

CITTA' METROPOLITANA DI GENOVA

**COMMITTENTE: SOCIETÀ COOPERATIVA A R.L.
"ASCENSORE VIA MARCO POLO "**

**CAMPAGNA DI INDAGINE GROUND PENETRATING RADAR
NELLA GALLERIA PEDONALE DI ACCESSO ALL'ASCENSORE
(PRESSO SAN NICOLA)**



RELAZIONE DI COMMENTO ALLE INDAGINI ESEGUITE ED AI RISULTATI OTTENUTI

Geologo dott. Giorgio Lombardi
Indagini geofisiche - Consulenze geologiche
Via Mongrifone 3/16 – 17100 SAVONA
tel: 338 5086317 e-mail: giorgiolombardi@ymail.com PEC: giorgiolombardi@pec.it
partita IVA: 01584990095

Partner:



INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. TEORIA DELLE INDAGINI GEORADAR.....	3
2.1. RICHIAMI PRELIMINARI SULLE INDAGINI GEORADAR.....	3
2.2. STRUMENTAZIONE GEORADAR.....	5
3. UBICAZIONE DELL'INDAGINE ESEGUITA.....	6
4. GROUND PENETRATING RADAR: STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	7
5. GROUND PENETRATING RADAR: RESTITUZIONE DATI E RISULTATI.....	8

ALLEGATI GRAFICI

Tav. 1: Schema di acquisizione delle linee GPR nel tunnel (punto di osservazione: da sbocco lato valle verso porta ascensore)

Tav. 2: Sezione - tipo del tunnel (punto di osservazione: da sbocco lato valle verso porta ascensore), scala 1:50

Tav. 3: Restituzione grafica dei risultati ottenuti dall'indagine GPR, scala 1:100

Tavv. 4, 5, 6: Radargrammi significativi interpretati

1. INTRODUZIONE

La Società Cooperativa a Responsabilità Limitata "Ascensore Via Marco Polo" con sede in Genova, nella persona dell'attuale Presidente dott. Benedetto Montanari, ha incaricato lo scrivente, partner di Techgea Geophysics srl di Torino, di eseguire una campagna di indagine Ground Penetrating Radar (nel seguito: Georadar o GPR) presso il tunnel pedonale che consente l'accesso all'ascensore con ingresso lato valle in prossimità di San Nicola.

La finalità dell'indagine è duplice: ricostruire in continuo la struttura costruttiva del tunnel ed individuare a tergo l'eventuale presenza di condizioni, a carico dei terreni o dell'ammasso roccioso circostanti, predisponenti fenomeni di richiamo e/o di circolazione idrica che, all'interno del tunnel, si palesano sotto forma di evidenti macchie di umidità.

Lo Strutturista incaricato della progettazione degli interventi di riqualificazione strutturale del tunnel è l'Ing. Daniele Canale, co-titolare dello Studio Montaldo - Canale di Genova.

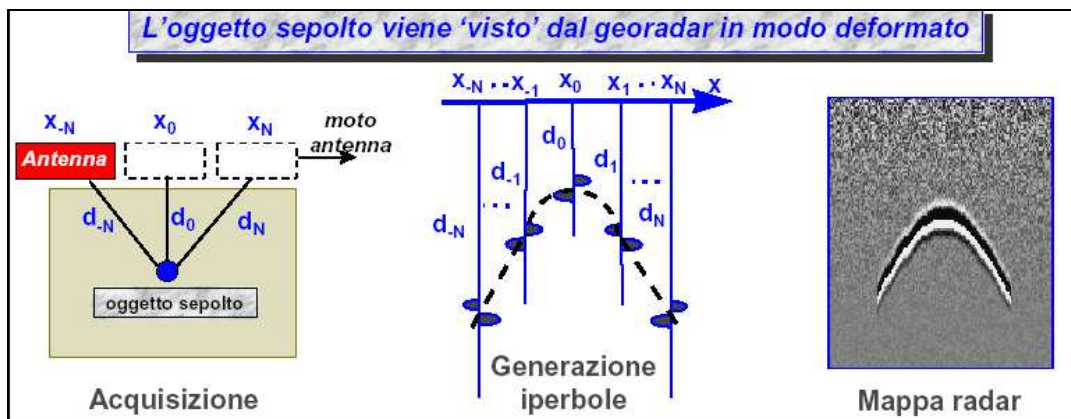
L'indagine è stata condotta in data 13.10.2020.

La metodologia geofisica utilizzata ed i risultati ottenuti sono descritti nelle pagine seguenti.

2. TEORIA DELLE INDAGINI GEORADAR

2.1. RICHIAMI PRELIMINARI SULLE INDAGINI GEORADAR

I rilievi georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) si basano sulla risposta di un segnale elettromagnetico di carattere impulsivo ad alta frequenza che viene inviato da un'antenna trasmittente. La presenza di discontinuità di proprietà elettromagnetiche del materiale provoca fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'energia elettromagnetica incidente su tale discontinuità. In generale, si analizza la risposta dell'onda elettromagnetica che viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità del mezzo e che ritorna in superficie, dove viene captata da un'antenna ricevente.



Il principio di funzionamento del georadar differisce da quello del radar convenzionale in quanto il mezzo di trasmissione non è più l'aria ma una roccia o un terreno, la risoluzione è in genere decimetrica o centimetrica, e il campo di misura è limitato ad alcuni metri di profondità.

In geofisica ambientale il georadar è utilizzato per l'individuazione di sottoservizi e strutture antropiche sepolte (cisterne interrato, fondazioni, ecc.); le applicazioni principali del georadar interessano anche le indagini archeologiche e la valutazione dell'integrità strutturale di elementi architettonici.

La velocità di propagazione di un'onda piana smorzata si ricava dalla soluzione dell'equazione d'onda e vale:

$$V_m = c / \left\{ (\epsilon_r \mu_r / 2) \left[(1 + P^2) + 1 \right] \right\}^{1/2}$$

dove c'è la velocità dell'impulso radar nel vuoto ($c \cong 0.3 \text{ m/ns}$), ϵ_r è la costante dielettrica relativa e μ_r è la permeabilità magnetica relativa. P è il fattore di perdita (loss factor) che vale:

$$P = \tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$$

ed è un indice del grado di dispersività del mezzo.

Si distingue tra dielettrici poco dispersivi ($P \ll 1$) e buoni conduttori ($P \gg 1$). Quando la frequenza dell'oscillazione del campo elettrico è sufficientemente elevata e la conducibilità del mezzo indagato è bassa, come nel caso di rocce e terreni, la corrente di spostamento prevale rispetto a quella di conduzione, la propagazione del segnale è di tipo ondulatorio e il termine P può considerarsi nullo. Se inoltre si è in presenza di materiali non ferromagnetici ($\mu \approx \mu_0$), la relazione della velocità media si semplifica:

$$v_m = c / \sqrt{\epsilon_r} = 0.3 / \sqrt{\epsilon_r}$$

I valori della costante dielettrica e della velocità di propagazione di alcuni materiali sono riportati nella tabella seguente. La lunghezza d'onda inoltre risulta: $\lambda = v/f$.

Materiale	Velocità di propagazione v [m/ns]	Costante dielettrica ϵ_r
Aria	0.3	1
Acqua dolce	0.033	81
Acqua di mare	0.033	81
Argilla	0.047 - 0.134	5-40
Argillite (bagnata)	0.113	7
Arenaria (bagnata)	0.112	6
Asfalto	0.134 - 0.173	3-5
Calcare	0.1-0.113	7-9
Calcestruzzo	0.055 - 0.112	6-30
Dolomia	0.106 - 0.155	6.8-8
Ghiaccio	0.160	4
Granito	0.160 - 0.120	5-8
PVC	0.173	3
Quarzo	0.145	4.3
Sabbia asciutta	0.12-0.16	3-6
Sabbia satura	0.055-0.06	25-30
Silt	0.055 - 0.134	5-30
Suolo argilloso	0.173	3
Suolo "medio"	0.075	16

Velocità di propagazione e costante dielettrica di alcuni materiali (Reynolds, 1997)

Si dimostra che per piccole lunghezze d'onda ($\lambda < 1$ m) e per mezzi elettricamente poco conduttivi (< 100 mS/m), i fenomeni legati alla propagazione di un'onda elettromagnetica possono essere trattati con la teoria dell'ottica geometrica; sono quindi applicabili all'elaborazione dei dati georadar molti algoritmi della sismica a riflessione.

Si osserva che, a causa dell'elevata costante dielettrica dell'acqua, le velocità variano molto con la saturazione in acqua del materiale e che per rocce e terreni sono in genere comprese tra 0.06 e 0.175 m/ns.

2.2. STRUMENTAZIONE GEORADAR

Il georadar è un dispositivo ad ampia banda che può operare nel campo di frequenza compreso tra 10 e 2500 MHz, ed è caratterizzato dall'emissione di segnali che possono essere assimilati a impulsi aventi in dominio di tempo un'ampiezza τ di qualche ns.

L'intervallo di tempo tra l'impulso di emissione e l'arrivo della riflessione da un bersaglio dipende, dalla profondità del bersaglio e dalla velocità di propagazione del mezzo.

Nella schematizzazione più semplice un sistema georadar si compone di:

- una sorgente impulsiva, con impulsi di $1\div 2$ ns di durata, ampiezza di picco di 100 V e frequenza di ripetizione degli impulsi variabile da 30 a 100 kHz;
- una o più coppie di antenne con funzione di trasmettitore e ricevitore;
- un convertitore analogico/digitale (8 - 16 bit);
- un sistema di memorizzazione su supporto magnetico dei segnali numerici e dispositivi di elaborazione dei segnali e di interfaccia grafica per la rappresentazione su schermo dei segnali.

La rappresentazione dei dati acquisiti avviene normalmente su un diagramma tempi-ampiezze del segnale ricevuto dal georadar.

Spostando l'antenna lungo una direzione prestabilita e accostando i diversi diagrammi tempi-ampiezze per i successivi segnali, si ottengono delle sezioni, dette *radargrammi*, in cui le ampiezze di riflessione sono rappresentate in funzione del tempo di andata e ritorno (twt) e della posizione dell'antenna lungo il profilo di acquisizione.

Durante l'acquisizione gli impulsi sono ripetuti con frequenza compresa tra 30 e 100 kHz. Le tracce rilevate dall'antenna ricevente sono mediate prima di essere registrate: in tal modo, ogni singola traccia registrata è il risultato di una operazione di *stacking*, che ha come effetto l'aumento del rapporto segnale/rumore.

In acquisizione si opera inoltre impiegando dei filtri in dominio di frequenza (filtri passa banda), con banda passante larga abbastanza da non perdere segnale utile. Successivamente, è possibile procedere ad un ulteriore filtraggio digitale sulle tracce acquisite.

Opportune procedure di elaborazione dei dati consentono di passare dalle sezioni radar "grezze" a immagini che meglio localizzano gli oggetti sepolti.

Un oggetto di forma e dimensioni tali da provocare la diffrazione del segnale, presenta nel radargramma una risposta dalla caratteristica forma a iperbole rovesciata, detta iperbole di diffrazione. Corpi che forniscono tipicamente una simile risposta sono, tra gli altri, le condotte sepolte.

Si ottiene una iperbole perché il fenomeno della diffrazione consente di rilevare un segnale, anche quando l'antenna ricevente non è posta sulla verticale dell'oggetto. Tale segnale percorre una distanza pari a

$$2d = 2\sqrt{x^2 + z^2}$$

dove z è la profondità dell'oggetto sepolto e x la distanza, misurata in superficie, tra l'oggetto e l'antenna. Il tempo di andata e ritorno del segnale diffratto è quindi:

$$t = 2 \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{v}$$

Tale equazione rappresenta, nel piano (x, t) , un'iperbole avente vertice nel punto $(0, 2z/v)$ e asintoti $t(x) = \pm 2x/v$.

Se è possibile individuare un'iperbole di diffrazione nei dati sperimentali, è anche possibile, per via grafica, stimare la profondità dell'oggetto che l'ha prodotta e la velocità di propagazione del mezzo. Si osserva che velocità di propagazione decrescenti, corrispondono a iperboli più strette.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla letteratura specialistica ⁽¹⁾.

3. UBICAZIONE DELL'INDAGINE ESEGUITA

In relazione all'obiettivo di indagine e sotto esplicitate richieste della Committenza e del Progettista Ing. Canale sono state sottoposte ad indagini le murature laterali del tunnel pedonale, la calotta e la pavimentazione..

Le scansioni sono state eseguite con un'antenna bistatica con frequenza centrale di 400 Mhz, adeguata sia per ricostruire la geometria della muratura, sia per individuare eventuali sottoservizi, sia per ottenere informazioni sulle caratteristiche dei materiali a tergo del manufatto.

Presso entrambi i fianchi del tunnel sono state acquisite linee GPR parallele all'asse di sviluppo a differenti altezze dalla pavimentazione. L'acquisizione ha seguito i criteri sintetizzati nei punti seguenti:

- **lato sinistro (monte):** n° 4 linee orizzontali ad altezza dal piano di calpestio del tunnel pari a circa 0.6 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.7 m, distribuite in funzione della presenza (in prossimità dello sbocco lato San Nicola) di ostacoli presenti in parete. N° 10 linee verticali sviluppate per l'intera altezza del fianco e della calotta (fino alla linea di illuminazione in sommità), equispaziate 5.0 m (eccetto tra le linee 22 e 23) distribuite in funzione della presenza di ingombri ed ostacoli;
- **lato destro (valle):** n° 4 linee orizzontali ad altezza dal piano di calpestio del tunnel pari a circa 0.6 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.8 m, distribuite in funzione della presenza (specie in prossimità dello sbocco lato San Nicola) di ostacoli presenti in parete e del corrimano. N° 9 linee verticali sviluppate per l'intera altezza del fianco (a partire dal corrimano) e della calotta (fino alla linea di alimentazione dei neon in sommità), equispaziate 5.0 m (eccetto tra le linee 25 e 26) distribuite in funzione della presenza di ingombri ed ostacoli;
- **pavimento:** n° 3 linee longitudinali, per l'intero sviluppo del tunnel, centrate ad una distanza della parete sinistra (lato monte) di circa 0.3 m, 0.95 m, 1.85 m. N° 17 linee ortogonali all'asse del tunnel, ubicate in funzione delle anomalie riscontrate dalle linee longitudinali

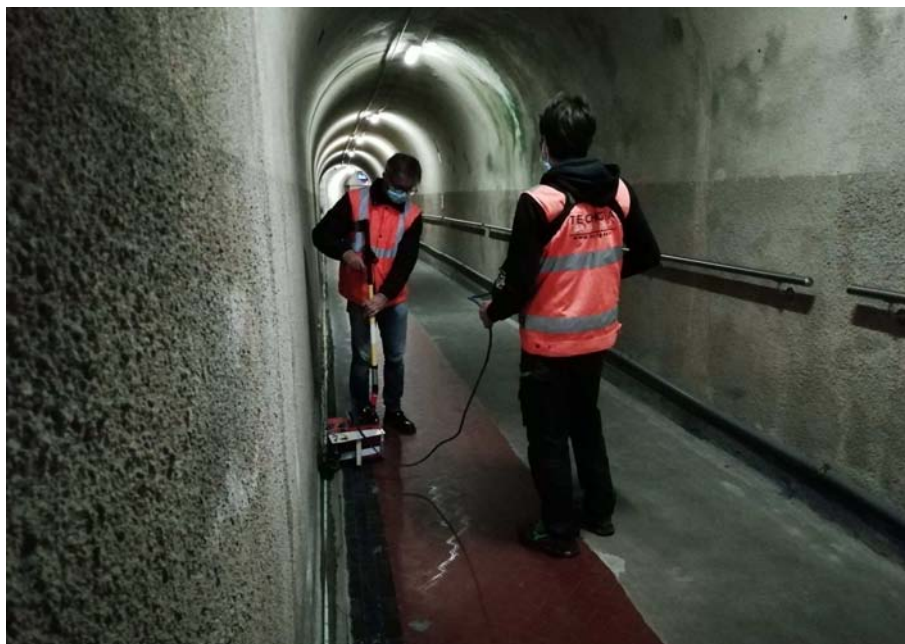
¹) J. L. Davis e A. P. Annan, 1989 : "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy", Geophysical prospecting 37, pp. 531-551.

4. GROUND PENETRATING RADAR: STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

E' stata utilizzata l'unità di controllo e acquisizione di segnali radar GSSI SIR 4000 corredata da antenna bistatica da 400 Mhz dotata di survey - wheel (odometro).



Utilizzo dell'antenna a parete



Utilizzo dell'antenna a pavimento

5. GROUND PENETRATING RADAR: RESTITUZIONE DATI E RISULTATI

Negli allegati grafici al presente report tecnico (Tav. 1, 2, 3) si riassumono lo schema di acquisizione ed i risultati ottenuti.

I dati salienti emersi dall'indagine sono qui sintetizzati:

- non sono mai risultate presenti opere di sostegno delle pareti e della volta (centine, armature o simili), il che lascia dedurre che lo scavo sia stato realizzato completamente (salvo, forse, il primissimo tratto allo sbocco verso San Nicola, in cui potrebbe essere stato condotto a cielo aperto) in roccia, e che lo scavo confinato abbia dimostrato nel corso di avanzamento dello scavo capacità di autosostegno;
- la struttura muraria (fianchi e volte - calotta) è in calcestruzzo non armato, e il fatto che non si riesca a seguire in maniera continua l'intradosso della struttura stessa dimostra che l'intradosso stesso è stato realizzato a contatto diretto con l'ammasso roccioso retrostante, che il coefficiente dielettrico della muratura e del bedrock non differiscono sensibilmente e che quindi, spesso, non si generano segnali riflessi sufficientemente potenti per tale ragione;
- è stato comunque possibile apprezzare lo spessore della struttura muraria: esso appare prossimo a 50 cm alla base e si rastrema lievemente verso la volta riducendosi a circa 40 cm (si consideri il possibile errore dovuto al valore non precisamente noto, ma solo ipotizzato, del coefficiente dielettrico dei materiali);
- sono state individuate delle tubazioni verticali aventi molto probabilmente funzione di captazione ed allontanamento dei deflussi provenienti dall'ammasso roccioso. Quest'ultimo, a tratti, appare pervaso da frequenti discontinuità (che generano fitte riflessioni radar), entro le quali è certamente presente circolazione idrica: tali dreni, verosimilmente, sono stati messi in opera nel corso delle varie fasi di avanzamento dello scavo del tunnel, allorché si verificava la presenza di venute idriche significative. Il numero di queste probabili tubazioni di drenaggio è pari a tre sul lato sinistro (lato monte), mentre presso il destro (lato valle) ne risulta probabilmente presente una sola (e non chiaramente visibile al radar): il tunnel svolge funzione di "dreno" a grande scala ed intercetta, evidentemente, un sistema di circolazione idrica in frattura che segue la direzione di immersione del versante. Di conseguenza l'entità delle venute idriche risulta inevitabilmente più ingente presso il lato di monte dello scavo;
- tutti i drenaggi verticali individuati sul lato sinistro (monte) sono molto probabilmente raccordati, al di sotto della pavimentazione del tunnel, ad una tubazione longitudinale di raccolta che risulta inequivocabilmente presente circa al centro del tunnel per l'intero sviluppo dello stesso. Non risulta presente la medesima situazione di collegamento in corrispondenza dell'unico probabile dreno verticale individuato presso la parete di destra (valle), sebbene non si possa escludere che la tubazione di raccordo sia presente ma non visibile al radar;
- le venute idriche sono certamente localizzate in settori di ammasso roccioso caratterizzati da presenza di discontinuità maggiormente fitte e pervasive, probabilmente conseguenti a disturbi tettonici a piccola - media scala;
- la muratura di confinamento della sezione del tunnel, per quanto a tratti interessata da fenomeni di umidità che si evidenziano all'estradosso, non presenta all'analisi GPR condizioni di preoccupante degrado o ammaloramento. Si delegano in ogni caso allo Strutturista incaricato i dovuti approfondimenti in merito;

- al di sotto del piano di calpestio interno al tunnel non si evidenzia la presenza di arco rovescio: immediatamente al di sotto della quota di posa della tubazione di raccolta delle acque assiale al tunnel si evidenziano i tipici segnali di riflessione a carico dell'ammasso roccioso (fratture, discontinuità...) presenti anche a tergo delle pareti;
- sarebbe sicuramente utile provvedere alla realizzazione di dreni supplementari, sul lato sinistro (monte) negli intervalli di progressive metriche (si rimanda agli allegati grafici) 3.0 - 8.0 (in volta), 16.0 - 28.0 (per l'intero sviluppo verticale), 35.0 - 42.0 (soprattutto nel settore centrale), e sul lato destro (valle) negli intervalli di progressive metriche 6.0 - 10.0 (in volta), 16.0 - 20.0 (per l'intero sviluppo verticale), 35.0 - 42.0 (soprattutto nel settore centrale).

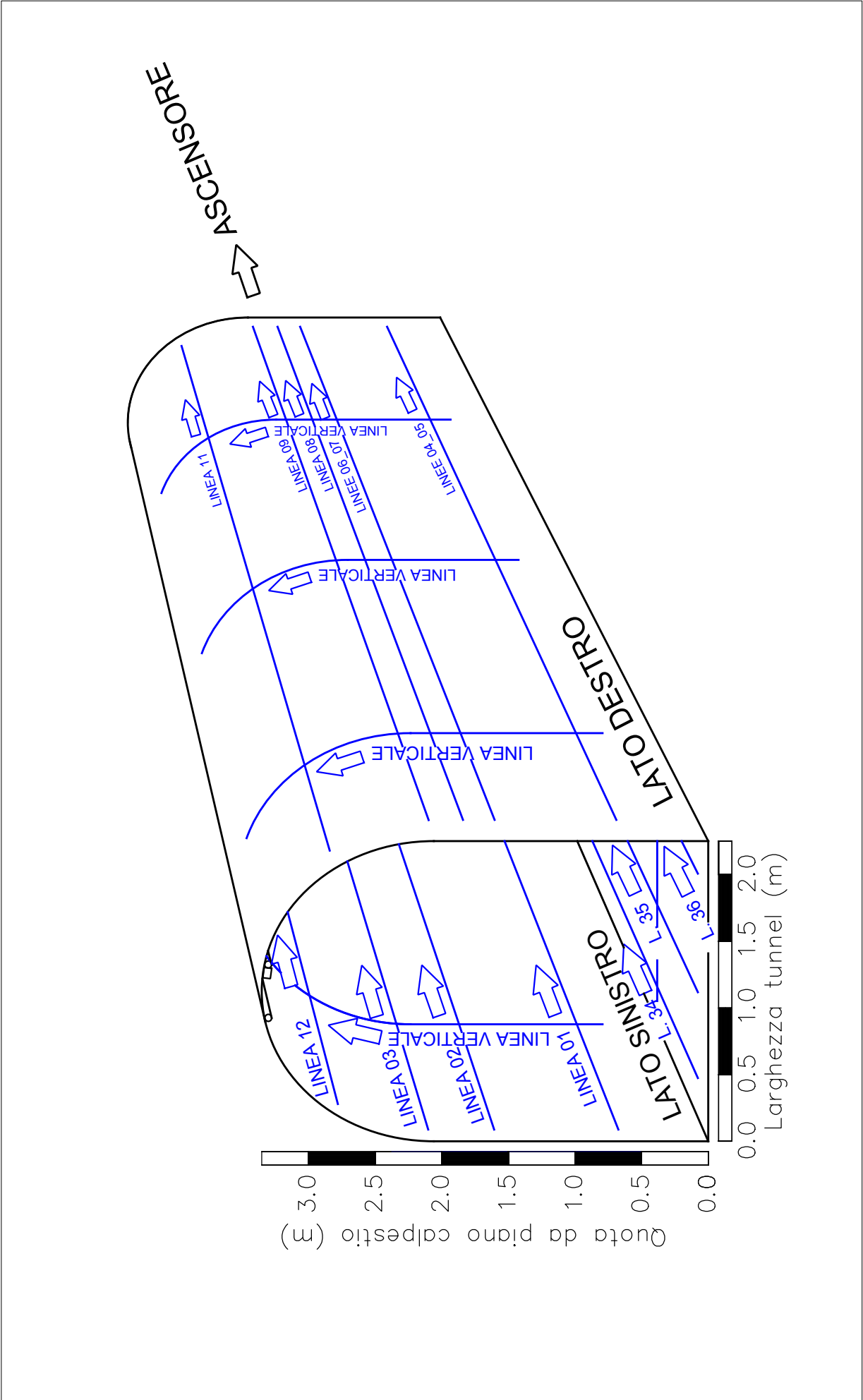
Savona, 27.10.2020

Geologo dott. Giorgio Lombardi, partner Techgea Geophysics

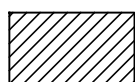
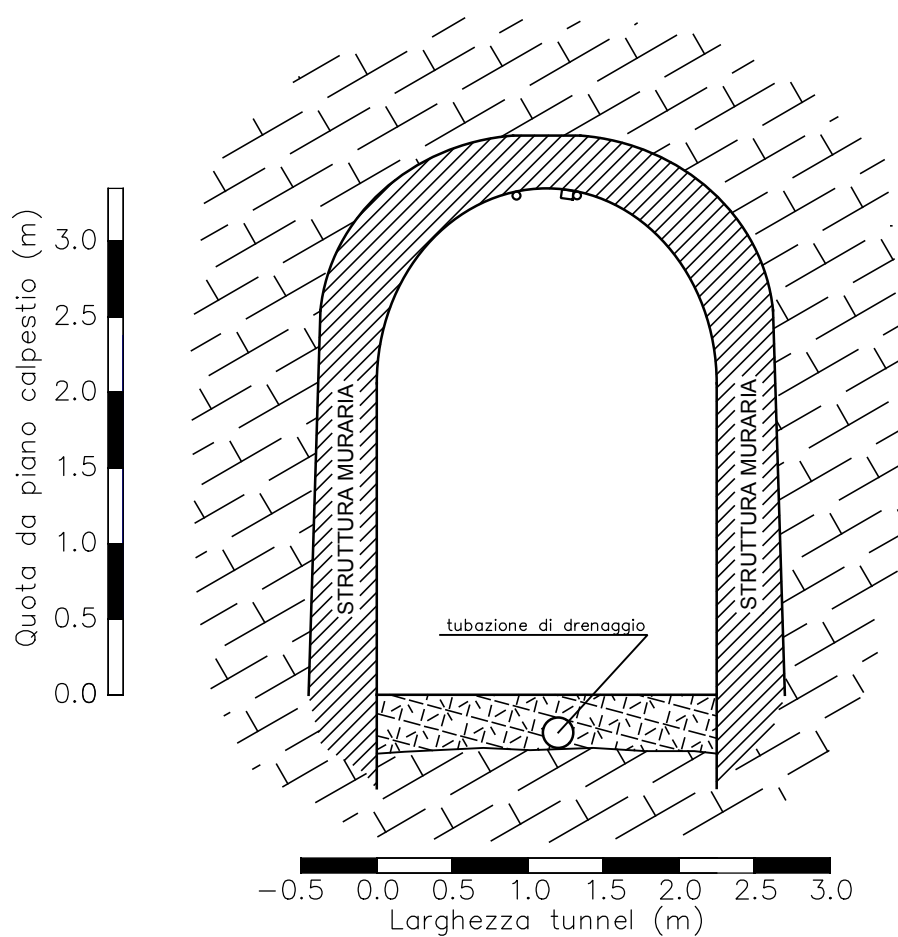


A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Giorgio Lombardi", written over the stamp.

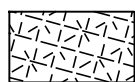
SCHEMA DI ACQUISIZIONE DELLE LINEE GPR NEL TUNNEL (PUNTO DI OSSERVAZIONE: DA
SBOCCO LATO VALLE VERSO PORTA ASCENSORE)



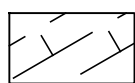
SEZIONE-TIPO DEL TUNNEL (PUNTO DI OSSERVAZIONE: DA SBOCCO LATO VALLE VERSO PORTA ASCENSORE), SCALA 1:50



rivestimento in muratura non armata



riporti sottostanti la pavimentazione



bedrock in posto (Formazione del Monte Antola)

RESTITUZIONE GRAFICA DEI RISULTATI OTTENUTI DALL'INDAGINE GPR, SCALA 1:100

Legenda

- Sezioni georadar

Locali retrostanti

Assenza di intonaco

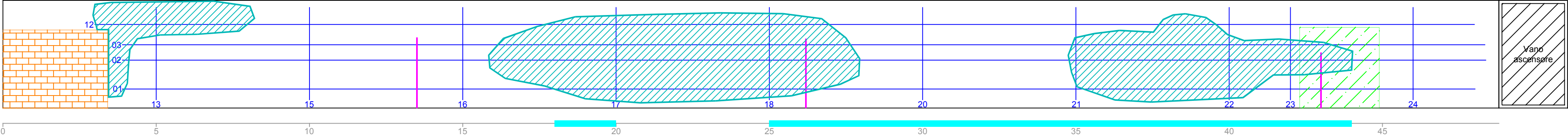
Zone umide - Evidenze superficiali
- Tubazioni

Tubazioni incerte

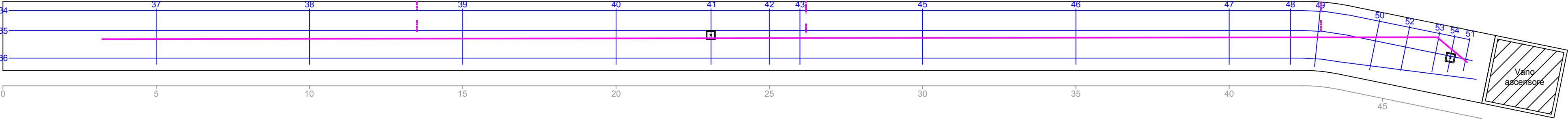
Zone fratturate con probabile circolazione idrica

Anomalia di incerta attribuzione

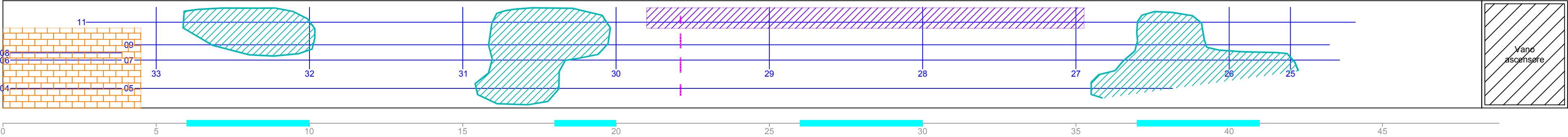
Lato sinistro



Pianta

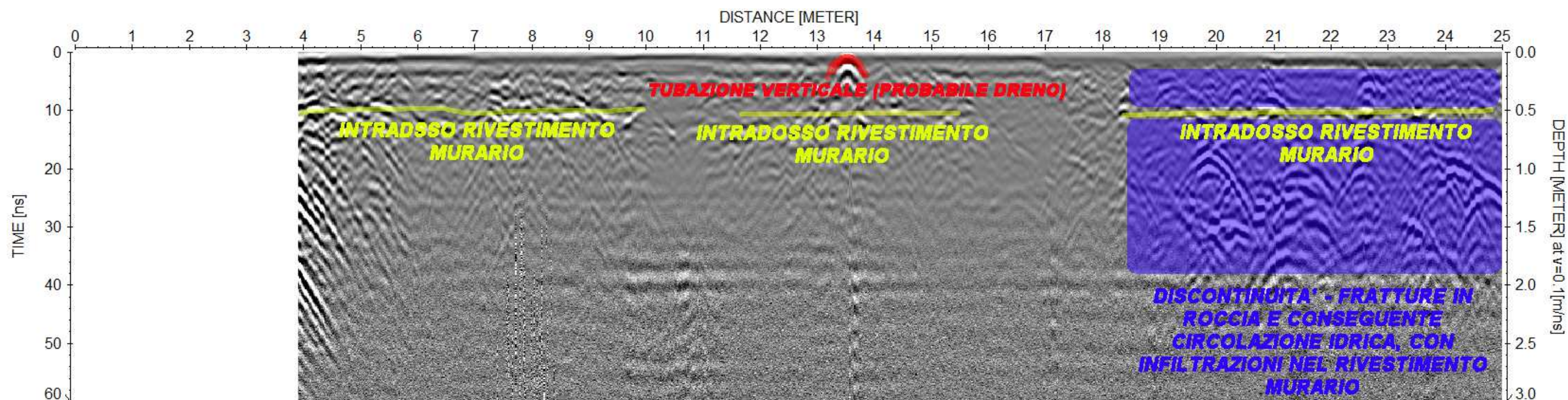


Lato destro

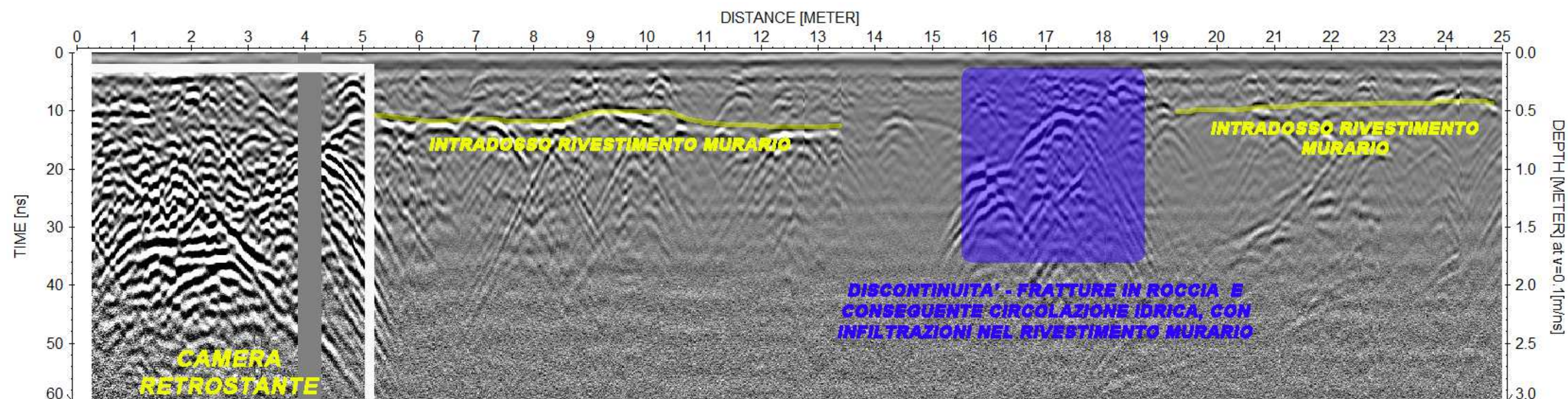


RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 01, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

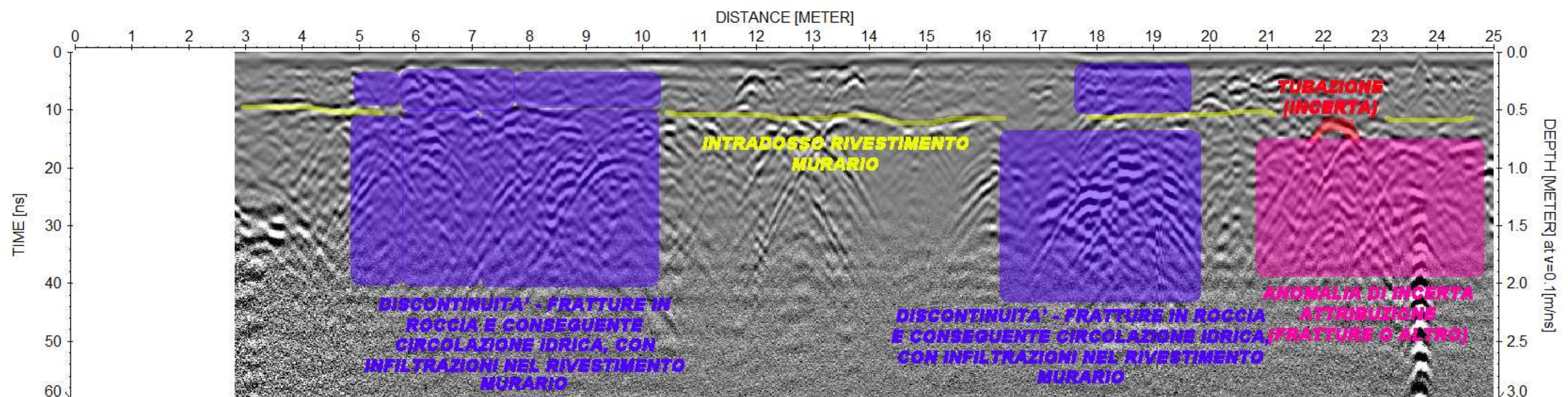


LINEE 04 E 05, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

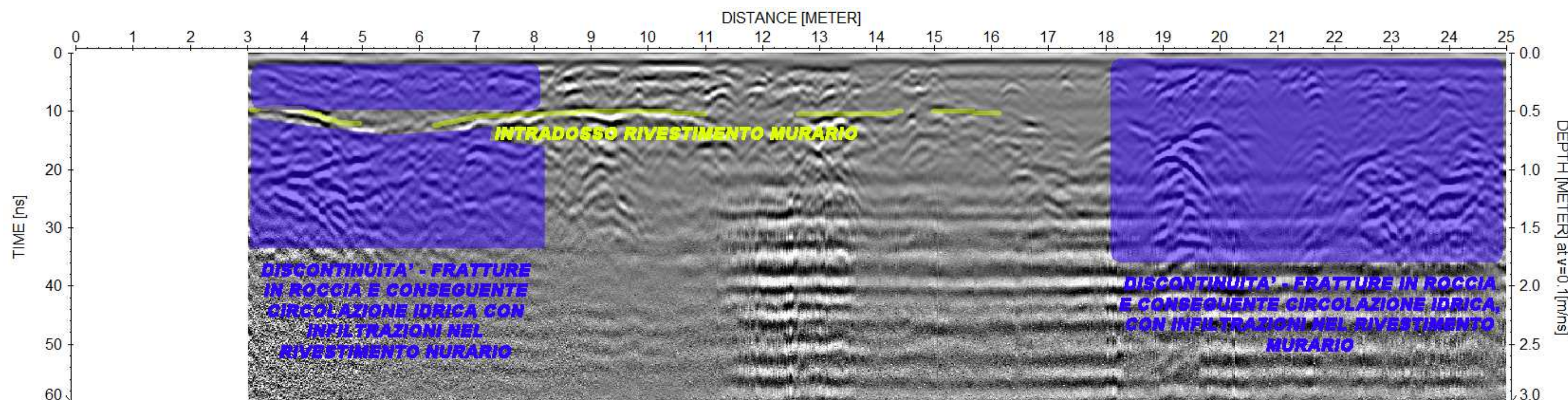


RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 11, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

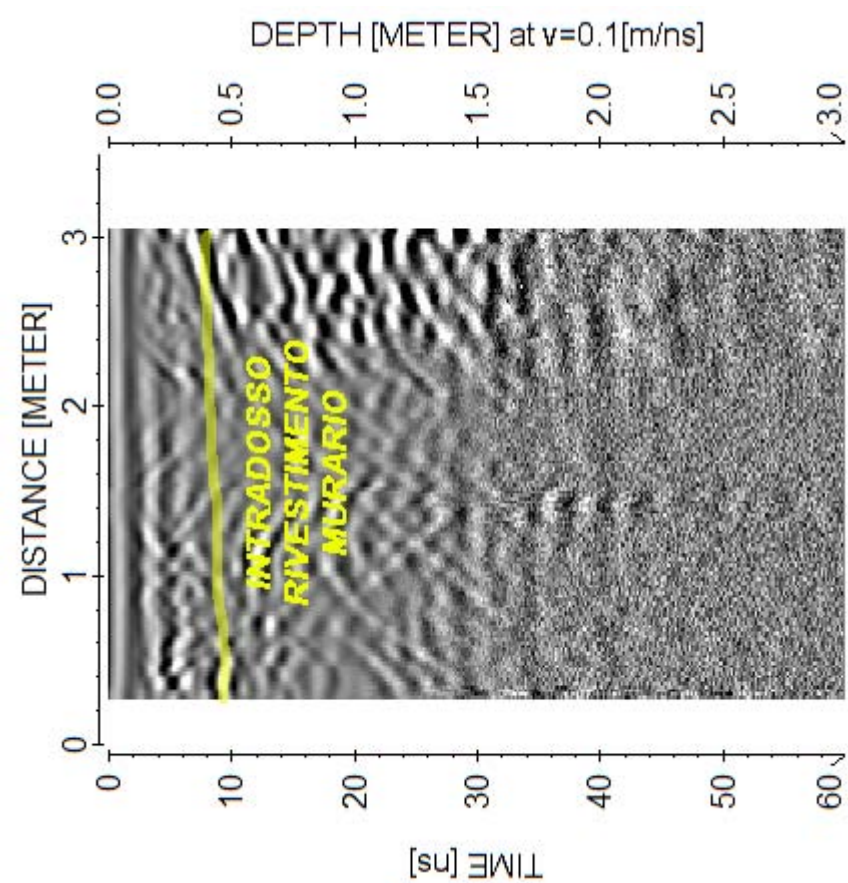


LINEA 12, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0



RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 24 (VERTICALE)



LINEA 42 (A PAVIMENTO, TRASVERSALE ALL'ASSE DEL TUNNEL)

