



GEAM

Associazione Georisorse e Ambiente

Titolo della lezione:

prove geofisiche in sito per la ricostruzione del modello geologico e geostrutturale

Indagini geofisiche in foro

Relatore:

Dott. Mario Naldi – Techgea Srl

**INDAGINI E MISURE GEOMECCANICHE PER LA STIMA
DEI PARAMETRI DI PROGETTO DI OPERE
A CIELO APERTO E IN SOTTERRANEO**

Torino, 16-17 Dicembre 2013

Prove geofisiche in sito

1. Stato dell'arte. Metodi e tecniche di indagine geofisica utilizzati in ambito geognostico
2. Progettazione delle indagini. Scelta del metodo di indagine, posizionamento punti di prova, risultati attesi
3. Interpretazione dei dati: passaggio dal modello geofisico al modello geologico

Evoluzione dei metodi e delle tecniche di indagine

L'evoluzione tecnologica e informatica degli ultimi 20 anni ha fortemente (e positivamente) condizionato sia la strumentazione geofisica e sia i processi di elaborazione dati

Per la strumentazione si è passati da...

- Rilievo analogico → a rilievo digitale
- registrazione dei dati su carta → a registrazione dati su supporto magnetico



Sismografo per sismica a rifrazione a 6 canali
Geometrics ES-1224 1977 – 1987 **(immagine fornita da Progeo Srl)**



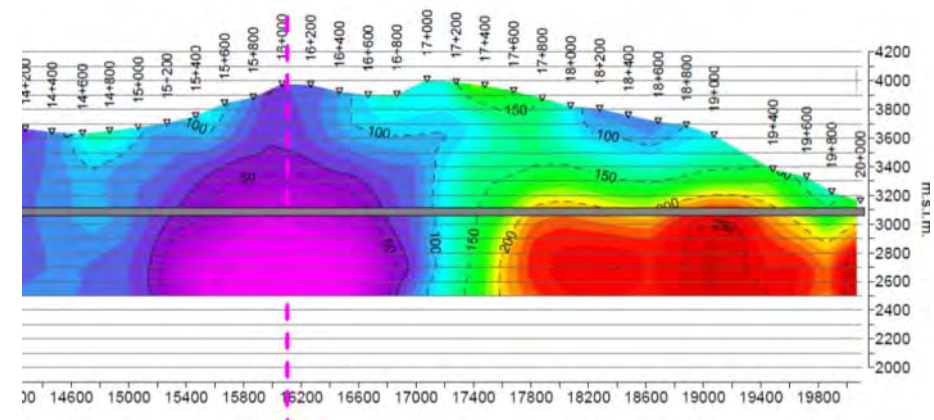
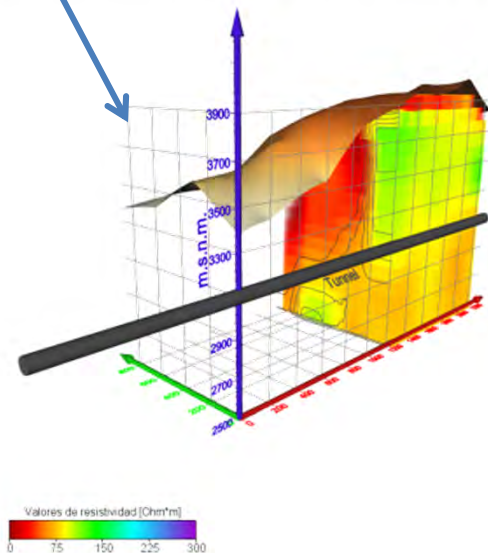
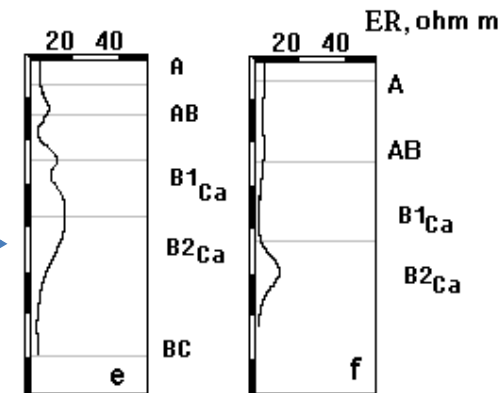
Sismografo 24 canali modulare per sismica a rifrazione/riflessione/SIRT
DAKLINK 2011 **(FonteTechgea Srl)**

Evoluzione dei metodi e delle tecniche di indagine

La possibilità di acquisire più dati in modo organizzato ha portato anche ad una evoluzione dei metodi di interpretazione dei dati.

Semplificando ed estremizzando...

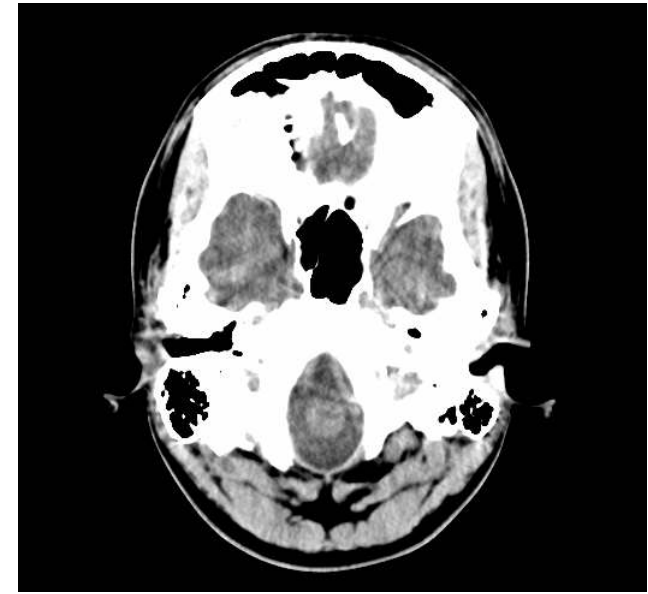
- Fino alla fine degli anni '80 l'elaborazione dei dati era monodimensionale 1D
- Successivamente si passa ad una elaborazione bidimensionale 2D (sezione) e tridimensionale (volume)



Evoluzione dei metodi e delle tecniche di indagine

Crossover tra i metodi di geophysical imaging e la biomedicina per immagini

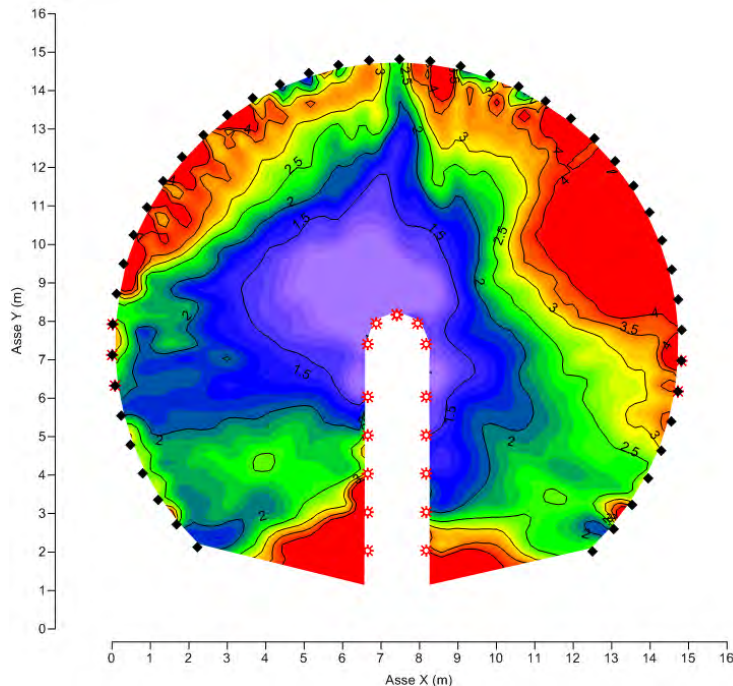
L'evoluzione della diagnostica medica per immagini ha fortemente influenzato i metodi di indagine geofisica con un **trasferimento tecnologico dalla biomedicina alla geofisica e viceversa**



TAC cranica

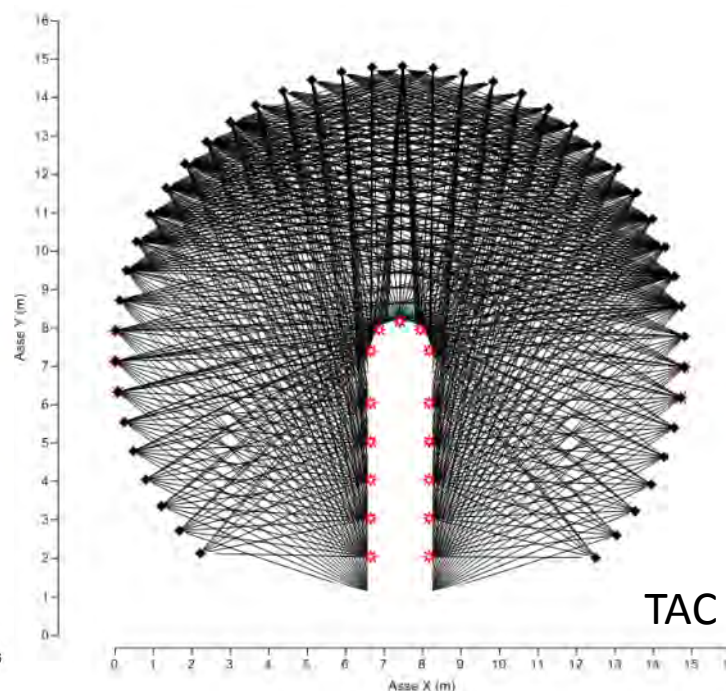
TK 3104 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (KM/S)

- 0.95 m da coronamento



TRAIETTORIA RAGGI SISMICI

-0.95 m da coronamento



TAC di un serbatoio

METODI DI INDAGINE

I metodi di indagine geofisica utilizzati nella modellazione geologica prendono in considerazione due proprietà fisiche del sottosuolo:
la resistività elettrica e la velocità di propagazione delle onde sismiche.

Semplicando...

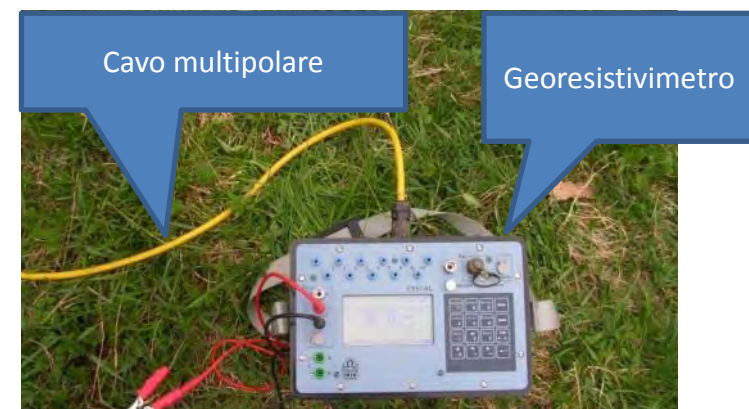
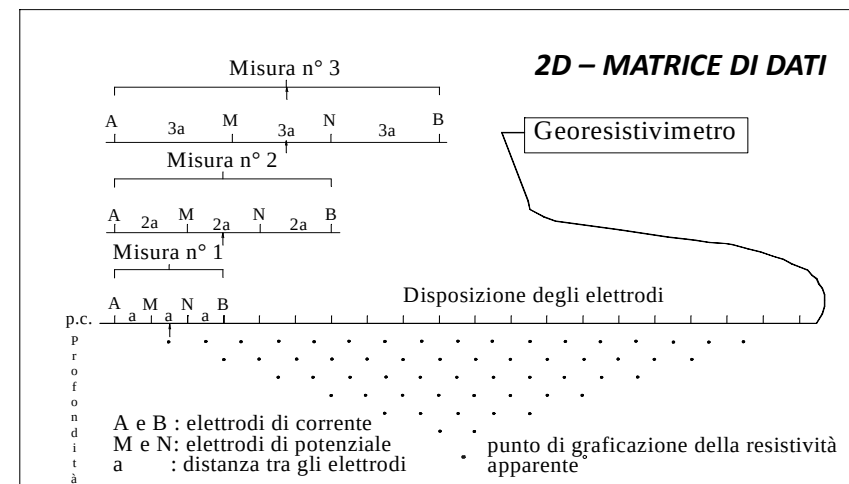
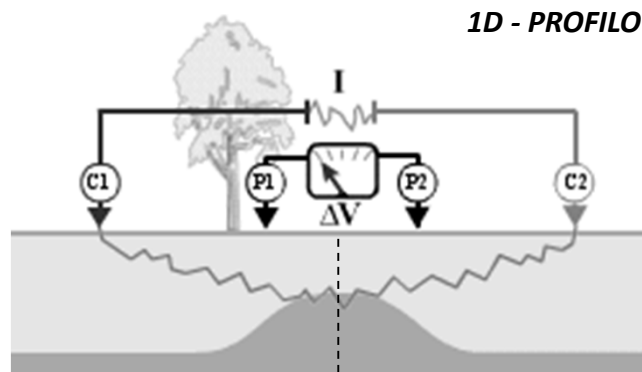
→ La **resistività elettrica** (da prove geoelettriche o elettromagnetiche) è più indicata per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del sottosuolo

→ La **velocità delle onde sismiche** è più indicata per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo

Metodi di indagine: metodo geoelettrico

Nel caso del **metodo geoelettrico** l'acquisizione dei dati 1D avviene secondo un profilo verticale S.E.V. (SONDAGGIO ELETTRICO VERTICALE) o V.E.S. (VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING) mediante utilizzo di 4 elettrodi → 2 elettrodi di corrente (AB) e due elettrodi di potenziale (MN)

L'acquisizione dei dati **2D** si ottiene traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività. Se invece si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine. SI TRATTA SEMPRE DI SEV, MA ACQUISITI IN MODO ORGANIZZATO CON STRUMENTAZIONE MULTIELETTRODO E CON MATRICE DI VALORI

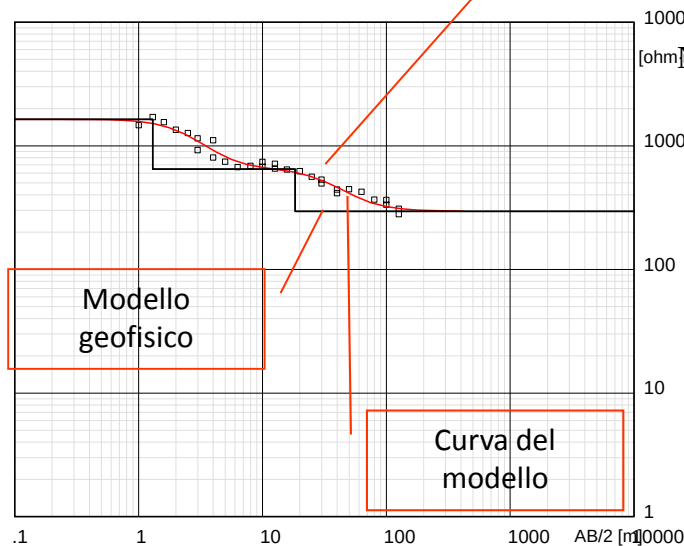


Metodi di indagine: metodo geoelettrico

L'acquisizione dei dati di resistività elettrica 1D avviene secondo un profilo verticale S.E.V. (SONDAGGIO ELETTRICO VERTICALE) o V.E.S. (VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING) mediante utilizzo di 4 elettrodi → 2 elettrodi di corrente (AB) e due elettrodi di potenziale (MN)

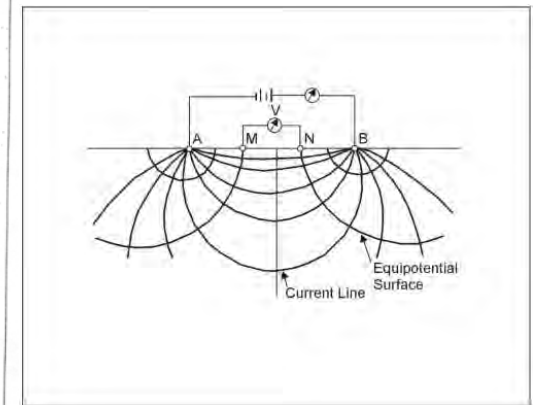
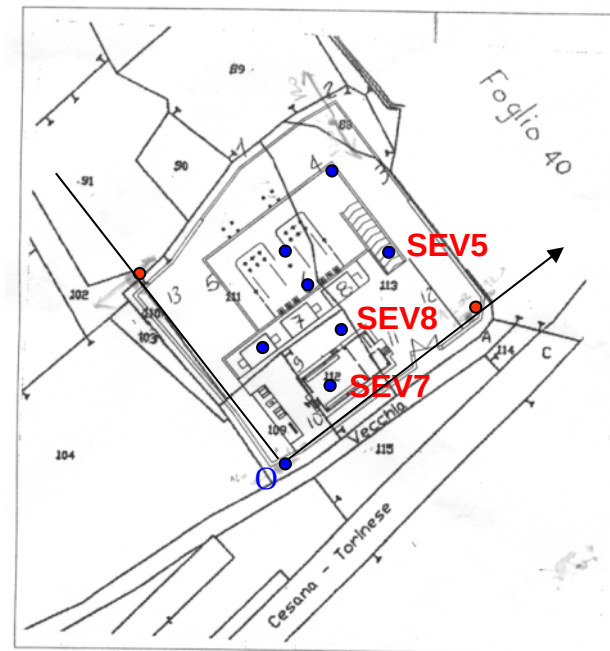
Electrical sounding Schlumberger - sev7.WS3

Dati sperimentali



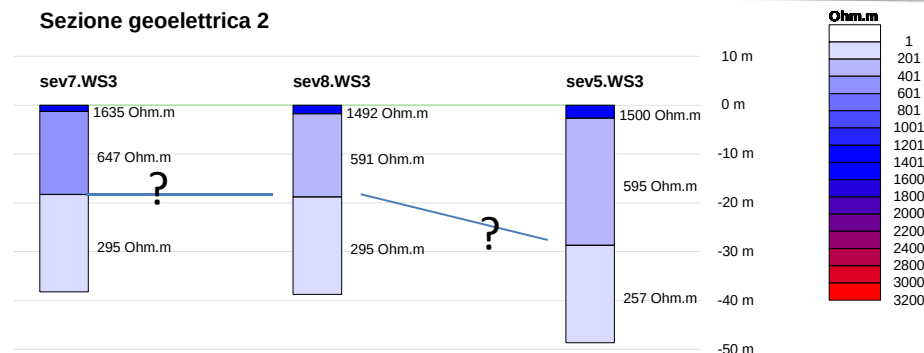
Location X = 30 Y = 17 Z = 0

Model Resistivity	Thickness	Depth
[ohm.m]	[m]	[m]
1635	1.3	
647	17	1.3
295		18



Utilizzando le elettrostratigrafie dei **sondaggi geoelettrici** si può ottenere una sezione degli elettrostrati per interpolazione dei dati, esattamente come una sezione geologica costruita sulla base di sondaggi geognostici

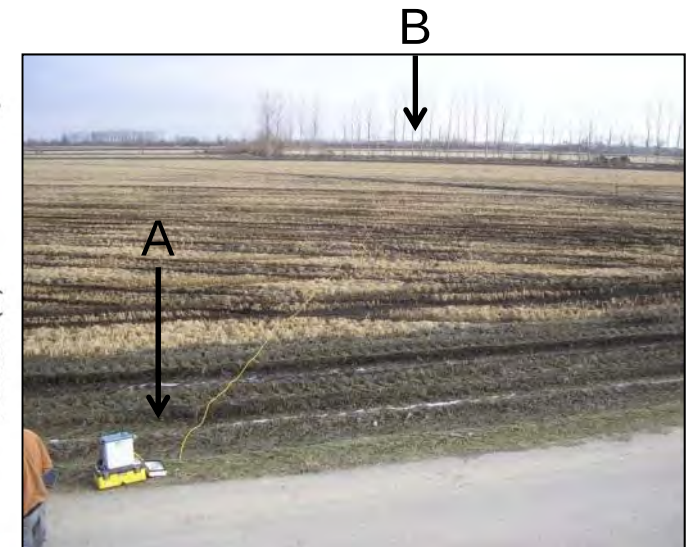
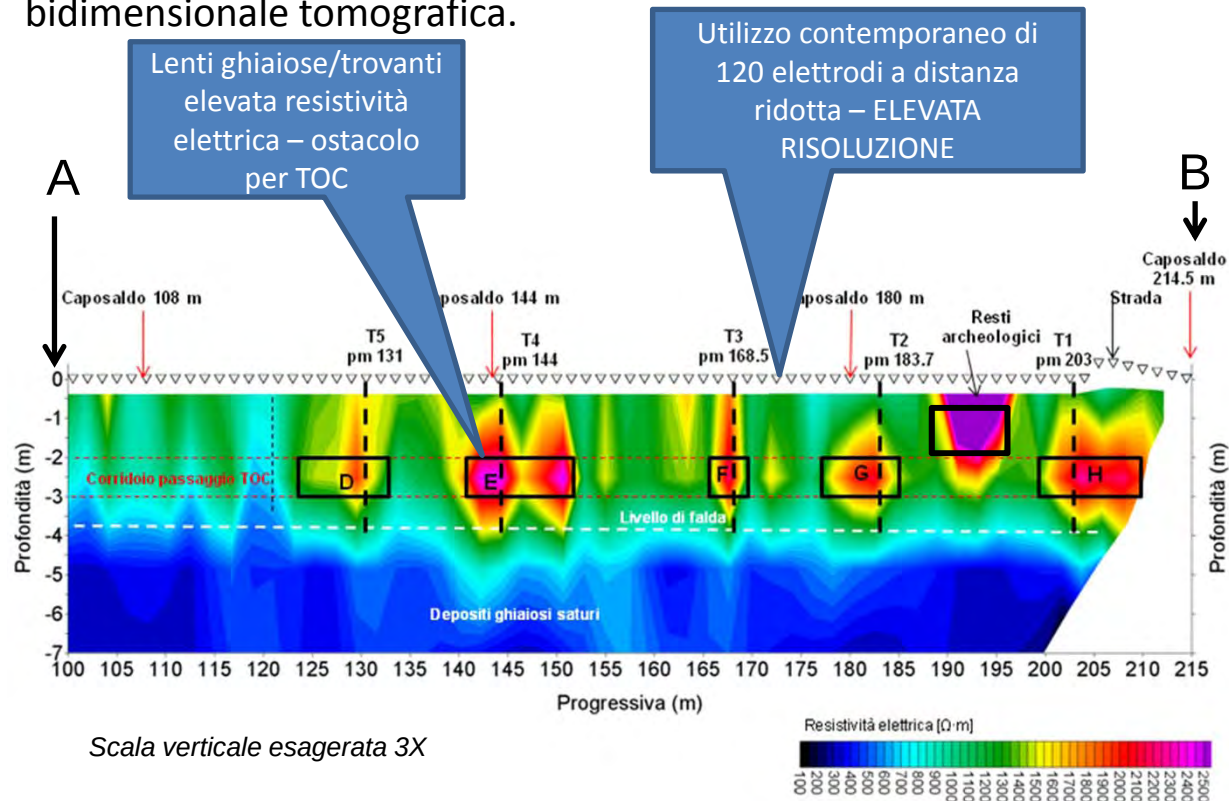
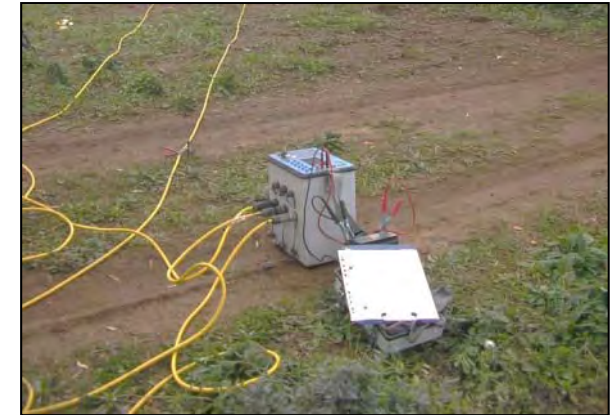
Sezione geoelettrica 2



Da un modello 1D si passa ad un modello interpretativo 2D che risente, però, di molte incognite laterali...

Metodi di indagine: metodo geoelettrico

L'acquisizione dei dati 2D avviene secondo una matrice di dati che fornisce una sezione di resistività «apparente». Mediante un processo di inversione tomografica si ottiene un modello 2D di resistività «reale» del sottosuolo. L'evoluzione è il passaggio da una elaborazione di tipo monodimensionale su profilo verticale ad una elaborazione bidimensionale tomografica.

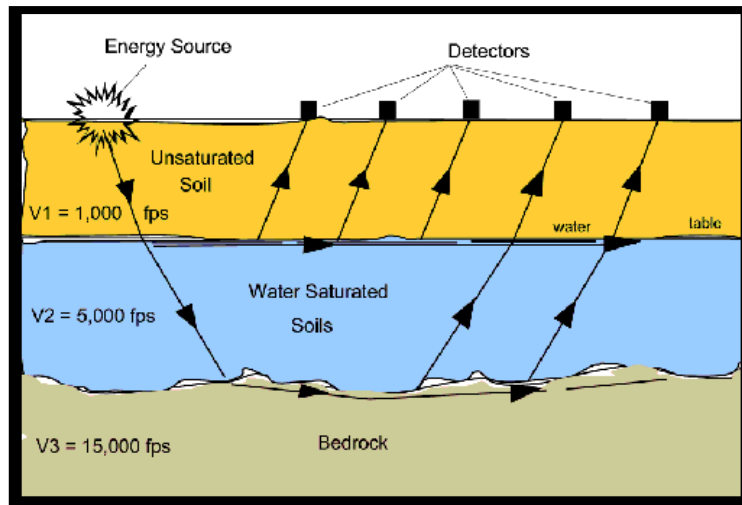


Tratto	Progressiva metrica	Note
D	Da 123 a 132	Tratto esteso con ciottoli/trovanti prevalenti
E	Da 140 a 153	Tratto esteso con ciottoli/trovanti prevalenti
F	Da 166 a 168	Tratto con ciottoli/trovanti prevalenti
G	Da 177 a 185	Tratto con ciottoli/trovanti prevalenti
H	Da 199 a 210	Tratto esteso con ciottoli/trovanti prevalenti

Il grado di risoluzione aumenta notevolmente rispetto ai modelli 1D e consente importanti valutazioni preventive per le tecniche di scavo (in questo caso perforazione teleguidata per posa oleodotto)

Metodi di indagine: sismica a rifrazione

Nel caso del metodo sismico a rifrazione si è passati dal metodo delle «dromocrone» al metodo GRM (general reciprocal method). Tale metodo (elaborato con inversione tomografica su un modello a celle) consente (con un sufficiente numero di scoppi) di individuare anche eventuali inversioni di velocità (che costituiscono il limite della prospezione sismica a rifrazione).



Elaborazione Tradizionale

L'elaborazione della sismica a rifrazione tradizionale richiede modelli di calcolo semplificati come ad esempio velocità costante degli strati, anisotropie di velocità laterali ridotte, spessori degli strati crescenti vs profondità, gradiente di velocità crescente in profondità.

La rifrazione totale avviene sulla superficie del rifrattore secondo l'angolo limite il quale è funzione delle velocità degli strati.

Elaborazione Tomografica

La rifrazione tomografica è stata sviluppata per risolvere i gradienti di velocità, le anisotropie verticali rapide operando, con elementi finiti o distinti, nella definizione di un modello del terreno il più verosimile e completo.

Le traiettorie dei raggi sismici sono curvilinee il cui andamento è determinato da un processo iterativo di affinamento del sistema tempo di percorrenza-velocità.

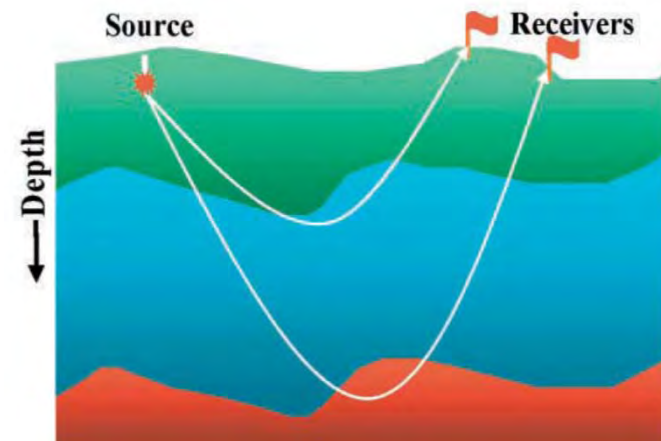


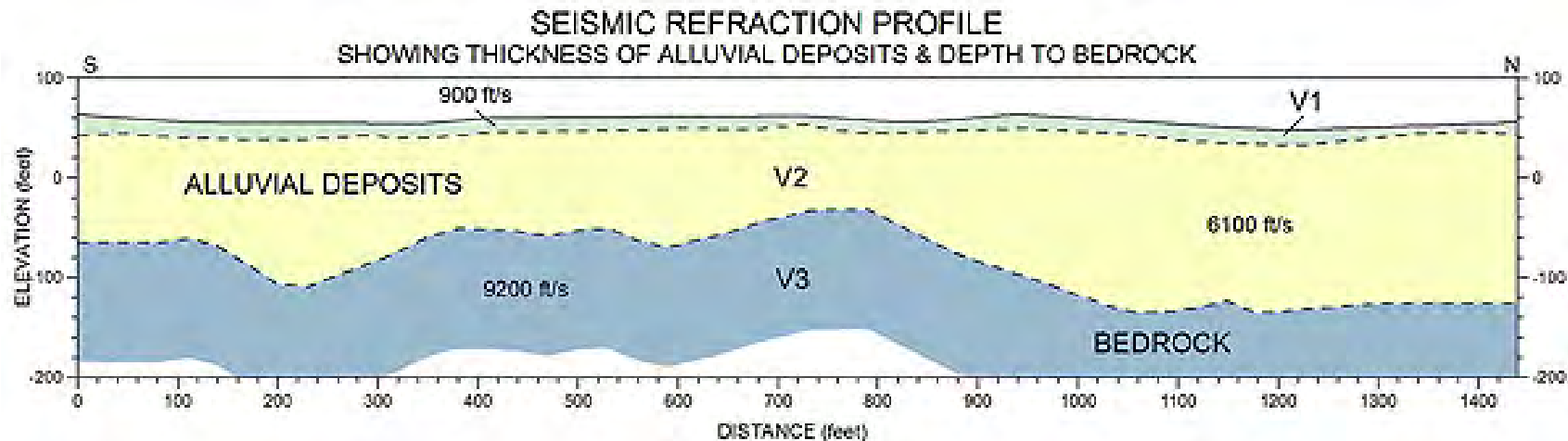
Figure 2: Model and rays for diving waves.

Metodi di indagine: sismica a rifrazione

L'elaborazione «tradizionale» con il metodo delle dromocrone fornisce un modello a strati a velocità crescente basato su pochi punti e assumendo che

- Vi sia velocità costante degli strati,
- Le anisotropie di velocità laterali siano ridotte,
- Vi siano spessori degli strati crescenti vs profondità,
- Il gradiente di velocità sia crescente in profondità

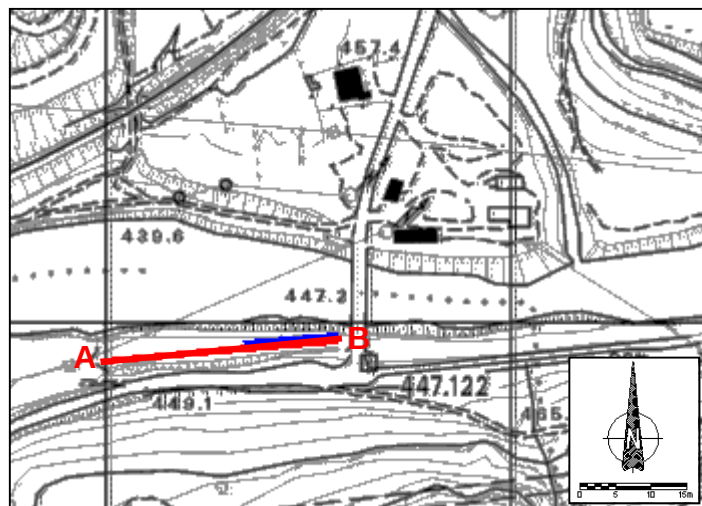
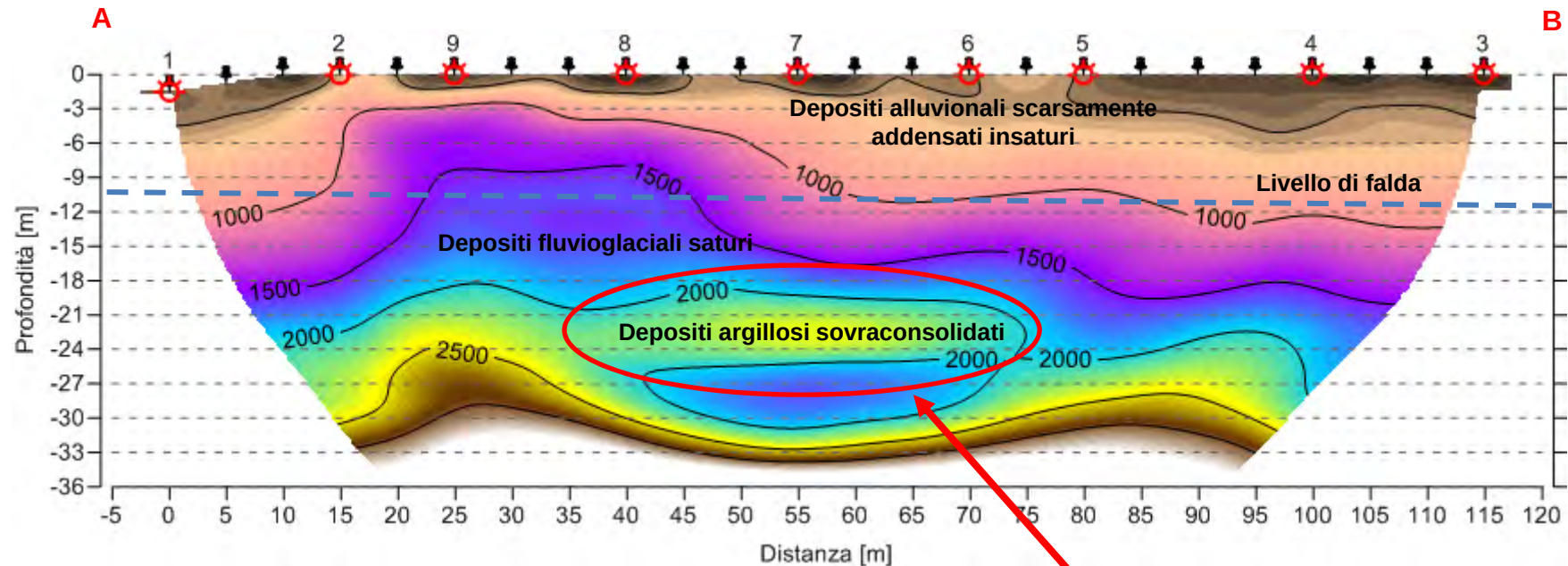
Tali condizioni si realizzano raramente, ad esempio per definire lo spessore della copertura detritica su un substrato lapideo.



Modello a 3 strati ($V1 < V2 < V3$).

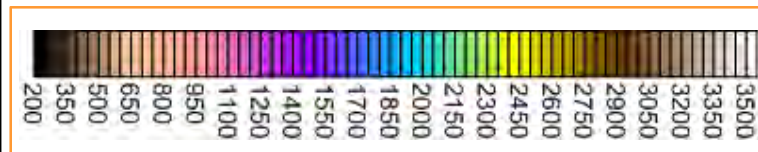
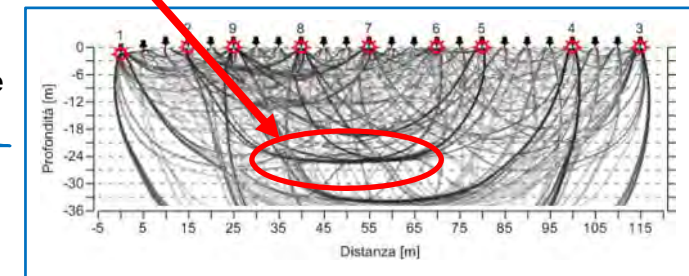
Metodi di indagine: sismica a rifrazione

L'elaborazione tomografica a partire dal metodo GRM fornisce un modello di distribuzione delle velocità delle onde sismiche e riesce a «risolvere» eventuali inversioni di velocità.



Modello di distribuzione
dei raggi sismici

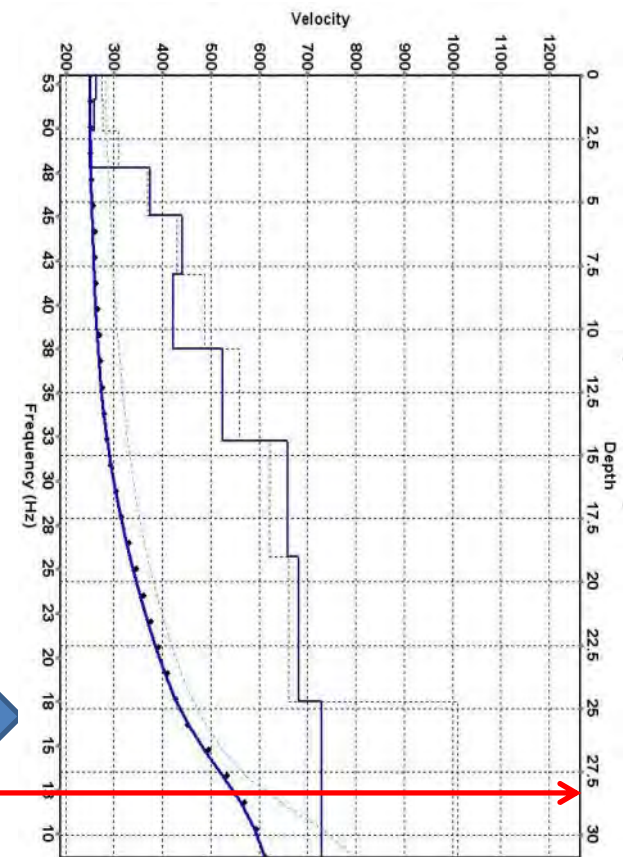
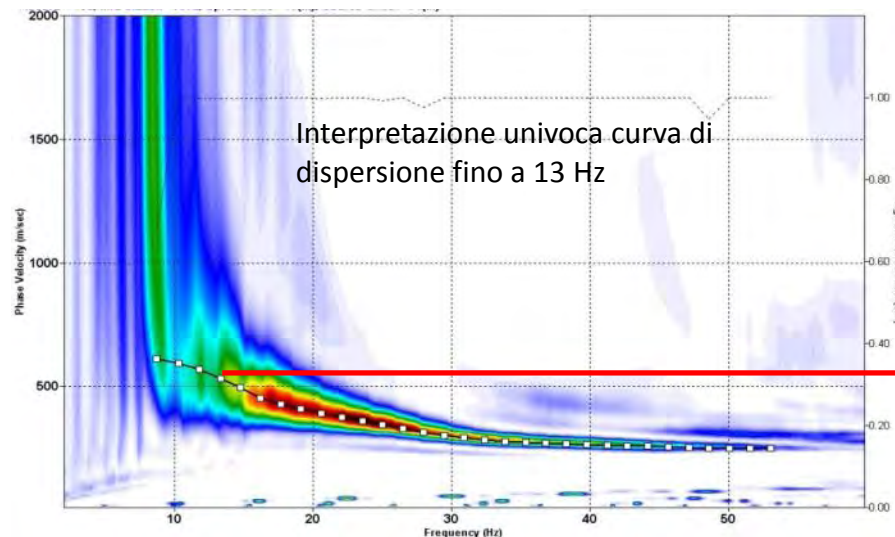
Scala dei colori
Velocità onde di compressione
Vp [m/s]



Metodi di indagine: analisi spettrale di onde superficiali (MASW, SASW)

A partire dalla fine degli anni '90 si sono diffuse le indagini **SASW** (spectral analysis surface waves), meglio note come **MASW** (multichannel analysis of surface waves), per la definizione del profilo di rigidità del sottosuolo. Utilizzate recentemente soprattutto ai fini di classificazione sismica, presentano notevoli e inesplorate potenzialità ai fini geotecnici a compendio o in alternativa al metodo sismico a rifrazione, perché:

- Non risentono della presenza d'acqua (sono onde di taglio)
- Sono molto «energetiche» (non servono sorgenti di grande energia)
- Hanno un favorevole rapporto tra lunghezza dello stendimento e profondità di indagine (prossimo a 1:1)
- Risolvono le inversioni di velocità
- Non utilizzano il metodo di inversione tomografica che, per casi complessi di rifrazione, può «mediare» i valori di velocità
- Forniscono il profilo di rigidità (tipicamente correlato alle proprietà geotecniche e geomeccaniche dei terreni)

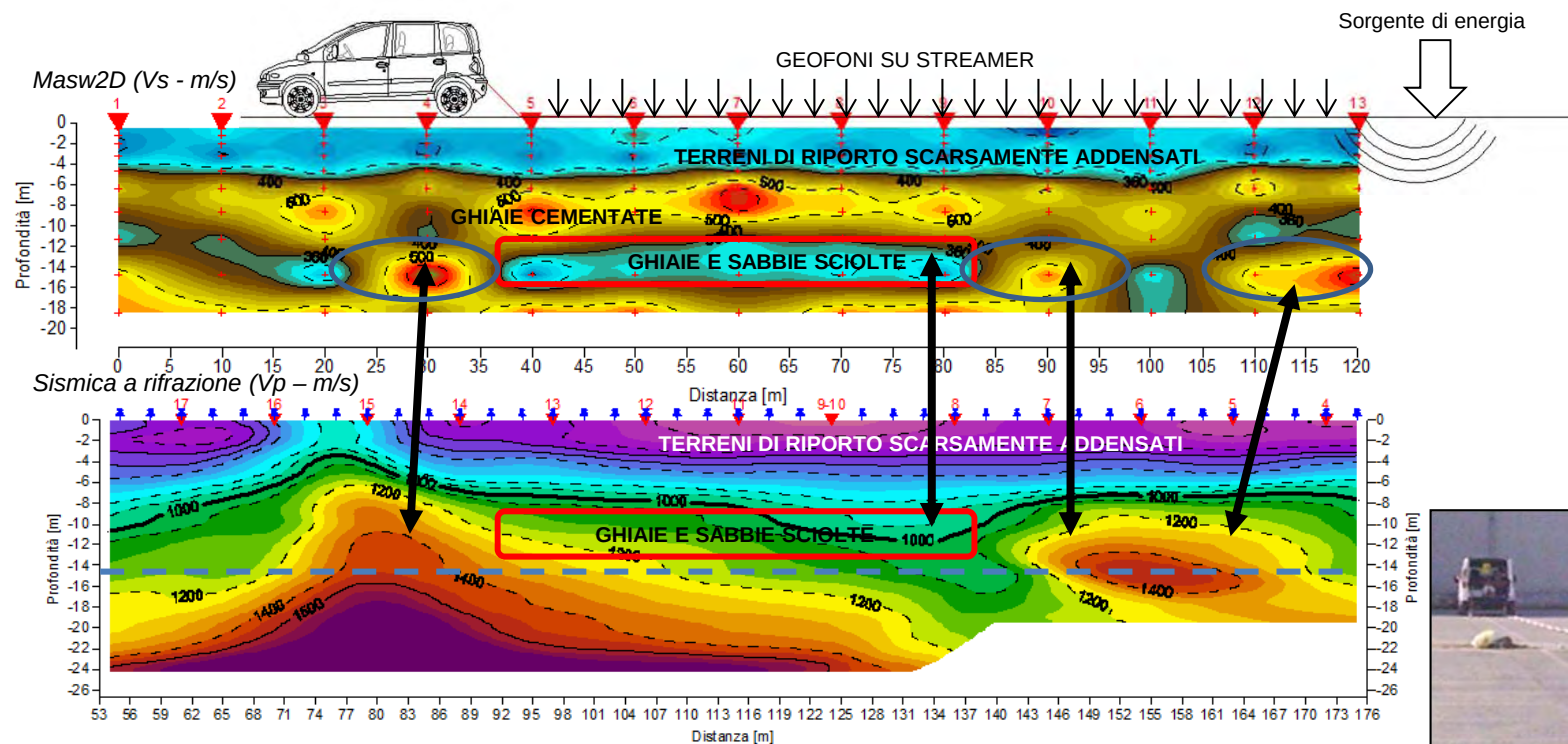


Profilo onde Vs molto attendibile fino a circa 28 m → lunghezza profilo = 46 m

Metodi di indagine: modelli 2DMASW

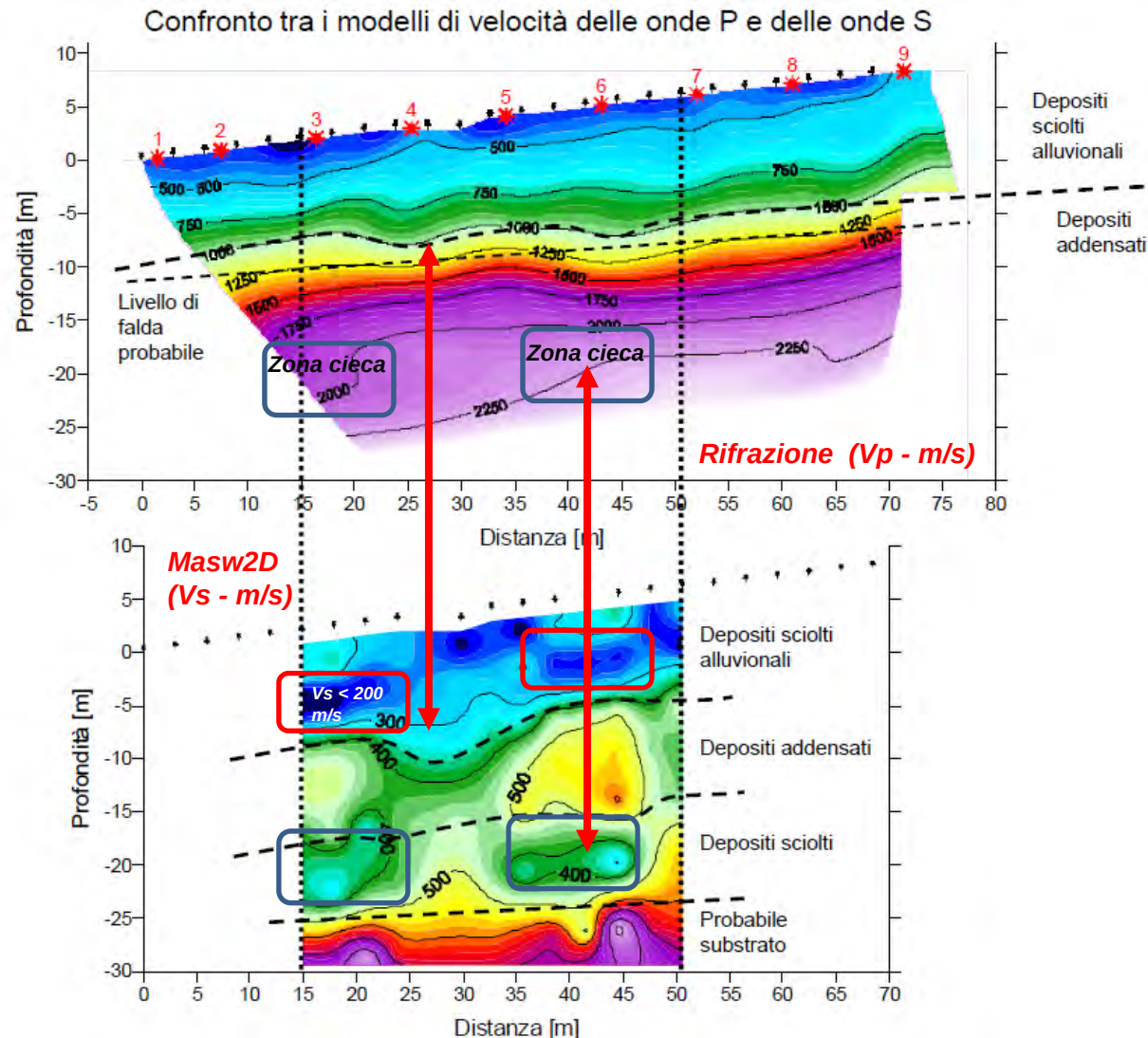
L'acquisizione di profili MASW su allineamento mobile (cavo mobile) permette una definizione di un profilo bidimensionale 2D che può risolvere modelli geologici e geotecnici in ambito urbano difficilmente risolvibili con altre tecniche.

Nel caso sotto riportato si osserva il confronto tra una sezione sismica MASW2D e la medesima sezione sismica a rifrazione: ad eccezione dello strato di riporto superficiale (ben visibile in entrambe le sezioni), la sezione sismica a rifrazione non è in grado di «risolvere» la presenza di stratificazione a velocità inversa



Metodi di indagine: MASW2D

Per la differente modalità di acquisizione e elaborazione dei dati, l'integrazione tra dati MASW2D e dati di tomografia sismica riduce notevolmente l'ambiguità interpretativa



L'esempio a fianco mette a confronto una sezione sismica a rifrazione e una sezione MASW2D in ambiente montano.

Obiettivo di indagine: verificare la profondità del substrato lapideo in relazione a scavi per parcheggio interrato.

Entrambe i metodi di indagine escludono la presenza del substrato lapideo entro i 10 m di profondità, ma il MASW2D permette di dettagliare meglio la presenza di zone «lente» ($V_s < 200$ m/s) nelle zone di scavo, con caratteristiche geotecniche scadenti. Inoltre, localizza il substrato lapideo a circa 25 m di profondità

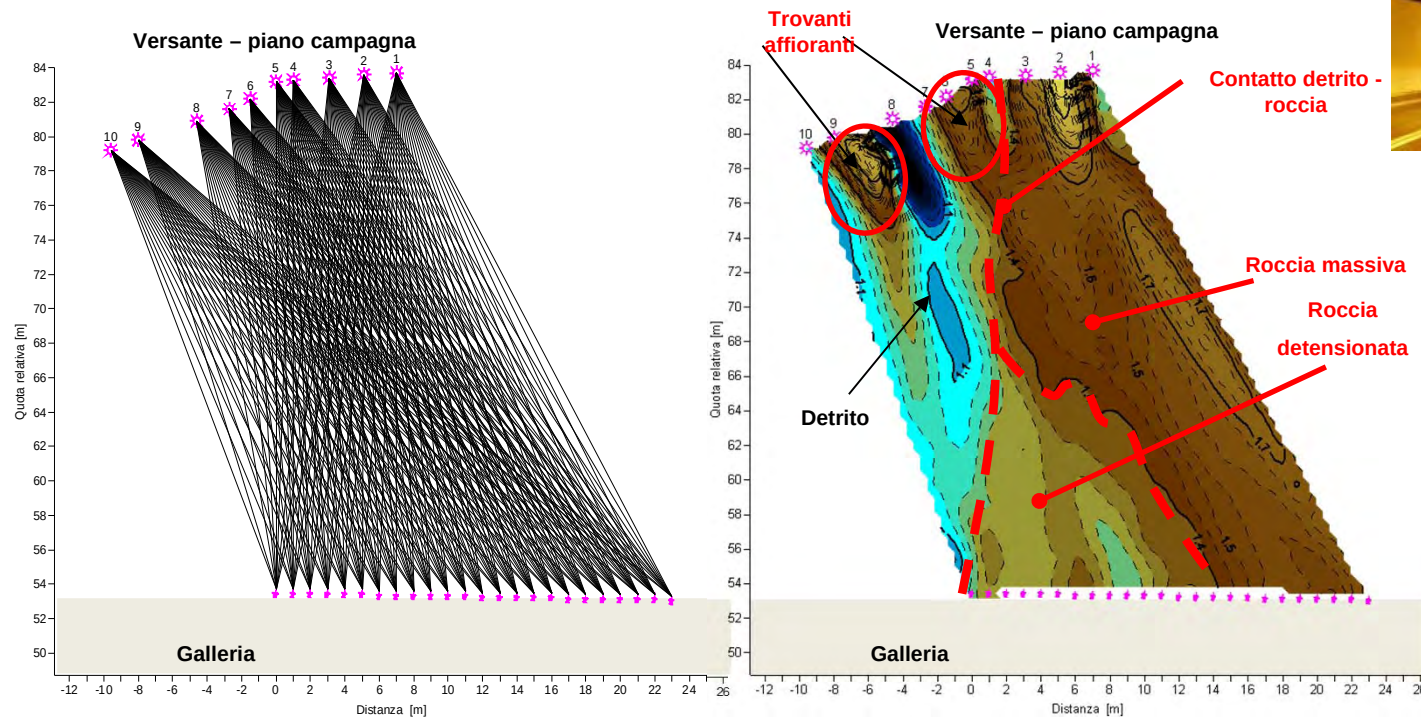
Metodi di indagine: tomografia sismica per tempi di percorso

Algoritmo di elaborazione SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique

Le indagini sismiche “in trasparenza” ricostruiscono un modello di velocità di onde di compressione o di taglio mediante riconoscimento delle traiettorie dirette (quindi non riflesse o rifratte). Per l’acquisizione dei dati si eseguono specifiche misure con energizzazione su un lato del solido da investigare (nell’esempio sotto il versante sopra la galleria) e ricezione sul lato opposto (nel nostro caso il paramento della galleria), sfruttando le onde dirette di primo arrivo (misura in trasparenza). La presenza di differenti litolipi o di zone fratturate all’interno dell’ammasso roccioso è correlata alle variazioni dei valori di velocità delle onde elastiche e viene generalmente evidenziata da zone a minor velocità delle onde sismiche. Il potere risolutivo della tecnica è legato essenzialmente:

1. al numero ed alla distribuzione delle misure attorno alla sezione indagata;
2. alla lunghezza d’onda della perturbazione sismica, la quale a sua volta dipende dalla velocità e dalla frequenza principale di oscillazione dell’onde sismiche;

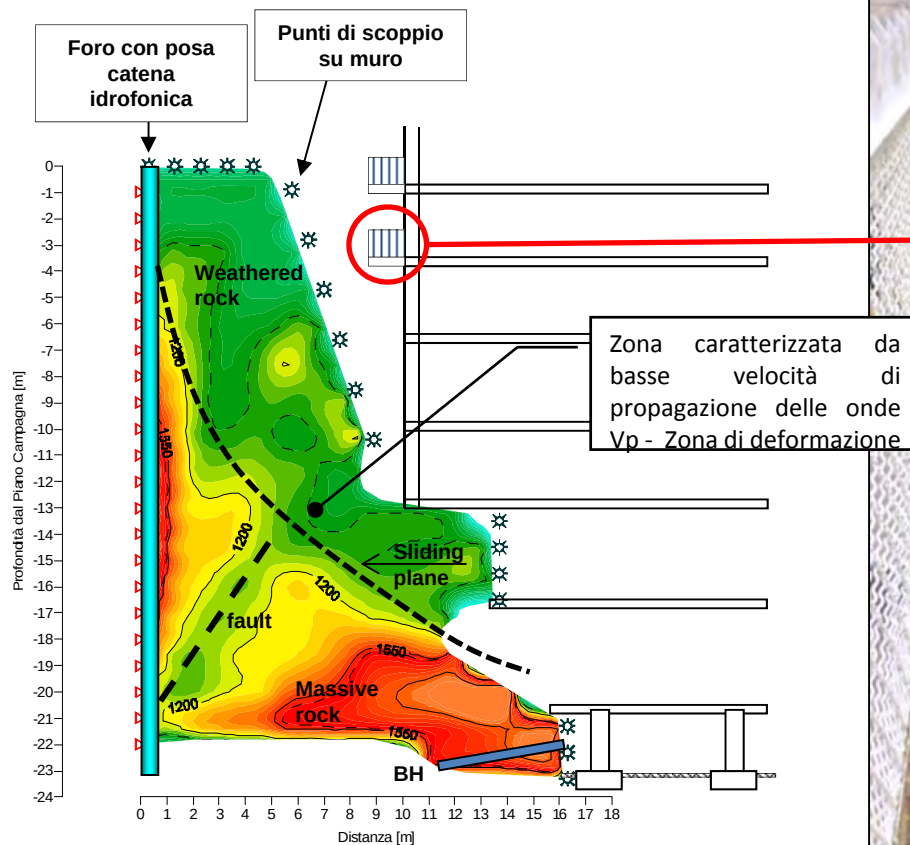
Il codice di calcolo utilizzato per la modellazione tomografica permette di utilizzare nell’algoritmo di inversione tomografica (SIRT) un sistema di ricostruzione per mezzo di raggi curvilinei che migliora il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala stabilizzando la soluzione dell’algoritmo d’iterazione



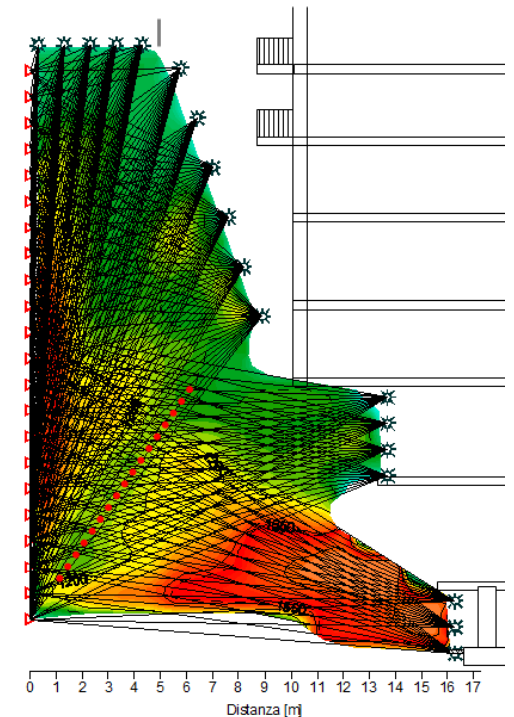
Metodi di indagine: tomografia sismica per tempi di percorso

Il metodo «in trasparenza» viene applicato soprattutto nelle **prove in foro cross-hole**, ma trova ottima applicabilità in tutti i casi dove vi sia la possibilità di attraversare il mezzo con raggi sismici:

1. Tra foro e parete (VEDI ESEMPIO SOTTOSTANTE)
2. Tra scavo e superficie (DA GALLERIA VERSO SUPERFICIE, ESEMPIO PRECEDENTE)



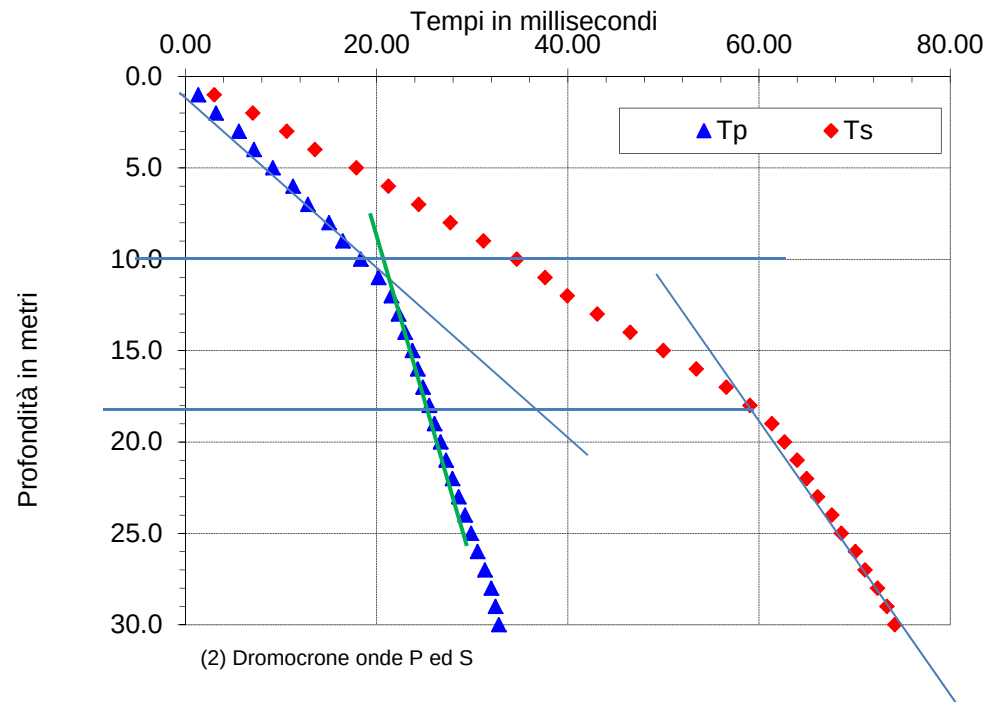
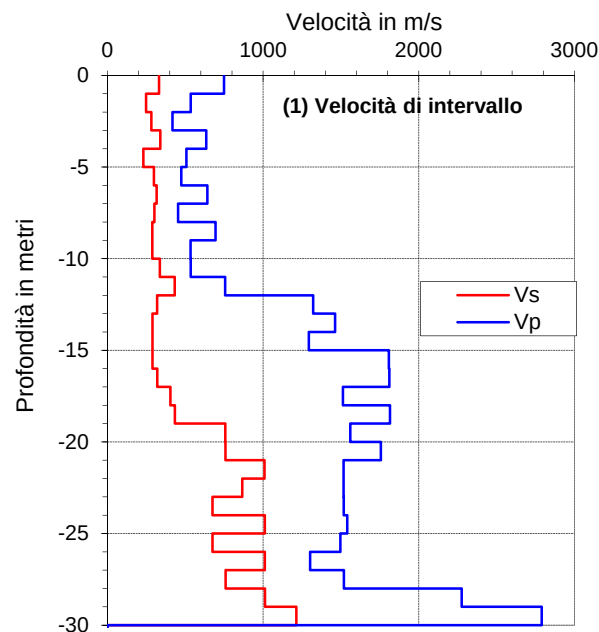
Traiettorie raggi sismici



Metodi di indagine: metodo sismico DOWN-HOLE

Anche la prova sismica Down-Hole prevede la misura di onde dirette, mediante l'inserimento di un geofono da foro o di una catena geofonica all'interno di un foro attrezzato (foto 1), e un impulso sismico (scoppio) all'esterno del foro ad una distanza prefissata (generalmente 2 m da bocca foro). Per la misura delle onde di taglio si utilizza un energizzatore tangenziale (foto 2).

La prova sismica *downhole* viene generalmente utilizzata per definire il profilo di rigidità dei terreni che, accoppiato al profilo stratigrafico derivante dalla perforazione del foro, fornisce un modello geotecnico completo del sottosuolo (moduli di deformabilità). L'elaborazione dei dati di primo arrivo delle onde sismiche di compressione e di taglio viene eseguita con il metodo «velocità di intervallo» (1) o con riconoscimento delle dromocrone (2) e calcolo della velocità media per livelli omogenei



Metodi di indagine: TDEM (ELETTROMAGNETICO IN DOMINIO DI TEMPO)

Il TDEM rappresenta un metodo di «nicchia» utilizzato per esplorazioni medio-profonde (mediamente 200-300 m), in particolare per ricerca d'acqua o per modelli geologici profondi. Presenta molti limiti di applicabilità, ma **risente di una recente «rinascita» per colmare il vuoto tra i 100 e i 200-300 m di profondità.**

La tipica configurazione d'indagine per sondaggi di resistività è composta da un trasmettitore collegato ad una spira di cavo elettrico (quadrata, rettangolare o circolare) disposto sul terreno ed una spira ricevente, di uguali dimensioni. La dimensione della spira è proporzionale alla profondità di indagine (maggiore è l'area della spira e maggiore è la profondità di indagine).

Il principio di funzionamento del metodo è basato sul fatto che, quando un flusso di corrente viene interrotto, esso non decade istantaneamente a zero, provocando la variazione del campo magnetico primario. Questa variazione induce istantaneamente nel sottosuolo, in prossimità del cavo trasmettente, anelli di correnti parassite che si diffondono nel sottosuolo verso il basso e verso l'esterno. Queste correnti producono, a loro volta, un campo magnetico secondario che si oppone alla variazione del campo magnetico primario. La variazione delle intensità delle correnti parassite, e il decadimento del campo magnetico secondario sono influenzati dalla resistività dei terreni e perciò la misura di questa variazione in funzione del tempo fornisce, grazie a elaborazione con appositi software, la misura della resistività in funzione della profondità

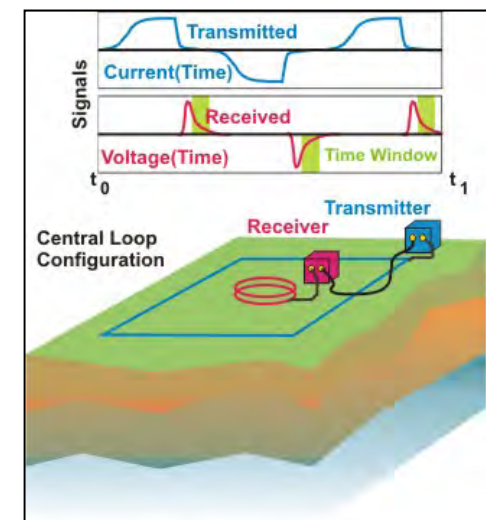
Ricevitore TDEM FAST TEM



Stesa del loop



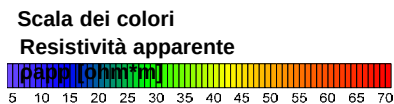
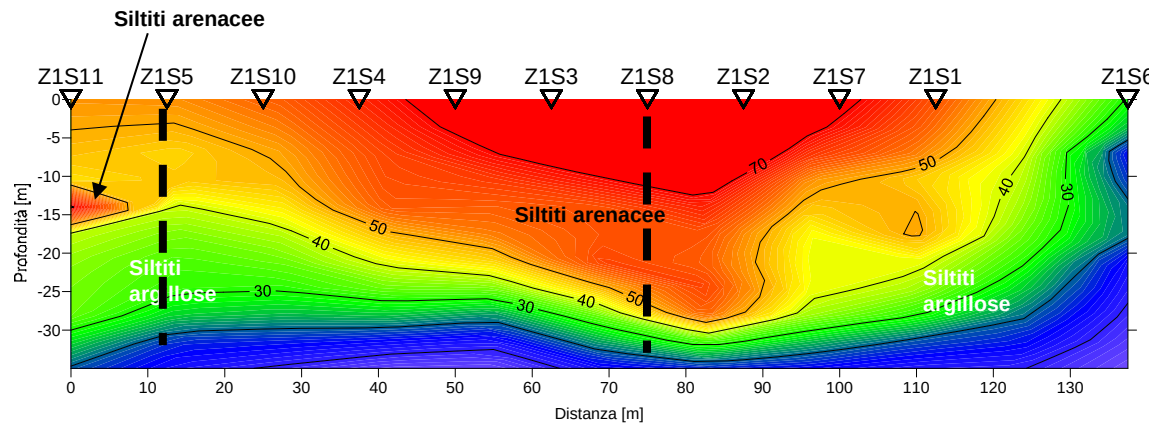
Ricevitore TDEM TERRA TEM



Metodi di indagine: TDEM (ELETTROMAGNETICO IN DOMINIO DI TEMPO)

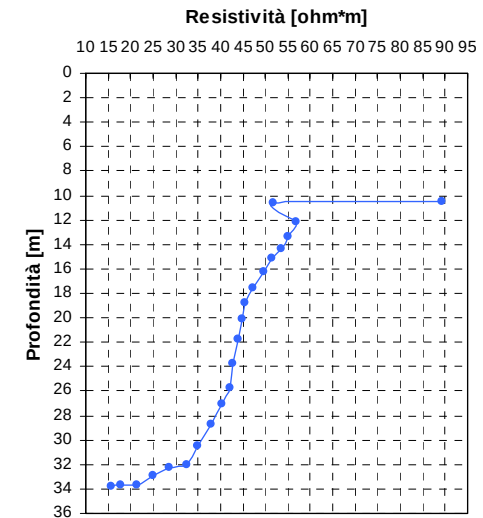
Come per i SEV, utilizzando le elettro-stratigrafie dei **sondaggi TDEM** si può ottenere una sezione degli elettrostrati per interpolazione dei dati, esattamente come una sezione geologica costruita sulla base di sondaggi geognostici

Il parametro è sempre la resistività elettrica dei terreni...

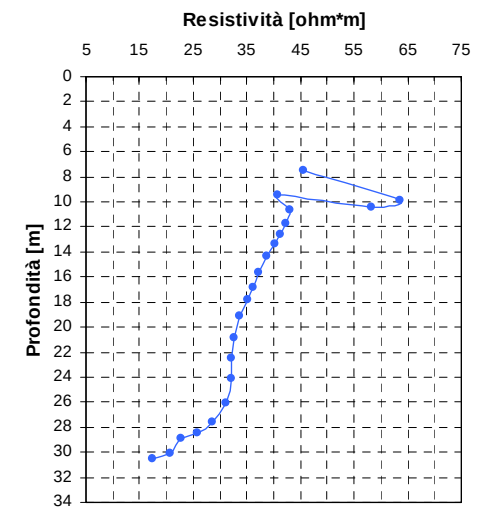


In generale fornisce sezioni a risoluzione inferiore rispetto alla tomografia elettrica e richiede spazi molto ampi (per arrivare a 200-300 m di profondità occorrono spire di 200x200 m). E' utile utilizzarlo in contesti non urbanizzati e per profondità molto elevate

Zona 1 - profilo S8



Zona 1 - profilo S5

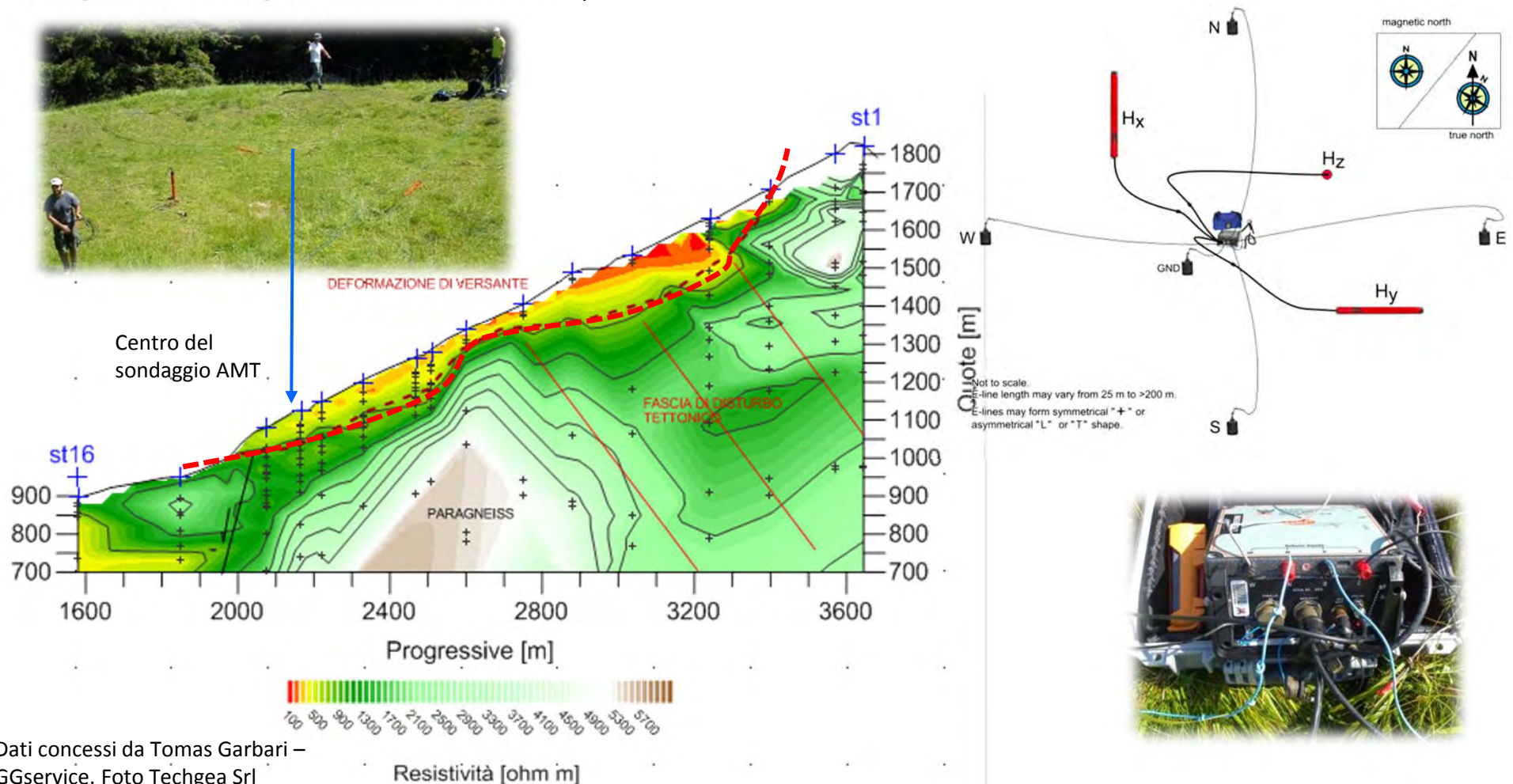


Dati archivio Techgea Srl

Metodi di indagine: AMT (AUDIOMAGNETOTELLURICO)

I sistemi magnetotellurici (AMT $\rightarrow$ 10 Hz-10000 Hz) appartengono tipologicamente al gruppo di indagini EM e sono impiegati per rilevare l'impedenza elettrica alla superficie terrestre utilizzando una serie di misure simultanee delle fluttuazioni del campo elettrico e magnetico locale.

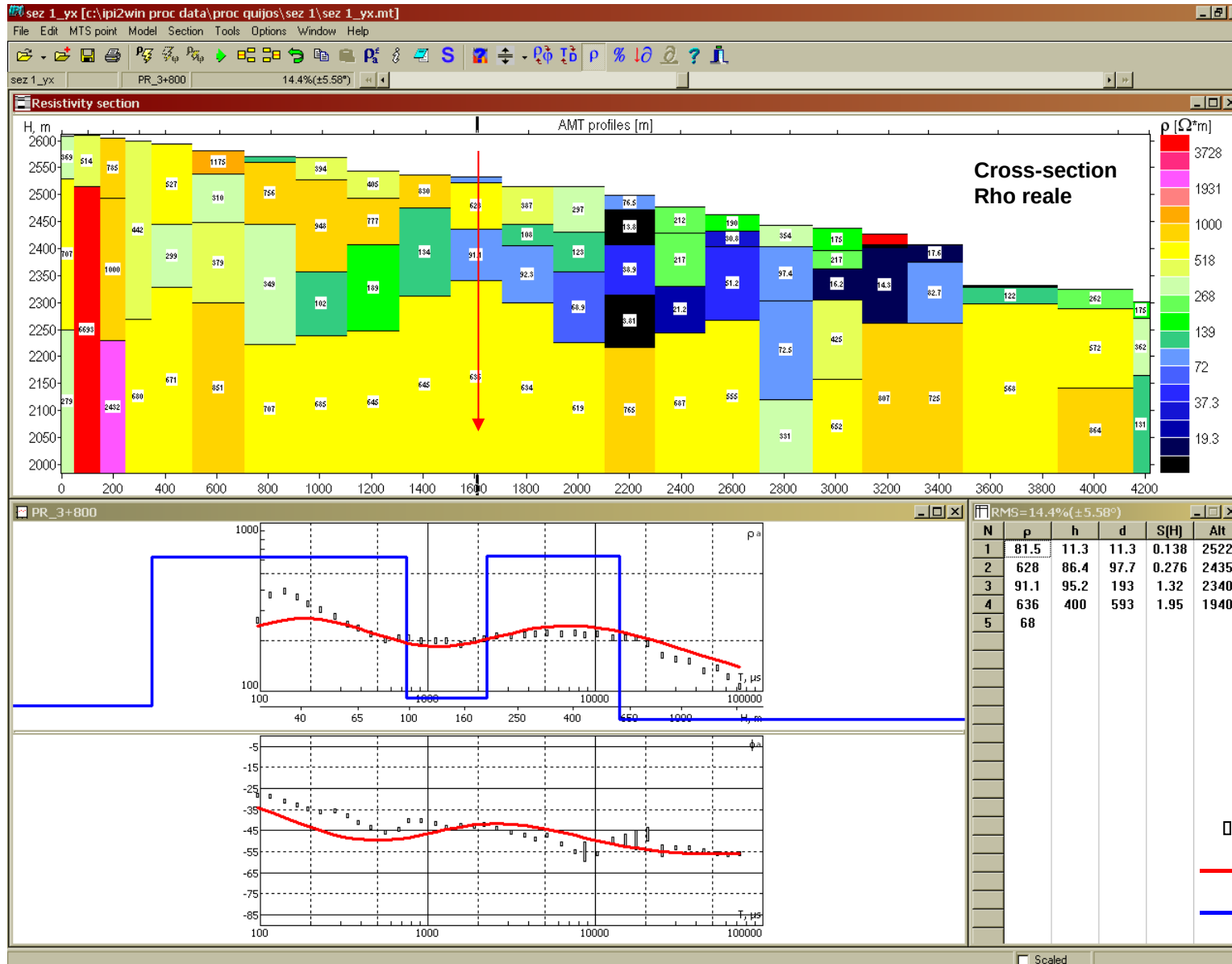
Tali misurazioni di terreno sono fatte per un periodo di diversi minuti secondo bande di frequenza stabilite che, per la strumentazione da noi impiegata, variano da 1 Hz fino a 40 KHz. Dalle serie temporali si estrae una curva di resistività elettrica del sottosuolo che, per sondaggi adiacenti, consente di ottenere un modello 2D o 3D del sottosuolo fino a grandi profondità (fino a 1000-2000 m). Il risultato finale è molto simile ad una sezione geoelettrica tomografica, con un grado di risoluzione molto più basso.



Dati concessi da Tomas Garbari –
GGservice. Foto Techgea Srl

Metodi di indagine: AMT (AUDIOMAGNETOTELLURICO)

Esempio di elaborazione dati → spaziatura tra i sondaggi AMT verticali = 200 m



Pianificazione e progettazione delle indagini geofisiche

FASE 1 → Stabilire gli obiettivi di indagine (profondità, dimensioni, grado di risoluzione, ecc.) in relazione alle proprietà dei materiali coinvolti nell'indagine e stabilire qual è il contrasto delle proprietà fisiche più rilevante ai fini della ricerca.

Di fatto abbiamo considerato sempre due sole proprietà fisiche:
la resistività elettrica e la velocità di propagazione delle onde sismiche.

Semplicando...

→ La **resistività elettrica** (da prove geoelettriche o elettromagnetiche) è più indicata per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del sottosuolo

→ La **velocità delle onde sismiche** è più indicata per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo

DEFINIRE GLI OBIETTIVI

VERIFICA «RIPPABILITA'» SCAVO DI FONDAZIONE DI PALO ALTA TENSIONE IN CONTESTO MONTANO (ROCCIA)

Profondità → entro 10 m

Dimensioni → estensione laterale di 20 m
(estensione massima scavo)

Grado di risoluzione → elevato

La scelta è ricaduta sul metodo sismico a rifrazione accoppiato ad un profilo MASW (per escludere eventuali sovrastime di velocità V_p legate alla presenza d'acqua)

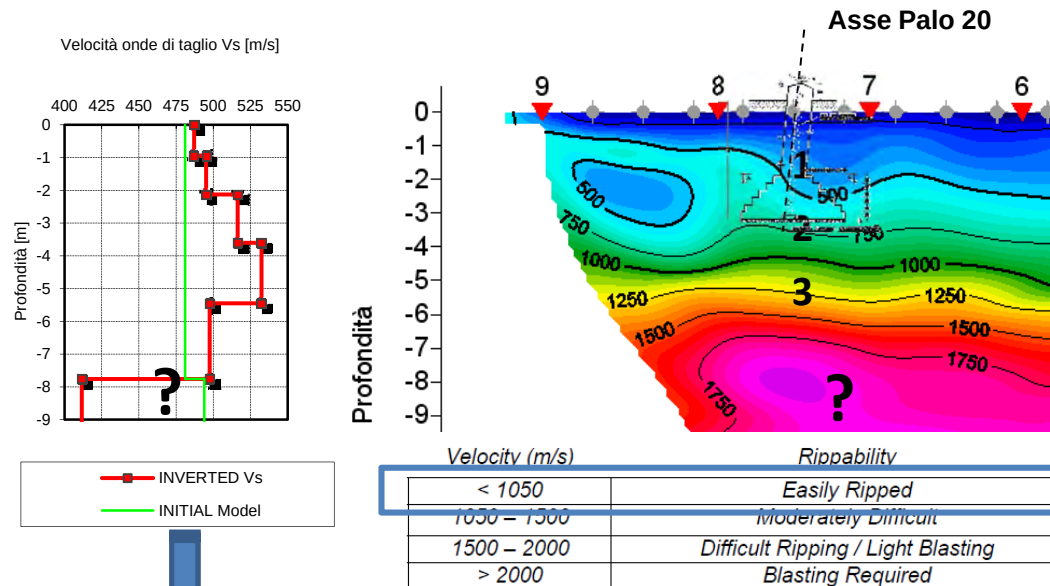
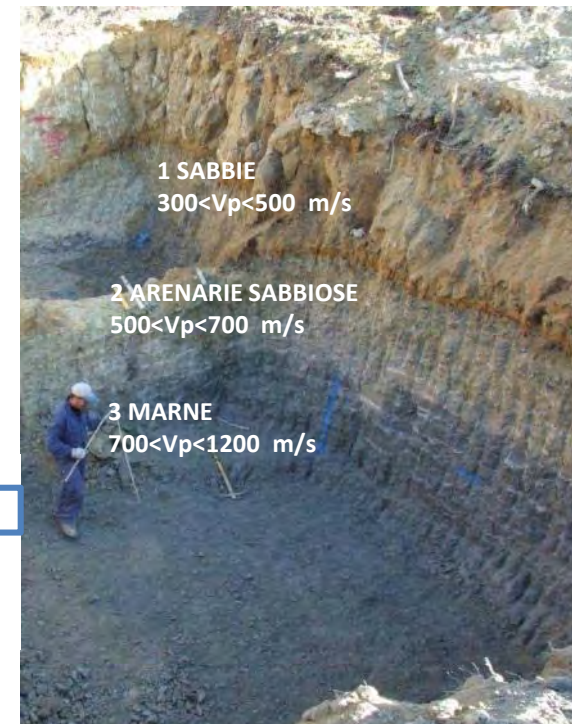


Table 1. Standard Caltrans Rippability Chart



Il MASW evidenzia un'inversione di velocità che la sismica a rifrazione non rileva

Marcate differenze litostratigrafiche. Minime differenze geomeccaniche (ROCCE TENERE E RIPPABILI). Le prove sismiche sono correlate alle proprietà geotecniche e geomeccaniche dei terreni/rocce

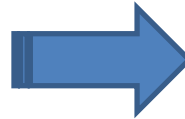
DEFINIRE GLI OBIETTIVI

VALUTARE LO SPESSORE DI UNA COLTRE DETRITICA A GROSSI BLOCCHI SU DEPOSITI MORENICI PER
VERIFICARE LE CONDIZIONI DI STABILITA' DEL VERSANTE

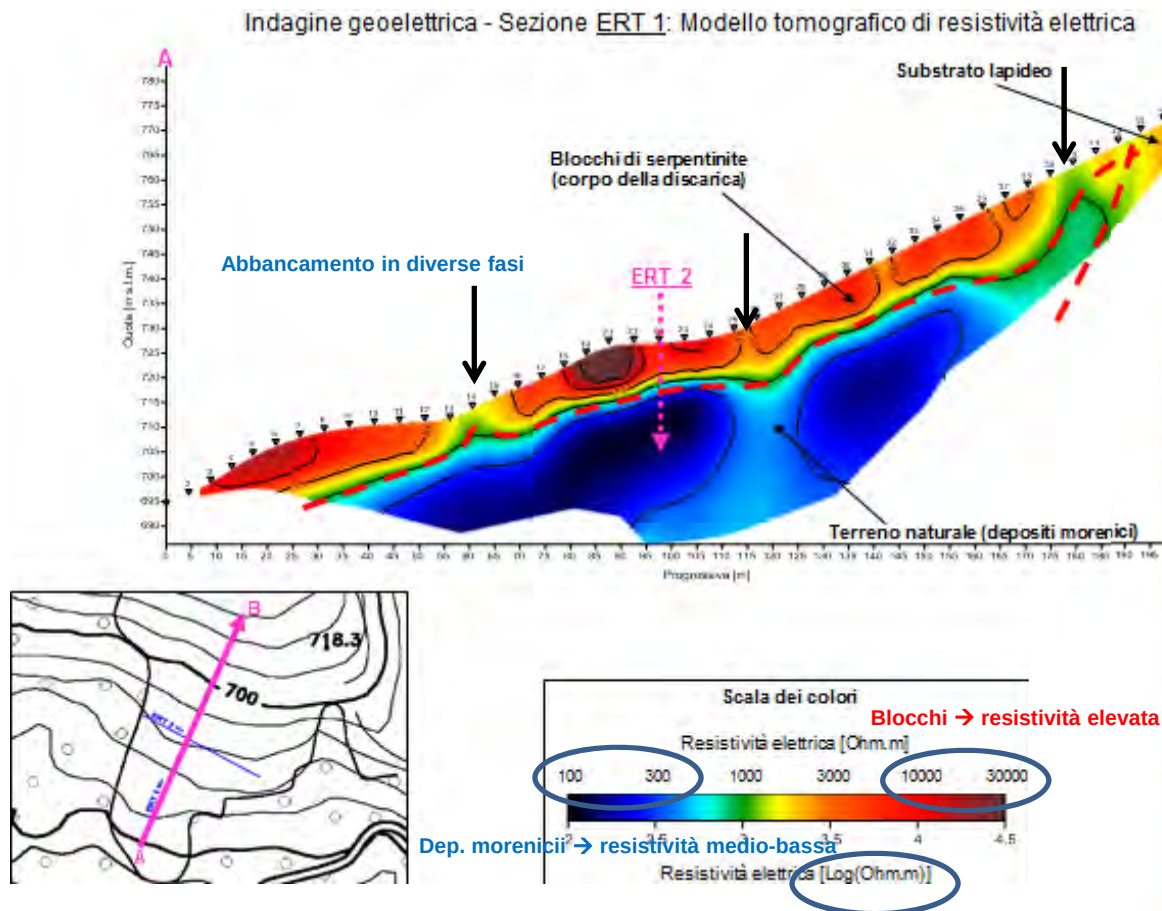
Profondità → entro 20 m

Dimensioni → estensione versante 250 m

Grado di risoluzione → elevato

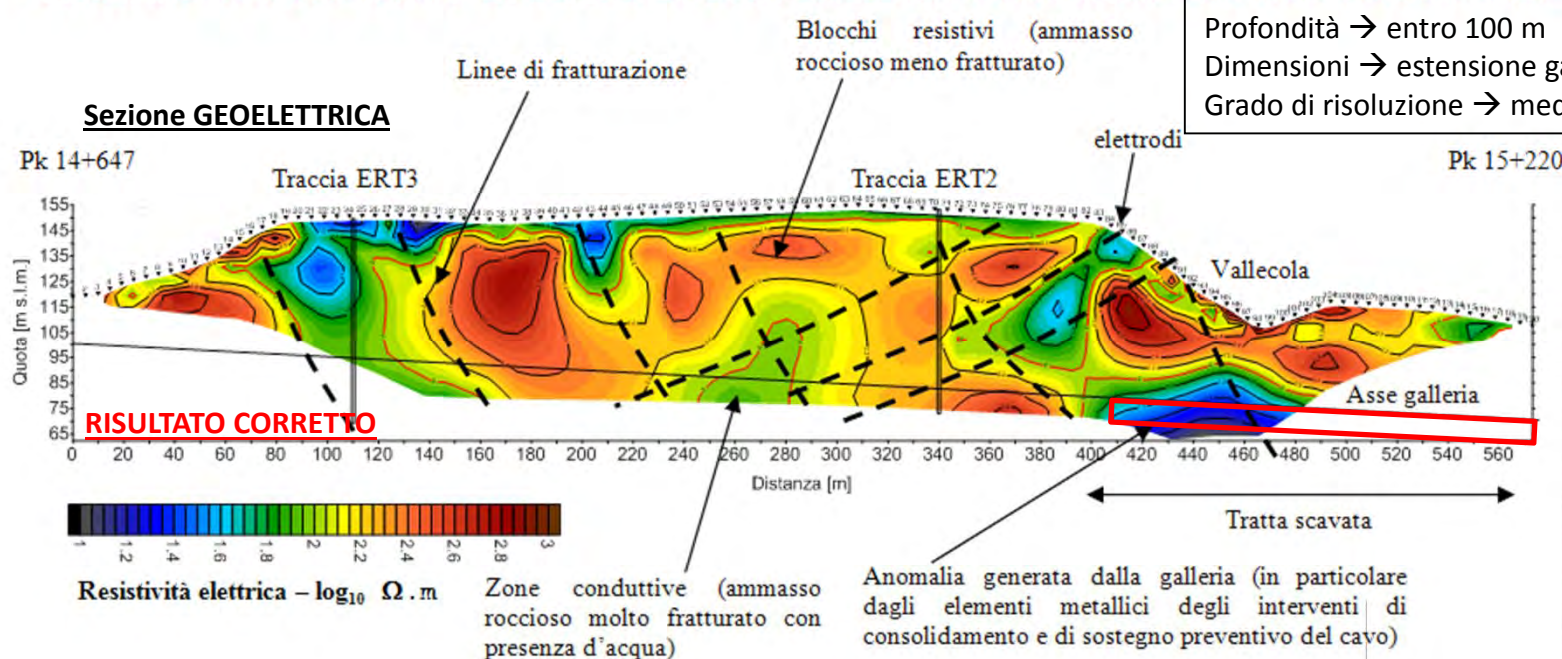


La scelta è ricaduta sul metodo geoelettrico per il forte contrasto tra detrito (resistività elettrica elevata) e roccia (resistività elettrica bassa). Il contrasto sismico tra detrito e depositi morenici è minimo e sfavorevole per metodi sismici



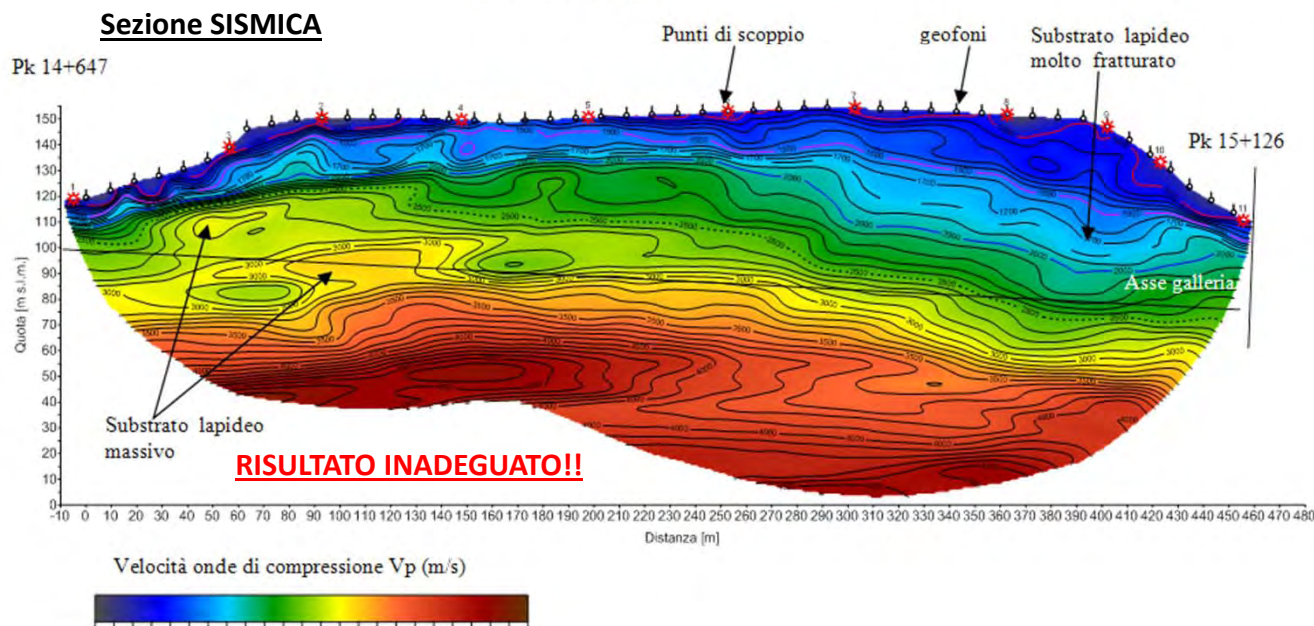
DEFINIRE GLI OBIETTIVI

VALUTARE LE CONDIZIONI DI SCAVO DI UNA GALLERIA CON AMMASSO ROCCIOSO SCADENTE



Per la necessità di valutare sia l'assetto geologico-idrogeologico e sia le condizioni dell'ammasso roccioso (caratteristiche geomeccaniche) si è scelto l'utilizzo combinato del metodo geoelettrico e sismico a rifrazione. L'utilizzo combinato di diverse metodologie di indagine riduce l'ambiguità interpretativa

Per la complessità geologica del sottosuolo il metodo sismico (pur con adeguata energizzazione, 11 scoppi con esplosivo, e con ottima copertura dei raggi sismici) si è dimostrato inadeguato alla ricostruzione del modello geologico e idrogeologico rilevato in fase di scavo - «BLOCCHI» LAPIDEI DELIMITATI DA ZONE DI TAGLIO



Pianificazione e progettazione delle indagini geofisiche

FASE 2 →

Valutare le condizioni del sito in relazione all'obiettivo di indagine (**posso tracciare linee sufficientemente lunghe $H \rightarrow V$? Posso trasportare facilmente la strumentazione? Posso tracciare una maglia regolare? Posso posizionare i geofoni/elettrodi/sensori magnetici?**) → Verificare la presenza di ostacoli (strade, ponti, viadotti, fiumi, ecc.) → **LOGISTICA**

Verificare eventuali disturbi/interferenze (**sono presenti sottoservizi, cavi elettrici aerei AT, rumore ambientale che può interferire con le misure geofisiche**) → **RUMORE AMBIENTALE**

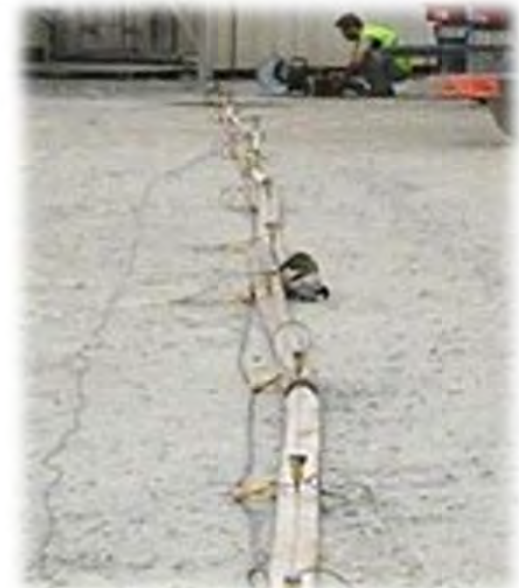
Pianificare le indagini in relazione all'obiettivo (dimensioni, profondità, grado di risoluzione) → **QUANTIFICAZIONE**

Logistica: posizionamento sensori

Valutare le condizioni di posizionamento dei sensori

In caso di condizioni «difficili» → favorire un ottimale contatto sensore-terreno per una ottimale diffusione del segnale geofisico nel sottosuolo

Favorire un accoppiamento ottimale tra geofoni e mezzo da indagare



Migliorare la resistenza di contatto per gli elettrodi



Perforazione di fori di alloggiamento per elettrodi

Logistica: sorgenti di energia

Valutare le sorgenti di energia necessarie



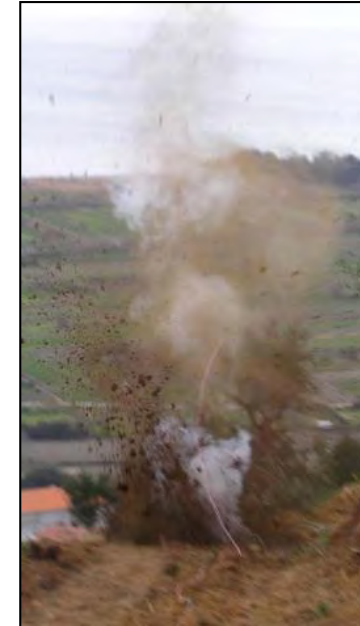
Mazza → si porta ovunque e ... never fails!



Fucile sismico → si porta quasi ovunque e ... «sometimes» fails!



«bolide» → si porta solo in alcuni posti



Esplosivo → richiede permessi speciali (tempi lunghi di attesa e non si può usare ovunque)

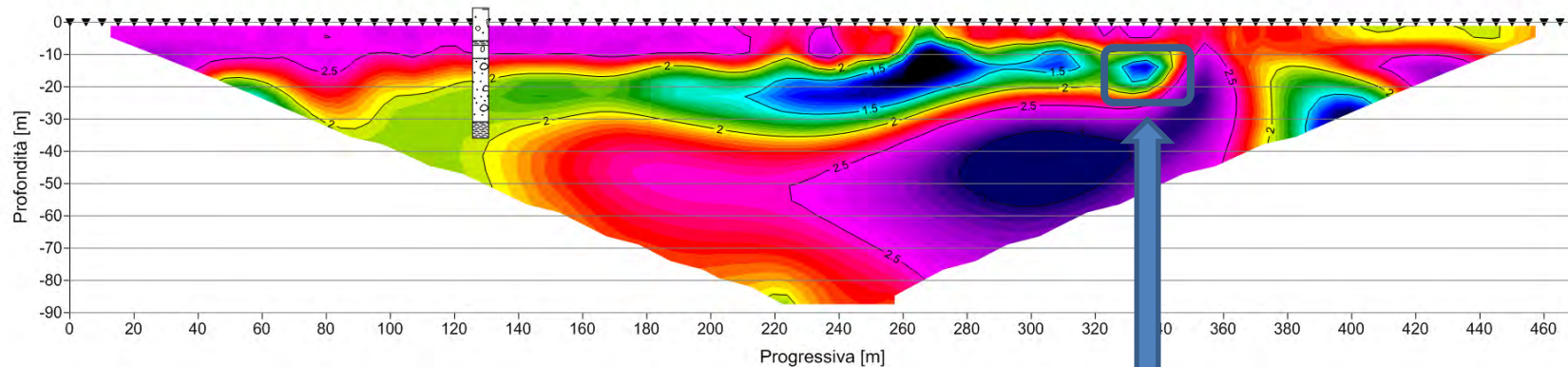


+ energia... + problemi

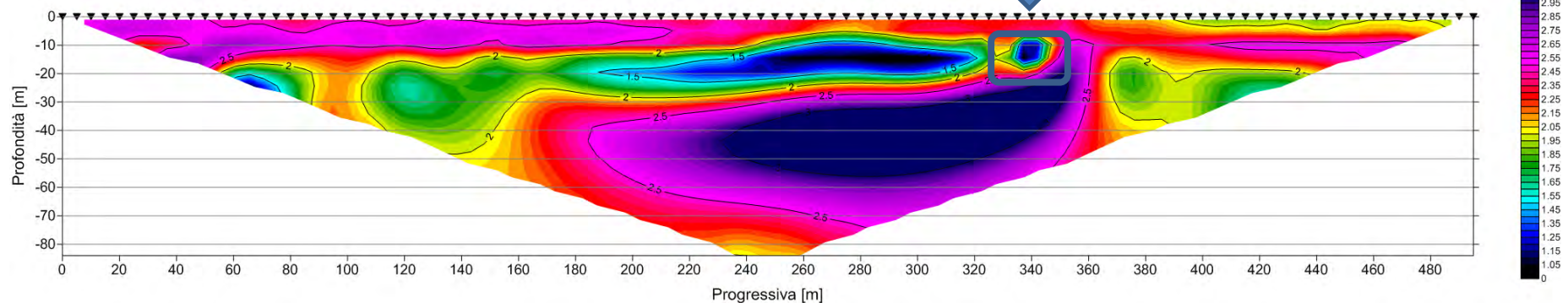
PROGETTAZIONE: SPAZIATURA SENSORI

Quanto è importante la spaziatura tra i sensori? Dipende dall'obiettivo di indagine. Nel caso della definizione dell'assetto litostratigrafico di una copertura glaciale l'utilizzo di **48 sensori a spaziatura 10 m** o di **100 elettrodi a spaziatura 5 m** non comporta differenze apprezzabili (STRATIFICAZIONE SUBORIZZONTALE CON SPESSORI PLURIMETRICI)

Lippman - WS 48 Canali



Lippman - W 100 Canali



TEST EFFICIENZA E RISOLUZIONE METODO GEOELETTRICO

PROGETTAZIONE: SPAZIATURA SENSORI

IN ALTRI CASI E' NECESSARIO UTILIZZARE SPAZIATURE TRA I SENSORI MOLTO RIDOTTE

Recommended Values in ()														
Depth (Z _{max}) ¹ (ft)	Source (S) ² (lb)	Receiver (R) ³ (Hz)	Receiver Spread (RS) (ft)			SR Move ⁶ (dx)			Recording ⁸					
			Length ⁴ (D)	Source Offset ⁵ (X ₁)	Receiver Spacing (dx) 24-ch* 48-ch	Lateral Resolution ⁷			dt ⁹ (ms)	T ¹⁰ (sec)	Vertical Stack ¹¹			
						High	Medium	Low			C	N	VN	
≤ 5.0	≤ 1 (1)**	4.5–100 (40)	5–15 (10)	1–15 (2)	0.2–0.6 (0.3)	0.1–0.3 (0.2)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
5–15	1–5 (5)	4.5–40 (10)	5–45 (30)	1–9 (5)	0.2–2.0 (1.0)	0.1–1.0 (0.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
15–30	5–10 (10)	≤ 10 (4.5)	15–90 (50)	3–18 (10)	0.5–4.0 (2.0)	0.2–2.0 (1.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
30–60	≥ 10 (20)	≤ 10 (4.5)	30–180 (120)	6–36 (30)	1.0–8.0 (4.0)	0.5–4.0 (2.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
60–100	≥ 10 (20)	≤ 4.5 (4.5)	60–300 (200)	12–60 (40)	2–12 (8)	1–6 (4)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
100–150	≥ 10 (20) or passive (4.5)	≤ 4.5 (4.5)	100–450 (300)	20–90 (60)	4–18 (12)	2–9 (6)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–3.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
> 150	≥ 10 (20) or passive (4.5)	≤ 4.5 (4.5)	> 150 (450)	> 30 (100)	> 6.0 (20)	> 3.0 (10)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	≥ 1.0 (2.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)

**Values listed here are by no means definitive and required. There can always be a tolerance of, at least, ±20% to the most recommended values.

¹maximum depth to be investigated, ²weight of hammer in pounds, ³natural frequency of geophone, ⁴approximate total length of receiver spread (D=mZ_{max} with 1 ≤ m ≤ 3), ⁵distance between source and the closest receiver (X₁=κD with 0.2 ≤ κ ≤ 1.0), ⁶distance in receiver spacing (dx) that the source (S) and receiver (R) setup moves after acquiring data at one location, ⁷degree of lateral resolution being sought, ⁸recording parameters for seismograph, ⁹sampling interval in milliseconds (ms), ¹⁰total recording time in seconds (sec), ¹¹number of stacking data in seismograph's memory before being saved under different conditions of calm (C), noisy (N), and very noisy (VN) environment, respectively, ¹²acquisition filter (e.g., low-cut, high-cut, etc.). *24-channel acquisition system.

Recommended Values in ()														
Depth (Z _{max}) ¹ (m)	Source (S) ² (lb)	Receiver (R) ³ (Hz)	Receiver Spread (RS) (m)			SR Move ⁶ (dx)			Recording ⁸					
			Length ⁴ (D)	Source Offset ⁵ (X ₁)	Receiver Spacing (dx) 24-ch* 48-ch	Lateral Resolution ⁷ High Medium Low			dt ⁹ (ms)	T ¹⁰ (sec)	Vertical Stack ¹¹ C N VN			
≤ 1.0	≤ 1 (1)**	4.5–100 (40)	1–3 (2.0)	0.2–3.0 (0.4)	0.05–0.1 (0.1)	0.02–0.05 (0.05)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
1–5	1–5 (5)	4.5–40 (10)	1–15 (10)	0.2–15 (2)	0.05–0.6 (0.5)	0.02–0.3 (0.25)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (0.5)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
5–10	5–10 (10)	≤ 10 (4.5)	5–30 (20)	0.5–10 (4)	0.2–1.0 (1.0)	0.1–0.5 (0.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	0.5–1.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
10–20	≥ 10 (20)	≤ 10 (4.5)	10–60 (30)	2–60 (10)	0.4–2.5 (1.5)	0.2–1.2 (1.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (0.5)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
20–30	≥ 10 (20)	≤ 4.5 (4.5)	20–90 (50)	4–90 (10)	0.8–3.8 (2.0)	0.4–1.9 (1.5)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–2.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
30–50	≥ 10 (20) or passive (4.5)	≤ 4.5 (4.5)	30–150 (70)	6–150 (15)	1.2–6.0 (3.0)	0.6–3.0 (2.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	1.0–3.0 (1.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)
> 50	≥ 10 (20) or passive (4.5)	≤ 4.5 (4.5)	> 50 (150)	> 10 (30)	> 2.0 (6.0)	> 1.0 (4.0)	1–2 (1)	2–4 (2)	4–12 (4)	0.5–1.0 (1.0)	≥ 1.0 (2.0)	1–3 (3)	3–5 (5)	5–10 (10)



Scelta dei parametri geometrici di acquisizione (www.masw.com)

Masw2d: 24 GEOFONI SU STREAMER SPAZIATURA 1 M

PROGETTAZIONE: DISPOSIZIONE GEOMETRICA

La disposizione delle linee/allineamenti dipende dalla profondità da raggiungere:

profondità indagini lineari

(H:L) → geoelettrica ERT circa 1:5 – 1:6 (1:3 polo-dipolo)

sismica a rifrazione 1:4

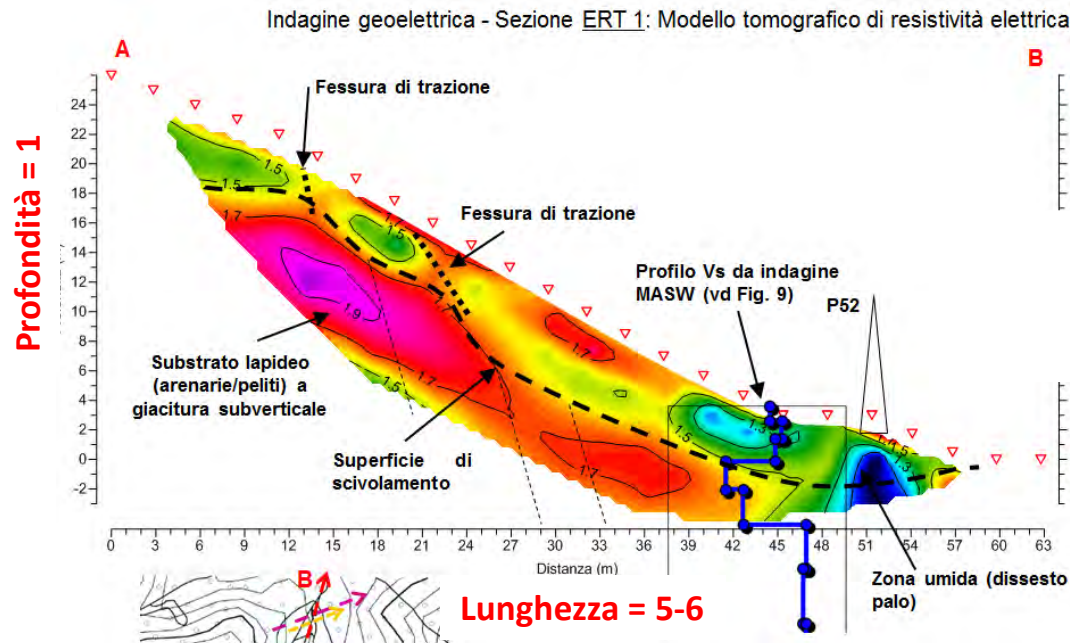
MASW2D 1:2

profondità indagini «puntuali»

(H:L) → TDEM 1:1

AMT ininfluyente (profondità di centinaia di metri con dipoli posti a 20 m di distanza)

Per una frana si tratterà una sezione secondo la massima pendenza



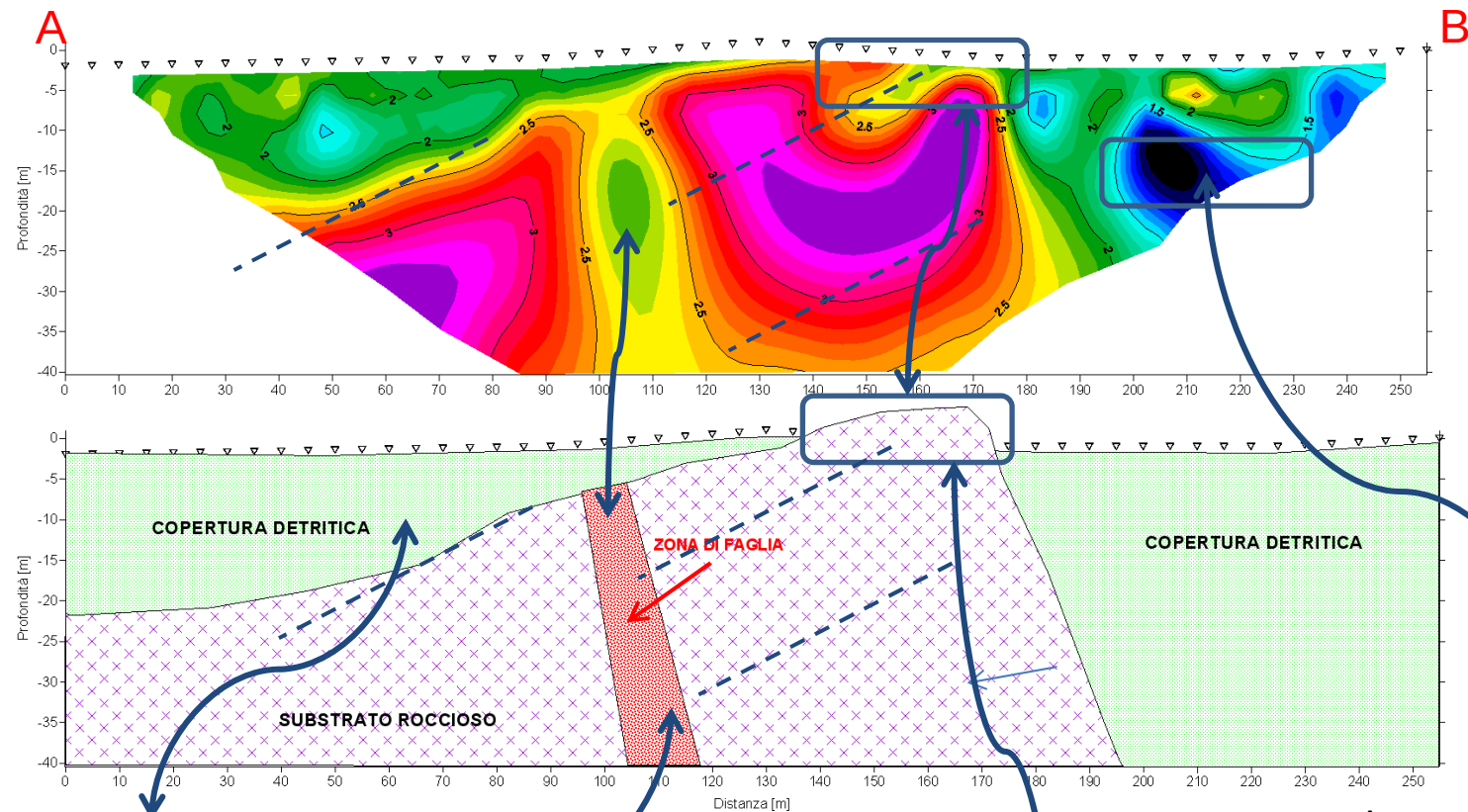
FASE 3 → INTERPRETAZIONE

... DAL MODELLO GEOFISICO AL MODELLO GEOLOGICO

- **Calibrazione con dati geologici, geognostici, strutturali di superficie**
- **Verifica incrociata tra diversi metodi di indagine geofisici**
- **Posizionamento sondaggi geognostici nei punti più significativi per una taratura del modello geofisico**

Calibrazione con dati geologici, geognostici, strutturali di superficie

PASSAGGIO DAL MODELLO GEOELETTRICO AL MODELLO GEOLOGICO



**Copertura detritica
DA CARTOGRAFIA GEOLOGICA**

**Lenti a bassa resistività elettrica
compatibile con lenti di argilla/limo.
VERSANTE GLACIALE CON DEPOSITI
MORENICI. CARTOGRAFIA GEOLOGICA**

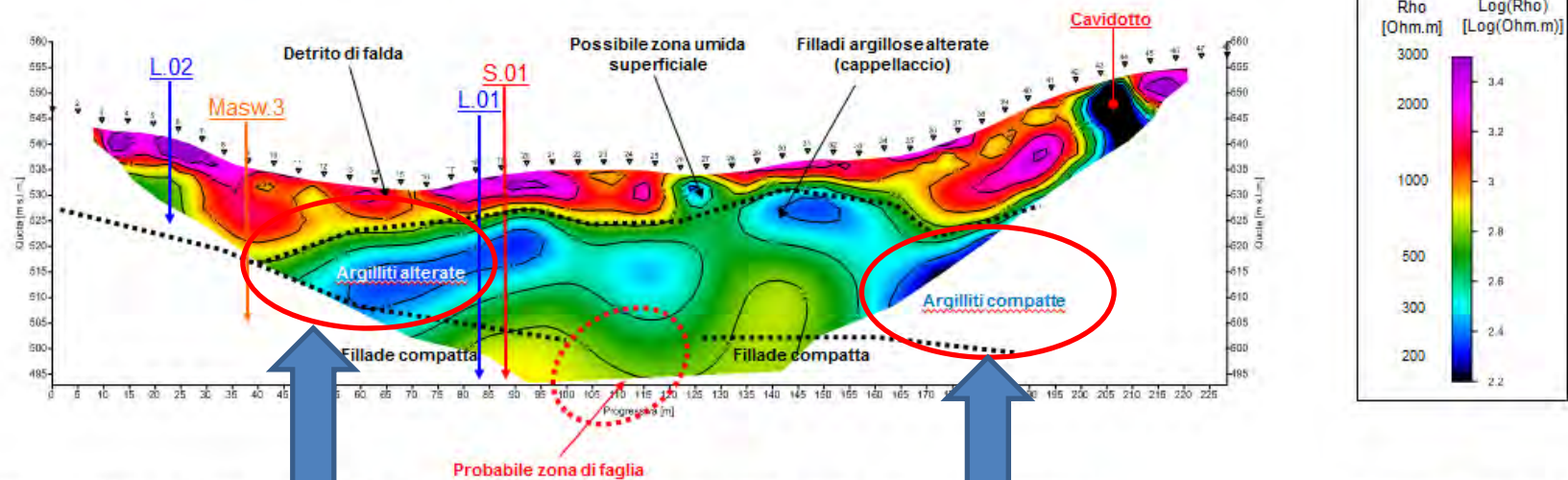
**STRUTTURA SUBVERTICALE A BASSA RESISTIVITA' ELETTRICA
INTERPRETAZIONE GEOLOGICA**

**Roccia affiorante (serpentinite → alta resistività elettrica)
CALIBRAZIONE DIRETTA**

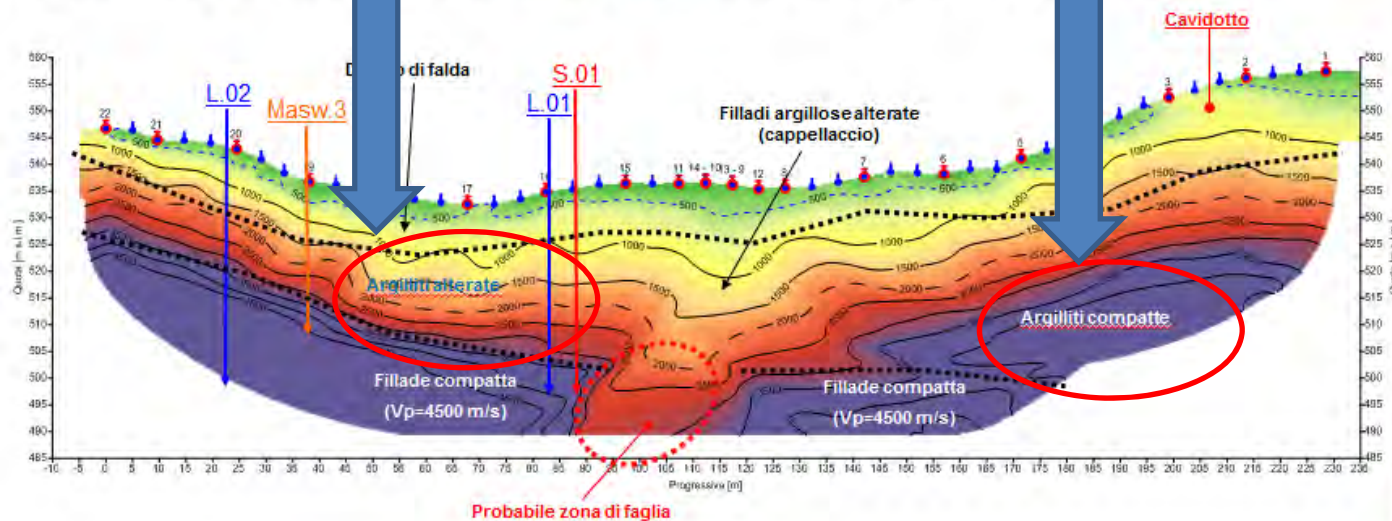
Confronto con diverse metodologie

Il controllo incrociato riduce notevolmente l'ambiguità interpretativa: a identici valori di resistività elettrica corrispondono caratteristiche di Vp completamente diverse

Sezione geoelettrica TV.PP.LE.03 – Modello tomografico di resistività elettrica reale

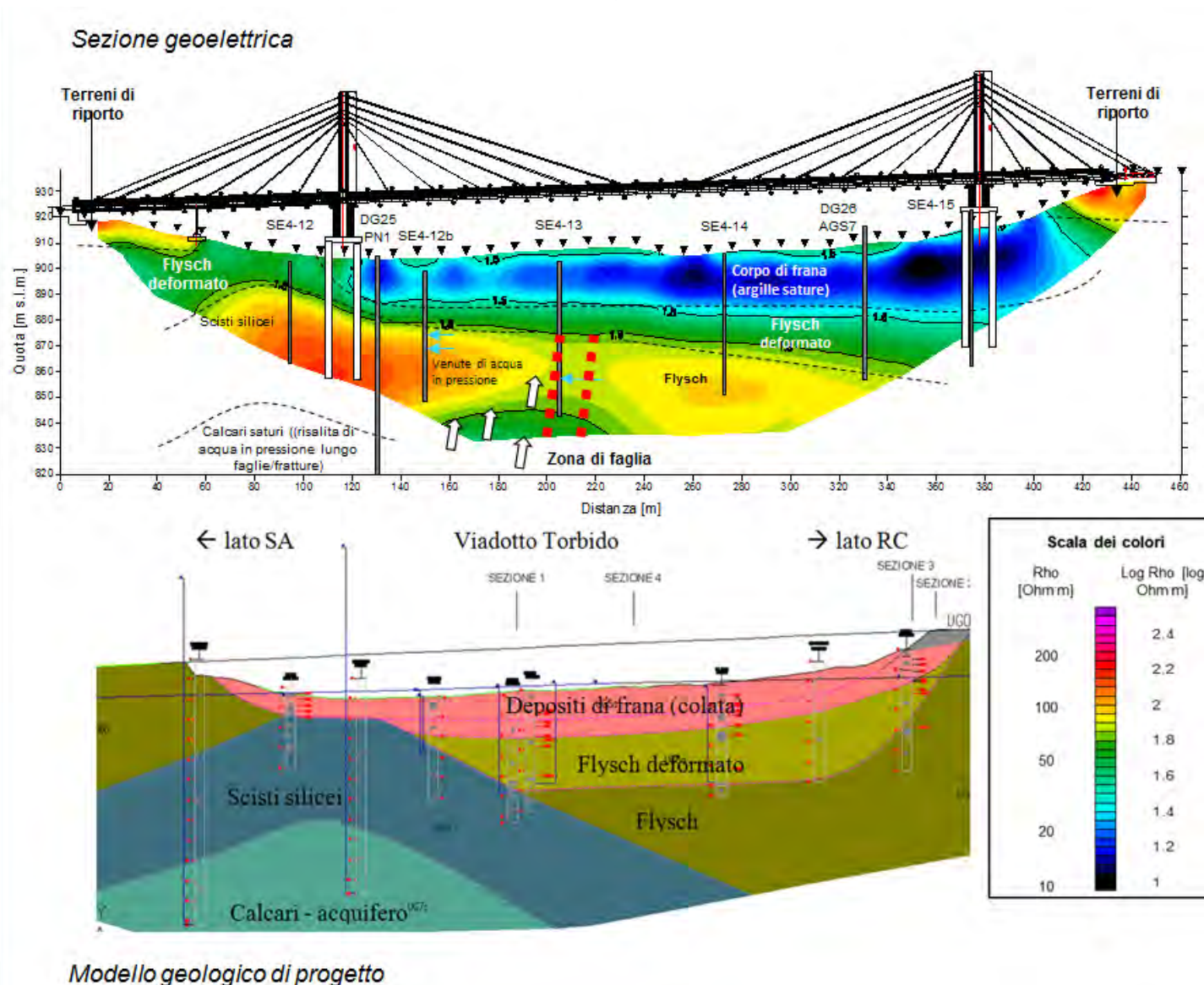


Sezione sismica a rifrazione P.LS.03 – Modello tomografico di velocità delle onde di compressione



Calibrazione con sondaggi geognostici

Nelle opere civili e con problematiche geotecniche rilevanti, il modello geofisico deve essere calibrato con un adeguato numero di sondaggi geognostici posizionati nei punti critici. Nel caso in esame: nell'anticlinale, sul corpo di frana, in corrispondenza di una importante discontinuità tettonica



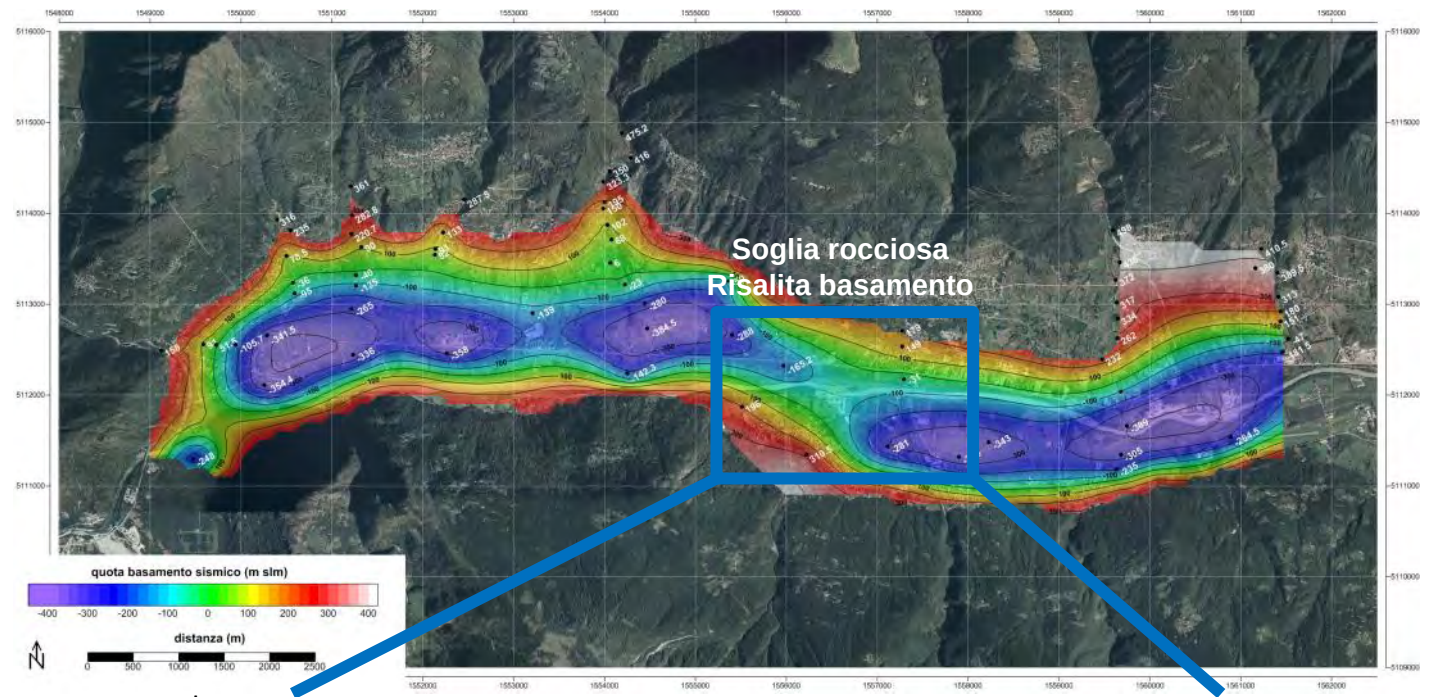
Alcuni casi pratici...



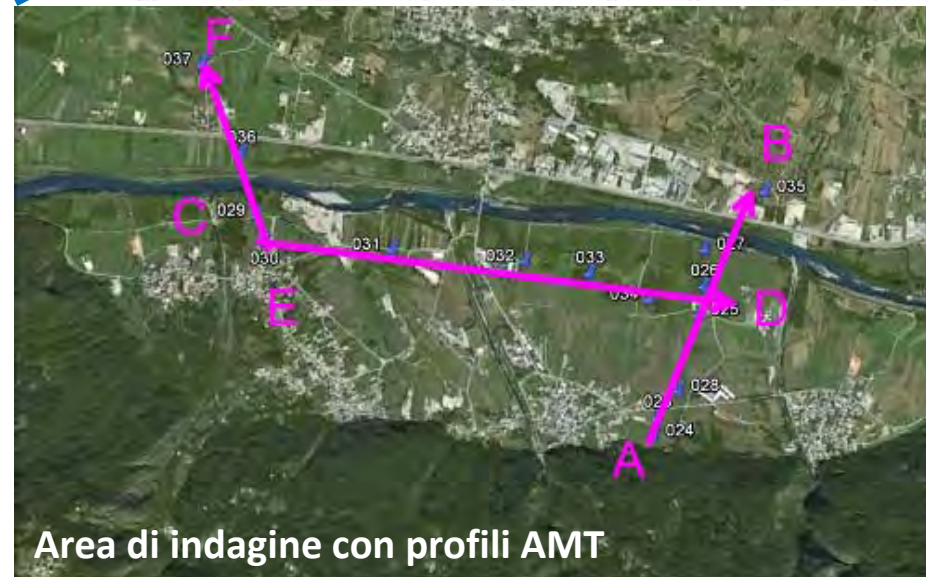
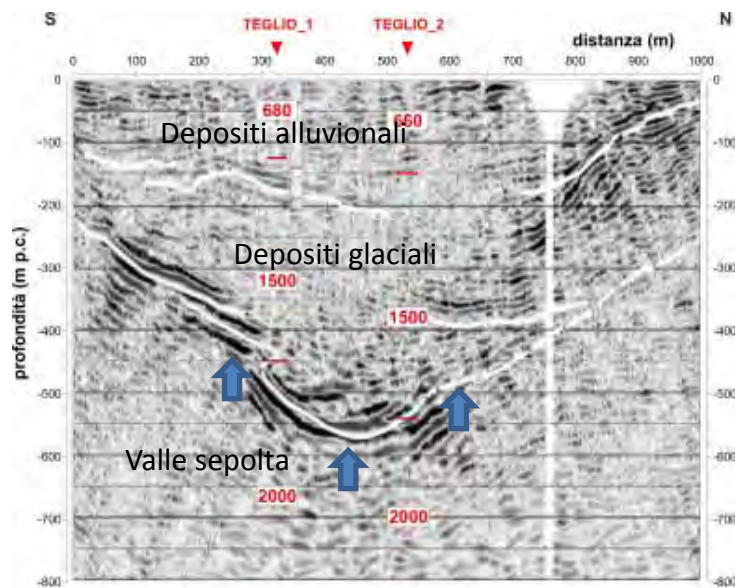
Caso 1 – indagini a grande scala

Verifica sulla risalita
del basamento lapideo
della media Valtellina
(Ardenno, SO)

Carta delle isobate del basamento lapideo ottenuta da dati di sismica a riflessione
– De Franco et Al. 2009



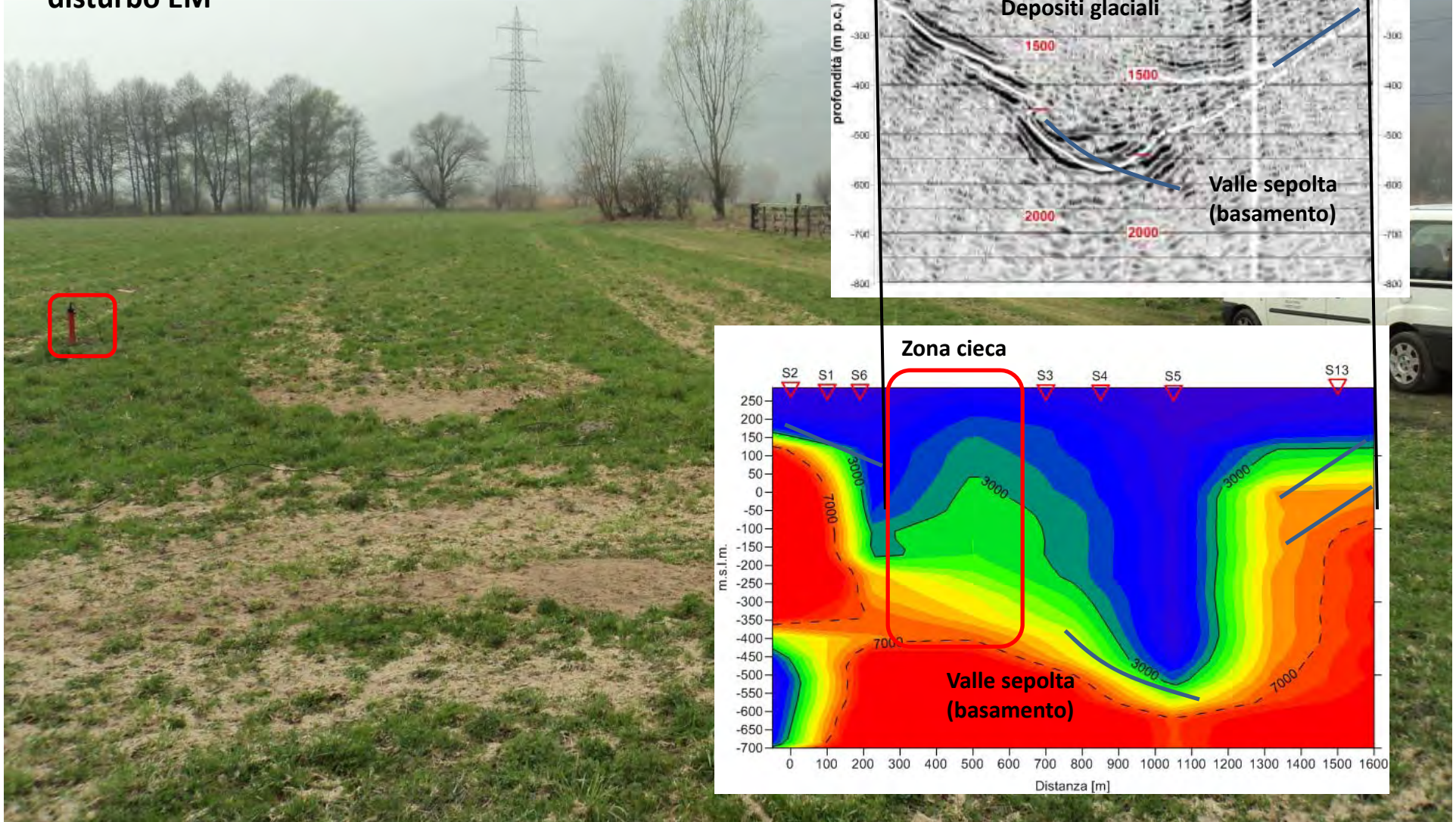
Profilo sismico a riflessione A – B – De Franco et Al. –



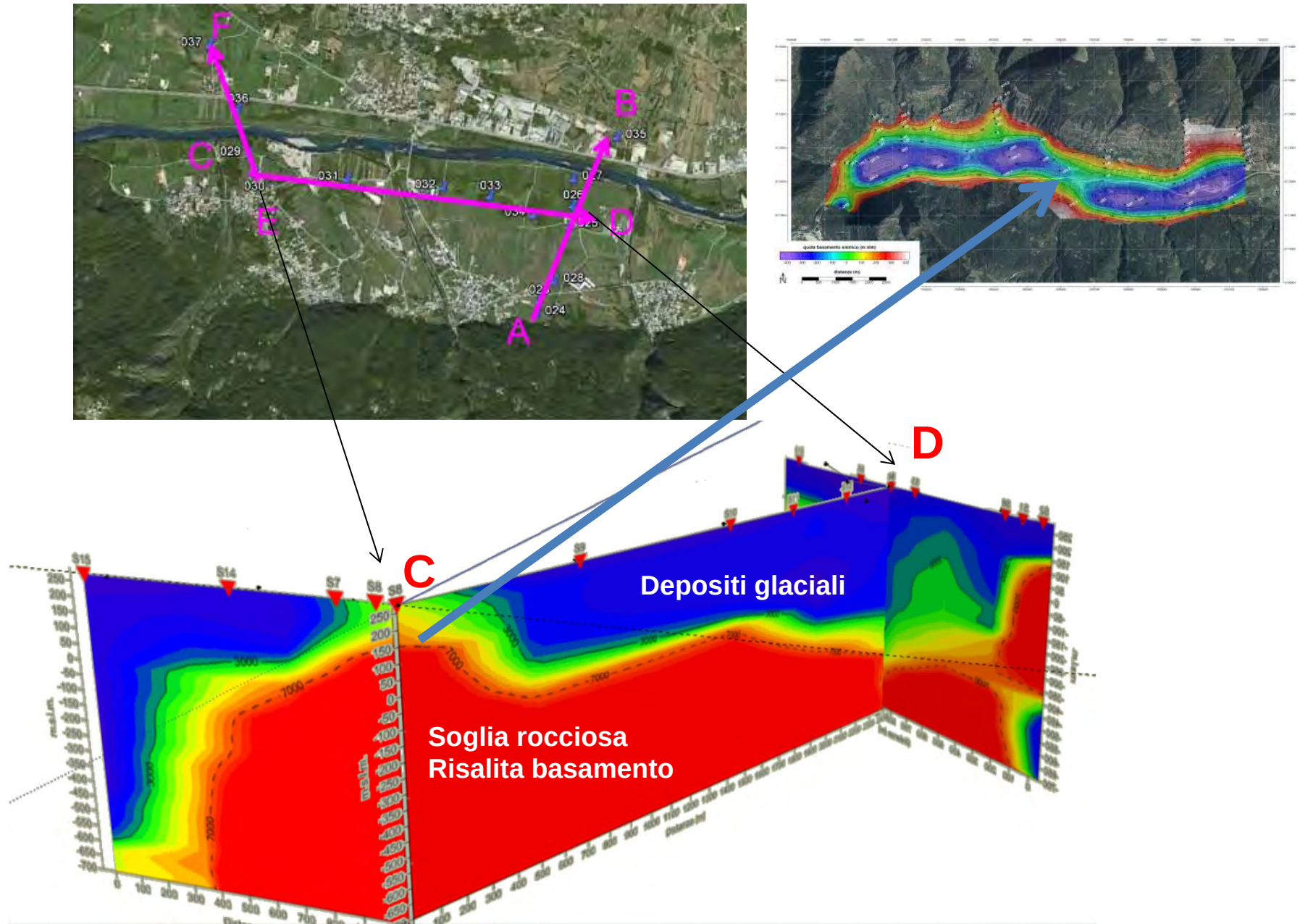
Caso 1 – verifica risalita basamento con metodo AMT

Sezione di taratura con la sezione sismica.

Sono stati acquisiti solo 7 profili AMT utili perché la linea AT determina un forte disturbo EM



Caso 1 – verifica risalita basamento con metodo AMT



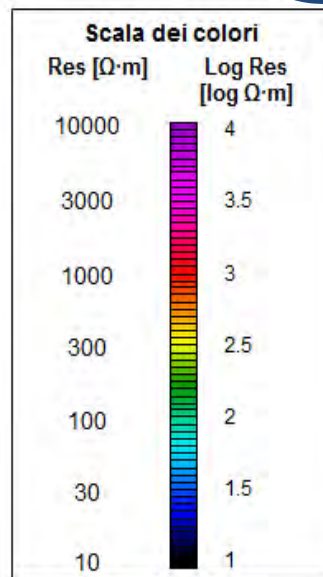
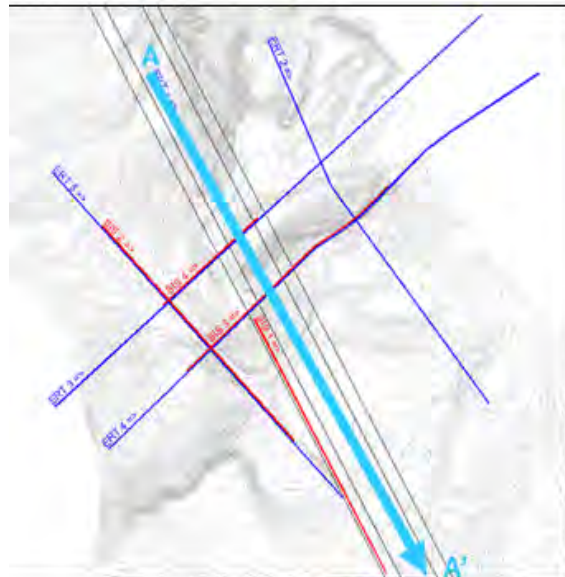
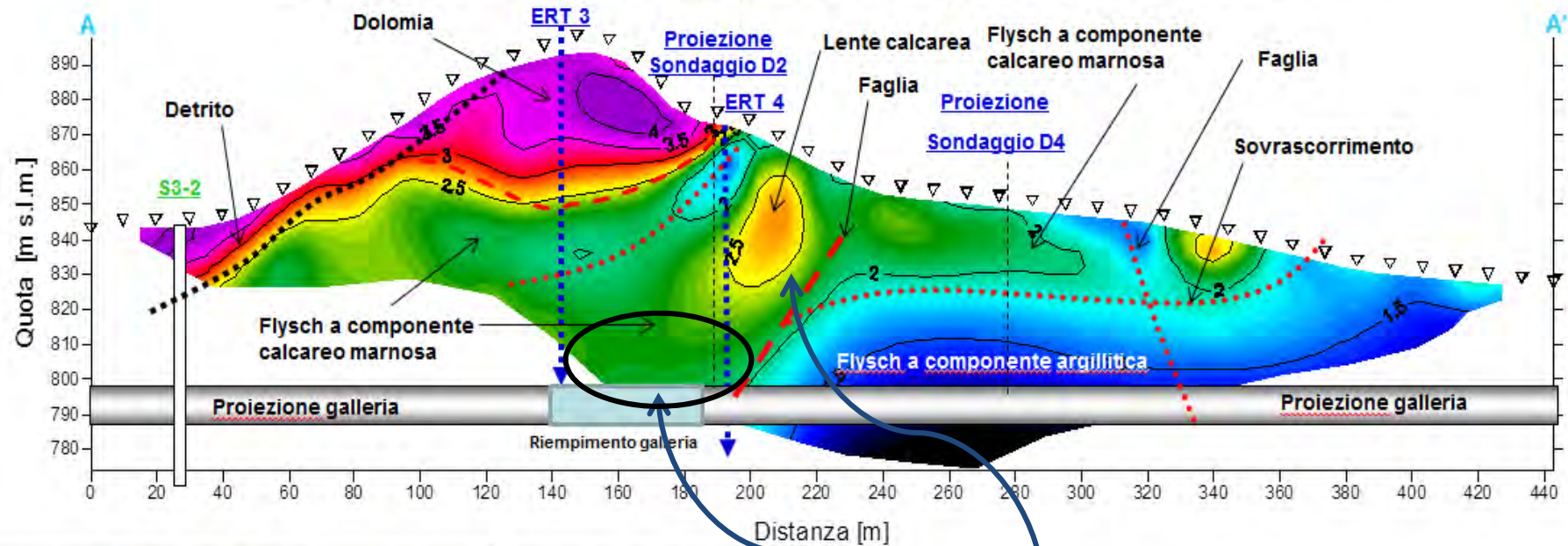
Caso 2 – Indagini a media scala

Verifica dell'assetto assetto geologico e
geostrutturale di una galleria in costruzione
Indagini sismiche e geoelettriche



Caso 2 – MODELLO GEOLOGICO

Indagine geoelettrica - Sezione ERT 1: Modello tomografico di resistività elettrica



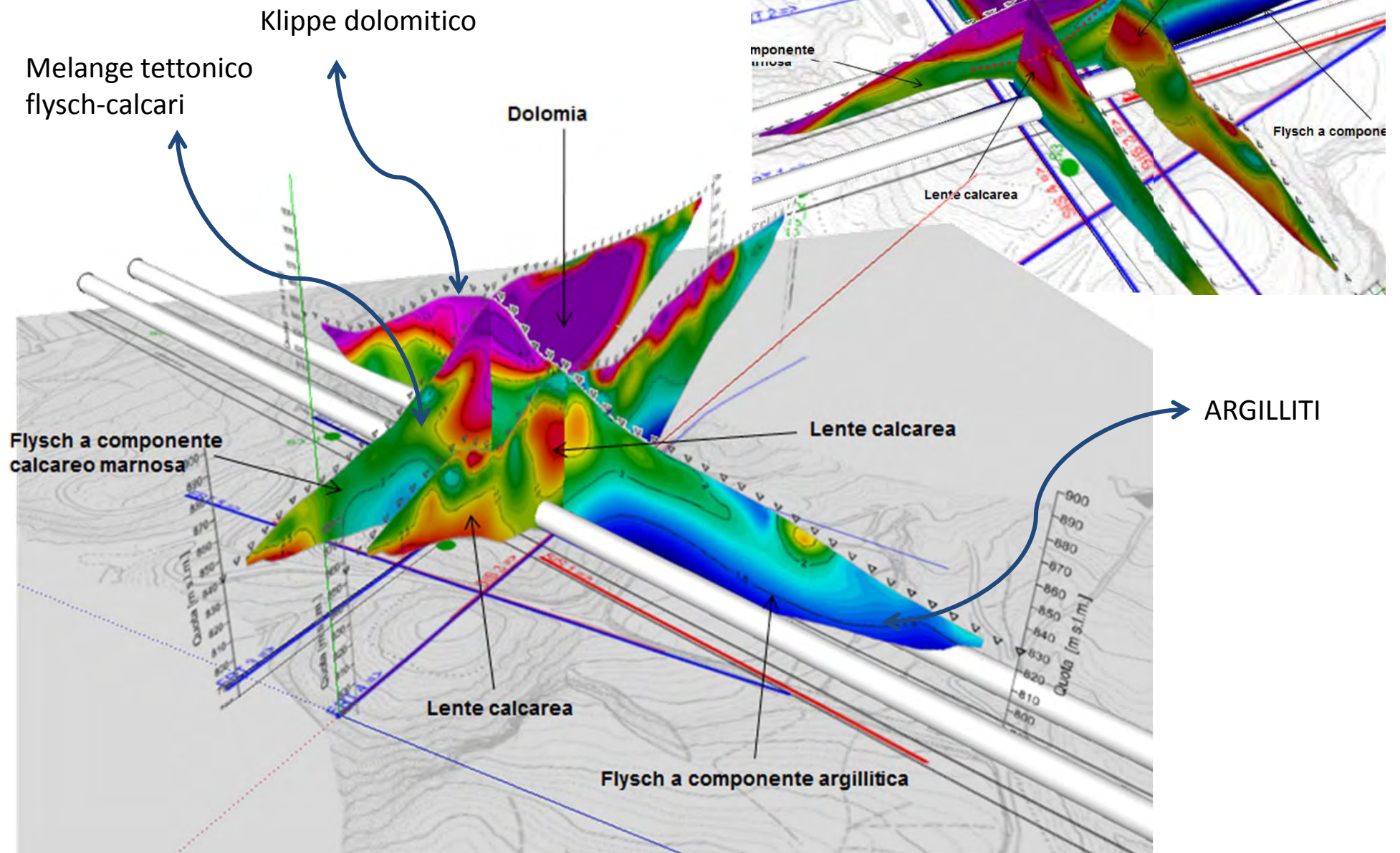
Lente calcarea parzialmente franata in galleria

Tratto dissestato (collasso del fronte di scavo) →
faglia di contatto Flysch-argilliti

Il dissesto è avvenuto poco prima del contatto
tettonico con le argilliti

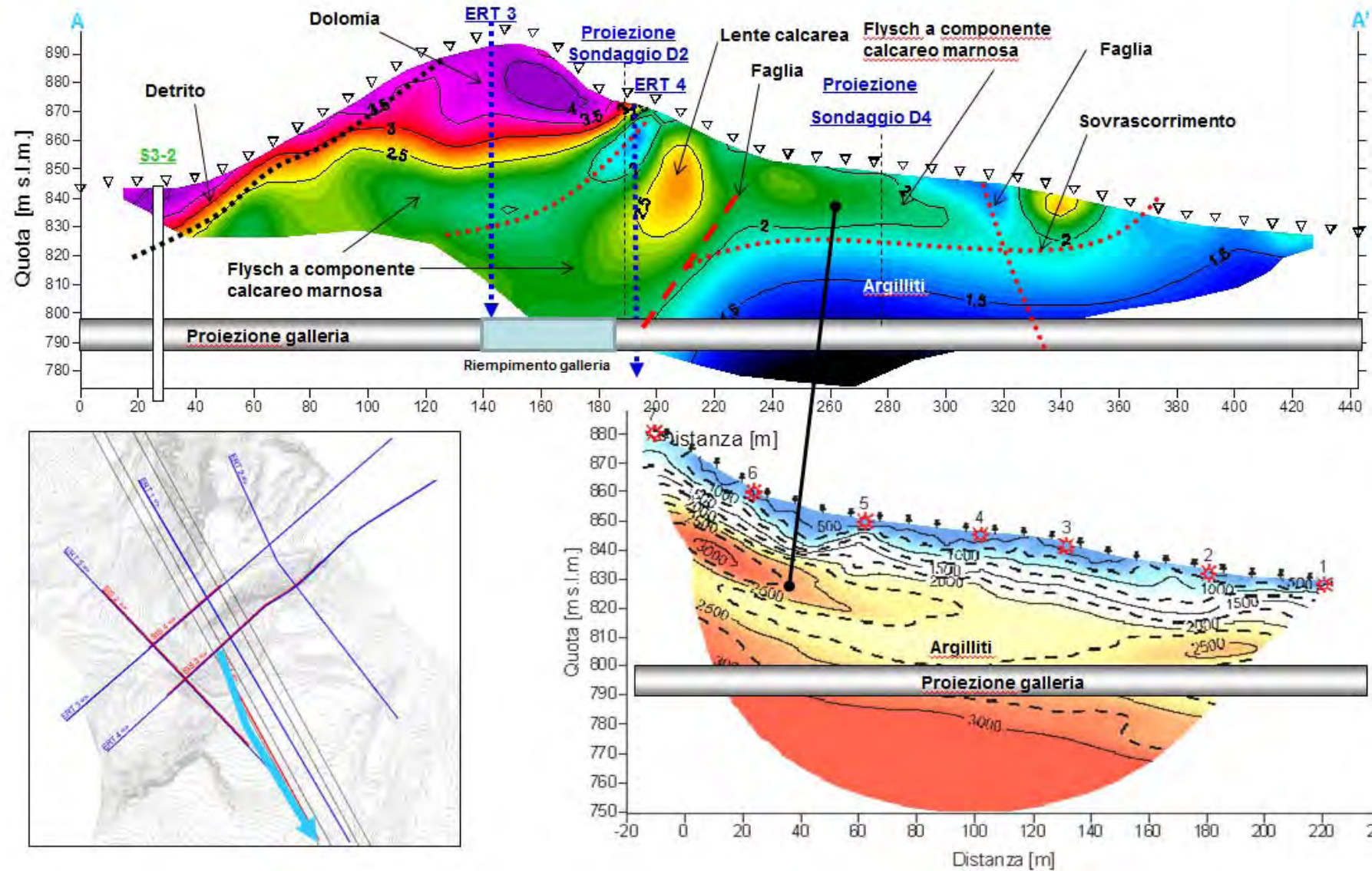
Caso 2 – MODELLO GEOLOGICO

Stereogrammi rappresentativi



Caso 2 – MODELLO GEOLOGICO

Confronto sezione geoelettrica e sezione sismica



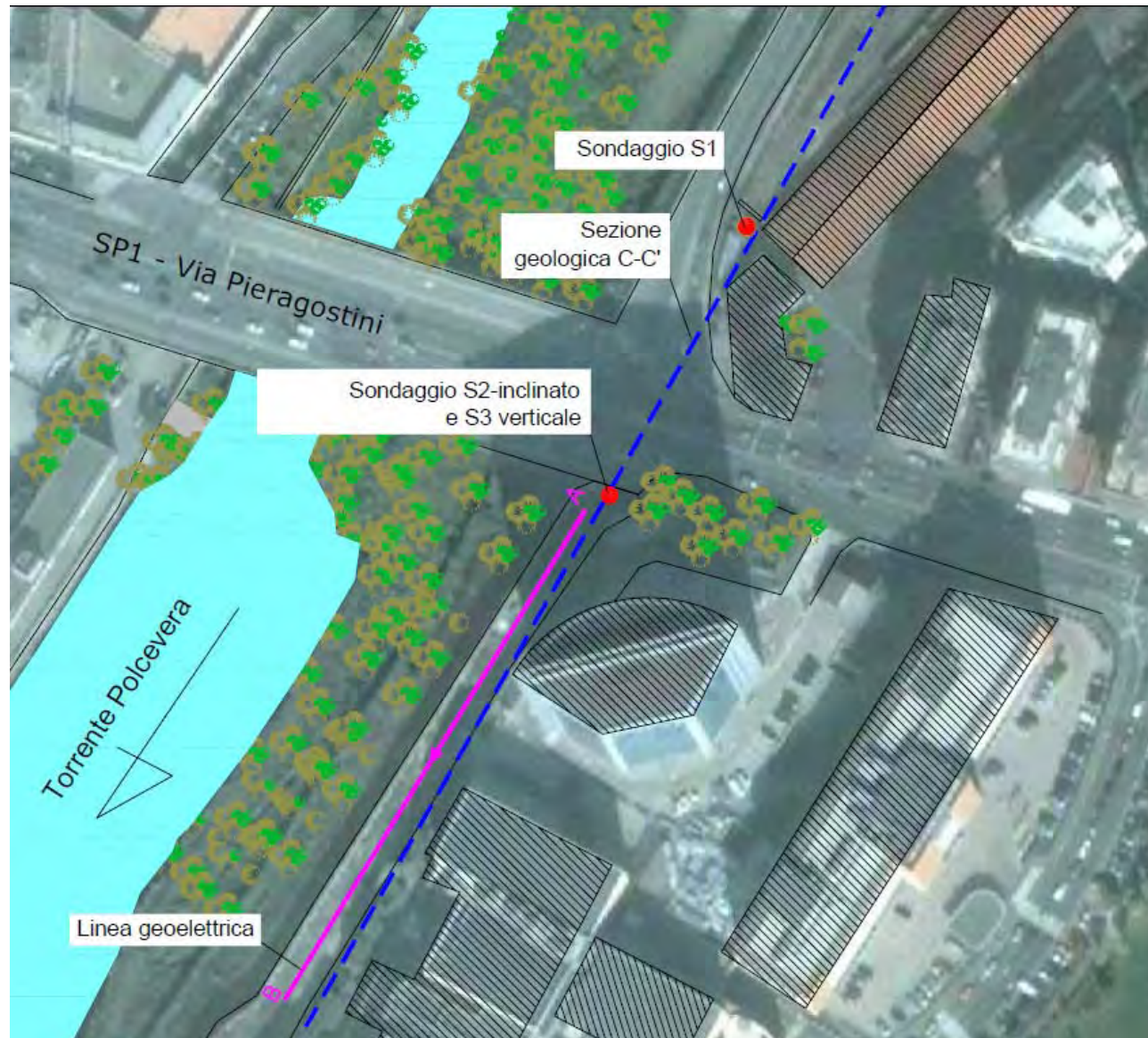
Caso 3 –Indagini a piccola scala

By pass di un ponte per posa di cavo AT



Caso 3 –Indagini a piccola scala

Verifica fattibilità di perforazione teleguidata (TOC) per by-pass ponte.



PROBLEMI

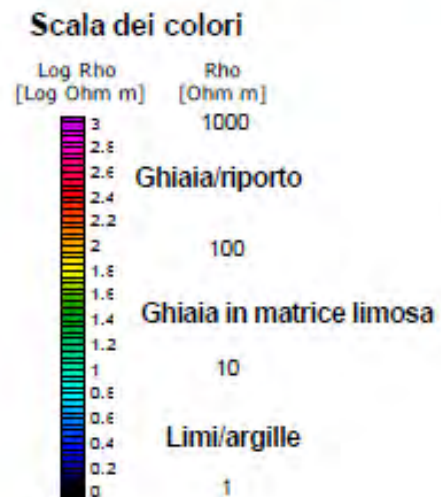
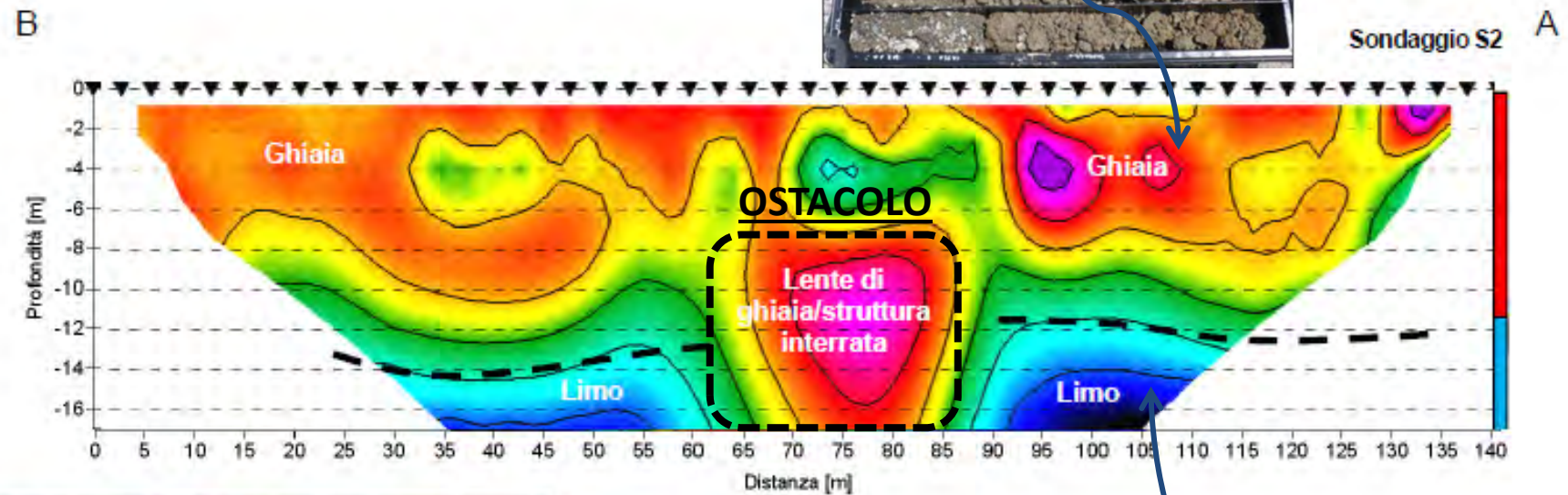
1. FONDAZIONI DEL PONTE
2. GRANULOMETRIA
DEPOSITI ALLUVIONALI
(LIMITE MAX DIAMETRO
CIOTTOLI 3-4 Cm)

Progettazione indagini:

- 1 linea geoelettrica
- 3 sondaggi geognostici
- 1 prova in foro georadar

Caso 3 –Indagini a piccola scala

Verifica assetto litostratigrafico



Caso 3 –Indagini a piccola scala
VERIFICA FONDAZIONI PONTE
CON PROVA GEORADAR IN FORO

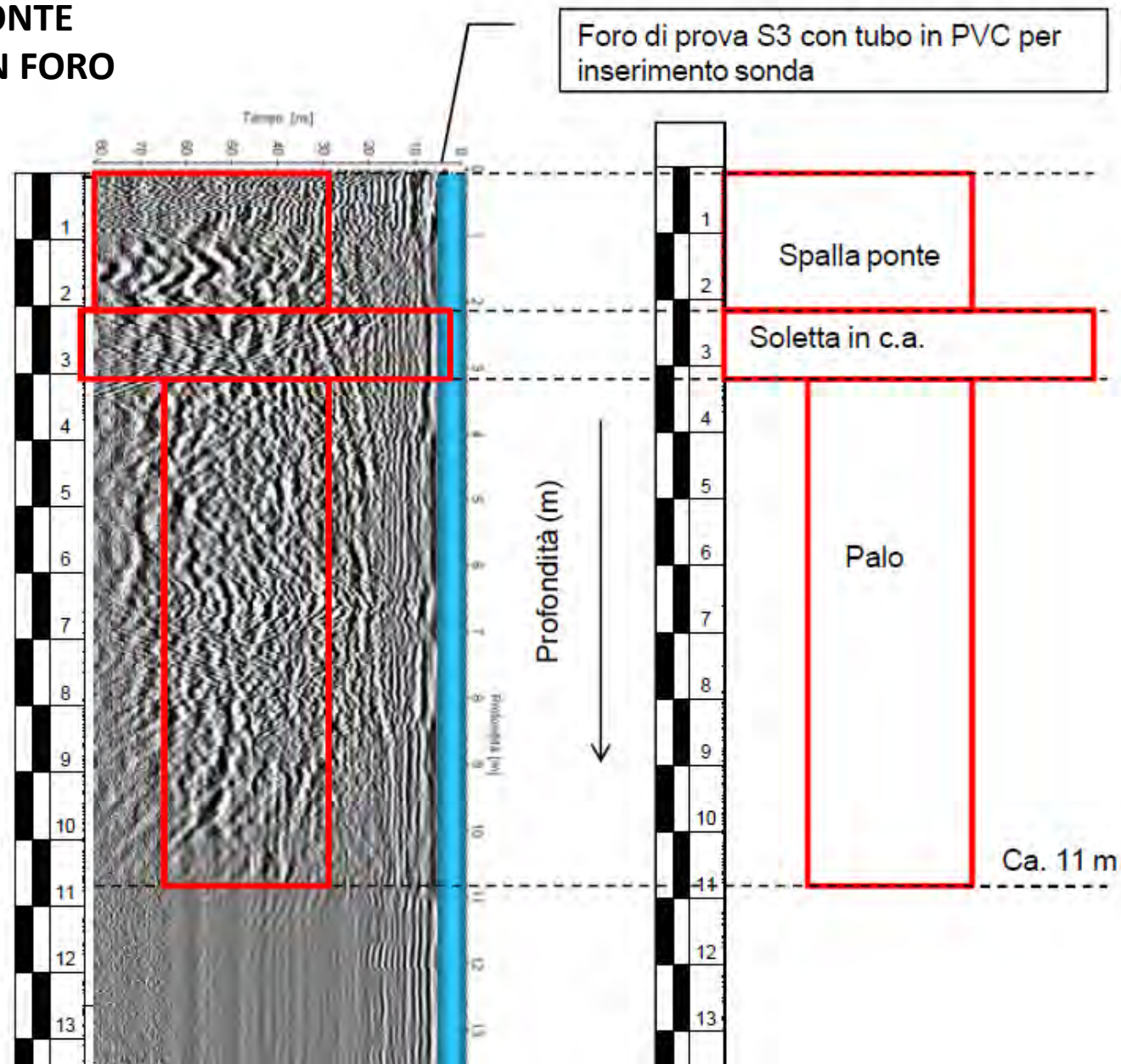
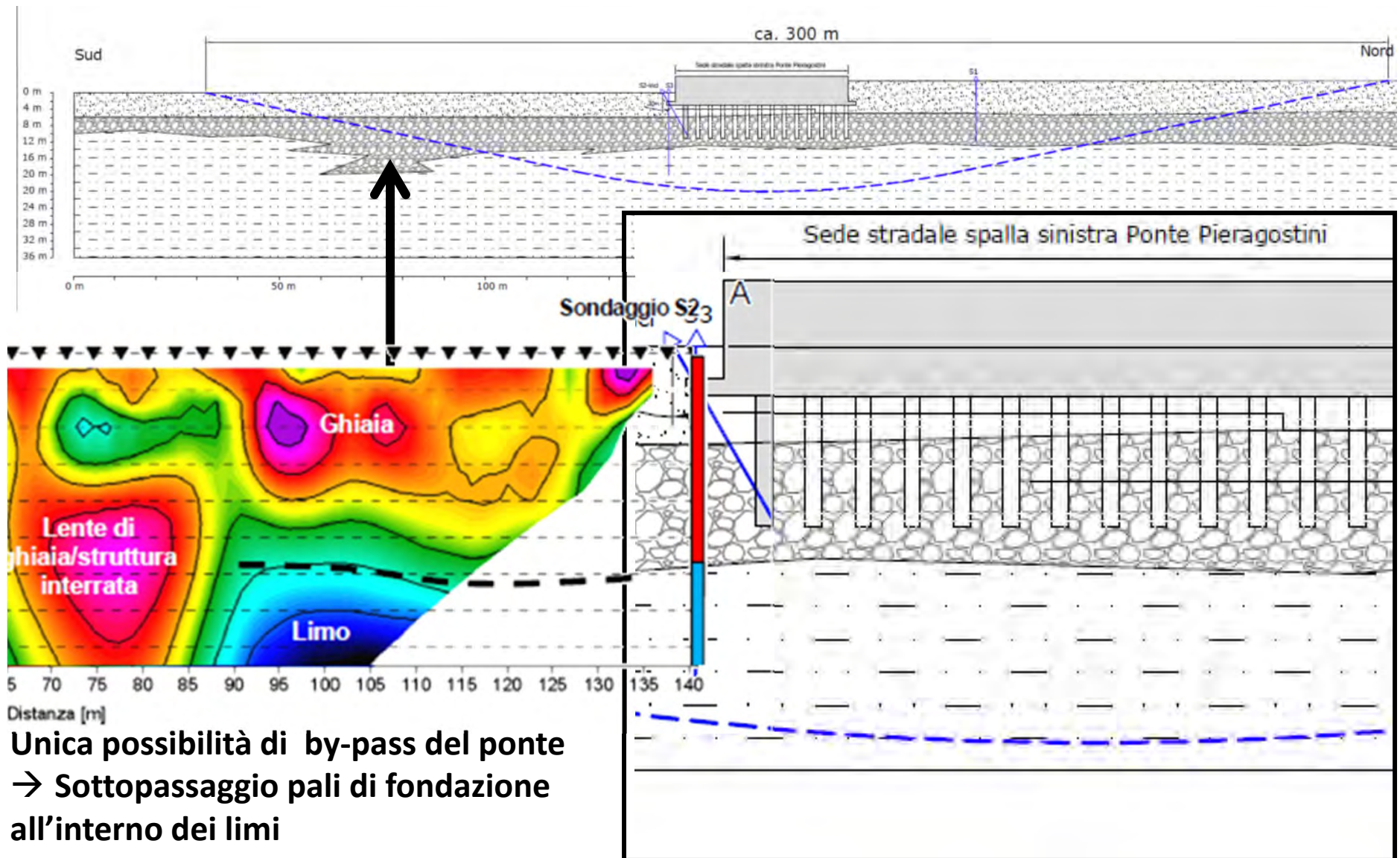


Diagramma radar

Interpretazione

Caso 3 –Indagini a piccola scala

Ricostruzione geologica



Caso 4 –Indagini a piccola scala

Indagini su strutture

Per un **impianto di produzione di biocarburante** è stata prevista la realizzazione di un elevato numero di **serbatoi in acciaio** di diametro compreso tra **5 e 16m** ed altezze variabili da **5 a 12m**.

I serbatoi di acciaio sono destinati ad accogliere i fluidi impiegati nel processo di produzione del biocarburante e sono installati su basamenti in calcestruzzo di forma anulare, al cui interno è stato messo in opera del materiale di riempimento compattato.

Durante il riempimento del primo serbatoio per l'esecuzione del cosiddetto “water test” si è verificato un cedimento del fondo con conseguente danneggiamento della struttura metallica.

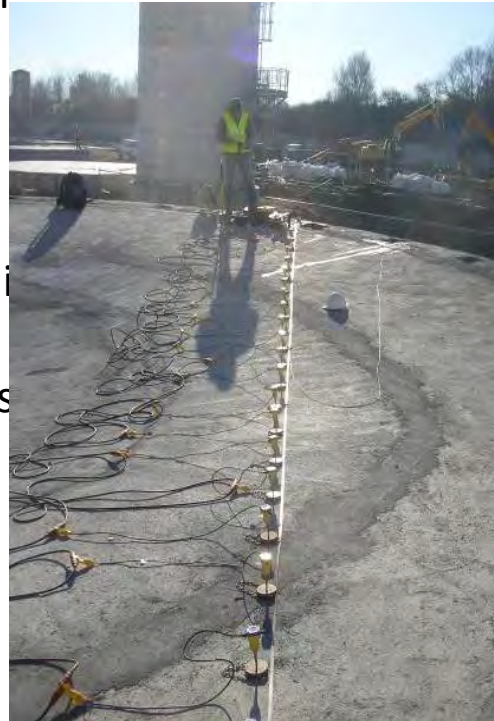


Scelta del metodo di indagine geofisica

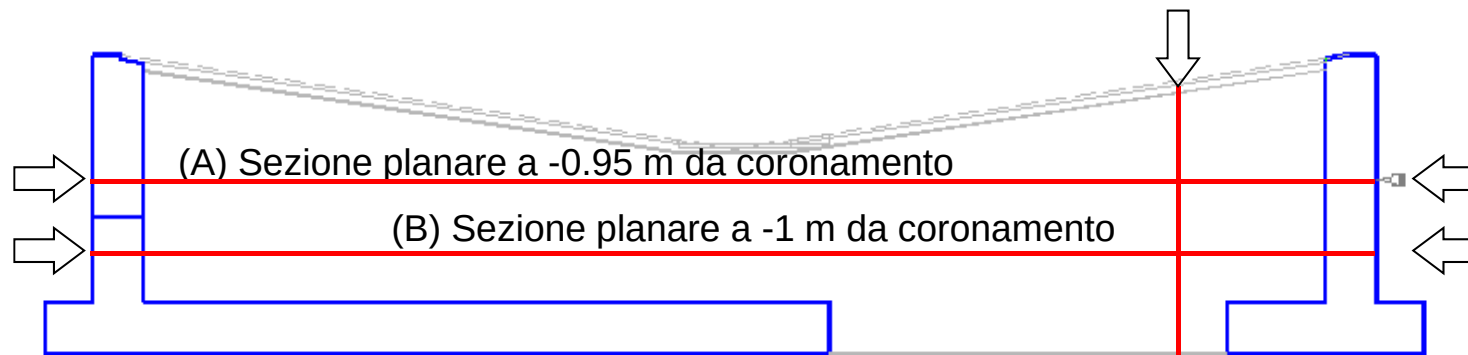
A seguito del dissesto (che ha determinato forti deformazioni) è stato definito un piano di indagini geofisiche volte a valutare il **caratteristiche del terreno di riempimento impiegato in tutti i serbatoi accessibili.**

La scelta del metodo è ricaduta sulla tecnica di tomografia sismica per tempi di percorso (Algoritmo di elaborazione SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) integrata con la tecnica sismica tomografica a rifrazione.

Metodo sismico a rifrazione



Metodo sismico in trasparenza



Metodi di indagine: tomografia sismica per tempi di percorso

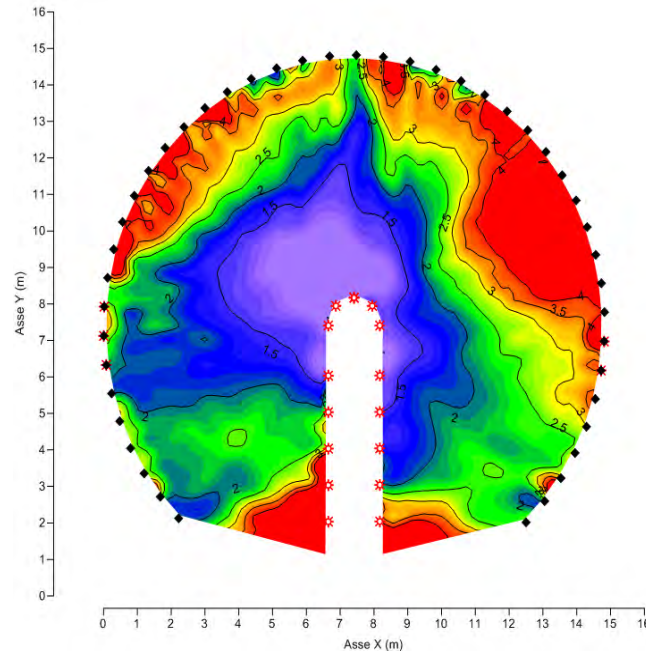
Algoritmo di elaborazione SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique

Le indagini sismiche “in trasparenza” ricostruiscono un modello di velocità di onde di compressione o di taglio mediante riconoscimento delle traiettorie dirette (quindi non riflesse o rifratte). Per l’acquisizione dei dati si eseguono specifiche misure con energizzazione su un lato del solido da investigare (nell’esempio sotto il versante sopra la galleria) e ricezione sul lato opposto sfruttando le onde dirette di primo arrivo (misura in trasparenza). La presenza di differenti litolipi o di zone a diverso grado di addensamento è correlata alle variazioni dei valori di velocità delle onde elastiche e viene generalmente evidenziata da zone a minor velocità delle onde sismiche. Il potere risolutivo della tecnica è legato essenzialmente:

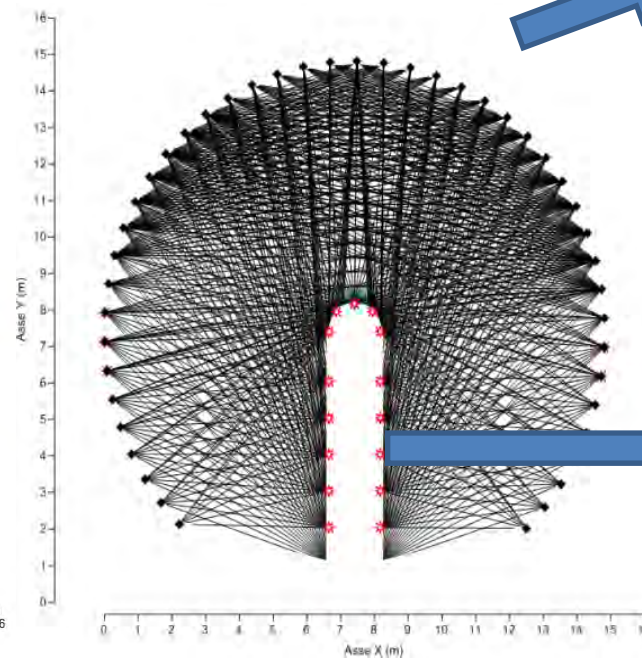
1. al numero ed alla distribuzione delle misure attorno alla sezione indagata;
2. alla lunghezza d’onda della perturbazione sismica, la quale a sua volta dipende dalla velocità e dalla frequenza principale di oscillazione dell’onde sismiche;

Il codice di calcolo utilizzato per la modellazione tomografica permette di utilizzare nell’algoritmo di inversione tomografica (SIRT) un sistema di ricostruzione per mezzo di raggi curvilinei che migliora il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala stabilizzando la soluzione dell’algoritmo d’iterazione

TK 3104 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (KM/SP) -0.95 m da coronamento



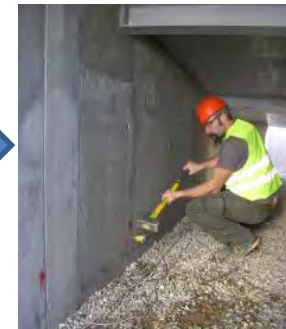
TRAIETTORIA RAGGI SISMICI -0.95 m da coronamento



arrivo



partenza



Metodi di indagine: tomografia sismica a rifrazione

La rifrazione tomografica è stata sviluppata per risolvere i gradienti di velocità, le anisotropie vertico laterali rapide operando, con elementi finiti o distinti, nella definizione di un modello del terreno il più verosimile e completo.

Le traiettorie dei raggi sismici sono curvilinee il cui andamento è determinato da un processo iterativo di affinamento del sistema tempo di percorrenza-velocità.

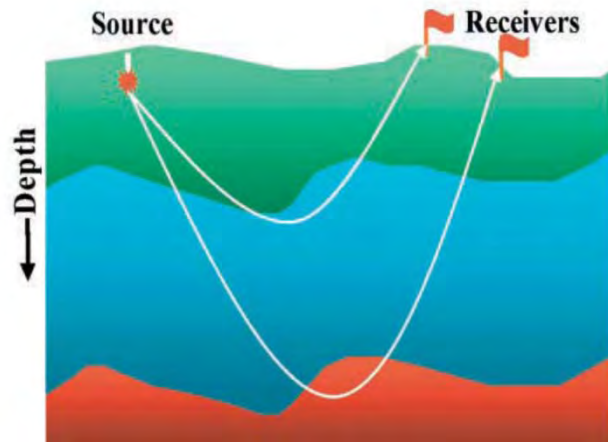
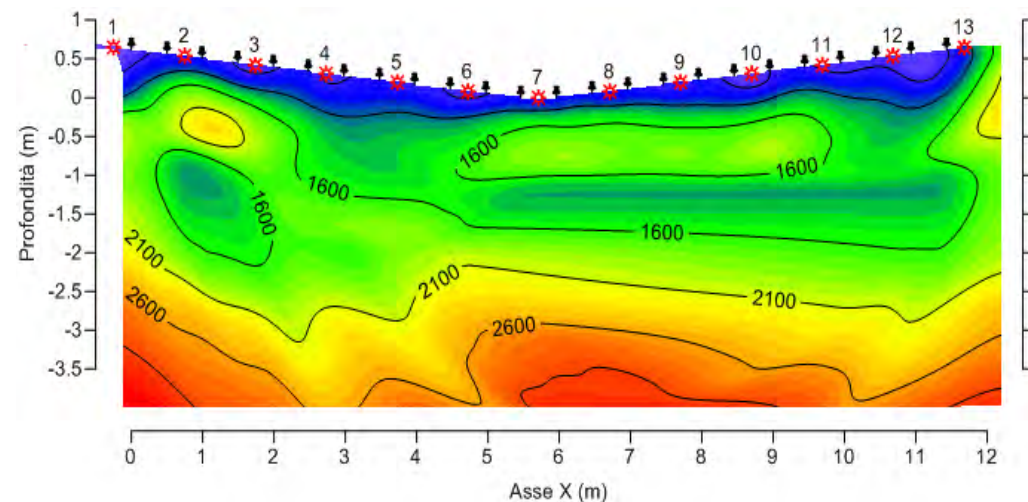
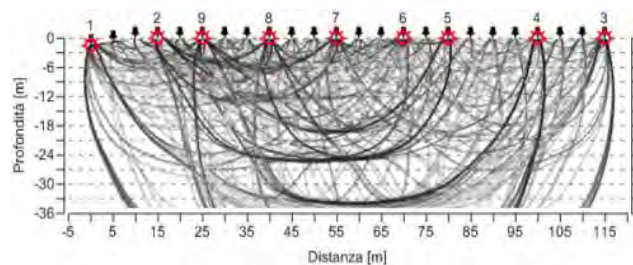
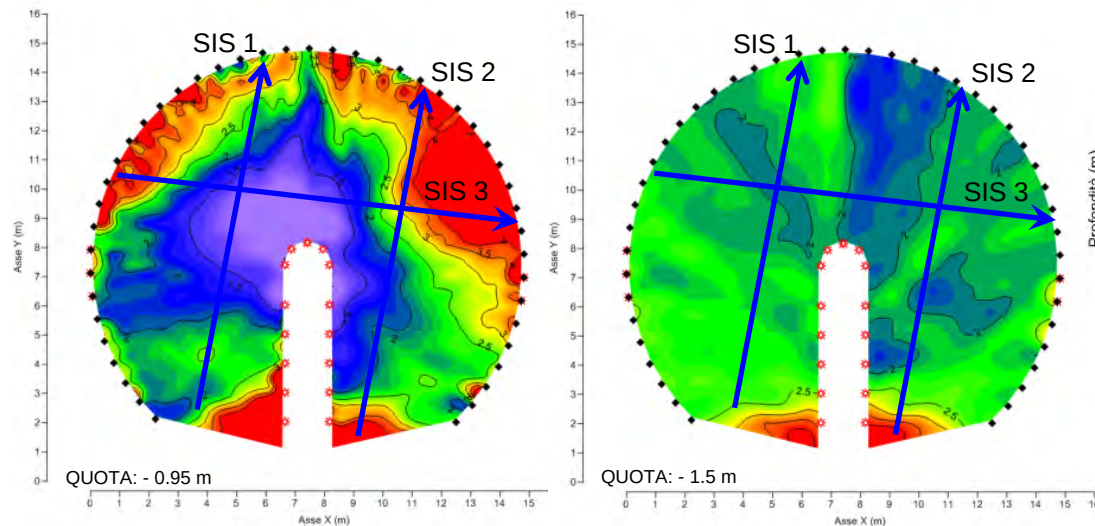


Figure 2: Model and rays for diving waves.

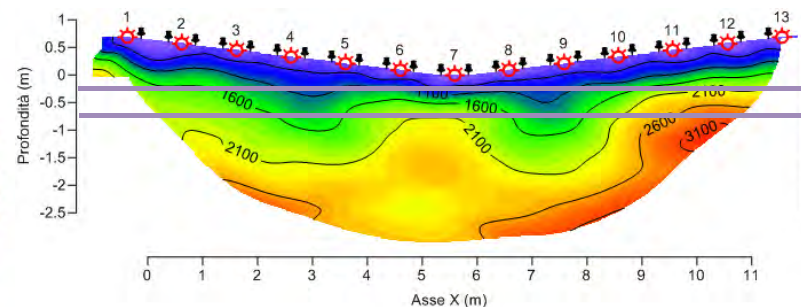


INTEGRAZIONE TRA I DUE METODI DI INDAGINE

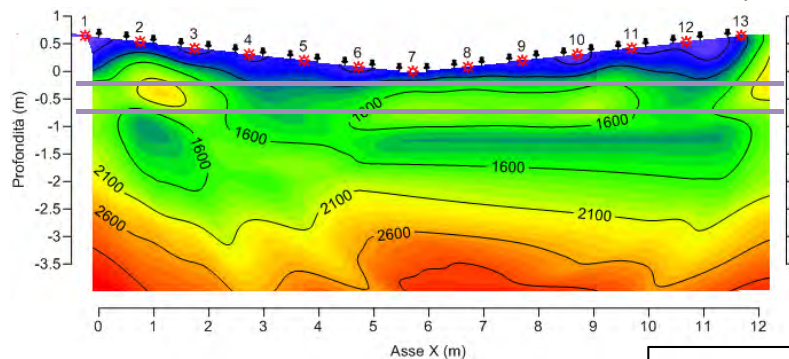
TOMOGRAFIA SISMICA IN TRASPARENZA – SEZIONI CIRCONFERENZIALI
MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (km/s)



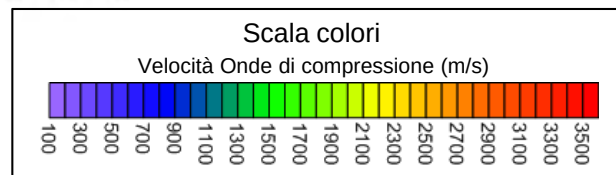
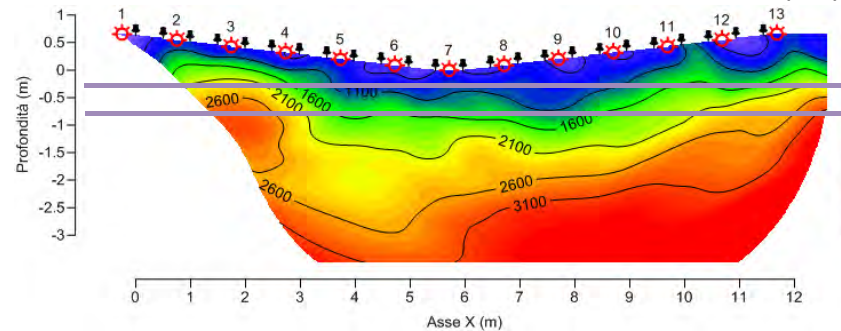
Sezione SIS 3
MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



Sezione SIS 1
MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



Sezione SIS 2
MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



NOTA BENE: il confronto tra le sezioni sismiche a rifrazione e la sezione circonferenziale (trasparenza) è solo indicativo. I valori più attendibili di velocità delle onde di compressione derivano dalla tomografia assiale (misura di onde dirette).

DEFINIZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

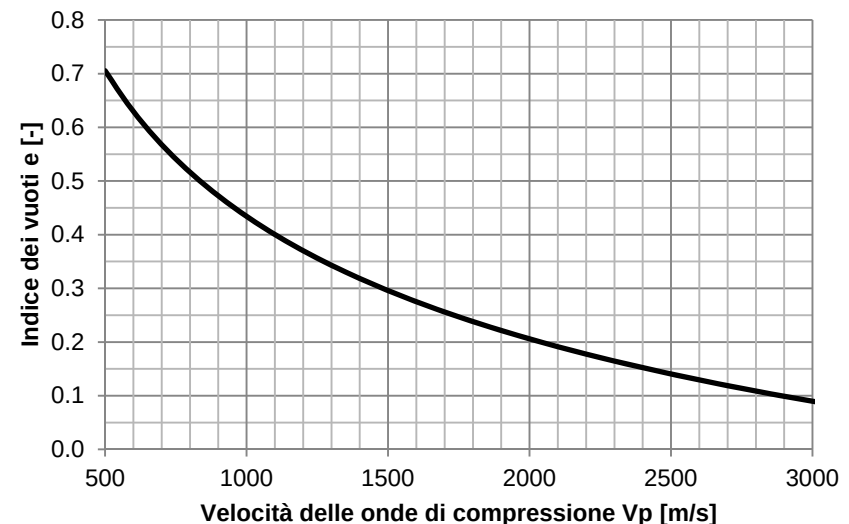
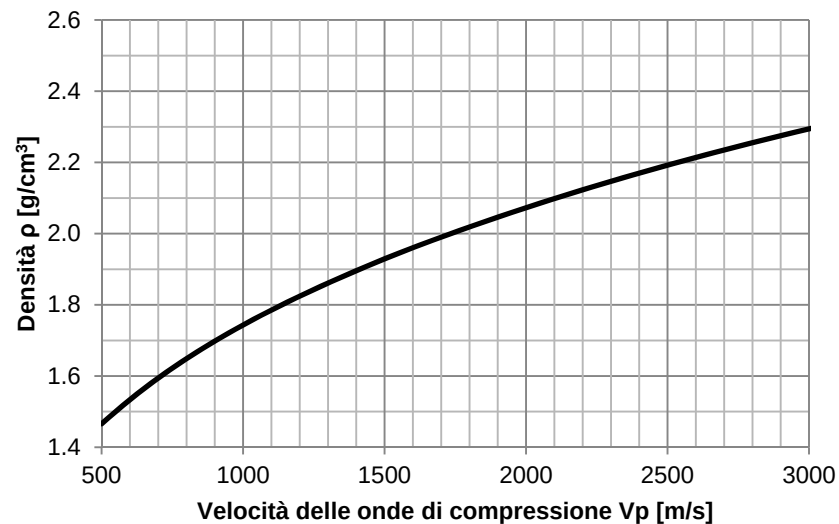
Entrambe le metodologie di indagine hanno fornito una mappatura orizzontale e, nei casi di applicazione della sismica a rifrazione, anche verticale della velocità delle onde di compressione dei terreni, direttamente correlabile alla densità in situ del terreno e, attraverso alcuni ulteriori passaggi, alla porosità del terreno.

Ai fini della valutazione delle proprietà dei terreni di riempimento in situ si è proceduto in prima istanza al calcolo della densità del terreno, utilizzando la relazione di Gardner riportata di seguito:

$$\rho = \alpha \cdot V_p^\beta$$

dove ρ è la densità del materiale attraversato, V_p sono le velocità delle onde di compressione, α e β sono delle costanti empiriche derivate dalla geologia, assunte rispettivamente pari a 0.31 e 0.25.

Sono stati quindi definiti delle curve su grafici velocità vs densità e velocità vs Indice dei vuoti .



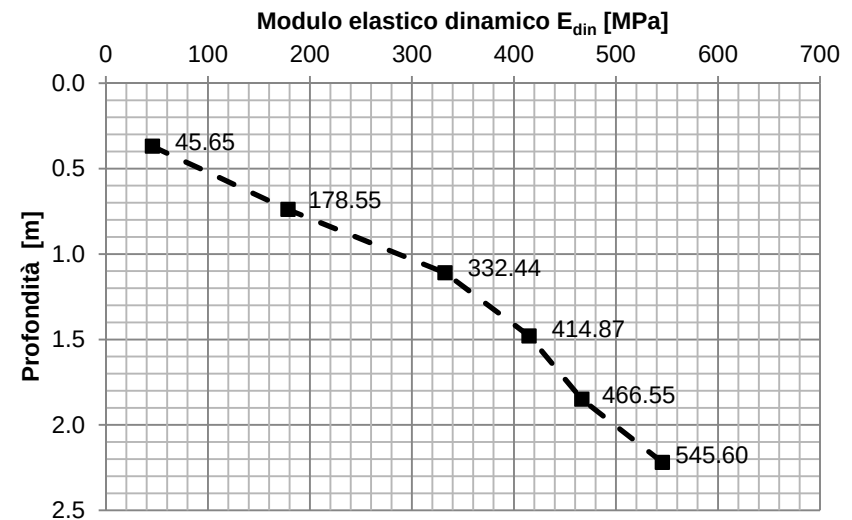
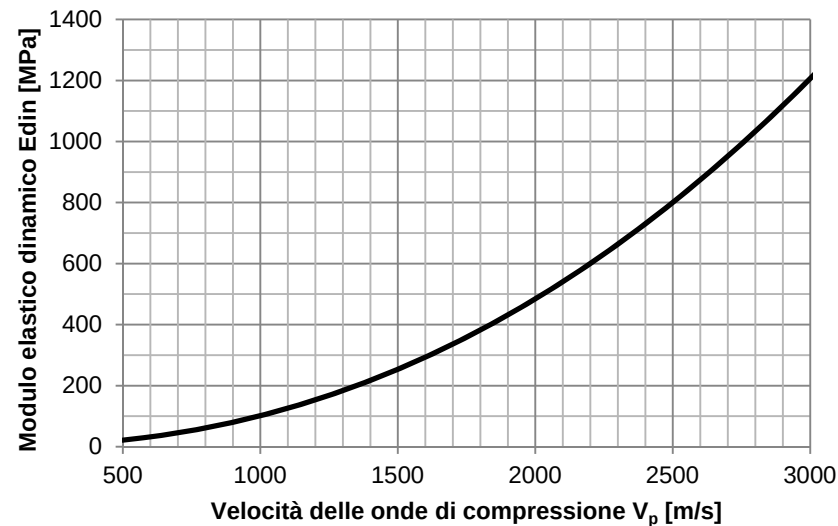
LA PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA E' PROPEDEUTICA ALLA PROGETTAZIONE DELL'INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO

DEFINIZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Il modulo elastico in condizioni dinamiche è legato alla velocità delle onde di compressione secondo la seguente espressione derivata dalla teoria dell'elasticità:

$$E_{\text{din}} = 2 \cdot \rho \cdot V_p \cdot \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \nu_{\text{din}}}{2 - 2 \cdot \nu_{\text{din}}}} \cdot (1 + 2 \cdot \nu_{\text{din}})$$

Con E_{din} modulo elastico dinamico, ρ densità del materiale attraversato e ν_{din} modulo di Poisson dinamico, assunto pari a 0.49. Utilizzando i valori di E_{din} ottenuti mediante l'espressione precedente si è proceduto mediante varie analisi numeriche alla definizione del coefficiente η che esprime il rapporto tra il modulo elastico dinamico E_{din} e il modulo elastico statico E_{stat} , in modo da ottenere quest'ultimo per ogni strato.



SCELTA DEL METODO DI CONSOLIDAMENTO

In relazione alle caratteristiche dei basamenti dei serbatoi, e per evitare danni alle strutture contenitive, si è scelta la tecnica di «compensation grouting».

La tecnica di trattamento mediante iniezioni di compensazione (compensation grouting) consente di contenere e talora annullare i cedimenti indotti su di una struttura da un'azione esterna (applicazione di carichi, subsidenze dovuto allo scavo di una galleria al di sotto delle fondazioni, ecc.).

In concomitanza con lo sviluppo dei cedimenti sulla struttura, costantemente monitorati attraverso sofisticate strumentazioni, viene effettuata in tempo reale una iniezione ripetuta, selettiva ed a volume controllato di miscele studiate opportunamente, finalizzata a compensare volumetricamente il cedimento indotto dall'azione esterna sino al limite massimo ammissibile.

L'iniezione avviene per mezzo di tubi valvolati (tubes a manchettes, TAMs) posizionati al di sotto della struttura soggetta a cedimento.

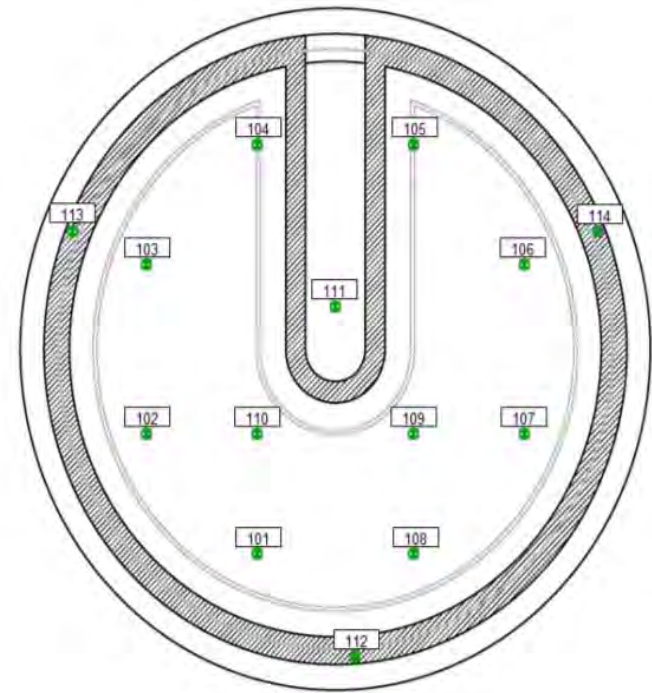
Si tratta di una tecnica di consolidamento di tipo attivo, che consente cioè di reagire al comportamento deformativo che si sviluppa, modificando in tempo reale le strategie di intervento sulla base del principio osservazionale.



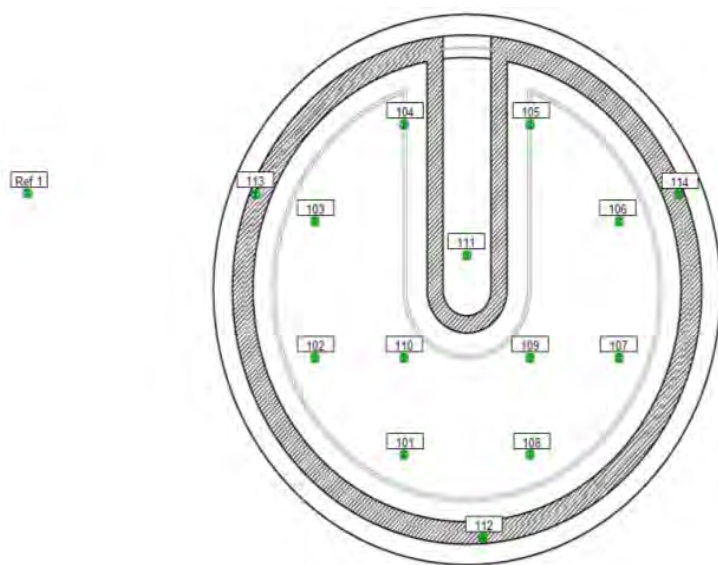
Esecuzione delle perforazioni per la realizzazione delle iniezioni di compensazione

MONITORAGGIO GEOTECNICO IN CORSO D'OPERA

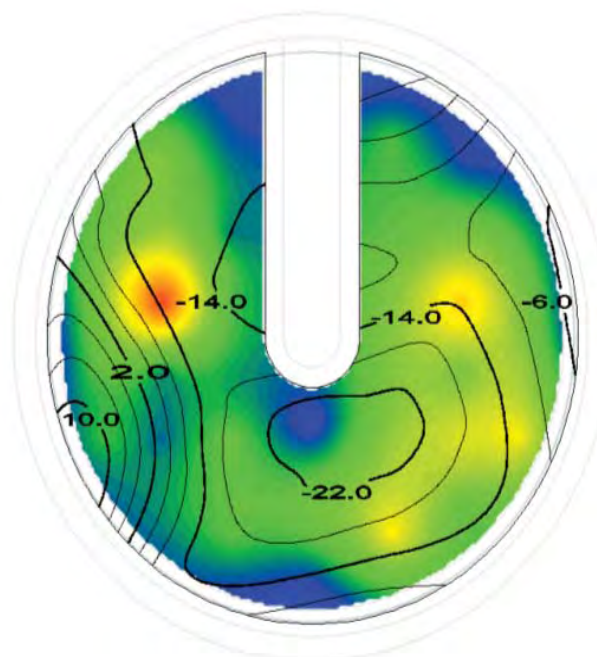
Il monitoraggio delle deformazioni del fondo del serbatoio durante le fasi di riempimento ed iniezione è stato affidato ad un insieme di tazze livellometriche opportunamente ubicate e collegate mediante un circuito idropneumatico, mediante il quale, con riferimento ad un elemento posizionato in un punto sicuramente fisso sul fondo, si è potuto valutare nel tempo lo spostamento verticale degli altri elementi costituenti il sistema (DIFFERENZIALE)



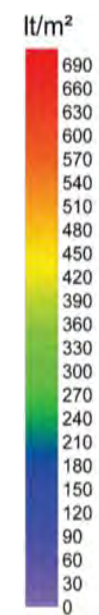
MONITORAGGIO GEOTECNICO IN CORSO D'OPERA



Disposizione tazze assestimentriche



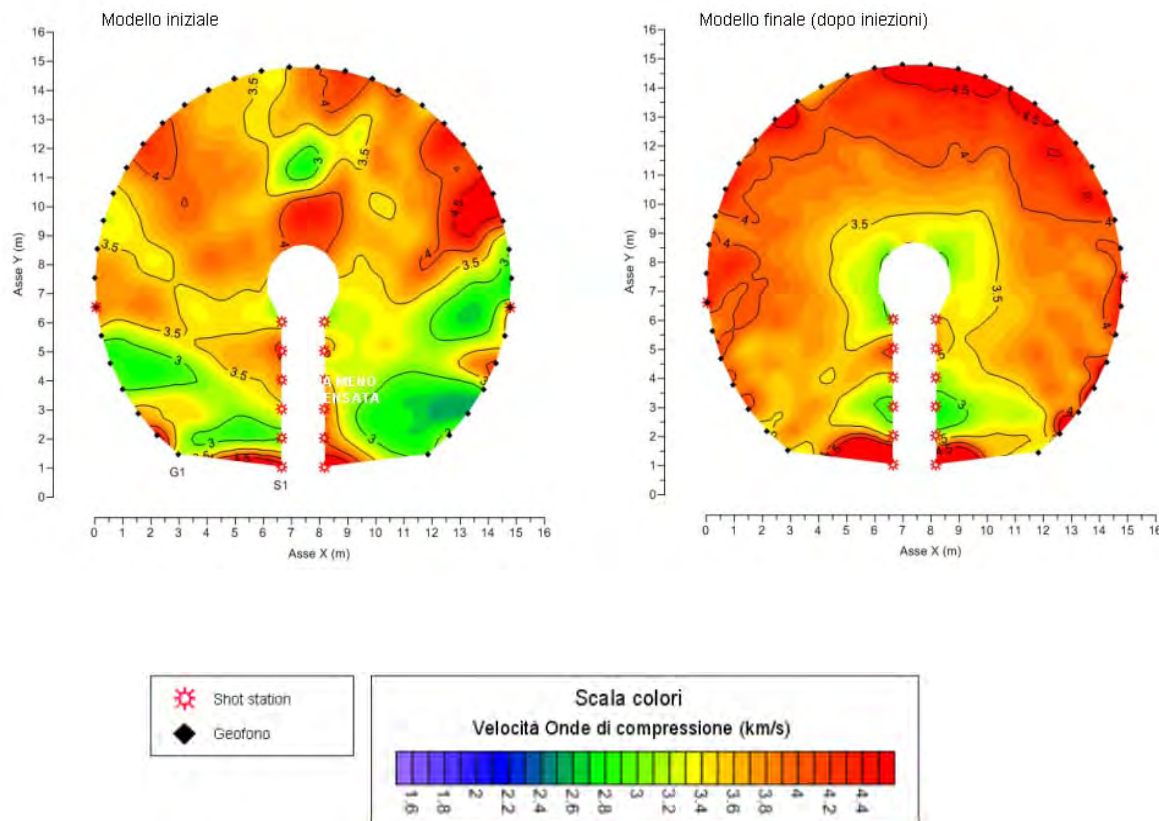
Volumi iniettati e cedimenti verticali per altezza d'acqua pari a 13.50m (isolinee di cedimento in mm, negativi diretti verso il basso)



VERIFICA GEOFISICA EX-POST

Al fine di valutare il miglioramento delle proprietà del terreno conseguito a seguito del trattamento con iniezioni (miglioramento permanente a lungo termine) è stata effettuata un'indagine geofisica con le medesime caratteristiche di quella eseguita prima del trattamento di compensazione.

La nuova indagine effettuata, perfettamente sovrapponibile a quella precedente in virtù dell'utilizzo del medesimo schema di energizzazione e misura, ha evidenziato un importante miglioramento delle caratteristiche del riempimento, in termini di omogeneizzazione della velocità delle onde sismiche, con incremento generalizzato in tutti i settori del riempimento (compreso tra il 25 ed il 35% dei valori iniziali).



Grazie per l'attenzione

