



# OGS

Istituto Nazionale  
di Oceanografia  
e di Geofisica  
Sperimentale



*Progetto*

**Indagine geofisica con metodologia GPR (Ground Penetrating Radar) ad alta risoluzione per la caratterizzazione della copertura rocciosa del ricovero austro-ungarico ubicato alle pendici del Monte Scorluzzo – Passo dello Stelvio (SO)**

*Titolo*

**RAPPORTO FINALE**

*Committente*

**SAP Società Archeologica srl**  
Strada Fienili 39/a  
Quingentole (MN)

*CIG:*

*CUP:*

*Rev*  
n. 01

*Data*  
Ottobre 2022

**Autori: M. GIORGI, S. PICOTTI e F. PETTENATI**

**Relazione: 2022/199 Sezione di Ricerca GEO 15**

Sommario

1	Introduzione.....	3
2	Inquadramento geografico .....	4
3	Rilievo geofisico: strumentazione e metodo .....	5
3.1	<i>Metodologia georadar</i> .....	5
3.2	<i>Georeferenziazione delle misure</i> .....	7
4	Acquisizione ed Elaborazione del dato .....	8
5	Analisi dei dati e Conclusioni .....	10
5.1	<i>Analisi dei dati</i> .....	10
5.2	<i>Conclusioni</i> .....	11

## 1 Introduzione

---

Su incarico della SAP Società Archeologica srl, l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) di Trieste ha eseguito un'indagine geofisica con metodologia GPR ad alta risoluzione per la caratterizzazione della copertura (volta) rocciosa del ricovero austro-ungarico ubicato alle pendici del Monte Scorluzzo – Passo dello Stelvio (BS).

Le attività di rilevamento si sono svolte nel mese di settembre 2022.

Il presente rapporto descrive le attività condotte durante l'acquisizione dei dati di campo, i processi di elaborazione dei dati ed i risultati della caratterizzazione geofisica del rilevato.

Le misure sono state effettuate con una consolle radar di nuova generazione GSSI SIR SYSTEM 4000 equipaggiata con antenna a frequenza centrale di 500 MHz. Le scansioni radar sono state georeferenziate con sistema GPS differenziale LEICA GS14.

I risultati e le interpretazioni delle indagini esposte nel presente rapporto tecnico si fondano sull'applicazione di norme, tecniche e conoscenze scientifiche allo stato dell'arte, e includono calcoli, pareri e valutazioni professionali inerenti i fenomeni e i processi analizzati.

È importante ricordare che le procedure di misura impiegate per l'indagine geofisica si basano su tecniche di esplorazione indiretta che, nonostante includano i più recenti progressi sia nelle conoscenze scientifiche che negli avanzamenti tecnologici, hanno una serie di intrinseche limitazioni. L'indagine geofisica non può, infatti, sostituire integralmente l'esplorazione diretta anche se ne rappresenta un indispensabile complemento per colmare le lacune informative e per garantire un'univoca correlazione dei principali elementi strutturali presenti nel sottosuolo.

## 2 Inquadramento geografico

L'area dove si trova l'apertura del ricovero austro-ungarico oggetto dello studio geofisico si trova alle pendici meridionali del Monte Scorluzzino in una zona ad oriente del più elevato Monte Scorluzzo. In Figura 1 è riportata su ortofoto Google Earth l'ubicazione dell'area dell'indagine dove è posizionata l'entrata del ricovero.

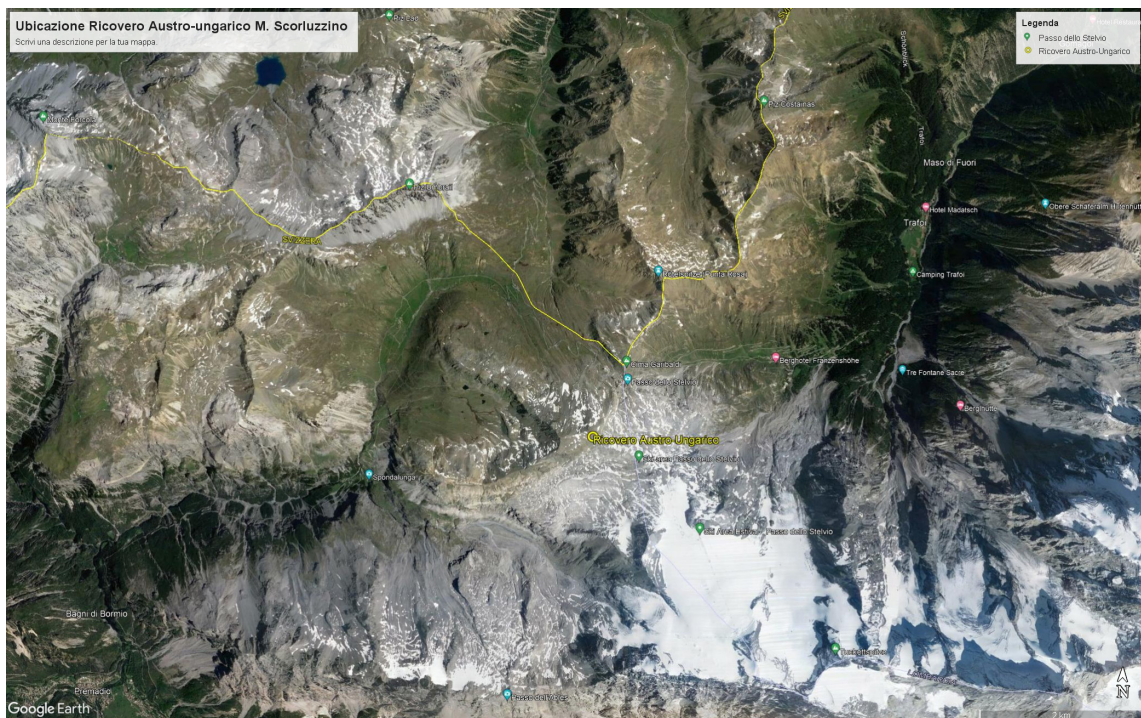


Figura 1: Ubicazione su ortofoto G.E. del ricovero austro-ungarico

### 3 Rilievo geofisico: strumentazione e metodo

#### 3.1 Metodologia georadar

Il rilievo *radar* (*GPR – Ground Probing Radar*) è una tecnica detta a numero d’onda e si basa sulla propagazione delle onde elettromagnetiche (EM) in profondità e sulla misura del segnale riflesso in corrispondenza di variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche dei terreni e dei corpi presenti nel sottosuolo. Il sistema radar, dopo l’invio dell’impulso EM, misura una serie temporale di risposta rilevando più bersagli posti in verticale uno sopra l’altro. In analogia con il metodo sismico, attraverso una procedura di elaborazione del dato registrato in superficie, l’obiettivo è quello di creare una vera e propria immagine in sezione del sottosuolo.

Il principio di funzionamento dello strumento (Figura 1), legato alla propagazione di un’onda EM nel sottosuolo, si basa sul fenomeno fisico di partizione dell’energia a un’interfaccia tra due mezzi con diverse proprietà dielettriche. In particolare, in corrispondenza di un’interfaccia fisica, l’onda EM generata in superficie e immessa nel sottosuolo per mezzo dell’antenna, subisce un fenomeno di riflessione e parte dell’energia (in funzione del contrasto di impedenza elettrica dei mezzi affacciati e dell’angolo di incidenza del segnale trasmesso) ritorna verso la superficie.

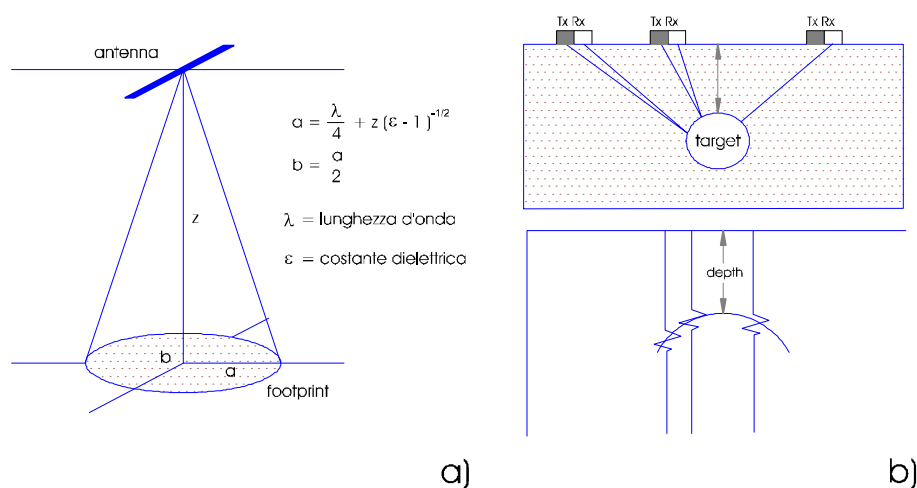


Figura 1 - Propagazione di un’onda EM nel sottosuolo. a) angolo solido di emissione dell’onda e footprint (impronta) dell’antenna sul riflettore; b) risposta di un riflettore con antenna in configurazione monostatica;

La configurazione monostatica (Figura 1b) prevede l’utilizzo di due antenne (tx+rx) molto ravvicinate per la trasmissione e la ricezione del segnale, mentre la configurazione bistatica prevede l’utilizzo di due antenne (tx+rx) a distanza (offset) variabile. La selezione della distanza permette, in prima approssimazione, la stima della velocità di propagazione dell’onda EM e quindi la trasposizione dalla scala “tempo” a quella “profondità”. A tal fine, esiste anche una seconda tecnica in configurazione monostatica, chiamata *migrazione nel dominio del tempo*. Tale tecnica di elaborazione consiste nel far collapsare le iperboli di diffrazione presenti nel dato, utilizzando

diverse velocità dell'onda. La velocità corretta sarà quella che consente di far collapsare le iperboli in un punto (vertice dell'iperbole).

La velocità di propagazione  $V_m$  di un'onda EM in un mezzo è data dalla relazione

$$V_m = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

dove  $C=30 \text{ cm/ns}$  è la velocità della luce ed  $\epsilon_r$  è la costante (permittività) dielettrica relativa del mezzo attraversato, normalizzata rispetto a quella dell'aria. In Tabella 1 sono elencate tipiche permittività relative dei materiali (e minerali) presenti nel sito di indagine, caratterizzato da abbondante presenza di Gneiss.

Materiale	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )
Quarzo	3.8 - 5
Feldspati (Graniti)	5-6
Argille	2-6
Aria	1
Ghiaccio	3-4

Tabella 1 – Tipiche permittività relative dei materiali (e minerali) presenti nel sito di indagine. Aria, ghiaccio e argilla sono presenti negli interstizi e fessure della volta rocciosa.

L'antenna impiegata per l'indagine, la cui frequenza dominante è  $f_0=500 \text{ MHz}$ , garantisce un'elevata risoluzione verticale e laterale (che verrà calcolata più avanti).

Il grado di direzionalità dell'onda EM generata dall'antenna, com'è noto, determina l'ampiezza dell'angolo solido in fase di energizzazione, governando quindi l'area di effettiva riflessione sulla superficie del bersaglio.

Una delle unità di misura utilizzabili per la caratterizzazione del sottosuolo, e quindi degli orizzonti riflettenti, è il grado di riflettività ( $R$ ), dato da

$$R = \frac{E_i}{E_r}, \quad (2)$$

e cioè il rapporto tra energia incidente ( $E_i$ ) ed energia riflessa ( $E_r$ ) per ogni singolo riflettore.

### 3.2 Georeferenziazione delle misure

Per la geometrizzazione del rilievo è stato utilizzato un sistema GPS LEICA VIVA GS 14 GNSS differenziale costituito da due antenne-ricevitore geodetiche GS14 e dal controller CS20. Le misure sono state effettuate in modalità differenziale con utilizzo di una stazione Master e una Rover.

Il sistema LEICA VIVA GS14 GNSS costituisce un'unità che combina un ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System) multicanale e multifrequenza e una radio UHF. Il sistema è dotato della tecnologia GNSS brevettata SmartTrack in grado di supportare non solo i segnali L1, L2 e L2C di evoluzione della tecnologia GPS, ma anche L1 e L2 di GLONASS e di Galileo. Altre specifiche di questa tecnologia sono la presenza di un motore di calcolo avanzato, una ricezione protetta da interferenze, un controllo multipath di alta precisione un tracciamento eccellente a basse elevazioni e misure GNSS di fase a basso disturbo (precisione <0.5 mm). Le antenne comunicano attraverso tecnologia Bluetooth con il controller Leica CS20.

I segnali satellitari tracciati simultaneamente sono:

**GPS:** L1 Fase portante, codice C/A - L2 Fase portante, codice C (L2C) e P2

**GLONASS:** L1 Fase portante, codice C/A - Fase portante, codice P2

**GALILEO:** E1 Fase portante, codice

Il sistema GNSS garantisce le seguenti prestazioni e precisione della misura:

Rilevamento GPS RTK Singola base	Rilevamento cinematico RTK di rete
Orizzontale 8 mm + 1 ppm rms	Orizzontale 8 mm + 0.5 ppm rms
Verticale 15 mm + 1 ppm rms	Verticale 15 mm + 0.5 ppm rms

Tabella 1 – Prestazioni del GPS LEICA Viva GS14



## 4 Acquisizione ed Elaborazione del dato

---

Il dato radar è stato acquisito su una superficie quadrata di lato 20 m situata sopra la volta della caverna (quadrato blu in Figura 3). Sono state acquisite 11 linee in direzione N-S e 7 linee in direzione E-W. Le linee N-S sono equispaziate di 2m e coprono tutta l'area, mentre le linee E-W sono equispaziate di 1m e coprono il rettangolo formato dai punti 5-6-7-8 (Figura 3). In Figura 3 sono rappresentate le linee più significative in termini di qualità del dato.

L'elaborazione del dato è stata fatta interamente in ambiente open source con il pacchetto CWP Seismic Unix (Stockwell, 1999). Il flusso di lavoro, volto principalmente ad aumentare il rapporto segnale/rumore, consiste nella seguente sequenza:

- Conversione del formato originale per poter operare in ambiente Seismic Unix.
- Filtraggio passa banda tra  $f_0/4$  e  $2f_0$ , dove  $f_0$  è la frequenza dominante dell'antenna. Questo consente di eliminare l'effetto dominante di inviluppo dovuto al segnale portante dell'antenna (chiamato WOW), caratterizzato da una frequenza di pochi MHz. Questo segnale costituisce a tutti gli effetti un rumore di fondo a bassissima frequenza.
- Allineamento degli eventi della prima riflessione, relativi all'interfaccia aria/suolo, che costituisce il nostro "tempo zero". Questo va fatto per tutte le tracce.
- Filtro mediano per eliminare il fenomeno del banding, dovuto al fatto che l'antenna utilizzata è schermata, per evitare riflessioni laterali (e.g., Francese et al., 2004). In molti casi il banding delle linee di scansione GPR mascherano il segnale riflesso, ed è tipicamente dipendente dall'accoppiamento dell'antenna col terreno (Carturan et al., 2013; Seppi et al., 2015). Questo implica che segmenti diversi dello stesso profilo possono mostrare un diverso carattere di banding. A volte quindi conviene suddividere le scansioni in sottoscansioni con banding omogeneo, filtrare ogni sottoscansione separatamente, ed infine riunire i vari segmenti. Con questa procedura il rapporto segnale/rumore viene decisamente migliorato (Francese et al., 2015).
- Recupero d'ampiezza.
- Migrazione in tempi, per far collassare le iperboli di diffrazione eventualmente presenti nel dato e avere così una stima della velocità media dell'onda elettromagnetica nel mezzo attraversato.
- Conversione delle linee GPR dal dominio dei tempi a profondità.

Nello step finale viene creata una vera e propria immagine in sezione del sottosuolo.

In Figura 2 sono rappresentati i risultati della migrazione in tempi di una porzione della Linea 16, in cui sono evidenti delle diffrazioni all'interno della copertura rocciosa del ricovero. L'applicazione della migrazione con diverse velocità mostra che tutte le diffrazioni vengono collassate usando  $V_m=15$  cm/ns.



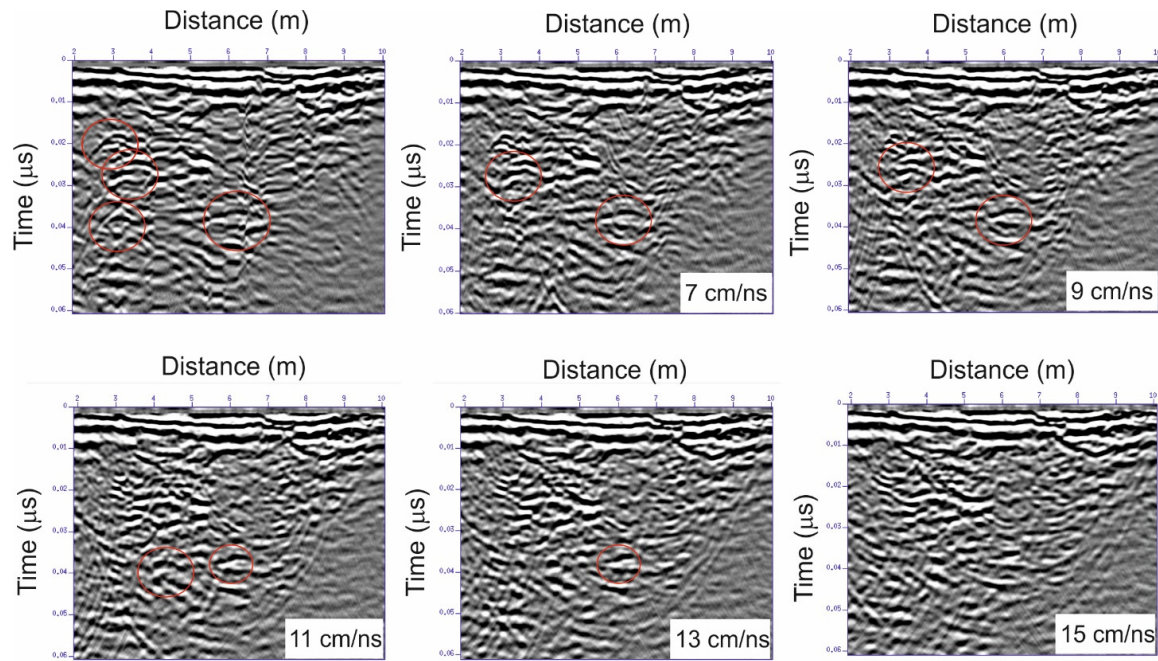


Figura 2 – Migrazione in tempi di una porzione della Linea 16 (pannello in alto a sinistra), in cui sono evidenti delle diffrazioni all'interno della copertura rocciosa del ricovero (cerchiate in rosso). Le diffrazioni vengono completamente collassate usando la velocità  $V_m=15$  cm/ns.

## 5 Analisi dei dati e Conclusioni

### 5.1 Analisi dei dati

Dall'analisi dei risultati della migrazione in tempi e dall'equazione (1) si può affermare che la permittività media dei mezzi materiali indagati è  $\epsilon_r \approx 4$ . Questo valore rappresenta una stima della costante dielettrica, ed è in accordo con le tipiche permittività (relative) dei materiali (e minerali) presenti nel sito di indagine, elencate in Tabella 1. Da questo valore è anche possibile avere un'idea della risoluzione del metodo GPR, pari a circa  $1/4$  della lunghezza d'onda. Essendo  $\lambda = v_m/f_0 \approx 30$  cm, ne segue che la risoluzione:  $\lambda/4 \approx 7.5$  cm.

Utilizzando questo valore di permittività media relativa, è stato possibile convertire le sezioni radar dal dominio dei tempi a profondità. Figure 4 e 5 rappresentano le sezioni più significative, in termini di rapporto segnale/rumore, in direzione N-S (Figura 4) e in direzione E-W (Figura 5). Le sezioni sono riferite alla superficie.

Il soffitto del ricovero è chiaramente visibile lungo le Linee 2 e 4 in direzione N-S, e lungo le Linee 16, 17 e 18 in direzione E-W. Oltre la Linea 4 (posizionata a circa 13 m dall'ingresso del ricovero) vi è una zona trasparente del segnale, che esclude una possibile continuazione della caverna verso ovest. La geometria di queste 5 linee è rappresentata nella mappa di Figura 3. Le porzioni di linea lungo le quali si riscontra segnale riflesso utile dal tetto del ricovero sono evidenziate in rosso. Da queste porzioni, si può evincere la direttrice della caverna, evidenziata in verde. In Tabella 2 sono riportati i punti GPS rappresentati in Figura 3.

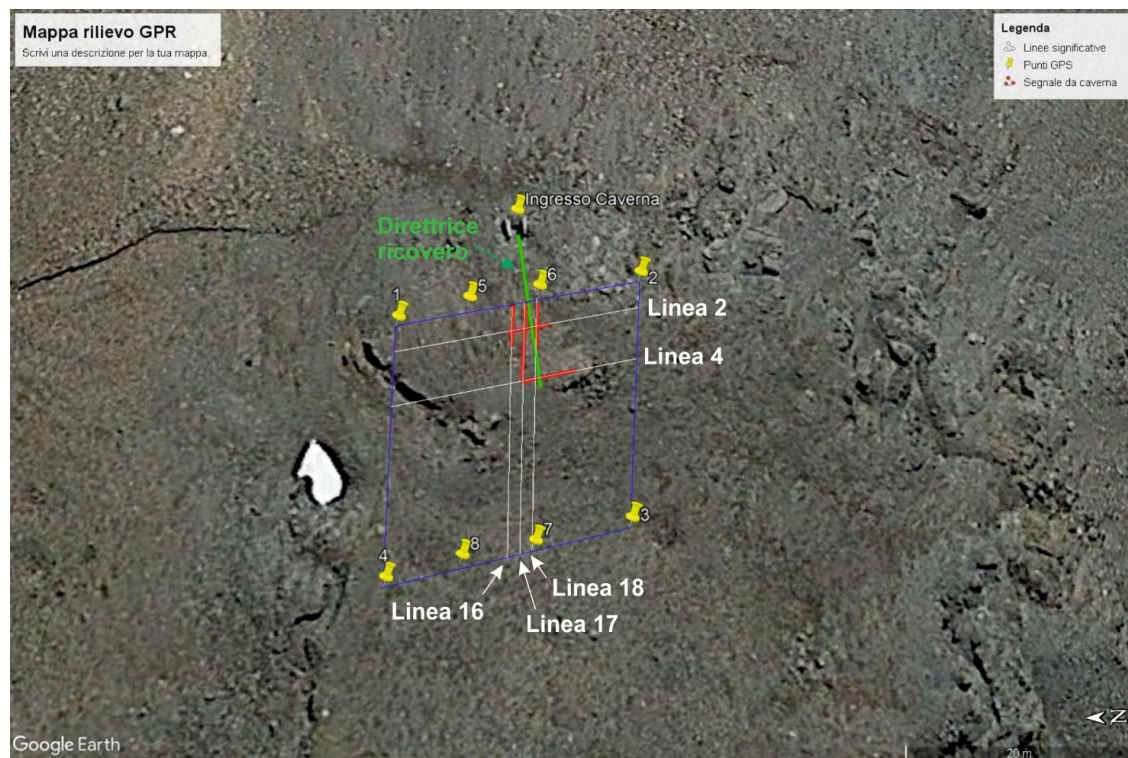


Figura 3 – Disposizione spaziale delle 5 linee GPR più significative in termini di rapporto segnale/rumore. Le porzioni di linea lungo le quali si riscontra segnale riflesso utile dal tetto del ricovero sono evidenziate in rosso. Da queste porzioni, si può evincere la direttrice della caverna, evidenziata in verde.

# Punto GPS	Latitudine	Longitudine
1	46° 31' 19.65" N	10° 26' 52.22" E
2	46° 31' 19.01" N	10° 26' 52.39" E
3	46° 31' 19.05" N	10° 26' 51.45" E
4	46° 31' 19.67" N	10° 26' 51.29" E
5	46° 31' 19.47" N	10° 26' 52.29" E
6	46° 31' 19.28" N	10° 26' 52.33" E
7	46° 31' 19.30" N	10° 26' 51.41" E
8	46° 31' 19.48" N	10° 26' 51.35" E

Tabella 2 – Punti GPS relativi alla Figura 3 (in coordinate WGS84), misurati con sistema GPS differenziale LEICA GS14.

## 5.2 Conclusioni

Dal punto di vista geologico, tutta l'area del Monte Scorluzzo è caratterizzata dalla presenza di rocce silicatiche, per la maggior parte acide, come micascisti, paragneiss e ortogneiss. In particolare, nella zona del ricovero sono presenti micascisti e gneiss. Strutturalmente queste rocce appartengono a scaglie tettoniche cristalline che riprendono l'assetto strutturale dei piani di scorrimento.

La copertura rocciosa del ricovero evidenzia la presenza di segnali in direzione obliqua, che immergono andando da SE verso NO, assimilabili alla "stratificazione" (piani di strato/scistosità) delle rocce metamorfiche e al conseguente sistema di fratture.

Dall'analisi dei radargrammi di Figure 4 e 5, si evidenzia la presenza di una zona chiamata "trasparente" con netta assenza di segnali radar, che testimonia una minor presenza di sistemi di fratturazione e conseguente maggior compattezza dell'ammasso roccioso. Posizionandosi all'ingresso della caverna e guardando le sezioni N – S di Figura 4 la "zona trasparente" viene a trovarsi a destra dell'entrata. Lo spessore della copertura rocciosa metamorfica è dato dalla profondità del tetto del ricovero, ben evidenziato nelle immagini delle linee 4 e 17, che è posizionato ad una profondità variabile tra 4 e 5 m.

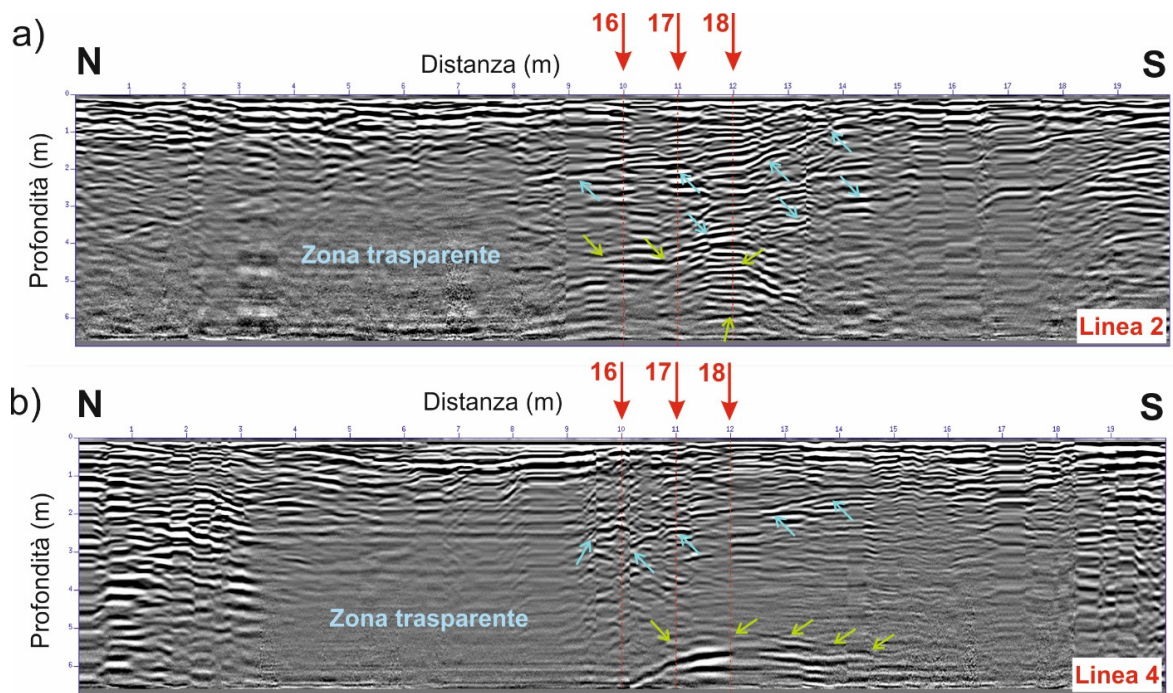


Figura 4 – Immagini in sezione del sottosuolo lungo le Linee 2 e 4, riferite alla superficie. Le frecce azzurre indicano i dettagli della volta rocciosa, mentre quelle verdi indicano i dettagli del ricovero (caverna).



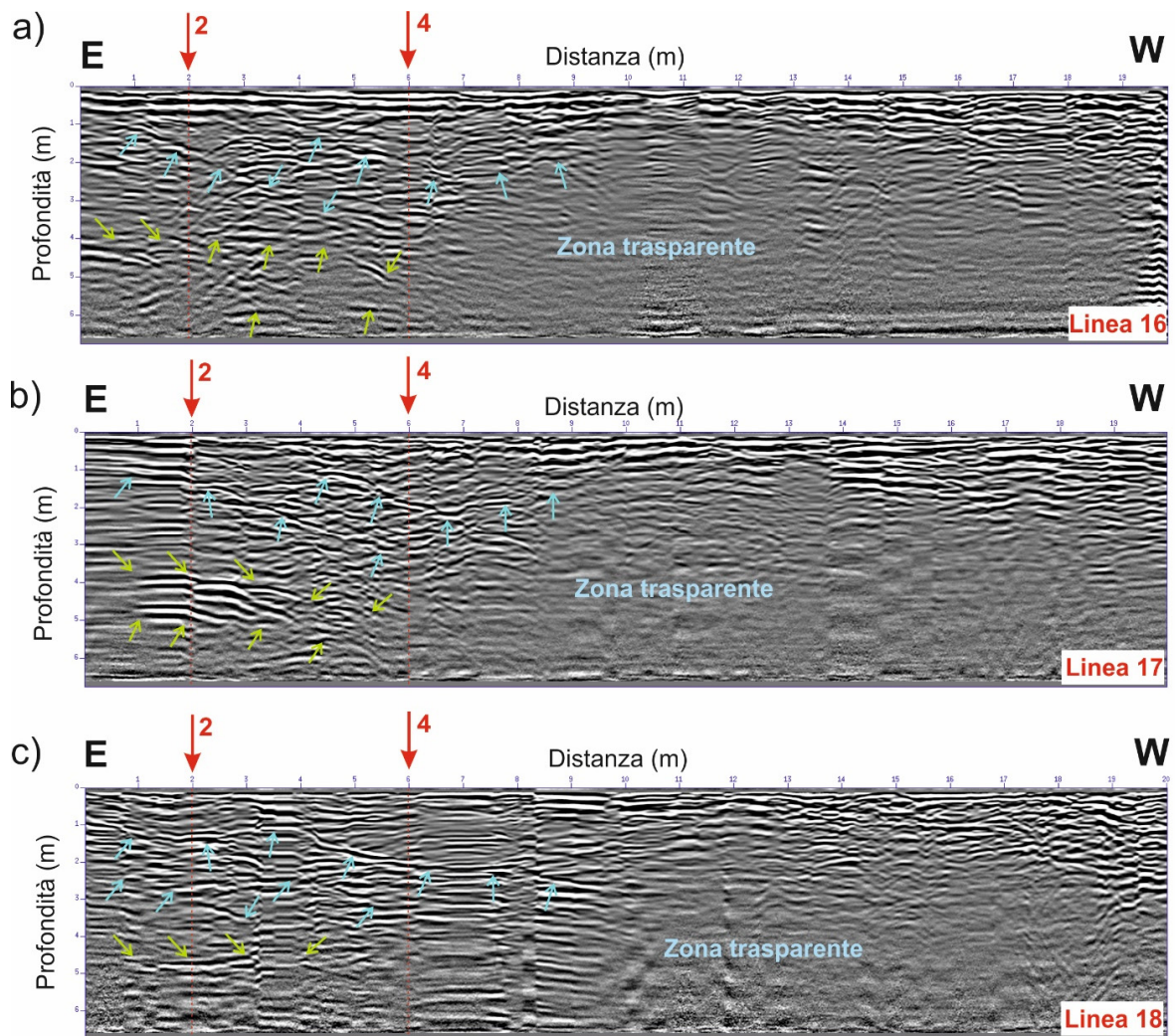


Figura 5 – Immagini in sezione del sottosuolo lungo le Linee 16, 17 e 18, riferite alla superficie. Le frecce azzurre indicano i dettagli della volta rocciosa, mentre quelle verdi indicano i dettagli del ricovero (caverna).

### Riferimenti Bibliografici

Francese R, Galgaro A and Grespan A (2004) Venice channel side-wall assessment with GPR technique – a case study. *J. Appl. Geophys.*, 56(1), 31–40 (doi: 10.1016/j.jappgeo.2004.03.001)

Francese R and 10 others (2015) GPR and seismic surveying in the world war I scenario of Punta Linke (Forni Glacier, Northern Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38, 129–141. (doi: 10.4461/GFDQ.2015.38.12)

Carturan L and 11 others (2013) Current behaviour and dynamics of the lowermost Italian glacier (Montasio Occidentale, Julian Alps). *Geogr. Ann.: Ser. A, Phys. Geograph.*, 95(1), 79–96 (doi:10.1111/geoa.12002)

Seppi R and 8 others (2015) Current transition from glacial to periglacial processes in the Dolomites (South-Eastern Alps). *Geomorphology*, 228, 71–86 (doi: 10.1016/j.geomorph.2014.08.025)

Stockwell JW, Jr (1999) Free software in education: a case study of CWP/SU: Seismic Unix. *Leading Edge*, 61(3), 759–775