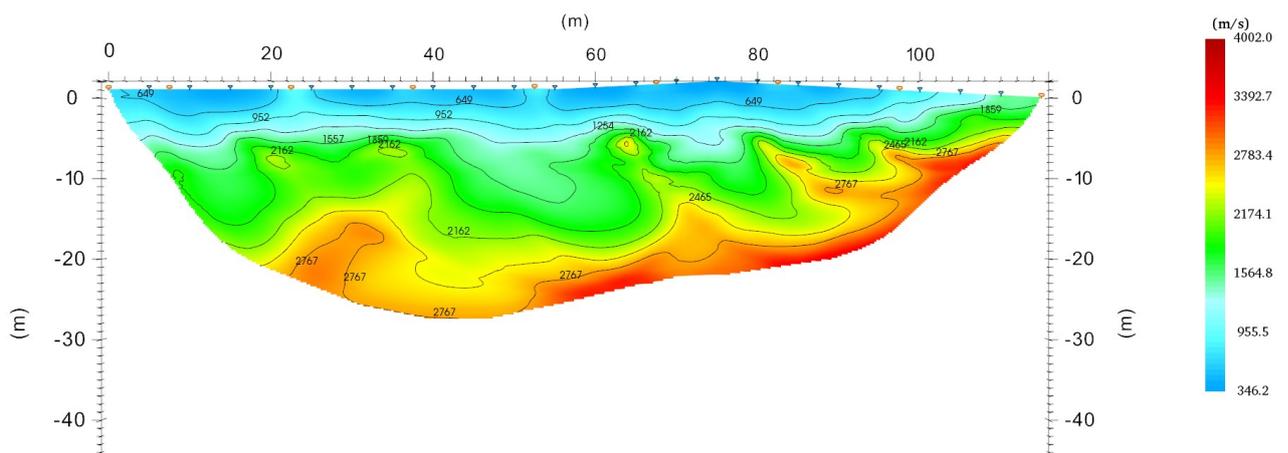








BALMUCCIA T3 - Profilo tomografico - velocità con isolinee - RMSE 2.131192 %



Osservando i risultati dell'indagine di tomografia sismica è possibile osservare come la profondità del substrato roccioso (individuabile orientativamente per valori di  $V_p$  superiori a circa 2500/2700 m/s) aumenti allontanandosi dal concentrico del paese, si hanno profondità dell'interfaccia substrato depositi che vanno dai circa 3-4m in prossimità dell'abitato fino a circa 25m in corrispondenza della S.P. 299.

## Indagine sismica HVSR

Per la caratterizzazione sismica del sito è stata eseguita un'indagine di superficie HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), con l'esecuzione di 2 acquisizioni HVSR.

Le vibrazioni sismiche ambientali (rumore sismico o microtremore) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di  $10^{-4}$  -  $10^{-2}$  mm (Okada, 2003). L'origine del rumore sismico è di tipo ambientale (ad esempio dovuto alle perturbazioni atmosferiche sugli oceani che si propagano come onde superficiali sui continenti), mentre le sorgenti dei microtremori sono le attività antropiche e si propagano come onde superficiali di Rayleigh. L'analisi delle misure di rumore sismico che sembra fornire i risultati migliori è quello dei Rapporti spettrali H/V noto anche come metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o metodo di Nakamura.

L'indagine HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è un'indagine sismica passiva, sul terreno si rilevano i dati di velocità delle onde sismiche acquisiti da una terna geofonica orientata nelle tre direzioni che vengono poi elaborate e interpretate tramite software per l'ottenimento di alcuni parametri specifici; tramite questa indagine è possibile effettuare delle stime per l'individuazione dei seguenti parametri:

- Classificazione del terreno di fondazione in base alle attuali NTC (parametro  $V_{seq}$ )
- Frequenza propria di risonanza del sito
- Ricostruzione stratigrafica del sottosuolo

All'interno dell'area di studio è stato condotto il rilievo dei microtremori con il tromografo Gemini 4,5 Hz della PASI S.r.l., per verificare le caratteristiche sismiche e stratigrafiche del terreno. Lo strumento utilizzato registra il rumore sismico ambientale presente nella superficie terrestre e generato da fenomeni atmosferici, dall'attività antropica e dall'attività dinamica terrestre.

I microtremori sono rappresentati da oscillazioni molto piccole (accelerazioni dell'ordine di  $10^{-15}m/s^2$ ), che, attraversando strati con caratteristiche differenti (in termini di densità e velocità di propagazione delle onde), subiscono fenomeni di rifrazione, riflessione, attenuazione e altri.

Questi fenomeni sono tali per cui un'onda che viaggia all'interno di un mezzo e viene riflessa da una superficie di discontinuità interferisce con le onde incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime quando la lunghezza d'onda incidente è pari a 4 volte lo spessore  $h$  dello strato (condizione di risonanza). La frequenza di risonanza è legata allo spessore ( $h$ ) e alla velocità delle onde di taglio  $V_s$  del primo strato ( $V_{s1}$ ) dalla seguente relazione:

$$f_r = V_{s1}/4h$$

Utilizzando la formula sopra esposta si evince che conoscendo la profondità di una discontinuità (trovata ad esempio attraverso indagini dirette quali prove penetrometriche) e la frequenza fondamentale del terreno in superficie (fornita dal tromografo) è possibile risalire alla velocità delle onde S del terreno. Una volta ricavato il valore di  $V_s$ , è possibile ricostruire la stratigrafia dell'area e l'andamento delle discontinuità, se presenti.

La tecnica HVSR consiste nella valutazione dei rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e verticali del moto ed è in grado di fornire in buona approssimazione il contenuto in frequenza del segnale dei microtremori. Nello specifico sono state realizzate 3 acquisizioni che hanno restituito risultati tra loro molto simili a conferma di una regolare esecuzione delle stesse.

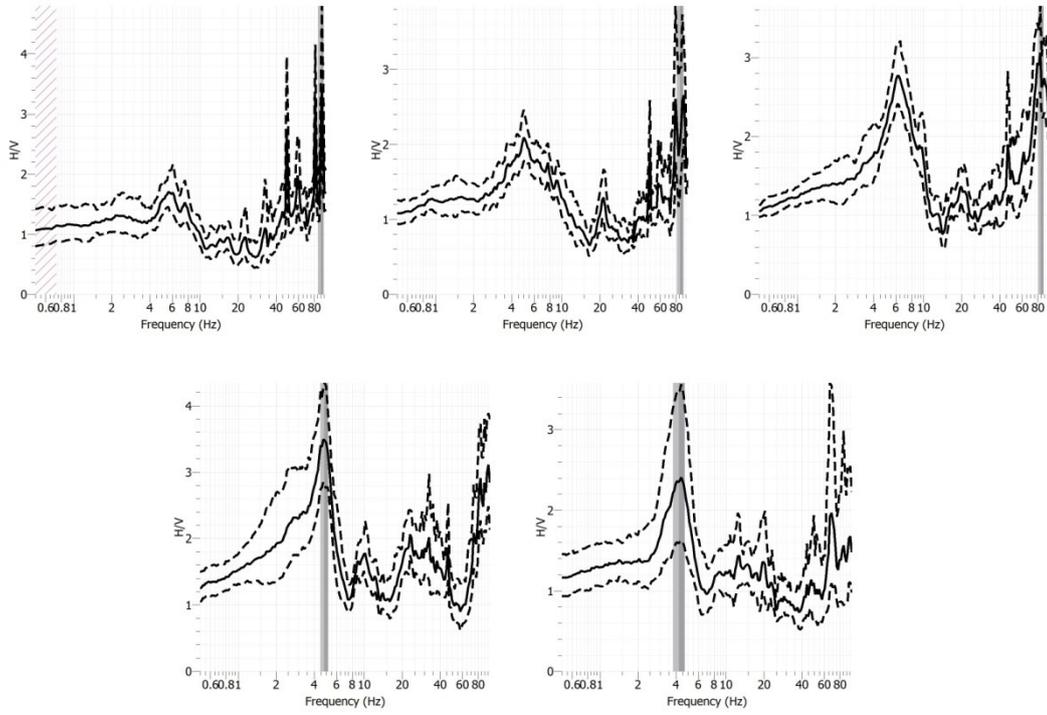
L'indagine HVSR permette l'individuazione delle frequenze di risonanza caratteristiche del sito, oltre alla ricostruzione dell'andamento delle velocità sismiche nel sottosuolo; durante la procedura di elaborazione è stato possibile verificare che sono stati rispettati i "CRITERI SESAME".

Si riportano di seguito le immagini caratteristiche delle indagini eseguite.

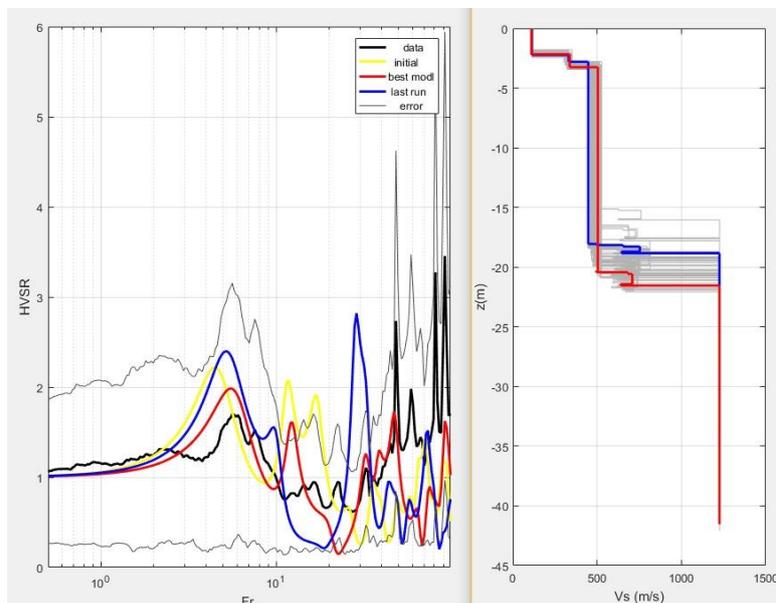
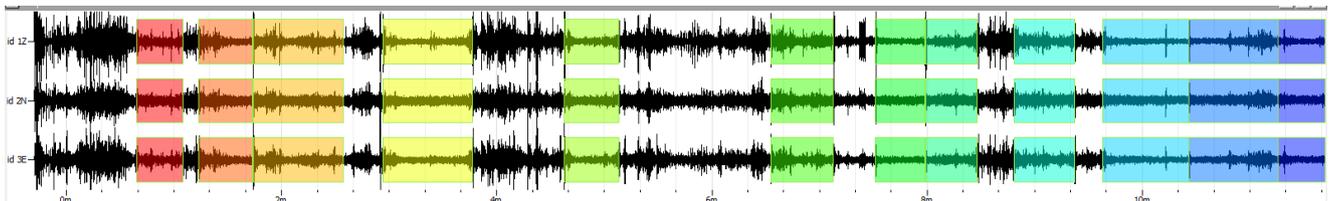
I segnali acquisiti, come visualizzabile nei grafici frequenze su rapporto H/V, sono qualitativamente accettabili e permettono la chiara visualizzazione dei picchi caratteristici.

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato in primo luogo il software Geopsy per la prima elaborazione del segnale per

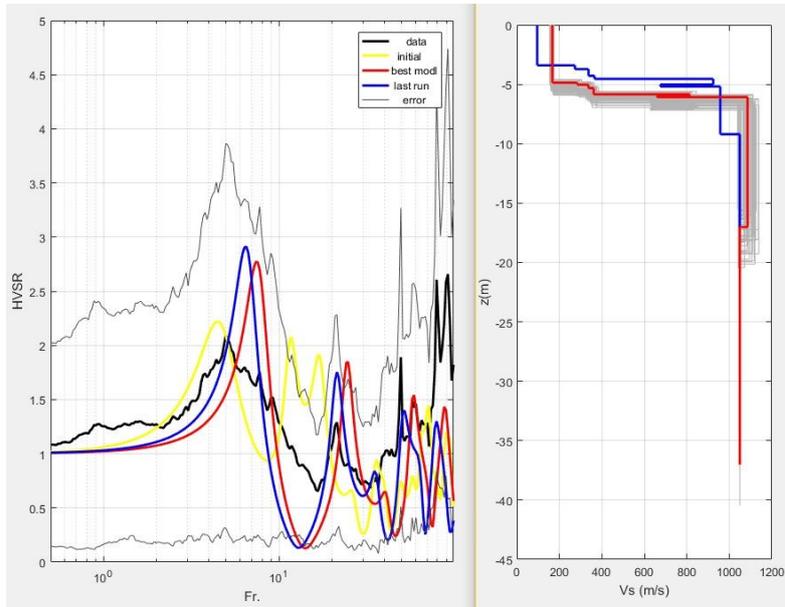
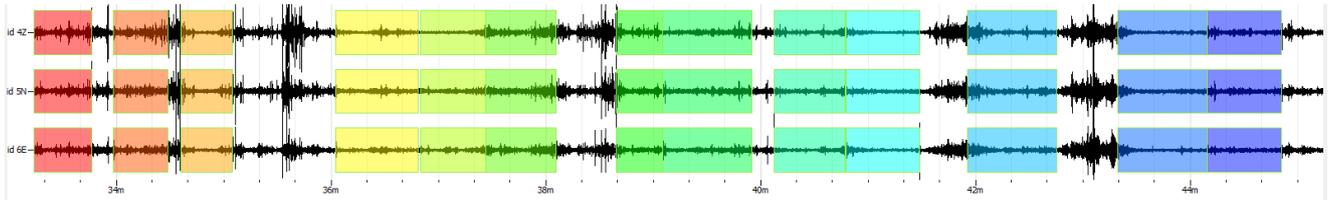
poi passare al software opensource OpenHVSr: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSr modeling and inversion (Author S.Bignardi, A.Mantovani, N.Abu Zeid).



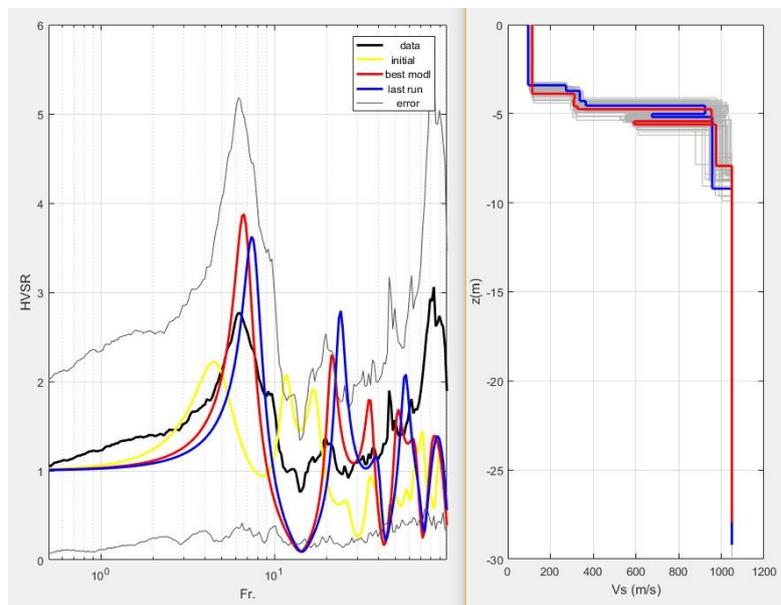
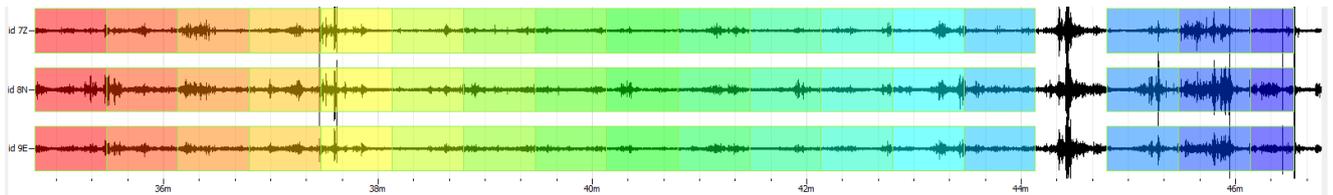
Acquisizioni HVSr (1-2-3-4-5).



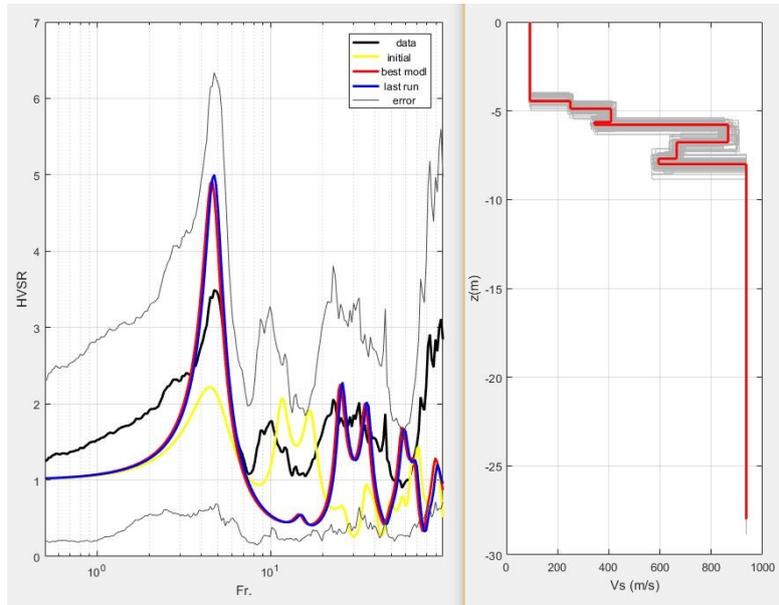
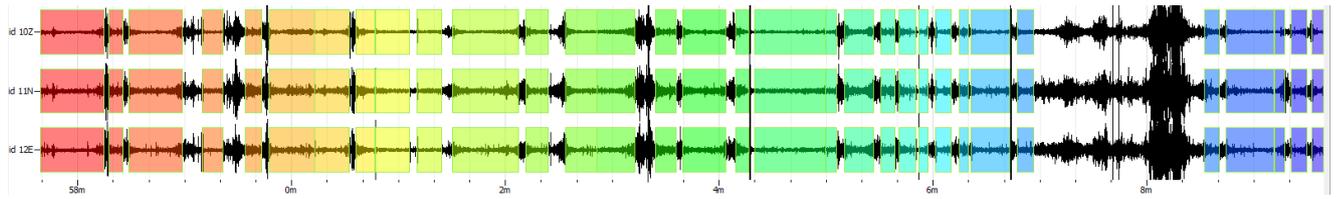
## HVS1



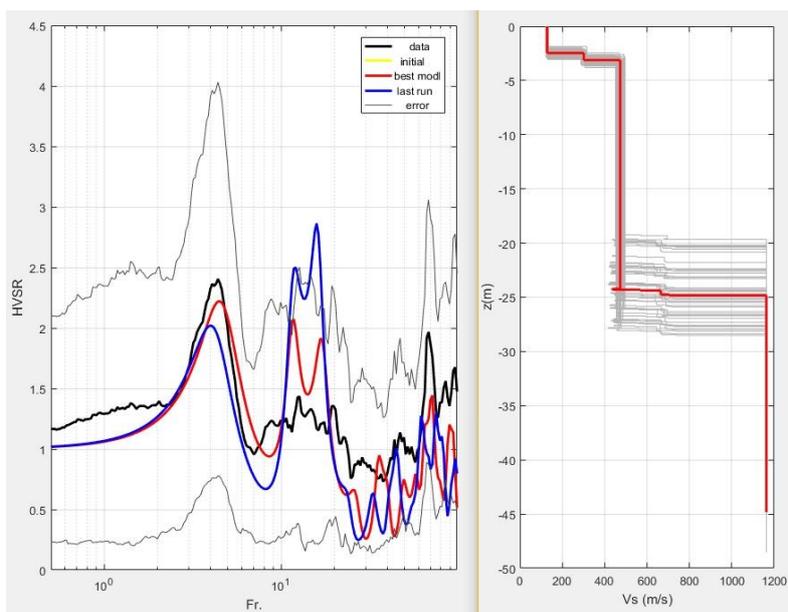
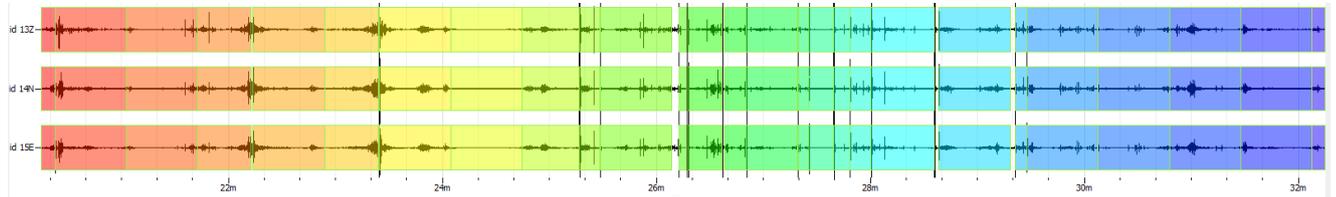
## HVS2



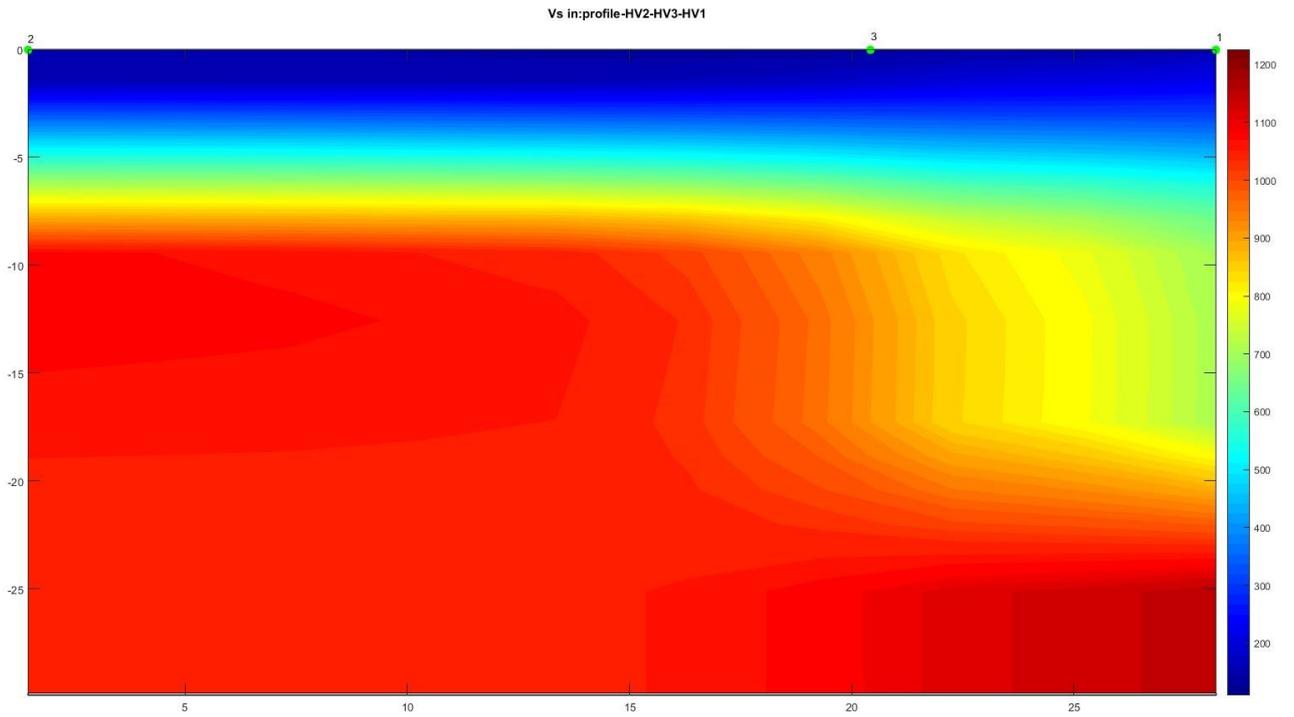
## HVS3



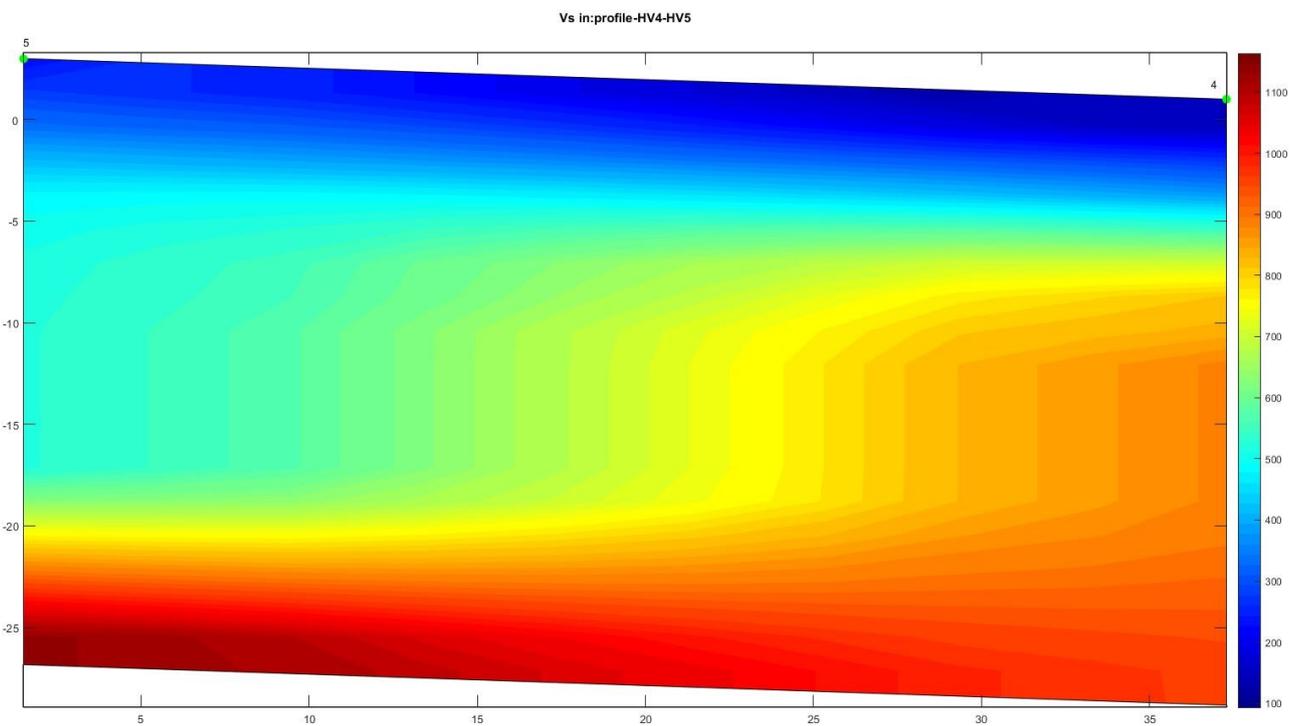
## HVS4



## HVS5



Sezione sismica ( $V_s$ ) interpretativa HV1-2-3



Sezione sismica ( $V_p$ ) interpretativa HV4-5.