

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



# INDAGINI GEOFISICHE SUPERFICIALI PRESSO LA MINIERA CAPPONA

Relatore: Ing. Luigi ZANZI

Tesi di Laurea di:

Ruggero BRAMBILLA

matricola 711829

Anno Accademico 2010/2011

# Indice

<b>Indice.....</b>	<b>2</b>
<b>Introduzione .....</b>	<b>4</b>
<b>Capitolo 1. Quadro introduttivo .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Inquadramento storico – geografico .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Inquadramento geologico.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Risultati ottenuti dai rilievi e dalle analisi nel 2009 .....</b>	<b>9</b>
1.3.1. Rilievo geologico – strutturale .....	9
1.3.2. Analisi geofisica.....	14
1.3.3. Modello geofisico finale .....	19
<b>Capitolo 2. Indagini sismiche.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Acquisizione dati .....</b>	<b>21</b>
2.1.1. Stendimento a 3 metri .....	23
2.1.2. Stendimento a 1 metro .....	24
<b>2.2. Pre-elaborazione dei dati .....</b>	<b>25</b>
2.2.1. Analisi dello start time .....	25
2.2.2. Filtro passabanda.....	33
<b>2.3. Picking dei primi arrivi .....</b>	<b>34</b>
2.3.1. Identificazione dei primi arrivi .....	34
2.3.2. Correzione del picking.....	35
<b>Capitolo 3. Inversione con metodo reciproco .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. Descrizione del metodo .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Risultati .....</b>	<b>39</b>

<b>Capitolo 4. Inversione con metodo tomografico.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. Descrizione del metodo .....</b>	<b>42</b>
4.1.1. Modello di partenza ricavato col metodo reciproco .....	42
<b>4.2. Risultati .....</b>	<b>43</b>
<b>Capitolo 5. Indagini Radar.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Acquisizione dati.....</b>	<b>49</b>
5.1.1. IDS 200 .....	51
5.1.2. MALA 100 .....	51
5.1.3. MALA 50 .....	51
<b>5.2. Elaborazione dei dati.....</b>	<b>52</b>
<b>5.3. Risultati .....</b>	<b>58</b>
<b>Capitolo 6. Analisi dei risultati.....</b>	<b>68</b>
6.1. Analisi e confronto dei risultati ottenuti con i risultati precedenti.....	68
<b>Conclusioni .....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>70</b>

# Introduzione

Il presente elaborato vuole approfondire lo studio del Politecnico di Milano del 2009, nell'area della miniera Cappona in località Montevecchia (Lc), lungo la strada SP68, via Alta Collina (Figura 0.1).

Il sito, dismesso nel novembre 1958, subì un crollo all'inizio 1959, coinvolgendo 300 m della strada soprastante la miniera, che collegava le località S. Bernardo e Cappona, ricostruita poi negli anni '70.

Verso la fine degli anni 2000, la Regione Lombardia ed il Politecnico di Milano decisero di far rientrare lo studio della stabilità della miniera Cappona nell'ambito del progetto *Miniere dismesse lombarde con risvolti di protezione civile: analisi scientifico – tecniche per la loro messa in sicurezza*, in quanto particolarmente significativa poiché il suo stato di abbandono potrebbe causare fenomeni di instabilità.

Nel 2009 venne quindi realizzato lo studio del Politecnico, con lo scopo di caratterizzare geologicamente e geofisicamente l'area in oggetto. Individuando così 4 livelli di spessore pari a circa 10 m ognuno.

Lo scopo del presente elaborato è di valutare l'esistenza di livelli più superficiali con metodologie sismiche e radar.



Figura 0.1: Localizzazione dell'abitato di Montevecchia rispetto alle città di Lecco e Como

# Capitolo 1. Quadro introduttivo

## 1.1. Inquadramento storico – geografico

La Miniera Cappona è ubicata nel Comune di Montevecchia, in provincia di Lecco, in corrispondenza della collina incisa a Nord dal Torrente Curone e a Sud dal Torrente Molgoretta, tra le località di Cappona e San Bernardo. In Figura 1.1 si riporta lo stralcio della CTR dell'area di studio.

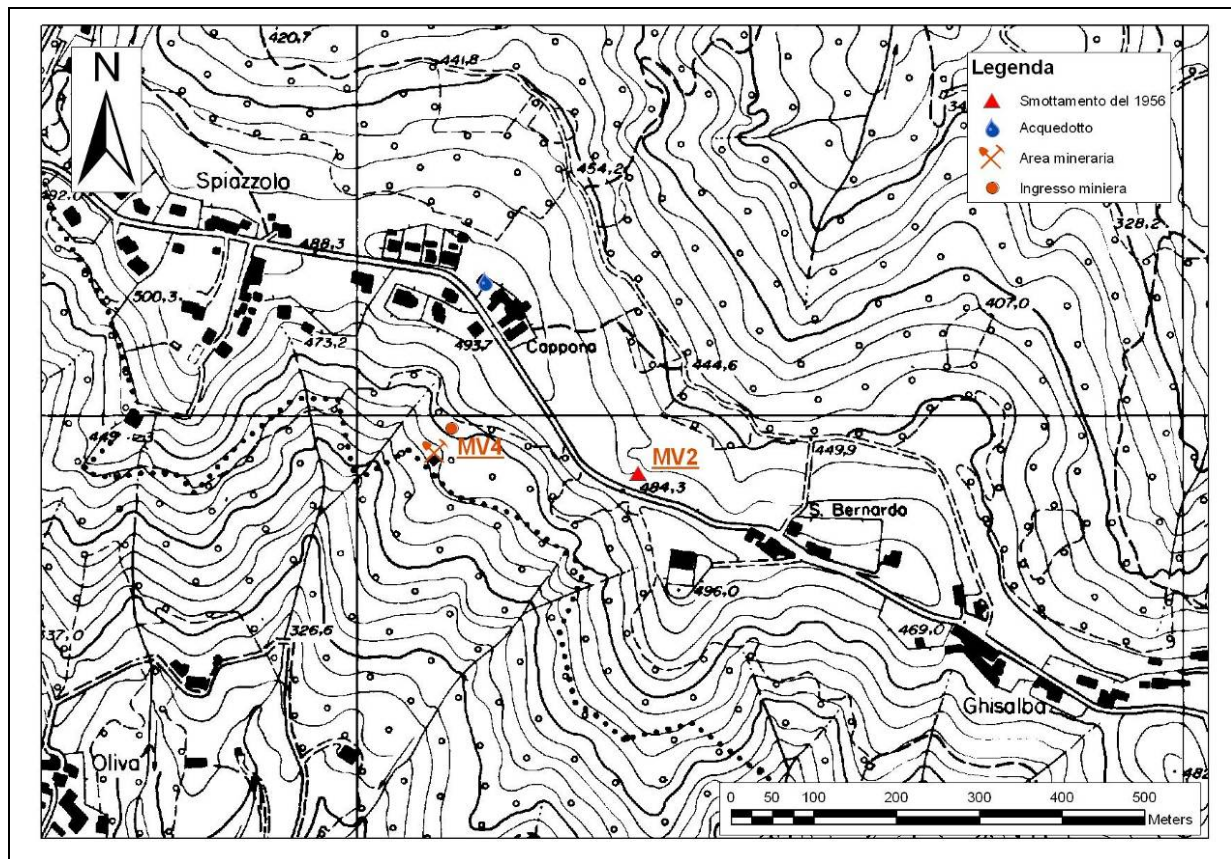


Figura 1.1: Stralcio della CTR, in cui sono stati evidenziati l'ingresso al sito minerario, l'area interessata dallo smottamento e l'acquedotto.

Lo sfruttamento della miniera (per la coltivazione della marna da cemento) avvenne tra il 1927 ed il 1958.

Negli anni Trenta iniziò la coltivazione in miniera con la realizzazione di una prima galleria. Successivamente venne realizzato un pozzo verticale profondo 100 m dalla superficie topografica permettendo la coltivazione di altri sei livelli. Nel giro di pochi anni il sistema idrico subì dei notevoli cambiamenti e scomparve la sorgente S. Bernardo. In totale vennero aperti sette livelli.

Fenomeni di infiltrazione d'acqua nella miniera Cappona portarono alla decisione di chiudere un livello (il sesto).

Nell'agosto del 1956 iniziarono a verificarsi fenomeni di crollo nel settimo e nel quarto livello della miniera. Nel novembre 1956 cessò lo sfruttamento della miniera.

Nella notte del 6 gennaio 1958 l'intera struttura collassò, con conseguente sprofondamento delle prime gallerie fino all'ultimo livello scavato. Le cause sono da attribuire allo sfruttamento indiscriminato dell'area.

La zona franata interessò un'area di 10 000 m<sup>2</sup>, investendo anche la strada di collegamento tra la Località San Bernardo con la Località Cappona.

La ricostruzione della strada avvenne negli anni settanta, quando divenne di competenza provinciale (attuale SP68).

Successivamente venne costruito un parcheggio sul versante nord.

Nel 2009 lo studio del Politecnico ha prodotto una descrizione abbastanza dettagliata delle caratteristiche geologico - fisiche dell'area interessata dalla frana. I risultati di questo studio sono riportati di seguito.

## 1.2. Inquadramento geologico

L'area della Miniera Cappona appartiene alla copertura sedimentaria di età Cretacica del Subalpino Lombardo, caratterizzata da una sequenza di torbiditi bacinali, carbonatiche e terrigene.

Il suo substrato roccioso è composto da:

- *Flysch di Bergamo*: il carattere più evidente di queste rocce è la stratificazione, infatti sono costituite da un'alternanza di strati di arenaria e di peliti di colore giallastro di spessore variabile (da alcuni decimetri a qualche metro), con interstrati marnosi molto sottili. I livelli arenacei sono ricchi di minerali e presentano le strutture tipiche dei depositi di origine torbiditica (laminazioni parallele, incrociate, ondulate).
- *Scaglia (Eocene)*: formata da sottili strati marnosi dalla tipica frattura scagliosa.
- *Formazione "Ceppo Lombardo"*: è un deposito fluvio – glaciale formatosi nel periodo interglaciale anteriore alla glaciazione Mindell. È costituito da un conglomerato parzialmente cementato.

Sulla strada che collega Montevicchia con Sirtori, la sequenza dei Flysch è tagliata dal Megastrato di Missaglia, composto da un potente strato carbonatico, gradato, spesso circa 20 metri, la cui base presenta un assetto caotico che passa a depositi conglomeratici e il cui tetto è costituito da megastrati calcarenitici che sfumano in marne calcaree biancastre (Figura 1.2).

Si ipotizza che questo strato derivi dal collasso di un settore di margine del bacino lombardo.

Il versante settentrionale del crinale (valle del Torrente Curone) è meno inclinato rispetto a quello meridionale (Torrente Molgoretta).

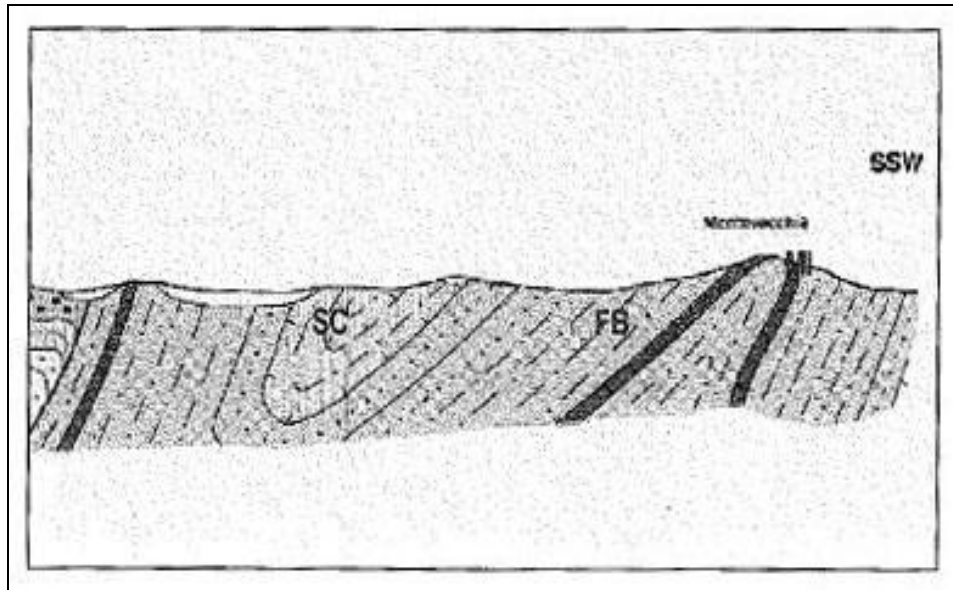


Figura 1.2: Sezione geologica dell'area (Bersezio R., Fornaciari M., Gelati R., 1990).

L'area della Miniera Cappona è ubicata nella porzione Sud – Ovest del crinale dove si hanno pendenze elevate. Per questo motivo il versante è terrazzato nella parte superiore, con una coltivazione prevalente di vite e arbusti (rosmarino, salvia, ecc.), mentre nella parte inferiore prevale il bosco.



## 1.3. Risultati ottenuti dai rilievi e dalle analisi nel 2009

### 1.3.1. Rilievo geologico – strutturale

Per eseguire rilievo geologico – strutturale furono scelte tre stazioni:

#### 1.3.1.1. Stazione 1: parete ovest della trincea di accesso alla miniera

La trincea si sviluppa in orizzontale, direzione Nord – Sud sul versante meridionale della collina. Lo scavo ha una lunghezza di circa 50 metri, larghezza di circa 5 metri ed è delimitato ai due lati da pareti subverticali di altezza variabile tra i 5 e i 10 metri.

La parete dov'è stato effettuato il rilievo si presenta poco vegetata, con il substrato roccioso ben affiorante (Figura 1.3).

La parete est, opposta alla stazione, è parzialmente franata e coperta da vegetazione molto fitta, che non permette il rilievo delle giaciture.



*Figura 1.3: Stazione di rilievo nel corridoio di accesso alla miniera.*

Il substrato è caratterizzato da un'alternanza di peliti e di arenarie stratificate, passanti a livelli marnoso calcarei, appartenenti alla formazione del Flysch di Bergamo.

Gli strati hanno immersione a reggipoggio rispetto al versante principale con inclinazioni di circa 30°, quasi perpendicolare allo sviluppo della trincea.

Eseguendo il Test di Markland, ipotizzando un angolo di attrito interno di 30°, risulta che non è prevedibile nessun movimento dei blocchi della parete, né per scivolamento planare, né per ribaltamento o per scivolamento a cuneo. Quest'ultimo potrebbe attivarsi solo per angoli di attrito molto bassi, difficilmente raggiungibili anche in situazioni meteorologiche particolarmente avverse.

Solo in corrispondenza di piccole rientranze della parete o locali irregolarità vi è la possibilità di mobilitazione di piccoli cunei rocciosi. I volumi unitari mobilitabili sono comunque dell'ordine di 10 – 15 dm<sup>3</sup>. Oltre a questi blocchi si possono generare locali distacchi dal ciglio superiore della parete dove si è avuta una parziale disarticolazione dell'ammasso a causa della spinta esercitata dall'apparato radicale della vegetazione. Anche in questo caso, le instabilità riguardano blocchi di modeste dimensioni (10 – 50 dm<sup>3</sup>). In Tabella 1.1 si riporta la classificazione geomeccanica.

<b>Classificazione geomeccanica</b>	<b>Valore</b>	<b>Descrizione</b>
Q	0.7	Roccia molto scadente
GSI	40 - 45	B/C: tra normale e mediocre
RMR (Q)	41	
RMR (GSI)	45 – 50	
RMR (coefficiente correttivo Q)	39	IV: Roccia scadente
RMR (coefficiente correttivo GSI)	43 - 48	III: Roccia mediocre

*Tabella 1.1: Classificazione geomeccanica della stazione 1.*

### **1.3.1.2. Stazione 2: imbocco della galleria**

Lo scavo è rettangolare, largo circa 5 metri e alto 7. I piedritti della galleria sono costituiti dalla successione arenaceo marnosa descritta nella stazione 1, mentre la volta è costituita da una bancata marnosa omogenea (Figura 1.4).



*Figura 1.4: Stazione di rilievo in galleria.*

Le due formazioni sono divise da una fascia cataclastica di spessore variabile, compreso tra i 2 e i 3 metri, costituita da frammenti di roccia fortemente fratturati e inseriti in una matrice argillosa. Tale fascia ha un assetto caotico, con discontinuità a bassa persistenza e un andamento ondulatorio.

L'assetto geologico strutturale dei piedritti, nella zona inferiore alla fascia cataclastica, è il medesimo descritto nella stazione 1.

La volta della galleria risulta nel complesso poco fratturata, ma le discontinuità che la interessano hanno una persistenza elevata.

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche non vi sono particolari evidenze di circolazione idrica lungo le fratture, infatti si è notato durante il rilievo solo un modesto stillicidio proveniente dalle fratture aperte della calotta.

Andando ad analizzare le condizioni di instabilità, si possono trarre solo alcune considerazioni di tipo qualitativo, in quanto non si è effettuato il Test di Markland.

I piedritti non presentano particolari problemi di stabilità. Infatti, sia dalla zona dove affiora la successione arenaceo – marnosa ben stratificata, che dalla zona cataclastica, si possono verificare solo distacchi isolati di blocchi le cui ridotte volumetrie non destano alcuna preoccupazione in termini di sicurezza.

La calotta invece appare in condizioni assai più critiche, infatti la presenza di tre sistemi di discontinuità di cui due tra loro ortogonali e la terza sub – orizzontale con apertura elevata e persistenza media, favorisce il distacco dalla volta di blocchi di discrete dimensioni.

È ragionevole ipotizzare che il distacco avvenga a lungo termine per rottura a trazione della matrice rocciosa, a causa del peso dei blocchi. A conferma di ciò si nota che all'imbocco della galleria sono presenti molti blocchi, crollati secondo questo meccanismo e tra essi quello di maggiori dimensioni ha un volume di circa 5.5 m<sup>3</sup>. In Tabella 1.2 si riporta la classificazione geomeccanica.

<b>Classificazione geomeccanica</b>	<b>Valore</b>	<b>Descrizione</b>
Q	1.27	Roccia scadente
GSI	45 – 50	B: normale
RMR (Q)	47	
RMR (GSI)	50 – 55	
RMR (coefficiente correttivo Q)	35	IV: Roccia scadente
RMR (coefficiente correttivo GSI)	38 - 43	III- IV: Roccia tra scadente e mediocre

*Tabella 1.2: Classificazione geomeccanica della stazione 2.*

### **1.3.1.3. Stazione 3: fronte di scavo a cielo aperto**

La stazione è situata esternamente alla miniera, laddove la coltivazione della marna avveniva a cielo aperto. La parete appare sub – verticale con altezze variabili tra i 18 e i 30 metri circa.

La sua morfologia appare piuttosto irregolare con porzioni di blocchi di roccia leggermente aggettanti.

Da un punto di vista geologico affiora un litotipo marnoso di aspetto massivo. Solo in un limitato settore, posto alla sommità del versante, si osserva un lembo di materiale arenaceo marnoso con aspetto caotico.

La fitta vegetazione costituita da rampicanti, rovi, arbusti e qualche pianta ad alto fusto, impedisce di rilevare direttamente le giaciture degli strati e delle famiglie di discontinuità (Figura 1.5).

Pertanto si possono fare solo delle osservazioni e stime parziali, osservando i blocchi crollati nell'evento franoso che ha coinvolto in passato la scarpata.

I sistemi di discontinuità sono da mediamente a molto persistenti, con aperture causate da fenomeni di rilascio, di disarticolazione o per carsismo. La spaziatura è generalmente elevata (maggiore di 2 metri).

Sono presenti anche discontinuità variamente orientate, probabilmente provocate dalle operazioni di scavo, che non definiscono un vero e proprio sistema ma, essendo piuttosto fitte, aumentano notevolmente lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso.

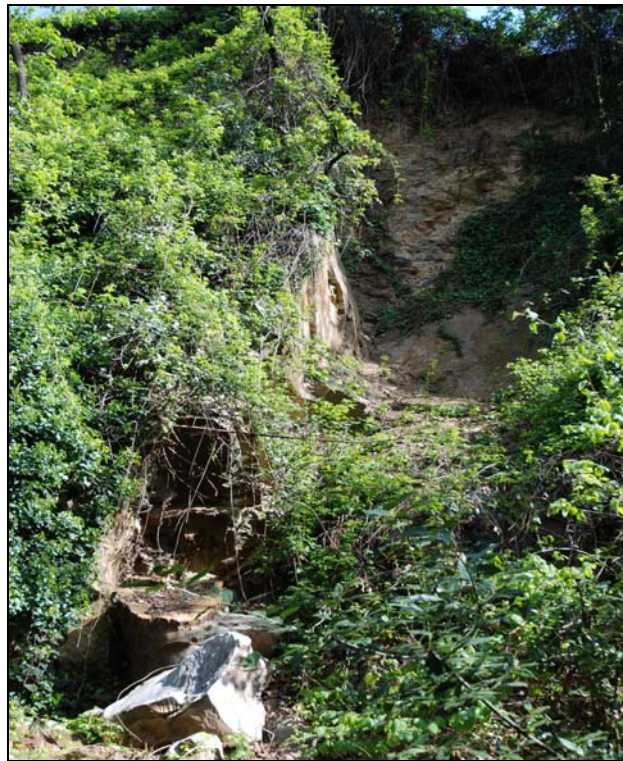


Figura 1.5: Stazione di rilievo sulla scarpata della cava a cielo aperto.

La vegetazione presente ha sicuramente contribuito ad aumentare la disarticolazione superficiale dell'ammasso roccioso, allargando l'apertura delle fratture attraverso la spinta dell'apparato radicale e attraverso l'azione delle piante ad alto fusto in presenza di vento (*effetto vela*).

Lungo il fronte, i dissesti sono abbastanza diffusi, ma più che dall'assetto strutturale sembrano essere causati dalle cattive condizioni in cui è stata lasciata la parete al termine dell'attività estrattiva.

Vi sono comunque alcune porzioni di ammasso disarticolato in precarie condizioni di stabilità, come testimoniano anche i numerosi blocchi presenti alla base della parete stessa. Essi hanno una volumetria variabile tra qualche  $\text{dm}^3$  fino a circa  $1 \text{ m}^3$ , per il più massiccio. E' possibile notare, osservando la parete, la presenza di alcuni blocchi potenzialmente instabili di volume compreso tra  $0.01$  e  $0.1 \text{ m}^3$  che localmente potrebbero dar luogo a crolli isolati.

## 1.3.2. Analisi geofisica

### 1.3.2.1. Sismica a rifrazione

L'indagine sismica fu eseguita con tre stendimenti di 24 geofoni (4,5 Hz) con spaziatura 5 m. Ogni stendimento era lungo 115 m. La sovrapposizione tra gli stendimenti era di 2 geofoni. La totale lunghezza investigata quindi fu 315 m. Dalle elaborazioni con metodo reciproco si ottenne modello a due strati (Tabella 1.3 e Figura 1.6)

<b>Primo stendimento</b>		<b>Secondo stendimento</b>		<b>Terzo stendimento</b>	
<i>primo strato</i>	<i>secondo strato</i>	<i>primo strato</i>	<i>secondo strato</i>	<i>primo strato</i>	<i>secondo strato</i>
1250 – 1410	2520	730 – 1000	2130	830 – 1000	2390

*Tabella 1.3: Velocità dell'onda di pressione in m/s nel primo e secondo strato dei tre stendimenti.*

Il primo strato ha uno spessore che varia tra circa 7 e 14 metri, con il massimo in corrispondenza della zona crollata nel 1958. Per quanto riguarda la velocità di propagazione presenta valori che variano tra 1250 e 1400 m/s nel tratto a sinistra del parcheggio (primo stendimento) e 750 e 1000 m/s nei due tratti a destra.

Anche il secondo strato presenta lo stesso andamento della velocità, ma con variazioni meno evidenti.

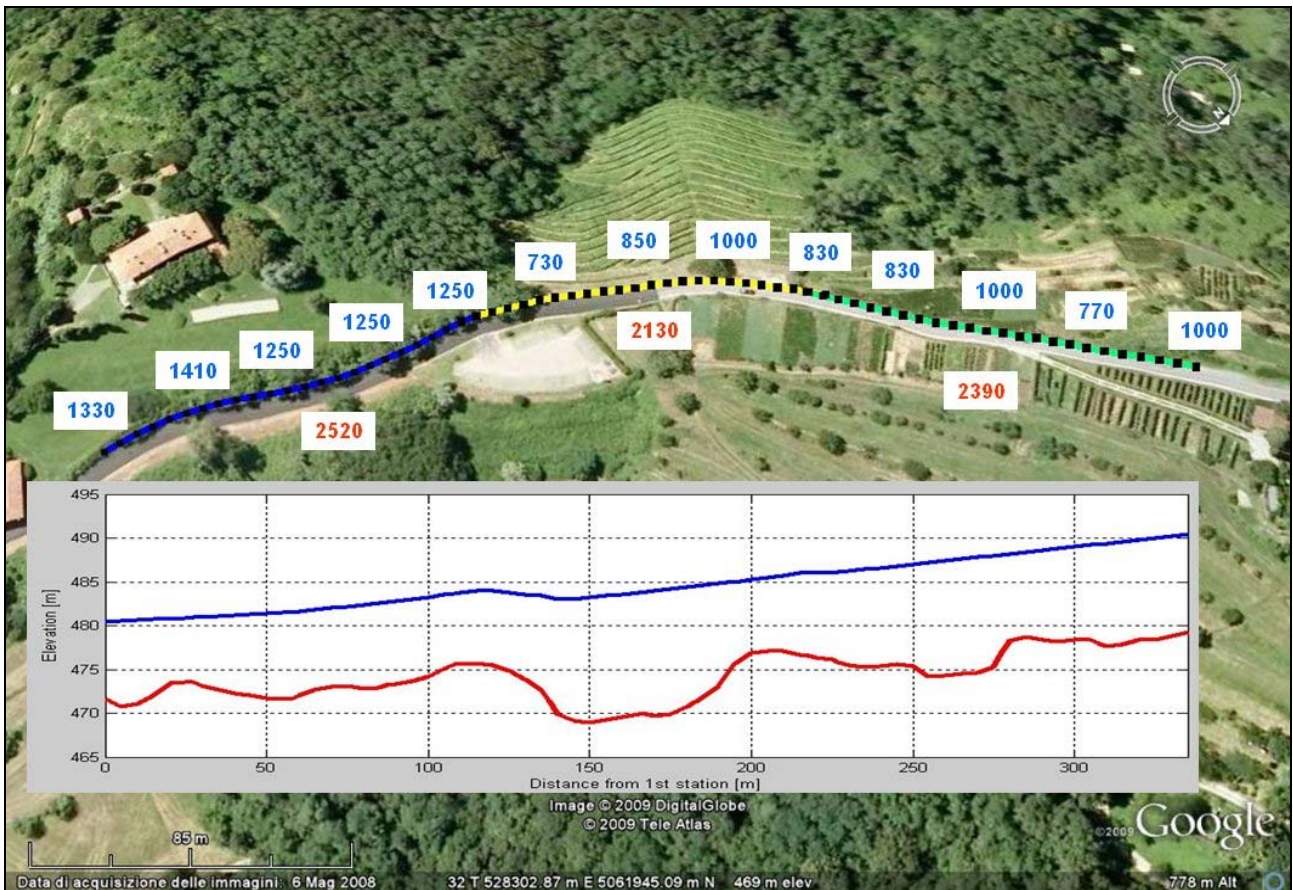


Figura 1.6: Risultati ottenuti con la sismica a rifrazione. Il modello mostra in blu l'andamento della topografia e in rosso quello dell'interfaccia che separa lo strato lento superficiale da quello consolidato sottostante. Inoltre sono indicate le velocità dell'onda di pressione in m/s nel primo strato (in blu) e nel secondo strato (in rosso).

### 1.3.2.2. Metodo MASW

La massima profondità di investigazione fu di circa 60 m, ovvero pari a metà della massima lunghezza d'onda.

Non fu possibile ricavare informazioni sul primo stendimento (Figura 1.7), poiché il materiale compatto e poco dispersivo non permette l'osservazione del ground roll.

I due modelli ottenuti, relativi al secondo e terzo stendimento, sono coerenti con la sismica a rifrazione in quanto riportano un aumento di velocità a circa 11 – 12 metri di profondità (spessore primo strato). Il secondo strato ha uno spessore di circa 10 metri. A profondità maggiori si osserva un'inversione di velocità che potrebbe indicare la presenza di un terzo strato di spessore 10 – 20 metri, con velocità minore dei primi due. È individuato anche un quarto strato molto veloce, costituito da roccia compatta, che parte da 30 – 40 metri di profondità.

Il secondo stendimento, che ha al suo interno il corpo di frana, presenta velocità sempre inferiori rispetto agli altri due.

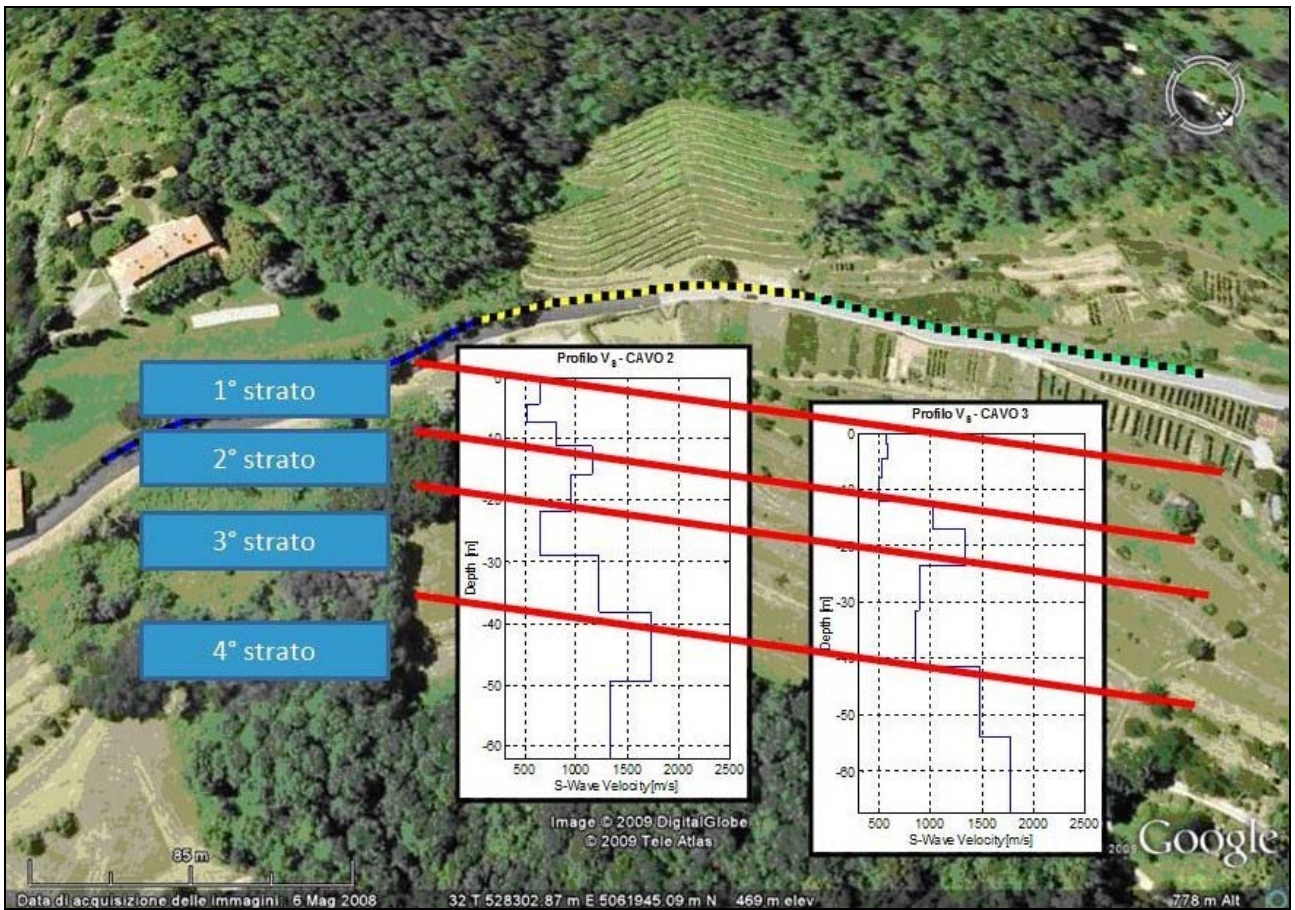


Figura 1.7: Individuazione dei quattro strati per il secondo e terzo stendimento.



### 1.3.2.3. Misure in trasparenza

Le velocità indicate in (Figura 1.8), indicano la velocità media degli strati sottostanti il primo in corrispondenza del terzo stendimento e parte del secondo

Le velocità elevate indicano il buono stato dell'ammasso roccioso, anche se si nota un abbassamento delle velocità medie con l'avvicinarsi al corpo di frana (nel passaggio dal terzo tratto al secondo).



Figura 1.8: Velocità media degli strati sottostanti al primo (in m/s), ricavata dai tempi di volo delle misure in trasparenza depurati del tempo di attraversamento del primo strato, ottenuti sulla base dei risultati della sismica a rifrazione.

### 1.3.2.4. Analisi delle ampiezze

L'analisi delle ampiezze fu eseguita sia sui dati della sismica a rifrazione che quelli delle misure in trasparenza. Dopo aver ricavato l'attenuazione, attribuibile solo all'assorbimento anelastico ed alle perdite per diffrazione (depurata del contributo di quest'ultima nel caso delle misure in trasparenza), il valor medio del fattore di qualità venne calcolato tramite la formula:

$$Q = \frac{\pi f}{v\alpha}$$

1.1

ottenendo i valori in (Figura 1.9)



Figura 1.9: Valori medi di attenuazione e fattore di qualità ottenuti dai dati a rifrazione ed in trasparenza del primo e del secondo strato (rispettivamente in blu e rosso).

### 1.3.3. Modello geofisico finale

Il modello finale ottenuto è composto da quattro strati di buona qualità, anche se nel tratto che contiene il corpo di frana, le caratteristiche risultano un po' più scadenti.

Per analizzare nel miglior modo possibile le caratteristiche degli strati sono stati utilizzati diversi metodi. Nelle tabelle da Tabella 1.4 a Tabella 1.7 sono riportati i dati riepilogativi.

	<b>Sismica a rifrazione</b>	<b>Metodo MASW</b>	<b>Misure in trasparenza</b>
<b>1° strato</b>	X	X	
<b>2° strato</b>	X	X	X
<b>3° strato</b>		X	X
<b>4° strato</b>		X	X

Tabella 1.4: Metodi geofisici che sono risultati efficaci per la caratterizzazione di ogni strato

Nelle tabelle seguenti sono riassunte le caratteristiche di ogni strato, divise per tratto. Il primo tratto è il più compatto. Il terzo tratto desta le maggiori preoccupazioni a livello di rischio di frana, in quanto ha velocità simili a quelle del secondo tratto, dove è avvenuto il crollo.

<b>PRIMO STENDIMENTO</b>	<b><math>V_p</math> (m/s)</b>	<b>Spessore (m)</b>	<b>Q</b>
<b>1° strato</b>	1250 – 1410	7 – 10	1.52
<b>2° strato</b>	2520	10	4.94
<b>3° strato</b>	Non è stato possibile reperire informazioni con le tecniche utilizzate		
<b>4° strato</b>	Non è stato possibile reperire informazioni con le tecniche utilizzate		

Tabella 1.5: Valori finali relativi al primo stendimento ottenuti dalla sismica a rifrazione

<b>SECONDO STENDIMENTO</b>	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	Spessore (m)	Q
<b>1° strato</b>	730 – 1000	500 – 700	10 – 14	1.24
<b>2° strato</b>	2130	500 – 1200	10	3.49
<b>3° strato</b>	–	600 – 1350	10 – 20	–
<b>4° strato</b>	3000	1400 – 1750	–	–

Tabella 1.6: Valori finali relativi al secondo stendimento ottenuti dalla sismica a rifrazione.

Nel secondo stendimento, la velocità media degli strati sottostanti il primo è 2850 – 2950 m/s.

<b>TERZO STENDIMENTO</b>	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	Spessore (m)	Q
<b>1° strato</b>	770 – 1000	500	10 – 14	1.52
<b>2° strato</b>	2390	500 – 1300	10	3.49
<b>3° strato</b>	–	900 – 1000	10 – 20	–
<b>4° strato</b>	3000	1000 – 1800	–	> 4.55

Tabella 1.7: Valori finali relativi al terzo stendimento ottenuti dalla sismica a rifrazione.

Nel terzo stendimento, la velocità media degli strati sottostanti il primo è 2950 – 3250 m/s.

È stato individuato un primo strato lento di spessore variabile tra 7 e 14 m ( $V_p$  tra 750 e 1400 m/s), seguito da uno strato più veloce e compatto ( $V_p$  tra 2100 e 2500 m/s) spesso 10 m. Il metodo MASW evidenzia anche la presenza di un terzo strato con spessore di 10 – 20 m e velocità inferiore al secondo, seguito poi da uno strato di roccia compatta molto più veloce ( $V_p$  almeno pari a 3000 m/s).

# Capitolo 2. Indagini sismiche

## 2.1. Acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati sismici si è adottato lo stesso sistema utilizzato per lo studio del 2009.

Sono state eseguite due serie di acquisizioni procedendo da est a ovest lungo via Alta Collina, le prime con distanza intergeofonica di 3 metri, le seconde con distanza intergeofonica di 1 metro (Figura 2.1 e Figura 2.2).



*Figura 2.1 Stendimento a 3 metri.*



*Figura 2.2 Stendimento a 1 metro.*

Si sono utilizzati 24 geofoni verticali (per la misura onde P) con frequenza caratteristica di 4,5 Hz. Per avere un miglior accoppiamento dei geofoni col terreno, si è infisso i geofoni tramite un punzone. Solo in alcuni casi non potendo infiggere i geofoni si è ricorso all'utilizzo delle basette (canale 4 dello Spread3\_3 e canali da 1 a 7 dello Spread3\_5), come riportato in Figura 2.3 e Figura 2.4.



*Figura 2.3 Geofoni su basetta.*



*Figura 2.4 Geofono con punzone.*

Come massa battente è stato utilizzato un martello da 8 kg, dotato di trigger accelerometrico collegato all'unità di acquisizione Geode(Figura 2.5 e Figura 2.6).



*Figura 2.5 Energizzazione stendimento a 3 metri.*



*Figura 2.6 Energizzazione stendimento a 1 metro.*

### 2.1.1. Stendimento a 3 metri

La prima serie è composta da cinque stendimenti in linea, con distanza intergeofonica di 3 m. Sono state registrate 7 energizzazioni (ripetendo il colpo in caso di segnale troppo disturbato) per ogni stendimento (spread): a 15 m, 6 m, 3 m dal primo e dal ventiquattresimo canale, più una energizzazione centrale. La lunghezza di ciascuno stendimento risulta quindi 69 m (distanza tra i due shots più esterni di 99 m), con distanza tra gli stendimenti pari a 3 m, per una copertura totale di 357 m (Figura 2.7). Dopo un'analisi preliminare di campo si è deciso di applicare un guadagno di 24 db, in modo da non saturare il segnale.

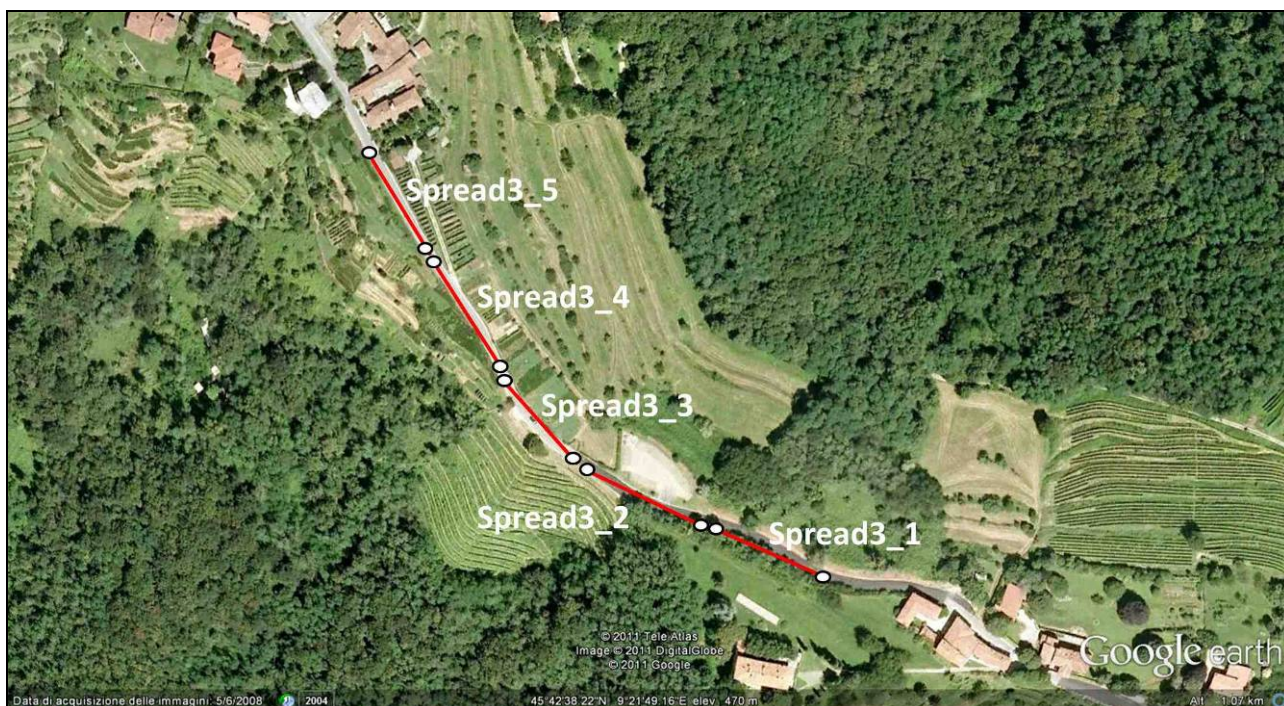


Figura 2.7 Layout della copertura del rilievo sismico con stendimenti a 3 metri.

## 2.1.2. Stendimento a 1 metro

La seconda serie è composta da cinque stendimenti in linea, con distanza intergeofonica di 1 m, posizionando il centro di ciascun stendimento al centro del rispettivo stendimento a 3 m. In aggiunta è stato steso uno stendimento in corrispondenza dell'inizio dello stendimento a 3 metri più a est, facendo coincidere il primo canale est dei due stendimenti a 1 e 3 metri (Figura 2.8). Anche in questo caso sono state eseguite 7 energizzazioni (ripetendo il colpo in caso di segnale troppo disturbato) per ogni stendimento (spread): a 10 m, 4 m, 2 m dal primo e dal ventiquattresimo canale, più una centrale.

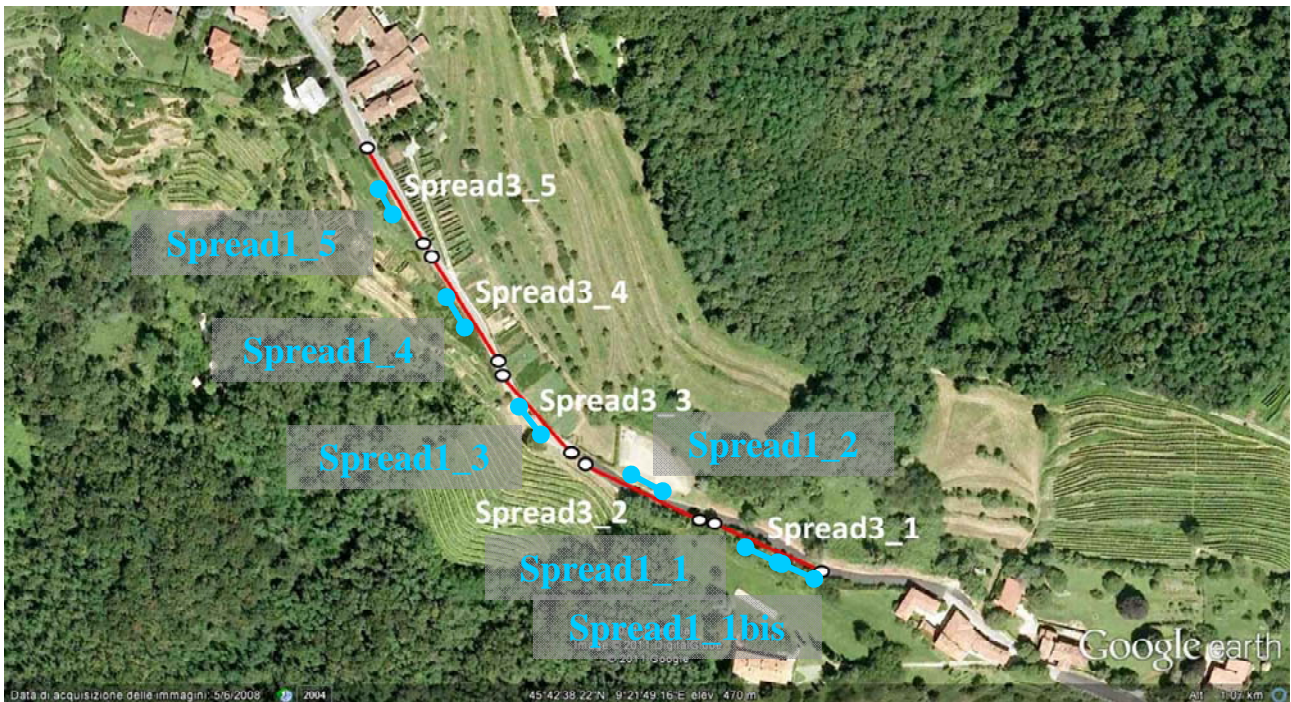


Figura 2.8 Layout della copertura del rilievo sismico con stendimenti a 1 metro, in azzurro.

Per praticità è stato assegnato un nome ad ogni stendimento, chiamandolo *SpreadX\_Y*, dove la X indica la distanza intergeofonica (1 oppure 3) e la Y corrisponde alla zona investigata (da est a ovest 1, 2, 3, 4 oppure 5, nel caso di distanza intergeofonica 1 m vi è anche l'1bis).

Ad ogni *spreadX\_Y* corrispondo quindi 7 registrazioni, una per ogni punto sorgente.

Per tutte le acquisizioni si è utilizzata una frequenza di campionamento di 2kHz, registrando una finestra temporale pari a 1 secondo.



## 2.2. Pre-elaborazione dei dati

Per processare i dati è stato utilizzato il software *Reflexw*.

Come analisi preliminare sono stati invertiti tutti gli spread separatamente (costruendo quindi 11 modelli basandosi sugli 11 SpreadX\_Y), eseguendo il picking senza pre-elaborare i dati. Si è poi costruito un modello per ogni stendimento a partire dallo studio di travel times. Con questa analisi speditiva, si è valutata qualitativamente la consistenza dei modelli ottenuti, confrontando le elaborazioni degli Spread1\_Y e Spread3\_Y corrispondenti, ed ancora questi ultimi col modello finale ottenuto dallo studio del 2009.

Successivamente si è deciso di analizzare congiuntamente i dati degli Spread1\_Y e Spread3\_Y associati alla stessa zona (uguale Y), in modo da realizzare un modello unico per ognuno dei 5 stendimenti.

Gli stendimenti sono quindi identificabili con un solo indice relativo alla posizione dello stendimento stesso (Y). Quindi *SpreadY* comprende sia le registrazioni con distanza intergeofonica 1 m che 3 m relativi alla stessa zona, ed ha una lunghezza di 69 m (distanza tra i due shots più esterni di 99 m).

### 2.2.1. Analisi dello start time

Per valutare l'eventuale valore del ritardo degli arrivi, si è provveduto all'analisi dello shot centrale (tra i canali 12 e 13) dei cinque Spread1\_Y (stendimenti a 1 metro), e quindi correggerlo muovendo lo *Start time*.

Dopo aver eseguito il "picking preliminare speditivo", lo si è importato nella finestra di lavoro *Traveltime analysis 2D*. A questo punto si è aggiunto il punto in corrispondenza dello shot, cioè a travel time zero. Analizzando la pendenza dei segmenti congiungenti i travel times (la pendenza di questi segmenti è esattamente la velocità del primo strato) si è valutata l'entità del ritardo, e quindi il valore di cui traslare i segnali in modo da avere una velocità costante e coerente tra i geofoni più prossimi allo shot, che quindi leggono l'arrivo diretto.

Noto il valore del ritardo, lo si è utilizzato per traslare tutte le registrazioni dello SpreadY relativo.

#### 2.2.1.1. Identificazione del ritardo

##### Spread1\_1

Analizzando il picking della registrazione numero 59 (corrispondente allo shot centrale del primo stendimento da est con distanza intergeofonica 1m) si è valutato un ritardo di 3 ms. Come prima approssimazione si vede una velocità del primo strato attorno ai 500 m/s (Figura 2.9).

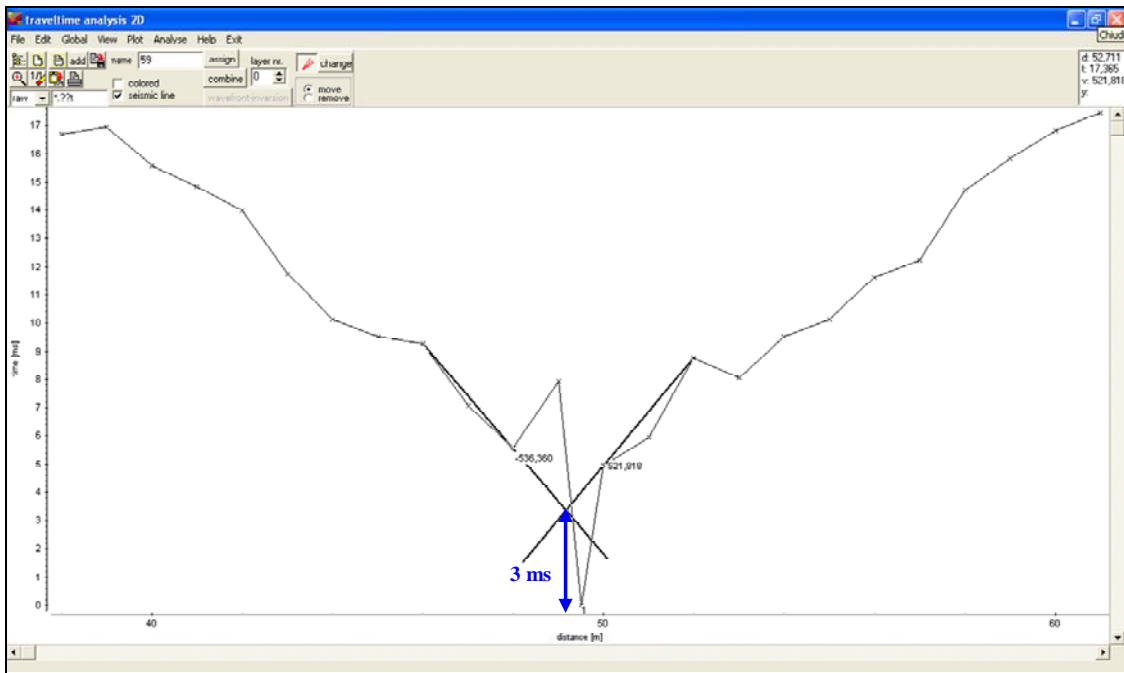


Figura 2.9 Picking della registrazione 59, corrispondente allo shot centrale del primo stendimento a est con distanza intergeofonica 1 m. Come si vede il segnale è ritardato di 3 ms.

### Spread1\_1bis

Analizzando il picking della registrazione numero 52 (corrispondente allo shot centrale del primo stendimento da est con distanza intergeofonica 1m, posizionato facendo coincidere il primo geofono col primo geofono a est dello Spread3\_1) si è valutato un ritardo di 3 ms. Come prima approssimazione si vede una velocità del primo strato attorno tra 450 e 500 m/s (Figura 2.10).

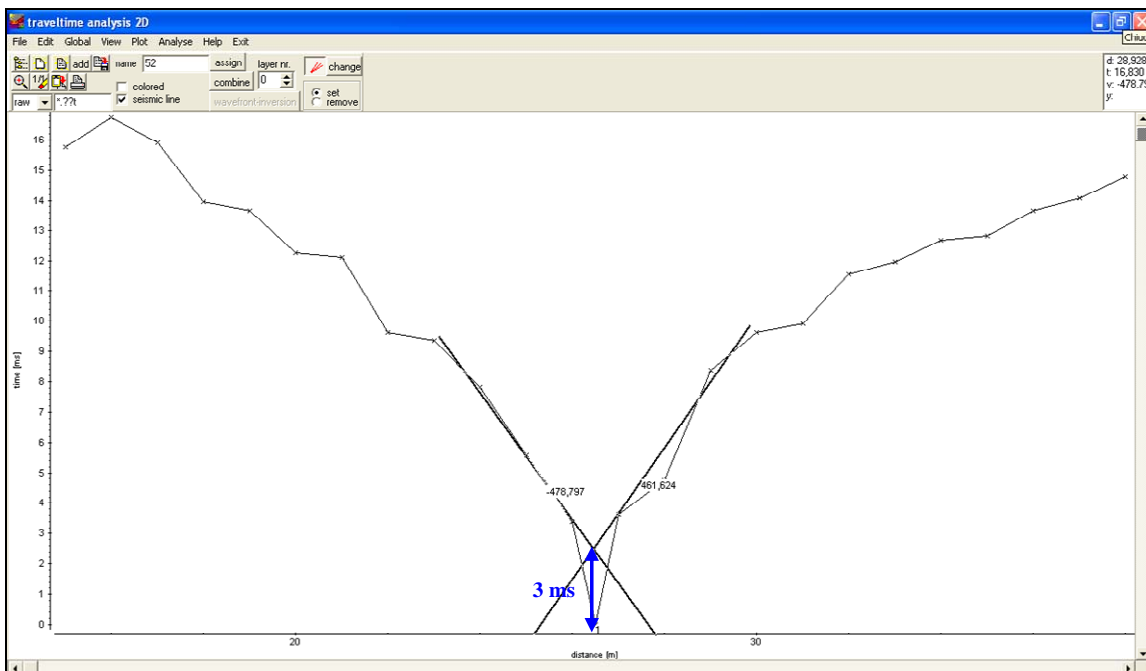


Figura 2.10 Picking della registrazione 52, corrispondente allo shot centrale dello stendimento 1bis, cioè il primo a est con distanza intergeofonica 1 m, con il primo canale coincidente col primo canale del primo stendimento a 3 metri. Come si vede il segnale è ritardato di 3 ms, come nel caso dello Spread1\_1.

## Spread1\_2

Analizzando il picking della registrazione numero 74 (corrispondente allo shot centrale del secondo stendimento in direzione est-ovest con distanza intergeofonica 1m) si è valutato un ritardo di 6 ms. Come prima approssimazione si vede una velocità del primo strato tra 500 e 700 m/s (Figura 2.11).

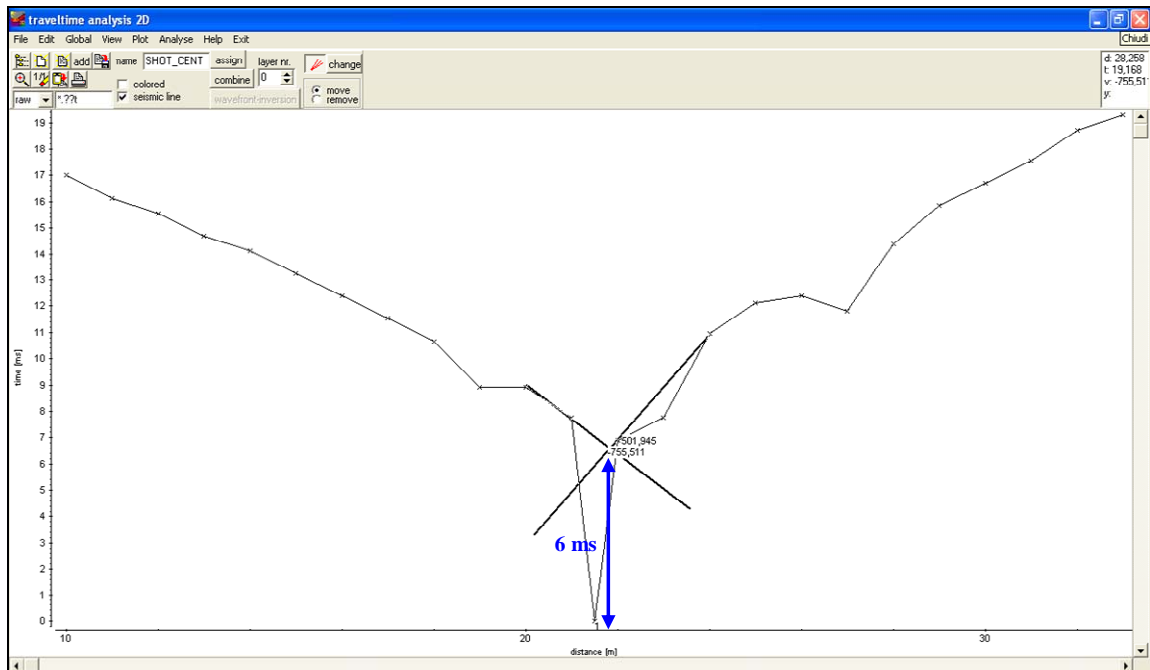


Figura 2.11 Picking della registrazione 74, corrispondente allo shot centrale del secondo stendimento in direzione est - ovest con distanza intergeofonica 1 m. Come si vede il segnale è ritardato di 6 ms.

## Spread1\_3

Analizzando il picking della registrazione numero 91 (corrispondente allo shot centrale del terzo stendimento in direzione est-ovest con distanza intergeofonica 1m) si è valutato un ritardo di 5 ms. Come prima approssimazione si vede una velocità del primo strato tra 300 e 400 m/s (Figura 2.12).

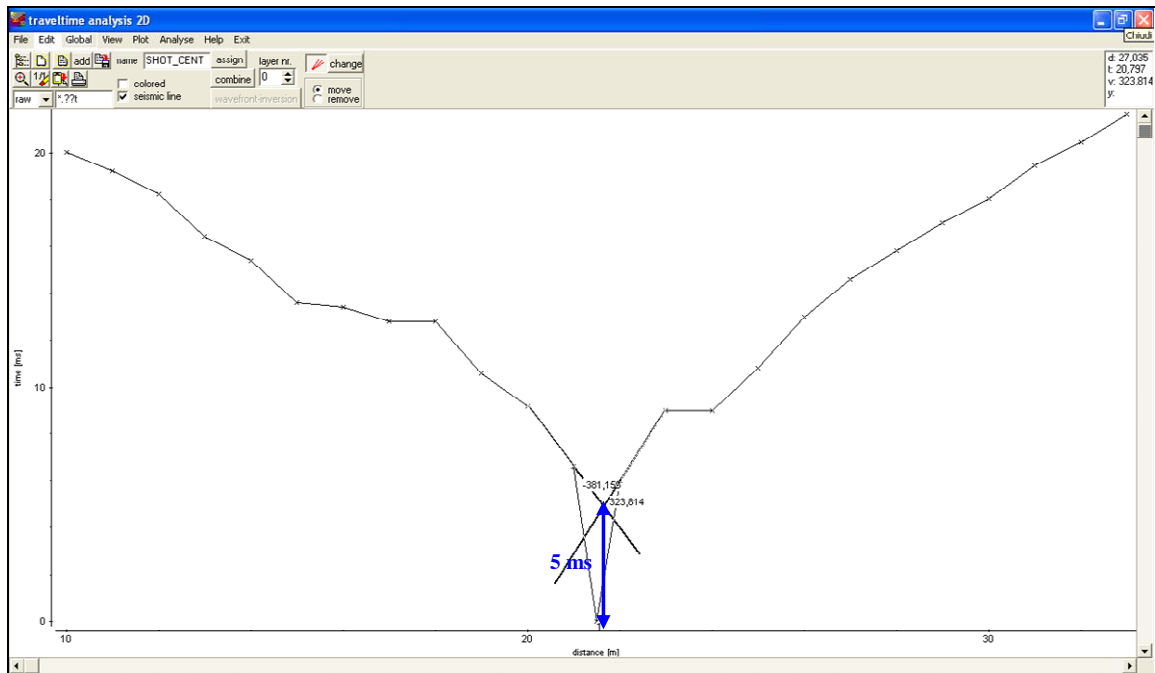


Figura 2.12 Picking della registrazione 91, corrispondente allo shot centrale del terzo stendimento in direzione est - ovest con distanza intergeofonica 1 m. Come si vede il segnale è ritardato di 5 ms.

#### Spread1\_4

Analizzando il picking della registrazione numero 101, corrispondente allo shot centrale del quarto stendimento in direzione est-ovest con distanza intergeofonica 1m, si sono riscontrate alcune incertezze relative ai travel times nei punti più vicini all'energizzazione a destra della stessa (Figura 2.13).

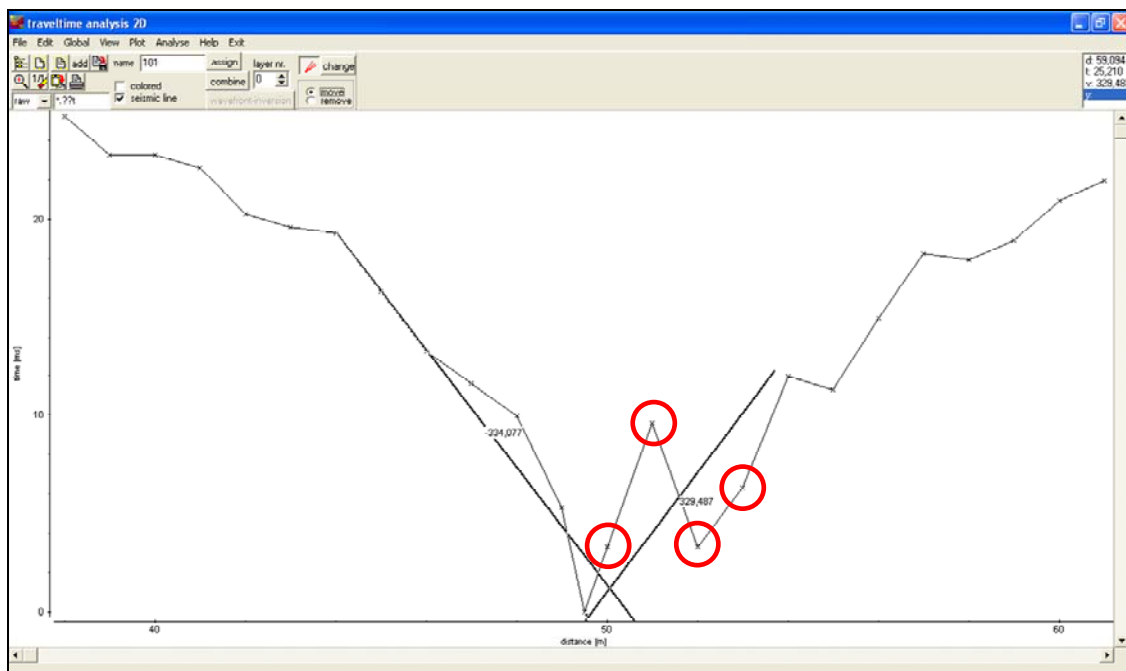


Figura 2.13 Picking della registrazione 101, corrispondente allo shot centrale del quarto stendimento in direzione est - ovest con distanza intergeofonica 1 m. Cerchiati in rosso i picks incerti.

Si è deciso quindi di importare congiuntamente il picking delle registrazioni numero 101 e 38 (corrispondente allo shot centrale del quarto stendimento in direzione est-ovest con distanza intergeofonica 3 m). Come si vede in Figura 2.14, non occorre fare alcuna correzione del ritardo, mentre si nota un leggero spostamento della curva verso destra (0,5 m massimo). In prima approssimazione si è stimata una velocità del primo strato compresa tra 300 e 350 m/s. Il picking è stato corretto successivamente, una volta importate tutte le curve dello stendimento.

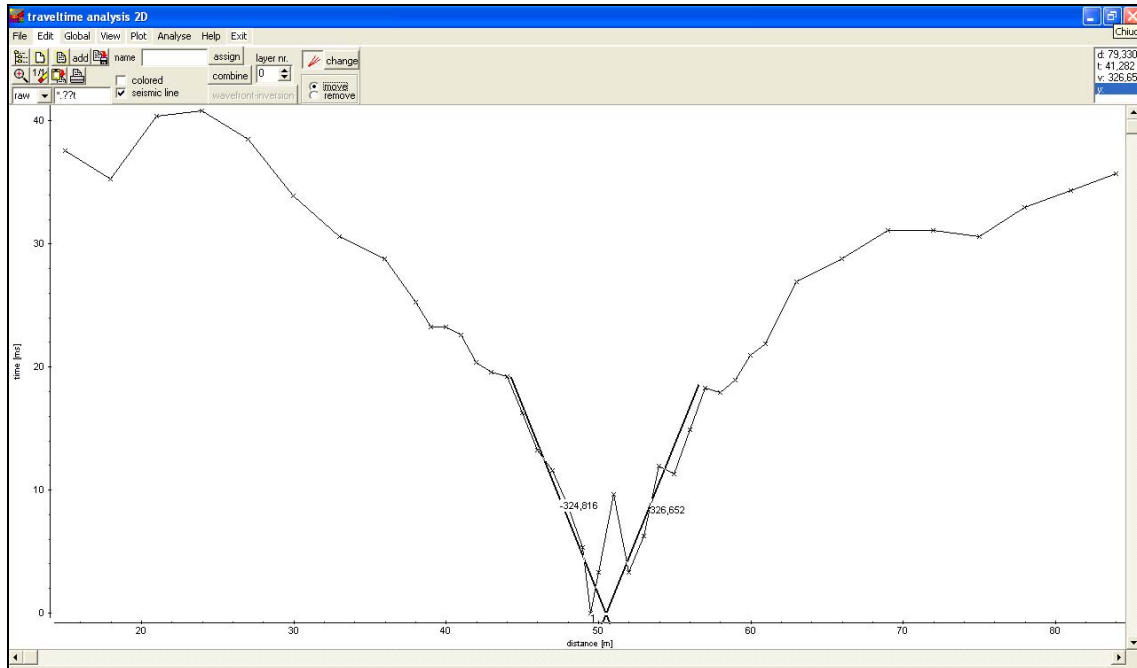


Figura 2.14 Picking delle registrazione 101 e 38, corrispondente agli shots centrali del quarto stendimento in direzione est - ovest con distanza intergeofonica rispettivamente di 1 m e 3 m. Come si vede non occorre traslare le registrazioni.

### Spread1\_5

Analizzando il picking della registrazione numero 109 (corrispondente allo shot centrale del quinto stendimento in direzione est-ovest con distanza intergeofonica 1m) si è valutato un ritardo di 3 ms. Come prima approssimazione si vede una velocità del primo strato tra 300 e 350 m/s (Figura 2.15).

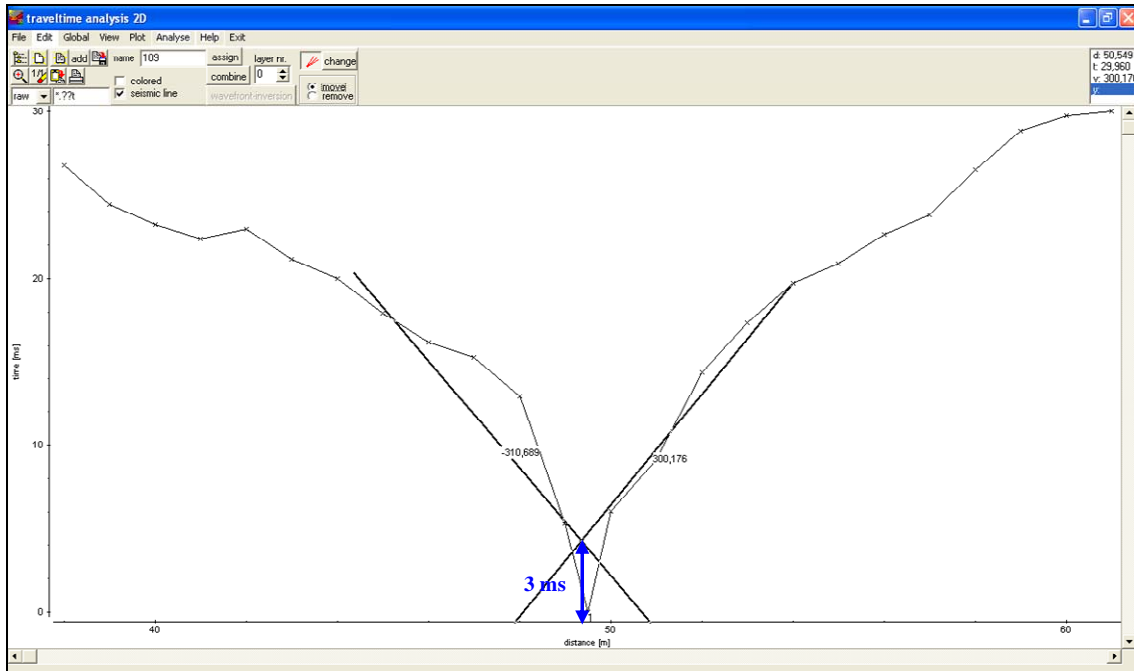


Figura 2.15 Picking delle registrazione 109, corrispondente allo shot centrale del quinto stendimento in direzione est - ovest con distanza intergeofonica di 1 m. Il ritardo risulta essere di 3ms.

### 2.2.1.2. Traslazione dell'asse temporale

La Tabella 2.1 riassume i risultati dell'analisi dei tempi d'arrivo dell'onda diretta valutati precedentemente, riporta quindi il valore temporale di cui traslare le registrazioni.

Stendimento	Tempo [ms]
Spread1_1 / Spread3_1 / Spread1_1bis	-3
Spread1_2 / Spread3_2	-6
Spread1_3 / Spread3_3	-5
Spread1_4 / Spread3_4	0
Spread1_5 / Spread3_5	-3

Tabella 2.1 Valori temporale di cui devono essere traslati I segnali relative ai vari stendimenti.

Per tutte le settantasette registrazioni è stata eseguita l'operazione di correzione dello start time in base al corrispondente valore ricavato (Tabella 2.1).

La Figura 2.16 riporta a titolo di esempio la finestra di dialogo del software *Reflexw*, tramite cui si applica la funzione di traslazione dello start time, in questo caso la registrazione 109 è stata traslata di -3 ms.

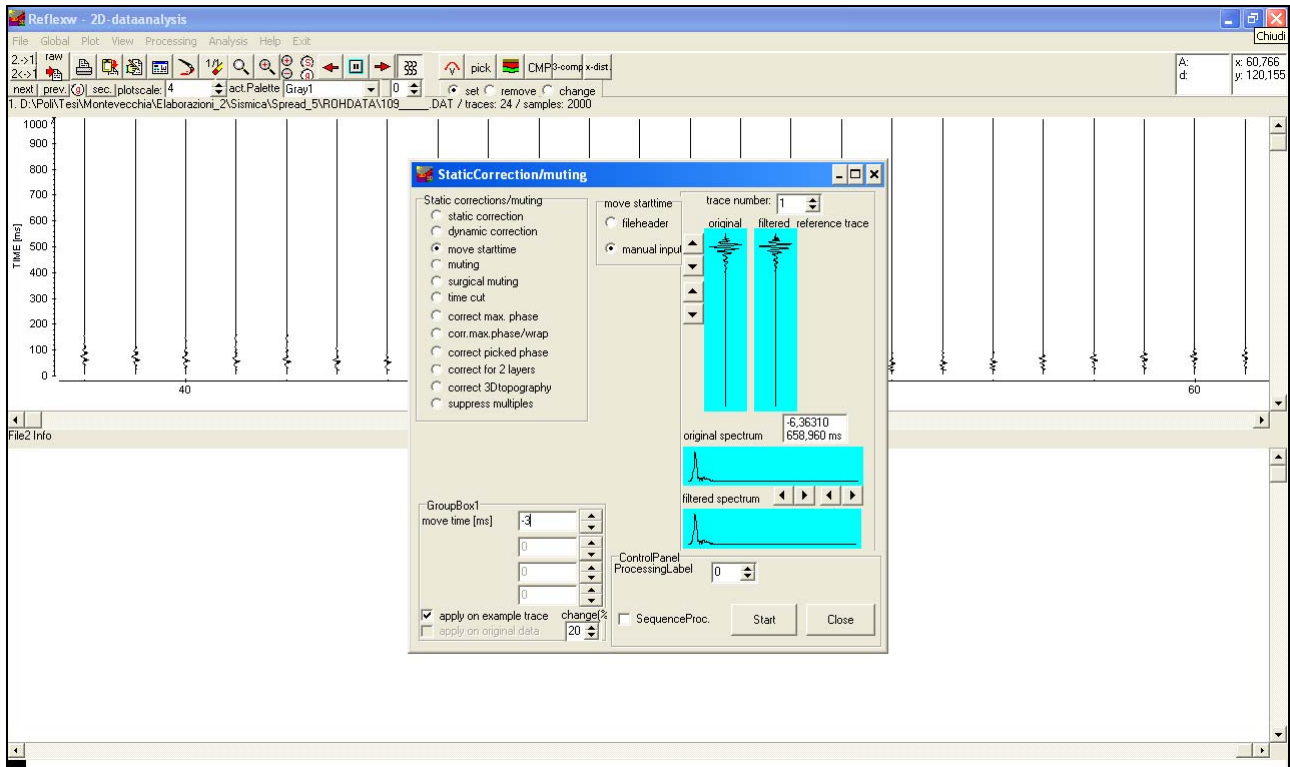


Figura 2.16 Finestra di dialogo di *Reflexw*, il valore indicato nella casella *move time* (-3 ms) indica il valore di cui vengono traslate tutte le ondate, questo è l'esempio della registrazione 109.

In Figura 2.17 è riportato, l'effetto di tale operazione sulle ondate della registrazione 109. Come si può vedere si sono tagliati i primi 3 ms della registrazione.

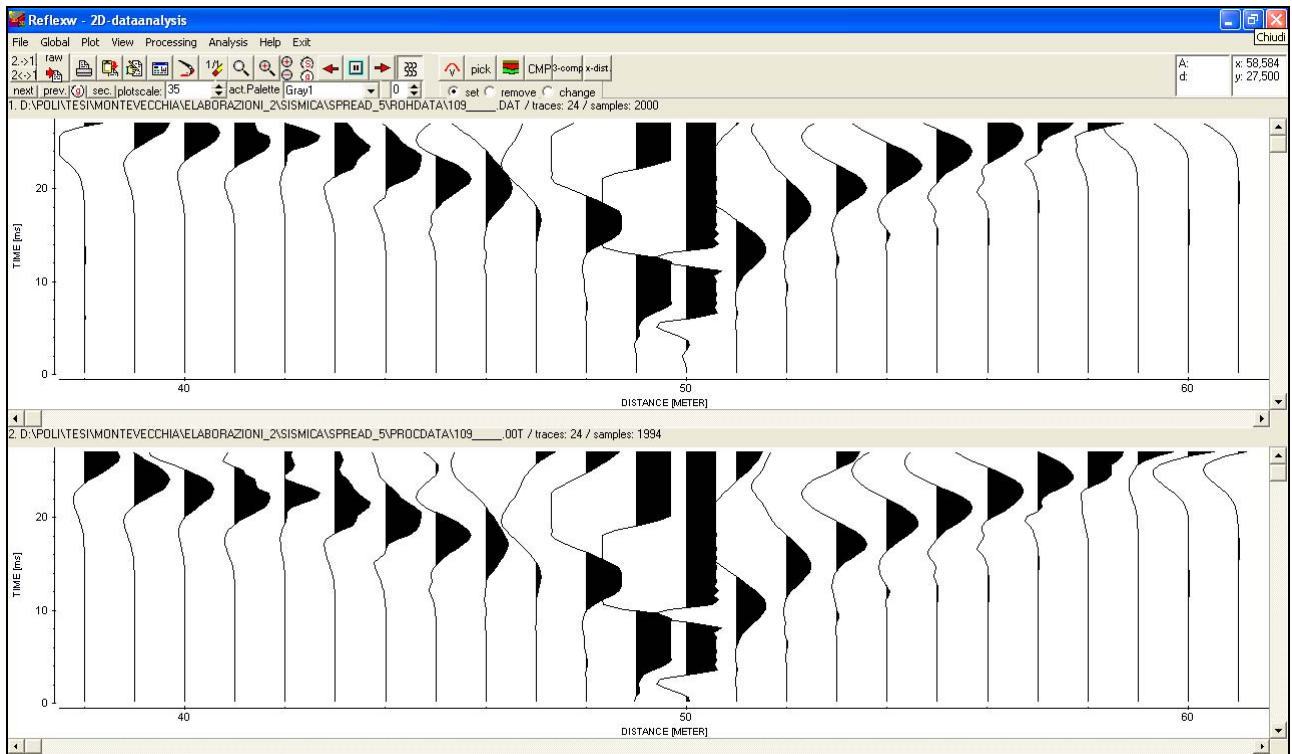


Figura 2.17 Esempio dell'effetto della traslazione di -3 ms, nel caso della registrazione 109.



## 2.2.2. Filtro passabanda

In generale le acquisizioni non sono risultate disturbate da un forte rumore. Solo alcune registrazioni hanno richiesto l'applicazione di un filtro passabanda.

Le uniche registrazioni a cui è stato applicato un filtro sono state la numero 46 e la 47, appartenenti allo Spread\_5. In entrambi i casi è stato applicato un filtro passabanda compreso tra 10 e 150 Hz (Figura 2.18 e Figura 2.19).

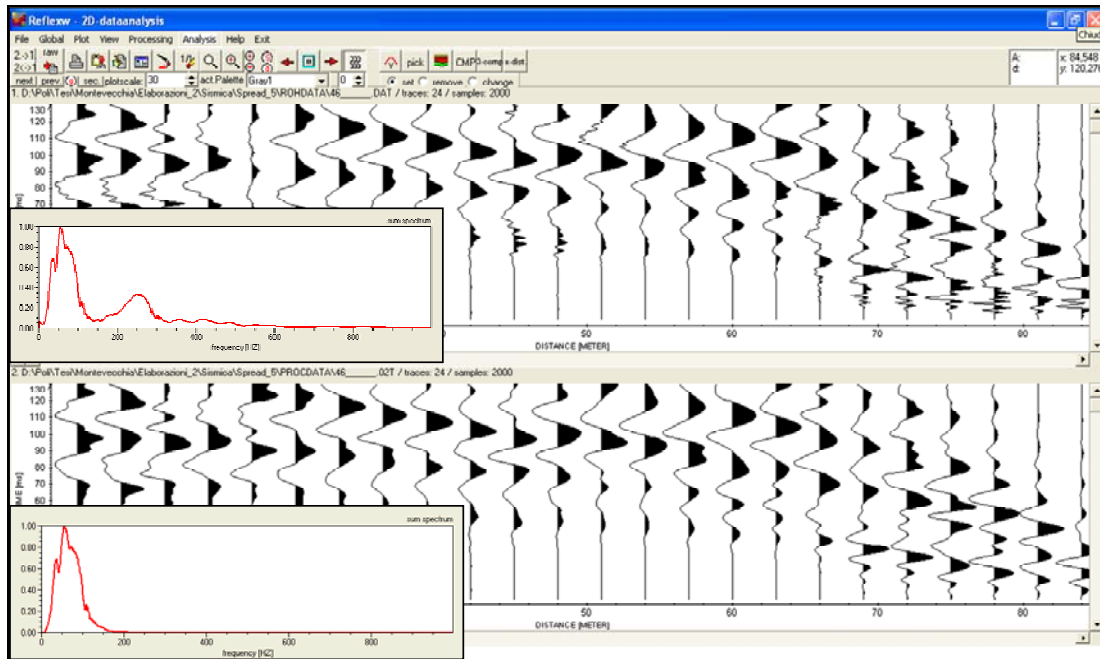


Figura 2.18 Registrazione 46 (Spread\_5) prima e dopo il filtro passabanda 10-150 Hz.

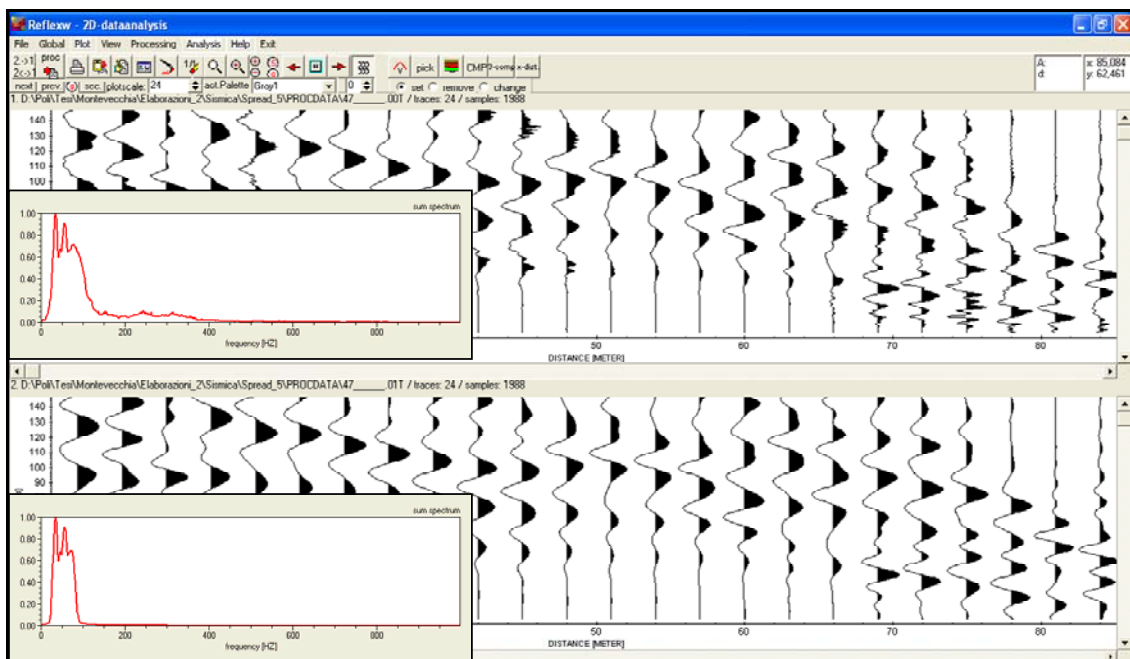


Figura 2.19 Registrazione 47 (Spread\_5) prima e dopo il filtro passabanda 10-150 Hz..

## 2.3. Picking dei primi arrivi

### 2.3.1. Identificazione dei primi arrivi

Una volta corretto lo start time, si è proceduto con il picking dei primi arrivi.

Con il processo di picking si definisco i travel time dei primi arrivi relativi ad ogni geofono. Si legge il tempo in cui il segnale emerge dal rumore di fondo.

Per eseguire il picking occorre anzitutto definire un metodo di selezione del tempo di arrivo. Occorre definire quale punto dell'ondina rappresenta il tempo di arrivo e considerare questo punto per tutte le onde e le registrazioni appartenenti allo stesso Spread. Per tutti gli spreads si è scelto di prendere il punto in cui inizia la parte positiva dell'ondina, come negli esempi Figura 2.20 e Figura 2.21.

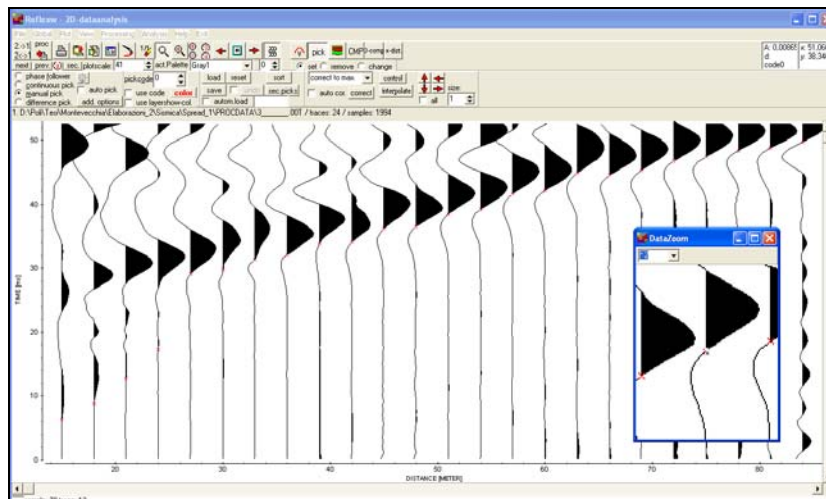


Figura 2.20 Picking dei primi arrivi. In questo esempio si riporta il picking della registrazione numero 3 traslata di 3 secondi.

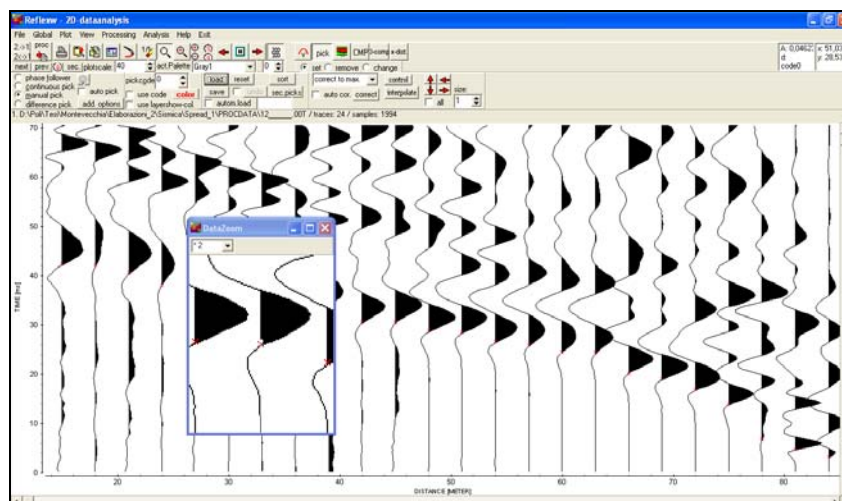


Figura 2.21 Picking dei primi arrivi. In questo esempio si riporta il picking della registrazione numero 12 traslata di 3 secondi.

## 2.3.2. Correzione del picking

Eseguito il picking si sono analizzate le dromocrone ottenute tramite il modulo *Traveltime Analysis 2D*. In questo modulo è possibile visionare il picking e correggere eventuali errori oppure eliminare i mispicks (cioè i picks non affidabili). Il parallelismo delle dromocrone rappresenta un criterio fondamentale per valutare la qualità del picking. Nelle figure da Figura 2.22 a Figura 2.31 si riporta l'analisi effettuata sulle dromocrone.

### Spread\_1

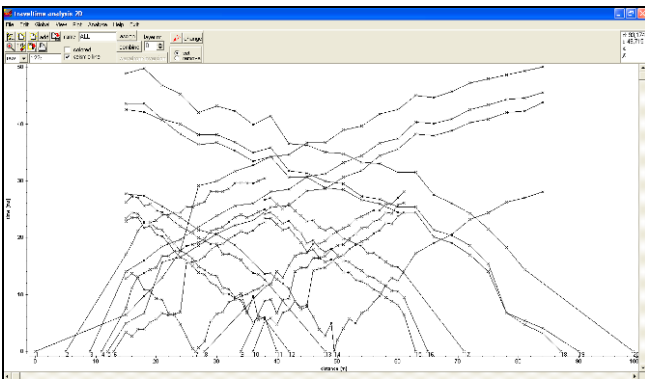


Figura 2.22 Caricamento delle dromocrone ricavate dal picking dello Spread\_1.

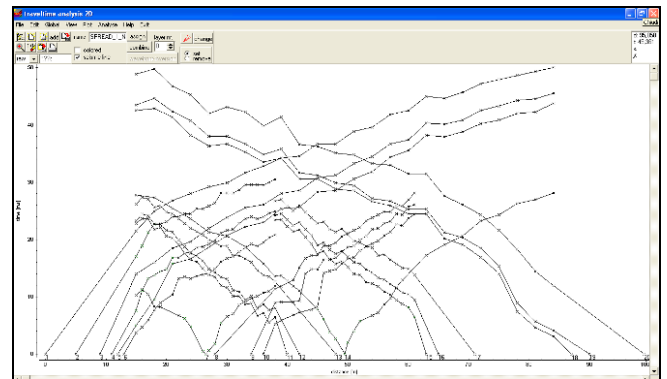


Figura 2.23 Dromocrone dello Spread\_1 dopo la correzione del picking.

### Spread\_2

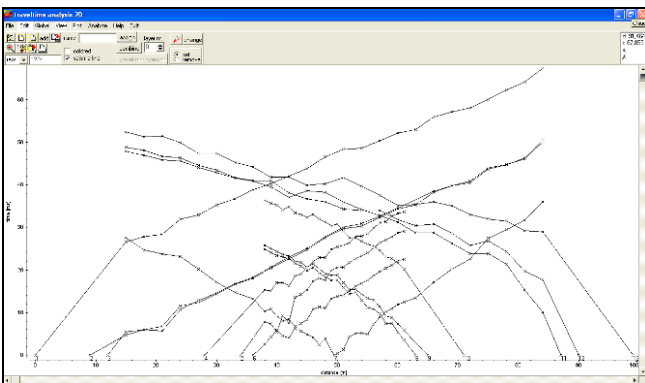


Figura 2.24 Caricamento delle dromocrone ricavate dal picking dello Spread\_2.

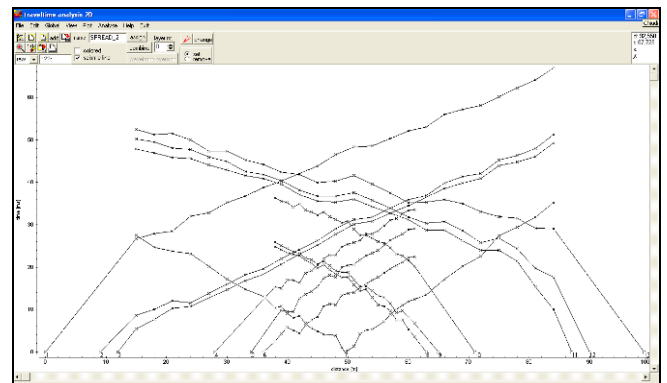


Figura 2.25 Dromocrone dello Spread\_2 dopo la correzione del picking.

### Spread\_3

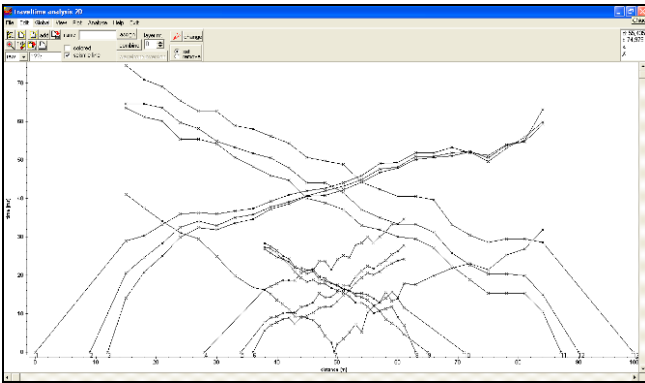


Figura 2.26 Caricamento delle dromocrone ricavate dal picking dello Spread\_3.

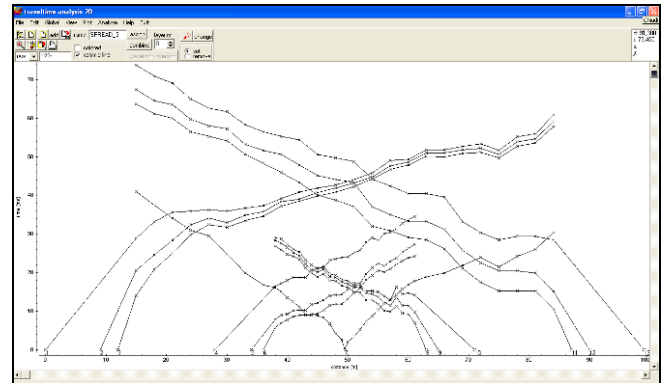


Figura 2.27 Dromocrone dello Spread\_3 dopo la correzione del picking.

### Spread\_4

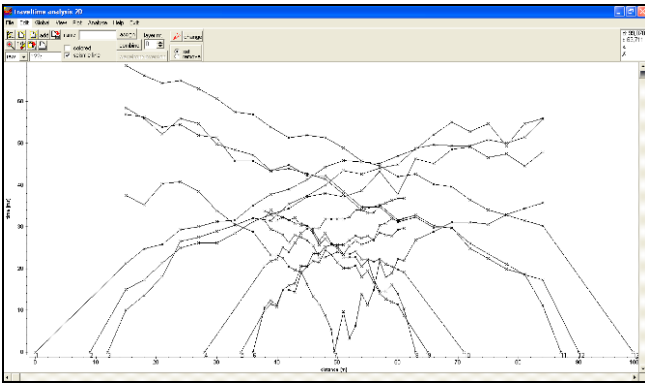


Figura 2.28 Caricamento delle dromocrone ricavate dal picking dello Spread\_4.

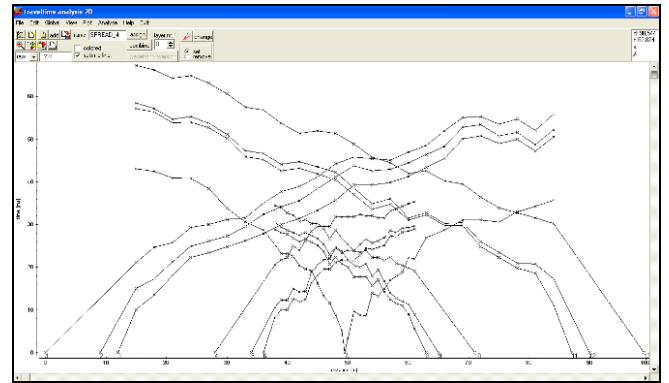


Figura 2.29 Dromocrone dello Spread\_4 dopo la correzione del picking.

### Spread\_5

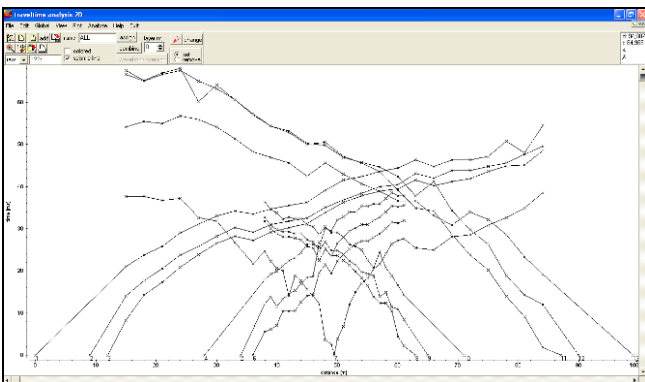


Figura 2.30 Caricamento delle dromocrone ricavate dal picking dello Spread\_5.

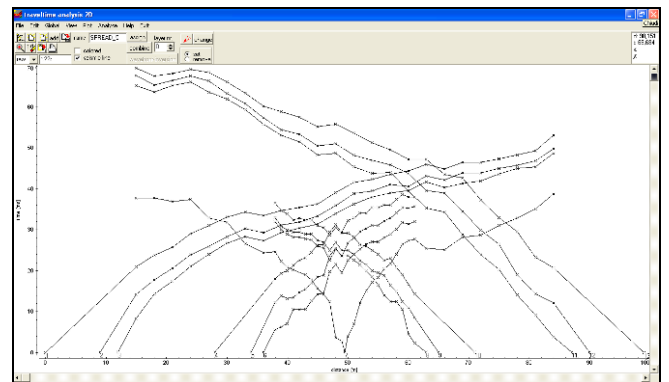


Figura 2.31 Dromocrone dello Spread\_5 dopo la correzione del picking.

# Capitolo 3. Inversione con metodo reciproco

L'inversione del picking col metodo reciproco permette di identificare gli spessori e le velocità degli strati a partire dai dati geometrici dello stendimento e dai tempi di arrivo registrati dai geofoni e individuati nella fase di picking. Per poter applicare tale metodo occorre avere almeno due registrazioni coniugate, cioè ottenute registrando i segnali dovuti a due shot esterni ai due capi dello stendimento.

## 3.1. Descrizione del metodo

Utilizzando il software *Reflexw* si è proceduto all'identificazione degli strati, lavorando separatamente sui 5 spreads, tramite un procedimento a cascata, come sotto riportato.

### Passo 1

Dopo aver inserito la registrazione di un ipotetico geofono posto in corrispondenza dello sparo, si sono identificati i segmenti di dromocrona appartenenti allo strato superficiale, cioè gli arrivi superficiali diretti.

Con la funzione *wavefront-inversion* si è determinata la velocità del primo strato e si è ottenuto un modello ad uno strato con velocità variabili lungo lo stendimento (asse x).

### Passo 2

Tornando alla visualizzazione delle dromocrone si sono identificati i segmenti appartenenti allo strato successivo. Una volta definiti i punti sorgente reciproci si sono generate due dromocrone (una diretta ed una inversa) che hanno come punti sorgente quelli selezionati e come valori il risultato di media e traslazione dei segmenti delle dromocrone selezionate in precedenza. In questo modo si sono definite due dromocrone che coprono tutta la lunghezza dello stendimento.

### Passo 3

Per fare l'inversione occorre selezionare il modello precedentemente ricavato (nel caso dell'inversione del picking del secondo strato si seleziona il modello del primo strato precedentemente generato). Il software *Reflexw* richiede di selezionare tale modello una volta lanciata la funzione *wavefront-inversion*.

A questo punto, definiti i parametri del modello, cioè la profondità massima del modello e il passo d'integrazione dell'algoritmo di inversione, si è generato un nuovo modello che comprende il modello precedentemente caricato e lo strato appena calcolato.

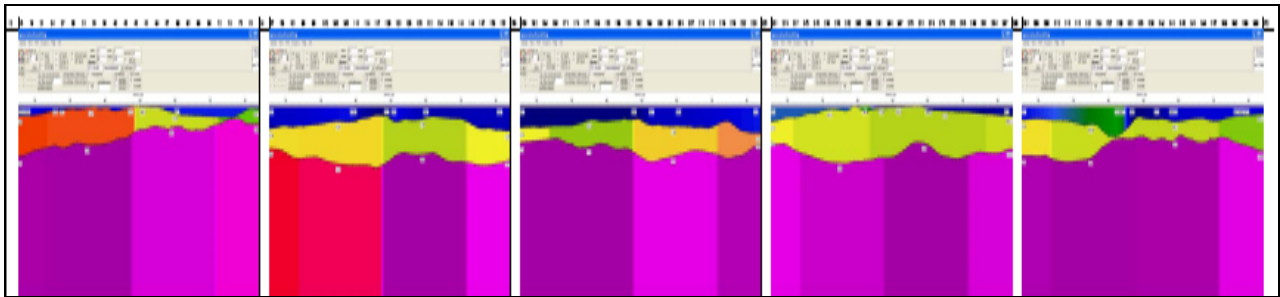
### Passo 4

Una volta generato il nuovo modello, tornando alla visualizzazione delle dromocrone, si è effettuata la selezione dei segmenti appartenenti allo strato successivo. Ripetendo le operazioni effettuate al Passo 2 ed al Passo 3.

Si ripete questa procedura fino ad aver identificato tutti gli strati. In questo caso si è riusciti ad identificare tre strati. Un quarto strato più profondo compariva solo in alcuni stendimenti, per evitare di fare una valutazione troppo azzardata si è preferito non considerarlo.

### **Passo 5**

Generati i modelli riferiti ai cinque spreads si è proceduto ad affiancarli per verificare la continuità dei diversi strati tra la fine di uno stendimento e l'inizio di quello successivo. Come si può vedere dalla Figura 3.1, i bordi dei 5 modelli generati per i 5 spreads, sono abbastanza coerenti.



*Figura 3.1 Rappresentazione del modello a 3 strati lungo tutto il profilo investigato.*

## 3.2. Risultati

Con il metodo reciproco si ricava un modello a 3 strati.

Il primo strato ha una velocità variabile tra 350 e 650 m/s, che rappresenta la coltre detritica areata di copertura. Lo spessore varia da pochi centimetri, nello stendimento più a est, ad un massimo di 5 m nella zona centrale, dove crollò della miniera.

Il secondo strato ha una velocità che varia tra 900 e 1300 m/s. Il terzo strato invece ha una velocità compresa tra 1600 e 2000 m/s. La profondità dell'interfaccia tra secondo e terzo strato varia tra 4 e 10 metri. Nelle figure da Figura 3.2 a Figura 3.6 si riportano i risultati dell'inversione col metodo reciproco per i cinque stendimenti.

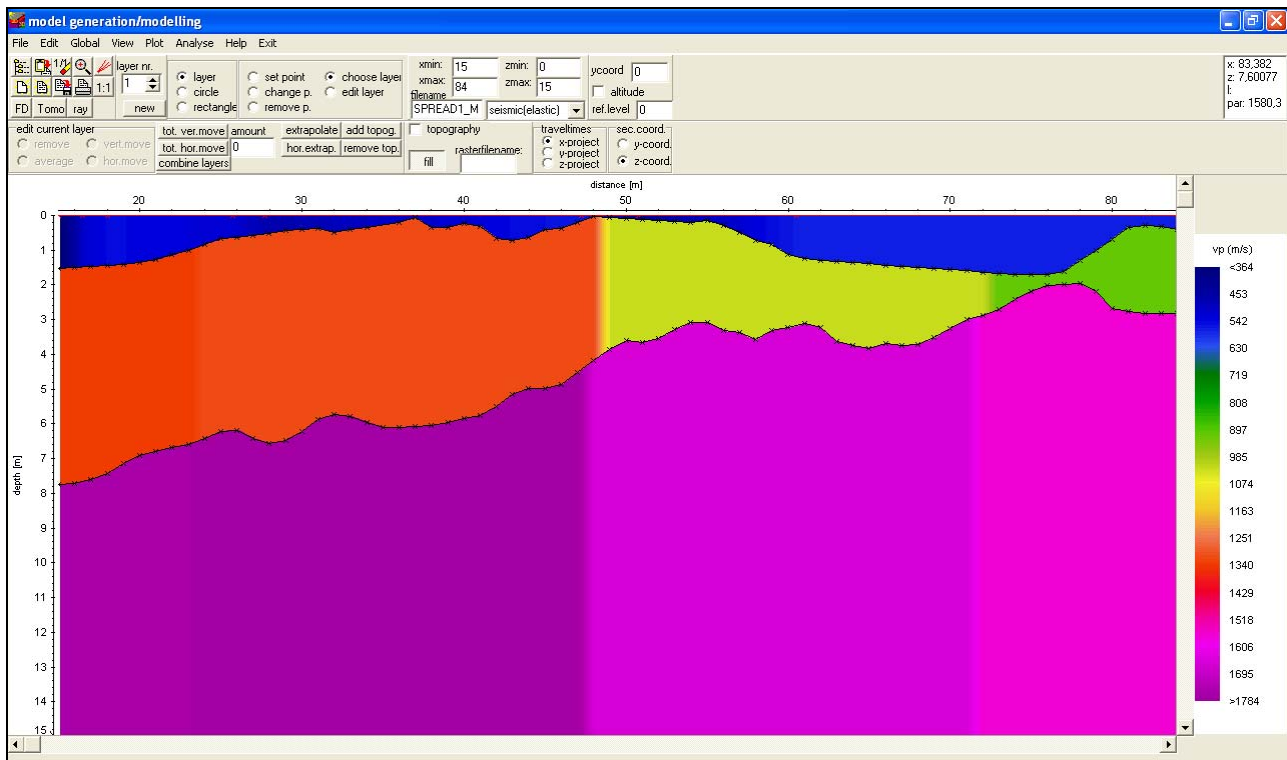


Figura 3.2 Risultato dell'elaborazione col metodo reciproco sullo Spread1.

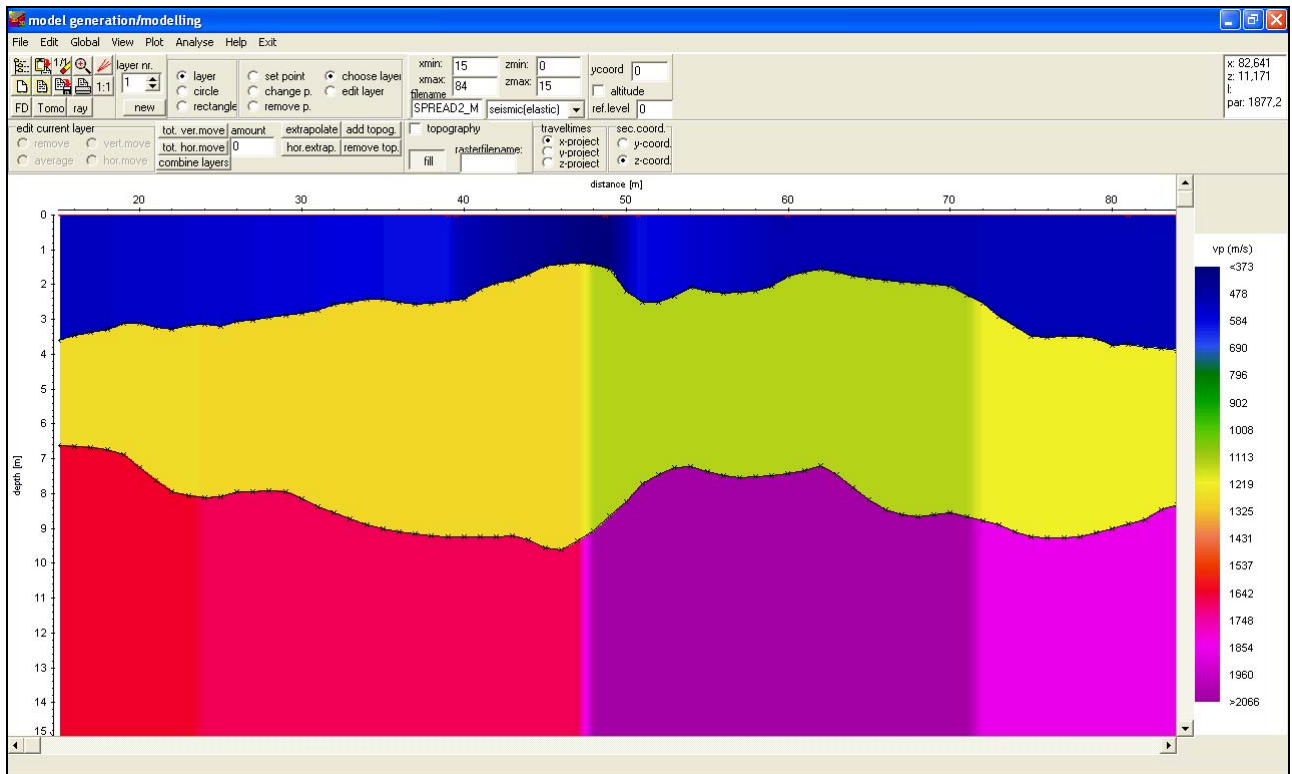


Figura 3.3 Risultato dell'elaborazione col metodo reciproco sullo Spread2.

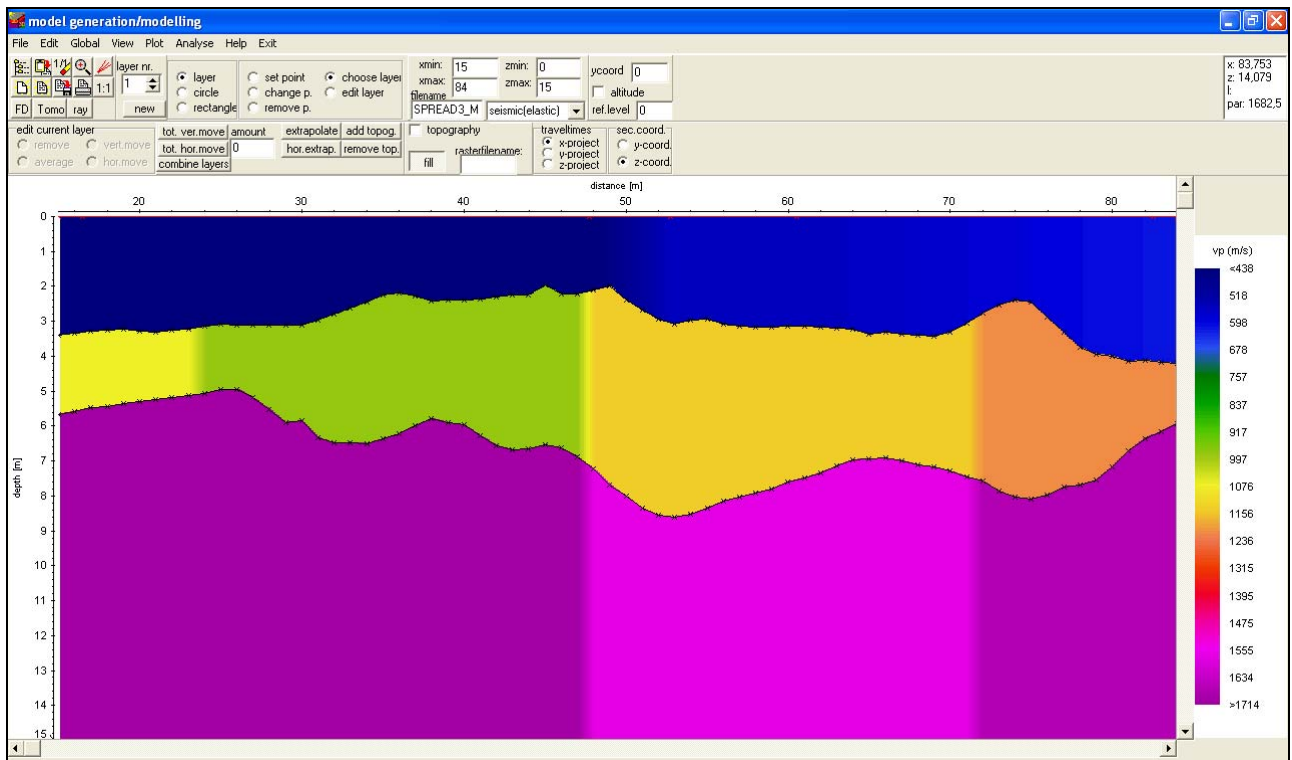


Figura 3.4 Risultato dell'elaborazione col metodo reciproco sullo Spread3.



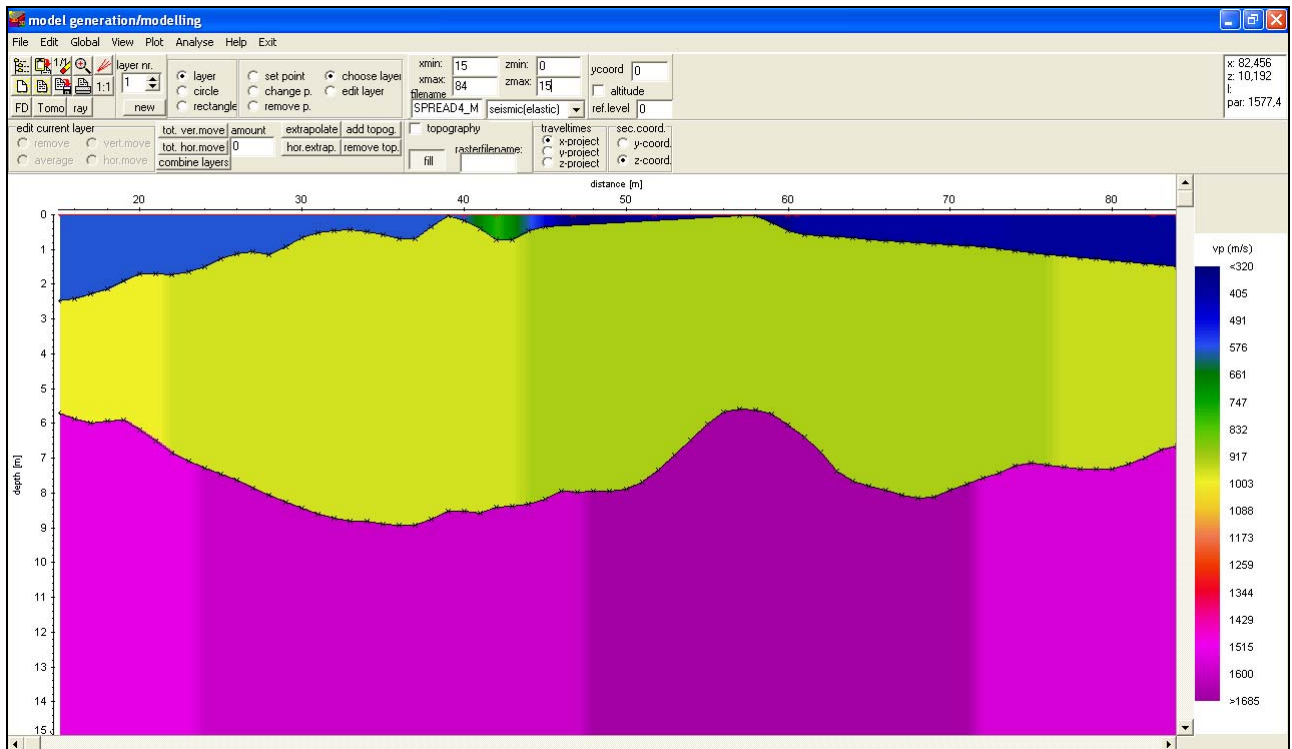


Figura 3.5 Risultato dell'elaborazione col metodo reciproco sullo Spread4.

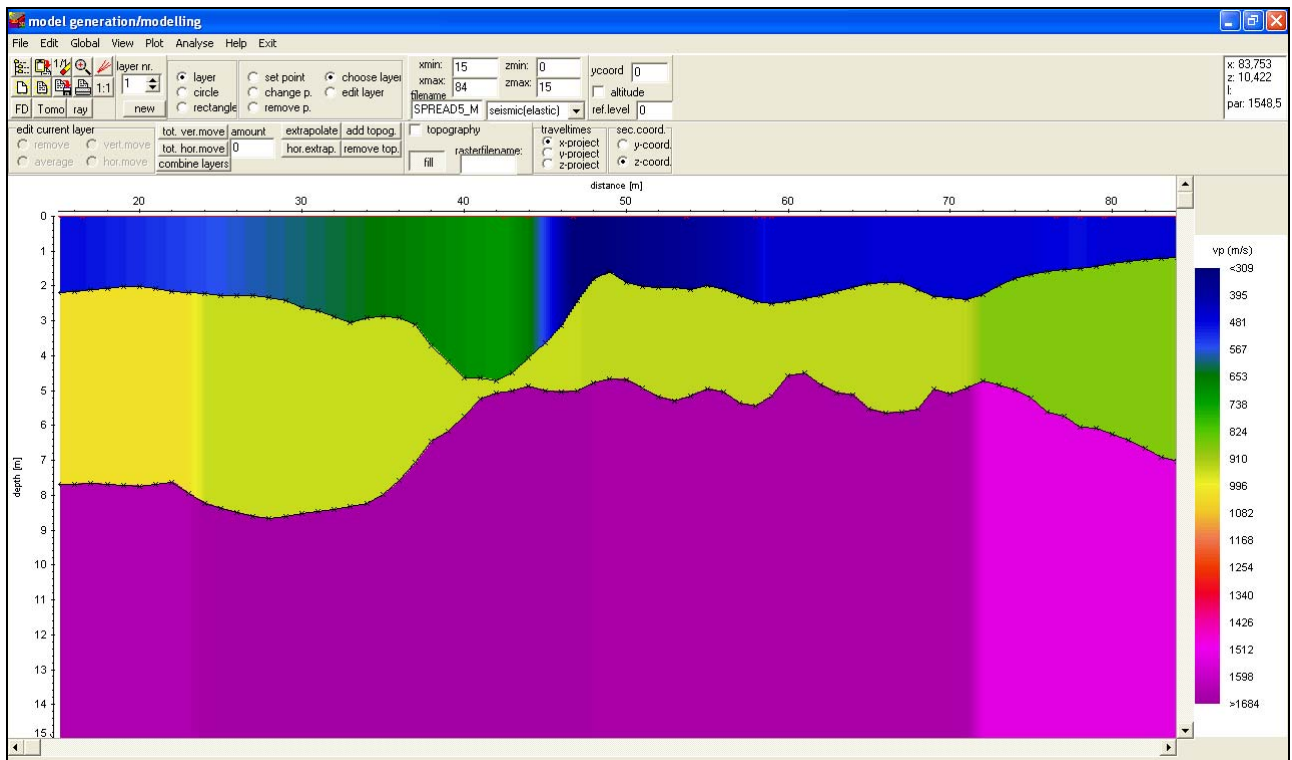


Figura 3.6 Risultato dell'elaborazione col metodo reciproco sullo Spread5.

# Capitolo 4. Inversione con metodo tomografico

La tomografia è una tecnica diagnostica che permette la ricostruzione del campo di velocità di propagazione di un'onda attraverso un mezzo. Noto il tempo che l'onda impiega per raggiungere il ricevitore e fatte alcune ipotesi sulla geometria del percorso della stessa, è possibile ricavare il valore medio della velocità dell'onda lungo il percorso seguito. Attraverso la discretizzazione del problema attraverso tecniche di stima ottimale iterative è possibile ricostruire un modello della velocità di propagazione nel mezzo indagato.

Nel caso della tomografia sismica con il software *Reflexw*, l'algoritmo tomografico simula i tempi di volo dei raggi attraverso un modello stratigrafico di partenza (definito dall'utente) e confrontandoli con i dati reali, lo modifica per minimizzarne le differenze.

Come modello di partenza si è utilizzato prima il modello ricavato con l'inversione sismica ricavata col metodo reciproco, e successivamente un modello generico a gradiente.

Mentre i dati reali sono stati ricavati a partire dai dati di picking.

## 4.1. Descrizione del metodo

### 4.1.1. Modello di partenza ricavato col metodo reciproco

Per implementare l'inversione tomografica, come primo approccio si è deciso di partire dal modello ricavato col metodo reciproco.

#### **Passo 1**

Per ogni spread si è importato il modello a 3 strati precedentemente descritto.

#### **Passo 2**

Si sono impostati i parametri del modello tramite il pannello di *Reflexw TomographyGroupBox*.

#### **Passo 3**

Si è importato il file dei dati reali (ricavato convertendo il file di picking).

#### **Passo 4**

Ultimata la procedura di inversione, visualizzando il percorso dei raggi, si sono confrontati i tempi di arrivo reali con quelli calcolati lungo i raggi.

Si è proceduto quindi a variare i parametri del modello al fine di migliorare la sovrapposizione tra tempi calcolati e tempi reali, ripetendo la procedura dal Passo 2 al Passo 4.

## 4.2. Risultati

Nelle figure di seguito (da Figura 4.1 a Figura 4.10) si riportano i risultati delle elaborazioni tomografiche. In linea generale confermano i risultati ottenuti col metodo reciproco, anche se con una leggera traslazione degli strati verso il basso, di circa 50 centimetri - 1 metro. Una conferma della validità dei risultati la si ha anche dal fatto che l'inversione tomografica eseguita a partire dai modelli a gradiente tende a ricostruire un modello stratigrafico simile a quello costruito a partire dal modello ottenuto col metodo reciproco.

### Spread 1

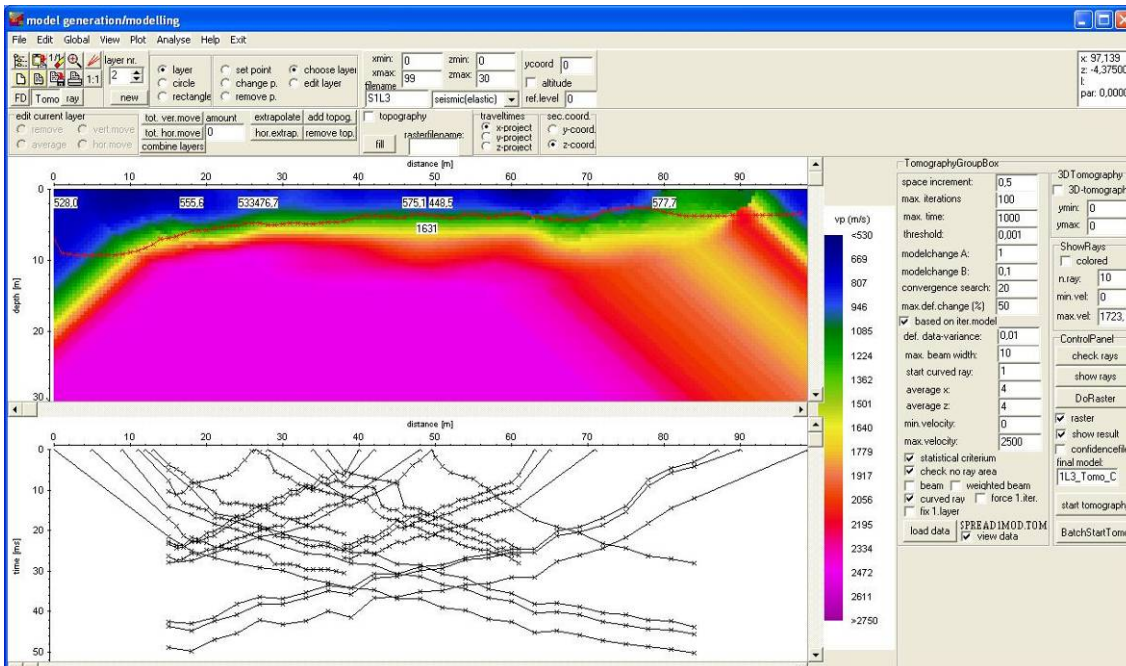


Figura 4.1 Elaborazione tomografica dello Spread1 ottenuta a partire dal modello ricavato con il metodo reciproco.

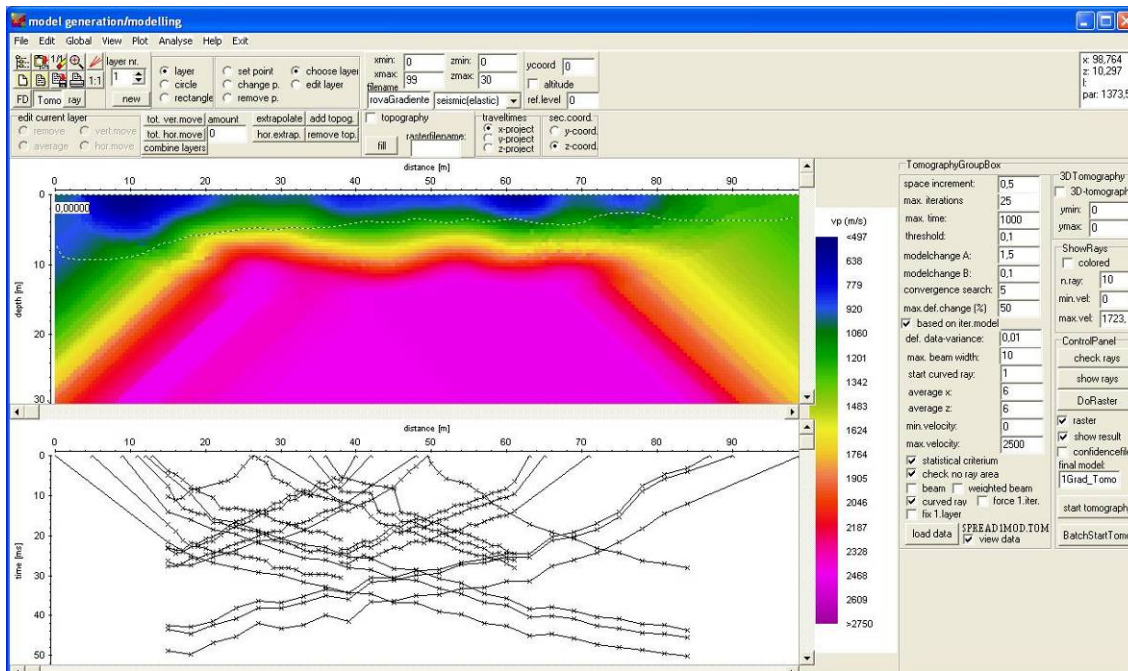


Figura 4.2 Elaborazione tomografica dello Spread1 ottenuta a partire dal un modello a gradiente.

## Spread 2

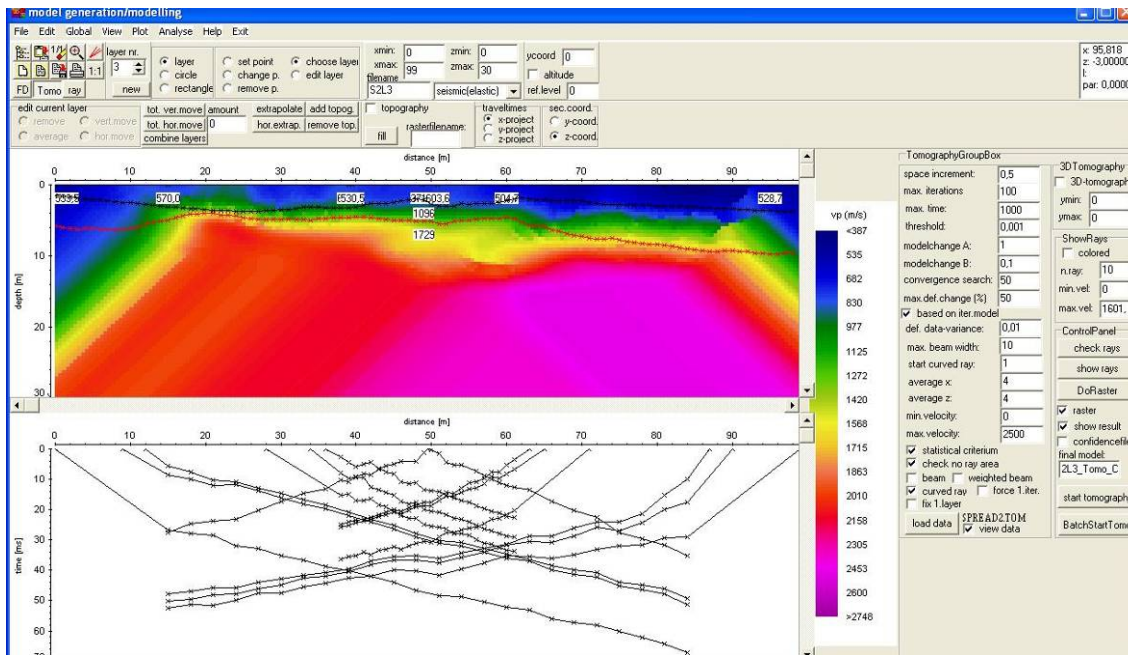


Figura 4.3 Elaborazione tomografica dello Spread2 ottenuta a partire dal modello ricavato con il metodo reciproco.

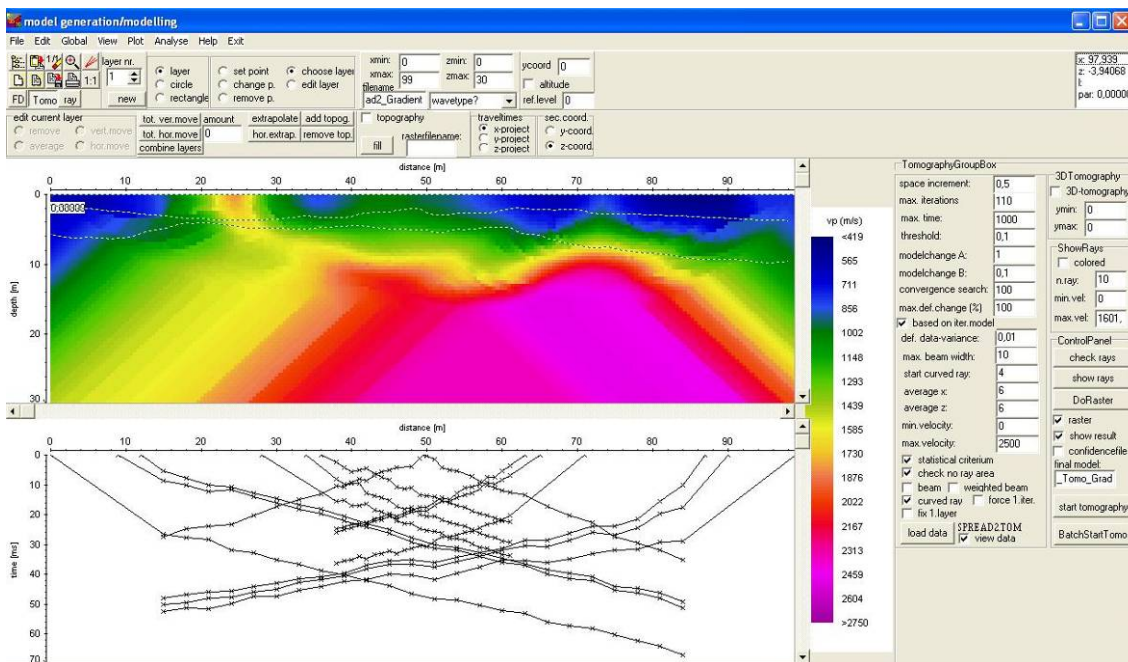


Figura 4.4 Elaborazione tomografica dello Spread2 ottenuta a partire dal un modello a gradiente.

## Spread 3

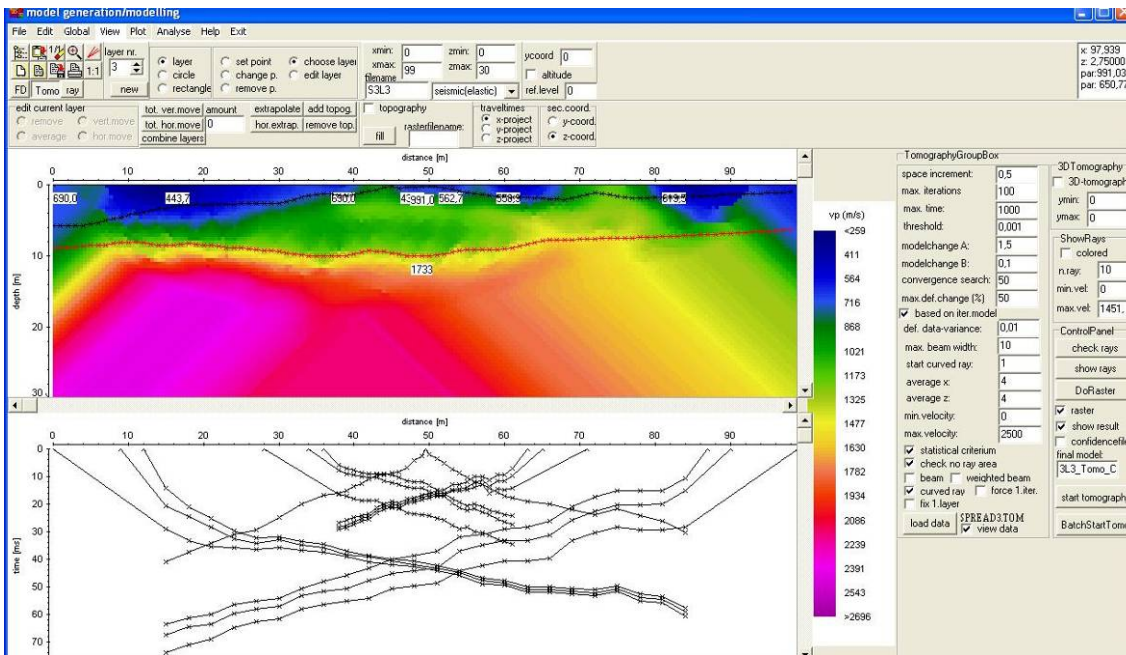


Figura 4.5 Elaborazione tomografica dello Spread3 ottenuta a partire dal modello ricavato con il metodo reciproco.

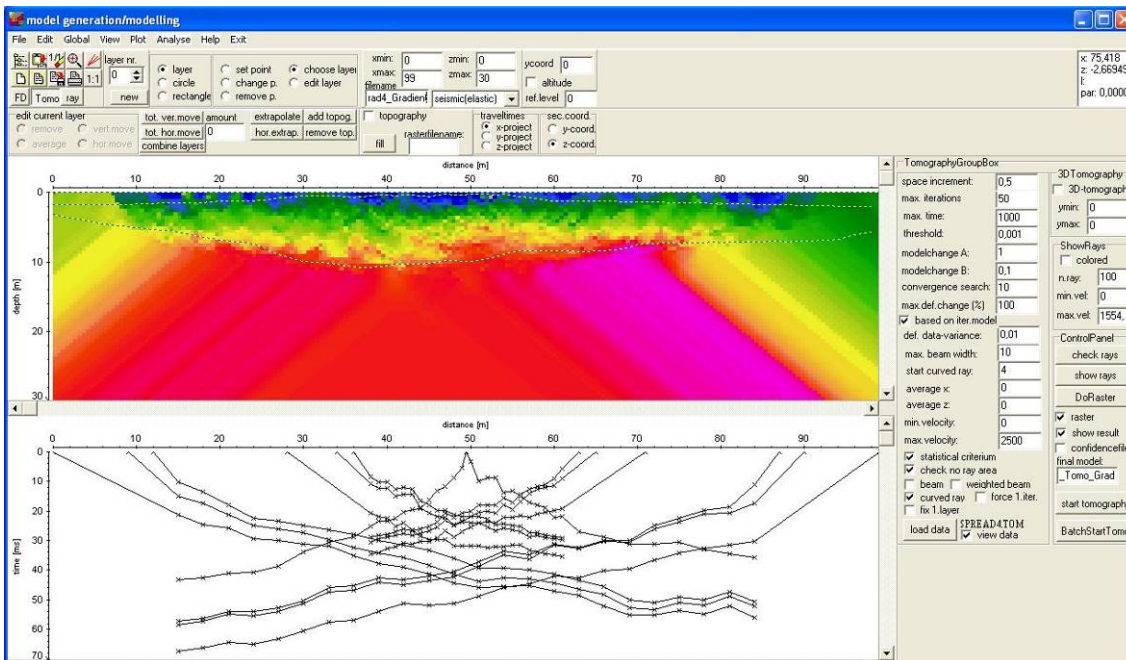


Figura 4.6 Elaborazione tomografica dello Spread3 ottenuta a partire dal un modello a gradiente.

## Spread 4

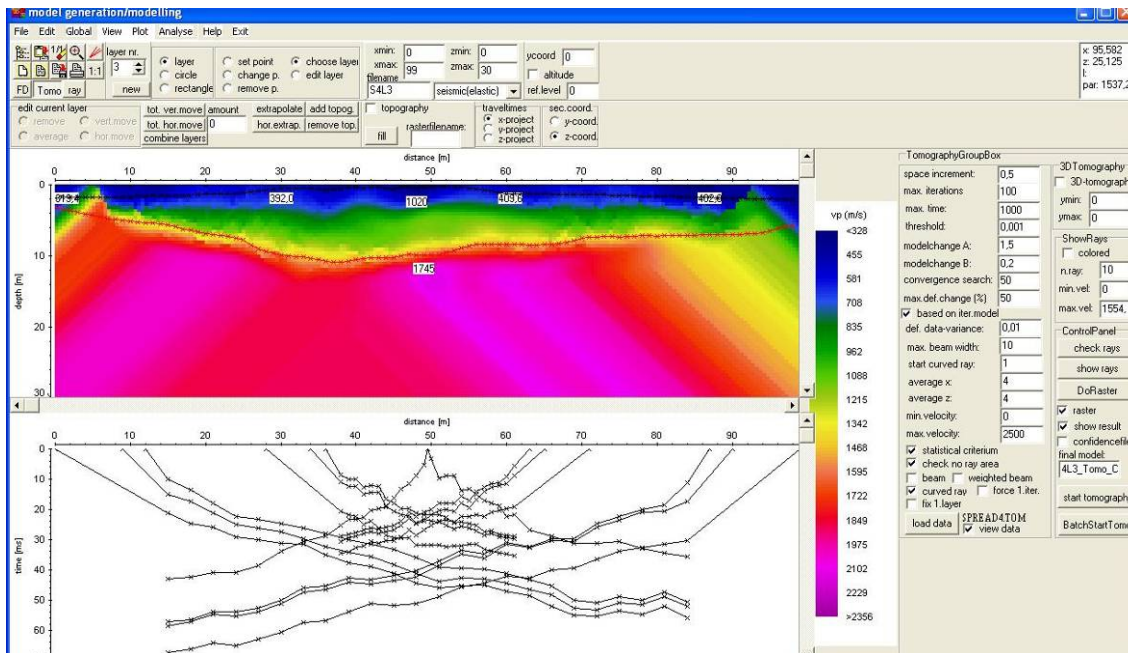


Figura 4.7 Elaborazione tomografica dello Spread4 ottenuta a partire dal modello ricavato con il metodo reciproco.

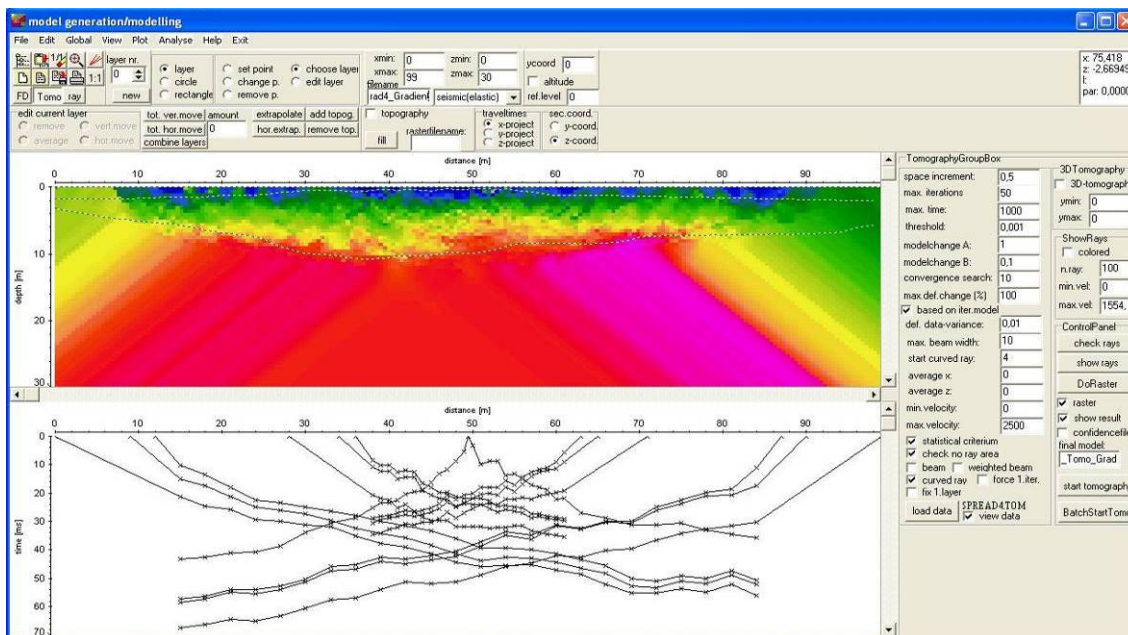


Figura 4.8 Elaborazione tomografica dello Spread4 ottenuta a partire dal un modello a gradiente.

## Spread 5

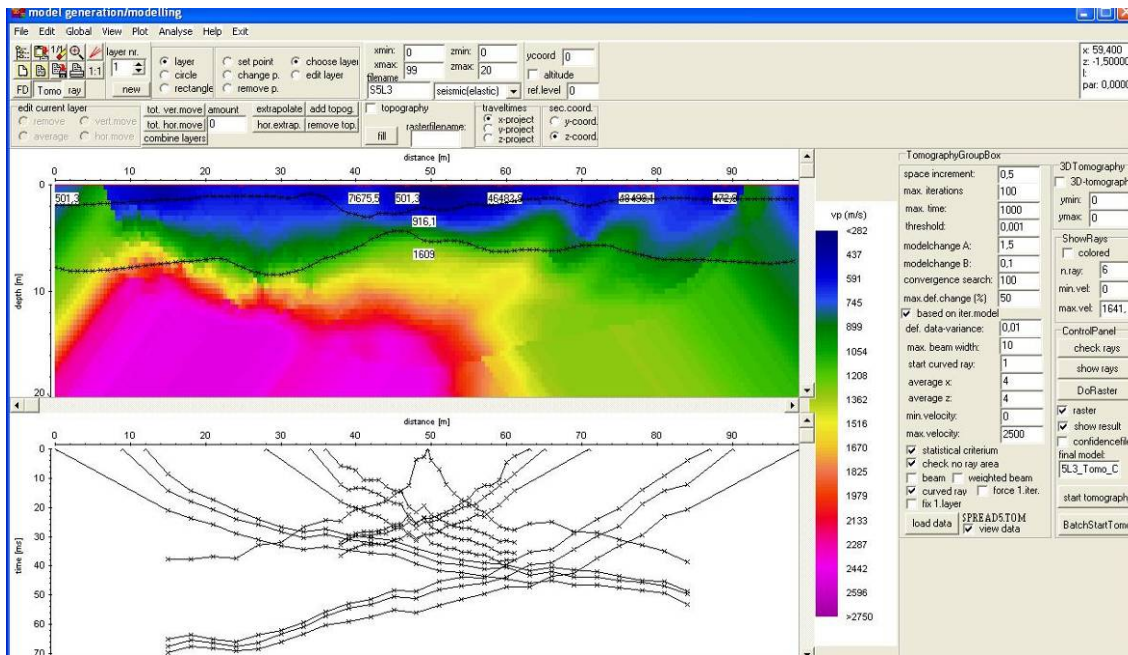


Figura 4.9 Elaborazione tomografica dello Spread5 ottenuta a partire dal modello ricavato con il metodo reciproco.

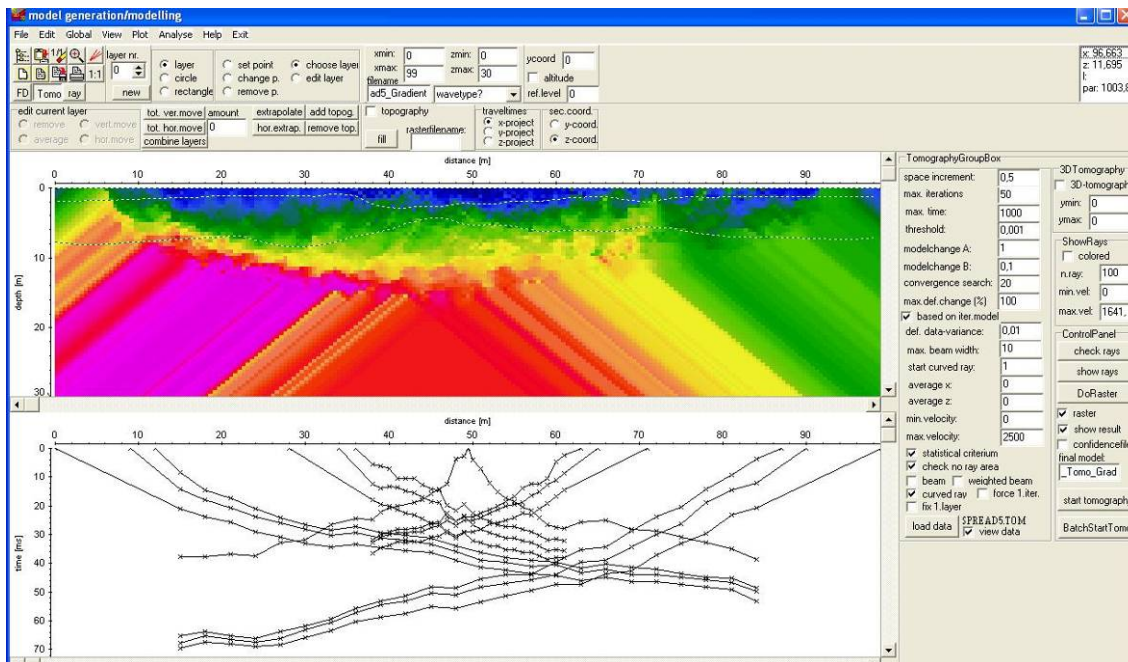


Figura 4.10 Elaborazione tomografica dello Spread5 ottenuta a partire dal un modello a gradiente.



# Capitolo 5. Indagini Radar

Per avere una risoluzione maggiore nella descrizione degli strati superficiali, si è adottato il Ground Penetrating Radar. Il funzionamento si basa sulla trasmissione e ricezione di onde elettromagnetiche attraverso il terreno. Il sistema è formato da 1 trasmettitore ed un ricevitore, collegati a due antenne ed una unità di acquisizione, visualizzazione e memorizzazione dei dati.

Il legame tra frequenza e profondità investigata rispetto alle frequenze più utilizzate nell'ambito geofisico è riassunta nella Tabella 5.1.

Penetration [m]	Frequency [MHz]
0,5	1000
1,0	500
2,0	200
5,0	100
10	50
30	25
50	10




Tabella 5.1 Relazione tra profondità investigata e frequenza elettromagnetica nominale dell'antenna. Le frecce blu indicano le frequenze utilizzate nel presente studio.

## 5.1. Acquisizione dati

In Tabella 5.2 sono riportate le caratteristiche delle tre diverse antenne utilizzate per l'acquisizione dei dati.

Antenna	Frequenza nominale [MHz]	Offset antenne [cm]
IDS 200	200	19
MALA 100	100	50
MALA 50	50	200

Tabella 5.2 Caratteristiche delle antenne utilizzate.

Nella Tabella 5.3 sono riportate le indicazioni per georeferenziazione ed interpretazione in direzione est – ovest.

Distanza	INFO
0m	Palo luce 1
30.8m	Tombino metallico lato strada
33m	Palo luce 2
44m	Cabina Gas lato strada
66m	Palo luce 3
98.5	Palo luce 4
100m	Inizio parcheggio sulla sx
111m	Entrata parcheggio sulla sx
129m	Inizio bancata laterale sulla sx
129.3m	Tombino metallico lato strada
131m	Palo luce 5 (di fronte al parcheggio)
141m	Fine parcheggio sulla sx
199m	Fine bancata laterale sulla sx (spiazzo sterrato sulla sx)
212m	Inizio recinzione metallica sulla sx e altra bancata laterale
282m	Tombino metallico con rattoppo sulla sede stradale
336m	Spigolo ponte (fine recinzione metallica sulla sx)

Tabella 5.3 Indicazioni per georeferenziazione ed interpretazione (da est a ovest)

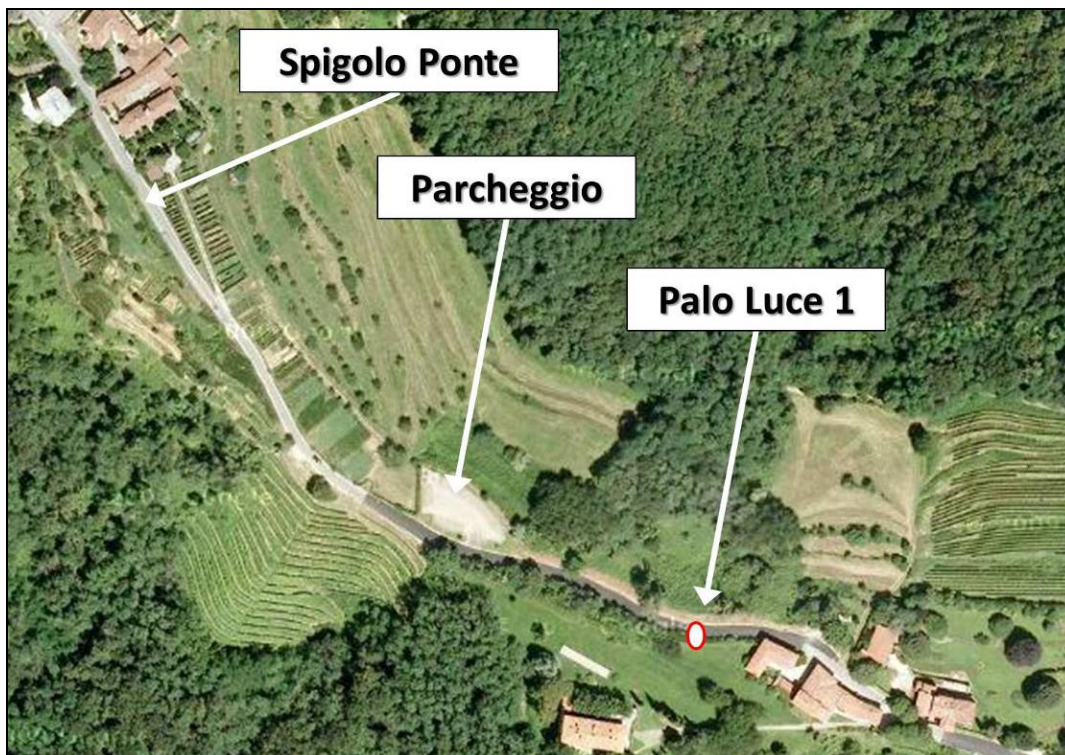


Figura 5.1 Riferimenti utilizzati per georeferenziare i profili GPR.

### 5.1.1. IDS 200

Sono stati eseguiti 4 profili, tre lunghi circa 100 metri l'uno in successione da est a ovest, ed uno unico da ovest ad est lungo circa 300 m, come riportato in Tabella 5.4.

PROFILO	CARATTERISTICHE	INFO
1	Inizio: Palo luce a 33.5m da spigolo casa Fine: dopo circa 100m	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
2	Inizio: Fine Profilo 1 Fine: dopo circa 100m	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
3	Inizio: Fine Profilo 2 Fine: Spigolo del marciapiede sul ponte (130m circa)	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
4	Inizio: Spigolo del marciapiede sul ponte Fine: Palo luce a 33.5m da spigolo casa	Direzione: da Ovest a Est Lato strada: dx

Tabella 5.4 Caratteristiche dei profili acquisiti con l'antenna IDS 200.

### 5.1.2. MALA 100

Sono stati eseguiti 2 profili, uno da est a ovest ed uno da ovest ad est lunghi circa 340 m, come riportato in Tabella 5.5.

PROFILO	CARATTERISTICHE	INFO
1	Inizio: Palo luce a 33.5m da spigolo casa Fine: Spigolo del marciapiede sul ponte	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
2	Inizio: Spigolo del marciapiede sul ponte Fine: Palo luce a 33.5m da spigolo casa	Direzione: da Ovest a Est Lato strada: sx

Tabella 5.5 Caratteristiche dei profili acquisiti con l'antenna MALA 100.

### 5.1.3. MALA 50

Sono stati eseguiti 6 profili, quattro da est a ovest e due da ovest ad est secondo lo schema riportato in Tabella 5.6. Nell'esecuzione del profilo si sono avute alcune difficoltà dovute all'ingombro dell'antenna, per questo motivo sono stati realizzati numerosi profili complementari.

PROFILO	CARATTERISTICHE	INFO
1	Inizio: Palo luce a 33.5m da spigolo casa Fine: Palo luce davanti al parcheggio	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
2	Inizio: Fine Profilo 5 Fine: Punto imprecisato dopo inizio rete metallica sulla sx	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
3	Inizio: Fine Profilo 7 Fine: Viale d'entrata sulla dx	Direzione: da Est a Ovest Lato strada: sx
4	Inizio: 50m da inizio rete metallica sulla sx	Direzione: da Est a Ovest

	Fine: Spigolo del marciapiede sul ponte	Lato strada: sx
5	Inizio: 50m da spigolo del marciapiede sul ponte Fine: Punto imprecisato vicino alla fine del parcheggio	Direzione: da Ovest a Est Lato strada: dx
6	Inizio: Punto imprecisato vicino alla fine del parcheggio Fine: Palo luce davanti al parcheggio	Direzione: da Ovest a Est Lato strada: dx

Tabella 5.6 Caratteristiche dei profili acquisiti con l'antenna MALA 50.

## 5.2. Elaborazione dei dati

I dati sono stati elaborati sempre con il software *Reflexw*.

Ogni profilo è stato analizzato separatamente.

I passaggi seguiti sono stati:

### Passo 1

Lettura e osservazione dei dati.

I dati sono stati importati e convertiti nel file in modalità compatibile col software *Reflexw*.

Solitamente da una prima osservazione si possono vedere dei riflettori più superficiali, mentre per vedere quelli più profondi è necessario processare i dati.

Dall'analisi dei dati importati si è definito, per ogni profilo, il valore di calibrazione temporale.

### Passo 2

Calibrazione della scala dei tempi.

Con la calibrazione della scala dei tempi si associa al tempo zero dell'esperimento l'istante in cui il segnale è irradiato dall'antenna trasmittente. A partire dall'osservazione fatta al Passo 1 si sono traslate tutte le registrazioni. In Figura 5.2 si riporta a titolo di esempio l'applicazione della traslazione dell'asse temporale di 15 ns adottata per il *Profilo\_1* realizzato con l'antenna IDS 200.

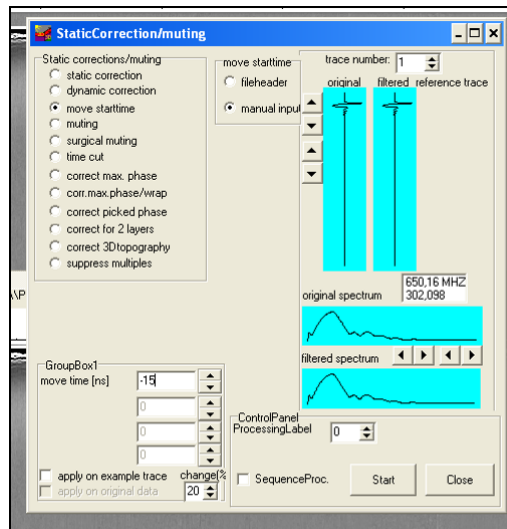


Figura 5.2 Finestra di dialogo del software Reflexw per la correzione della scala temporale.

### Passo 3

Filtro passabanda.

Lavorando sulle tracce processate al Passo 2, dopo aver analizzato gli spettri di ampiezza delle tracce e aver osservato la banda in cui si concentra la maggior parte di energia, tenuto presente il valore della frequenza nominale del segnale emesso dall'antenna, si sono adottati i filtri passabanda in modo da eliminare le frequenze di disturbo. In Figura 5.3 si riporta a titolo di esempio l'applicazione della traslazione dell'asse temporale di 15 ns adottata per il *Profilo\_1* realizzato con l'antenna IDS 200.

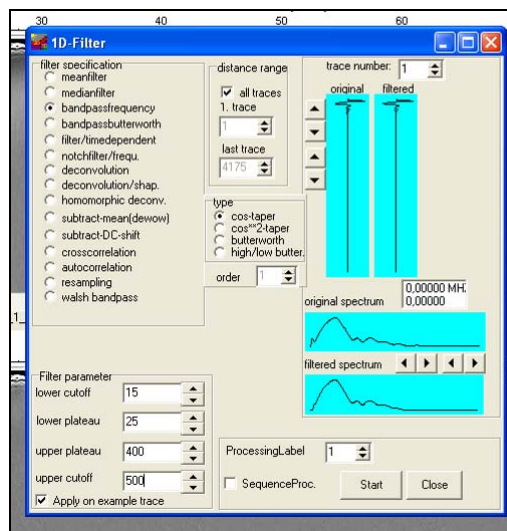


Figura 5.3 Finestra di dialogo del software Reflexw per l'applicazione del filtro passabanda.

### Passo 4

Applicazione del guadagno.

Si sono adottati diversi tipi di guadagno, al fine di amplificare il segnale in profondità.

Le funzioni di guadagno utilizzate sono:

- *AGC-Gain*: agisce sulle singole tracce indipendentemente. Il filtro permette la creazione di ampiezze ugualmente distribuite in direzione  $y$  (nel nostro caso l'asse temporale). Con il parametro *window length* si assegna la dimensione della finestra temporale. Il programma prima calcola la media di ogni singola traccia considerando l'intero spazio temporale. Dopodiché scala ogni valore di ampiezza in modo che l'ampiezza media ha lo stesso valore per ogni valore della finestra selezionata attorno al valore corrente nella traccia. La dimensione della finestra determina l'uguaglianza di distribuzione dell'ampiezza. Un valore della finestra pari a 1 indica che ogni tempo del campionamento riceve lo stesso valore di ampiezza (scelta non ragionevole). Una finestra di dimensioni pari all'intera traccia non causa modifiche all'ampiezza. Finestre molto piccole causano una forte uguaglianza nella distribuzione dell'ampiezza, e viceversa finestre grandi provocano una scarsa uguaglianza. Questa funzione enfatizza le piccole ampiezze rispetto alle grandi. In Figura 5.4 si riporta la finestra di dialogo del software *Reflexw*.

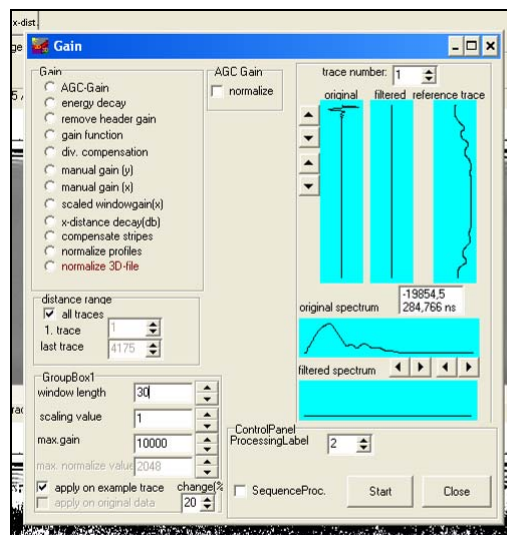


Figura 5.4 Finestra di dialogo del software *Reflexw* per l'applicazione del guadagno tramite la funzione *AGC-Gain*.

- *Energy decay*: agisce sulle singole tracce indipendentemente. Con questa opzione si applica a tutta la traccia un'amplificazione basata sul decadimento medio di ampiezza calcolato automaticamente. Per prima cosa viene calcolata la curva dei decadimenti medi di tutte le tracce. Dopo di che ogni punto di ogni traccia viene diviso per il valore medio preso dalla curva stessa. Come la funzione *AGC-Gain* anche questa enfatizza le piccole ampiezze rispetto alle grandi. In Figura 5.5 si riporta la finestra di dialogo del software *Reflexw*.

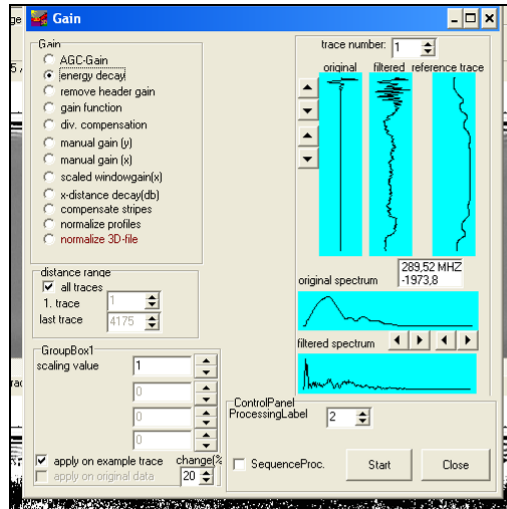


Figura 5.5 Finestra di dialogo del software Reflexw per l'applicazione del guadagno tramite la funzione Energy decay.

- *Gain function*: agisce sulle singole tracce indipendentemente. Con questa opzione è possibile moltiplicare tutti i dati per una funzione  $g(t)$  (5.1).

$$g(t) = (1 + a \cdot t) \cdot e^{(b \cdot t)} ; \text{ con } a = a' / \text{pulse} \text{ e } b = (b' \cdot v) / 8,69$$

5.1

- La larghezza dell'impulso è automaticamente determinata dalla frequenza nominale. I due parametri  $a'$  e  $b'$ , devono essere inseriti manualmente. È possibile inoltre inserire il tempo a cui far iniziare l'applicazione del filtro e il massimo valore di guadagno da assegnare. Questa funzione compensa smorzamento e diffrazione geometrica. In Figura 5.6 si riporta la finestra di dialogo del software Reflexw.

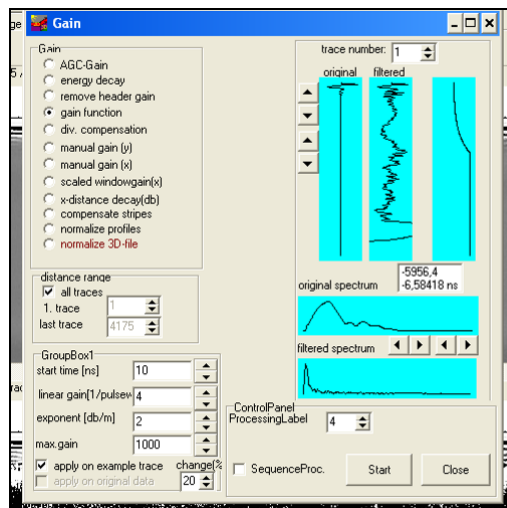


Figura 5.6 Finestra di dialogo del software Reflexw per l'applicazione del guadagno tramite la Gain function.

Una volta applicato il guadagno, si è osservato nuovamente lo spettro delle ampiezze, per verificare l'introduzione e l'amplificazione del rumore, ripetendo successivamente il Passo 3.

## Passo 5

Analisi di velocità.

Dopo aver attivato il comando di *Reflexw Velocity adaptation*, si sono individuate le iperboli di diffrazione e la velocità dello strato, come riportato nell'esempio di Figura 5.7.

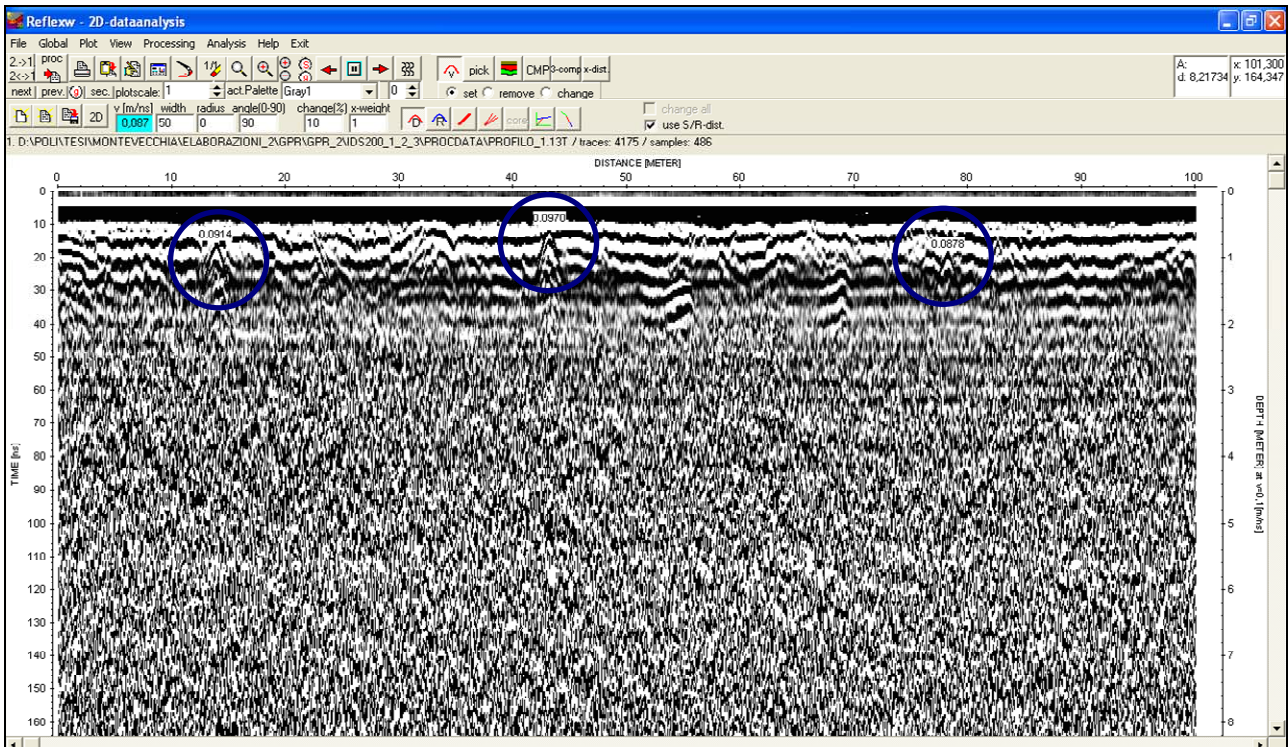


Figura 5.7 Individuazione delle iperboli di velocità tramite il software Reflexw.

## Passo 6

Sottrazione del background.

- L'ultima operazione è stata la rimozione del background, in modo da eliminare le riverberazioni in aria tra trasmettitore e ricevitore e verificare la presenza di eventuali riflettori nascosti. In Figura 5.8 si riporta la finestra di dialogo del software *Reflexw*. È stata ripetuta poi l'analisi di velocità come al Passo 5.



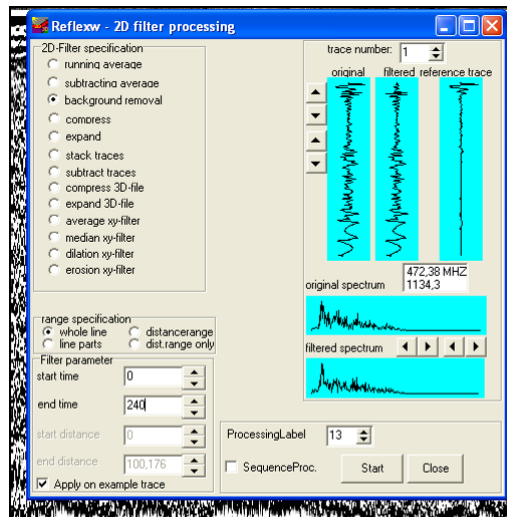


Figura 5.8 Finestra di dialogo del software Reflexw per la rimozione del background.

## 5.3. Risultati

### 5.3.1. IDS 200

Nella Tabella 5.7 sono riportate le operazioni eseguite sui 4 profili registrati con l'antenna IDS 200.

Elaborazione	Valore	Commenti
Lettura e osservazione dei dati	15 ns	Tempo di volo in aria
Calibrazione della scala dei tempi	- 15 ns	
Filtro passabanda	(15; 25) – (400;500)	
Applicazione del guadagno	<ul style="list-style-type: none"><li>• AGC time window 30 ns</li><li>• Energy decay</li><li>• Gain function <math>a' = 5</math>; <math>b' = 1</math></li></ul>	
Filtro passabanda	(30; 50) – (400;500)	
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo
Sottrazione del background		Lungo tutta la traccia
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo

*Tabella 5.7 Riassunto delle elaborazioni eseguite sui profili registrati con l'antenna IDS 200.*

I risultati sono riportati nelle figure sottostanti (da Figura 5.9 a Figura 5.12).

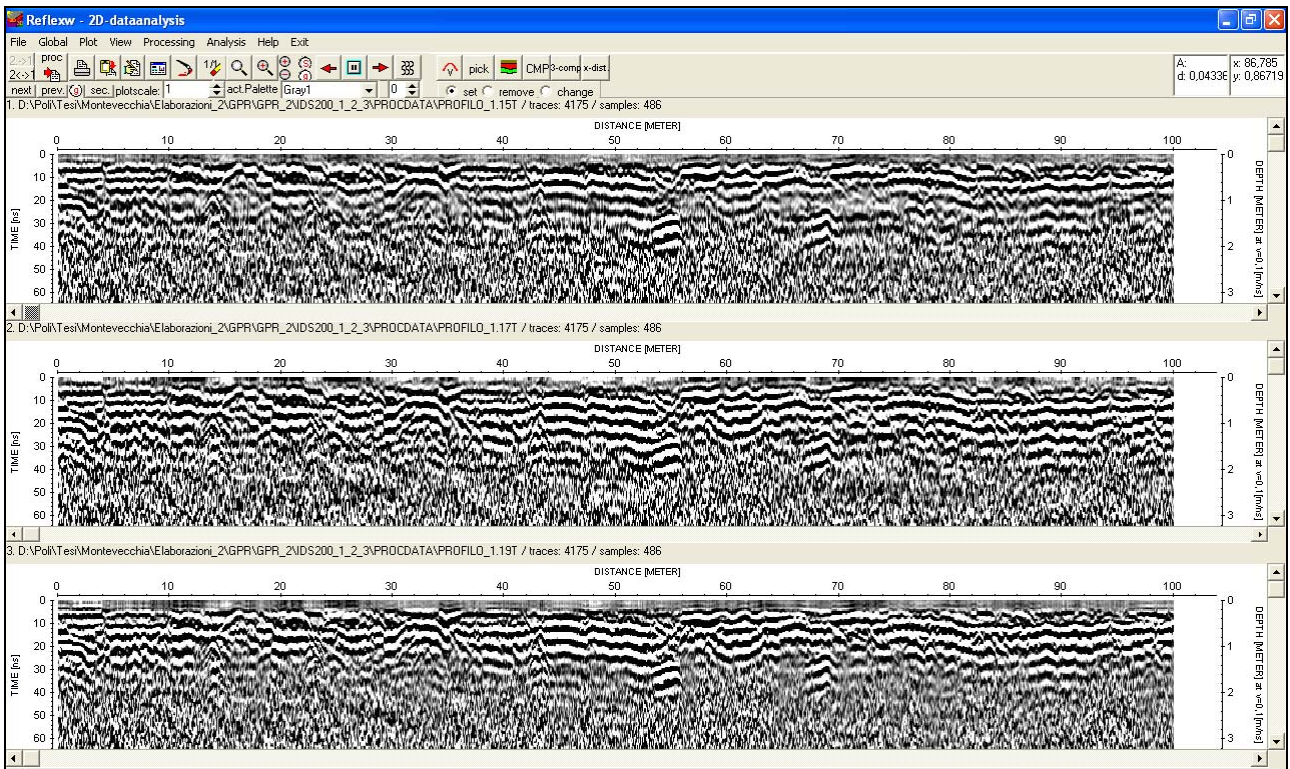


Figura 5.9 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo1 con antenna IDS200, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

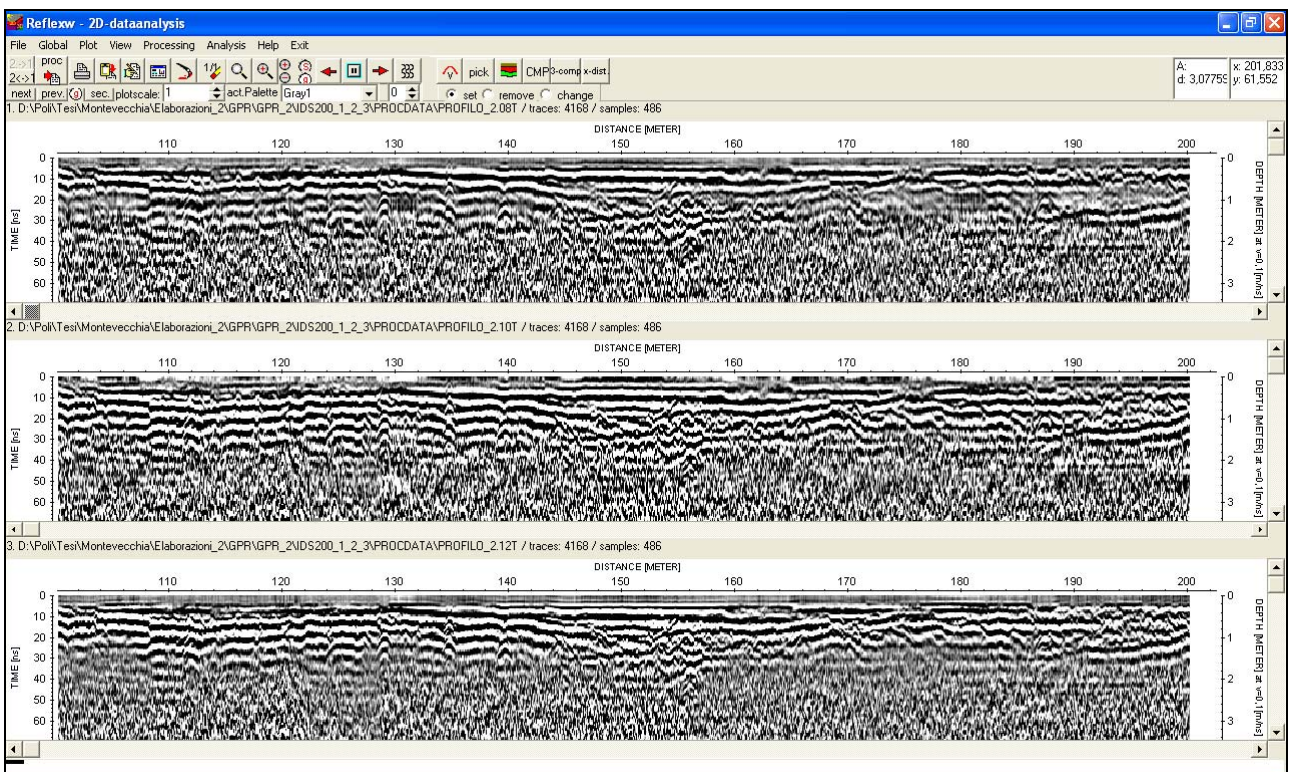


Figura 5.10 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo2 con antenna IDS200, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

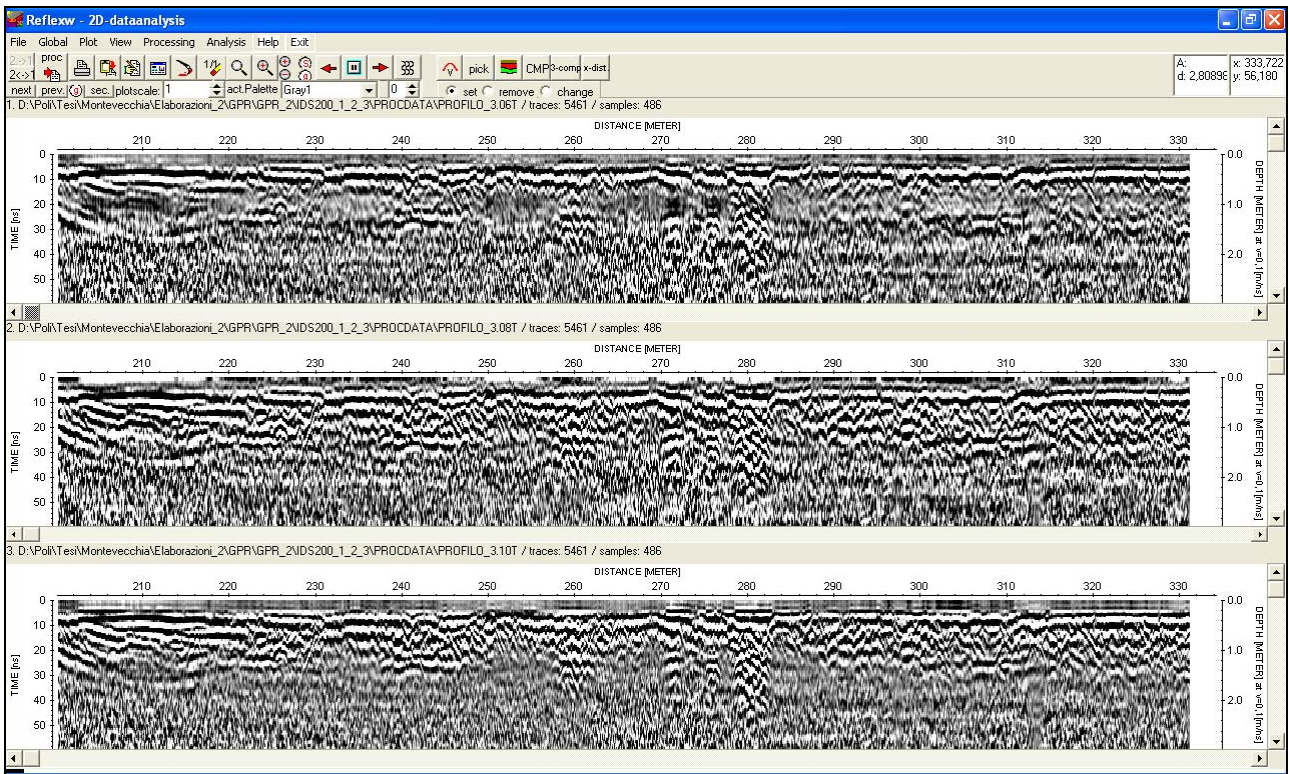


Figura 5.11 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo3 con antenna IDS200, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

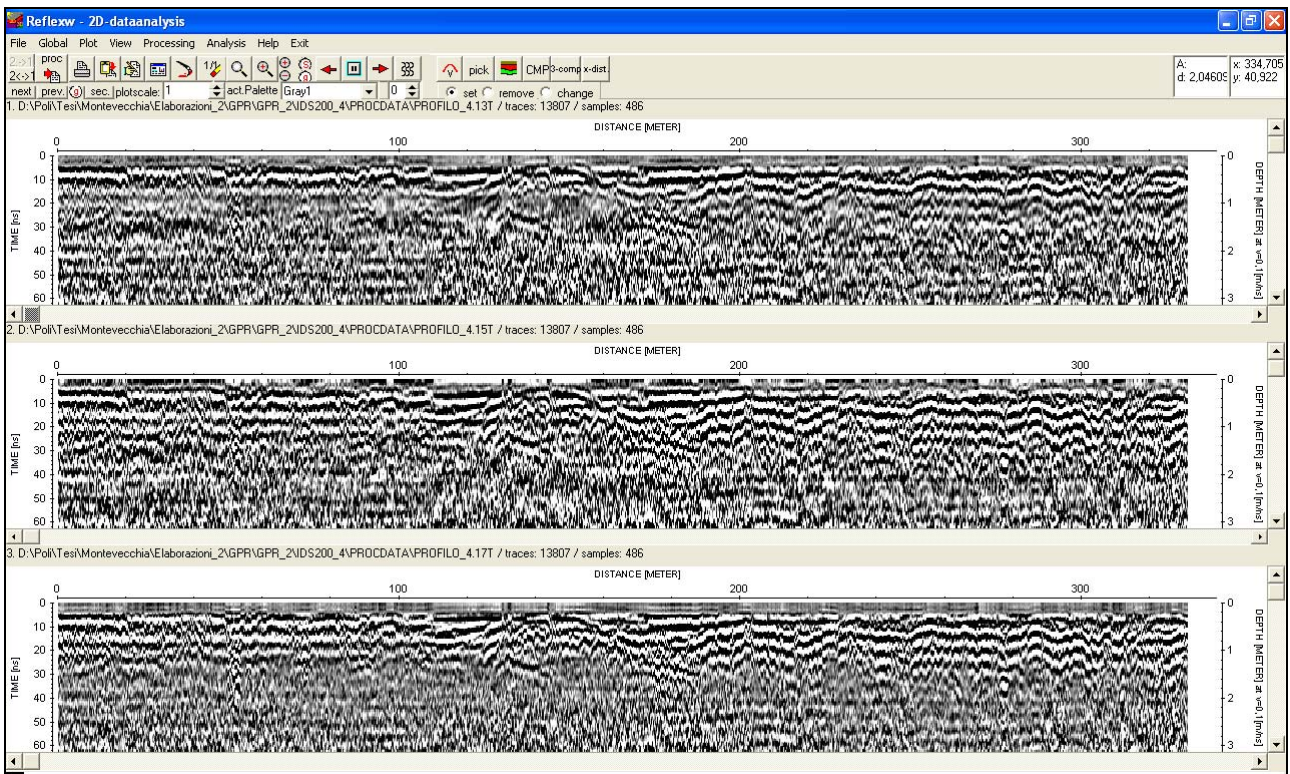


Figura 5.12 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo4 con antenna IDS200, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

Dai risultati si vede che l'antenna riesce ad investigare fino ad una profondità massima di 2 metri. Dalle immagini si vede fondamentalmente la presenza di uno strato di terreno parzialmente saturo pressoché parallelo col piano campagna.

### 5.3.2. MALA 100

Nella Tabella 5.8 sono riportate le operazioni eseguite sui 2 profili registrati con l'antenna MALA 100.

Elaborazione	Valore	Commenti
Lettura e osservazione dei dati	16 ns	Tempo di volo in aria
Calibrazione della scala dei tempi	- 16 ns	
Filtro passabanda	(15; 20) – (180;200)	
Applicazione del guadagno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AGC time window 30 ns</li> <li>• Energy decay</li> <li>• Gain function <math>a'= 2</math>; <math>b' = 1</math></li> </ul>	
Filtro passabanda	(15; 20) – (150;200)	
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo
Sottrazione del background		Lungo tutta la traccia
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo

*Tabella 5.8 Riassunto delle elaborazioni eseguite sui profili registrati con l'antenna MALA 100.*

I risultati sono riportati nelle figure sottostanti (da Figura 5.13 a Figura 5.19).

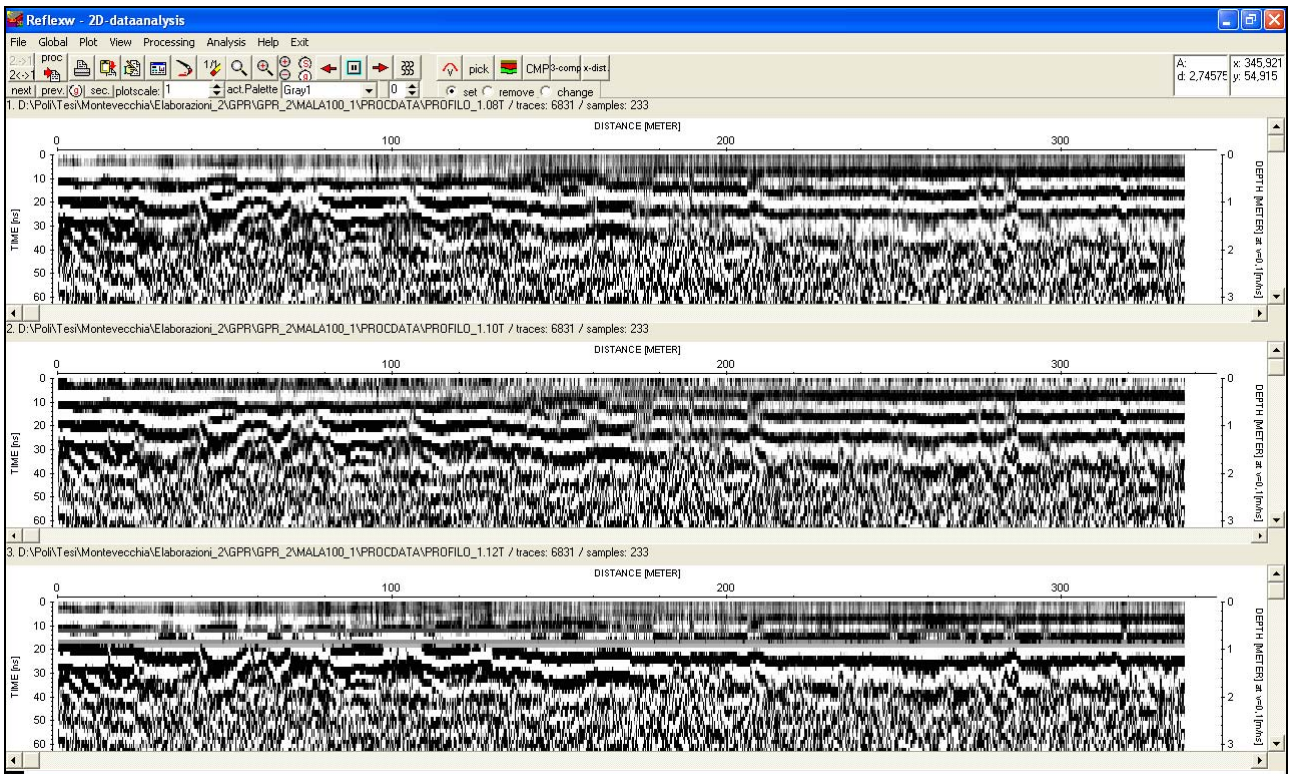


Figura 5.13 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo1 con antenna MALA100, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

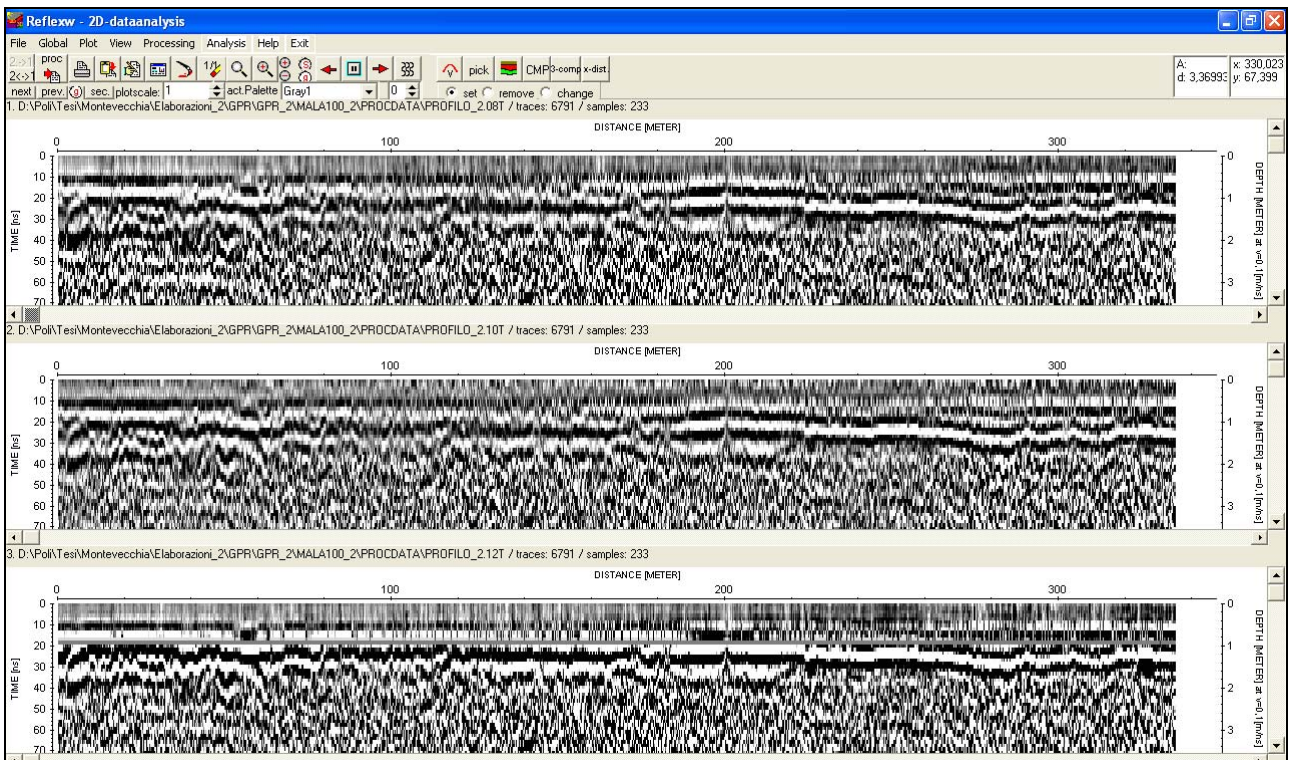


Figura 5.14 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo2 con antenna MALA100, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

Dalle figure sopra riportate si vede che l'antenna non riesce ad investigare profondità maggiori di 2 metri, nonostante abbia frequenza nominale di 100 MHz (massima profondità teorica 5 metri). Gli strati sembrano pressoché paralleli alla superficie.

### 5.3.3. MALA 50

Nella Tabella 5.9 sono riportate le operazioni eseguite sui 6 profili registrati con l'antenna MALA 50.

Elaborazione	Valore	Commenti
Lettura e osservazione dei dati	18 ns	Tempo di volo in aria
Calibrazione della scala dei tempi	- 18 ns	
Filtro passabanda	(10; 20) – (100;110)	
Applicazione del guadagno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AGC time window 30 ns</li> <li>• Energy decay</li> <li>• Gain function <math>a' = 1</math>; <math>b' = 0,5</math></li> </ul>	
Filtro passabanda	(10; 20) – (100;110)	
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo
Sottrazione del background		Lungo tutta la traccia
Analisi di velocità	0,8 – 1,0 m/ns	Terreno parzialmente saturo

*Tabella 5.9 Riassunto delle elaborazioni eseguite sui profili registrati con l'antenna MALA 50.*

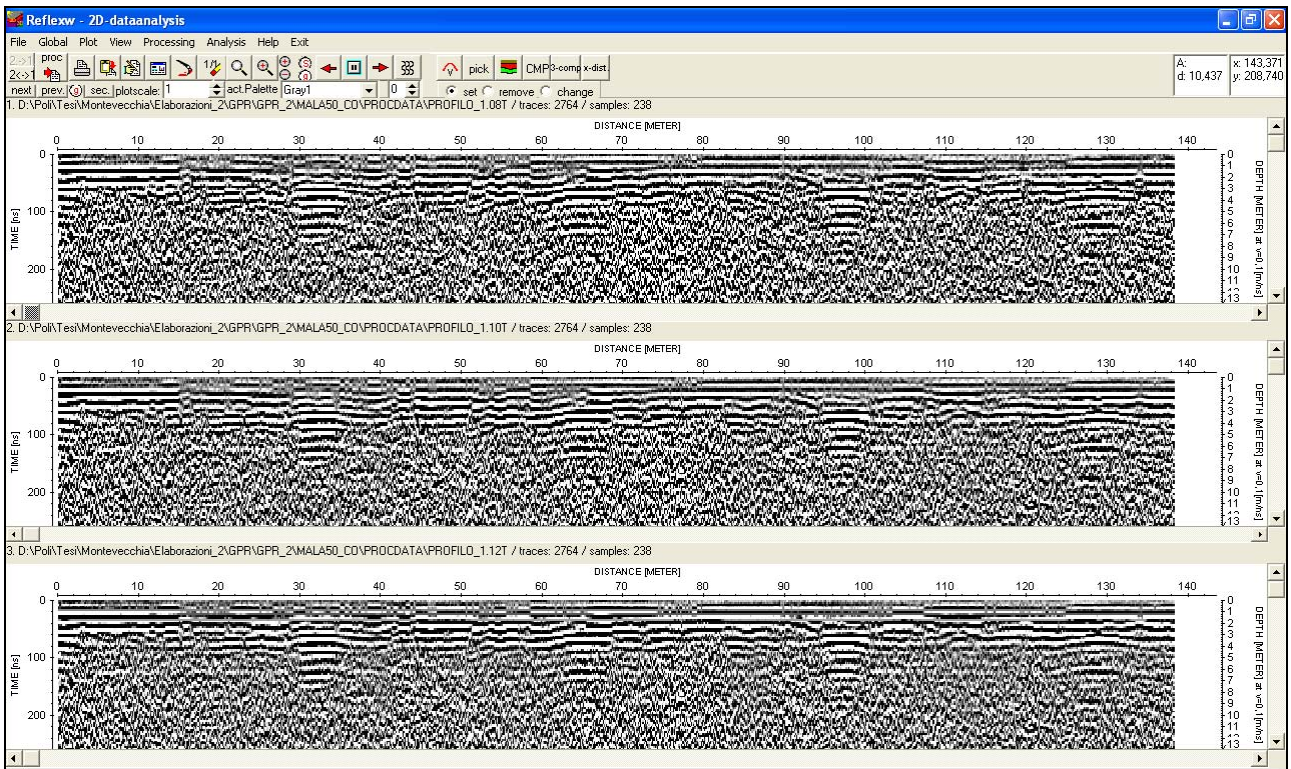


Figura 5.15 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo1 con antenna MALA50, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

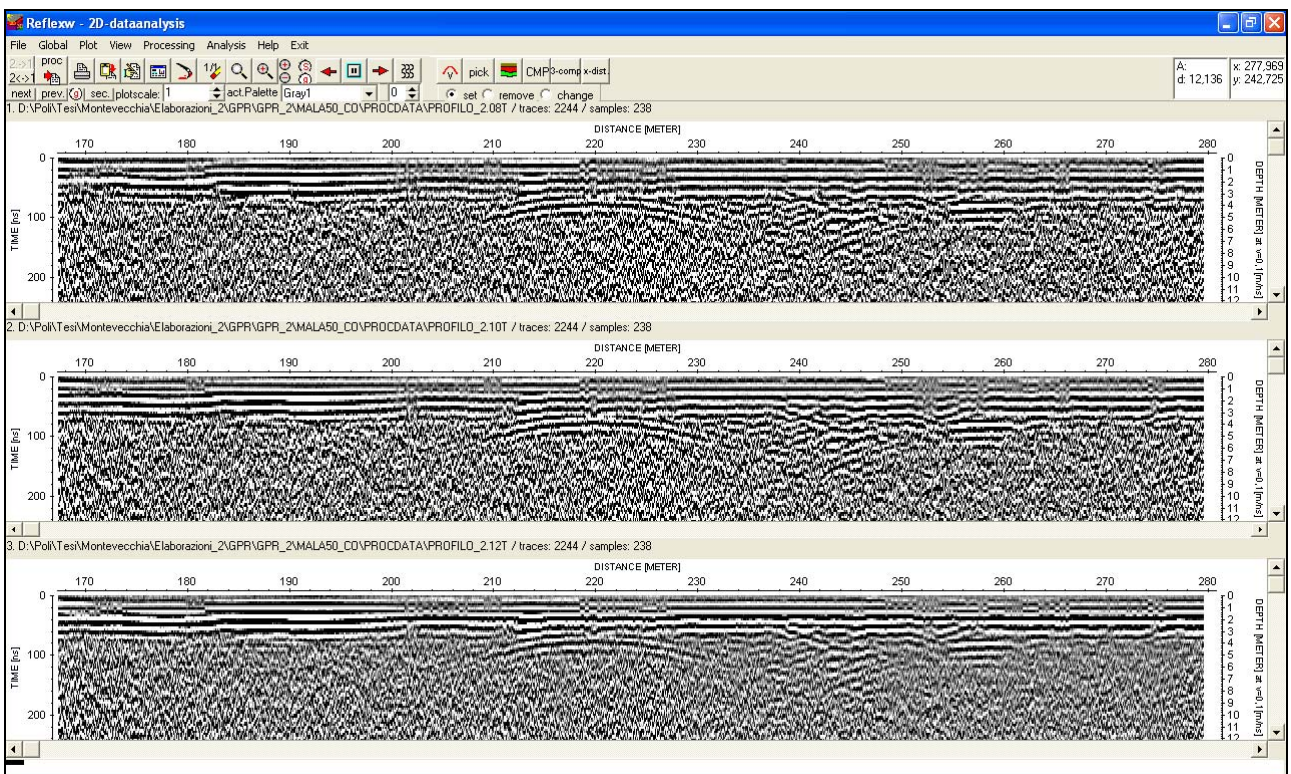


Figura 5.16 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo2 con antenna MALA50, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.



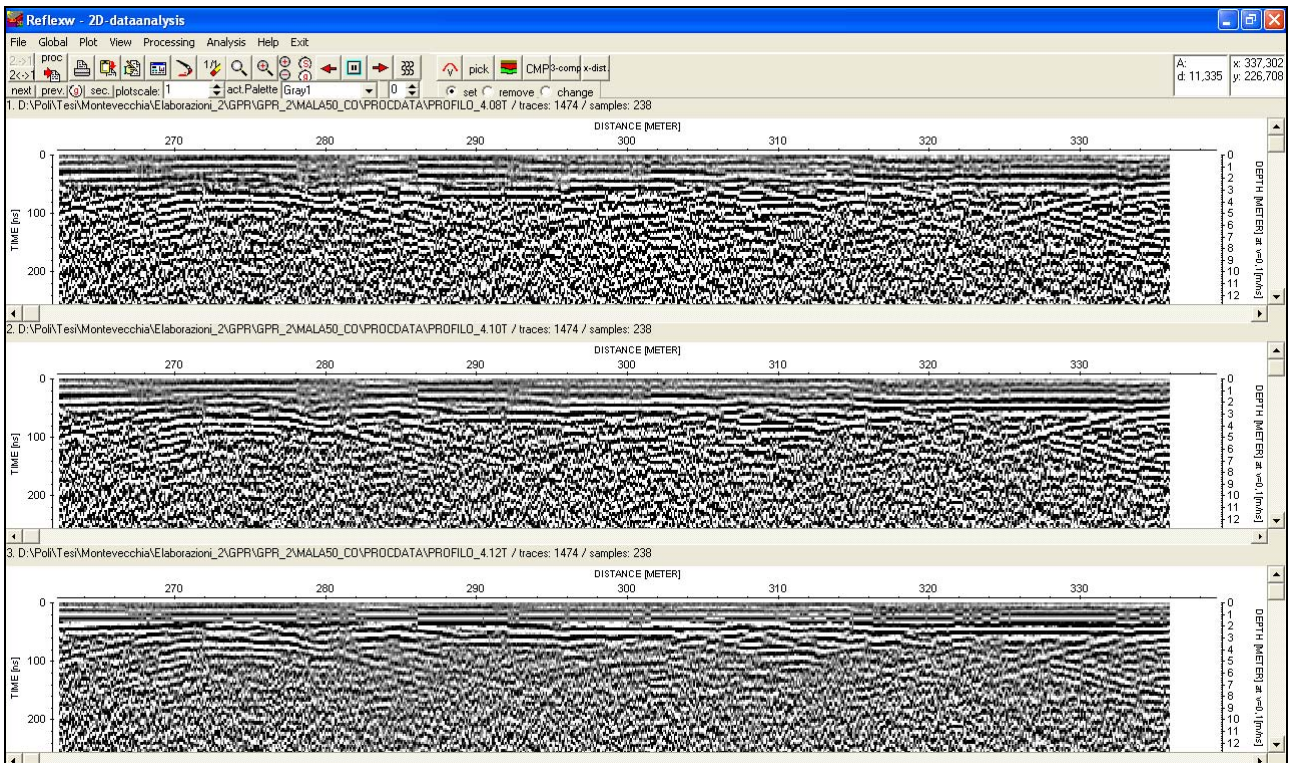


Figura 5.17 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo4 con antenna MALA50, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

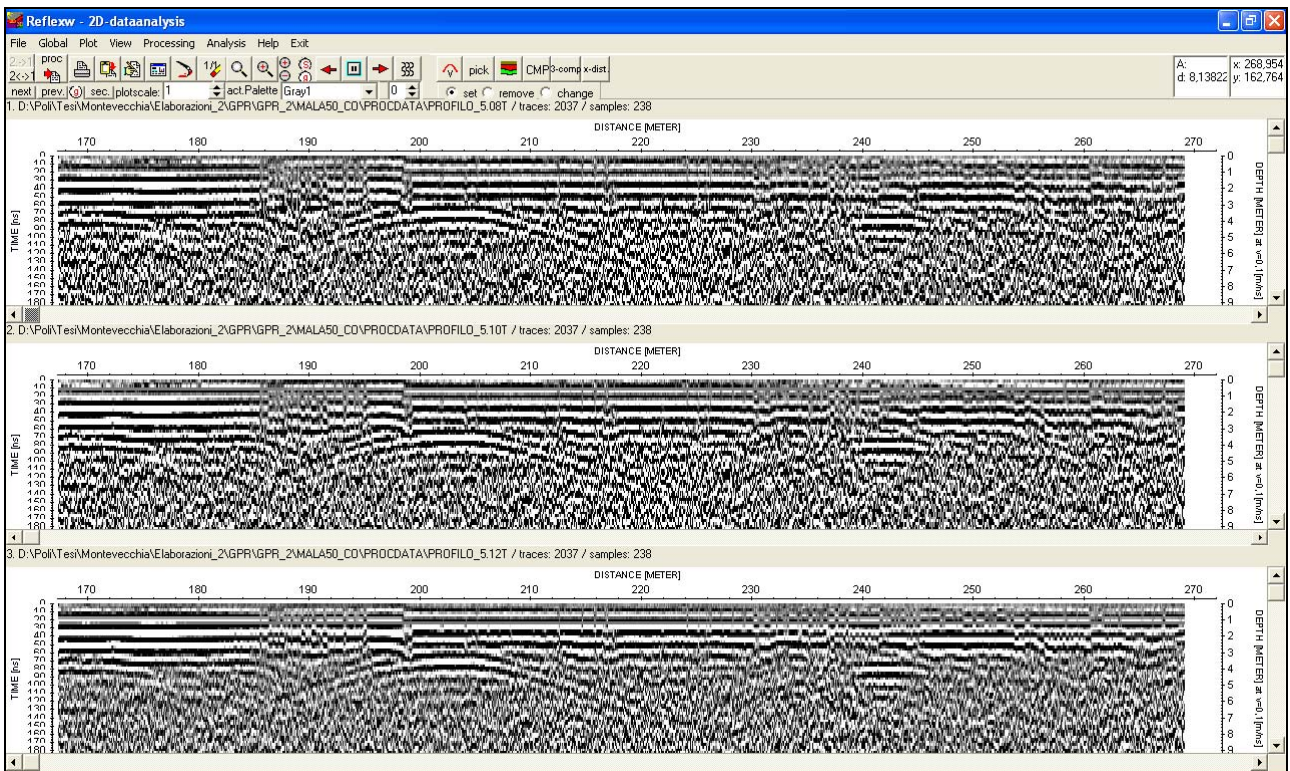


Figura 5.18 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo5 con antenna MALA50, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

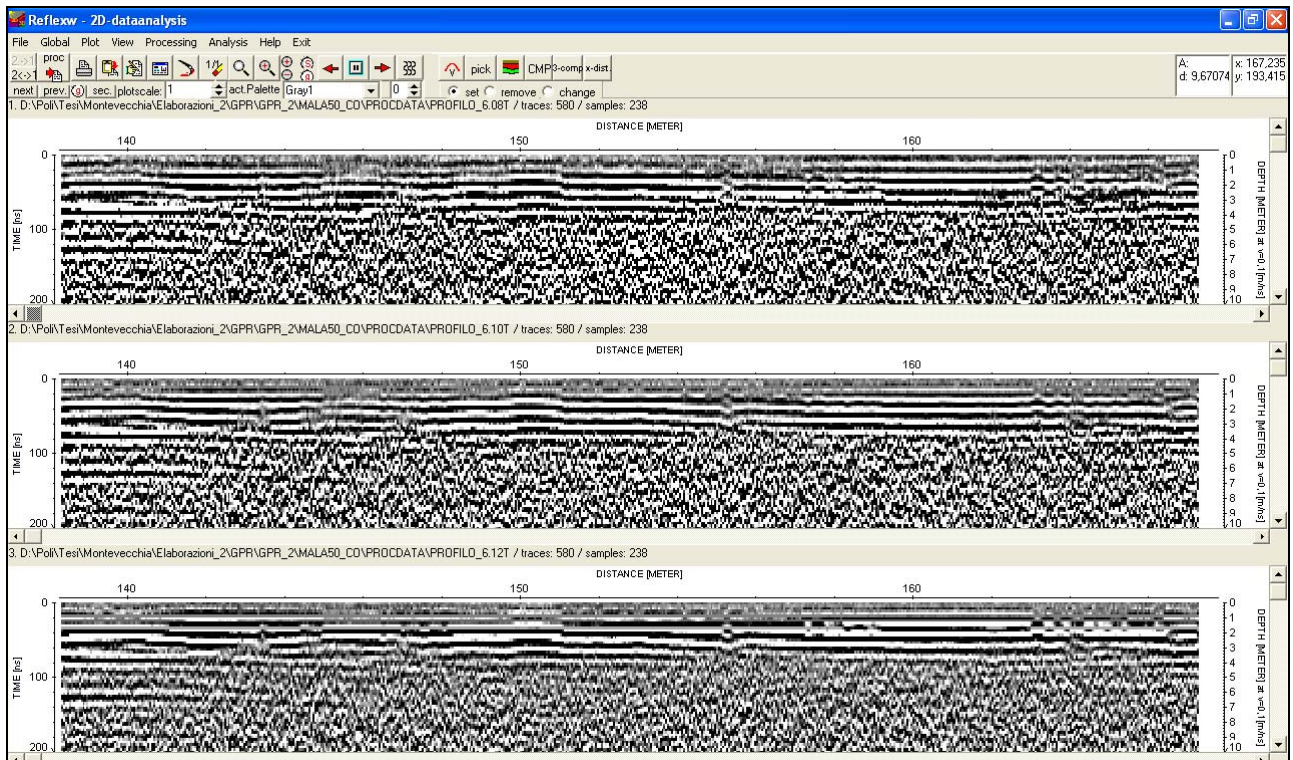


Figura 5.19 Risultato dell'elaborazione della registrazione del Profilo6 con antenna MALA50, utilizzando nell'ordine dall'alto al basso le funzioni di guadagno AGC, Energy decay e Gain Function.

La massima profondità investigata è 5 metri circa in questo caso. Ancora una volta si vedono strati pressoché paralleli alla superficie.

In Figura 5.20 si riportano i profili 2 e 5. L'iperbole di diffrazione che si vede ha una velocità pari a quella dell'aria (0,3 m/ns). Il motivo della loro presenza è il fatto che l'antenna MALA 50 non è schermata, e vede il segnale di ritorno riflesso dai lampioni a bordo strada.

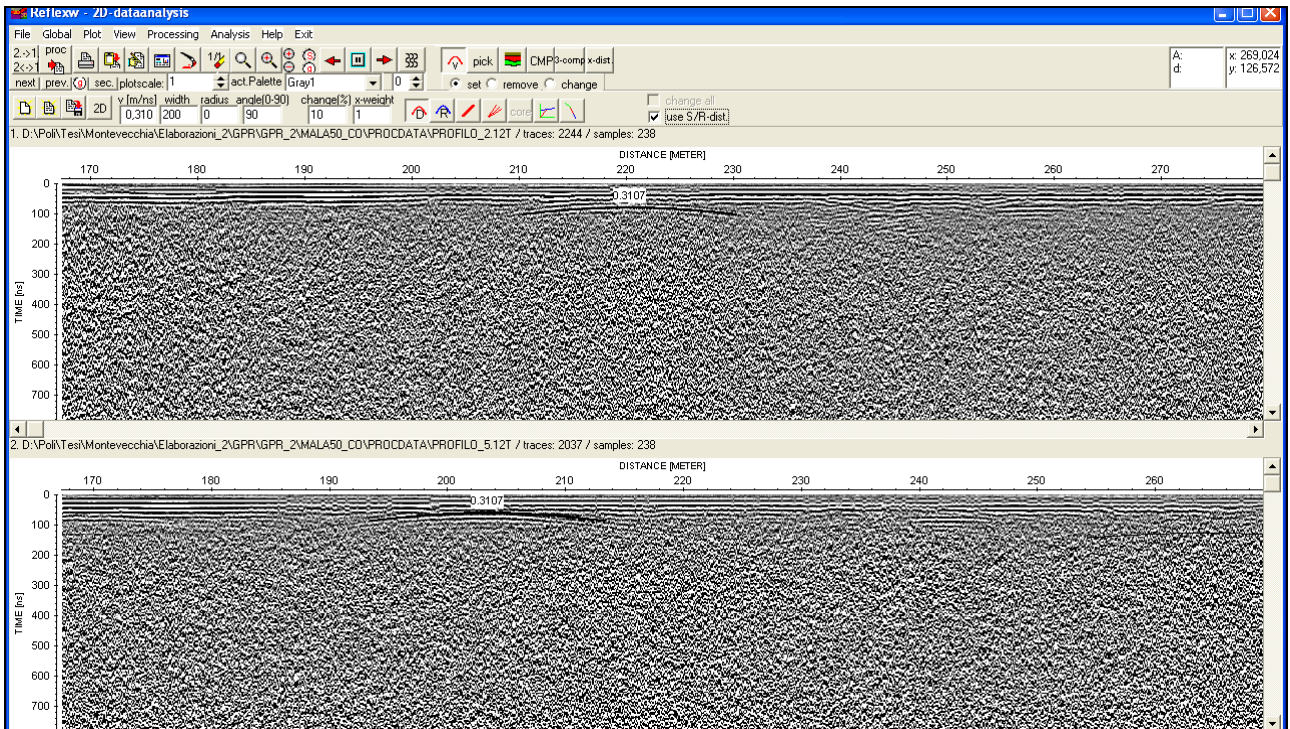


Figura 5.20 Iperboli di diffrazione dei profili 2 e 5, con velocità pari a 0,3 m/ns. Queste iperboli sono date dalla riflessione del segnale radar da parte dei lampioni a bordo strada.

# Capitolo 6. Analisi dei risultati

## 6.1. Analisi e confronto dei risultati ottenuti con i risultati precedenti

I risultati ottenuti col presente studio sono stati confrontati con quelli ottenuti dallo studio del 2009. I rilievi del 2009 avevano identificato 4 strati per una profondità totale di 40 metri. Con lo studio attuale si è andati ad investigare con maggior dettaglio la parte più superficiale del modello precedente, cioè solamente il primo strato.

Con le elaborazioni dei dati sismici si è ottenuto un modello a 3 strati, con profondità massima pari a circa 10 metri, con velocità inferiori alla velocità del secondo strato ricavato dallo studio precedente.

Con le elaborazioni radar si intendeva confermare i risultati ottenuti dalla sismica, ma non si è riusciti ad arrivare ad una profondità sufficiente per incontrare l'interfaccia più veloce.

Nella Figura 6.1e nella Tabella 6.1 si riporta il confronto tra le profondità ricavate con l'inversione sismica col metodo reciproco dello studio attuale con quelle dello studio del 2009. Come si vede la profondità dell'interfaccia secondo terzo strato del presente studio non è mai maggiore della profondità dell'interfaccia primo secondo strato dello studio del 2009.

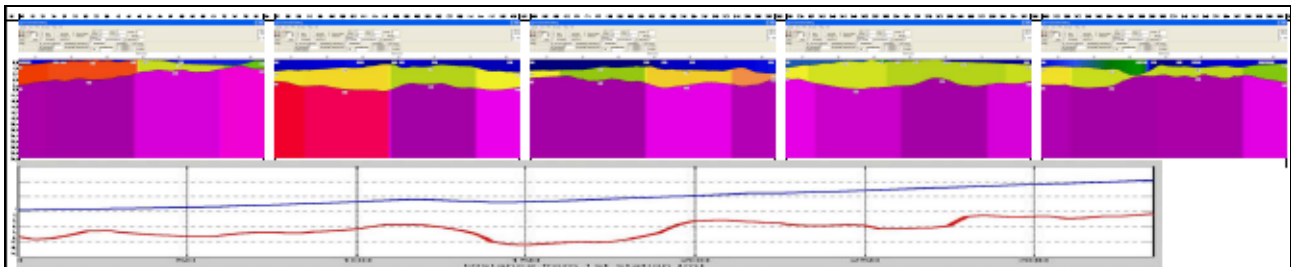


Figura 6.1 Confronto tra i dati ottenuti con il metodo sismico reciproco nel presente studio con quelli ottenuti nel 2009.

x	0	21	69	72	87	102	117	132	141	144	168	189	213	216	234	261	267	285	288	318
z1	2	0,5	0,5	4	3,5	1,5	2,5	3,5	3,5	3,5	2,5	3,5	4,5	2,5	0,5	0,3	0,5	1,5	2	3
z2	8	6	4,5	7,5	8,5	10	8	11	8,5	7,5	5,5	7	6,5	6,5	8	6	7,5	7	7	5
z 2009	8	6	9	9	9	9	9	11	13	13	15	8	10	10	12	13	10	10	10	10

Tabella 6.1 Confronto dei punti più profondi e meno profondi del modello attuale e con le quote del modello del 2009.

# Conclusioni

I rilievi hanno permesso di ricostruire l'andamento stratigrafico della parte più superficiale della copertura della miniera Cappona, integrando così i risultati precedenti che avevano invece identificato la stratigrafia più profonda.

In particolare si sono rilevate molto utili le indagini sismiche, in quanto hanno permesso di definire in modo abbastanza chiaro la presenza di livelli di piccolo spessore all'interno dello strato "lento" ricavato dagli studi precedenti: una strato aerato superficiale di spessore variabile tra pochi centimetri e 5 metri con velocità attorno ai 500 m/s, uno strato intermedio con profondità variabile tra 4 e 10 metri e velocità attorno a 1000 m/s, ed uno strato più profondo con velocità di circa 1700 m/s.

Poco significative sono state invece le indagini GPR, in quanto non hanno dato le risposte cercate, soprattutto le antenne a frequenza nominale (MALA 100 e MALA 50). L'unico risultato ricavabile è la presenza di una stratificazione pressoché parallela alla superficie nei primi 2-3 metri di profondità, con una velocità paragonabile a quella di un materiale detritico di copertura parzialmente saturo.

# Bibliografia

L. Zanzi, *Appunti di sismica di esplorazione e georadar*

L. Zanzi, *Trattamento dei segnali geofisici*

A.P. Annan, *Practical processing of GPR data*

A.C. Kack & M. Slaney, *Principles of computerized tomographic Imaging*

G.T. Herman, *Fundamentals of computerized tomography*

B. Casartelli & G. Colombo, *Indagini geofisiche per la verifica delle condizioni di stabilita' della miniera cappona* (Tesi – Relatore L. Zanzi)

S. Scagliotti, *Indagini sismiche eseguite presso la miniera dismessa di Montevicchia (LC)* (Tesi – Relatore L. Zanzi)

D. Arosio, L. Longoni, M. Papini e L. Zanzi, *Integration of seismic surveys to investigate an abandoned mine site*