

**Indagine Sismica a rifrazione a Fortezza in  
prossimità del sondaggio BH09/14**



**GG Service sas**

via Bellavista, 13/A  
38069 Torbole s/G (TN)  
P. Iva/C.F./Reg. TN: 01999920224  
tel/fax: 0464-664799/506041  
infoggservice@gmail.com

## 1. INTRODUZIONE

Nell'ambito delle indagini integrative per le quali si è motivato un sondaggio orizzontale nella zona dell'imbocco è stata eseguita anche una indagine sismica a rifrazione.

Essa è consistita in un array a 24 canali a spaziatura differenziata con i primi 12 canali distribuiti nella parte bassa pianeggiante con separazione di 2m e gli altri 12 (attraversamento strada sterrata, passaggio in prossimità del sondaggio e risalita sul versante roccioso) separati di 4m.

I geofoni utilizzati hanno una frequenza propria pari a 40Hz e per le energizzazioni è stata adottata una mazza da 8kg che rappresentava l'unica sorgente capace di essere trasportata ed utilizzata sulla parte alta del tracciato che si presenta ad acclività medioelevata.

L'acquisizione è avvenuta con strumento dotato di elevata dinamica (24bit – mod Daq link III della Seismic Source Co.) finestra temporale di 0.4sec e campionamento pari a 0.125ms.

In totale il profilo misura circa 70m di estensione.



Ubicazione linea sismica

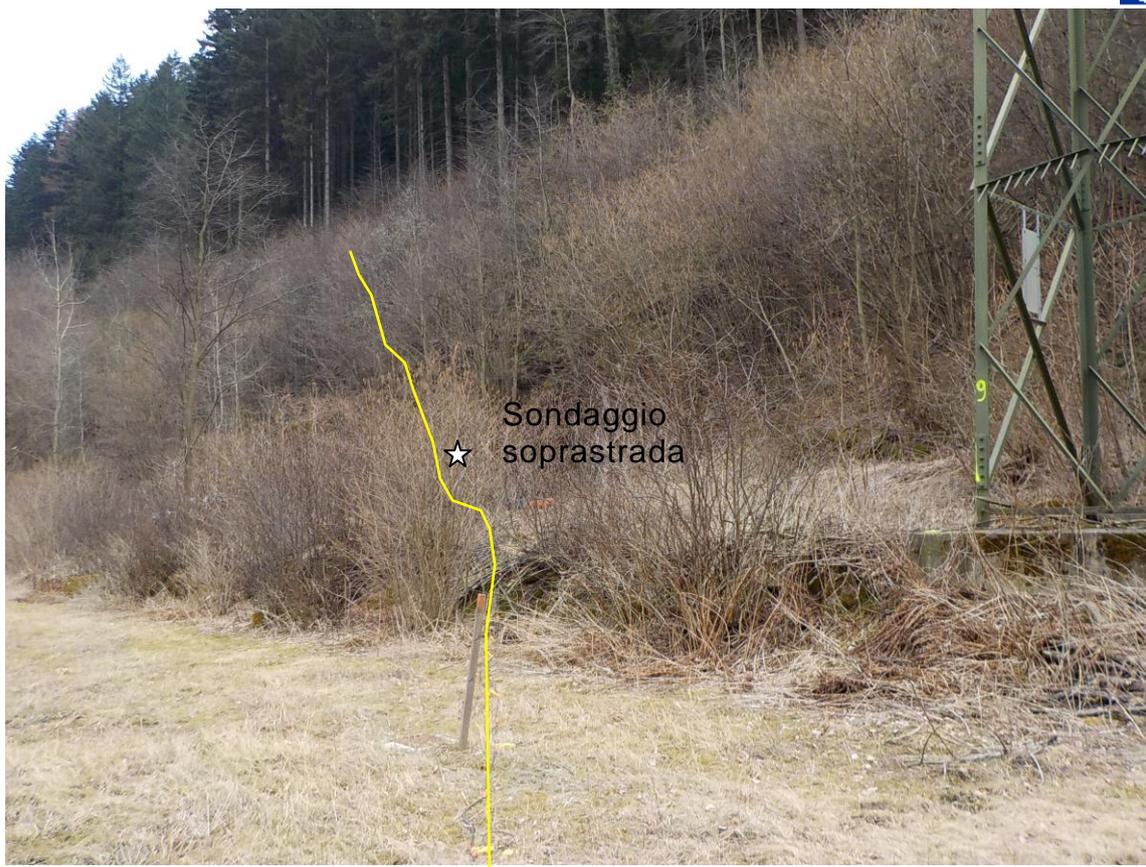


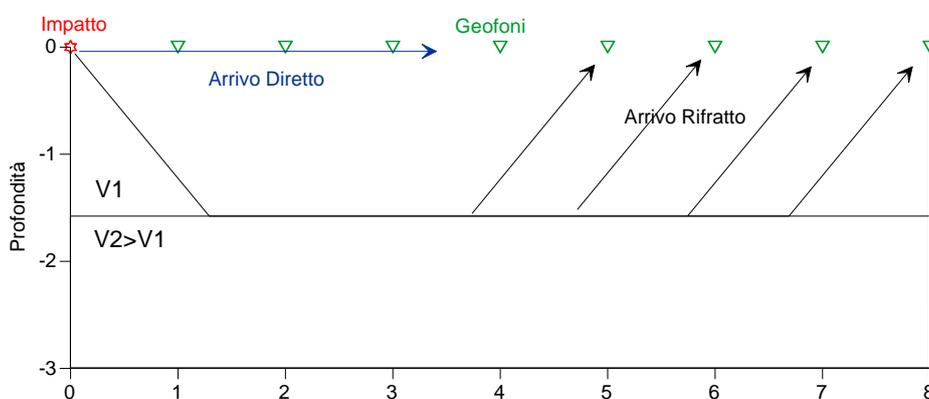
Immagine fotografica linea sismica

## 2. CENNI METODOLOGICI

### Sismica a rifrazione

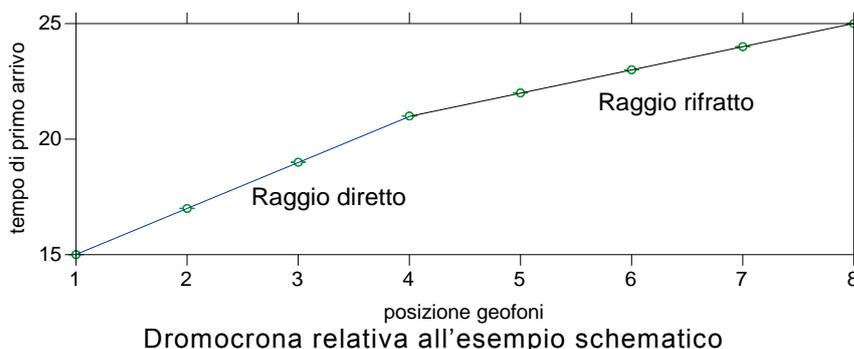
La tecnica di sismica a rifrazione si basa sul concetto che una sorgente meccanica eccita il sottosuolo inviando onde elastiche che si propagano in profondità e vengono parzialmente deviate (rifratte) lungo l'interfaccia che separa due mezzi a differente impedenza acustica ( $\rho \cdot V$ ) ed in parte proseguono verso il basso finché l'energia viene completamente assorbita dal mezzo in cui si propaga.

L'effetto di queste onde è la formazione di vibrazioni che vengono captate da sensori posti sulla superficie, generalmente elettromagnetici, in grado di trasformare la sollecitazione meccanica, che subisce la massa mobile del magnete, in un segnale elettrico che, debitamente amplificato, viene riprodotto su monitor e memorizzato su supporto informatico.



Esempio schematico (total-rifrazione) del percorso dei raggi sismici "tiro esterno" di un modello sismico a due strati

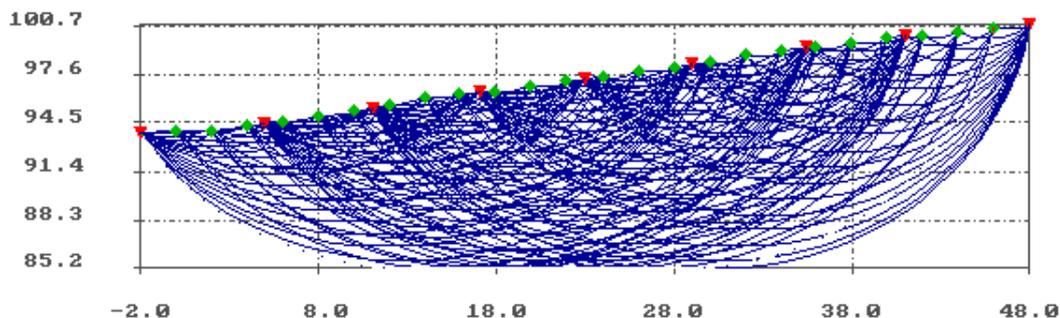
La lettura dei tempi di primo arrivo della vibrazione ai differenti sensori (geometricamente disposti in linea sul terreno secondo un profilo) è riferita all'istante zero, che è quello che corrisponde all'istante dell'energizzazione del terreno. Essa consente la loro ubicazione su un diagramma cartesiano ottenendo le dromocrone relative ad ogni punto di energizzazione. Il grafico che ne risulta è costituito da una serie di segmenti la cui inclinazione corrisponde alla velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo.



Dall'analisi delle dromocrone è possibile (e questo è il dato fondamentale dell'interpretazione) definire il numero dei sismostrati presenti nel sottosuolo (ovviamente per la finestra temporale adottata che è funzione della lunghezza dello stendimento e della quantità di energia utilizzata).

L'interpretazione per la risoluzione geometrica dei sismostrati (profondità e velocità) si avvale di diverse metodologie di calcolo dalle più semplici procedure dirette (Hagedoorn, 1959; Barry, 1967), seguendo le leggi generali dell'ottica, a quelle più complesse sia 1D che 2D che elaborano i dati mediante la tecnica del GRM (Palmer, 1980), del Ray-tracing o della tomografia (Hampson & Russell, 1984; Olsen, 1989).

La finalità della tomografia è la dettagliata esplorazione del modello di distribuzione della velocità in un mezzo. Essa si basa sui primi arrivi ottenuti per set plurimi di coppie sorgente-ricevitore: la sola limitazione è quella che i raggi sismici formino una rete completa e cioè, idealmente, ciascun punto del mezzo investigato dovrebbe essere attraversato dai raggi in tutte le direzioni.



Esempio applicativo di una fitta rete di raggi ideale per la tomografia (24 geofoni e 9 basi di energizzazione)

Il metodo tomografico si basa sul principio della rifrazione critica di raggi monocromatici che si retro-propagano in superficie e per la cui simulazione è richiesto un gradiente velocità positivo.

Pertanto l'applicabilità dell'analisi è limitata a variazioni laterali di velocità non elevate e per morfologie della superficie topografica e dei rifrattori non esasperate.

Oltre all'input fornito dai tempi di primo arrivo misurati ( $t_{obs}$ ), è sempre necessario introdurre un modello iniziale, che può essere scelto tra semispazio a velocità costante, mezzo stratificato a velocità crescente con gradiente fisso o con step di velocità o modello 2D strutturato in base al livello di conoscenza del sito indagato; la risoluzione del problema diretto avviene per semplice computazione geometrico-temporale tracciando i raggi che attraversano nel minor tempo disponibile le celle in cui è stato suddiviso il modello iniziale.

Il calcolo dei residuali rappresenta cella per cella l'input per la risoluzione del problema inverso che è di tipo linearizzato con la possibilità di scelta di diversi criteri di ricerca (back projection, damped least squares, max. smoothness e max. flatness constrain).

Abitualmente la prima soluzione dell'inversione viene utilizzata come input 2D per la successiva, ripetendo l'analisi in maniera

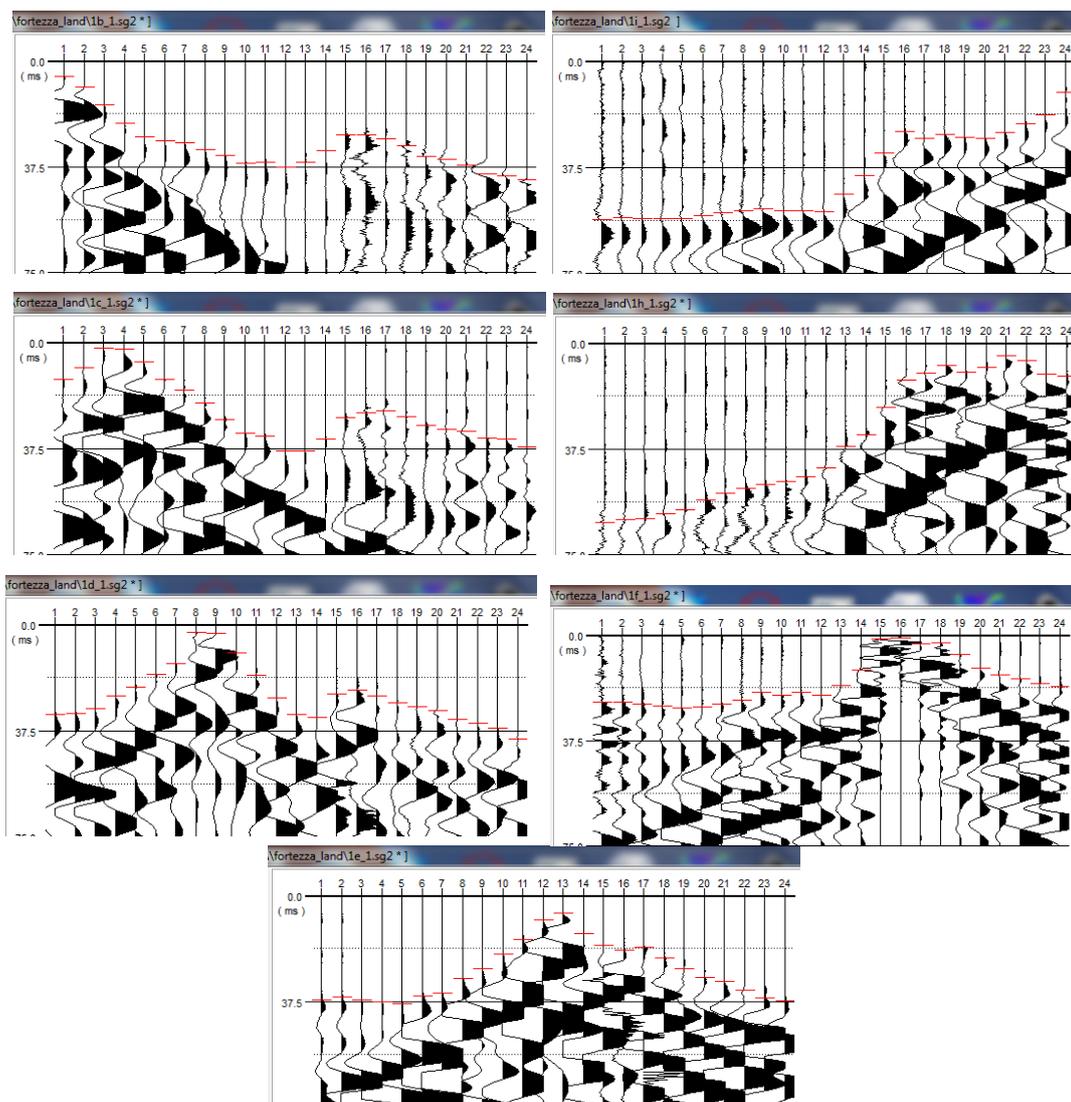
iterativa ed adottando l'ottimizzazione per smoothness o max. flatness constrain. In questo caso l'inversione è di tipo non lineare ed il risultato principale è l'estremizzazione del bending dei raggi.

Questo accorgimento permette di approdare a soluzioni più realistiche soprattutto nei casi in cui sono presenti impedenze acustiche elevate.

### 3. SINTESI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

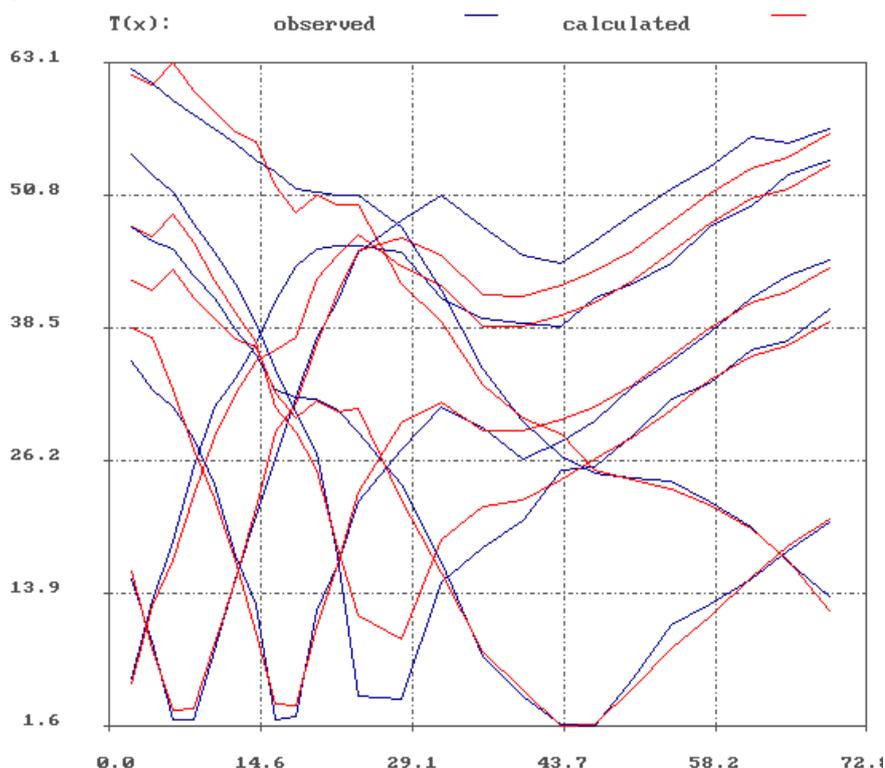
Le energizzazioni della linea sismica sono state eseguite con impatti di una mazza da 8Kg su una piastra metallica ed il rapporto segnale rumore si presenta sufficientemente elevato da garantire un campionamento dei primi arrivi di buona qualità.

In particolare si nota la grande differenza tra i primi arrivi che contraddistinguono la parte bassa del versante oltre la strada (arrivi più lenti e a bassa frequenza) geofoni 1-13 e la seconda che è distribuita lungo versante (arrivi più veloci e a elevata frequenza) e che nella prima parte mostra il substrato roccioso in affioramento.



Sismogrammi acquisiti lungo la linea sismica

Il modello di velocità ottenuto ha una buona accuratezza se si considera la difficoltà a ricostruire numericamente un elevato contrasto laterale quale è quello che separa la parte bassa del versante e della piana alluvionale da quella alta la cui prima parte è praticamente in roccia. Si noti a tal proposito l'articolazione delle dromocrone con rami a bassa velocità per i sensori distribuiti sulla piana alluvionale e rami a più elevata velocità per quelli distribuiti lungo il versante,



Ottimizzazione delle dromocrone campionate e calcolate a partire dal modello ottimizzato presentato di seguito

La modellazione sismica consente di individuare una situazione in cui dall'affioramento monte strada verso nordovest si identifica una copertura sciolta con probabili blocchi ( $V_p=600\text{m/s}$ ). Il suo spessore cresce verso nordovest e più in profondità oltre 5-7m le  $V_p$  aumentano testimoniano un aumento di addensamento o magari la presenza di una falda a pelo libero.

La porzione di roccia subaffiorante in cui è stato anche iniziato il sondaggio meccanico orizzontale mostra valori di velocità che a livello corticale varia da  $1000\text{m/s} < V_p < 2000\text{m/s}$ . Questa taratura oggettiva aiuta a ricostruire la superficie che separa copertura da substrato roccioso e che è stata indicata da un tratteggio rosso scuro.

Nella porzione sommitale (geofoni 21-24) si nota un ispessimento della copertura mentre tra i geofoni 1-14 si segue bene l'immersione a relativamente debole pendenza del substrato roccioso: essa mostrerebbe una sorta di risalita intorno ai geofoni 2-4. Non è escluso comunque che tale risalita sia in realtà associabile alla presenza di grandi masse litoidi non radicate capaci comunque di sostenere il segnale sismico.

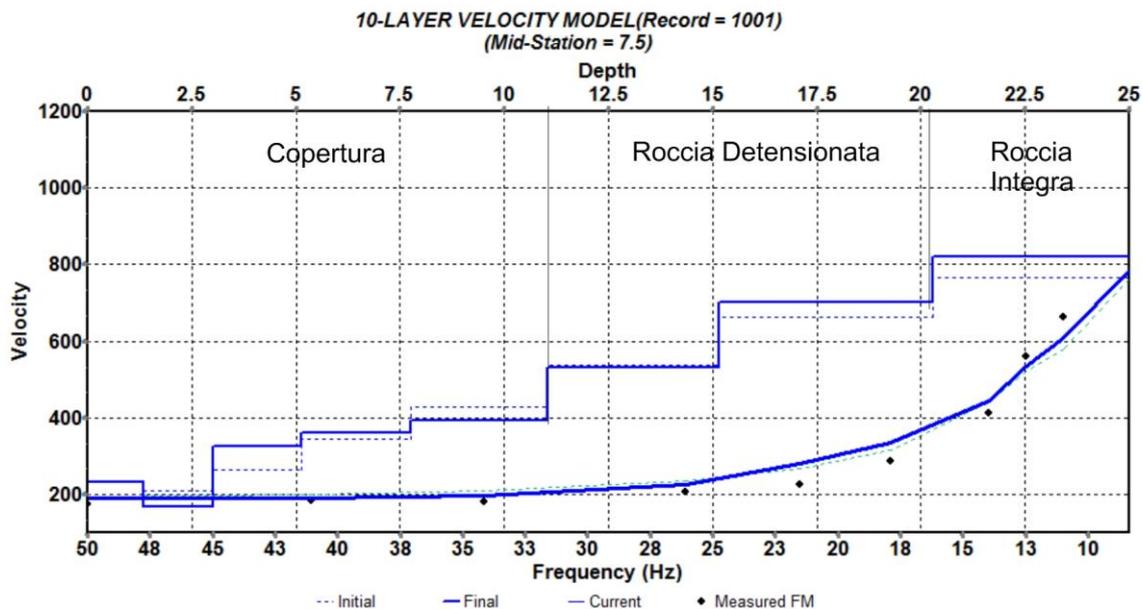
La roccia integra ( $V_p \gg 2200\text{m/s}$ ) ha un comportamento molto più omogeneo (linea tratteggiata azzurro ghiaccio) e tende a risalire addentrandosi verso il versante.

Appare molto interessante osservare come il detensionamento del versante sia condizionato non solo dalle strutture subverticali parallele al versante e che condizionano la morfologia dei luoghi (a monte della linea entro il bosco si notano numerose balze rocciose) ma anche da piani di discontinuità che le collegano e che appaiono in contropendenza, almeno per come la sezione taglia queste strutture.

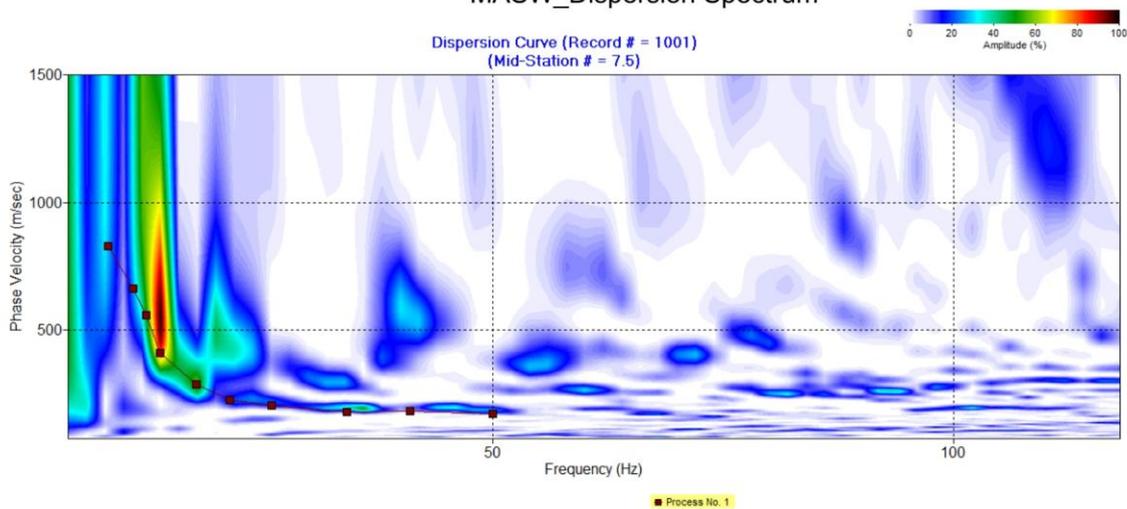
La destrutturazione del materiale lapideo, oltre che essere visibile in affioramento quando si sale lungo versante, interesserebbe quindi i primi 15m determinando un abbassamento delle caratteristiche meccaniche globali dell'Ammasso roccioso per i primi 30-40m di inizio cunicolo.

Avendo a disposizione una dozzina di sensori in un tratto abbastanza pianeggiante ed avendo acquisito con una finestra temporale sufficientemente elevata si è potuto analizzare anche il treno d'onda di superficie per la prima energizzazione esterna (2m oltre gh1) e ricavare la verticale del profilo di velocità delle onde di taglio. Analogamente a quanto anticipato dalla sismica a rifrazione si notano una decina di m di suoli di copertura non lapidei  $200 < V_s < 450\text{m/s}$  appoggiati sopra a materiali più rigidi (roccia fratturata?  $550 < V_s < 750\text{m/s}$ ). Oltre 20m si raggiungono velocità tipiche di un bedrock sano  $V_s > 800\text{m/s}$ .

Vs\_profile\_MASW



MASW\_Dispersion Spectrum



Modello di velocità Vs a partire dalla analisi dei soli primi 12 geofoni spazati di 2m

GG Service s.a.s.  
di  
Garbari Tomas &C.



# Modello Velocità Vp

