



COMMISSARIO di GOVERNO
per il contrasto del dissesto idrogeologico nella Regione Siciliana

**MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA
STRADA DI COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO - FRAZIONE
PECORINI A MARE - FILICUDI (ME)**

Patto per il SUD-ME_17821 Lipari - Filicudi - Codice Caronte SI_1_17821 - CUP J69D16002060001

PROGETTO ESECUTIVO

Coordinamento e integrazione
delle prestazioni specialistiche

Ing. D. Majolino (IENCON-NETEC)

Geologia

Dott. F. Cannavò, Dott. M. Orifici (ORION)

Progettazione Geotecnica

PhD Ing. I.Cavarretta (IENCON-CDG)

Progettazione Idraulica e Stradale

PhD Ing. I.Cavarretta, Ing. S. Merlino (IENCON-CDG-NETEC)

Progettazione Strutturale

PhD Ing. I.Cavarretta (IENCON-CDG)

Progettazione Paesaggistica

Arch. B. Versaci (ORION)

Progettazione Ambientale

Ing. S. Merlino (IENCON-NETEC)

Coordinamento sicurezza in progettazione

Ing. M. Brancatelli (ORION)

Cantierizzazione e interferenze

Ing. M. Brancatelli (ORION)

Elaborati Economici

Ing. G. Baratta (IENCON-NETEC)

Sistema Gestione Qualità

Ing. L. Gangitano (IENCON-CDG)

Visto:

il R.U.P.

Arch. Mirko Ficarra

Raggruppamento temporaneo:



CIVIL DESIGN GROUP
C.D.G. INGEGNERIA



DATA:

--/--/--

CONSORTILE MANDATARIA - s.c.a.r.l.

CONSORZIATE ESECUTRICI - s.r.l.

SOCIETÀ MANDANTE - s.r.l.s.

Relazioni tecniche e relazioni specialistiche
Relazione geologia e certificati indagini

codice progetto			nome file				REVISIONE	SCALA
progetto liv. prog. n. prog.			T00_GE00_GEO_RE01_C					
F I L I 2 4	E	0 0 0 1	opera/ progr.	ambito/progr.	cod. disciplina	cod. tipo elab.		
F I L I 2 4	E	0 0 0 1	T 0 0	G E 0 0	G E O	R E 0 1	C	-
C	Terza emissione				Settembre 2024	Dott. F. Cannavò	Arch. B. Versaci	Ing. L. Gangitano
B	Seconda emissione				Luglio 2024	Dott. F. Cannavò	Arch. B. Versaci	Ing. L. Gangitano
A	Prima emissione				Marzo 2024	Dott. F. Cannavò	Arch. B. Versaci	Ing. L. Gangitano
REV.	MOTIVO DELLA REVISIONE				DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

**MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA
STRADA DI COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO - FRAZIONE
PECORINI A MARE - FILICUDI (ME)**

CUP J69D16002060001 CIG 81187647FE



Elaborato

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE GEOLOGICA E CERTIFICATI INDAGINI

R.T.P.

(Mandataria)

IENCON Scarl



(Esecutori servizi)



CIVIL DESIGN GROUP
C.D.G. INGEGNERIA



(Mandante)

ORION Progetti Srls



Redatto:

ORION Progetti Srls
Geol. Francesco Cannavò



Verificato:

Direttore tecnico
ORION Progetti Srls

Arch. Benedetto Versaci



Approvato:

Progettista responsabile delle
integrazioni specialistiche

Ing. Domenico Majolino



II R.U.P.

Arch. Mirko Ficarra

Maggio 2021

Sommario

1. PREMESSE	2
2. CARATTERISTICHE GENERALI DELL'INTERVENTO	4
3. RIFERIMENTI NORMATIVI.....	8
4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	9
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	10
5.1 - Stratigrafia	15
5.2 - Aspetti geologico locale	16
5.3 - Sintesi delle indagini geologiche	28
6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	32
6.1 - Caratteristiche generali del territorio;	32
6.2 - Caratteristiche locali.....	34
7. ASPETTI CLIMATOLOGICI	39
8. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	42
8.1 Aspetti idrogeologici generali	42
8.2 Aspetti idrogeologici nell'area di progetto.....	43
9. SISMICITÀ	44
9.1 Sismicità nell'isola di Filicudi.....	44
9.2 Modello sismico di progetto	46
10. CONCLUSIONI E PROPOSTE D'INTERVENTO.....	48

Allegati fuori testo:

- *Tav 1 Carta Corografica IGM Scala 1:25.000*
- *Tav 2 Carta Geologica e geomorfologica a scala 1:5.000*
- *Tav 3 Sezioni litostratigrafiche scala 1:2.000*
- *Tav 4 Planimetria delle indagini scala 1:2.000*
- *Appendice 1: Relazione indagini geognostiche, geofisiche e georadar*

1. PREMESSE

Con Decreto a contrarre n. 1724 del 27/11/2019, il **Commissario di Governo contro il Dissesto idrogeologico nella Regione Siciliana** ha indetto una gara mediante procedura aperta per l'affidamento dei servizi *ME_17821_LIPARI - FILICUDI (ME) – “Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato – frazione Pecorini a mare – Filicudi (ME)”*. Appalto per l'affidamento dello Studio geologico, Progettazione definitiva, Progettazione esecutiva, Coordinamento Sicurezza in fase di Progettazione ed indagini geognostiche. Codice Caronte SI_1_17821 – Codice ReNDiS 19IRD85/G1 - CUP J69D16002060001 - CIG 81187647FE

Con Decreto Commissariale n. 1662 del 22/09/2020 è stata approvata la proposta di aggiudicazione efficace dell'appalto dell'affidamento dei suddetti servizi al COSTITUENDO RTP: Società consortile IENCON a.r.l. (capogruppo) – ORION PROGETTI S.R.L. (mandataria) con sede legale in Palermo, Via Monte Giberto, 67 Roma.

Il sottoscritto geologo Francesco Cannavò, socio di ORION Progetti Srls, a margine della sottoscrizione del Contratto per l'affidamento dei servizi in oggetto, ha proceduto a eseguire i rilievi geologici preliminari. Successivamente il sottoscritto geologo, in concorso con i progettisti Ingg. Ignazio Cavarretta e Domenico Majolino, ha proceduto alla redazione del Piano delle Indagini nell'area in progetto.

Con l'approvazione da parte del RUP del Piano delle indagini predisposto si è proceduto a eseguire le indagini geognostiche, geofisiche, geotecniche propedeutiche alla redazione della relazione geologica, affidate con contratto di subappalto alla Si.Ar. Trivellazioni di Rosario Simonetti.

Le diverse fasi che hanno caratterizzato il lavoro vengono riassunte brevemente a seguire:

- Consultazione bibliografica relativa a lavori di carattere geologico svolti nel

territorio d'interesse;

- Consultazione dei dati termo-pluviometrici relativi alle stazioni più vicine all'isola di Filicudi;
- Rilevamento delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche dell'area d'interesse progettuale e del suo intorno con redazione delle relative carte tematiche;
- Predisposizione del Piano delle Indagini consistente in:
 - n. 2 indagini di sismica a rifrazione elaborate sia con la tecnica del G.R.M. che con la "tomografia sismica" in configurazione a 24 canali con interdistanza geofonica di 2,5 m per una lunghezza complessiva dello stendimento di ml 62,5, identificate in planimetria con la sigla "SS1" e "SS2";
 - n. 1 indagine sismica del tipo "MASW", sullo stesso allineamento dello stendimento sismico "SS2", con offset dello scoppio di 5 m;
 - n. 300 ml di indagine "georadar";
 - n. 10 carotaggi lungo la strada provinciale per verificare la consistenza del corpo stradale e del substrato di imposta di cunette e muretti di contenimento da progettare;
 - rilievo con velivolo APR lungo la strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare per un totale di poco più di 61 ettari rilevati.
- Definizione del contesto geomorfologico;
- Definizione dei modelli geologico, idrogeologico, sismico.

Le informazioni acquisite nell'ambito dei rilievi di superficie sono state riportate nelle allegate cartografie geo-litologiche, geomorfologiche e idrogeologiche.

2. CARATTERISTICHE GENERALI DELL'INTERVENTO

Il progetto di fattibilità tecnica ed economica posto a base di gara aveva previsto la sistemazione della S.P. Agr. Filicudi Porto – Pecorini, che presenta uno sviluppo longitudinale complessivo di poco meno di 7 km., attraverso:

- Interventi sul piano viabile;
- Sistemazione dei versanti e sulla sicurezza della circolazione.

L'intervento prevede il rifacimento della pavimentazione stradale, attraverso la scarifica di alcune parti, il livellamento e la stesura del tappetino di usura per l'intera larghezza e lunghezza della carreggiata. Il rifacimento delle strisce di margini e la collocazione di segnaletica stradale sia orizzontale che verticale. Inoltre è prevista, nei tratti individuati dal progetto, la sistemazione dei versanti a monte della strada attraverso la collocazione di rete paramassi e la realizzazione di una gabbionata per il ripristino situazione preesistente a seguito frana.

L'intero tracciato è stato percorso dagli scriventi durante i vari sopralluoghi. Esso presenta una serie di criticità che mettono a rischio la sicurezza del percorso, individuate principalmente nelle seguenti cause:

- la caduta di detriti, anche di grossa pezzatura, dai versanti sovrastanti;
- il deterioramento del conglomerato bituminoso;
- le delimitazioni del ciglio lato valle, a volte assenti, costituite da delimitazioni di entità ridotte ad evitare il rischio di caduta, il guard-rail esistente, a tratti danneggiato o ceduto e comunque di altezza non regolamentare e non idoneo ad evitare, in caso di urto, il rischio di caduta a valle, i paracarri a tratti danneggiati e parzialmente crollati.

Le situazioni riscontrate e le relative criticità vengono nel seguito descritte con riferimento allo sviluppo longitudinale della strada suddividendolo in 6 settori partendo dal porto di Filicudi.

Settore 1 – Zona Filicudi Porto

Nel tratto compreso tra la frazione di Filicudi Porto e la frazione di Canali, non si

riscontrano particolari criticità. Gli interventi principali sono rivolti alla regolarizzazione dei cigli, la sfalcatura di arbusti che rendono insicura la transitabilità della strada ed il rifacimento di porzioni del manto bituminoso nei tratti degradati.

Settore 2 – Zona raccolta rifiuti

Qui si individuano due tratti a mezzacosta, rispettivamente, a valle e a monte dell'area destinata a stazione di stoccaggio dei rifiuti. Il primo lungo circa 230m (tratto a valle) ed il secondo lungo circa 120m (tratto a monte).

Nel tratto a valle, la strada è in gran parte molto esposta sul sottostante pendio con un guardrail in stato precario. In adiacenza al ciglio opposto della carreggiata, controripa, si riconoscono i detriti vulcanici frammisti e quelli dovuti al crollo di blocchi che delimitavano antichi terrazzamenti.

Nel tratto a monte dell'area di stoccaggio rifiuti, affiorano controripa le bancate laviche con blocchi a luoghi delimitati da giunti di apertura significative e prossimi al distacco. In tutto il settore si rinviene vegetazione minore che parzialmente occupa la carreggiata lungo tratti ad entrambi i cigli, ed anche attecchita su scorie di sabbia e ghiaia trasportate dalle acque di pioggia non regimate.

Settore 3 – Tornante sopra la zona raccolta rifiuti

I tufi vulcanici a margine del tornante inciso a monte della zona raccolta rifiuti si presentano friabili e la loro erosione progressiva provoca il rilascio di scorie sabbiose e ghiaiose. Queste ultime invadono progressivamente la carreggiata anche per effetto della corrivazione delle acque di pioggia. Nel tratto più elevato i tufi inglobano blocchi che appaiono precariamente legati al circostante ammasso.

Settore 4 – Località Canali - Rocca di Ciaule e tratto sommitale

Procedendo verso monte, sino alla frazione Canali, non ci sono particolari criticità, fatta salva la necessità di ripulire la vegetazione spontanea. Nei due tornanti prima di raggiungere l'albergo Villa La Rosa si accumulano a tratti pericolosi veli di scorie detritiche di ghiaia fina. Al riguardo si ha notizia di diversi incidenti che nel passato hanno movimentato il soccorso della locale postazione medica, specialmente a causa di cadute dai ciclomotori che in gran numero vengono affittati nel periodo estivo ai visitatori dell'isola. Nel tratto sommitale i detriti con gli incorporati blocchi vulcanici

appaiono a luoghi instabili o erodibili, con possibili conseguenze di crollo sulla carreggiata. Inoltre, si rinviene un tratto di carreggiata ad ampiezza ridotta, con conseguenti disagi ed accentuata pericolosità nel tratto in curva. I bordi della strada sono poco definiti ed interessati anche da alberi di alto fusto o da blocchi disposti lungo il ciglio di sottoscarpa.

Settore 5 - Tratto a mezzacosta con accesso a proprietà private

In questo tratto sono stati realizzati muretti-cordolo controripa, per trattenere il materiale fine che per dilavamento o piccoli cedimenti, arriva sulla carreggiata. Sono state realizzate anche alcune gabbionate controripa che hanno bene assolto alla protezione della carreggiata ed al mantenimento della larghezza stradale. Una micro-trincea con taglio ed asportazione meccanica è stata eseguita per l'interramento di cavi elettrici o di comunicazione sottoservizi, ed era non ancora ripavimentata alla data sul sopralluogo. Estesa lungo una rilevante sezione del tratto in prossimità del ciglio controripa, rappresenta un pericolo sensibile per la circolazione ed in particolare per cicli e motocicli.

Settore 6 - Discesa verso Pecorini a mare

Superata la parte inferiore della frazione Canali e procedendo verso la frazione Pecorini a mare, si è osservata la parte più critica dell'intero tracciato. Le riprese fotografiche ivi eseguite il 3 01 2020 sono raccolte nelle tabelle delle Figure 19 e 20, relative rispettivamente al tratto superiore ed a quello inferiore di tale settore. Negli anni precedenti sono state eseguite alcune opere finalizzate a migliorarne la condizione generale ed in particolare:

- la posa di reti para massi con maglie di dimensioni diverse; le maglie fini hanno trattenuto parte del materiale che va cedendo; le maglie più larghe hanno trattenuto i cedimenti con grossa pezzatura, non riuscendo però a fermare le frazioni inferiori ai 30 cm.*
- la realizzazione di muretti di pietra, per trattenere il materiale fine che per dilavamento o piccoli crolli o cedimenti potrebbe arrivare sulla carreggiata.*

I suddetti interventi sono stati realizzati a tratti, e comunque in misura limitata rispetto alla necessità dettata dalla odierna situazione. Peraltro il degrado del tempo

ha provocato, in alcuni tratti, il distacco delle reti al piede, per cui il materiale trattenuto si riversa ora sulla carreggiata.

Anche in questo tratto le opere di delimitazione della carreggiata, lato valle, sono inadatte a garantire la sicurezza stradale, sia perché a tratti mancanti, sia perché, ove presenti, sono certamente inadatte per l'altezza estremamente limitata delle opere o dei guard-rail, sia per lo stato in cui si presentano oggi, con paracarri murari interconnessi da tubi metallici in parte crollati. Il rischio maggiore riscontrato è comunque quello derivante dal distacco di materiale dai versanti di monte, dove sono presenti blocchi in incipiente distacco dall'ammasso roccioso localmente interessato da giunti persistenti ed aperti.

Il degrado del manto stradale è diffuso e a macchia di leopardo, dovuto sia a deterioramento da usura che da degrado da dilavamento e da caduta del materiale sulla carreggiata. Come nel primo tratto, anche in questo settore più basso sono presenti restringimenti della carreggiata dovuti ad accumuli di materiale distaccatosi dalle pareti o a pericolosi rigonfiamenti al piede delle scarpate controripa. Parimenti, in tale tratto inferiore si osserva infine un precario collegamento con stradelle e piazzali di servizio oltre che l'assenza di opere di regimazione idraulica. Infine un accumulo di materiale detritico in incipiente movimento si è osservato a valle del secondo tornante sopra Pecorini porto.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI

A seguire si richiamano le principali norme, ordinanze, linee guida e documenti a cui si è fatto riferimento nella conduzione dello studio geologico commissionato e nella stesura della presente relazione:

- D.M. 17.01.2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- CIRCOLARE C.S.LL.PP. N° 7 del 21.01.2019;
- Legge 3 agosto 1998, n. 267;
- D. Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.;
- D.lgs. 50/2016, art. 23.
- Linee guida per la valutazione del dissesto idrogeologico e la sua mitigazione attraverso misure e interventi in campo agricolo e forestale;
- Linee guida Gruppo interregionale Ordine dei Geologi;
- Progetto Qualità 2010 CNG (Consiglio Nazionale dei Geologi);
- Linee guida per le attività di programmazione e progettazione degli interventi per il contrasto del rischio idrogeologico;
- AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.

4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Filicudi è la quinta isola in ordine di grandezza dell'arcipelago delle Eolie. Amministrativamente fa parte del Comune di Lipari, con una superficie che misura 9,5 Kmq, con un'altezza di 774 m s.l.m.,



Figura 1 – Arcipelago delle isole Eolie

L'isola è caratterizzata da versanti scoscesi e coste rocciose, ed è formata da un gruppo di crateri tra i quali il più alto è Fossa delle Felci (773 m). Dall'anno 2000, insieme alle altre Isole Eolie, è stata inserita nella lista dei Patrimoni dell'umanità Unesco, con provvedimento ICOMOS N. 908.

Dal punto di vista topografico l'isola è coperta parzialmente dalla cartografia alla scala al 2000 (5800314 – 5800318 – 5800319 – 5800320 – 5800325), e interamente dalla Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) n° 580030 alla scala 1:10.000 e dal Foglio 244, Quadrante III, Orientamento NO della Tavoleta della Carta d'Italia alla scala 1:25.000 edita dall'Istituto Geografico Militare del 1969.

Le coordinate WGS84 e UTM del sito di progetto, prendendo come riferimento della partenza della strada il porto di Pecorini a mare, sono:

Coordinate geografiche	38.558784	14.565713
UTM – Zona 33 S	4267912 m N	4621843 m E

Tabella 1 - Coordinate all'incrocio della SP al porto di Pecorini a mare

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le Isole Eolie fanno parte di un sistema arco-fossa-bacino marginale che è il risultato della collisione tra le placche convergenti Africana ed Eurasiatica lungo il margine della placca Africana. Il piano di subduzione si immerge dal Mar Ionio verso il bacino del Tirreno meridionale e consiste in una stretta (200 Km) zona di Benioff con direzione NE-SW, immersione verso NW con inclinazione di circa 60° gradi e profonda fino a 500 Km. La zona di subduzione è sede di intensa attività sismica.

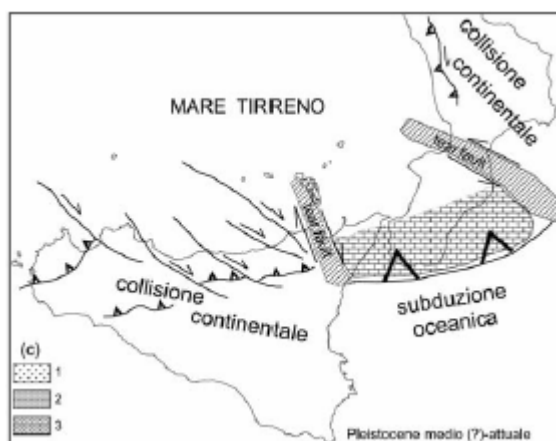


Figura 2 - Sistema arco-fossa bacino marginale
(Guarnieri P., Carbone S., 2003)

L'arcipelago eoliano rappresenta la porzione emersa dell'arco vulcanico attivo localizzato tra il bacino di retro-arco del tirreno meridionale (bacino oceanico Marsili) e la regione avan-arco dell'Arco Calabro, una catena ercinica interessata dalla tettonica estensionale (bacini fore-arc) e generale sollevamento tardo Quaternaria. L'arcipelago è costituito da sette isole e da numerosi rilievi sottomarini "seamount" disposti secondo una struttura vulcanica ad arco che ha uno sviluppo lineare di circa 200 Km.

Considerando che le isole si elevano da fondali di 1.500-2.000 m di profondità e che possono raggiungere quasi 1.000 m (987 m s.l.m. M.te Fossa delle Felci nell'isola di Salina) si osserva che alcuni dei complessi vulcanici emersi possono raggiungere un'altezza di circa 3.000m, comparabile con quella dell'Etna.

La struttura dell'Arco Eoliano è intersecata nel suo settore centro-meridionale, da un'importante lineamento tettonico regionale (linea Eolie-Tindari-Giardini), che condiziona strettamente la distribuzione dei centri vulcanici in questo settore. L'inizio dell'attività vulcanica viene fatta risalire, sulla base dell'età di campioni dragati alla base degli edifici vulcanici, a circa 1,3 Ma, mentre i dati geocronologici indicherebbero una graduale migrazione dell'attività vulcanica da W verso E.

Tutti i vulcani delle isole sono caratterizzati da strutture composite e stratovulcani. Attività effusiva ed esplosiva da numerosi centri di emissione ha prodotto spessi flussi di lava e duomi, così come spesse (fino a 70m) sequenze piroclastiche.

Le isole Eolie consistono principalmente di prodotti vulcanici e, subordinatamente, da depositi marini tardo-quadernari e depositi costieri recenti e continentali. Forme marine terrazzate sono state rilevate sulle isole di Lipari, Salina, Alicudi, Filicudi e Panarea. Essi consistono principalmente in lembi residui di superfici terrazzate poste a differenti quote. Le forme più evidenti sono rappresentate da piattaforme d'abrasione marina coperte da conglomerati costieri a grossi blocchi.

I terrazzi d'abrasione, sono il risultato di una prolungata azione erosiva e, nelle aree vulcaniche, sottolineano l'assenza di attività vulcanica, così essi rappresentano importanti marker stratigrafici nella definizione dell'evoluzione del vulcanismo. Tali fenomeni si sono ripetuti più volte negli ultimi 200 Ka lasciando traccia in vari ordini di terrazzi, a quote diverse. Le piattaforme d'abrasione si rinvencono fino a 100-120 m di profondità nei settori più antichi di tutte le isole.

L'isola di Filicudi si estende per circa 9.5 Km² e raggiunge un'altezza di 776 m s.l.m.: essa rappresenta la porzione emersa di un grande sistema vulcanico che si erge da una profondità di circa 1.000 m sotto il livello del mare. Oltre all'isola, altri resti di questo apparato sono lo scoglio La Canna e il Banco di Filicudi (47m

sotto il livello del mare) che si trovano a NW dell'isola stessa. I centri vulcanici emersi e quelli sommersi delineano una catena vulcanica che si prolunga per circa 35 Km in direzione NW-SE e termina all'altezza del centro sommerso di Alicudi Nord. Le lave del centro di Zucco Grande sono state datate 1.0 Ma (Santo et al., 1995), così da rappresentare i prodotti più antichi dell'arcipelago eoliano, e forniscono un prezioso strumento per una migliore ricostruzione della geologia di Filicudi.

L'evoluzione geologica di Filicudi si articola in tre stadi evolutivi. Il I° stadio inizia con la deposizione delle piroclastiti e delle lave andesitiche del centro dello Zucco Grande (Paleo-Filicudi) la cui ubicazione va collocata in mare a NE di Punta dello Zucco Grande (ZG). L'attività di questo antico centro vulcanico è caratterizzata nella sua fase finale da un grande collasso vulcanotettonico: ad esso segue un lungo periodo di stasi (circa 700.000 anni) caratterizzato da un'intensa fase erosiva esercitata dall'azione del mare. Intorno a 400.000 anni fa l'attività vulcanica riprende in due punti, più o meno contemporaneamente: si attivano perciò in rapida successione i centri di Filo del Banco (FB) e del Bue Marino (BM) i cui resti affiorano sulla costa N e W e sono rappresentati da colate laviche basaltiche.

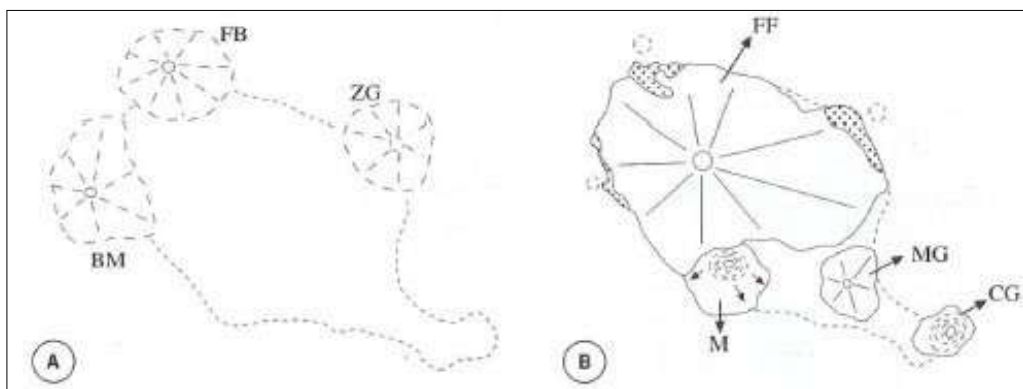


Figura 3a - Stadi evolutivi dell'isola di Filicudi (Calanchi 1996)

Trascorso un ulteriore periodo di quiescenza, circa 200.000 anni fa divengono attivi simultaneamente i tre centri di Fossa Felci, Chiumento e Riberosse, ai quali si aggiungono anche il centro minore di Monte Guardia e il

duomo di Capo Graziano (II° stadio evolutivo).

Fossa Felci (FF) è un grande stratovulcano composto interamente da lave di composizione andesitico-basaltica e da depositi piroclastici di caduta. Durante le fasi finali di attività si ha la messa in posto del duomo esogeno dacitico della Montagnola (M). Il Monte Guardia (MG) è un cono di scorie: qui l'erosione ha asportato metà dell'apparato che, nella sua fase iniziale vede la messa in posto di numerose e sottili colate laviche di composizione andesitico-basaltica. Capo Graziano (CG) invece rappresenta un isolato duomo endogeno avente la stessa età di Monte Guardia (190 Ka) e composizione andesitica.

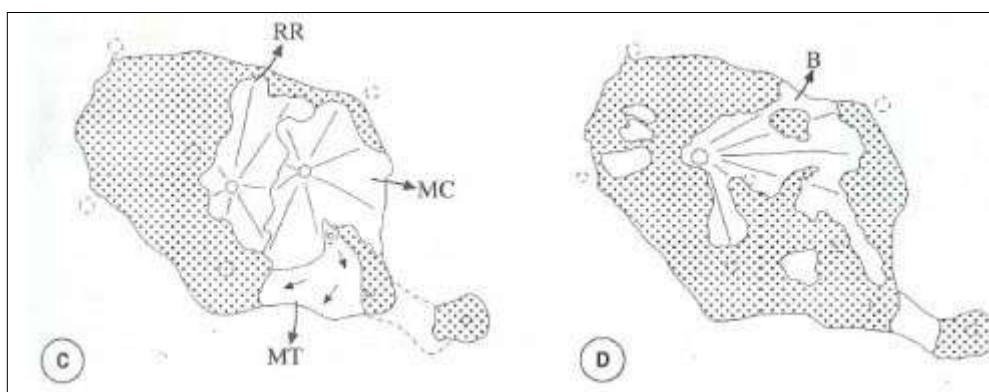


Figura 3b – Stadi evolutivi nell'isola di Filicudi (Calanchi 1996)

Monte Chiumento (MC) è un ulteriore stratovulcano costituito prevalentemente da spessi depositi di scorie con intercalate colate laviche andesiticobasaltiche, da flussi di blocchi ("block flow ") e da "mud flow ". La parte sommitale è interessata da una depressione a forma di ferro di cavallo, geneticamente dovuta al collasso gravitativo di un settore dell'edificio vulcanico: i duomi esogeni andesitici di Monte Terrione (MT) sono disposti intorno al bordo meridionale di questa depressione. Il centro di Riberosse (RR) è invece un grande cono di scorie parzialmente ricoperto da colate laviche andesitico-basaltiche e da depositi piroclastici rimaneggiati. È prevalentemente sui prodotti di questa fase che si imposta un conglomerato marino dovuto all'evento di abrasione marina che è presente anche su alcune altre isole dell'arco eoliano.

Al III° stadio di attività di Filicudi sono da attribuirsi i depositi piroclastici ("fall", "surge" e "e "flow") prodotti dal centro di Benefizio () ubicato nella parte centrale e più elevata dell'isola (tra Fossa Felci e Riberosse). Tuttavia, l'ultimo episodio in assoluto dell'apparato di Filicudi è rappresentato dal centro prevalentemente sommerso di La Canna, le cui uniche testimonianze subaeree sono rappresentate dallo scoglio della Canna, un "neck" che si eleva per oltre 70m dal livello del mare, e dallo Scoglio di Montenassari: la composizione è basaltica. Più a NW della Canna si trova infine il centro completamente sottomarino del Banco di Filicudi, di natura andesitico-basaltica.

La storia geologica di Filicudi è descritta da sei epoche eruttive caratterizzate da un'attività vulcanica omogenea. La fase più antica è datata in modo approssimativo a circa 300-330.000 anni fa mentre la fase più recente con la quale si conclude il ciclo vulcanico dell'isola con l'attività eruttiva del Monte Montagnola ricade in un momento non ben definito fra 80.000 e 55.000 anni fa. Durante questo lungo periodo di evoluzione dell'isola si formano depositi marini per lo più riferibili al Tirreniano (tra 124.000 e 81.000 anni fa), periodo durante il quale l'apparato vulcanico non è attivo. I depositi vulcanici vengono erosi dal mare e da agenti atmosferici trasformando le rocce in ciottoli arrotondati e in sabbia.

Le rocce di Filicudi rientrano in un range composizionale abbastanza ristretto, comprendente basalti, andesiti basaltiche, andesiti e rare daciti.

5.1 Stratigrafia

Filicudi come tutte le isole dell'arcipelago delle Eolie sono di origine vulcanica, pertanto, i terreni affioranti sono costituiti in massima parte da rocce vulcaniche effusive e solo localmente sormontate da depositi marini o alluvionali recenti terrazzati.

Le piroclastiti sono il prodotto dell'attività esplosiva vulcanica, in seguito alla quale i materiali frammentati espulsi e/o polverizzati si depositano in ambiente subaereo o subacqueo con strutture proprie delle rocce sedimentarie detritiche; questi possono essere suddivisi in depositi di caduta e in depositi di flusso in funzione dei meccanismi di trasporto e sedimentazione.

Le colate laviche, di spessore assai variabile, sono spesso intercalate da depositi piroclastici di scorie.

I duomi lavici consistono in un accumulo di lava con forma a bulbo e pareti ripide, che si installa sulla verticale di un condotto senza grande espansione laterale. Si forma in seguito all'emissione di lave acide e molto viscosi con un contenuto di gas insufficiente a innescare eruzione esplosiva.

I dicchi lavici sono intrusioni sub-superficiali di magma con geometria planare, discordante e a inclinazione da media a verticale.

Il litotipo maggiormente diffuso su Filicudi è costituito da alternanza di lave e piroclastiti, peraltro nella maggior parte dei casi le strutture vulcaniche sono rappresentate da stratovulcani, cioè vulcani formati dalla stratificazione di prodotti diversi, in ripetuta alternanza.

Le alluvioni recenti ed attuali, quasi assenti a Filicudi, sono dei materiali granulometricamente molto eterogenei prodotti dallo smantellamento delle vulcaniti, prevalentemente dei prodotti piroclastici più erodibili, di cui ne riflettono la natura. I materiali depositi in prossimità della costa sono per lo più grossolani (ciottoli) in relazione alla rielaborazione e selezione subita dall'azione del mare.

5.2 - Assetto geologico locale

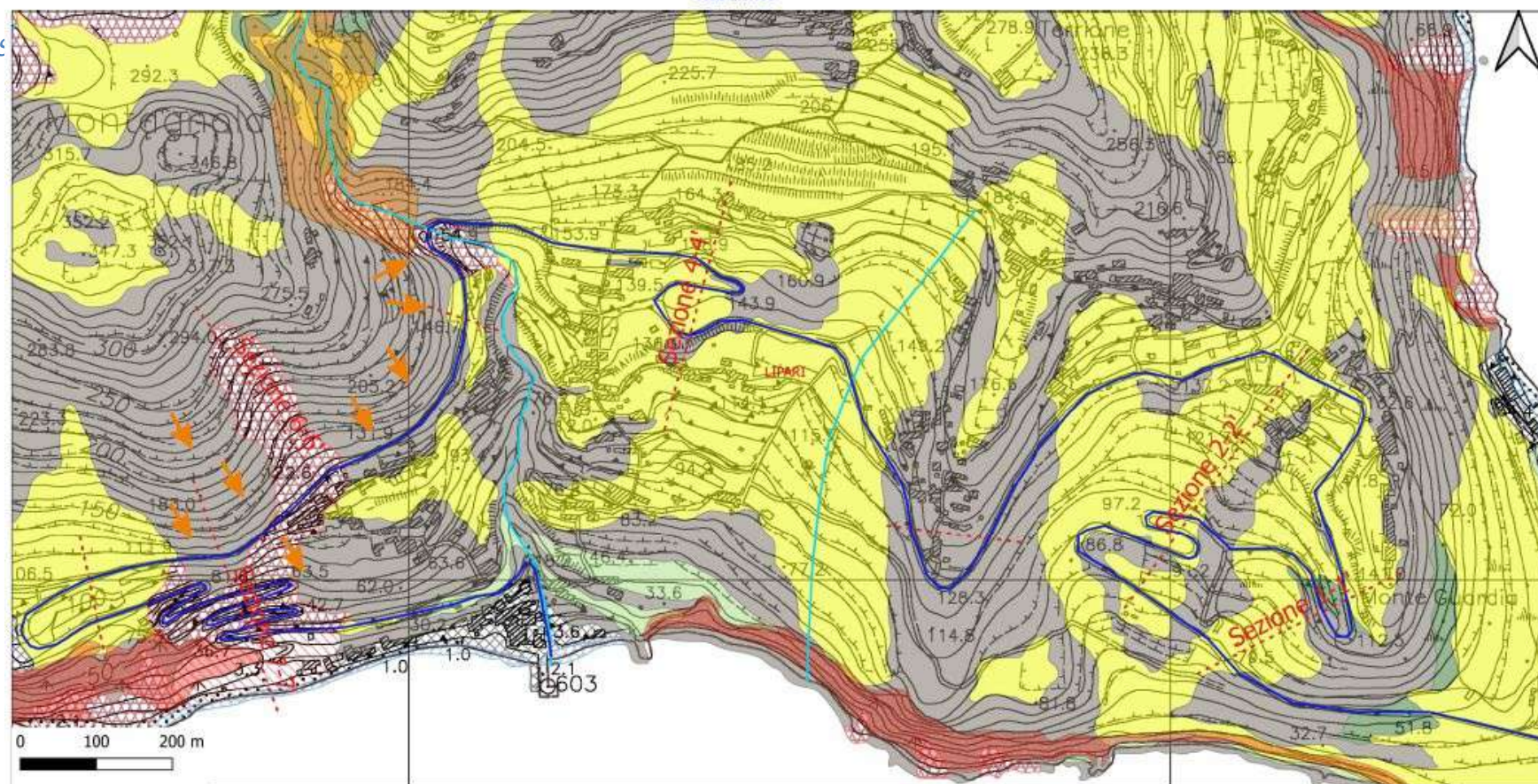
Sulla base degli elementi a disposizione in questa fase e a seguito sia di rilievi di superficie preliminari che della consultazione bibliografica della cartografia geologica ufficiale dell'Isola di Filicudi, si è proceduto a redigere una carta litologica relativa al settore di interesse progettuale e dei suoi immediati dintorni. In particolare si evidenzia che il settore orientale, caratterizzato da versanti modestamente acclivi (pendenza media 14°) è prevalentemente interessato dall'affioramento delle colate laviche associabili alla Formazione Canale di età compresa fra 170 e 125 mila anni e la Formazione Pianoconte risalente a circa 55 mila anni fa. Nel settore occidentale, dove le pendenze medie (38°) sono molto più accentuate rispetto a quello orientale, prevalgono le colate laviche, costituite prevalentemente da bancate di composizione andesitica e dacitica, afferenti alla Formazione Stimpagnato di età compresa fra 81 e 55.000 anni.

Oltre alla redazione della carta litologica si è proceduto a costruire lungo 8 diverse direttrici monte-valle, altrettante sezioni litostratigrafiche. Sia la carta litologica che le sezioni litostratigrafiche sono appresso rappresentate.

La carta geologica dell'isola è il risultato di una semplificazione dei lavori di dettaglio di Villari (1980) e Manetti et al. (1995), vedi figura 13, che hanno studiato la stratigrafia delle vulcaniti dell'isola, suddividendole in 3 periodi eruttivi, durante i quali sono stati attivi, anche contemporaneamente, almeno 6 edifici vulcanici e vari centri periferici.

L'attività vulcanica a Filicudi risulta quindi dall'interazione più o meno contemporanea di vari centri eruttivi dislocati in tutta l'isola; non sono evidenti particolari allineamenti dei centri, se si esclude un certo allungamento E-O di tutta l'isola.

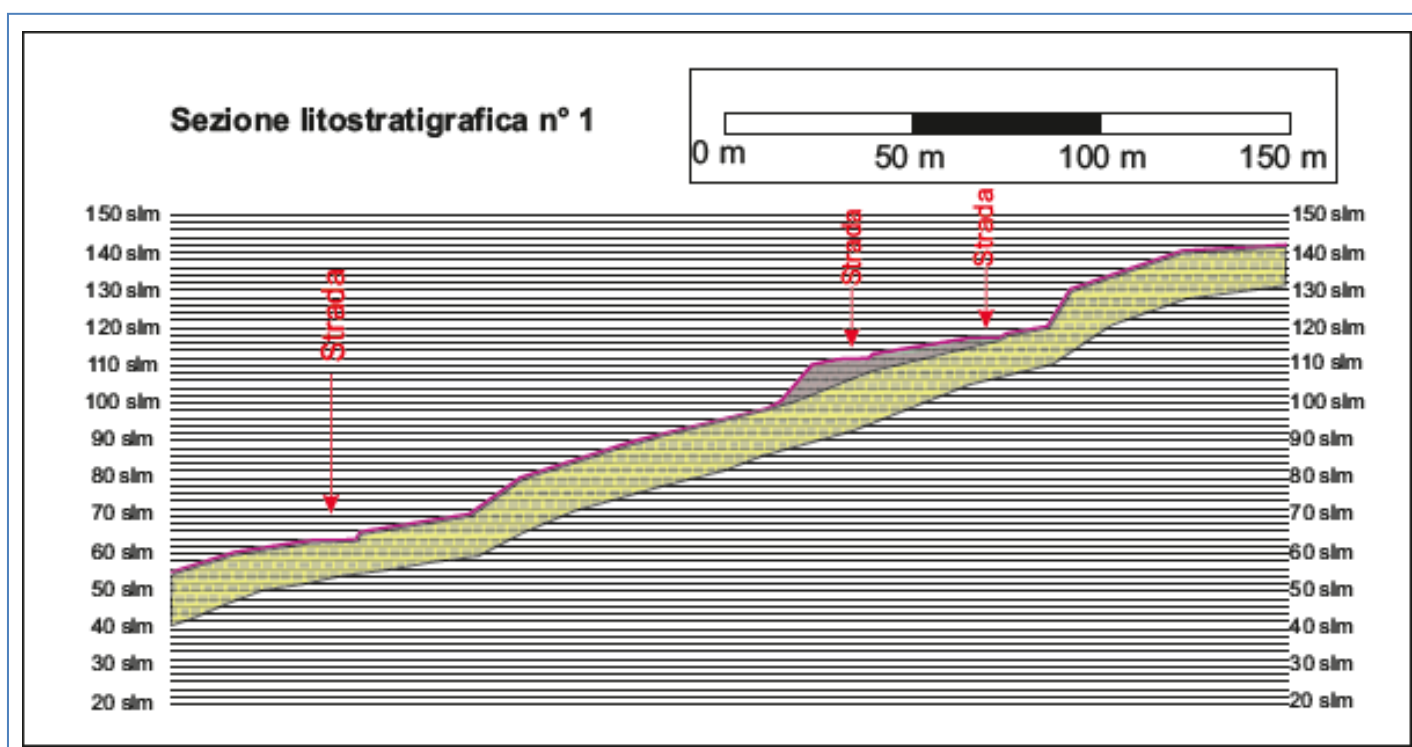
"MESS"





LEGENDA

— Strada provinciale	Litologie affioranti
— Rete idrografica	Settore atropizzato
- - - Direttrici di sezione litostratigrafica	Detrito di falda
Dissesti PAI	Detrito di versante
Crollo e/o ribaltamento	Depositi alluvionali, di spianata costiera e di spiaggia
Scorrimento	Depositi fluvio-marini terrazzati a varie quote.
Dissesti conseguenti a erosione accelerata	Formazioni piroclastiche sciolte e scarsamente saldate (scorie, pomici, lapilli e bombe)
→ Crolli	Formazioni vulcanoclastiche saldate e/o cementate (tufi, ialoclastiti, ignimbriti, breccie a pillows, ecc.)
	Vulcaniti lapiridee (hancate laviche e corpi lavici, ecc.)

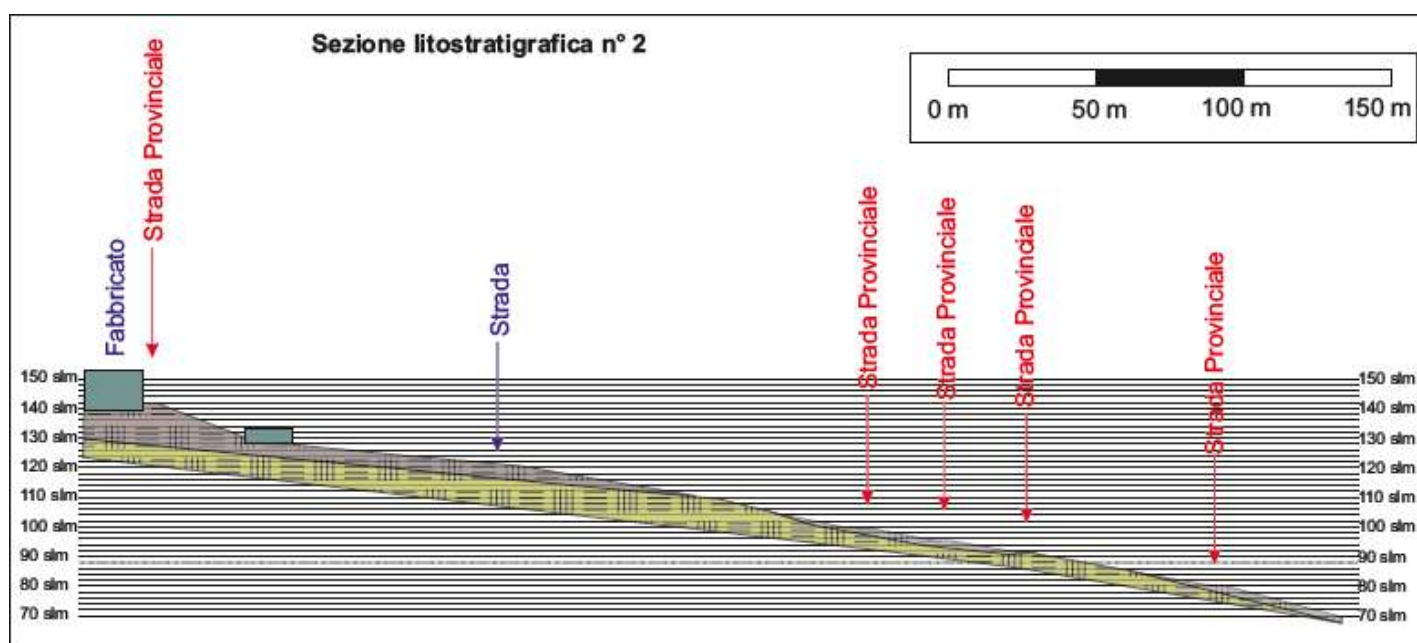
In corrispondenza della direttrice n° 1, si evidenzia il versante con pendenza media 19°. In 3 brevi tratti della direttrice monte-valle analizzata, si rilevano degli incrementi di pendenza, mentre dal punto di vista litologico, il settore medio-alto, della zona osservata, presenta una copertura di vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche basaltiche dello spessore variabile fino a circa 10 metri, sui banchi lavici andesitici (Formazione Canale) che costituiscono i litotipi di substrato dell'intera area d'interesse progettuale.



- | | |
|---|--|
|  | Vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro. |
|  | Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi. |

In corrispondenza della direttrice n° 2, si evidenzia una pendenza media di circa 13°. In questo settore in successione stratigrafica si riscontrano le colate della Formazione Pianoconte su quelle della Formazione Canale. Nei pressi della

discarica, in alcuni settori, si evidenzia coltre detritica di copertura di spessore variabile fino a circa 2 metri. Tale coltre si presenta ben addensata e parzialmente cementata, costituita da elementi litici di origine vulcanica, di pezzatura prevalentemente centimetrica con frequenti inclusioni di blocchi basaltici e/o andesitici di maggiore diametro, a tessitura grano-sostenuta, raramente fango-sostenuta e con matrice sabbiosa. Tale coltre è soggetta a dilavamento con costante erosione delle parti-celle superficiali e conseguente deposizione lungo i margini dell'asse stradale limitando la funzionalità delle cunette di convogliamento delle acque di deflusso superficiale.



- | | |
|--|--|
| | Vulcanoclastiti eterometriche e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro. |
| | Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi. |

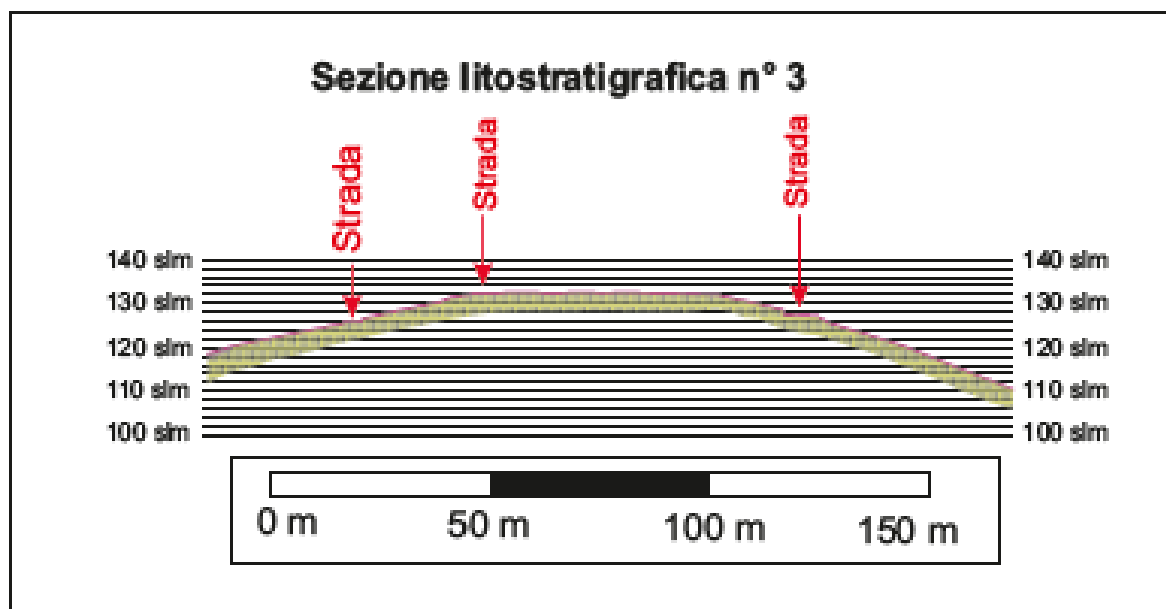
La foto proposta a seguire rappresenta una porzione detritica cementata nel settore a ovest di Monte Guardia a ridosso della SP in progetto. Risulta evidente



il buon grado di addensamento e di parziale cementazione dei granuli prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi che la costituiscono.



Foto 1 - Copertura detritica

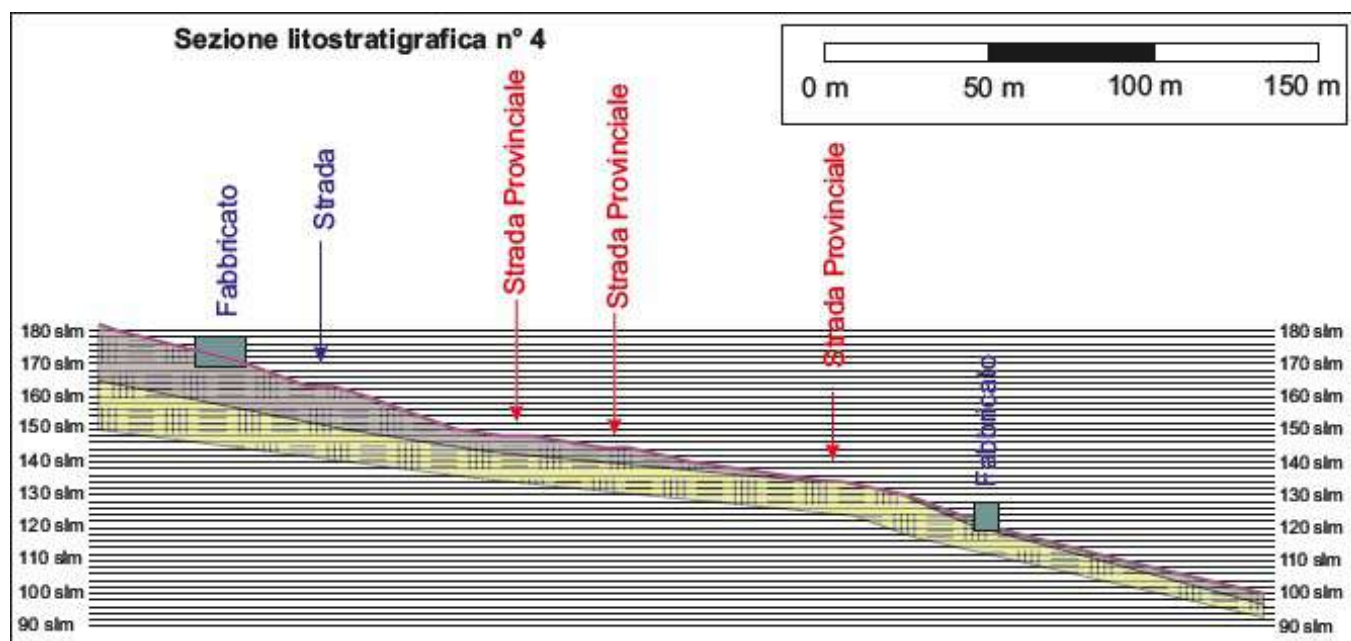
La sezione litostratigrafica n° 3 è stata costruita lungo una direttrice est-ovest passante per uno spartiacque allo scopo di valutare in questo ambito le pendenze e le eventuali criticità rilevabili. Si nota un leggero declivio sia nel settore est che nel settore ovest dello spartiacque nell'ambito analizzato. Dal punto di vista litologico si rileva quasi esclusivamente l'affioramento dei banchi lavici andesitici della Formazione Canali.



	Vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro.
	Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi.

La direttrice di sezione n° 4 intercetta tre settori della sede stradale di interesse progettuale fra Portella Rocca e la frazione Pecorini. La pendenza media è nell'ordine dei 14°, più accentuata nel settore medio-alto. Anche qui si osserva la sovrapposizione delle colate della Formazione Pianoconte su quelle della Formazione Canale. Le prime si trovano in affioramento nel settore medio-alto e medio-basso della porzione analizzata mediante profilo e sezione litostratigrafica, mentre le bancate laviche della Formazione Canale affiorano nel settore centrale della zona analizzata dove le lave più recenti sono state erose. Le bancate laviche sono caratterizzate da blocchi di volume variabile fino a qualche metro cubo, spesso disarticolati e, nei settori maggiormente acclivi, soggetti a fenomeni di crollo con esposizione a rischio degli elementi presenti a valle, in particolare strade e fabbricati.

A tratti anche in questo tratto si evidenzia la presenza di coltri detritiche di copertura il cui dilavamento delle particelle superficiale si deposita nelle cunette implicando una limitazione di funzionalità delle cunette. Il settore occidentale è caratterizzato da pendenze sostanzialmente maggiori. Nella seguente immagine sono rappresentate su ortofoto sia le direttrici di sezione che la strada di interesse progettuale e le aree in dissesto censite nel PAI.



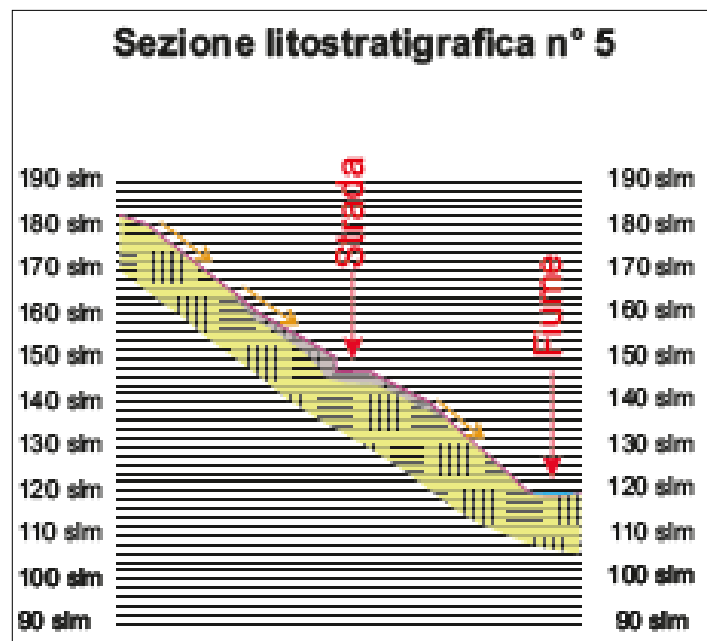
Le sezioni n° 5, n° 6, n° 7 e n° 8 hanno consentito di studiare il contesto geomorfologico e geo-litologico del settore occidentale dell'area d'interesse progettuale dove le pendenze sono molto accentuate, rispetto a quello centro-orientale, le bancate laviche sono disarticolate e si registra periodicamente il crollo di blocchi lungo il pendio con costante esposizione a rischio geomorfologico della viabilità e dei fabbricati presenti. Rispetto alle nn. 5, 6 e 7, fa eccezione la n. 8 dove le acclività si presentano meno accentuate rispetto alla media dell'intero settore occidentale della zona d'intervento.

Tali sezioni, pertanto, sono state costruite in corrispondenza di 4 direttrici scelte perché ritenute rappresentative del contesto geomorfologico e geo-

litologico dell'area di progetto. Si rileva altresì che tale settore, in considerazione delle pendenze presenti e della disarticolazione dei blocchi oltre che del loro significativo volume, è quello maggiormente soggetto a rischio geomorfologico.

Nello specifico si rileva che in corrispondenza della sezione litostratigrafica n° 5 la pendenza media del versante è nell'ordine dei 35° con tratti che raggiungono i 42°. I blocchi, di volume variabile fino a qualche metro cubo, sono disarticolati e, in considerazione della considerevole acclività soggetti costantemente a crollo esponendo a rischio la strada provinciale. Lungo questo settore alcuni tratti, in particolare nelle zone immediatamente a ridosso della sede stradale, sono state oggetto

nel tempo di alcuni interventi di mitigazione della pericolosità e del rischio da crolli. L'attuale stato del versante richiede un intervento più ampio finalizzato all'ulteriore e sostanziale mitigazione della pericolosità geomorfologica presente.



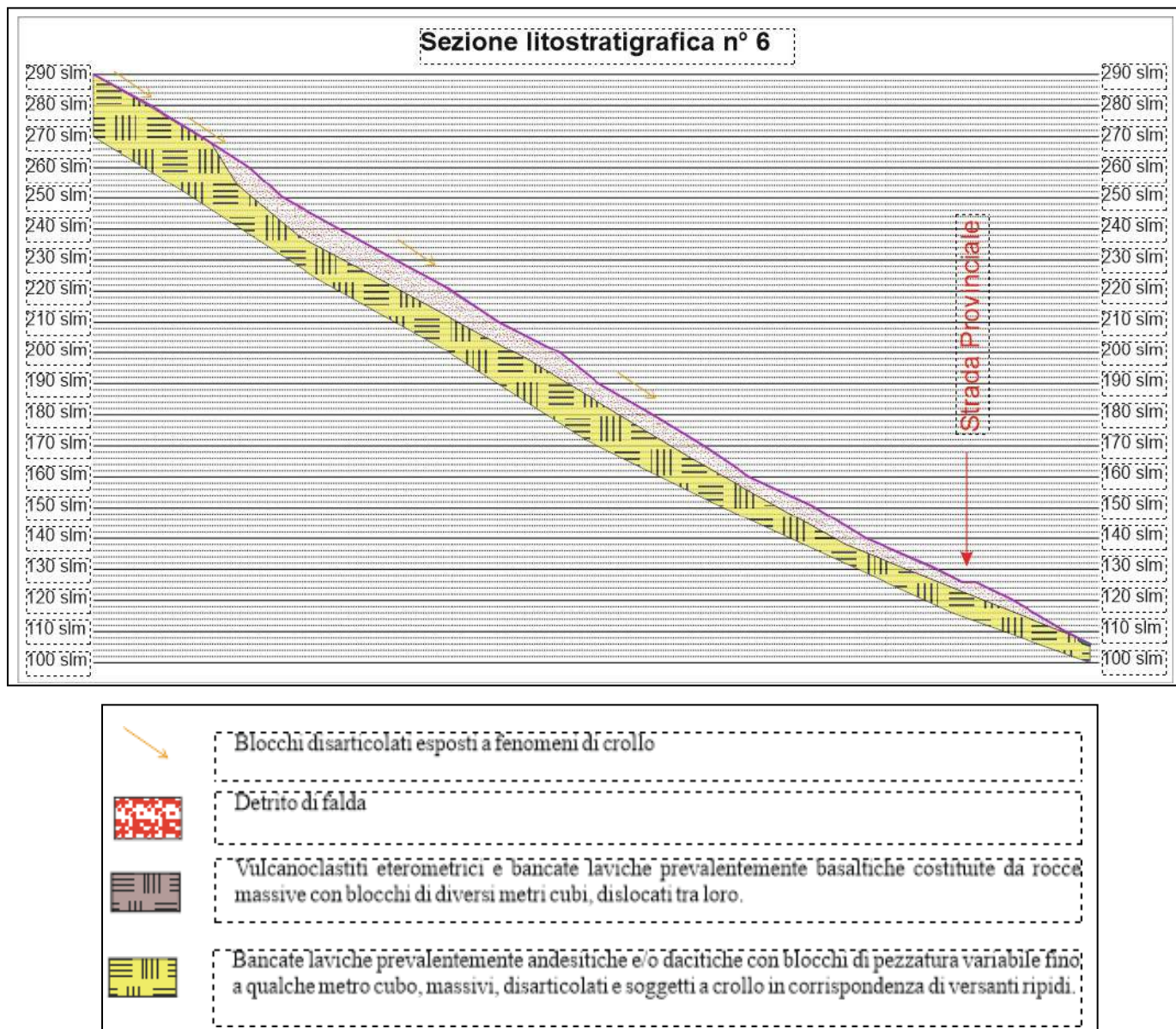
	Blocchi disarticolati esposti a fenomeni di crollo
	Detrito di falda
	Vulcanoclastiti eterometriche e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro.
	Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi.

In corrispondenza della direttrice n° 6 che intercetta un tratto della SP, si evidenziano pendenze medie di 38° con presenza nel settore alto di bancate laviche associabili alla Formazione Stimpagnano, con blocchi disarticolati ed esposti a crollo. Gran parte del versante è invece costituito da detrito di frana che si spinge fino alle sue pendici. Il detrito di frana è costituito da elementi di pezzatura da centimetrica a decimetrica immersi in matrice prevalentemente sabbiosa. Si rileva un buon grado di addensamento. I muretti a secco risultano in numerosi tratti divelti. A ridosso della strada è in alcuni tratti evidente l'attività dell'azione erosiva della porzione detritica da parte delle acque di ruscellamento superficiale. È frequente che il detrito eroso, riversandosi sulla sede stradale, provochi incidenti in particolare a danno dei ciclomotori.



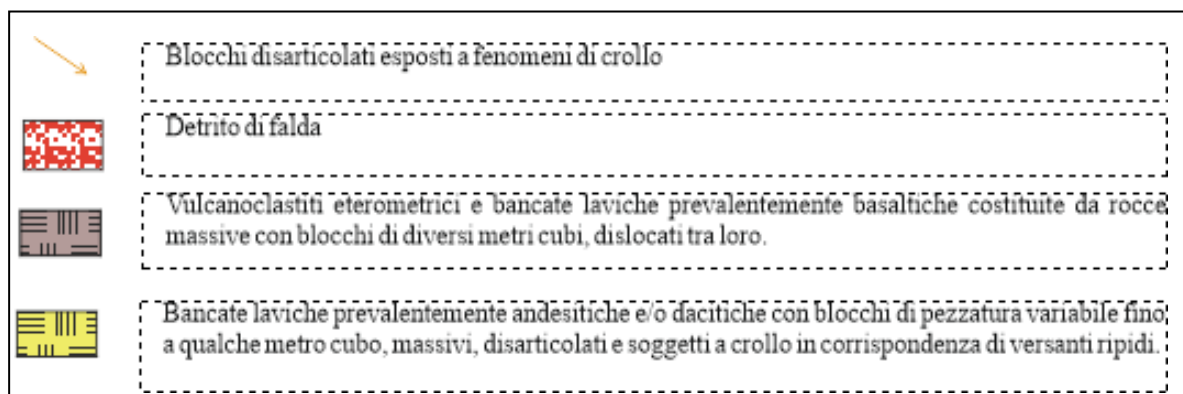
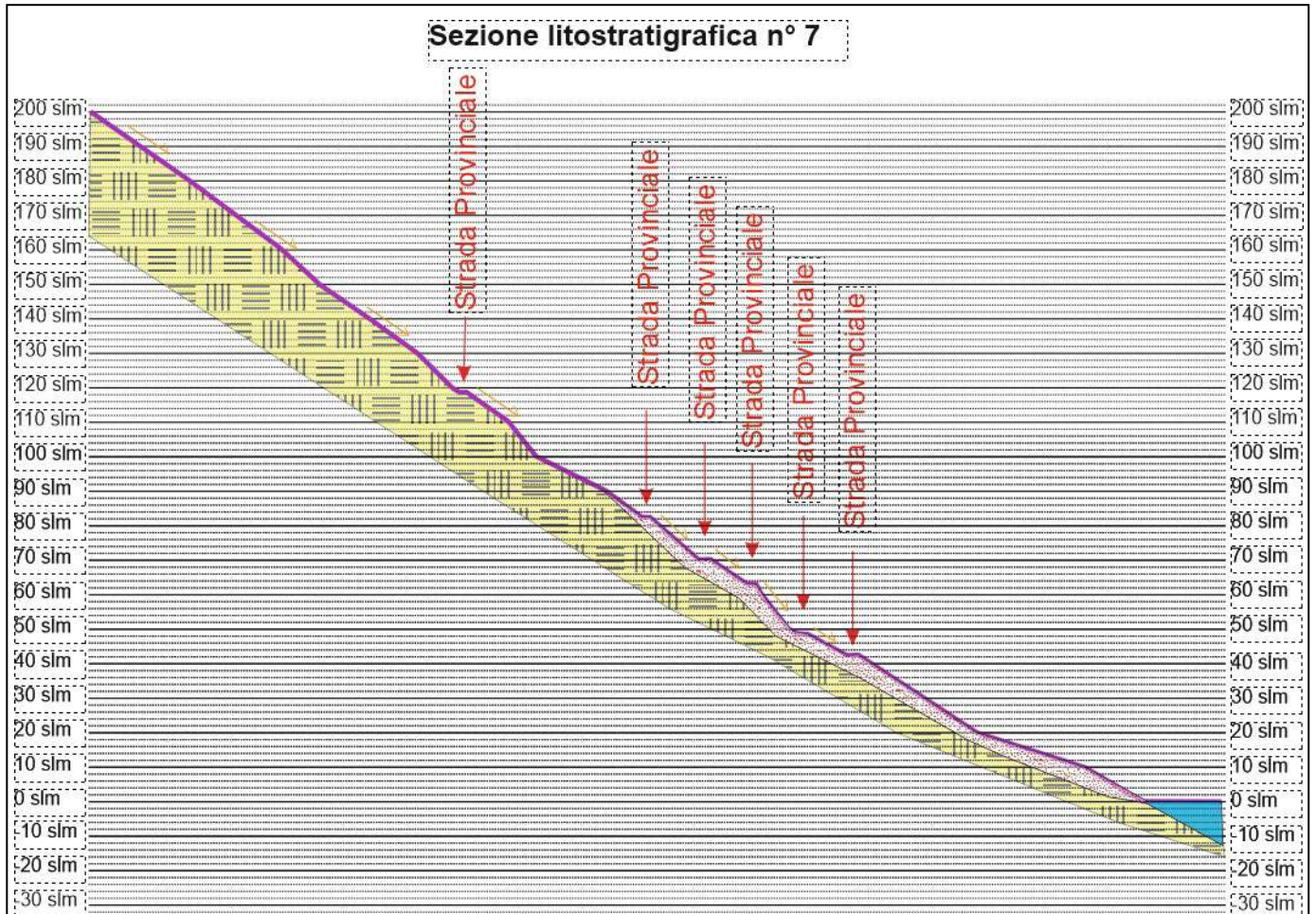
Foto 2 e Foto 3 - Settore interessato da affioramento detritico

Tale settore è stato oggetto di alcune indagini finalizzate a definire lo spessore della coltre detritica e il grado di addensamento complessivo allo scopo di individuare i necessari interventi per garantirne la mitigazione della pericolosità geomorfologica.

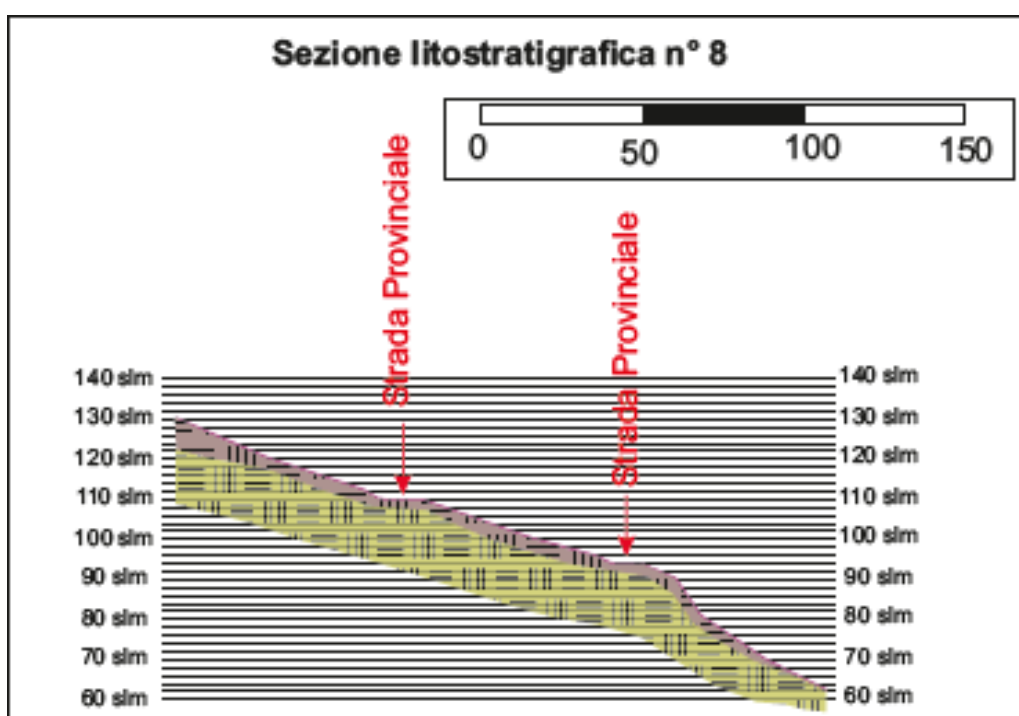






La direttrice di sezione n° 7 intercetta 5 tratti della SP evidenziando la notevole acclività del versante con circa 39° di pendenza media, l'esposizione a crollo del settore medio-alto e la presenza di detrito di frana in quello medio-basso con le medesime caratteristiche e le problematiche già espresse in riferimento al settore analizzato con la sezione lito-stratigrafica n° 6 in relazione al fango che si riversa sulla sede stradale. Anche questi tratti sono stati oggetto sia di rilievi geostutturali finalizzati all'applicazione del "Decreto crolli" per i versanti in roccia, sia

di indagini finalizzate a meglio comprendere lo spessore della coltre detritica e le relative caratteristiche geo-tecniche al fine di garantire scelte progettuali adeguate e risolutive delle problematiche esistenti.



In corrispondenza della direttrice n° 8, si evidenziano pendenze meno accentuate con versanti caratterizzati da muretti a secco. A valle della strada provinciale la scarpata acquisisce maggiore acclività. In questo tratto d'intervento le problematiche rilevabili sono in particolare connesse al trasporto di materiale fangoso eroso dai settori detritici presenti a ridosso della sede stradale.



	Blocchi disarticolati esposti a fenomeni di crollo
	Detrito di falda
	Vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro.
	Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi.

Si precisa ulteriormente che i settori rocciosi costituiti dalle bancate laviche, spesso fratturate, sono state oggetto di studio dei problemi di stabilità di versanti

lapidei facendo riferimento al cosiddetto ammasso roccioso, inteso come matrice lapidea solcata da superfici di discontinuità (struttura).

5.3 – Sintesi delle indagini geologiche

L'area in esame, oltre a essere stata oggetto di rilevamento di superficie che ha permesso di definire tra l'altro l'assetto geologico nel settore dentro cui si inquadrano gli interventi previsti, è stata interessata da una campagna di indagini finalizzata, in particolare, ad avere elementi relativi allo spessore delle coltri di copertura nei settori in cui prevale l'affioramento di coperture detritiche.

Rimandando per una trattazione più completa al report allegato, a seguire si riporta una sintesi relativa agli elementi tratti dalle seguenti indagini eseguite:

- n. 2 indagini di sismica a rifrazione elaborate sia con la tecnica del G.R.M. che con la "tomografia sismica" in configurazione a 24 canali con interdistanza geofonica di 2,5 m per una lunghezza complessiva dello stendimento di ml 62,5, identificate in planimetria con la sigla "SS1" e "SS2";
- n. 1 indagine sismica del tipo "MASW", sullo stesso allineamento dello stendimento sismico "SS2", con offset dello scoppio di 5 m;
- n. 370 ml di indagine "georadar";
- rilievo con velivolo APR lungo la strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare per un totale di poco più di 61 ettari rilevati.

La planimetria riportata nella seguente immagine rappresenta i punti indagati e la tipologia di indagine eseguita.

Allo scopo di trattare in maniera più specifica le indagini eseguite e i risultati ottenuti, a seguire si esegue uno zoom sui settori esaminati in modo da offrire un quadro di dettaglio quanto più chiaro possibile.

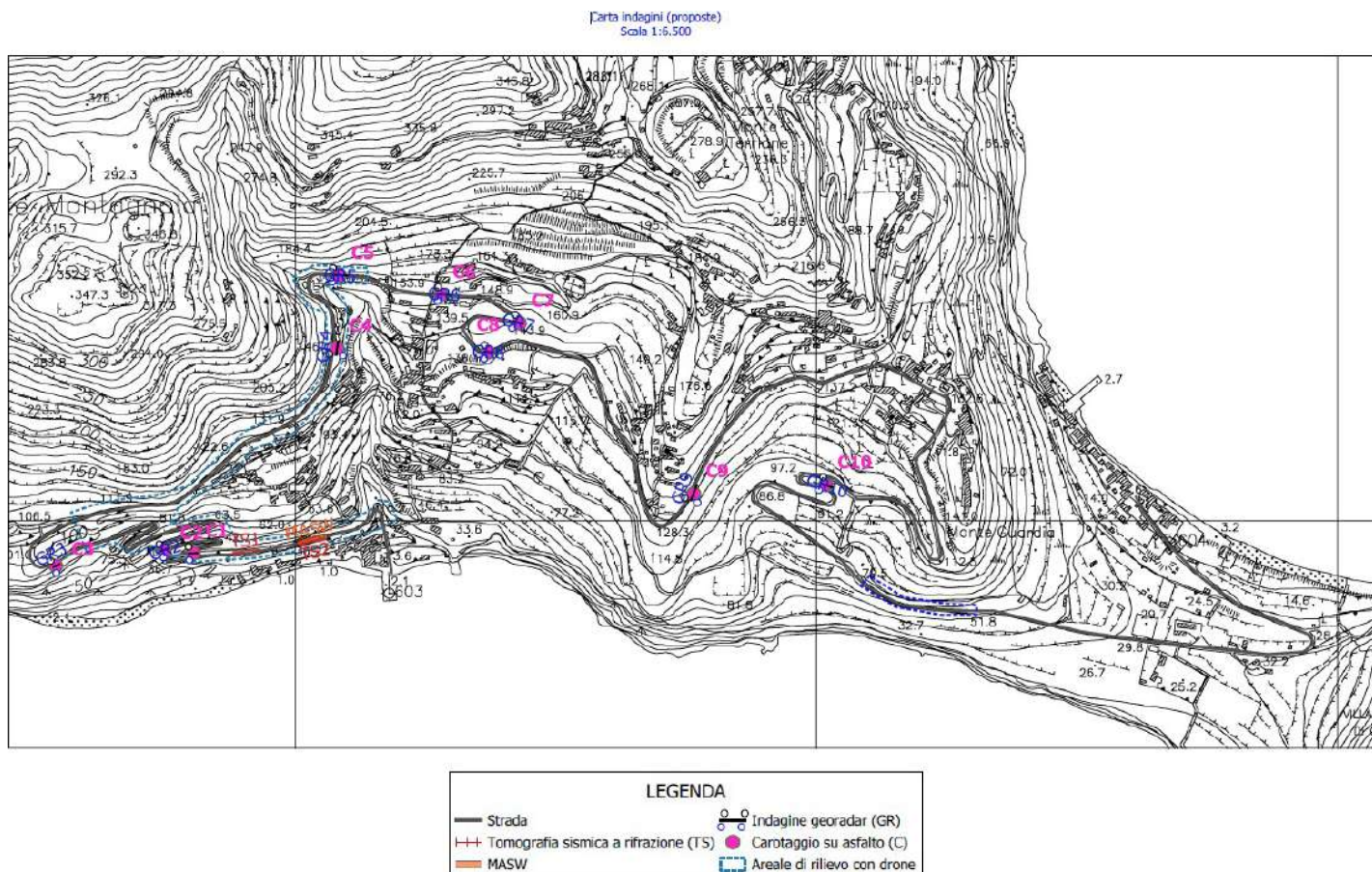


Figura 5a - Planimetria ubicazione delle indagini

Le indagini sismiche a rifrazione e MASW eseguite nel settore occidentale dell'area d'intervento, hanno permesso di valutare la copertura della coltre (sottofondo stradale, detrito, riporto) nell'ordine dei 4-5 metri. Il grado di addensamento della coltre di copertura è complessivamente medio-basso a differenza del successivo substrato, dove si registra un sostanziale incremento delle velocità delle onde sismiche a conferma della maggiore tenacità.

In termini litologici il substrato è caratterizzato dalle bancate laviche associabili alla Formazione Canali.

La MASW eseguita lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione TS2, ha consentito di classificare il suolo indagato alla categoria "B" secondo l'elenco definito dal cap. 3.2.2 delle NTC 2018 e della relativa circolare

attuativa emanata dal C.S.LL.PP.-

Come già anticipato, la seguente figura offre uno zoom sui settori che sono stati oggetto dell'indagine sismica a rifrazione

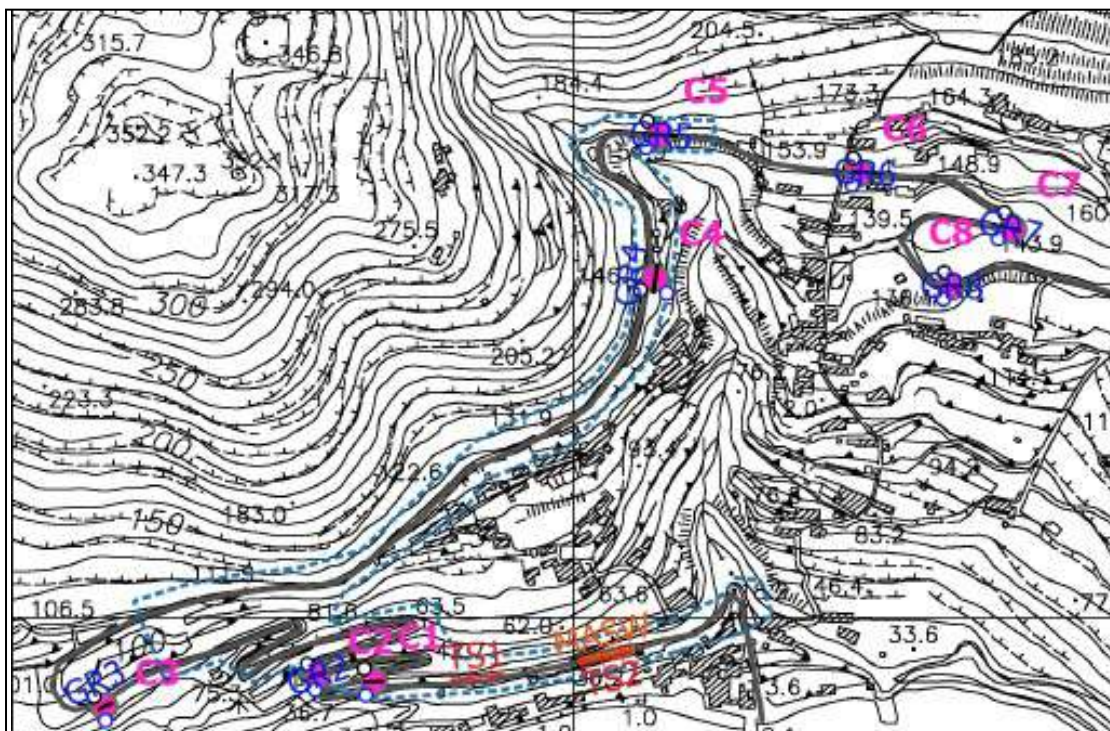


Figura 5b - Planimetria ubicazione delle indagini

L'indagine georadar, sviluppata per 370 ml ha consentito di verificare, ai fini dell'intervento, i settori in cui si ha la presenza di sottoservizi.

I rilievi di superficie e le indagini hanno consentito di definire il modello geologico dell'area di progetto sintetizzabile nelle sezioni litostratigrafiche in precedenza illustrate.

Le considerazioni svolte, a valle delle valutazioni eseguite dal punto di vista geologico, inducono a specificare in particolare che:

1. il settore centro-orientale dell'area d'interesse progettuale non evidenzia particolari criticità dal punto di vista geologico se non la presenza di detrito lungo la sede stradale derivante da una non adeguata

regimentazione delle acque che si ritiene, nell'ambito del progetto, dovrà essere oggetto di un intervento specifico.

2. Il settore occidentale dell'area di progetto, in considerazione delle sostanziali pendenze e della disarticolazione dei blocchi lavici, è soggetto in molti tratti a frane di crollo. In alcuni tratti sono stati eseguiti in passato delle opere di mitigazione che tuttavia, in considerazione dell'estensione dell'area non risultano sufficienti ad assicurare un grado di rischio basso per la viabilità e i fabbricati esposti. In tale settore è pertanto opportuno estendere gli interventi di mitigazione della pericolosità e del rischio crolli.
3. Alcuni settori della zona occidentale presentano coperture detritiche soggette a fenomeni erosivi per dilavamento della parte fine. Le zone immediatamente a ridosso della sede stradale causano il trasporto di fango e detriti sulla rete viabile determinando situazioni di rischio per i veicoli in transito. In ragione di ciò risulta opportuno assicurare un intervento di regimazione delle acque oltre che di contenimento della porzione detritica al fine di mitigare gli effetti di tale fenomeno di dilavamento e trasporto.

6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

6.1 - Caratteristiche generali del territorio

Le aree vulcaniche rappresentano un contesto dinamico che condiziona l'evoluzione dei processi morfogenetici, caratterizzate da fenomeni distensivi nella crosta terrestre con svariate fenomenologie eruttive e modalità di messa in posto dei prodotti conseguenti.

L'assetto geomorfologico dell'apparato vulcanico dell'isola di Filicudi è fortemente condizionato dalla concomitante azione di diversi fattori che schematicamente possono riassumersi in:

- alternanza in breve spazio, sia in senso verticale che laterale, di formazioni geologiche contraddistinte da risposte diverse all'azione morfogenetica degli agenti esogeni, in funzione delle assai varie caratteristiche litotecniche, modalità di messa in posto dei diversi prodotti vulcanici (lahar, surge, depositi da caduta, ecc..) e all'alterazione idrotermale degli stessi;

- azione dei processi endogeni legati alla recentissima evoluzione vulcanica e al generale e rapido sollevamento regionale, che comporta elevata energia del rilievo;

- intensa attività neotettonica e vulcano-tettonica;

- azione erosiva del mare in questi casi particolarmente intensa per l'effetto della elevata acclività dei versanti sottomarini, della presenza di falesie che inibiscono la formazione di spiagge, per l'elevata azione riflettente nei confronti del moto ondoso, e dunque per lo scarso/assente apporto di sedimenti alla costa;

- azioni determinate dal regime pluviometrico e dalle caratteristiche dei piccoli bacini idrografici i cui spartiacque sono prossimi al mare.

Le forme di erosione più peculiari del paesaggio eoliano sono rappresentate dalle falesie che bordano buona parte delle isole e dai profondi canali che caratterizzano i settori maggiormente erosi.

L'evoluzione dei versanti avviene soprattutto attraverso il rapido e continuo arretramento delle falesie oltre che all'erosione accelerata operata dalle acque incanalate e attraverso fenomeni gravitativi che riguardano soprattutto i principali valloni.

Il sistema delle falesie è in rapido arretramento, come suggeriscono i diffusi crolli di materiale lapideo, che si accumula in blocchi anche di notevoli dimensioni alla base delle stesse. L'erosione accelerata operata dalle acque incanalate si differenzia a seconda dei tipi litologici su cui si esplica, in funzione del loro differente grado di alterabilità, erodibilità e dell'acclività dei versanti, determinando l'approfondimento di canali in corrispondenza delle aree di affioramento delle alternanze di rocce laviche e piroclastiti che caratterizzano gran parte delle isole (stratovulcani) e lo sviluppo di una fitta rete di incisioni parallele sui versanti meno acclivi impostati sulle litologie più erodibili delle piroclastiti e cineriti di caduta e di flusso.

I fenomeni di instabilità gravitativi che si rilevano in tali aree sono rappresentati da frane, ascrivibili prevalentemente a colate rapide di detrito, a crolli e ribaltamenti in detrito e/o in roccia e fenomeni di scivolamenti planari. In generale i fenomeni di crollo interessano prevalentemente le aree costiere, caratterizzate per lunghi tratti da costa alta, come nel caso di Filicudi, mentre sono pure numerosi i fenomeni di crollo e ribaltamento che si localizzano in corrispondenza delle scarpate che orlano le zone di testata dei principali canali.

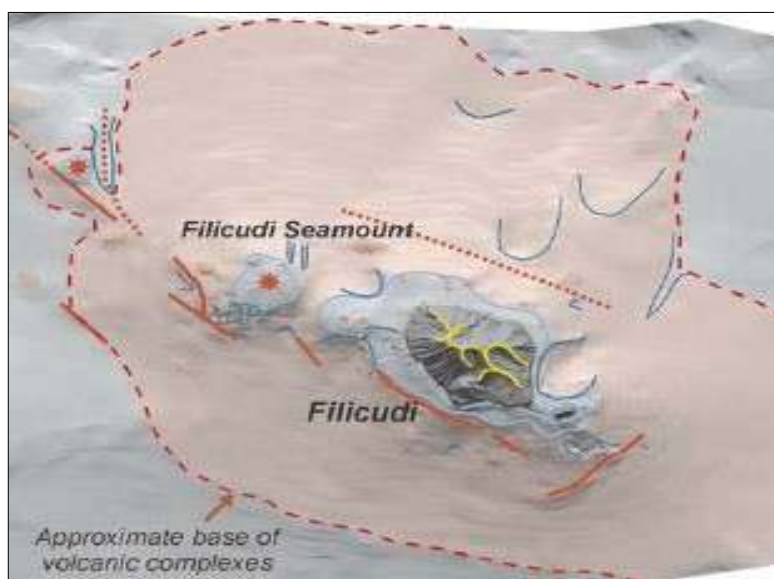
I materiali franati si vanno accumulando al fondo dei canali, in considerazione delle elevate pendenze su cui giacciono e del fatto che rappresentano il naturale ricettore delle acque di deflusso superficiale, le cui modalità di trasporto sono rappresentate dalle colate rapide di detrito, come testimoniano le conoidi presenti allo sbocco dei principali canali. Nel caso di colate di detrito, i materiali coinvolti sono tipicamente depositi piroclastici. Gli effetti della erosione risultano molto bassi o nulli per la rapida infiltrazione in sottosuolo delle acque meteoriche.

6.2 - Caratteristiche locali

La morfologia accidentata dell'area che interessa la strada oggetto di intervento ha costretto ad uno sviluppo planare della stessa abbastanza tortuoso per salire di quota e collegare le abitazioni esistenti tra il porto principale e quello



Figura 6 – Ricostruzione 3D dell'area oggetto di intervento (in rosso la strada oggetto di intervento) di Pecorini a mare. Nella figura 6 la morfologia accidentata è resa evidente dalla ricostruzione 3D tramite Lidar 1 x 1 metro in sovrapposizione al tracciato stradale attraverso elaborazione con software GIS (in rosso la traccia della strada).



Nella figura 7 è possibile vedere la parte sommersa dell'isola con il perimetro ricostruito della base dell'apparato vulcanico.

Figura 7 – Ricostruzione geomorfologica e strutturale della parte sommersa

Nell'ambito dello studio si è proceduto a eseguire un rilievo geomorfologico dell'area di interesse corredando i dati di superficie con quelli derivanti dalla campagna di indagine eseguita. In particolare è stato eseguito lo studio con relativa mappatura delle linee di deflusso superficiale, delle lesioni al suolo e su pareti (muri di sostegno), dei cedimenti e degli avvallamenti della sede stradale, delle scarpate morfologiche, dei settori oggetto di ruscellamento concentrato e/o diffuso. Tali informazioni, unitamente alle aree oggetto di coperture detritiche e ai settori in dissesto censiti nella carta dei dissesti del PAI, sono stati riportati nella carta geologica e geomorfologica.

Per l'individuazione delle aree a rischio geomorfologico si è effettuata preliminarmente la raccolta di tutte le informazioni disponibili, quindi è stata condotta in via prioritaria un'analisi estesa ad una fascia a cavallo infrastrutture viaria. A seguito di ciò le aree ritenute più critiche sono state oggetto di accurato rilievo topografico e fotografico con drone.

Per quanto riguarda i dissesti censiti dal PAI essi lambiscono la strada in oggetto, non la interessano direttamente così come si vede dallo stralcio della Carta dei dissesti (Isole Eolie n. 03) riportata in figura 8.

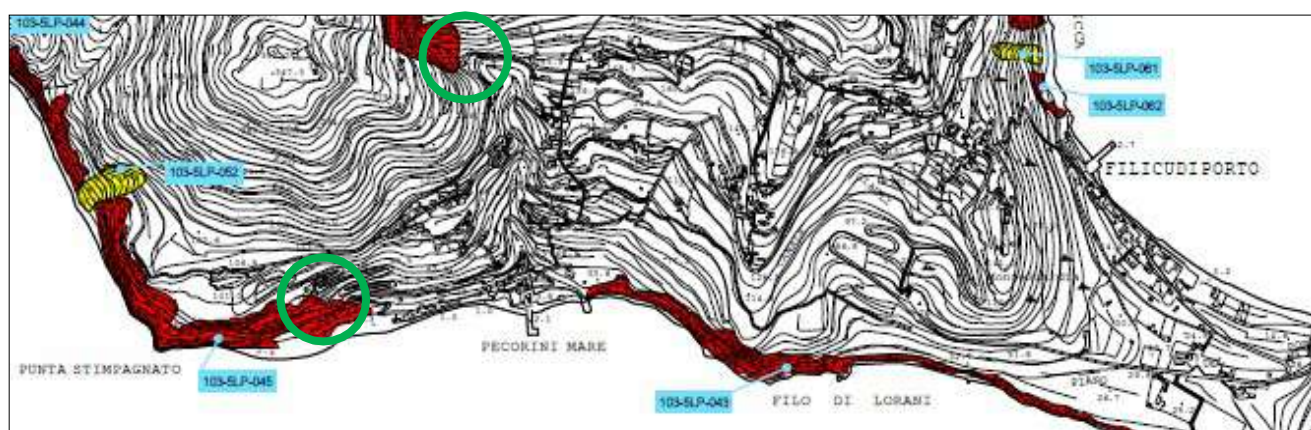


Figura 8 – Dissesti PAI – Isole Eolie (03), i cerchi verdi individuano aree con criticità

Nel dettaglio in zona “Punta Stimpagnato” è presente il **codice dissesto PAI 103-5LP-045** con aree a rischio idrogeologico R4, con tipologia di dissesto “crollo e/o ribaltamento” lungo la falesia a valle della strada, causa anche l’elevata pendenza del versante.

In dettaglio il dissesto è quasi adiacente al secondo tornante individuato nelle figure 9-10.

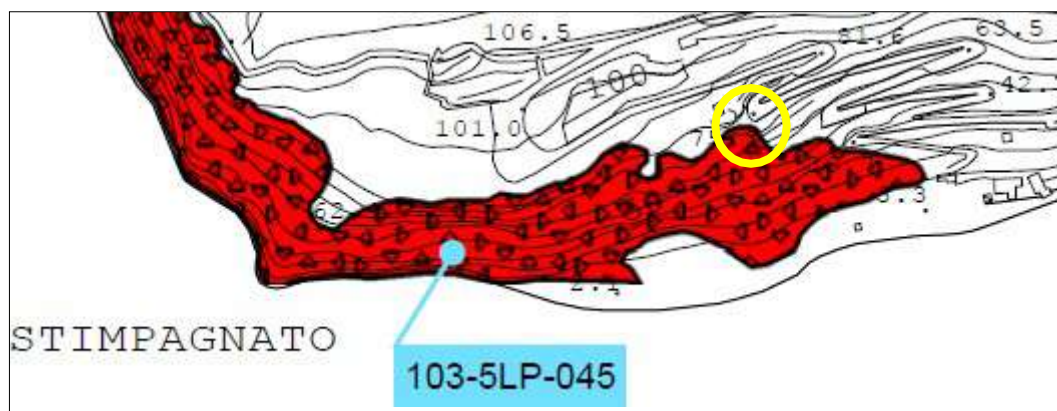


Figura 9 – Stralcio “carta dei dissesti” PAI nell’area di Punta Stimpagnato



Figura 10 – Area da attenzionare

Andando un po’ più a monte lungo la strada in contrada Portella si rileva un altro dissesto, **codice dissesto PAI 103-5LP-051**, dovuto ad erosione accelerata

la cui delimitazione in cartografia si chiude proprio in prossimità della strada in oggetto.

Il dissesto è causato dall'erosione accelerata operata lungo il versante a monte dalle acque di ruscellamento sulle friabili vulcanoclastiti che costituiscono Monte Montagnola; in occasione di importanti eventi meteorici cospicue masse detritiche vengono trasportate per fenomeni gravitativi superficiali e si incanalano nell'impluvio che costeggia Monte Montagnola. L'impluvio intercetta la strada e sbocca a valle nel porto di Pecorini a mare, dove si deposita il materiale.

Si ritiene opportuno suggerire in corrispondenza del nodo idraulico evidenziato in figura (cerchio rosso) eseguire una verifica idraulica allo scopo di valutarne l'efficienza e, in caso contrario, programmare la realizzazione di un tombino di sezione adeguata per favorire l'attraversamento delle acque al di sotto della sede stradale evitandone l'accumulo sulla sede stradale.

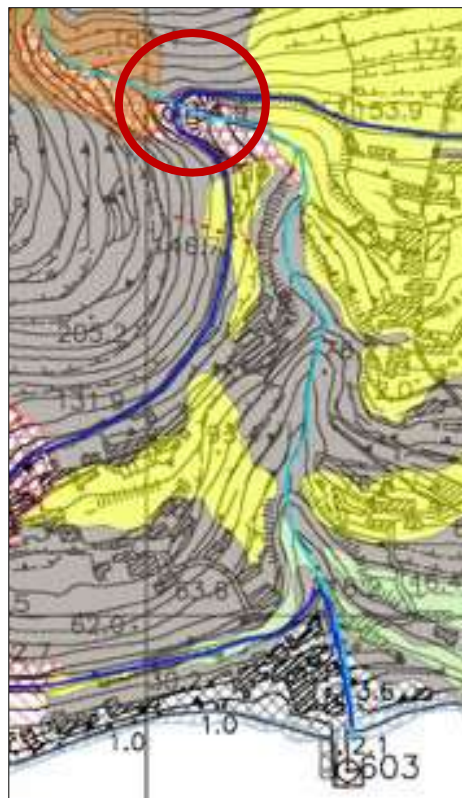


Figura 11 – Stralcio carta geologica e geomorfologica

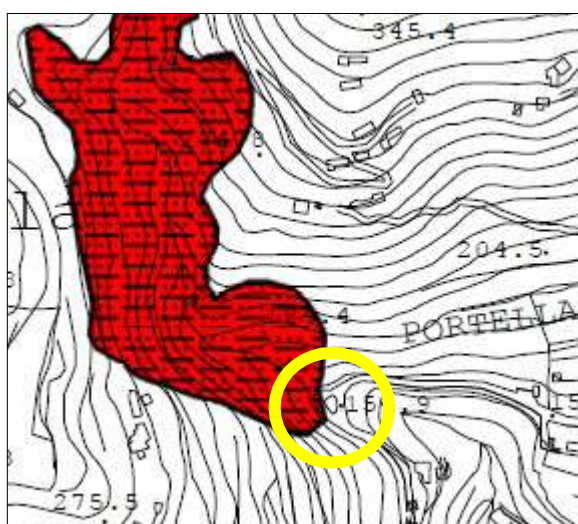


Figura 12 – Dissesto PAI 103-5LP-051

"MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA STRADA DI COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO
– FRAZIONE PECORINI A MARE" – COMUNE DI FILICUDI (PA) CODICE RENDIS 19IRD85/G1

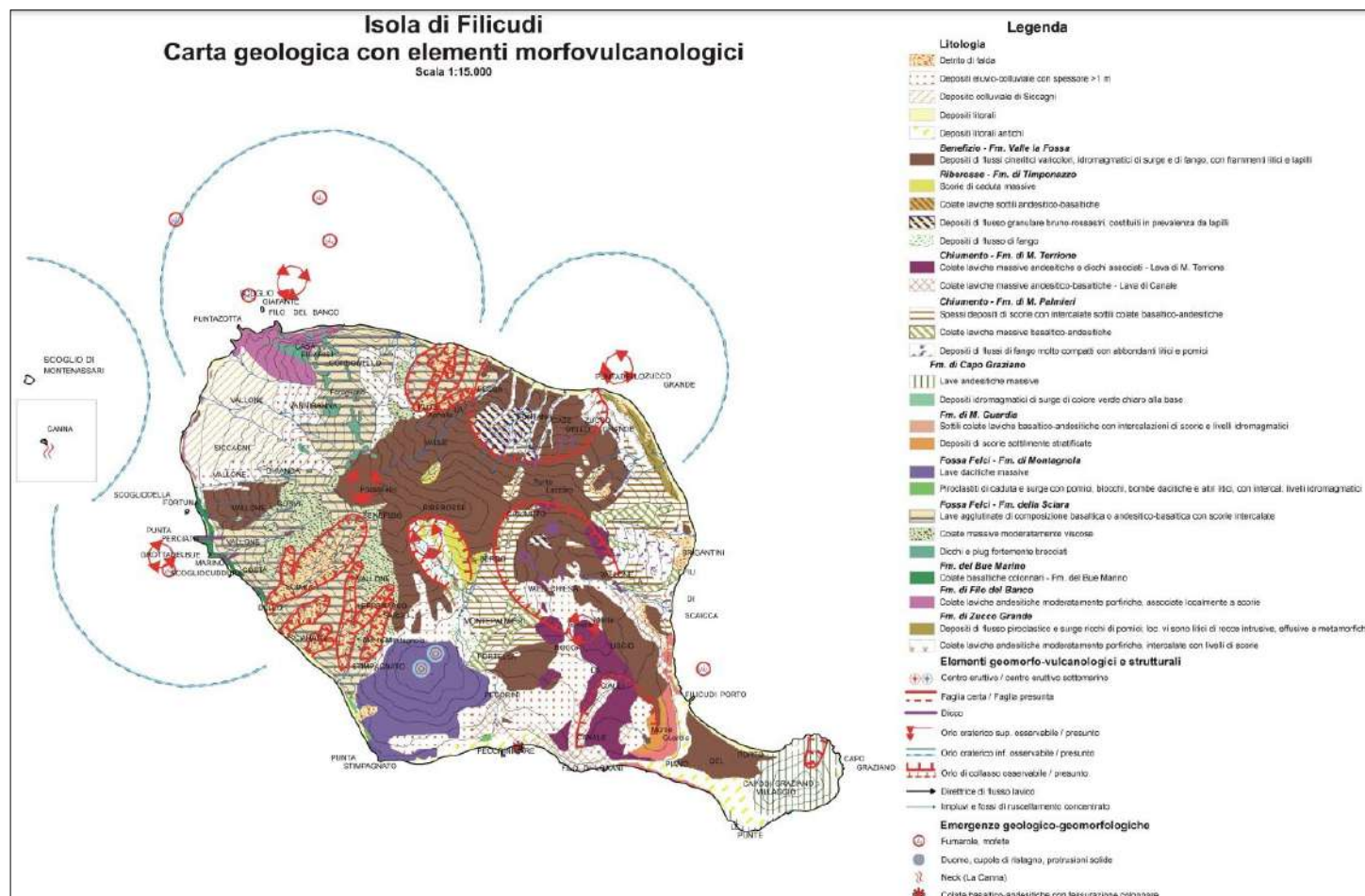


Figura 13 – Cartografia geologica e morfologica (Villari & Nappi, 1975; Manetti et al., 1995)

In relazione alle considerazioni di carattere geomorfologico eseguite, tenuto altresì conto di quanto emerso nell'ambito dei rilievi geo-litologici e delle indagini nonché delle valutazioni derivati dai profili topografici e dalle 8 sezioni litostratigrafiche eseguite e riportate sia nel precedente capitolo che in tavola n. 3 allegata, si ribadisce quanto già osservato a margine del capitolo 1, rilevando altresì la necessità di un opportuno studio idraulico in corrispondenza del nodo idraulico indicato nelle figure 11-12 al fine di valutare l'adeguatezza della sezione idraulica e nell'eventualità programmare uno specifico intervento di adeguamento.

7. ASPETTI CLIMATOLOGICI

Gli aspetti climatologici, in questo territorio rivestono fondamentale importanza in quanto rientrano fra i fattori preponderanti nell'ambito della evoluzione dei paesaggi.

Il clima della Provincia di Messina è il più mite della Sicilia, nonché il più piovoso, con temperature medie estive comprese tra i 30/35° C, mentre durante l'inverno raramente si registrano temperature al di sotto dei 7/10° C (almeno per il territorio posto in prossimità della costa).

Relativamente alle isole Eolie, il clima è temperato, così come in tutta la provincia, e possono sintetizzarsi le seguenti condizioni meteoclimatiche medie registrate in alcune delle stazioni meteorologiche presenti nelle isole Stromboli, Vulcano (Piano) e Lipari (Castellaro):

Temperature medie dell'aria	max 30° (estate) - min 11° (inverno)
Temperature medie del mare	max 26° (estate) - min 15° (inverno)
Umidità relativa	49/91% (estate) - 72/95% (inverno)
Precipitazioni	mm 30 (estate) - mm 230 (inverno)
Venti predominanti	NW/SE (primavera) - NW/N (estate) - NW/SE (autunno) - NW/W (inverno)
Stato del mare	gg. 300 (calmo-mosso) - gg. 54 (mosso-agitato) - gg. 11 (grosso)
Ore di sole	8 (primavera) - 11 (estate) - 7 (autunno) - 4 (inverno)

Per definire le condizioni climatiche di quest'area è stata eseguita una ricerca storica sulle precipitazioni e sulle temperature prendendo in considerazione le stazioni termo-pluviometriche più vicine.

STAZIONE	PERIODO DI OSSERVAZIONE	STRUMENTO	QUOTA (m s.l.m.)
LIPARI	1965-1994	Pluviometro	50
SALINA	1965-1994	Termo-Pluviometro	350

Regime pluviometrico

Per l'analisi delle condizioni pluviometriche, si è fatto riferimento ai dati registrati nelle 2 stazioni pluviometriche ricadenti all'interno dell'area in esame.

Stazione	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
Lipari	89,5	73,8	60,6	40,6	23,0	10,6	10,6	20,7	46,1	75,4	76,7	87,8	615,4
Salina	82,9	79,7	56,6	44	23,2	10,8	8,9	17	41,4	74,3	81,7	94,1	614,6

Piovosità media mensile in mm, per il periodo di osservazione 1965-1994

Nella seguente tabella vengono riassunte le caratteristiche principali della stazione di Leni a cura del SIAS nel periodo di osservazione 2003-2017:

Anno 2003 (mm)	Anno 2004 (mm)	Anno 2005 (mm)	Anno 2006 (mm)	Anno 2007 (mm)	Anno 2008 (mm)	Anno 2009 (mm)	Anno 2010 (mm)	Anno 2011 (mm)	Anno 2012 (mm)	Anno 2013 (mm)	Anno 2014 (mm)	Anno 2015 (mm)	Anno 2016 (mm)	Anno 2017 (mm)	Media x Stazione (mm)
812,0	789,2	961,4	526,8	839,6	690,6	925,0	811,2	658,4	677,2	823,2	733,4	1009,6	588,4	641,6	765,8

Rispetto al periodo di osservazione precedente le precipitazioni medie sono aumentate da 614,6 mm a 765,8 mm. Le precipitazioni mostrano generalmente valori più elevati nelle stagioni autunnale e invernale.

Il clima dell'arcipelago risulta soggetto all'influenza, oltre che della latitudine e della posizione geografica, della presenza del mare, che svolge un'importante azione mitigatrice e determina due caratteristiche importanti:

- riduzione generale delle escursioni termiche;
- aumento del grado di umidità atmosferica.

Su scala locale, inoltre, l'orografia, lo sviluppo altimetrico, il tipo di suolo e la sua conformazione litologica, costituiscono altrettanti fattori che determinano variazioni microclimatiche fra le diverse isole e fra le diverse aree all'interno della stessa isola.

Nel complesso, il clima può essere ricondotto al tipo temperato-mediterraneo, avendosi all'incirca un semestre (ottobre-marzo) con precipitazioni meteoriche generalmente abbondanti e spesso concentrate in brevi periodi, a cui si accompagnano temperature relativamente basse seppure variabili con l'altitudine. A questo si contrappone un semestre (aprile-settembre) con precipitazioni scarse e occasionali associate ad alti valori di temperatura e sensibili escursioni giornaliere.

Regime termico

Per l'analisi delle condizioni termometriche si è fatto riferimento soltanto ai dati registrati dalla stazione termopluviometrica di Salina.

Stazione	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
Salina	11,08	11,09	13,10	15,00	18,80	22,50	25,40	25,90	23,30	20,10	15,90	13,10	18,10

Temperature medie mensili in C°, per il periodo di osservazione 1965-1994

La limitata distribuzione delle stazioni termometriche non permette di evidenziare le eventuali variazioni presenti. Infatti, prendendo in considerazione i dati termometrici rilevati nel periodo di un trentennio e confrontando i valori relativi alle medie mensili ed annuali, il territorio in esame mostra un andamento termico piuttosto regolare. I valori medi si mantengono intorno ai 25 °C nei mesi di luglio e agosto e comunque non scendono al di sotto dei 22 °C nel quadrimestre giugno-settembre. Le temperature minime si aggirano sugli 11 °C .

L'escursione estiva è più che doppia rispetto a quella invernale a causa della maggior durata del soleggiamento, dell'intensità della radiazione solare e della maggiore frequenza di giorni con cielo sereno; l'escursione annua, nel complesso, risulta abbastanza bassa. I valori medi mensili di umidità relativa sono piuttosto elevati, riflettendo le caratteristiche strettamente connesse alla microinsularità, ovvero alla condizione di territori di modesta estensione interamente circondati dal mare. In estate i valori si attestano intorno al 50% nelle ore diurne più calde e soleggiate, mentre nelle ore notturne risultano estremamente elevati (anche oltre il 90%), soprattutto quando la pressione è elevata e si verifica la subsidenza di aria umida in assenza (o quasi) di vento (condensa di vapore sotto forma di rugiada). Questa caratteristica assolve un importante ruolo sotto il profilo ecologico, poiché dà luogo a un intenso fenomeno di "precipitazioni occulte" che apportano una notevole fonte supplementare di acqua alla vegetazione.

8. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

8.1 Aspetti idrogeologici generali

Le caratteristiche idrogeologiche di un'area sono essenzialmente funzione della permeabilità dei litotipi presenti. Essa non è altro che la capacità, più o meno grande, del terreno di lasciarsi attraversare dall'acqua; è legata alla modalità e luogo di formazione dei litotipi, alla loro tessitura e struttura, ed alla loro storia geologica.

Le caratteristiche di permeabilità e le modalità della circolazione idrica sotterranea, dei terreni affioranti nell'area in studio, sono strettamente legate alla natura litologica e al loro assetto giaciturale, strutturale e tessiturale.

Nell'isola di Filicudi affiorano in generale esclusivamente rocce permeabili, di grado e tipo anche notevolmente diversi proprio a causa della caratteristica eterogeneità dei terreni vulcanici. Il tipo e grado di permeabilità delle rocce laviche è strettamente influenzato dalla frequenza e continuità delle discontinuità presenti, originate da fenomeni di contrazione e/o dagli sforzi tettonici.

Le piroclastiti presentano un grado di permeabilità molto variabile in funzione della granulometria, dello stato d'addensamento e del livello di cementazione. In considerazione che si tratta molto spesso di corpi lenticolari che garantiscono una, seppure articolata, continua circolazione delle acque di infiltrazione.

In considerazione che l'isola di Filicudi deriva dall'attività di più edifici vulcanici e dalla loro sovrapposizione, risulta un complesso assetto giaciturale dei diversi corpi litologici. Inoltre, a causa del fatto che le caratteristiche strutturali del mezzo vulcanico risultano molto variabili da luogo a luogo, anche in breve spazio, sia nell'ambito dello stesso litotipo che tra litotipi diversi, le acque di infiltrazione si muovono nel mezzo non saturo seguendo traiettorie variamente inclinate, ma configurando nell'insieme una circolazione continua fino al tetto della falda di base.

La presenza di strati impermeabili, sempre discontinui, è limitata alla presenza di livelli argillificati o a livelli di lava molto compatta.

8.2 Aspetti idrogeologici nell'area di progetto

Il contesto idrogeologico del settore oggetto di studio, in considerazione degli aspetti di interesse progettuale, assume una notevole rilevanza. L'alta permeabilità dei terreni vulcanici determina una considerevole infiltrazione delle acque meteoriche che comporta l'assenza di un vero e proprio reticolo idrografico e bacini idrografici di limitata estensione. Il ruscellamento superficiale è limitato a piccoli impluvi in concomitanza di eventi piovosi di maggiore entità che determinano in alcuni settori fenomeni di erosione accelerata con accumuli a valle di detrito di falda come quello in precedenza citato in contrada Portella.

9. SISMICITÀ

9.1 Sismicità nell'isola di Filicudi

Il Decreto del 15 gennaio 2004 ("Individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche ed adempimenti connessi al recepimento ed all'attuazione dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo, n. 3274") pubblicato sulla G.U.R.S. n° 7 del 13 febbraio 2004, ha reso esecutiva la Nuova Classificazione Sismica del territorio nazionale in base alla quale il Comune di Lipari, nel cui territorio ricade l'isola di Filicudi, è stato inserito in zona sismica 2.

L'arcipelago delle Isole Eolie è sismicamente attivo e il contesto geomorfologico che caratterizza l'isola di Filicudi e in particolare i versanti dell'area della frazione Pecorini, determina specifica importanza alla luce dei possibili fenomeni sismo indotti che si possono innescare in presenza di un terremoto.

L'aspetto sismico di un territorio è sempre strettamente correlato alle condizioni geologiche, idrogeologiche e geomorfologiche dell'area, in quanto la propagazione delle onde sismiche, in particolari condizioni come quelle oggetto del nostro studio, può innescare delle accelerazioni improvvise.

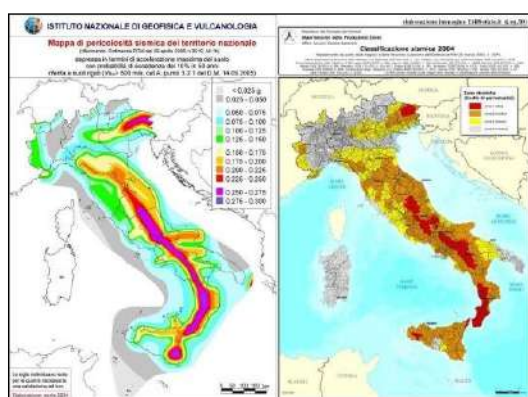


Figura 14 – Mappe di pericolosità sismica nazionale e di classificazione sismica

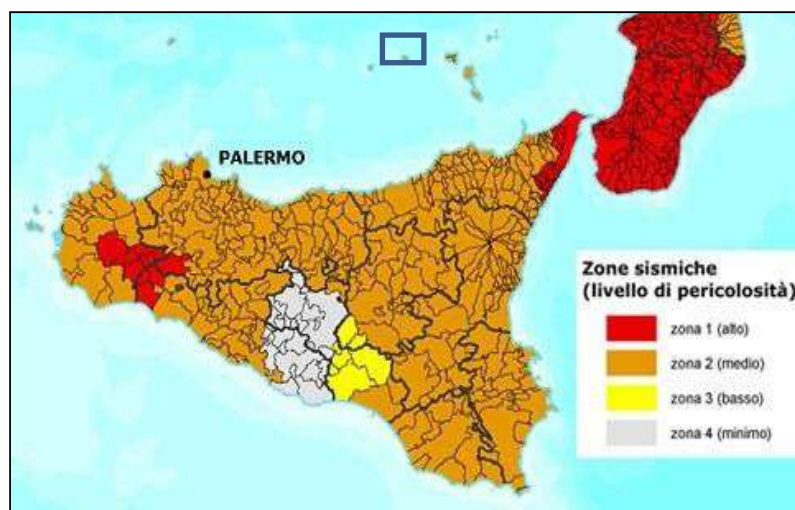


Figura 15 – Classificazione sismica nel territorio regionale e nel basso Appennino.
Il riquadro con bordo blu indica il settore di nostro interesse

Successivamente all'emanazione della OPCM 3274, l'INGV ha redatto la "Mappa della Pericolosità Sismica" (Fig. 14). Nell'ambito dello studio che ha permesso di costruire la suddetta mappa sono state definite per ogni zonizzazione sismica (ZS) le magnitudo massime cautelative (M_{wmax2}). Alle zone sismiche "Eolie-Patti" e "Sicilia Settentrionale", sono state assegnate valori di $M_{wmax2}=6.14$. Tale valore scaturisce dagli eventi sismici registrati in passato e dalla probabilità di accadimento.

Il nuovo studio di pericolosità, allegato all'OPCM n. 3519/2006, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione (a_g), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche.

Nel comune di Lipari, secondo gli studi condotti dall'INGV, è prevista una accelerazione sismica del suolo **$a_g=0.22$** . Tale valore è riferito alla macro- scala e come si evidenzia nella figura 16 l'accelerazione sismica può variare da sito a sito in funzione delle condizioni locali anzidette.

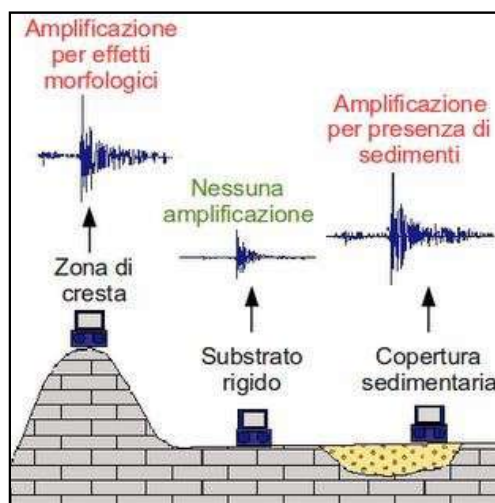


Figura 16

9.2 Modello sismico di progetto

Il sottosuolo d'interesse, come abbiamo visto dalle sezioni lito-stratigrafiche costruite a margine dei rilievi eseguiti e della campagna d'indagine svolta, è costituito nel complesso da una modesta copertura detritica su un substrato vulcanico tenace. Tale copertura detritica raggiunge al massimo alcuni metri di spessore nel settore orientale ma le evidenze rappresentano un buon grado di addensamento e quasi sempre una parziale cementazione dei livelli al di sotto del suolo. Nel settore occidentale, le indagini svolte in due tratti corrispondenti alla presenza di coltre detritica, hanno evidenziato spessori variabili fino a 4-5 metri con grado di addensamento medio-basso.

Certamente la densità non è comunque quella di un corpo perfettamente omogeneo che può essere attraversato velocemente da un'onda sismica riducendo al minimo i tempi di oscillazione delle strutture presenti in superficie. Per tale motivo, la legge sismica impone, in funzione di dette valutazioni, l'utilizzo di coefficienti che permettano alle strutture di rispondere adeguatamente alle potenziali sollecitazioni sismiche registrabili.

La falda idrica è molto profonda e non genera alcuna influenza nei settori di progetto.

La campagna d'indagine sismica e in particolare la MASW ha permesso di trarre utili informazioni di carattere sismico oltre che stratigrafico. Esse hanno consentito tra l'altro di valutare quanto prescritto dal cap. 3.2.2 del D.M. 17/01/2018 e della circolare del C.S.LL.PP. n° 7 del 21/01/2019, ovvero di classificare il suolo fra le seguenti tipologie in funzione della velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche verticali (V_s). La velocità $V_{seq}=599$ m/sec, ha consentito di ascrivere la categoria di suolo, in funzione della seguente tabella, alla categoriadi suolo "B":

Categoria di suolo	Caratteristiche del suolo
Tipo A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m..
Tipo B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
Tipo C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
Tipo D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
Tipo E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

La categoria topografica, considerata l'elevata pendenza media $> 15^\circ$ dei settori d'interesse progettuale, risulta essere ovunque "T2".

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

10. CONCLUSIONI E PROPOSTE D'INTERVENTO

Lo studio geologico eseguito nell'ambito del progetto di "MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA STRADA DI COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO – FRAZIONE PECORINI A MARE" – COMUNE DI FILICUDI (PA) CODICE RENDIS 19IRD85/G1 ha permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- L'area di progetto è ubicata nel settore centro-meridionale dell'isola di Filicudi;
 - L'ambito d'interesse progettuale riguarda quello che risulta percorso dalla SP che collega il centro abitato con la frazione Pecorini;
 - Dal punto di vista geologico, l'area d'interesse è caratterizzata da successioni vulcanoclastiche saldate e/o cementate (tufi, ialoclastiti, ignimbriti, brecce a pillows, ecc.) che ricoprono delle vulcaniti prevalentemente lapidee associabili alla Formazione Canale nel settore orientale ed alla Formazione Stimpagnato in quello occidentale.
 - il settore orientale è caratterizzato da versanti moderatamente acclivi (pendenza media 14°), mentre nel settore occidentale le pendenze medie (38°) sono molto più accentuate.
 - Dal punto di vista litologico si evidenzia la presenza di coperture detritiche di spessore variabile fino ad alcuni metri che nel settore occidentale dell'area d'interesse progettuale, come riscontrabile dagli affioramenti presenti a ridosso della sede stradale, si presentano ben addensate e parzialmente cementate, mentre nel settore occidentale, come evidenziato anche dalle indagini sismiche eseguite e dagli affioramenti presenti a ridosso della sede stradale, il detrito è caratterizzato da addensamento medio-basso e soggetto a fenomeni erosivi a opera delle acque di ruscellamento.
 - Nel settore occidentale di progetto, a differenza di quello centro-orientale, si rilevano dal punto di vista geomorfologico, versanti molto acclivi con la presenza di blocchi lavici disarticolati e di volume variabile fino a qualche

metro cubo. Tale circostanza espone costantemente a rischio geomorfologico da crolli la viabilità principale e le abitazioni presenti.

- Dal punto di vista sismico l'isola di Filicudi nella classificazione nazionale rientra in "Zona sismica 2". Le indagini eseguite hanno consentito di ascrivere il sottosuolo nell'area di progetto alla categoria "B" e alla categoria topografica "T2" secondo l'elenco del cap.3.2.2 delle NTC2018 e della relativa circolare applicativa del C.S.LL.PP. n° 7 del 21/01/2019;
- Dal punto di vista idrogeologico i terreni in successione sono caratterizzati da permeabilità medio-elevata per porosità e fessurazione;
- La falda idrica in corrispondenza dell'intera area è molto profonda e non influisce con le problematiche di carattere geomorfologico presenti.

Alla luce delle suddette considerazioni si ritiene opportuno suggerire le seguenti proposte d'intervento minime finalizzate alla mitigazione della pericolosità geomorfologica presente e del conseguente rischio geomorfologico per gli elementi esposti:

- a) È opportuno garantire in tutta l'area di interesse progettuale un'adeguata regimentazione idraulica finalizzata ad assicurare alle acque di deflusso superficiale il convogliamento nei naturali recapiti torrentizi presenti;
- b) Il settore occidentale dell'area di progetto, in considerazione delle sostanziali pendenze e della disarticolazione dei blocchi lavici, è soggetto in molti tratti a frane di crollo. In alcuni tratti sono stati eseguiti in passato delle opere di mitigazione che tuttavia, in considerazione dell'estensione dell'area non risultano sufficienti ad assicurare un grado di rischio basso per la viabilità e i fabbricati esposti. In tale settore è pertanto opportuno estendere gli interventi di mitigazione della pericolosità e del rischio crolli.
- c) Alcuni settori della zona occidentale presentano coperture detritiche soggette a fenomeni erosivi per dilavamento della parte fine. Le zone immediatamente a ridosso della sede stradale causano il trasporto di fango

e detriti sulla rete viabile determinando situazioni di rischio per i veicoli in transito. In ragione di ciò risulta opportuno assicurare un intervento di regimazione delle acque oltre che di contenimento della porzione detritica al fine di mitigare gli effetti di tale fenomeno di dilavamento e trasporto.

- d) In relazione alle considerazioni di carattere geomorfologico eseguite, tenuto altresì conto di quanto emerso nell'ambito dei rilievi geo-litologici e delle indagini nonché delle valutazioni derivati dai profili topografici e dalle 8 sezioni litostratigrafiche eseguite e riportate sia nel precedente capitolo che nella tavola n. 3 allegata si rileva la necessità di un opportuno studio idraulico in corrispondenza del nodo idraulico indicato nelle figure 11-12 al fine di valutare l'adeguatezza della sezione idraulica e nell'eventualità programmare uno specifico intervento di adeguamento.

Per l'approfondimento degli aspetti sintetizzati in questo capitolo si rimanda alla consultazione di ogni singolo capitolo della presente relazione.

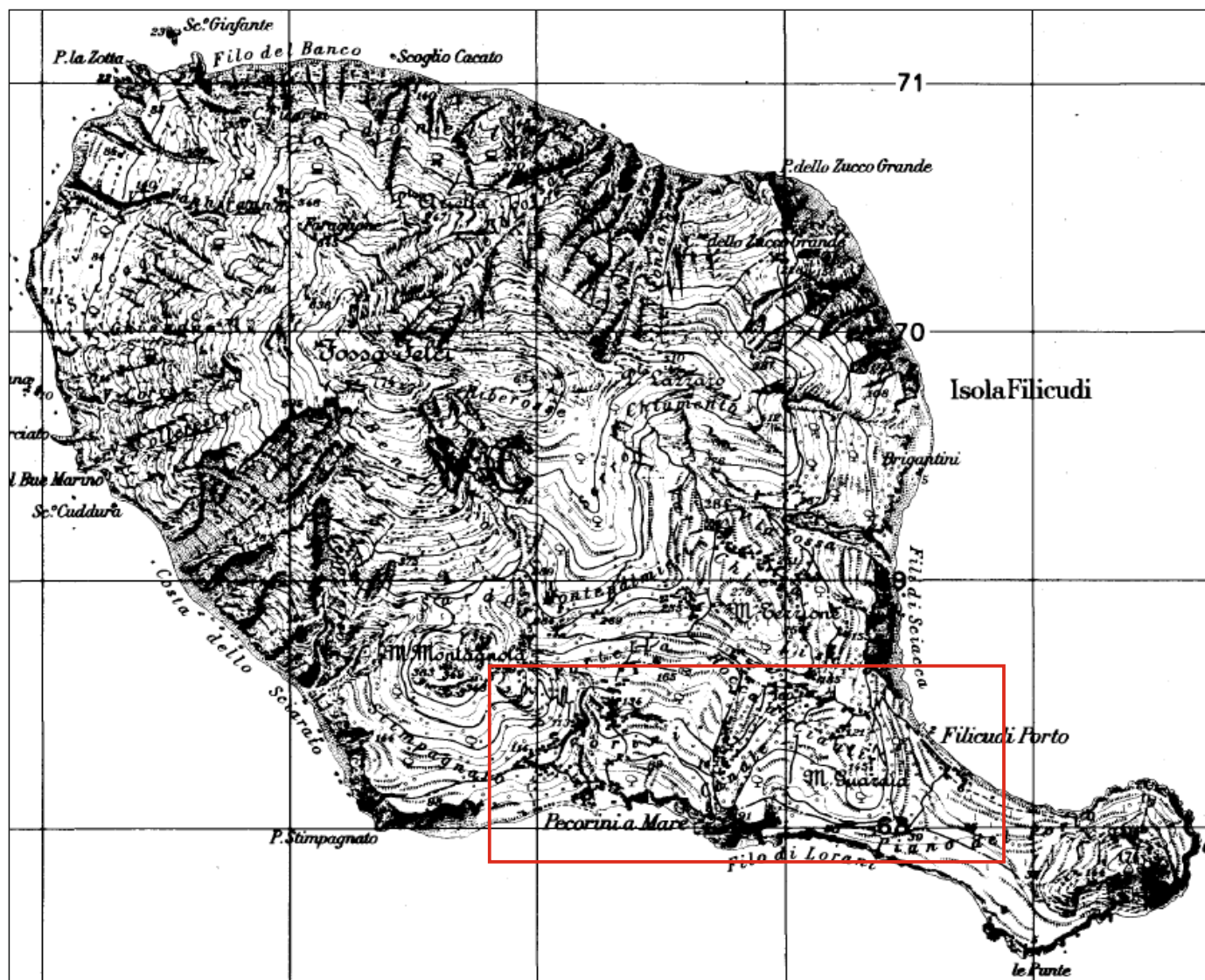
Caprileone (ME), Maggio 2021

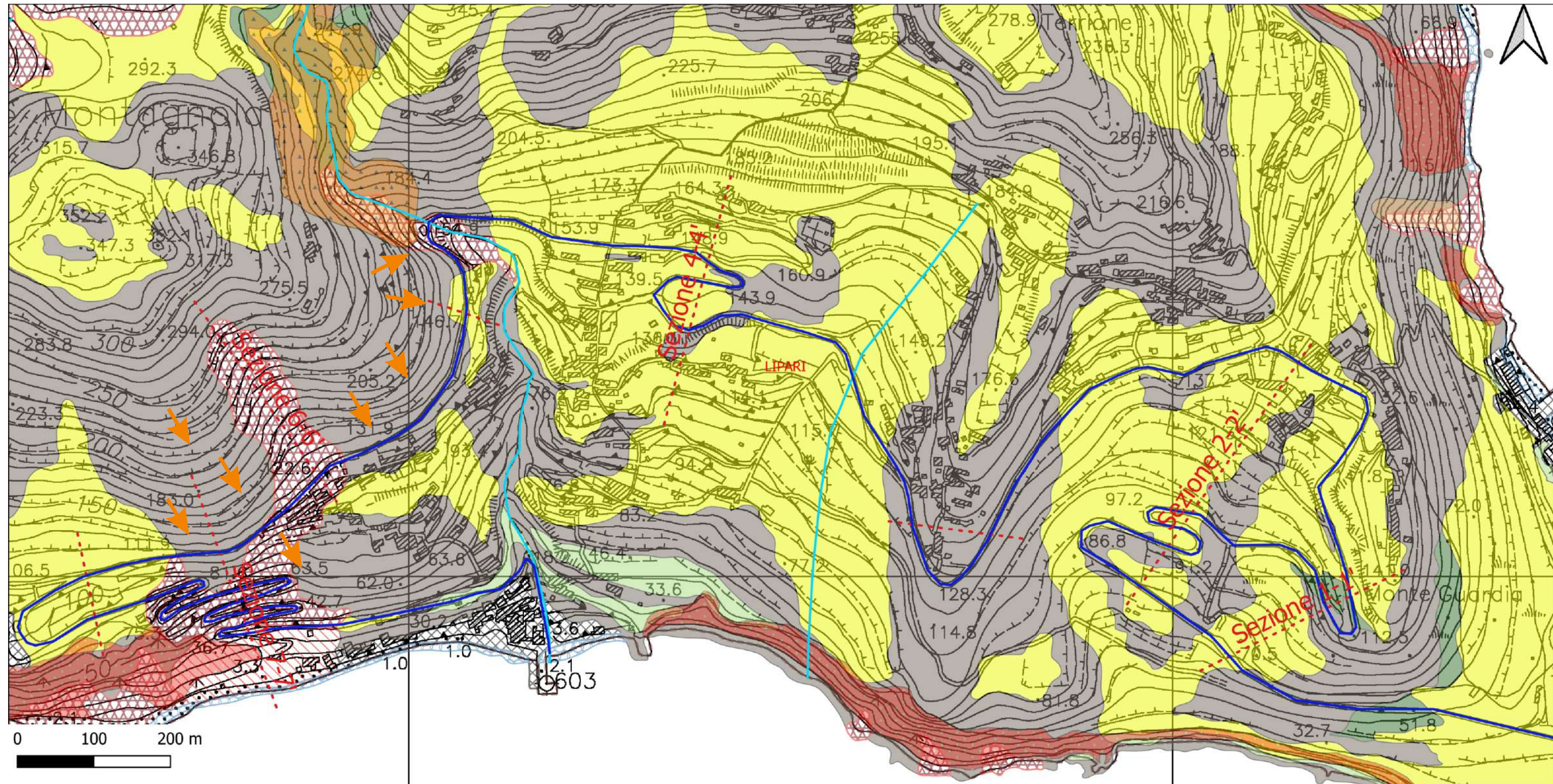
Dott. Geol. Francesco Cannavò



MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA STRADA DI
COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO - FRAZIONE PECORINI A MARE

TAV. 1 - CARTA COROGRAFICA IGM
Scala 1:25.000

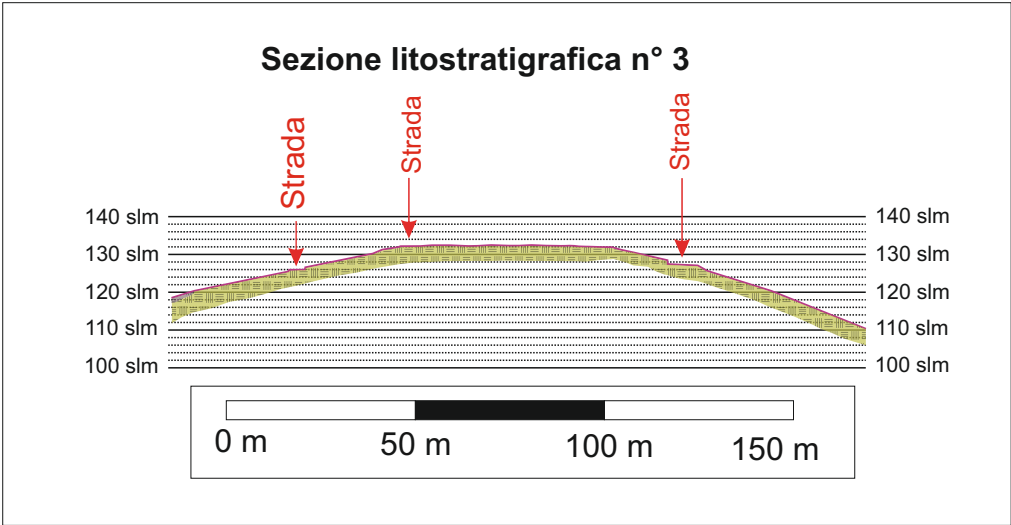
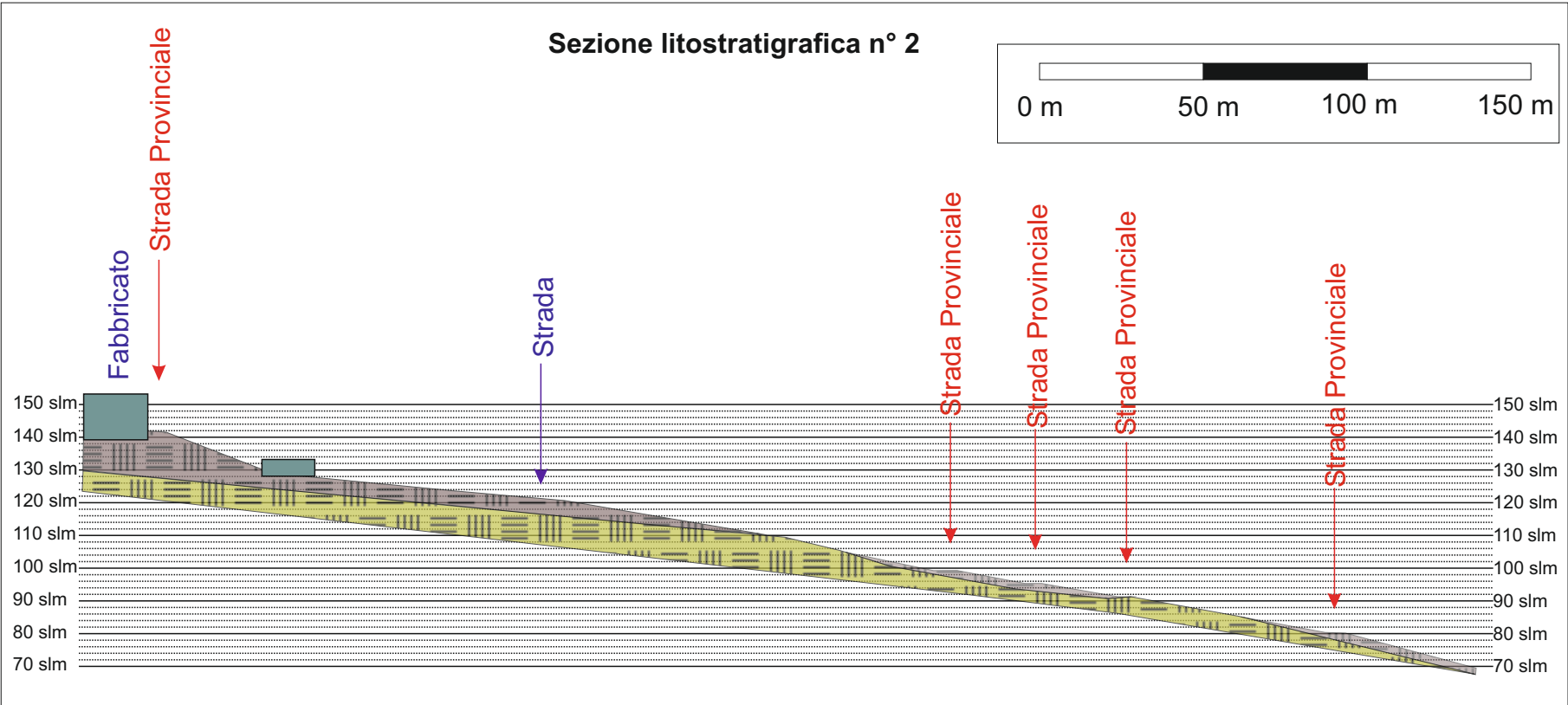
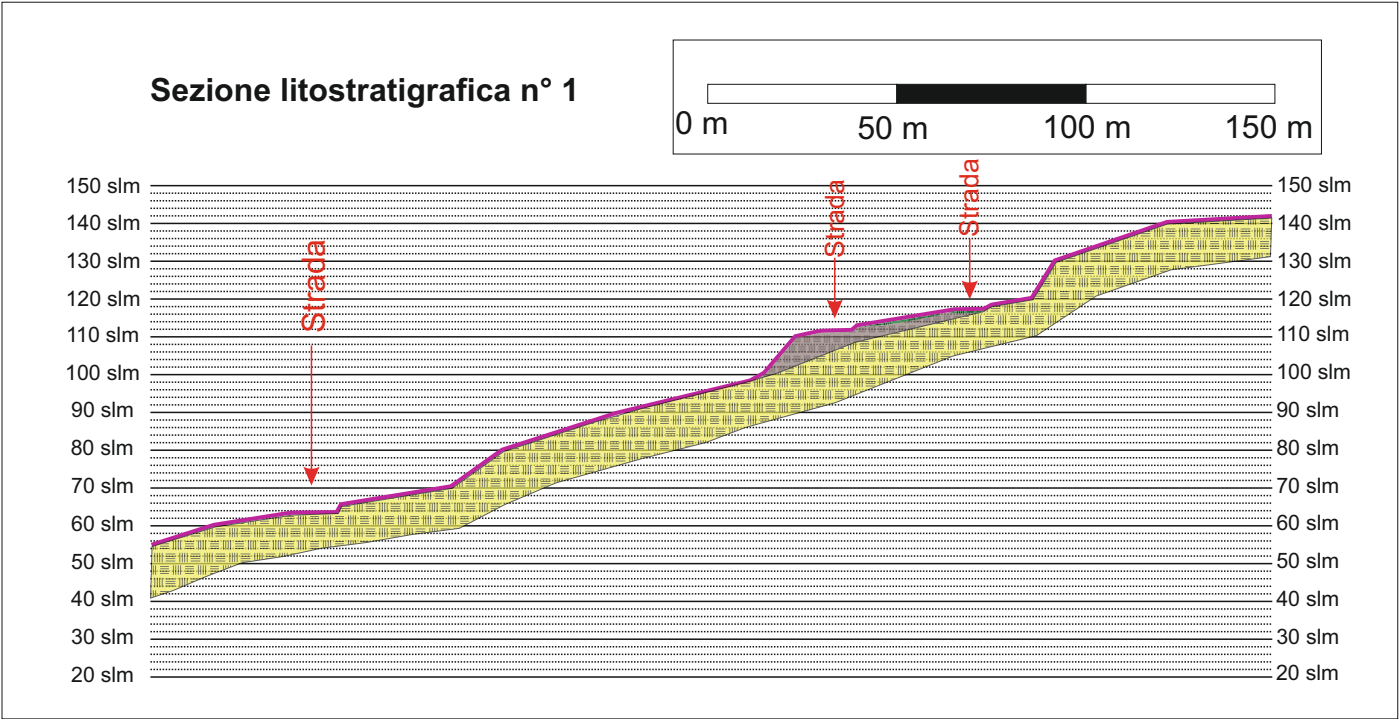




LEGENDA

- | | |
|---|--|
| — Strada provinciale | Litologie affioranti |
| — Rete idrografica | ▨ Settore atropizzato |
| - - - Direttrici di sezione litostratigrafica | ▨ Detrito di falda |
| Dissesti PAI | ▨ Detrito di versante |
| ▨ Crollo e/o ribaltamento | ▨ Depositi alluvionali, di spianata costiera e di spiaggia |
| ▨ Scorrimento | ▨ Depositi fluvio-marini terrazzati a varie quote. |
| ▨ Dissesti conseguenti a erosione accelerata | ▨ Formazioni piroclastiche sciolte e scarsamente saldate (scorie, pomici, lapilli e bombe) |
| ▨ Crolli | ▨ Formazioni vulcanoclastiche saldate e/o cementate (tufi, ialoclastiti, ignimbriti, brecce a pillows, ecc.) |
| | ▨ Vulcaniti lapidee (bancate laviche e corpi lavici, ecc.) |

TAV. 3A
Sezioni litostratigrafiche



Formazioni piroclastiche sciolte e scarsamente saldate (scorie, pomici, lapilli e bombe).

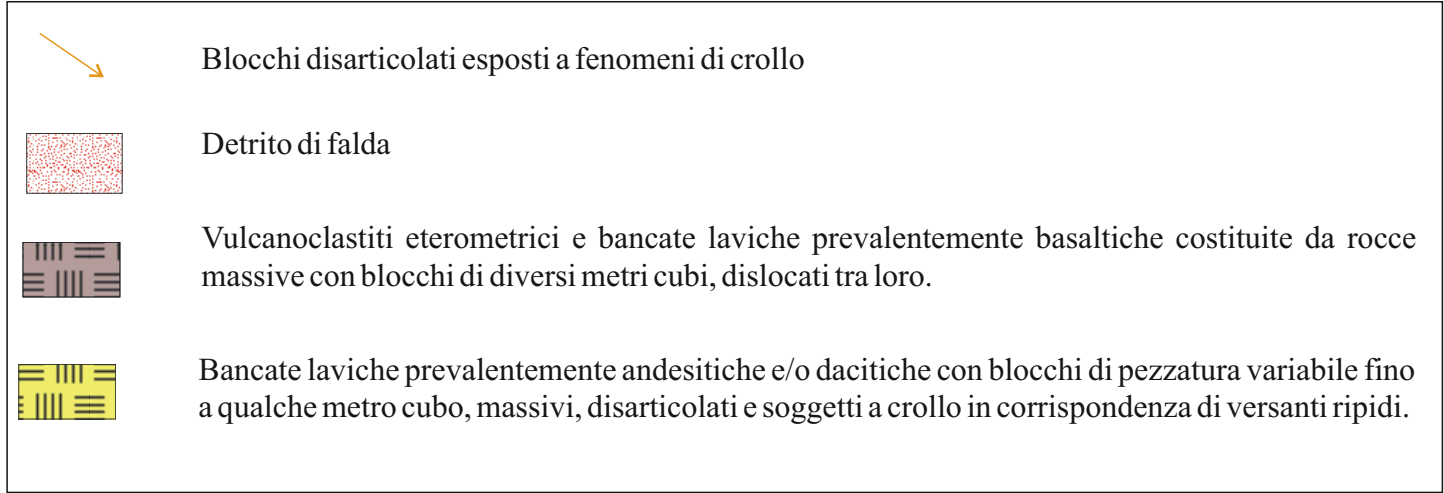
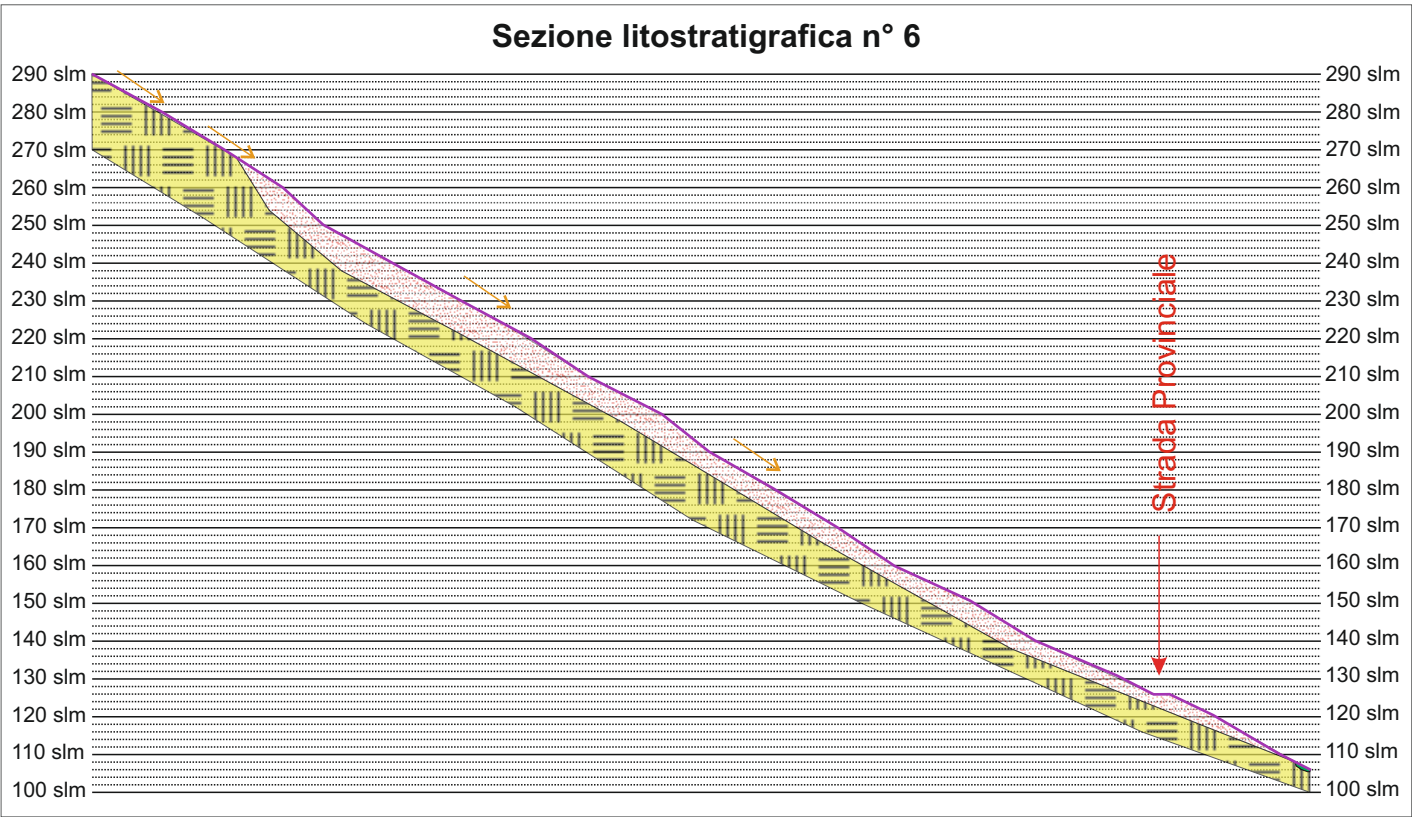
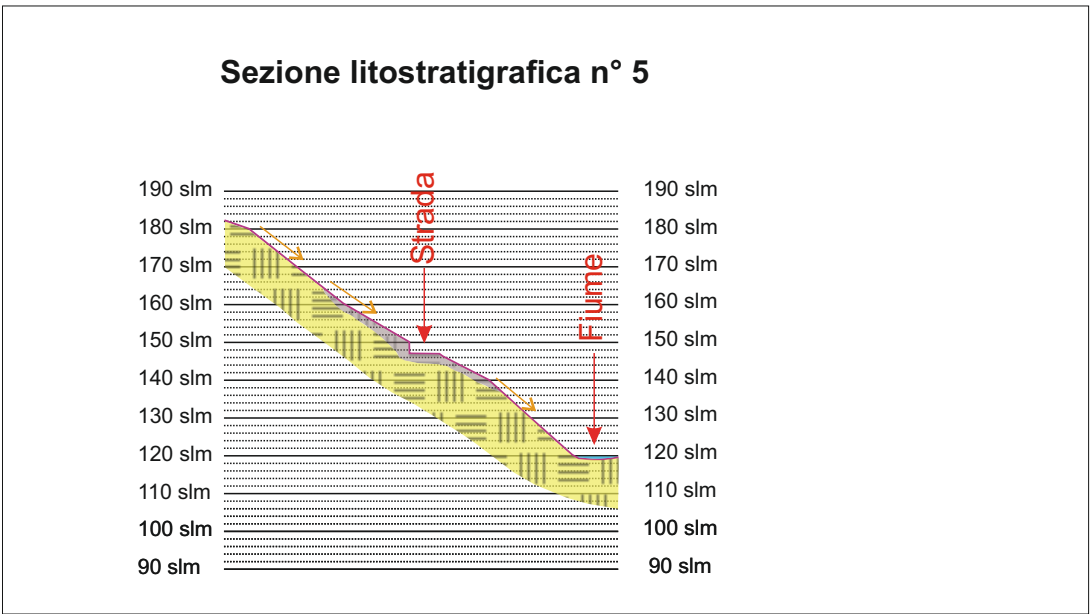
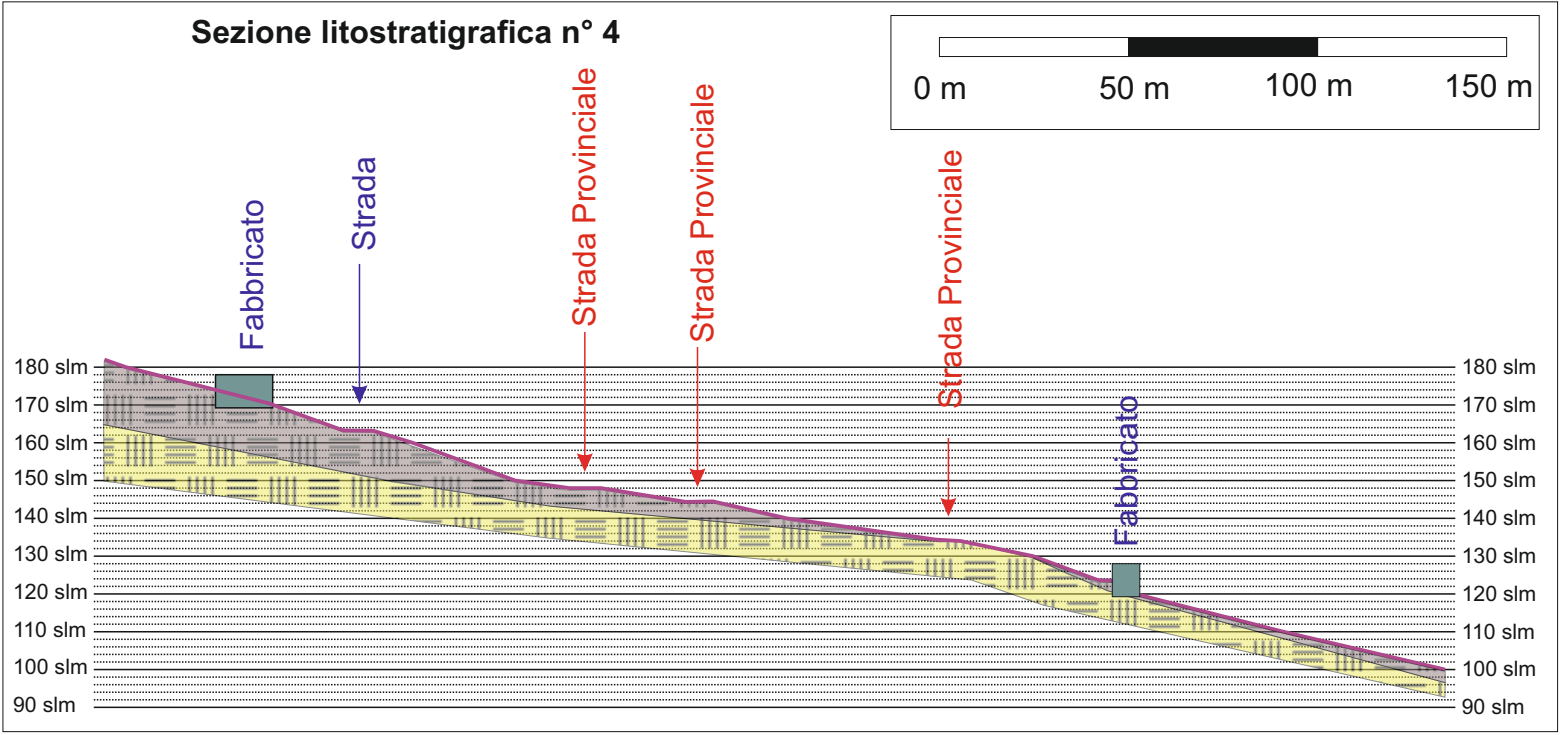


Vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro.

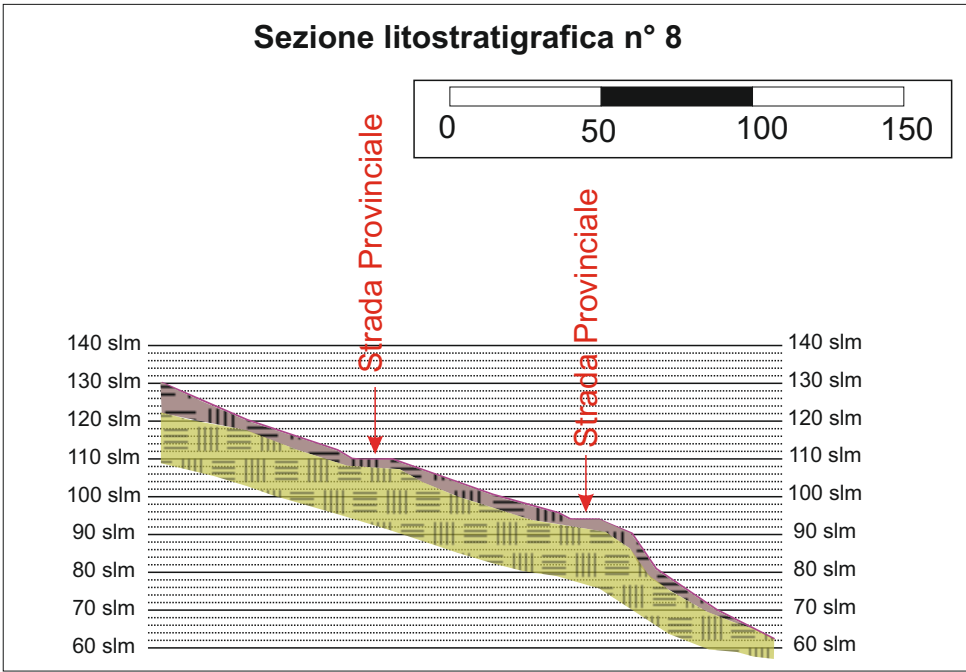
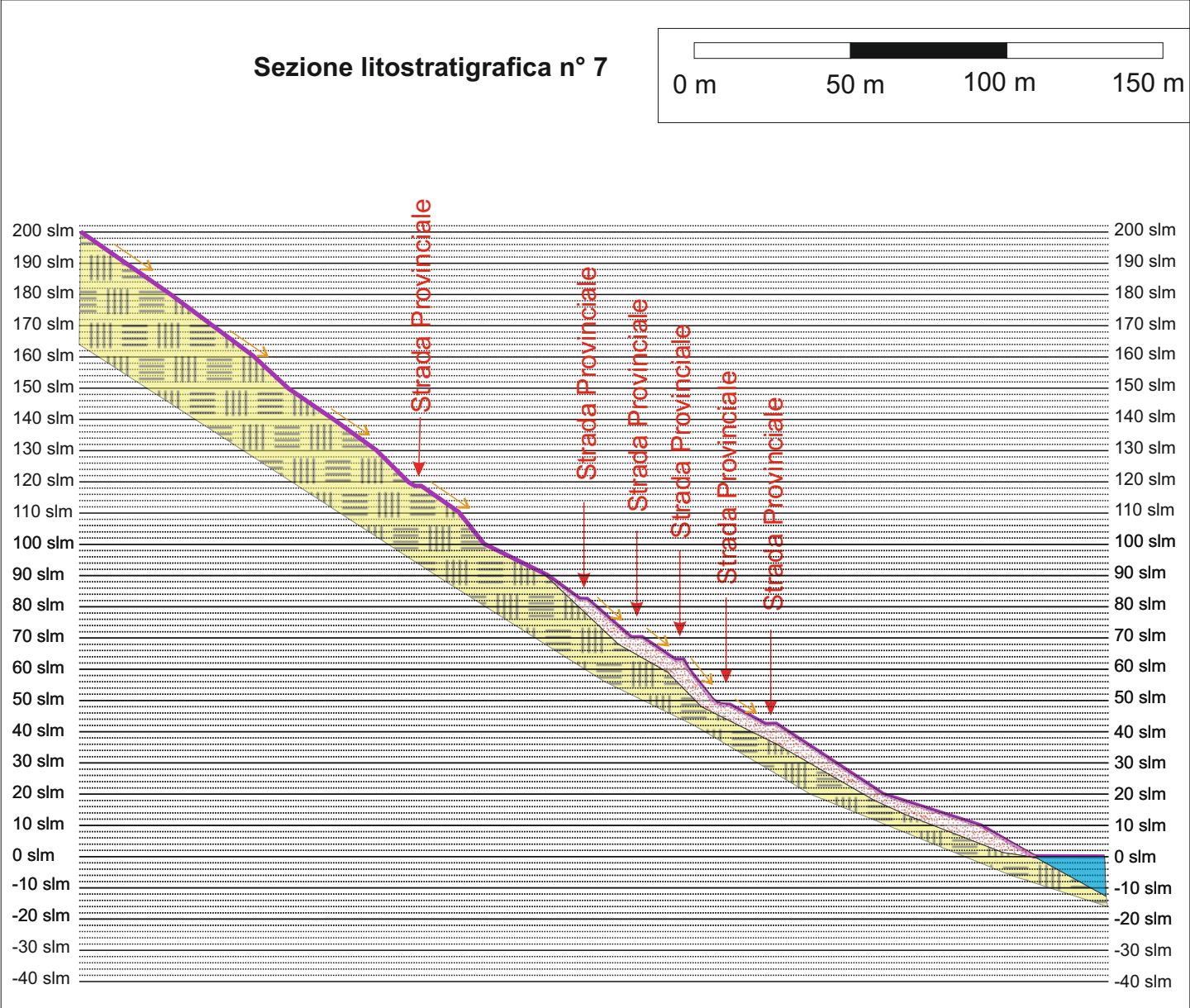


Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi.

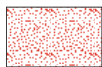
TAV. 3B
Sezioni litostratigrafiche



TAV. 3C
Sezioni litostratigrafiche



Blocchi disarticolati esposti a fenomeni di crollo



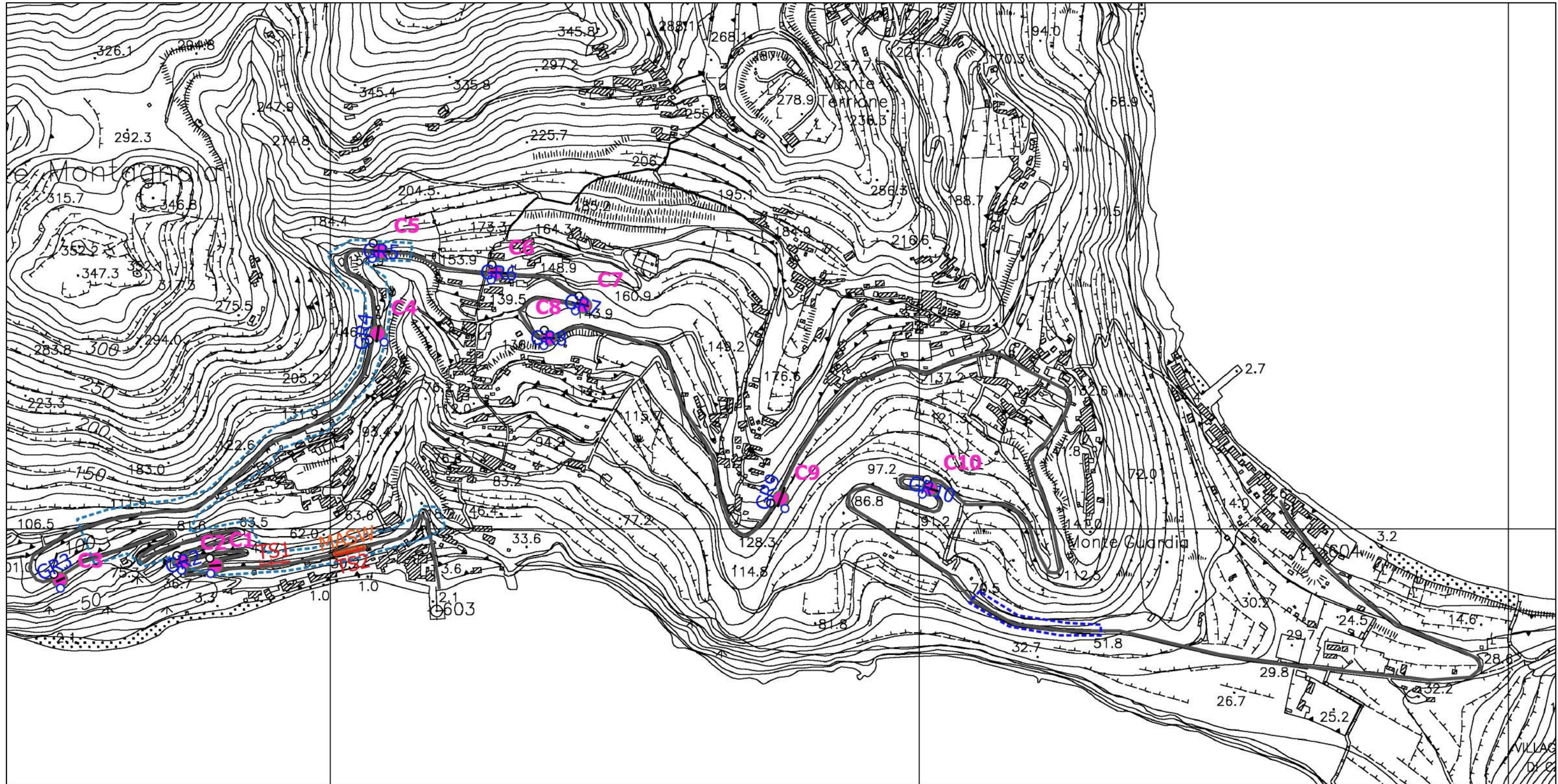
Detrito di falda



Vulcanoclastiti eterometrici e bancate laviche prevalentemente basaltiche costituite da rocce massive con blocchi di diversi metri cubi, dislocati tra loro.



Bancate laviche prevalentemente andesitiche e/o dacitiche con blocchi di pezzatura variabile fino a qualche metro cubo, massivi, disarticolati e soggetti a crollo in corrispondenza di versanti ripidi.

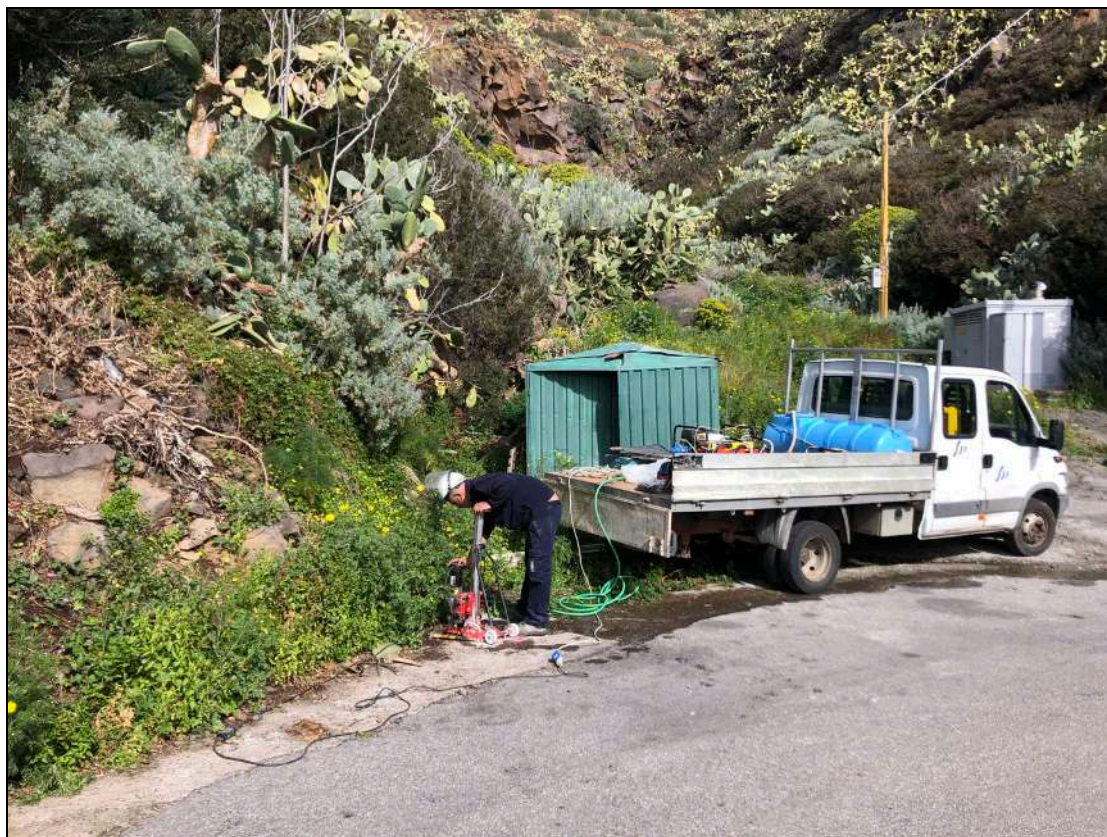


LEGENDA

- Strada
- ++ Tomografia sismica a rifrazione (TS)
- MASW
- ○ Indagine georadar (GR)
- Carotaggio su asfalto (C)
- Aree di rilievo con drone

**MESSA IN SICUREZZA E RIFUNZIONALIZZAZIONE DELLA STRADA DI
COLLEGAMENTO CENTRO ABITATO - FRAZIONE PECORINI A MARE**

APPENDICE 1
Relazione indagini geognostiche, geofisiche e georadar



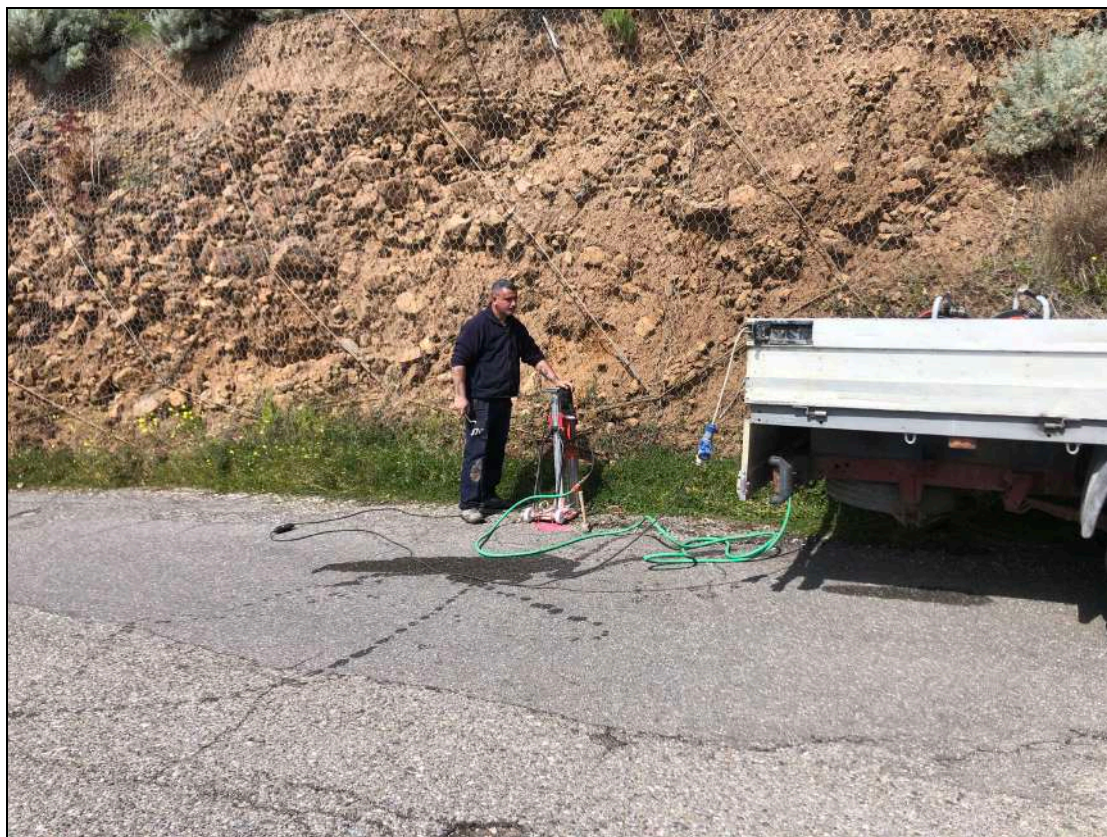
Postazione Carotaggio C1





Postazione Carotaggio C2





Postazione Carotaggio C3





Postazione Carotaggio C4





Postazione Carotaggio C5





Postazione Carotaggio C6





Postazione Carotaggio C7





Postazione Carotaggio C8





Postazione Carotaggio C9





Postazione Carotaggio C10





Carote prelevate dal sondaggio 1 al sondaggio 10

Nell'area oggetto di studio, sono state eseguite:

- n. 2 indagini di sismica a rifrazione elaborate sia con la tecnica del G.R.M. che con la "tomografia sismica" in configurazione a 24 canali con interdistanza geofonica di 2,5 m per una lunghezza complessiva dello stendimento di ml 62,5, identificate in planimetria con la sigla "SS1" e "SS2";
- n. 1 indagine sismica del tipo "MASW", sullo stesso allineamento dello stendimento sismico "SS2", con offset dello scoppio di 5 m;
- n. 370 ml di indagine "georadar";
- rilievo con velivolo APR lungo la strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare per un totale di poco più di 61 ettari rilevati.

In allegato sono riportate le planimetrie con l'ubicazione dei rilievi effettuati, i reports delle indagini eseguite e la relativa documentazione fotografica.

Il DEM viene fornito, a codesto committente, telematicamente e su supporto DVD-ROM.

Di seguito una descrizione delle tecniche di indagine e delle procedure adottate per l'acquisizione e l'elaborazione delle stesse.



1.1 La tecnica di sismica a rifrazione

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti. Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell. Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore. La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità. Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un

angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.

La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.



Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)} V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1 \sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1 V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)} \sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1 V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.

Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare **la funzione velocità** secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$

dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto



allo stendimento. T_V è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_V viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.

Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°

Lo strumento utilizzato è un sismografo digitale marca *Dolang Geophysical*, mod. DBS280B a 24 bit.

Resolution	24 bit
Available Channels	24
Number of samples/trace	256,512,1024,2048,4096,8192, 10992
Sampling rate (Hz)	250,500,1000,2000,4000,8000,16000
Averaging	Always sampling at 16 K then averaging for noise reduction
Recording time	Up to 44.7 sec
Time standard accuracy	0,005%
Gain Accuracy	+/- 0,2%
Input Impedance	Matched to sensor
Cross talk	To be measured
Input signal range	+/- 2V
Anti alias filter	800 Hz 12 db/octave
Software filter	30Hz, 60Hz, 200Hz, 400Hz
Dynamic Resolution	124 dB at 1000 Hz
Crossfeed isolation	To be measured
THD noise	< 97 dB
Recording Format	SEG2
Operating temperature	0°- 50
Power Supply	From USB notebook only



Scheda tecnica dello strumento

1.2 La tomografia sismica

La tomografia sismica permette di costruire un'immagine della distribuzione in profondità della velocità delle onde sismiche e delle sue anomalie con un alto potere risolutivo. In particolare, l'indagine sismica a rifrazione è un'indagine sismica indiretta e attiva che utilizza le onde rifratte generate dai contrasti di velocità di propagazione delle onde sismiche per ricostruire le caratteristiche del sottosuolo. La velocità delle onde sismiche dipende dalla densità e dalle proprietà elastiche del materiale attraversato, ovvero da proprietà riconducibili alle caratteristiche litologiche del substrato indagato. La direzione di propagazione delle onde in profondità rispetta la legge di Snell e ad ogni interfaccia si originano fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione. Nelle indagini a rifrazione, come dice il nome stesso, verranno



considerate solo le onde rifratte. La tomografia sismica a rifrazione consente di ottenere un'immagine della distribuzione di velocità nel sottosuolo mettendo in evidenza le variazioni continue di velocità piuttosto che un modello a strati tipico delle elaborazioni a rifrazione (Intercette, delaytime, plus minus, G.R.M.).

Lo svolgimento dell'indagine sismica a rifrazione consiste nel generare un'onda sismica di compressione (energizzazione) e registrarne l'arrivo ai geofoni disposti in linea ad intervalli noti. L'interpretazione delle misure registrate si basa sull'analisi del tempo impiegato dall'onda generata con le energizzazioni a raggiungere ciascun geofono. Per poter ricostruire la variazione di velocità delle onde di compressione nel sottosuolo è necessario eseguire più energizzazioni in posizioni differenti.

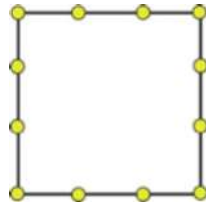
Le misure effettuate con la tecnica a rifrazione possono essere elaborate con la procedura tomografica al fine di evidenziare in dettaglio le variazioni locali di velocità.

La tecnica tomografica prevede la creazione di un modello sintetico iniziale del sottosuolo e la sua perturbazione alla ricerca del minimo scarto tra le misure effettuate sul terreno e le misure "virtuali" registrate sul modello sintetico attraverso una procedura iterativa che alterna le due seguenti fasi:

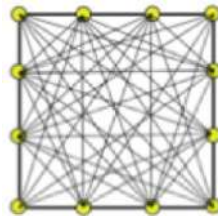
Nella fase "diretta" vengono calcolati sul modello sintetico i tempi di arrivo del impulso sismico (smartTomo è basato sul lavoro di Moser, T. J. "Shortest path calculation of seismic rays." Geophysics 56.1 (1991): 59-67). Il modello di velocità iniziale è suddiviso in una griglia le cui celle hanno assegnato un valore di velocità iniziale. Sui lati della cella sono presenti più nodi (il numero è scelto dall'utente) che costituiscono i nodi della rete di ipotetici raggi sismici che connettono tutte le sorgenti e tutti i ricevitori che sono anche essi dei nodi. Ogni nodo è connesso con i

nodi delle celle adiacenti. Aumentando il numero di nodi aumenta il dettaglio e la precisione nel percorso dei raggi sismici ma aumenta anche l'uso di memoria.

Il percorso delle onde rifratte corrisponde al percorso che impiega il minor tempo a percorrere il tragitto tra la sorgente ed il ricevitore.



Esempio di cella con 4 nodi sui lati. I nodi vengono utilizzati per discretizzare i raggi sismici



Cella con esplicitati tutti i raggi possibili usando 4 nodi. Aumentando il numero di nodi migliora l'approssimazione del percorso dei raggi sismici

Nella fase "inversa" i tempi sintetici calcolati nel passo "diretto" vengono confrontati con i tempi misurati sui sismogrammi; le differenze tra i tempi sono usate per aggiornare il modello sintetico (smartTomo impiega un algoritmo riconducibile alla famiglia delle "Simultaneous Iterative Reconstruction Technique"). Nell'applicazione di questo metodo la velocità viene sostituita dal suo inverso, la lentezza. Ad esempio, considerando un generico raggio sismico j tra la sorgente ed il ricevitore la lentezza media può essere espressa come:

$$(1) \quad S_{ij} = \frac{t_{0j}}{t_{ij}}$$



dove t_{0j} rappresenta il tempo misurato tra la sorgente ed il ricevitore e l_j rappresenta la lunghezza del raggio sismico j -esimo. Pertanto, conoscendo i tempi di percorso misurato t_m e il tempo di percorso calcolato t_c per il raggio j -esimo si può calcolare il residuo del tempo di percorso:

$$(2) \quad \Delta t_j = t_{mj} - t_{cj}$$

Il residuo dei tempi di percorso viene proiettato su ciascuna cella k su cui si calcola anche il fattore di correzione della lentezza:

$$(3) \quad \Delta S_k = \frac{\sum \Delta t_{jk}}{\sum \Delta l_{jk}}$$

L'indice i rappresenta ciascun raggio sismico incidente sulla cella k -esima. Il fattore di correzione della lentezza verrà utilizzato per aggiornare il modello di velocità alla fine di ogni iterazione del ciclo di risoluzione. Questa procedura consente di ottenere un modello, con variazioni di velocità continue e non necessariamente vincolato alla presenza di rifrattori.

Ad ogni ciclo di aggiornamento segue una fase di smoothing del risultato per rendere più omogeneo il modello mediante operazioni di distribuzione della velocità alle celle adiacenti a quelle attraversate dai raggi sismici che non verrebbero aggiornate, garantendo maggiore stabilità alle procedure di calcolo e un risultato interpretabile più facilmente.

Il funzionamento della procedura è illustrato nella seguente Figura tratta da Reinhard Kirsch, "Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology" Springer 2006.

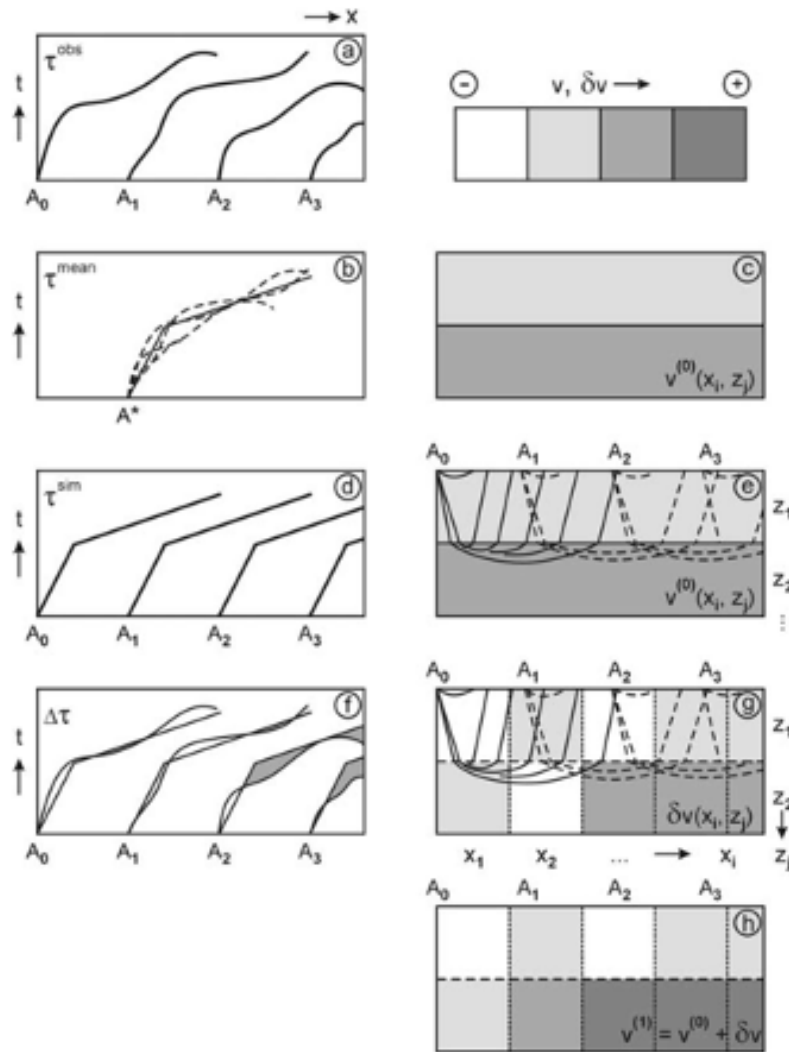


Immagine che illustra il processo di ottimizzazione del risultato da parte della tomografia sismica.

(a) Le dromocrone misurate sulle tracce registrate sul terreno sono utilizzate per costruire il modello iniziale (b) e (c).

(d) Utilizzando il modello iniziale (e) vengono calcolate le dromocrone sintetiche.

(f) Vengono calcolate le differenze tra le dromocrone misurate e simulate (equazione 2) e vengono calcolati gli aggiornamenti del modello di velocità (g) (equazione 3)

(h) Il modello di velocità aggiornato può essere utilizzato come un nuovo modello iniziale in (d) e (e) fino a quando un determinato criterio di stop è stato raggiunto

1.3 La tecnica MASW

La geofisica osserva il comportamento delle onde che si propagano all'interno dei materiali. Un segnale sismico, infatti, si modifica in funzione delle caratteristiche del mezzo che attraversa. Le onde possono essere generate in modo artificiale attraverso l'uso di masse battenti, di scoppi, etc.

Moto del segnale sismico

Il segnale sismico può essere scomposto in più fasi ognuna delle quali identifica il movimento delle particelle investite dalle onde sismiche. Le fasi possono essere:

- **P-Longitudinale:** onda profonda di compressione;
- **S-Trasversale:** onda profonda di taglio;
- **L-Love:** onda di superficie, composta da onde P e S;
- **R-Rayleigh:** onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado.

Onde di Rayleigh – "R"

In passato gli studi sulla diffusione delle onde sismiche si sono concentrati sulla propagazione delle onde profonde (P,S) considerando le onde di superficie come un disturbo del segnale sismico da analizzare. Recenti studi hanno consentito di creare dei modelli matematici avanzati per l'analisi delle onde di superficie in mezzi a differente rigidità.

Analisi del segnale con tecnica MASW

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica



il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

Modellizzazione

È possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione: $v = \lambda \times v$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidezza.

Modi di vibrazione

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.



Profondità di indagine

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

1.3.1 Categoria del suolo di fondazione: procedura semplificata

La risposta sismica locale è determinata in relazione alle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche a partire dalla "pericolosità sismica di base". La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2 delle nuove NTC), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento T_R , come definito nel § 2.4. In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s .

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con: h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II (NTC 2018).

Dalle indagini eseguite e dalle osservazioni in campagna risulta $V_{S_{equiv,30}} = 599$ m/s per cui la **categoria del sottosuolo di fondazione ricade in "B"**.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.



1.4 L'indagine "georadar"

I rilievi geofisici di tipo georadar - **GPR** (Ground Penetrating Radar) sono stati eseguiti e finalizzati all'individuazione e alla ricerca dei principali sottoservizi insistenti nell'area sede della progettazione.

Il GPR permette di segnalare la presenza di lineamenti di oggetti e di strutture sepolte in modo non distruttivo e veloce attraverso riflessioni di onde elettromagnetiche; inoltre il metodo possiede un elevato potere risolutivo sia in verticale che in orizzontale, che permette di costruire modelli 2D, oltre che di orizzonti litologici e strutture archeologiche in generale. In allegato alla presente relazione si forniscono, in formato digitale:

- ✓ le immagini dei singoli profili georadar rilevati, "elaborati e interpretati" in "*radargrammi*";
- ✓ planimetria con ubicazione delle linee di acquisizione e mappatura dei targets individuati.

1.4.1 Generalità e principio di funzionamento

Il metodo georadar (conosciuto anche con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar – GPR) è una tecnica ad elevata risoluzione che consente di raccogliere una grande quantità di informazioni su vaste aree nei primi metri del sottosuolo, riferibili alla presenza di corpi sepolti, cavità, strutture di interesse archeologico, stratificazioni del sottosuolo, ecc. Un apparato radar strumentale opera mediante la generazione di onde impulsive ad elevata frequenza (tipicamente tra 10 MHz a qualche GHz), che vengono trasmesse nel sottosuolo mediante un'opportuna "antenna trasmittente" disposta sulla superficie del terreno. Il segnale elettromagnetico si propaga nel mezzo e subisce delle riflessioni se incontra un mezzo con discontinuità dei parametri elettromagnetici.

L'onda riflessa che torna in superficie viene registrata da una "antenna ricevente". Il segnale captato viene poi trasmesso all'unità di controllo che provvede ad

amplificarlo e registrarlo in formato digitale. Misurando l'intervallo di tempo impiegato dall'impulso a radiofrequenza per

- i) arrivare alla discontinuità sepolta,
- ii) riflettersi,
- iii) ritornare al ricevitore,

si può risalire alla posizione della struttura riflettente se è nota la velocità di propagazione.

Le modalità d'impiego del georadar sono due:

1) *Monostatico*, se si utilizza una sola antenna che funziona sia da trasmettente che da ricevente (Fig. 2a), ovvero essa trasmette l'impulso radar e subito dopo si pone in ricezione per captare l'energia riflessa da un eventuale bersaglio.

2) *Bistatico*, se vengono adoperate due antenne distinte (una per trasmettere Tx e una per ricevere Rx) che vengono tenute ad una distanza fissa l'una dall'altra mentre si esegue il rilievo (Fig. 2b).

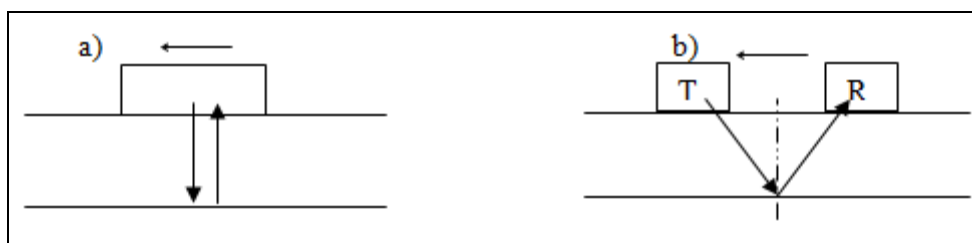


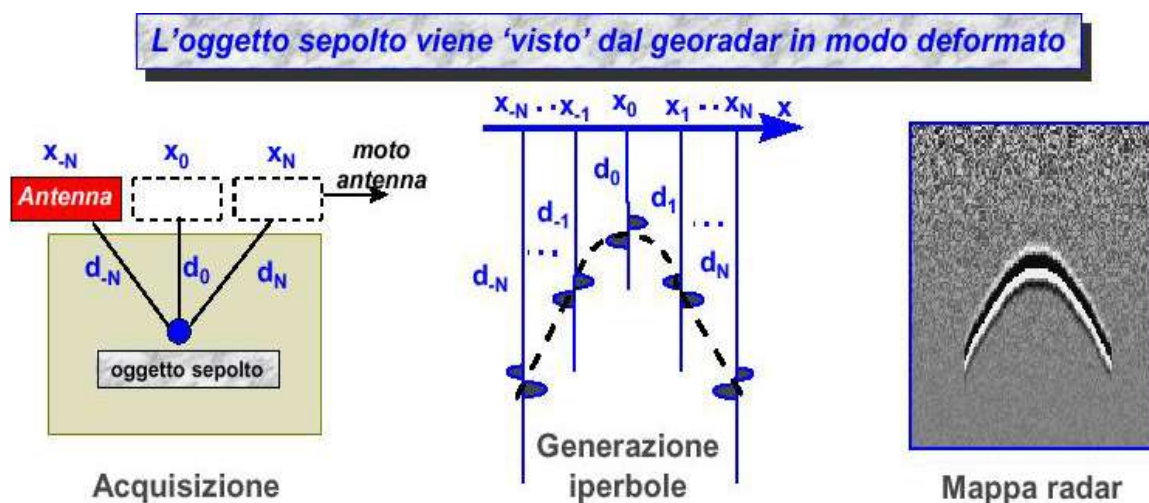
Illustrazione del sistema di acquisizione a) monostatico e b) bistatico

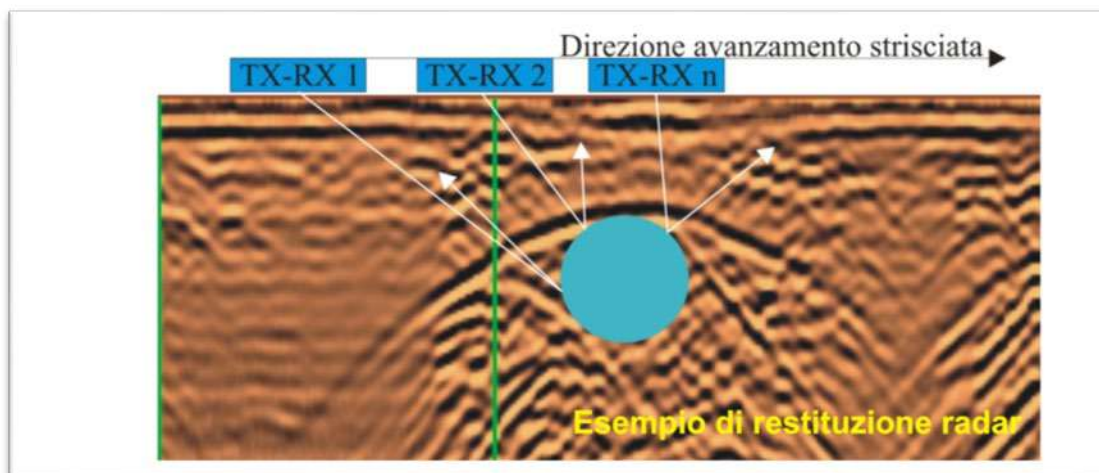
La tecnica di acquisizione può inoltre essere “*in continuo*”, ovvero con il sistema di antenne è mosso in modo continuo sulla superficie del terreno lungo un profilo ben definito, oppure “*per punti*”. Nella modalità in continuo, le antenne sono trascinate manualmente o mediante dei veicoli con velocità costante e anche l'energia radar è trasmessa nel sottosuolo costantemente e ad un ritmo fissato. Nella modalità per punti, una o entrambe le antenne vengono spostate ad intervalli spaziali discreti consentendo l'acquisizione dei dati solo in determinati punti. L'acquisizione per punti (molto più onerosa in termini di tempo) viene utilizzata solo in particolari situazioni;

ad esempio quando la presenza di asperità sul terreno rende difficoltoso il trascinamento delle antenne. In entrambi i modi si ottengono profili bidimensionali che contengono un gran numero di riflessioni. Se i dati sono acquisiti lungo profili equidistanziati (griglie), la correlazione e l'analisi di riflessioni permette di costruire un'accurata immagine tridimensionale di lineamenti sepolti e quindi della stratigrafia ad essa associata.

1.4.2 Strumentazione utilizzata

Le indagini elettromagnetiche impulsive sono state eseguite con l'unità di acquisizione campale IDS OPERA DUO dotato di un modulo antenna a doppia frequenza; l'antenna ad alta frequenza (700 MHz) permette la localizzazione accurata di oggetti superficiali, l'antenna a bassa frequenza (250 MHz) consente la localizzazione di oggetti più profondi. Durante l'indagine il georadar acquisisce, elabora e memorizza i dati e contemporaneamente presenta sullo schermo del computer i dati collezionati come sezioni radar delle aree scansionate. L'operatore, interpretando i radargrammi visualizzati, procede marcando le caratteristiche rilevanti possibilmente associate ad oggetti sepolti. La configurazione base è stata mantenuta costante al fine di ottenere risultati comparabili su tutte le aree indagate.





Un "esempio di radargramma" con individuazione di un sottoservizio/tubo di grosso diametro

L'antenna viene praticamente trascinata sul terreno inviando continuamente impulsi verso l'oggetto sepolto. Le onde elettromagnetiche inviate nel terreno intercettano l'oggetto sepolto dopo aver percorso distanze variabili, per questo l'onda cambia forma dopo intervalli di tempo diversi a seconda della posizione: il risultato è un'iperbole che può anche essere asimmetrica.

Il risultato è una "sezione radar" come quelle in allegato in cui sull'asse delle ascisse è riportata la distanza (in metri) percorsa dall'antenna lungo il profilo e sull'asse delle ordinate è riportata la profondità di investigazione ottenuta dal tempo doppio di viaggio dell'onda elettromagnetica nel sottosuolo, cioè il tempo che l'onda elettromagnetica impiega per andare dall'antenna trasmittente alla superficie di contatto tra due mezzi con caratteristiche elettromagnetiche distinte, essere riflessa e tornare indietro all'antenna ricevente.

1.4.3 Modalità di acquisizione ed ubicazione

Il rilievo è stato eseguito secondo le disposizioni presenti nei seguenti documenti:

- ASTM D6432-99 (REV. 2005) : *"Standard Guide for using the Surface Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation"*;

- CEI 306-8 (2004-07 – FASC. 7355): *“Impiego del radar per introspezione del suolo per prospezioni preliminari ad opera di posa servizi ed infrastrutture sotterranee”*.

Nella fattispecie si è proceduto eseguendo n. 4 strisciate longitudinali, n. 17 trasversali lungo la strada in esame.

Il rilievo, quindi, è costituito da n. 21 profili di varia lunghezza. I profili sono stati acquisiti con 512 campioni/traccia, applicando una finestra temporale di 80 ns (intervallo di profondità) ad un passo di scansione di 0,00324 metri.

1.4.4 Caratteristiche e limiti della metodologia

La metodologia elettromagnetica impulsiva, comunemente conosciuta con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar (GPR), utilizza impulsi elettromagnetici di breve durata per l'esplorazione del sottosuolo. Attraverso un'analisi degli impulsi riflessi da superfici di discontinuità dei parametri elettromagnetici è possibile risalire alle strutture presenti nel sottosuolo. Tale metodo ha il vantaggio di fornire in tempo reale una descrizione dettagliata del sottosuolo indagato. Il GPR trova ottimi impieghi in terreni resistivi (spazi vuoti, ghiaie, sabbie sciolte, etc..), consentendo di individuare strutture con “caratteristiche elettromagnetiche” differenti rispetto all'ambiente circostante, mentre risulta praticamente “cieco” in terreni con alta conduttività, in cui l'assorbimento dell'energia da parte del materiale stesso ne limita la profondità di indagine (ad esempio in caso di strati di argilla, falde freatiche, umidità nel sottosuolo, massetti in cls armati, ecc.). A tal proposito si specifica che *"non tutti i sottoservizi possono essere localizzati e mappati"*, in considerazione della loro profondità, tipo di materiale, geologia e prossimità ad altre strutture e/o anomalie. Anche un'indagine appropriata ed eseguita in modo professionale potrebbe non garantire il riconoscimento del 100% delle strutture eventualmente presenti.

Infatti, i parametri fisici che influenzano la propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo (in questo caso nel sottosuolo) sono:



- ✓ la *conducibilità elettrica* σ (s/m): essa è una caratteristica del mezzo e rappresenta la sua capacità di veicolare una corrente elettrica. Un buon conduttore è caratterizzato da alti valori di σ .
- ✓ la *permittività dielettrica* ϵ : essa rappresenta la capacità del materiale di polarizzarsi elettricamente in risposta all'applicazione di un campo elettrico esterno. Un dielettrico perfetto è rappresentato dallo spazio vuoto in cui $\sigma = 0$. La permittività dielettrica del vuoto è $\epsilon_0 = 8,857 \times 10^{-12}$ (Farad/m). La permittività relativa al vuoto è chiamata costante dielettrica $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ed è un numero puro.
- ✓ la *permeabilità magnetica* μ : essa rappresenta la capacità del materiale di magnetizzarsi per effetto di un campo magnetico esterno. La permeabilità magnetica del vuoto è $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m). La permeabilità relativa al vuoto $\mu_r = \mu/\mu_0$ è un numero puro. Per materiali geologici $\mu_r \approx 1$ e quindi è di solito un parametro poco significativo nelle indagini GPR.

La propagazione di un campo elettromagnetico in un mezzo materiale è governata dalle equazioni di Maxwell. L'ampiezza dell'onda elettromagnetica (EM) subisce un'attenuazione man mano che si propaga in profondità nel sottosuolo. La prima causa è lo smorzamento geometrico: l'ampiezza dell'onda EM diminuisce infatti all'aumentare della distanza dal punto sorgente in modo proporzionale all'inverso della distanza. La seconda causa è legata al tipo di materiale che l'onda EM attraversa, e in particolare alle sue perdite per conducibilità e/o (caso più raro) per isteresi. Se il mezzo attraversato dall'onda EM ha un'elevata conducibilità elettrica, l'ampiezza dell'onda EM viene attenuata molto rapidamente. Mezzi molto conduttivi sono quelli che contengono acqua, argilla, sali disciolti o elettroliti. Elevati valori di conducibilità si rilevano anche nei suoli agricoli saturi di azoto e potassio o nei suoli umidi impregnati di carbonato di calcio. La costante dielettrica varia in base alla composizione chimica, alla struttura fisica, alla quantità di umidità e alla temperatura del campione roccioso. Tanto più la differenza di ϵ_r tra due materiali del sottosuolo è grande, tanto più aumenta l'ampiezza delle riflessioni generate e l'ampiezza stessa è

tanto più pronunciata, quanto più la distanza tra la discontinuità e le antenne è piccola.

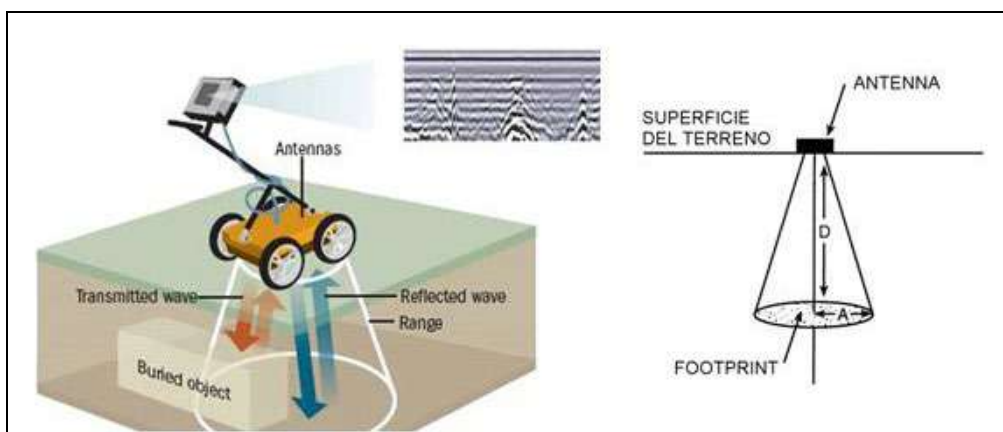
Nella tabella 1 sono riportati i valori tipici della costante dielettrica relativa ϵ_r , della conducibilità elettrica σ , della velocità v e dell'attenuazione α , osservati per diversi materiali ad una frequenza di 100 MHz:

Materiale	$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$	$\sigma(\text{mS/m})$	$V(\text{m/ns})$	$\alpha(\text{dB/m})$
Aria	1	0	0.30	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \cdot 10^{-3}$
Acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
Acqua salata	80	$3 \cdot 10^4$	0.01	10^3
Sabbie asciutte	3-5	0.01	0.15	0.01
Sabbie sature	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calcere	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Argillite	5-15	1-100	0.09	1-100
Limo	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilla	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sale asciutto	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1

Tabella 1. Valori di ϵ_r , σ , v , α per alcuni materiali

Un'altra causa di attenuazione sono i fenomeni di *riflessione e rifrazione* che si verificano quando l'onda incide su una superficie di separazione tra due mezzi con differenti proprietà elettromagnetiche. Riflessioni e trasmissioni possono inoltre manifestarsi in maniera pronunciata generando riflessioni multiple o fenomeni di *scattering* che disperdono ancora di più l'energia radar. Le antenne utilizzate nei sistemi radar hanno un "range di frequenze" che va da 10 MHz a circa 3 GHz. Esse hanno generalmente una larghezza di banda di due ottave, cioè le frequenze variano tra 1/2 e 2 volte la frequenza dominante o frequenza di centro banda f_0 . In realtà, anche se un'antenna radar è identificata da una segnata frequenza di centro banda, non necessariamente l'energia che si propaga nel sottosuolo è esattamente centrata su quella frequenza, poiché il suolo ha un effetto di carico sull'antenna. Inoltre nel

sottosuolo le alte frequenze vengono assorbite più rapidamente delle basse e ciò provoca uno spostamento della frequenza centrale verso le basse frequenze. L'energia radar non penetra nei metalli. Un oggetto metallico largo rispetto alla lunghezza d'onda incidente rifletterà il 100 % dell'energia radar che lo colpisce e oscurerà ogni cosa al di sotto di esso. La scelta delle antenne da adoperare in un rilievo va fatta in base alle dimensioni geometriche degli oggetti di interesse e della profondità a cui essi presumibilmente dovrebbero trovarsi. Le onde elettromagnetiche prodotte dalle antenne standard, irradiano energia radar nel terreno secondo un cono ellittico il cui apice è al centro dell'antenna trasmittente. Il lobo di radiazione nel sottosuolo permette così di "guardare" non solo direttamente sotto l'antenna ma anche di fronte, in dietro e ai lati man mano che l'antenna viaggia sul terreno. Parliamo così di risoluzione orizzontale. La stima del lobo di radiazione è importante specialmente quando si progetta la spaziatura tra le linee di una griglia, in modo da rendere evidenti tutti i bersagli di una certa importanza nel sottosuolo, cioè in modo tale che questi ultimi siano colpiti dall'energia radar trasmessa e che perciò possano generare riflessioni. In generale, l'angolo del cono è definito dalla costante dielettrica relativa del materiale attraversato dalle onde e dalla frequenza centrale di emissione dell'antenna.



Cono ellittico della penetrazione GPR nel terreno

Un'equazione che può essere usata per stimare la larghezza del fascio di trasmissione a varie profondità (il footprint) è la seguente (Leucci, 2007a):

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

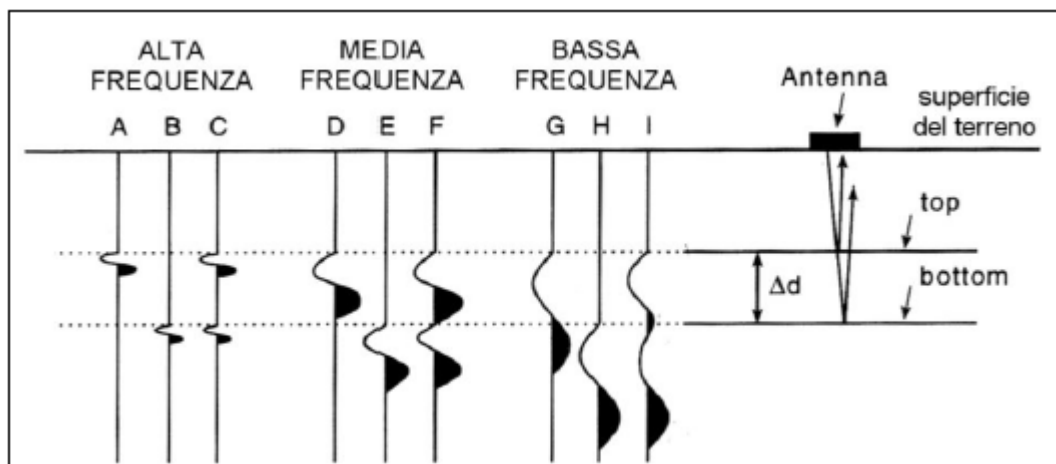
dove A sono le dimensioni approssimate del raggio del footprint, λ è la lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico in aria, D è la profondità a cui si trova l'oggetto riflettente e r è la costante dielettrica relativa del mezzo attraversato. Una volta scelta la frequenza da utilizzare nell'indagine geofisica bisogna conoscere la velocità di propagazione nel mezzo che ci consente di stimare la profondità (D) delle riflessioni: questa si può misurare dagli stessi dati georadar. A parità di velocità, all'aumentare della frequenza aumenta il potere risolutivo verticale e orizzontale. È anche noto però che all'aumentare della frequenza aumenta il potere di assorbimento del mezzo e diminuisce quindi la profondità di penetrazione.

All'interfaccia aria-suolo si crea una prima rifrazione che provoca un cambiamento di direzionalità del fascio radar; la maggior parte dell'energia è incanalata al di sotto dell'antenna e si propaga in un cono. Più alta è la costante dielettrica relativa r del materiale di cui è costituito il terreno, più bassa è la velocità dell'onda radar trasmessa, e più focalizzato è il cono di trasmissione delle onde che si propagano nel terreno. L'espansione del cono di energia sotto l'antenna, permette di "vedere" un bersaglio non soltanto quando l'antenna gli passa effettivamente sopra, ma anche prima e subito dopo, generando le classiche "iperboli" che spesso si notano nei tracciati radar. Alcune antenne non sono schermate e irradiano in tutte le direzioni. Le antenne non schermate, possono registrare riflessioni generate dallo stesso operatore che trascina l'apparecchiatura radar lungo il profilo, o da alcuni oggetti vicini, come per esempio un albero o una macchina, case e linee elettriche. Queste riflessioni rendono ovviamente più difficoltosa l'analisi dei dati, e per questo è consigliabile prendere nota degli oggetti presenti in superficie in prossimità del profilo radar eseguito. Superfici sepolte, che contengono avvallamenti o creste, possono focalizzare o diffondere l'energia radar secondo la loro orientazione rispetto all'antenna in superficie. Se per esempio una superficie ha una convessità verso



l'alto, molta dell'energia radar sarà riflessa lontano dall'antenna e non sarà registrata alcuna riflessione significativa. Questo è il cosiddetto "*scattering radar*". Se invece la superficie sepolta ha una concavità verso l'alto, allora l'energia sarà focalizzata verso l'antenna e sarà registrata una riflessione più intensa. Inoltre, poiché nel vuoto non si hanno perdite per assorbimento, una discreta quantità di energia può restare intrappolata all'interno di una cavità e l'onda può "rimbalzare" più di una volta da una parete all'altra, generando ogni volta delle riflessioni, che sulla sezione radar sono identificate come "*riflessioni multiple*". Molto importante è, dunque, la scelta dell'antenna da adoperare poiché è legata alla capacità di risolvere corpi sepolti e alla profondità che si vuole raggiungere. I fattori che devono essere considerati sono soprattutto le dimensioni e la profondità dell'oggetto che si vogliono rendere evidenti e inoltre occorre esaminare accuratamente l'area d'indagine, allo scopo di individuare la presenza di ostruzioni o impedimenti sulla superficie, linee elettriche, ripetitori, radio, ecc. che possono limitare o impedire l'utilizzo di alcune antenne.

Antenne ad alta frequenza (> 500 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali, ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti (in genere minori di un metro). Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, ma la risoluzione spaziale diminuisce. La banda di frequenza, normalmente utilizzata dai sistemi GPR, va da circa 10 MHz fino a superare 1 GHz (la profondità di penetrazione, in quest'ultimo caso, si riduce drasticamente). Inoltre le antenne a bassa frequenza sono più lunghe, più pesanti e meno maneggevoli rispetto alle antenne a frequenza maggiore.



Riflessione dal top, dal bottom e riflessione totale da due strati separati da una distanza Δd , corrispondenti a impulsi di diversa lunghezza d'onda (da Leucci, 2007a)

Considerando due superfici di discontinuità pressoché parallele il segnale ricevuto si relaziona grossomodo alla riflessione dalla parte superiore e dalla parte inferiore di un oggetto sepolto. Affinché le due riflessioni siano distinguibili è necessario che la distanza fra le superfici stesse, sia maggiore o uguale ad una lunghezza d'onda; infatti se la distanza è minore, allora le onde riflesse risultanti dalla sommità e dal fondo dell'anomalia sepolta non saranno riconoscibili in quanto sovrapposte l'una all'altra, mentre se è maggiore si individuano due riflessioni distinte e l'oggetto può essere risolto.

Generalmente, nel caso del metodo radar, la risoluzione verticale si considera idealmente tra $\lambda/4$ e $\lambda/2$ dove $\lambda = v/f_0$ è la lunghezza d'onda nel terreno corrispondente alla frequenza centrale dell'antenna (Leucci, 2007a).

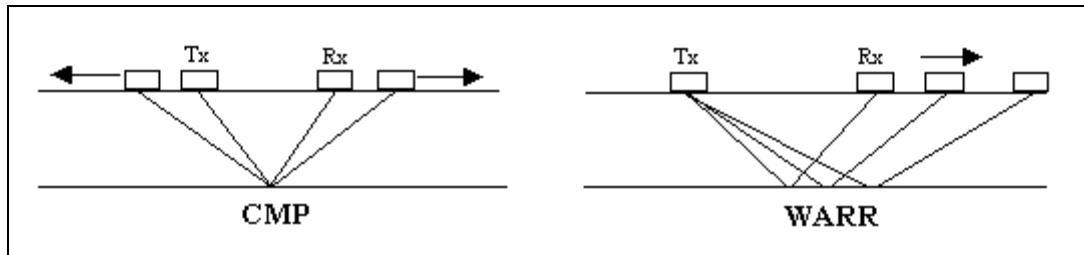
Freq. (MHz)	P(ns)	λ (m) a $v=c$	λ (m) $v=(1/3)c$	λ (m) $v=(1/6)c$
1	1000	300	100	50
10	100	30	10	5
30	33	10	3.3	1.65
100	10	3	1	0.5
300	3.3	10	3.3	1.65
500	2	0.6	0.2	0.1
1000	1	0.3	0.1	0.05
2000	0.5	0.15	0.05	0.025
3000	0.33	0.1	0.03	0.015

Tabella 2. Valori della lunghezza d'onda al variare della frequenza e della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica

La fase più delicata dell'indagine GPR è la stima della velocità media con cui l'impulso elettromagnetico si propaga all'interno del terreno oggetto dell'indagine. Una buona conoscenza di questo importantissimo parametro, permette all'operatore di stabilire approssimativamente la profondità a cui si trovano gli oggetti responsabili delle riflessioni osservate nelle sezioni radar. Le velocità che si riscontrano nelle prospezioni GPR sono comprese tra 30 cm/ns dell'aria e circa 1 cm/ns per l'acqua salata. Le tecniche di acquisizione dati, per le misure di velocità, sono essenzialmente due: WARR (riflessione e rifrazione a grande angolo) e CMP o CDP (punto medio comune o punto profondo comune). Entrambe richiedono l'utilizzo di due antenne separabili fra loro. La tecnica di acquisizione WARR prevede che un'antenna, in genere la trasmittente, sia tenuta fissa mentre l'altra si muove lungo il profilo scelto ad una velocità molto bassa e il più possibile costante. Il problema delle misure di velocità, è comune per i due metodi di prospezione GPR e sismico ed infatti il WARR si ispira concettualmente agli schemi di acquisizione dei dati sismici "commonsource" o "common-receiver" a seconda se, a rimanere fissa, sia rispettivamente l'antenna trasmittente o la ricevente. Nel CDP, le antenne devono essere spostate, di una uguale distanza, lungo versi opposti rispetto ad un punto medio che resta fermo. Entrambi i metodi prevedono che il riflettore venga

individuato preliminarmente dall'analisi dei profili radar eseguiti precedentemente sul sito. La grande difficoltà di spostare entrambe le antenne alla stessa velocità, per la registrazione in continuo, porta ad eseguire il CDP soltanto per punti.

Il WARR necessita di un riflettore orizzontale mentre il CDP può essere utilizzato anche con riflettori debolmente inclinati.



Riflessione dal top, dal bottom e riflessione totale da due strati separati da una distanza Δd , corrispondenti a impulsi di diversa lunghezza d'onda (da Leucci, 2007a)

Sono disponibili diversi metodi per la stima della velocità delle onde elettromagnetiche. Ognuno di questi presenta vantaggi e svantaggi nelle applicazioni pratiche.

Metodo 1 - Localizzazione di oggetti a profondità conosciuta: Il tempo doppio di viaggio è il tempo che occorre ad un'onda EM per percorrere il tragitto, nel terreno, dall'antenna trasmittente fino all'oggetto e ritorno al ricevitore. Denotando la profondità dell'oggetto conosciuto con z_{noto} e la velocità dell'onda e.m. con v , il tempo doppio di viaggio per una configurazione monostatica dell'antenna è dato da:

$$t = 2Z_{\text{noto}}/V$$

Poiché la profondità dell'oggetto è conosciuta, si può piccare il tempo doppio di viaggio da una sezione radar e esprimere la velocità dell'onda EM usando l'equazione sopra. L'accuratezza di questa velocità, dipende dall'errore t_{err} con cui conosciamo il tempo doppio di viaggio piccato. Denotando con t_{picc} il tempo doppio di viaggio piccato, questo può essere espresso come una funzione del tempo doppio di viaggio accurato e dell'errore introdotto tramite la relazione:

$$t_{\text{picc}} = t \pm t_{\text{err}}$$

Per cui il range della velocità dell'onda EM stimata può essere espresso da:

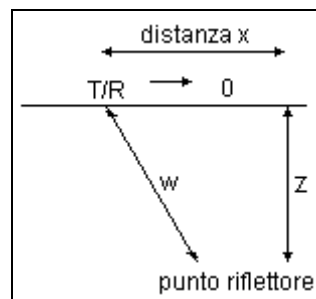
$$v = 2Z_{\text{noto}}/t_{\text{picc}} \pm t_{\text{err}}$$

oppure

$$2Z_{\text{noto}}/t_{\text{picc}} + t_{\text{err}} \leq v \leq 2Z_{\text{noto}}/t_{\text{picc}} - t_{\text{err}}$$

Più è alto l'errore sul tempo doppio di viaggio e più è alta l'imprecisione sulla velocità. Assumendo la velocità dell'onda EM come costante nell'area vicino l'oggetto noto, la profondità di un oggetto sconosciuto nelle vicinanze dell'oggetto noto può essere facilmente calcolata usando la velocità ottenuta.

Metodo 2 – Riflessione da un punto sorgente: Questo è un metodo veloce per la stima della velocità e si basa sul fenomeno che un piccolo oggetto, per esempio la sezione d'urto di un tubo, riflette le onde radar in quasi tutte le direzioni (fig. 25).



Geometria del punto riflettore

Denotando la profondità dell'oggetto ancora con z e la distanza laterale dell'antenna monostatica dall'oggetto con x , la lunghezza w del cammino dell'onda può essere semplicemente espressa da:

$$w^2 = 4(x^2 + z^2)$$

e dunque la funzione del tempo doppio di viaggio con

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

Denotando con t_0 il tempo doppio di viaggio, sulla verticale all'oggetto, si ha:

$$t_0 = 2z/v$$

l'equazione che definisce $t(x)$ può essere riscritta come:

$$t(x) = \sqrt{\frac{4x^2}{v^2} + t_0}$$

che è la formula per la cosiddetta “*diffrazione iperbolica*”.

Poiché conosciamo, dalla sezione radar, per ogni posizione x , il corrispondente tempo doppio di viaggio $t(x)$, la velocità può essere calcolata invertendo l'equazione sopra. La forma dell'iperbole è governata dalla velocità dell'onda nel terreno e dalla geometria dell'oggetto sepolto. L'inclinazione dei suoi asintoti è una funzione solo della velocità media. Il tempo di viaggio al suo vertice è funzione sia della profondità dell'oggetto che della velocità dell'onda nel terreno. Se l'oggetto riflettore è più allargato e di diametro circolare, come per esempio un cilindro, il vertice dell'iperbole rappresenta il top del cilindro, mentre la forma è identica a quella di un punto diffrattore sepolto al centro del cilindro.

Metodo 3 – Registrazione di un semplice CDP: Il percorso di un'onda EM dal trasmettitore al riflettore e da questo al ricevitore, può essere espresso come una funzione della distanza x tra il trasmettitore e il ricevitore nella forma:

$$w^2 = x^2/4 + z^2$$

e la funzione del tempo doppio di viaggio come

$$t(x) = \frac{2w}{v} = \frac{2\sqrt{\frac{x^2}{4} + z^2}}{v}$$

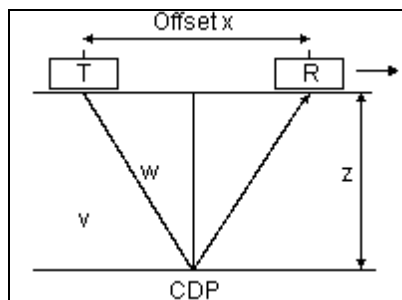
Denotando la distanza zero del tempo doppio (distanza nulla tra le antenne) di viaggio con t_0 , allora:

$$t_0 = t(x = 0) = 2z/v$$

L'equazione di $t(x)$ può essere riscritta come:

$$t(x) = \sqrt{\frac{x^2}{v^2} + t_0}$$

Può essere stimata la velocità di propagazione dell'onda e.m. nel mezzo.



Configurazione Trasmettitore/Ricevitore per una semplice registrazione CDP

La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di riflettori, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni. La presenza di colui che interpreterà i dati durante la fase di acquisizione è sicuramente consigliata per una corretta integrazione dei risultati con i vari fattori ambientali. Una valutazione preliminare dei risultati può essere effettuata già in fase di acquisizione favorendo le eventuali correzioni della configurazione strumentale al fine di ottimizzare la qualità dei dati in funzione dello scopo dell'indagine.

La fase di elaborazione è generalmente preceduta da una di filtraggio durante la quale una serie di filtri applicata ai dati consente il miglioramento del rapporto segnale/rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo viene trattato in modo da mettere in maggior risalto le informazioni richieste.

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale. Una volta ottenuta la sezione radar-stratigrafica relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale in tempo alla scala in profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando uno dei metodi sopra elencati. Nel caso in studio è stato utilizzato il metodo denominato "riflessione da un punto sorgente" o delle "iperboli di diffrazione", che ha permesso di stimare una velocità di 9.5 cm/ns (velocità media).



La qualità dei dati grezzi non ha richiesto tecniche avanzate di elaborazione. Tuttavia, per facilitarne l'elaborazione è stato eseguito un processing adeguato mediante software IDS.

Le fasi più importanti di questa elaborazione possono essere riassunte come segue:

- 1) *rimozione della traccia media*: questo tipo di filtro permette la rimozione della banda orizzontale visibile nelle sezioni radar, che può rappresentare riflessioni da oggetti che si mantengono a distanza costante dall'antenna. L'algoritmo, basandosi su un semplice processo aritmetico, che somma tutte le ampiezze delle riflessioni generate allo stesso tempo lungo il profilo e divide per il numero delle tracce sommate, permette di rimuovere la traccia media e di esaltare, così, gli eventi non orizzontali presenti nelle sezioni radar;
- 2) *normalizzazione dell'ampiezza (declipping)*: per eliminare locali saturazioni nell'ampiezza delle tracce. Si sceglie un fattore di scala (0.6 nel nostro caso) per il quale saranno moltiplicati tutti i valori dell'ampiezza: una procedura di interpolazione che utilizza un polinomio di terzo ordine permetterà la ricostruzione delle forme d'onda saturate.
- 3) *migrazione*: una tecnica che permette di eliminare distorsioni introdotte nei dati registrati. una sezione GPR non contiene informazioni unidirezionali a causa del lobo conico di radiazione dell'energia per cui alcune riflessioni presenti possono essere generate anche da oggetti posti lateralmente rispetto alla posizione dell'antenna. Questo carattere multidirezionale della registrazione delle riflessioni GPR si manifesta nella generazione di iperboli che possono causare seri problemi nell'interpretazione. La migrazione risolve questo problema di immagine riportando l'energia al suo vero punto di riflessione.
- 4) *filtro passa basso*: consente di eliminare la componente di rumore ad alta frequenza (effetto nebbia) presente nelle sezioni radar.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

Già durante l'acquisizione sul campo si è eseguita una prima interpretazione dei radargrammi riconoscendo i principali sottoservizi, riportati in planimetria allegata, e anomalie da attenzionare imputabili alla presenza di oggetti sepolti non pertinenti a quanto ricercato, poi si è eseguita l'elaborazione dei dati GPR in studio che ha permesso di organizzare e fornire i radargrammi per ogni tratto investigato. Lungo le strisciate si evidenziano delle iperboli ascrivibili alla presenza di sottoservizi longitudinali alla sede stradale che risultano ubicati centralmente ed esternamente alla stessa a quote non superiori a 0,80 cm di profondità. Si riscontrano inoltre diversi sottoservizi probabilmente attribuibili agli allacci privati delle varie tubazioni insistenti sull'area in studio.

Si riportano in allegato le strisciate georadar con ubicazione planimetrica delle stesse.



Fase di esecuzione del rilievo

1.5 Il Rilievo con drone

Lungo la strada provinciale di interesse progettuale, nelle aree ritenute più critiche, all'interno delle aree circoscritte nell'elaborato "2 – Planimetrie con ubicazione delle indagini" della Relazione Tecnica, è stato effettuato un rilievo fotografico e

topografico mediante impiego di APR (aeromobile a pilotaggio remoto), finalizzato ad:

- ✓ analizzare gli ammassi rocciosi costituiti dalle bancate laviche;
- ✓ definire la posizione ed il volume dei blocchi dislocati a monte del tracciato stradale;
- ✓ ricostruire dei profili topografici di dettaglio;
- ✓ correlare le informazioni ottenute con quelle derivanti dai rilievi geostrutturali degli ammassi rocciosi e poter effettuare delle analisi delle traiettorie di caduta e di rotolamento nei settori della viabilità e degli abitati esposti.

Pertanto sono stati eseguiti n. 9 voli con drone GPS, vincolati con punti fiduciarî acquisiti tramite strumento GPS – GNSS, per un totale di circa 61 ettari di estensione areale.

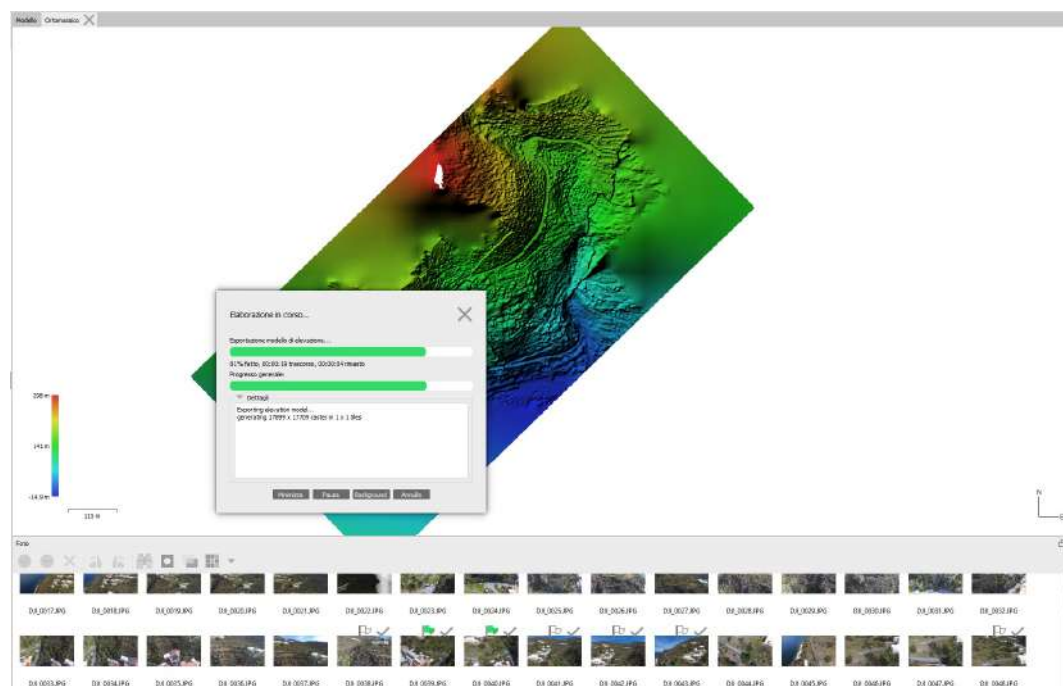


Acquisizione dei punti fiduciarî

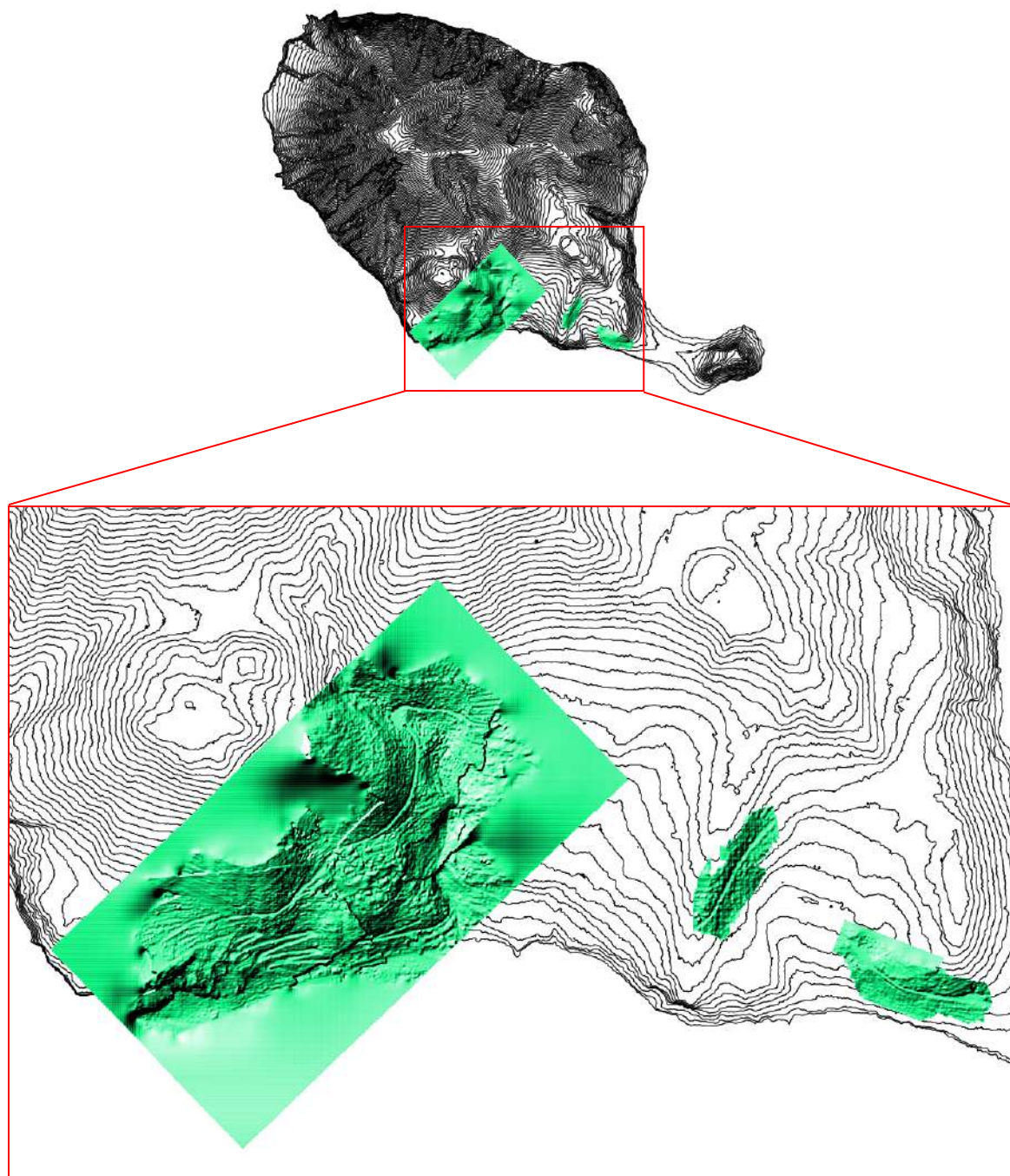
Successivamente alla fase di acquisizione dei dati telerilevati si è proceduto all'elaborazione degli stessi mediante software "Agisoft Metashape" ed alla restituzione del modello digitale di elevazione (DEM – DSM) a maglia fitta.



Elaborazione foto aeree



Fase di elaborazione del DEM



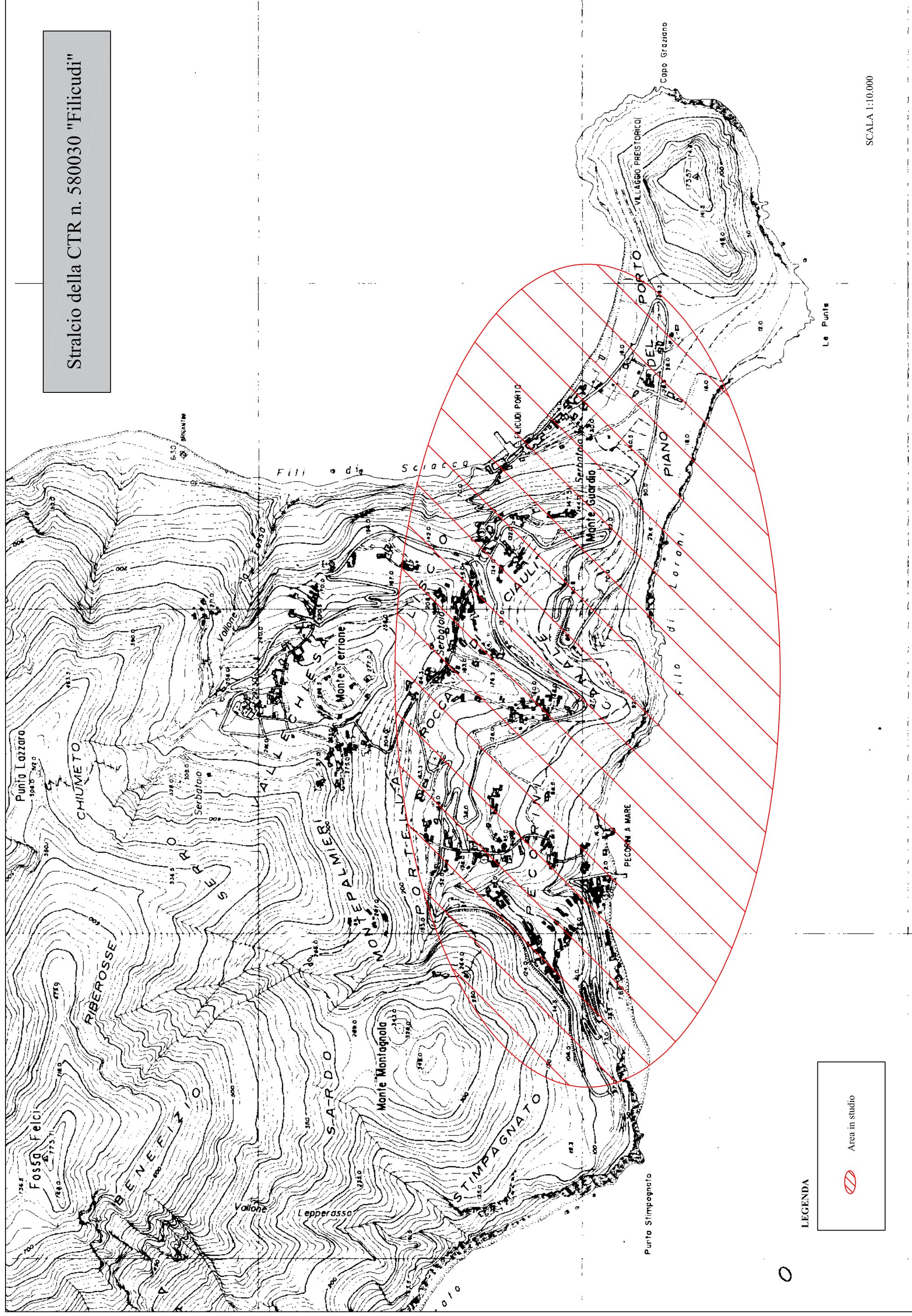
Dettaglio dell'hillshade ottenuto mediante acquisizione con drone

ALLEGATI

Ubicazione dei rilievi effettuati

ID Indagine	Tipo di indagine	LATITUDINE	LONGITUDINE
S1	CAROTAGGIO	38°33'35.4266"N	14°33'56.0512"E
S2	CAROTAGGIO	38°33'32.7029"N	14°33'43.7618"E
S3	CAROTAGGIO	38°33'33.5638"N	14°33'37.2071"E
S4	CAROTAGGIO	38°33'36.4405"N	14°33'41.6334"E
S5	CAROTAGGIO	38°33'44.6716"N	14°33'52.6175"E
S6	CAROTAGGIO	38°33'49.8870"N	14°33'54.8256"E
S7	CAROTAGGIO	38°33'48.8914"N	14°33'59.1346"E
S8	CAROTAGGIO	38°33'35.5008"N	14°34'20.5623"E
S9	CAROTAGGIO	38°33'39.7319"N	14°34'23.3488"E
S10	CAROTAGGIO	38°33'29.0356"N	14°34'42.8479"E
SS1	TOMOGRFIA SISMICA	38°33'28.2436"N	14°34'50.0140"E
SS2	TOMOGRFIA SISMICA	38°33'37.6739"N	14°33'43.5001"E
MW	MASW	38°33'37.6739"N	14°33'43.5001"E

Stralcio della CTR n. 580030 "Filicudi"



LEGENDA

Area in studio

SCALA 1:10.000

Ubicazione planimetrica dell'indagine di sismica a rifrazione "n.2" e tipo "MASW"

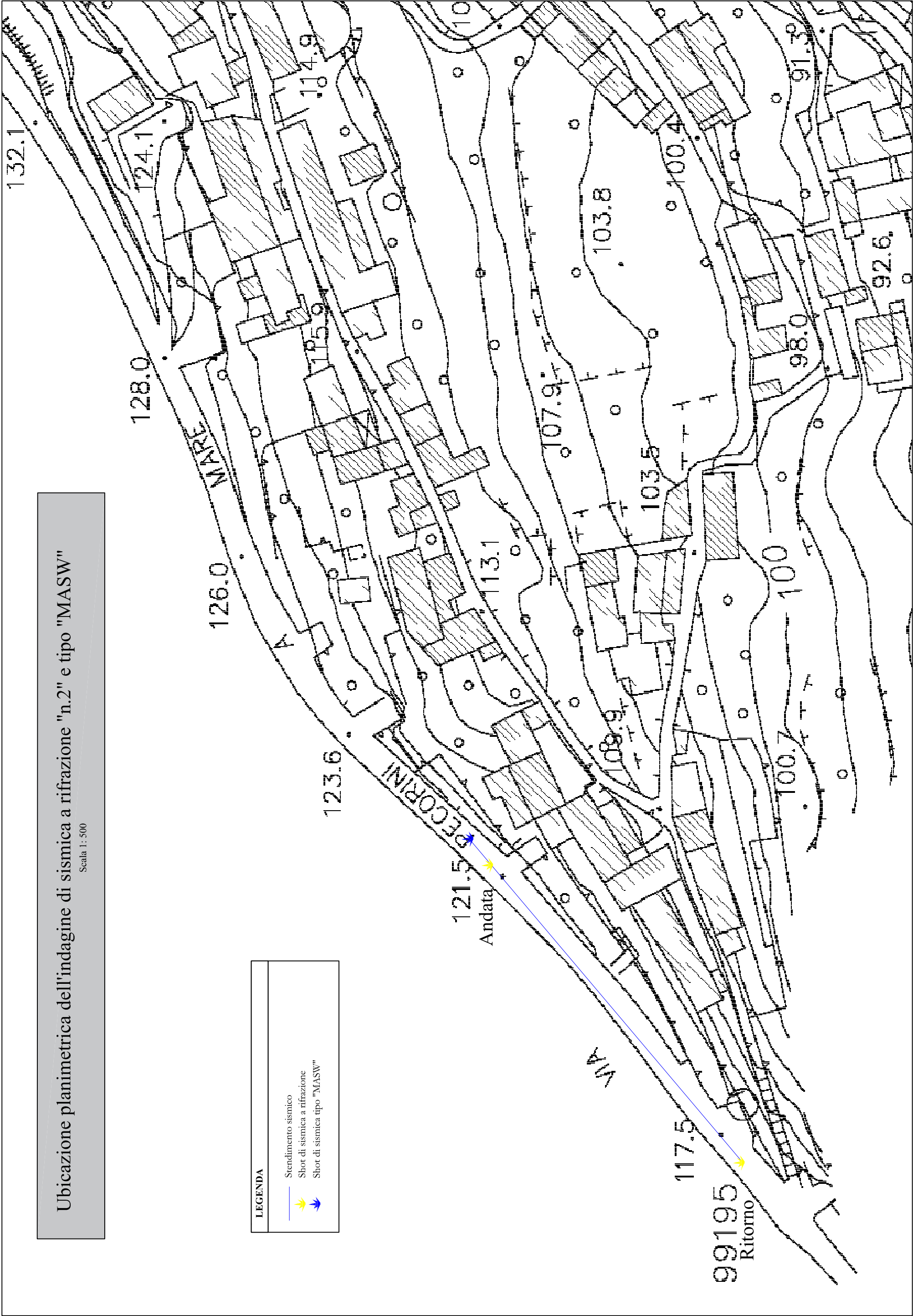
Scala 1: 500

LEGENDA

Stendimento sismico



Shot di sismica a rifrazione

Shot di sismica tipo "MASW"



Ubicazione planimetrica dell'indagine di sismica a rifrazione "n.1"

Scala 1: 500

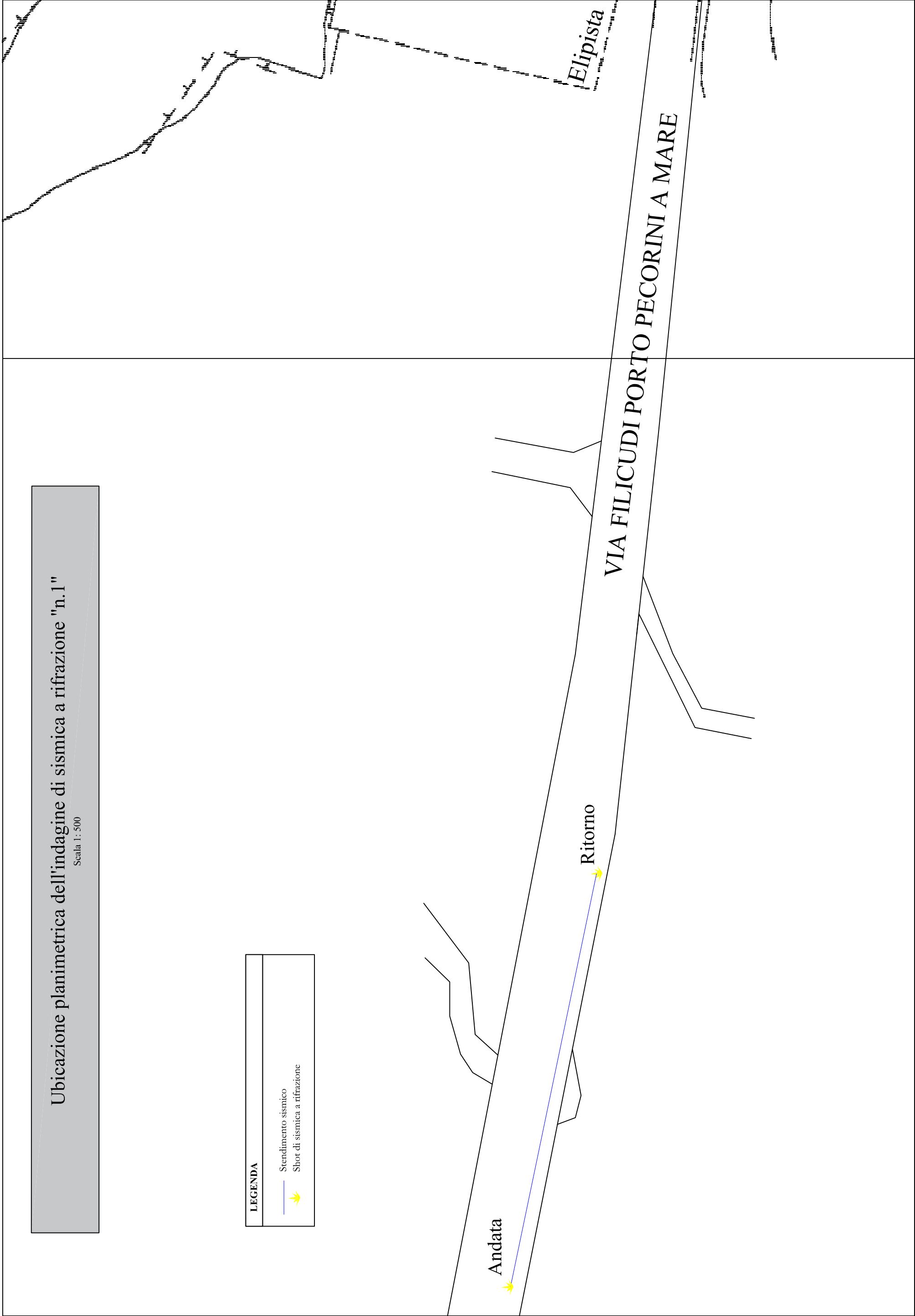
LEGENDA	
	Stendimento sismico
	Shot di sismica a rifrazione

Andata

Ritorno

VIA FILICUDI PORTO PECORINI A MARE

Elipista

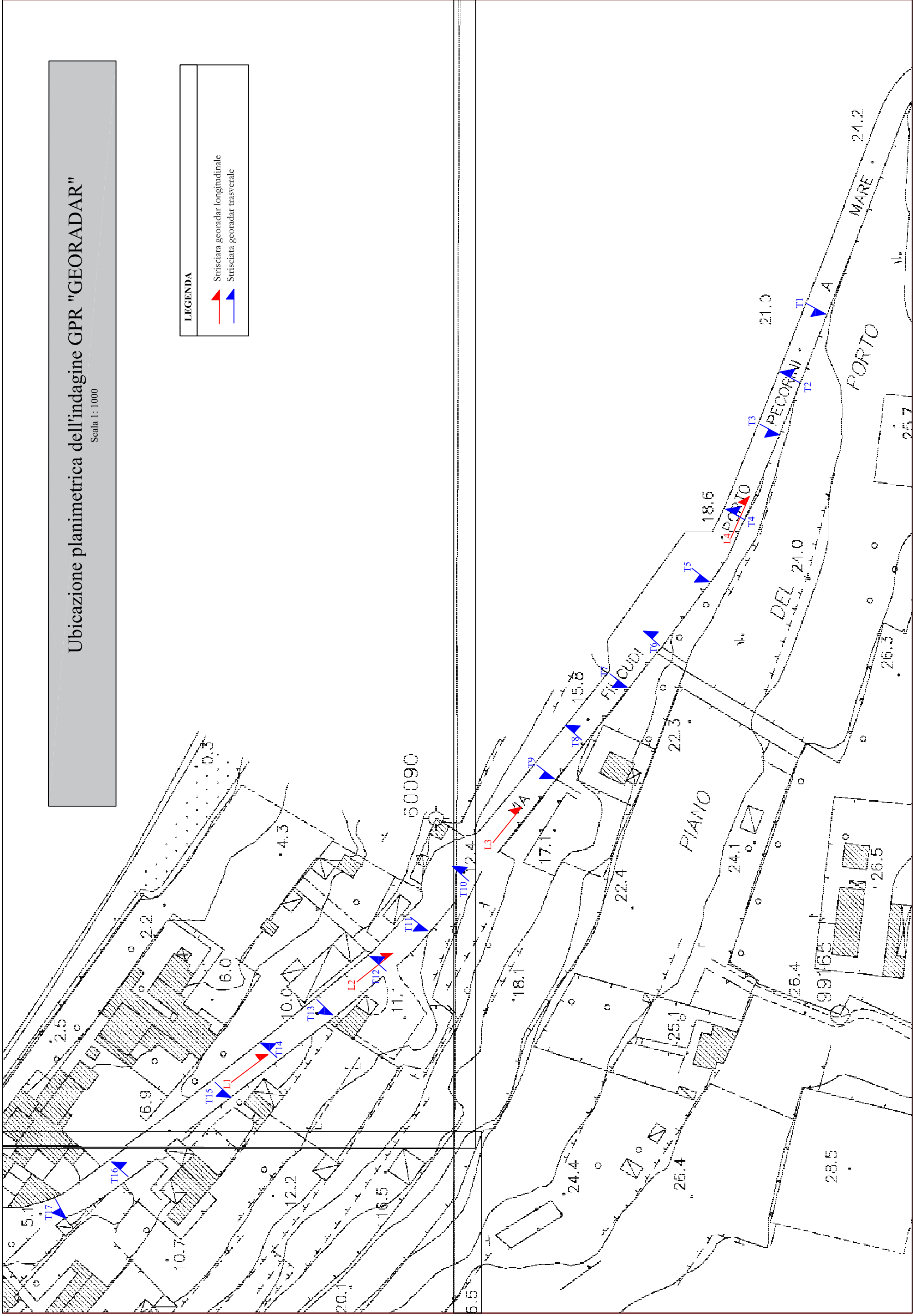


Ubicazione planimetrica dell'indagine GPR "GEORADAR"

Scala 1: 1000

LEGENDA

- Striscia georadar longitudinale
- Striscia georadar trasversale



Indagine di sismica a rifrazione “Filicudi n.1”

Dati generali

Descrizione	Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-Pecorini a mare
Committente	Si.Ar. Trivellazioni - Comune di Lipari
Zona	Isola di Filicudi (ME)
Operatore	Dott. Geol. Antonino Spinali
Data	18/03/2021



Area di esecuzione dell'indagine

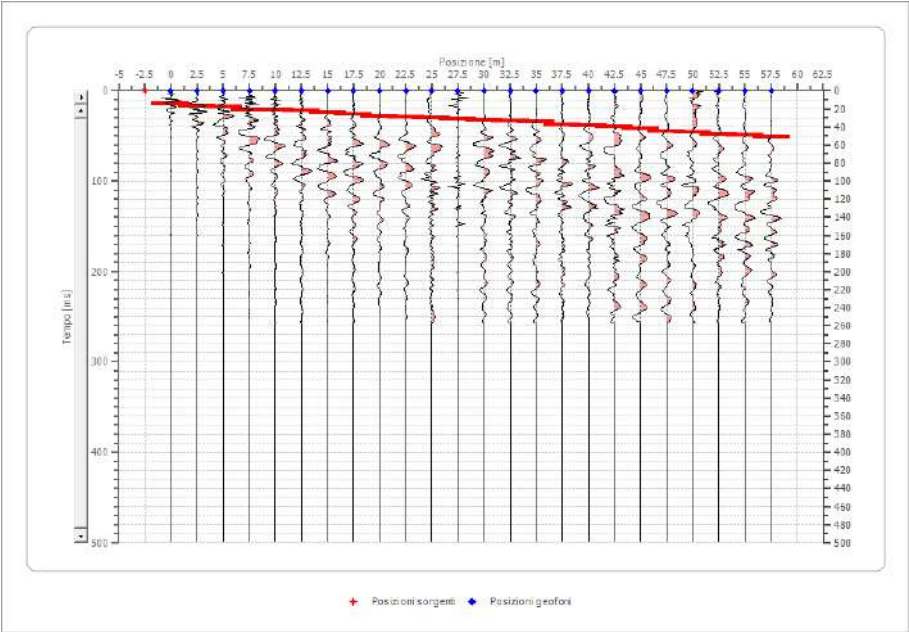
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	2.5	-0.1
3	5.0	-0.1
4	7.5	-0.2
5	10.0	-0.2
6	12.5	-0.3
7	15.0	-0.3
8	17.5	-0.4
9	20.0	-0.4
10	22.5	-0.5
11	25.0	-0.5
12	27.5	-0.6
13	30.0	-0.6
14	32.5	-0.7
15	35.0	-0.7
16	37.5	-0.8
17	40.0	-0.8
18	42.5	-0.9
19	45.0	-0.9
20	47.5	-1.0
21	50.0	-1.0
22	52.5	-1.1
23	55.0	-1.1
24	57.5	-1.2

Dati battute

Battuta 1

Posizione sorgente X -3 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	14.6353
2.5	16.7260
5.0	17.7714
7.5	20.9076
10.0	20.9076
12.5	21.9529
15.0	23.5520
17.5	26.1344
20.0	28.2252
22.5	29.2706
25.0	30.3160
27.5	31.3613
30.0	32.4067
32.5	33.4521
35.0	34.4975
37.5	37.6336
40.0	38.6790
42.5	39.7244
45.0	41.8151
47.5	44.9512
50.0	45.9966
52.5	48.0874
55.0	49.1328
57.5	51.2235

Battuta 2

Posizione sorgente X 14 [m]

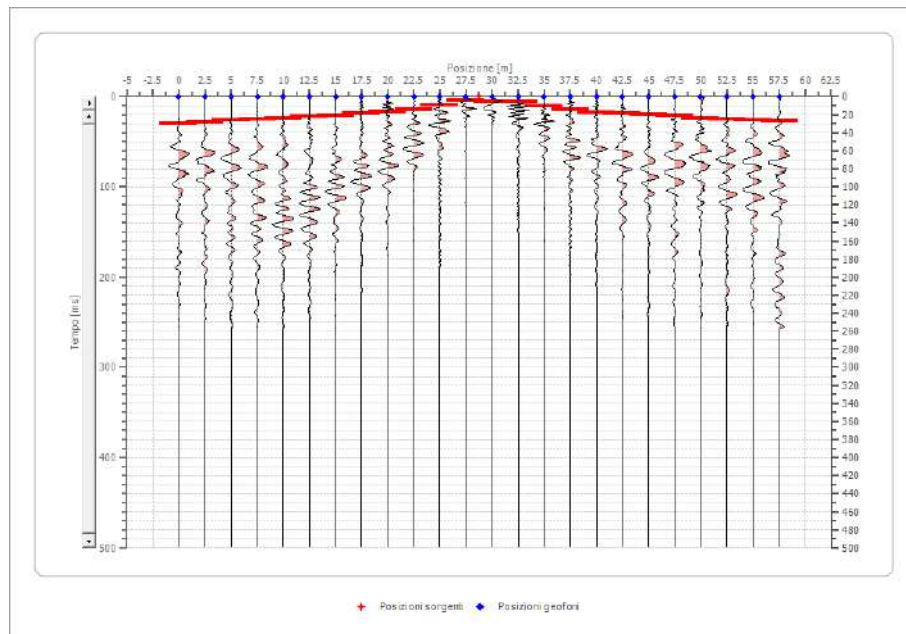
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	16.7260
2.5	14.6353
5.0	13.5899
7.5	10.4538
10.0	9.4084
12.5	4.1815
15.0	3.1361
17.5	7.3176
20.0	12.5445
22.5	16.7260
25.0	17.7714
27.5	18.8168
30.0	19.8622
32.5	20.9076
35.0	21.9529
37.5	24.0437
40.0	24.5760
42.5	27.6480
45.0	28.2252
47.5	29.2706
50.0	31.3613
52.5	34.4975
55.0	35.5428
57.5	35.5428

Battuta 3

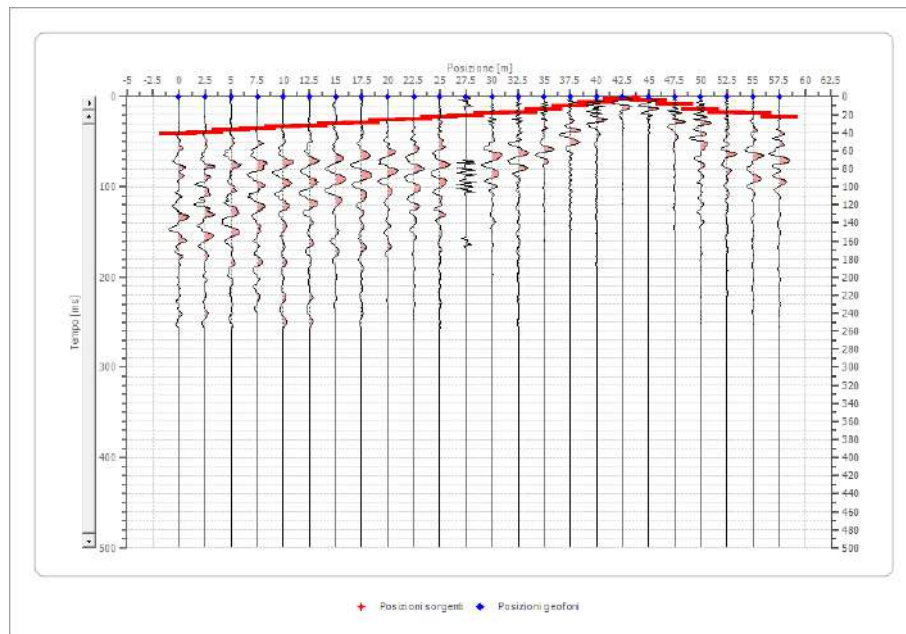
Posizione sorgente X 29 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	30.3160
2.5	28.2252
5.0	26.1344
7.5	25.0891
10.0	24.0437
12.5	21.9529
15.0	20.9076
17.5	18.8168
20.0	16.7260
22.5	14.6353
25.0	9.4084
27.5	4.1815
30.0	5.2269
32.5	5.2269
35.0	10.4538
37.5	14.6353
40.0	17.7714
42.5	18.8168
45.0	19.8622
47.5	20.9076
50.0	24.0437
52.5	25.6000
55.0	26.1344
57.5	27.1798

Battuta 4

Posizione sorgente X 44 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	40.7697
2.5	39.7244
5.0	36.5882
7.5	35.5428
10.0	33.7920
12.5	32.4067
15.0	30.3160
17.5	29.2706
20.0	26.1344
22.5	25.6000
25.0	22.9983
27.5	20.9076
30.0	18.8168
32.5	17.7714
35.0	14.6353
37.5	10.4538
40.0	6.2723
42.5	3.1361
45.0	4.1815
47.5	8.3630
50.0	14.6353
52.5	17.7714
55.0	18.8168
57.5	22.9983

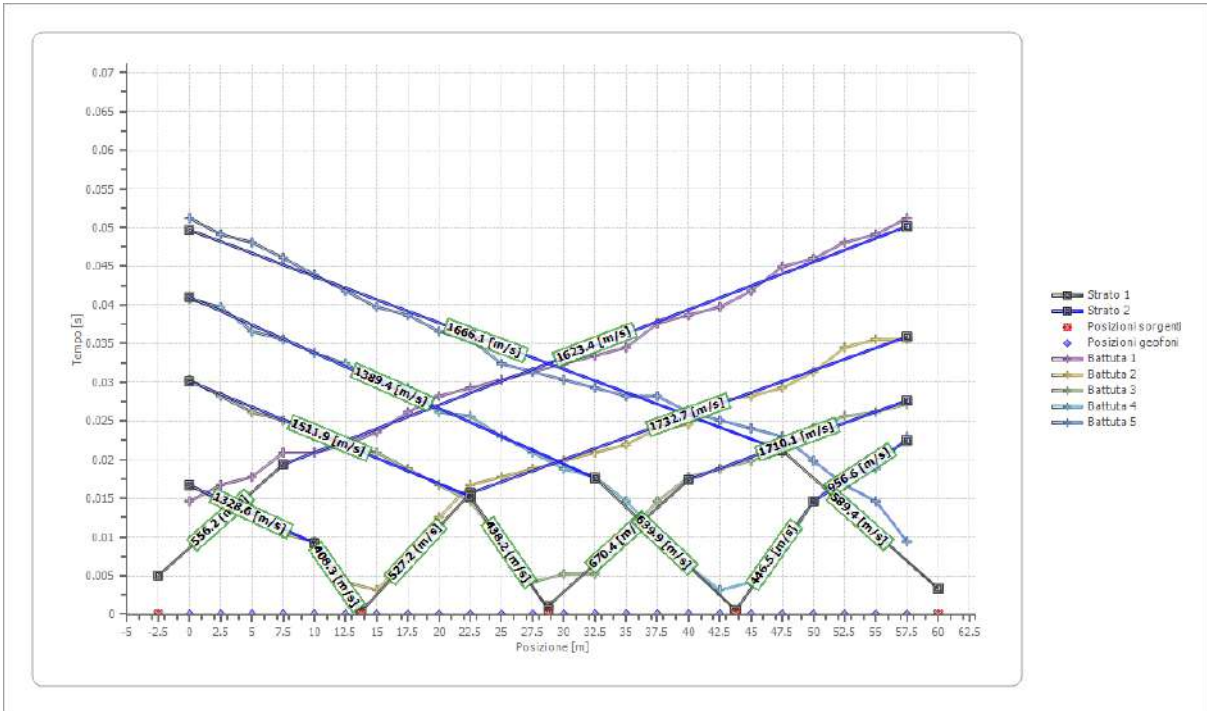
Battuta 5

Posizione sorgente X 60 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

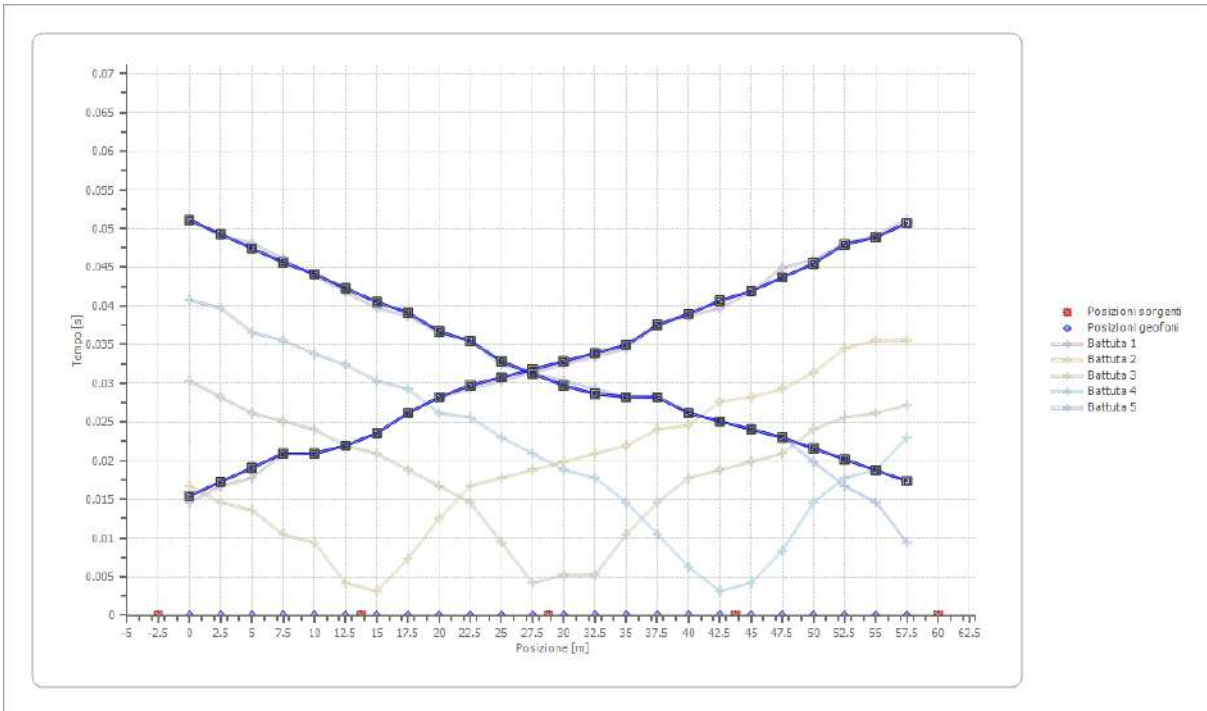


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	51.2235
2.5	49.1328
5.0	48.0874
7.5	46.0800
10.0	43.9059
12.5	41.8151
15.0	39.7244
17.5	38.6790
20.0	36.5882
22.5	35.5428
25.0	32.4067
27.5	31.3613
30.0	30.3160
32.5	29.2706
35.0	28.2252
37.5	28.2252
40.0	26.1344
42.5	25.0891
45.0	24.0437
47.5	22.9983
50.0	19.8622
52.5	16.7260
55.0	14.6353
57.5	9.4084

Dromocrone



Dromocrone traslate



Interpretazione col metodo G.R.M.

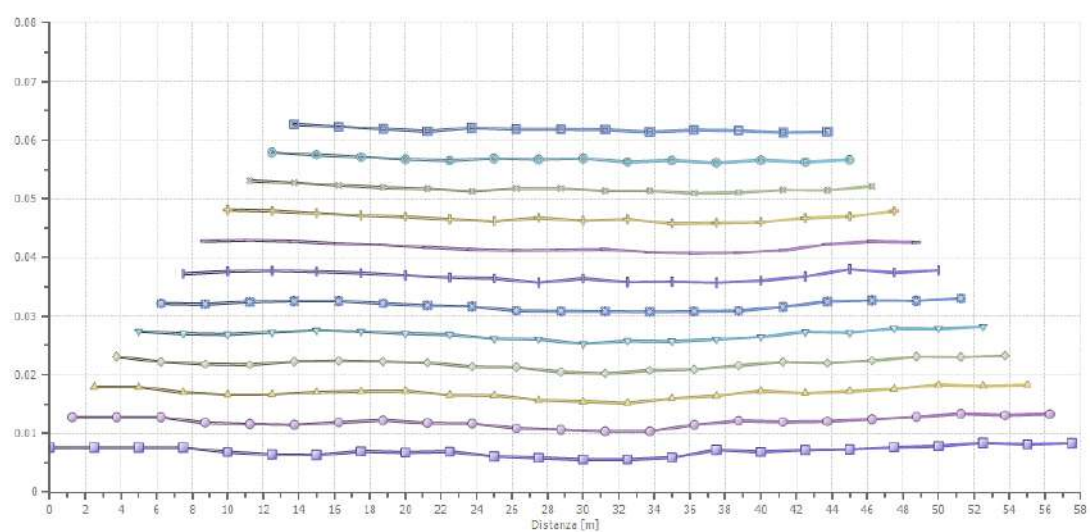
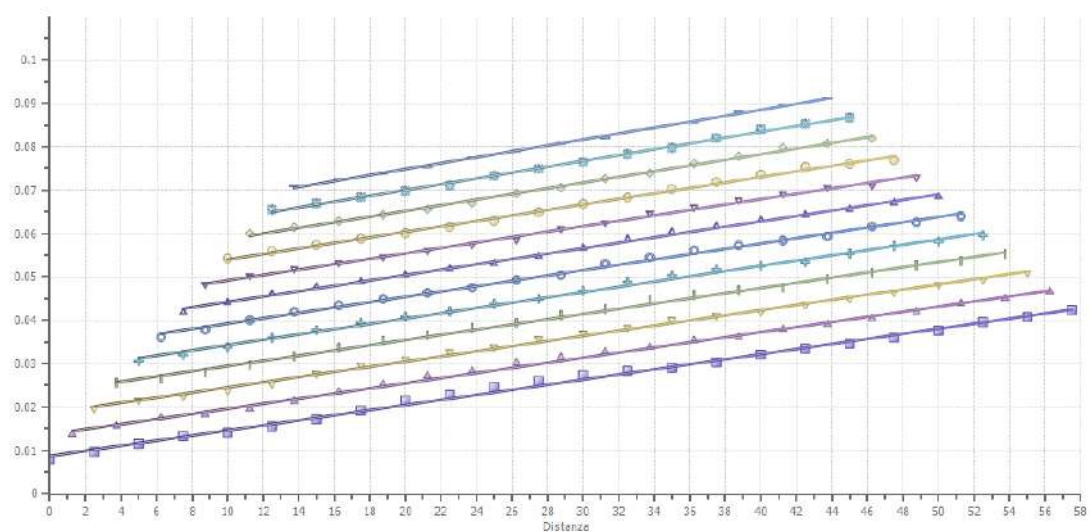
XY: 0

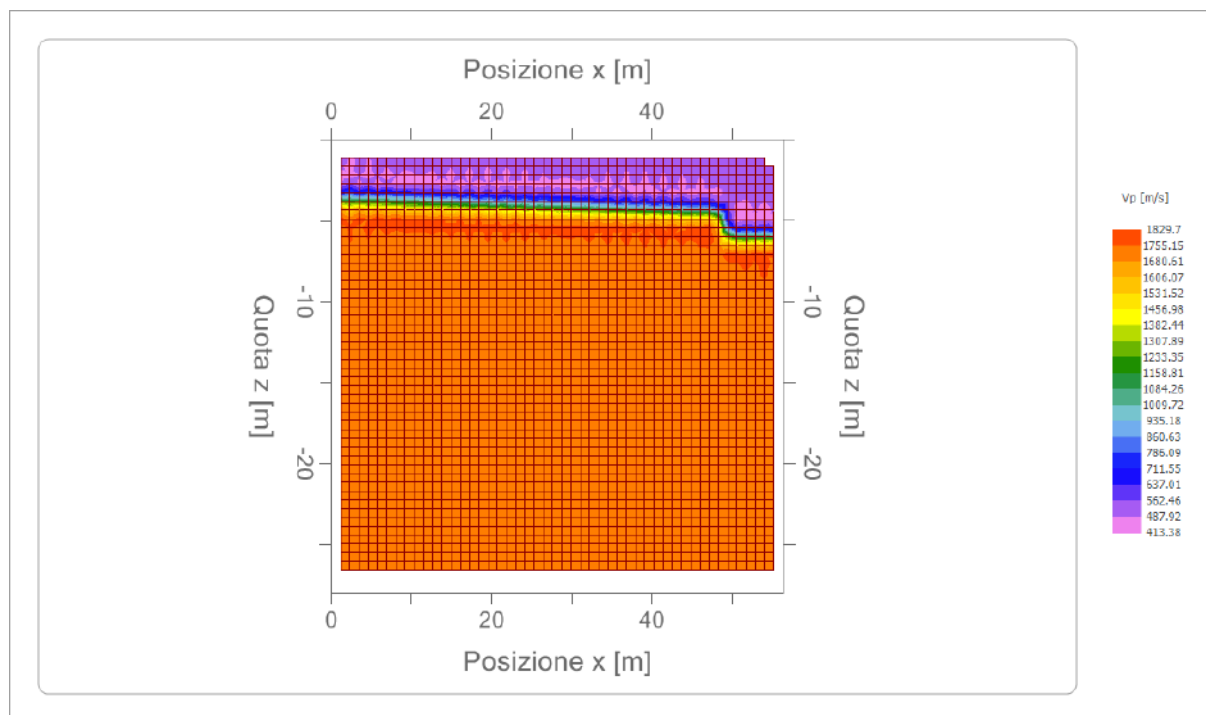
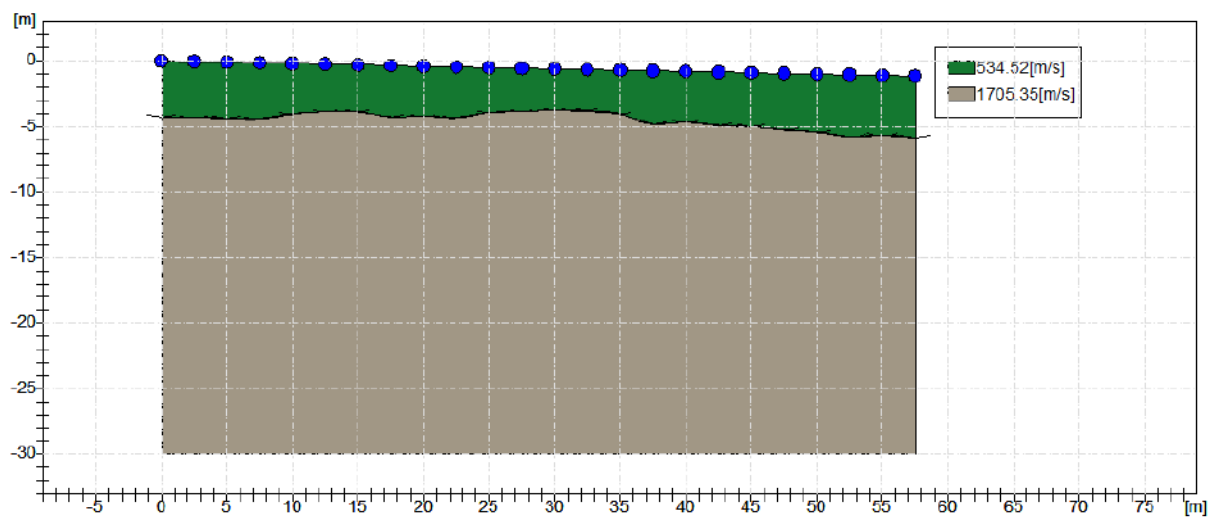
	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	4.3	--
G= 2.5 [m]	4.3	--
G= 5.0 [m]	4.3	--
G= 7.5 [m]	4.3	--
G= 10.0 [m]	3.8	--
G= 12.5 [m]	3.6	--
G= 15.0 [m]	3.6	--
G= 17.5 [m]	3.9	--
G= 20.0 [m]	3.8	--
G= 22.5 [m]	3.9	--
G= 25.0 [m]	3.4	--
G= 27.5 [m]	3.3	--
G= 30.0 [m]	3.1	--
G= 32.5 [m]	3.1	--
G= 35.0 [m]	3.3	--
G= 37.5 [m]	4.1	--
G= 40.0 [m]	3.9	--
G= 42.5 [m]	4.1	--
G= 45.0 [m]	4.1	--
G= 47.5 [m]	4.3	--
G= 50.0 [m]	4.4	--
G= 52.5 [m]	4.7	--
G= 55.0 [m]	4.6	--
G= 57.5 [m]	4.7	--
Velocità [m/sec]	534.5	1705.3
Descrizione		

Altri parametri geotecnici

	Strato n. 1	Strato n. 2
Coefficiente Poisson	0.35	0.35
Densità [kg/m³]	1800.00	1800.00
Vp [m/s]	534.52	1705.35
Vs [m/s]	256.77	819.22
G0 [MPa]	118.68	1208.02
Ed [Mpa]	514.28	5234.77
M0 [MPa]	395.60	4026.75
Ey [Mpa]	320.43	3261.67

G0: Modulo di deformazione al taglio;
Ed: Modulo edometrico;
M0: Modulo di compressibilità volumetrica;
Ey: Modulo di Young;





Indagine di sismica a rifrazione “Filicudi n.2”

Dati generali

Descrizione	Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-Pecorini a mare
Committente	Si.Ar Trivellazioni - Comune di Lipari
Zona	Isola di Filicudi (ME)
Operatore	Dott. Geol. Antonino Spinali
Data	19/03/2021



Area di esecuzione dell'indagine

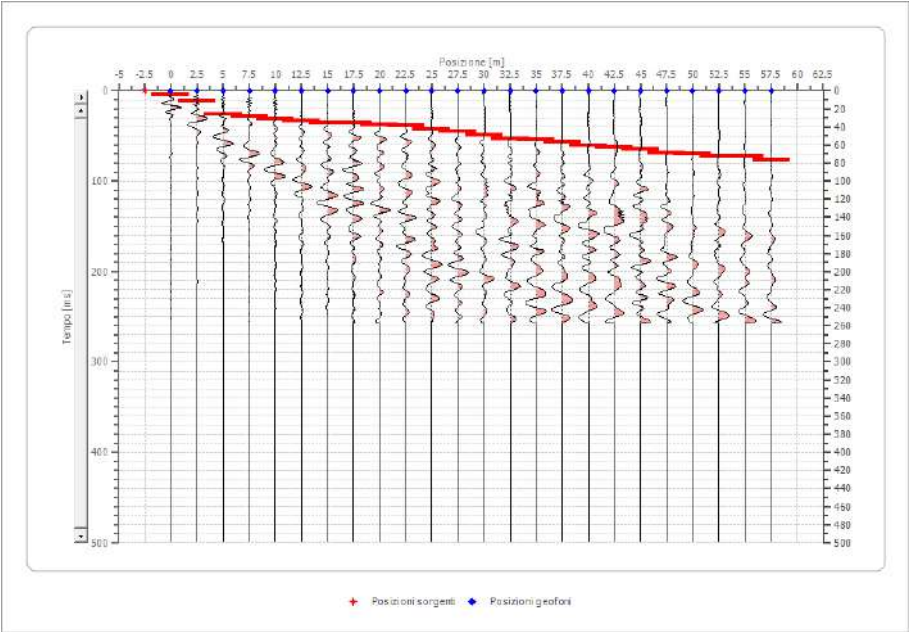
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	2.5	-0.1
3	5.0	-0.1
4	7.5	-0.2
5	10.0	-0.2
6	12.5	-0.3
7	15.0	-0.3
8	17.5	-0.4
9	20.0	-0.4
10	22.5	-0.5
11	25.0	-0.5
12	27.5	-0.6
13	30.0	-0.6
14	32.5	-0.7
15	35.0	-0.7
16	37.5	-0.8
17	40.0	-0.8
18	42.5	-0.9
19	45.0	-0.9
20	47.5	-1.0
21	50.0	-1.0
22	52.5	-1.1
23	55.0	-1.1
24	57.5	-1.2

Dati battute

Battuta 1

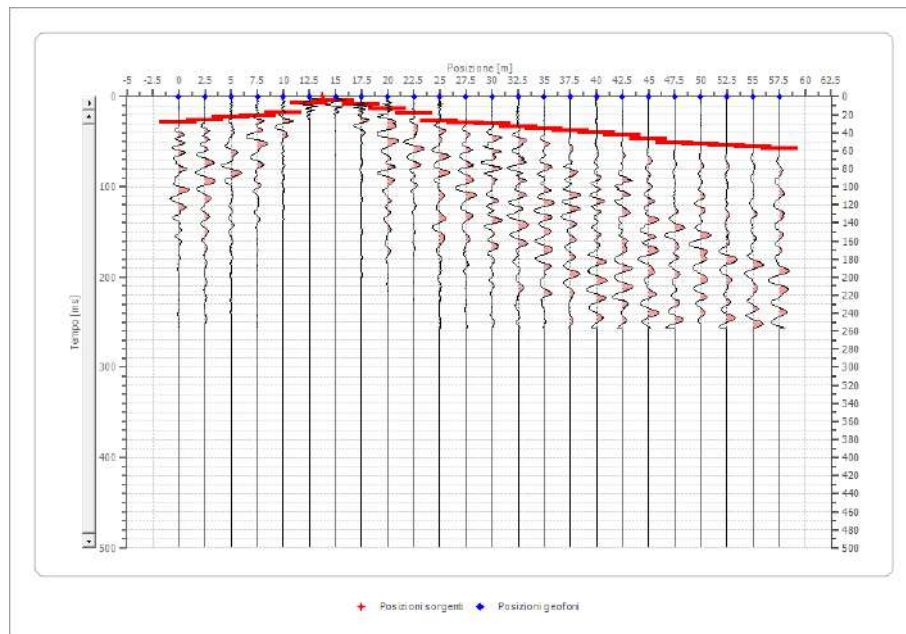
Posizione sorgente X -3 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	4.1815
2.5	11.4992
5.0	26.1344
7.5	28.2252
10.0	31.3613
12.5	33.4521
15.0	35.5428
17.5	35.5428
20.0	37.8880
22.5	38.9120
25.0	42.8605
27.5	44.9512
30.0	49.1328
32.5	53.3143
35.0	54.3596
37.5	56.4504
40.0	60.6319
42.5	62.7227
45.0	64.8134
47.5	68.9949
50.0	70.0403
52.5	72.1311
55.0	72.1311
57.5	76.3126

Battuta 2

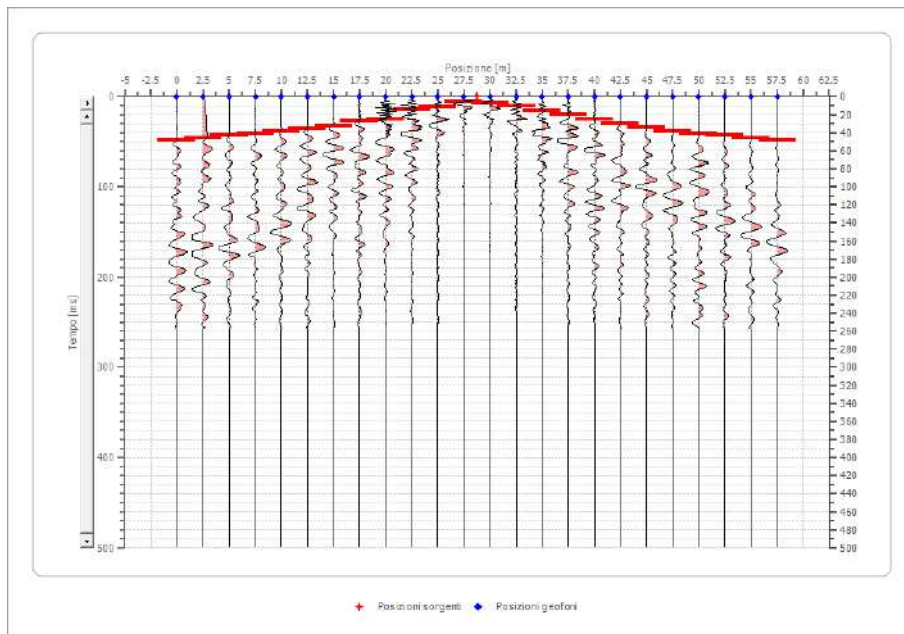
Posizione sorgente X 14 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	28.2252
2.5	26.1344
5.0	22.9983
7.5	20.9076
10.0	17.7714
12.5	7.3176
15.0	4.1815
17.5	8.3630
20.0	13.5899
22.5	18.8168
25.0	27.1798
27.5	29.2706
30.0	30.3160
32.5	33.4521
35.0	35.5428
37.5	37.6336
40.0	39.7244
42.5	42.8605
45.0	47.0420
47.5	51.2235
50.0	52.2689
52.5	54.3596
55.0	55.4050
57.5	57.4958

Battuta 3

Posizione sorgente X 29 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

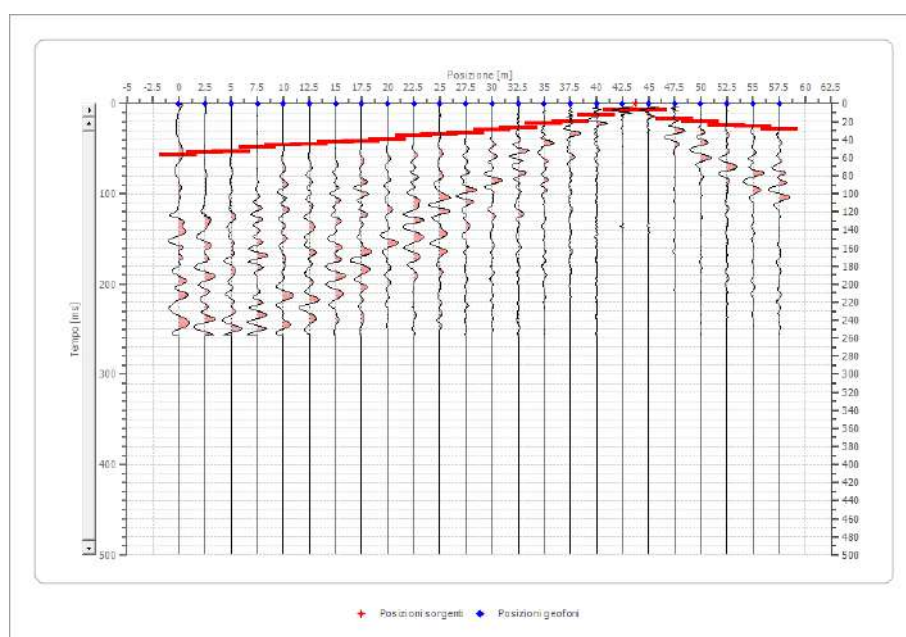


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	48.0874
2.5	45.9966
5.0	42.8605
7.5	40.7697
10.0	38.6790
12.5	35.5428
15.0	32.4067
17.5	27.1798
20.0	25.0891
22.5	14.6353
25.0	11.4992
27.5	5.2269
30.0	7.3176
32.5	10.4538
35.0	15.6807
37.5	19.8622
40.0	25.0891
42.5	30.3160
45.0	34.4975
47.5	38.6790
50.0	40.7697
52.5	42.8605
55.0	45.9966
57.5	48.0874

Battuta 4

Posizione sorgente X 44 [m]

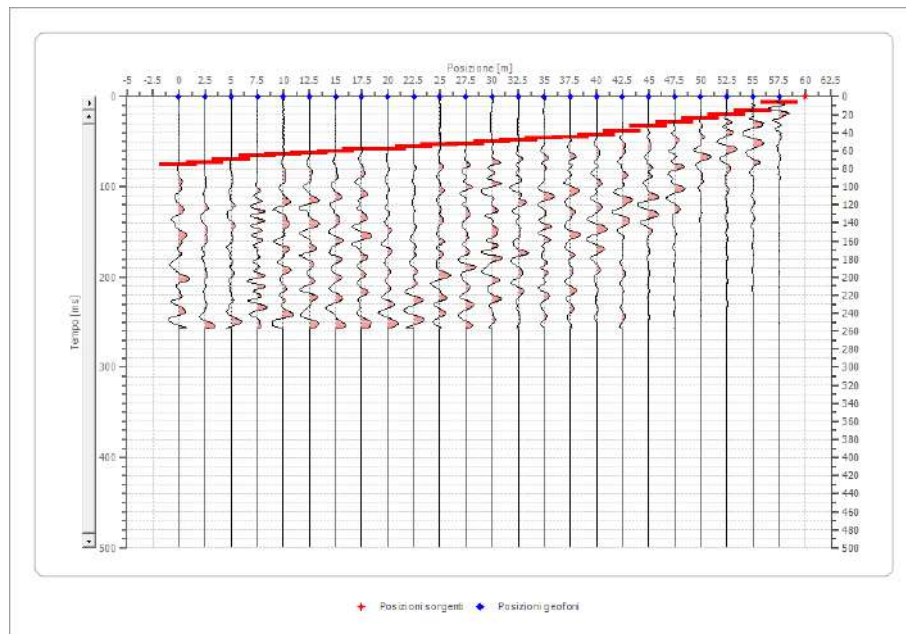
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	56.4504
2.5	54.3596
5.0	53.3143
7.5	48.0874
10.0	45.9966
12.5	44.9512
15.0	42.8605
17.5	41.8151
20.0	39.7244
22.5	35.5428
25.0	34.4975
27.5	32.7680
30.0	29.2706
32.5	27.1798
35.0	21.9529
37.5	19.8622
40.0	12.5445
42.5	7.3176
45.0	7.3176
47.5	16.7260
50.0	19.8622
52.5	24.0437
55.0	25.0891
57.5	28.2252

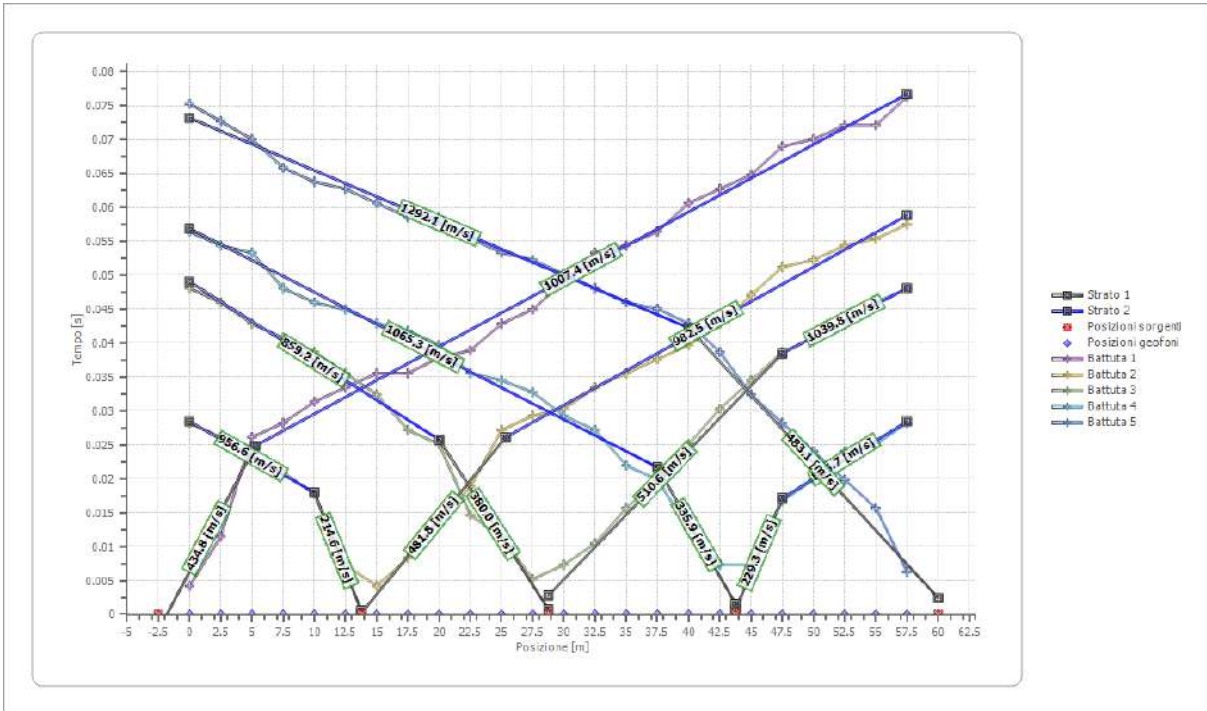
Battuta 5

Posizione sorgente X 60 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]

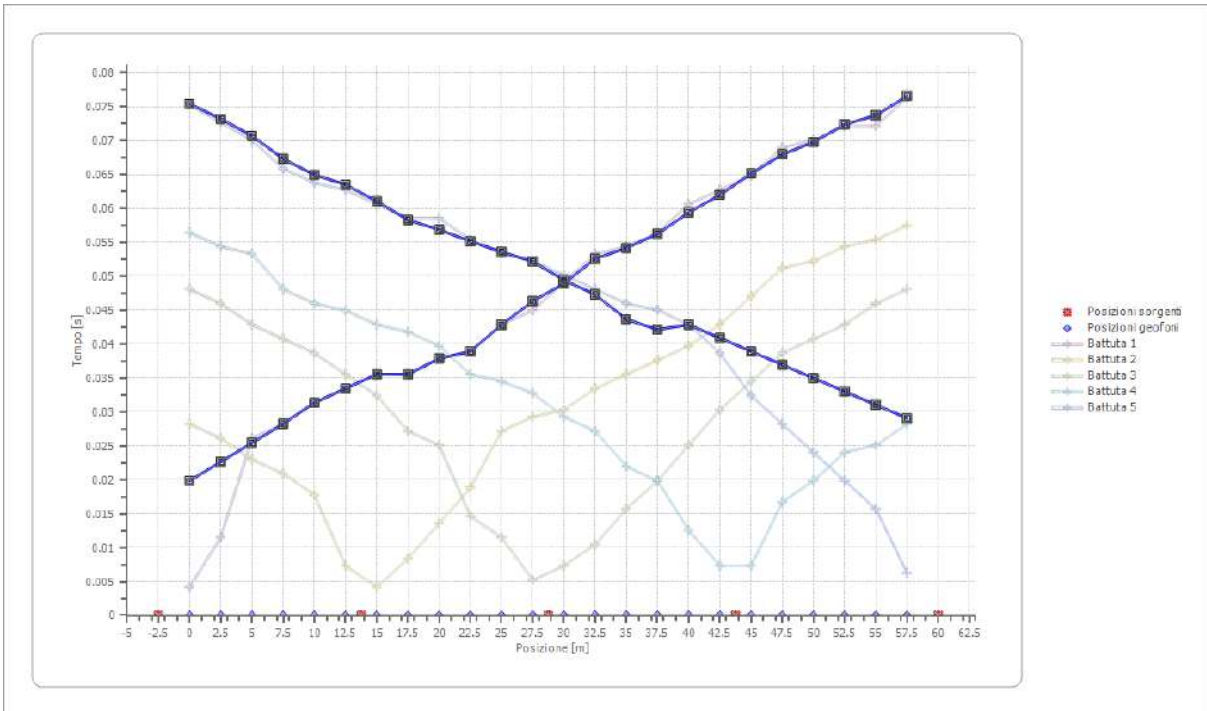


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	75.2672
2.5	72.7040
5.0	70.0403
7.5	65.8588
10.0	63.7680
12.5	62.7227
15.0	60.6319
17.5	58.5412
20.0	58.5412
22.5	55.4050
25.0	53.3143
27.5	52.2689
30.0	50.1781
32.5	48.0874
35.0	45.9966
37.5	45.0560
40.0	42.8605
42.5	38.6790
45.0	32.4067
47.5	28.2252
50.0	24.0437
52.5	19.8622
55.0	15.6807
57.5	6.2723

Dromocrone



Dromocrone traslate



Interpretazione col metodo G.R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	3.6	--
G= 2.5 [m]	3.7	--
G= 5.0 [m]	3.7	--
G= 7.5 [m]	3.6	--
G= 10.0 [m]	3.8	--
G= 12.5 [m]	3.9	--
G= 15.0 [m]	3.8	--
G= 17.5 [m]	3.3	--
G= 20.0 [m]	3.5	--
G= 22.5 [m]	3.3	--
G= 25.0 [m]	3.8	--
G= 27.5 [m]	4.2	--
G= 30.0 [m]	4.2	--
G= 32.5 [m]	4.5	--
G= 35.0 [m]	4.1	--
G= 37.5 [m]	4.2	--
G= 40.0 [m]	5.0	--
G= 42.5 [m]	5.1	--
G= 45.0 [m]	5.4	--
G= 47.5 [m]	5.5	--
G= 50.0 [m]	5.5	--
G= 52.5 [m]	5.6	--
G= 55.0 [m]	5.5	--
G= 57.5 [m]	5.7	--
Velocità [m/sec]	383.8	1129.8
Descrizione		

Altri parametri geotecnici

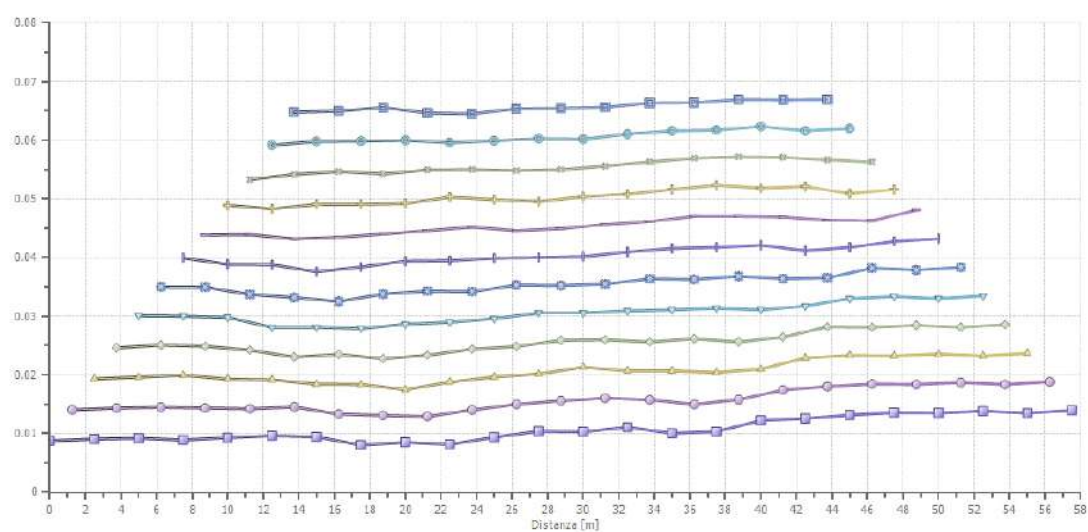
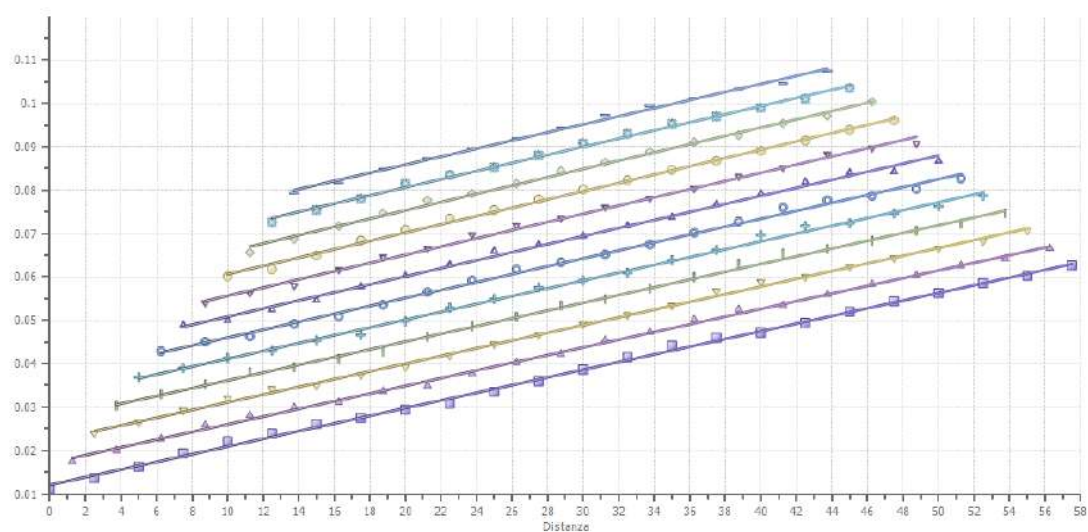
	Strato n. 1	Strato n. 2
Coefficiente Poisson	0.35	0.35
Densità [kg/m³]	1800.00	1800.00
Vp [m/s]	383.79	1129.82
Vs [m/s]	184.36	542.75
G0 [MPa]	61.18	530.23
Ed [Mpa]	265.12	2297.68
M0 [MPa]	203.94	1767.44
Ey [Mpa]	165.19	1431.63

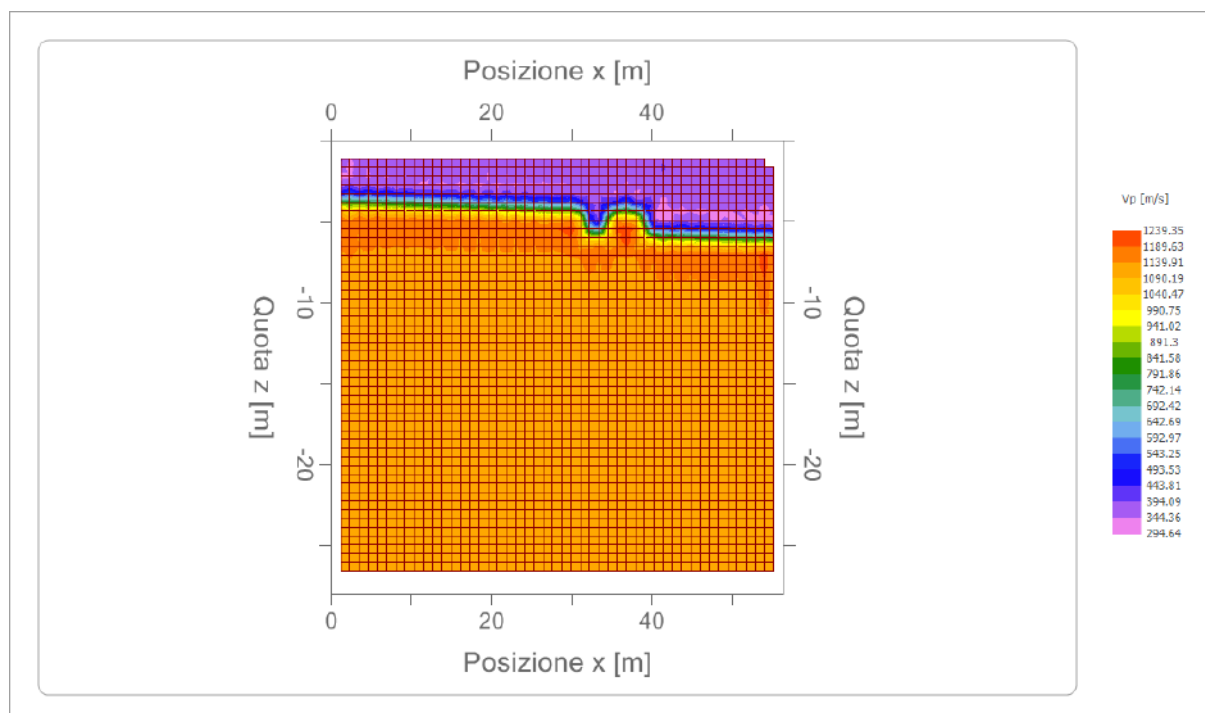
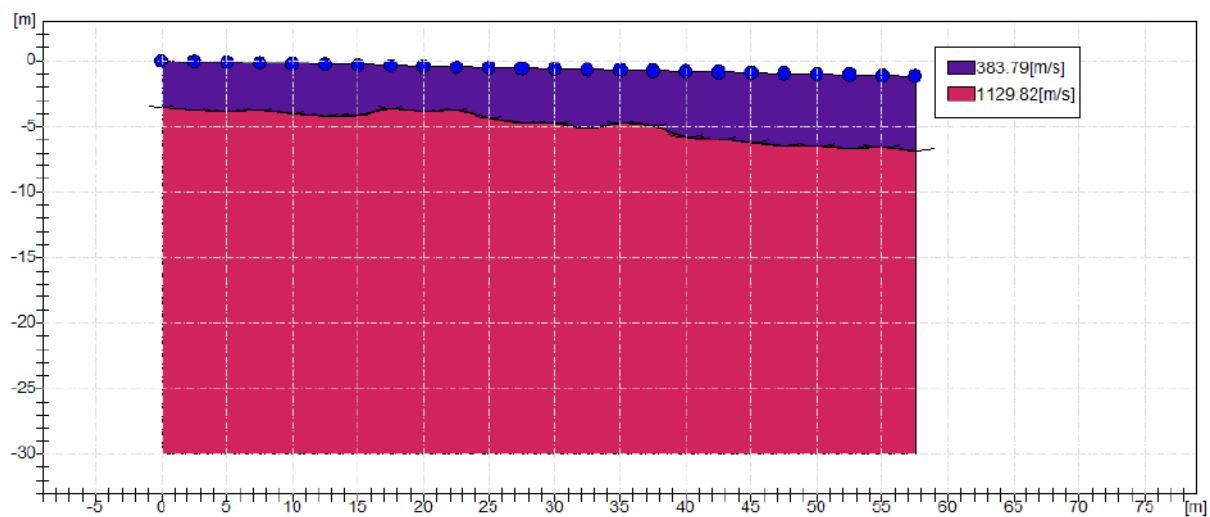
G0: Modulo di deformazione al taglio;

Ed: Modulo edometrico;

M0: Modulo di compressibilità volumetrica;

Ey: Modulo di Young;





Dott. Geol.
Antonino
Spinali
n. 3483

Indagine di Tomografia sismica – stendimento n.1

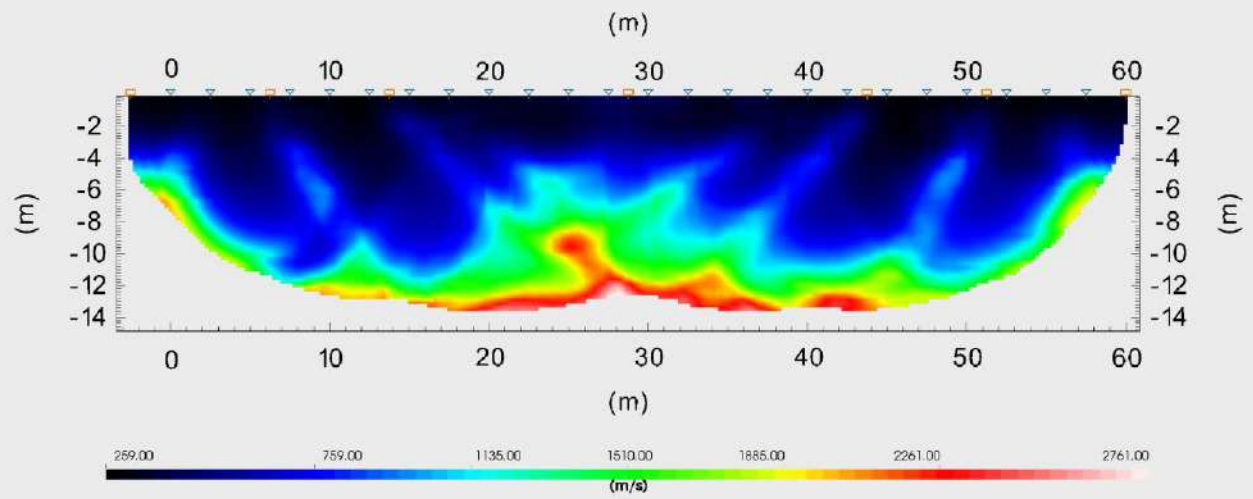
Dati generali

Descrizione	Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-Pecorini a mare
Zona	Isola di Filicudi (ME)
Operatore	Dott. Geol. Antonino Spinali
Data	18/03/2021

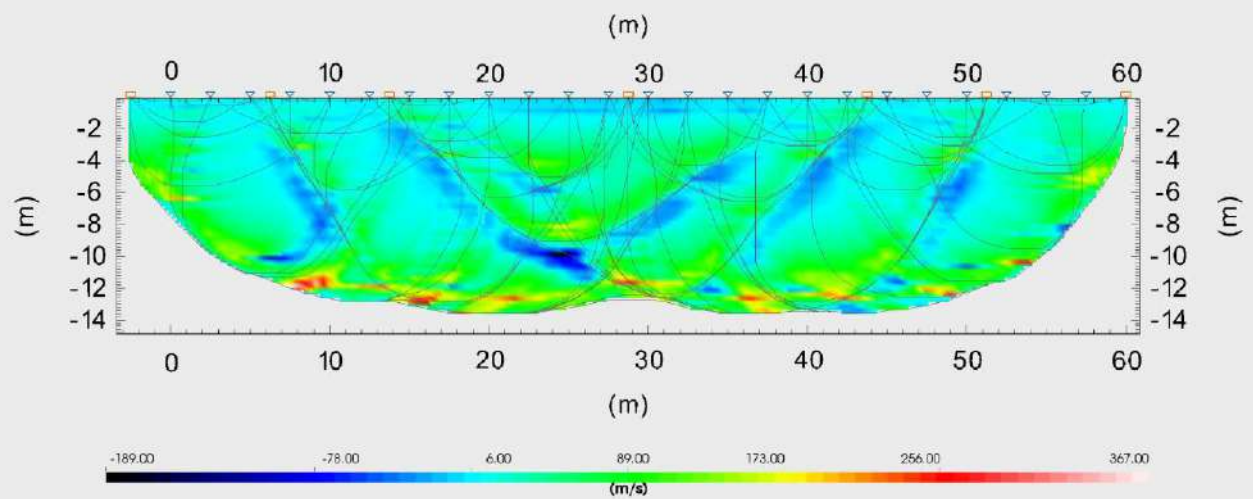


Esecuzione del sondaggio sismico

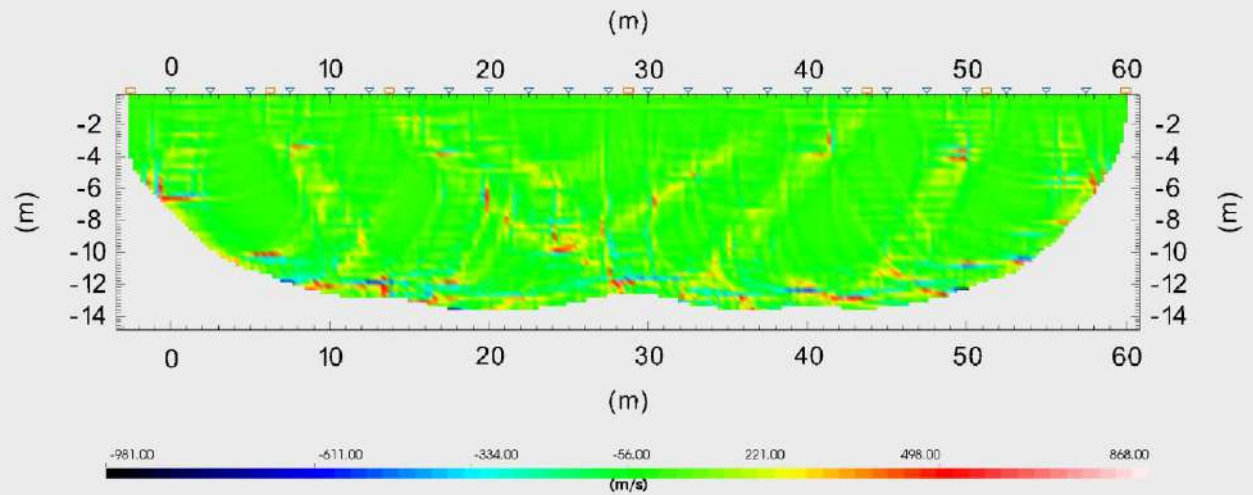
Tomographic Profile - Velocity



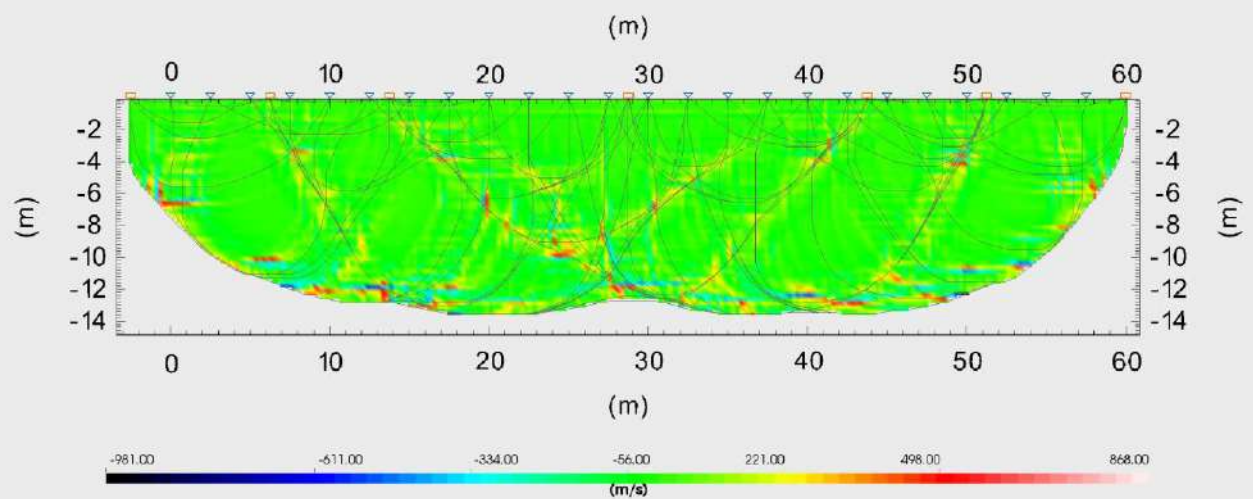
Tomographic Profile - Vertical Gradient with Rays



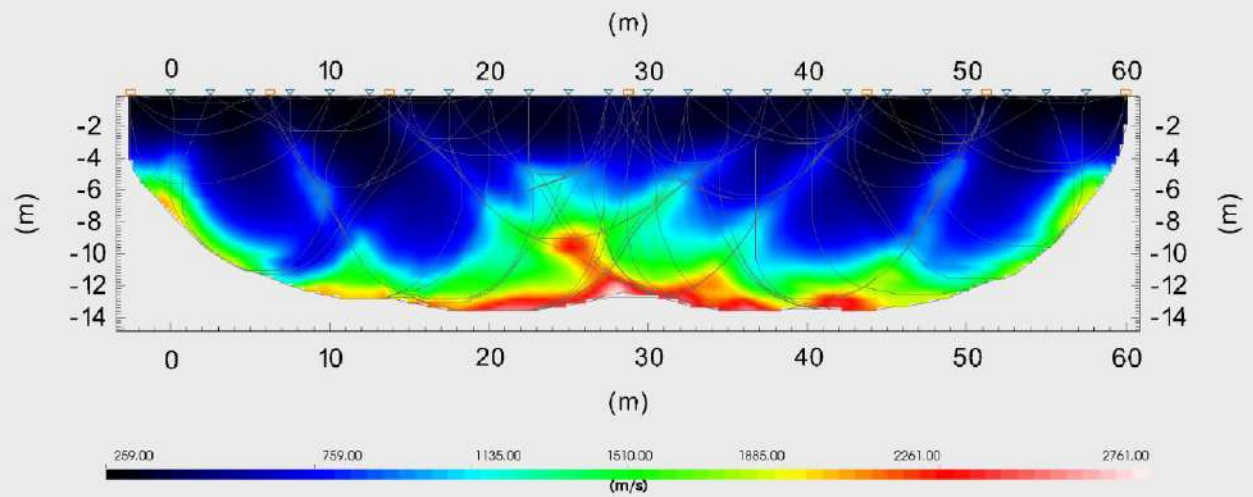
Tomographic Profile - Laplacian Gradient



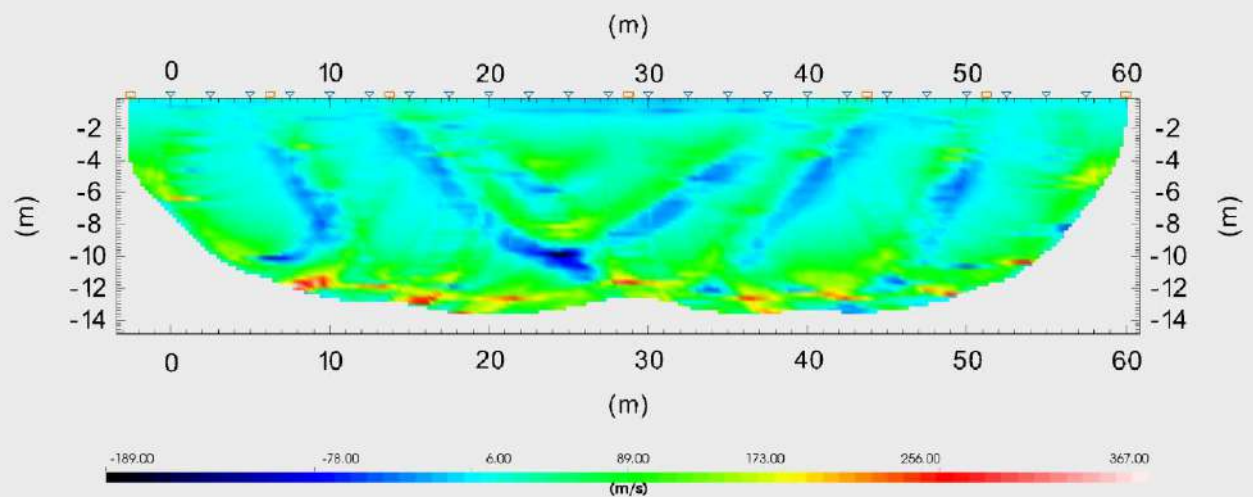
Tomographic Profile - Laplacian Gradient with Rays



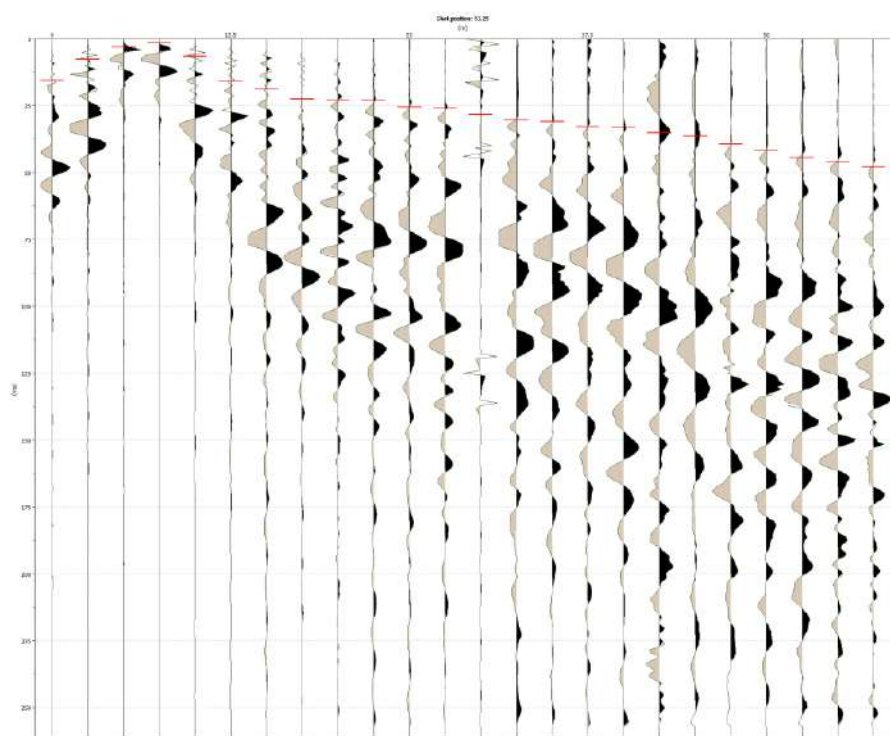
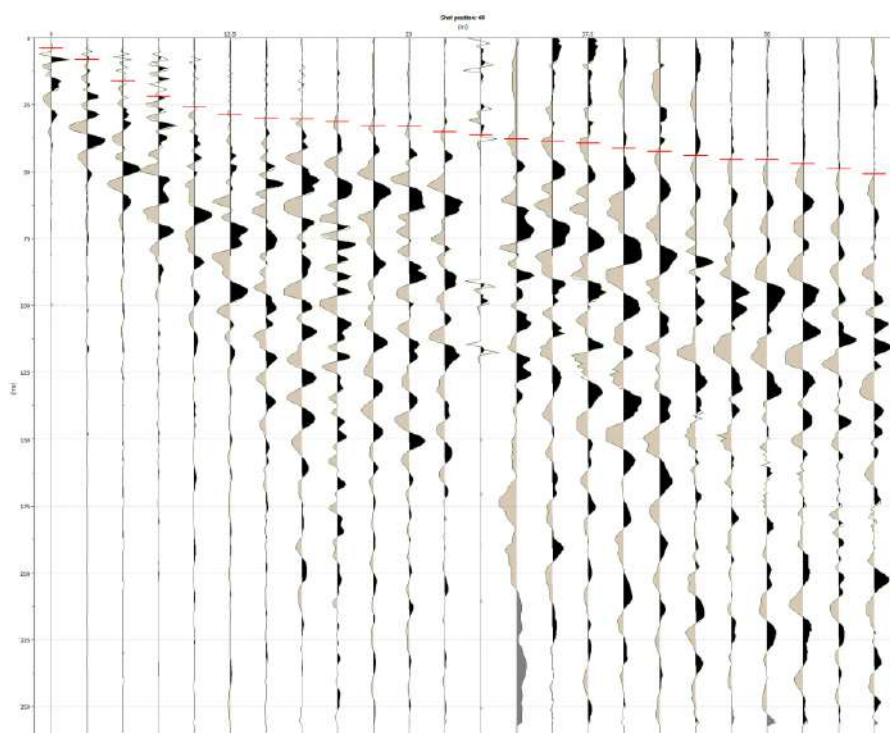
Tomographic Profile - Velocity with Rays

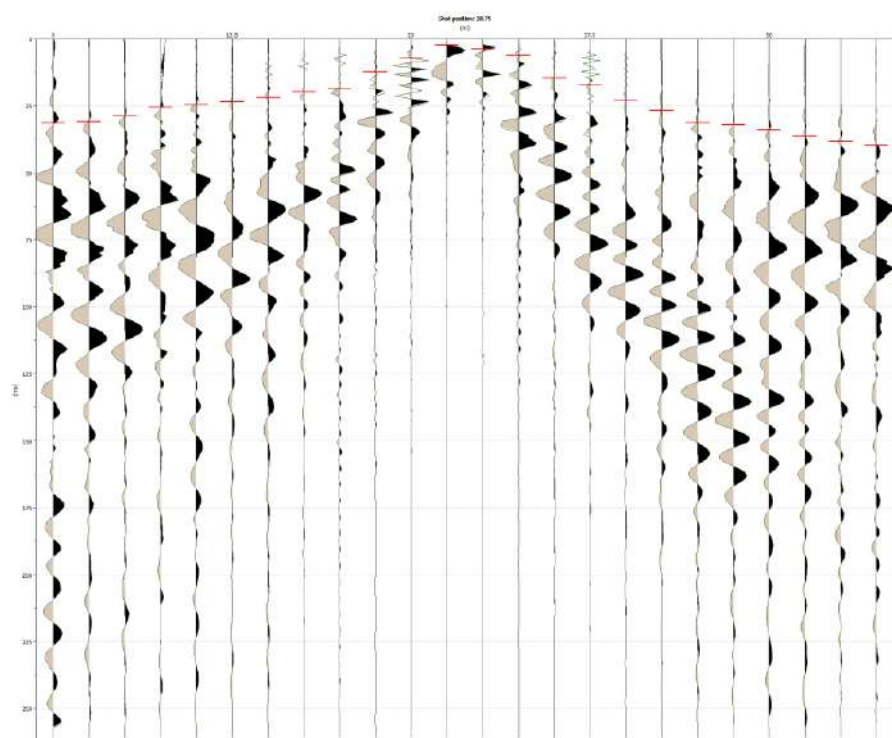
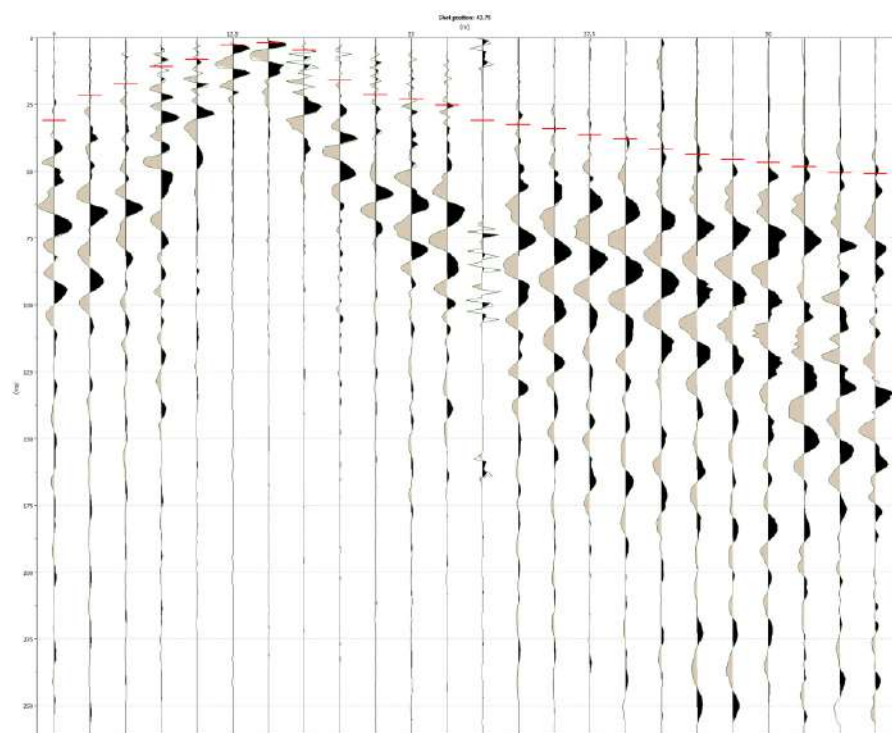


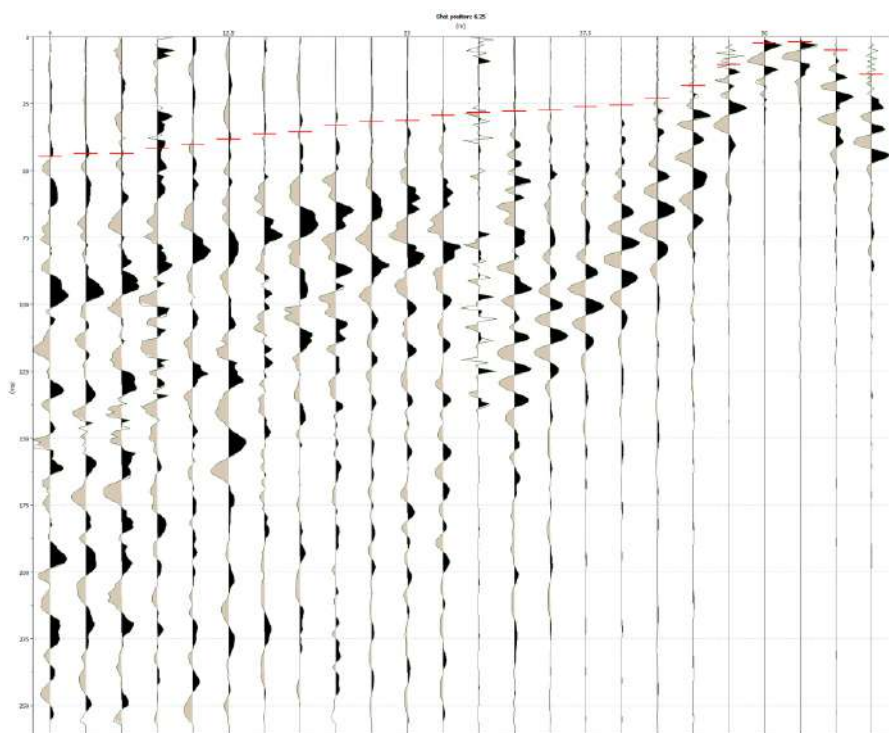
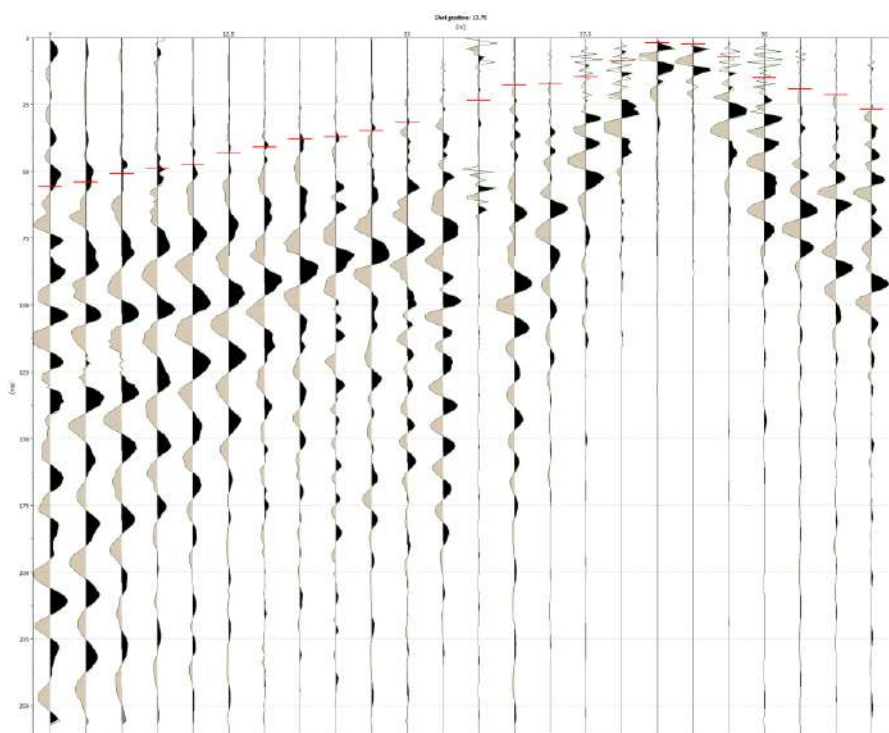
Tomographic Profile - Vertical Gradient



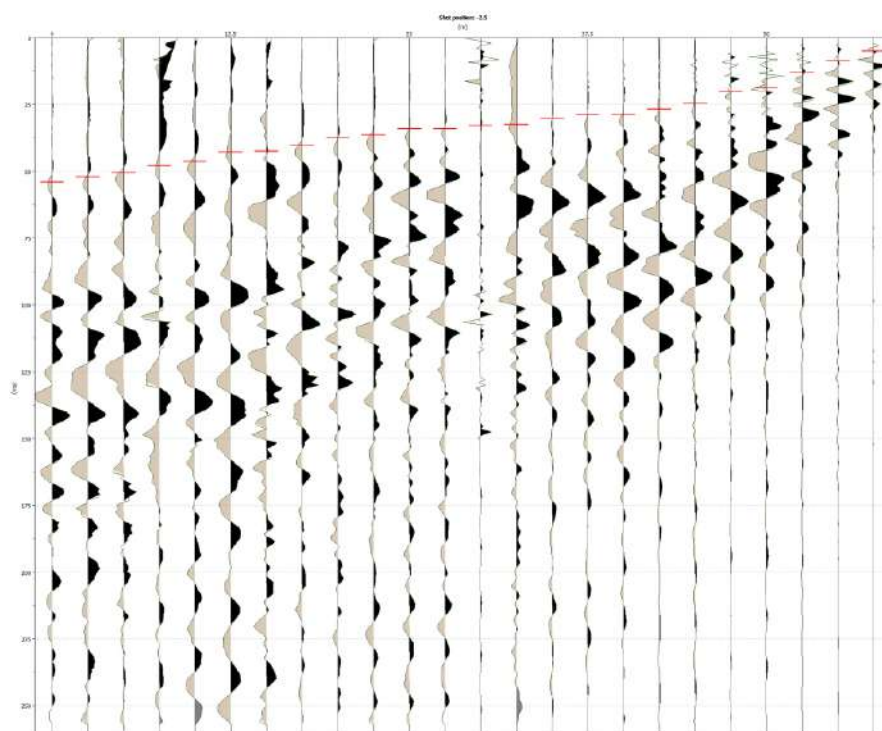
Traccia Andata



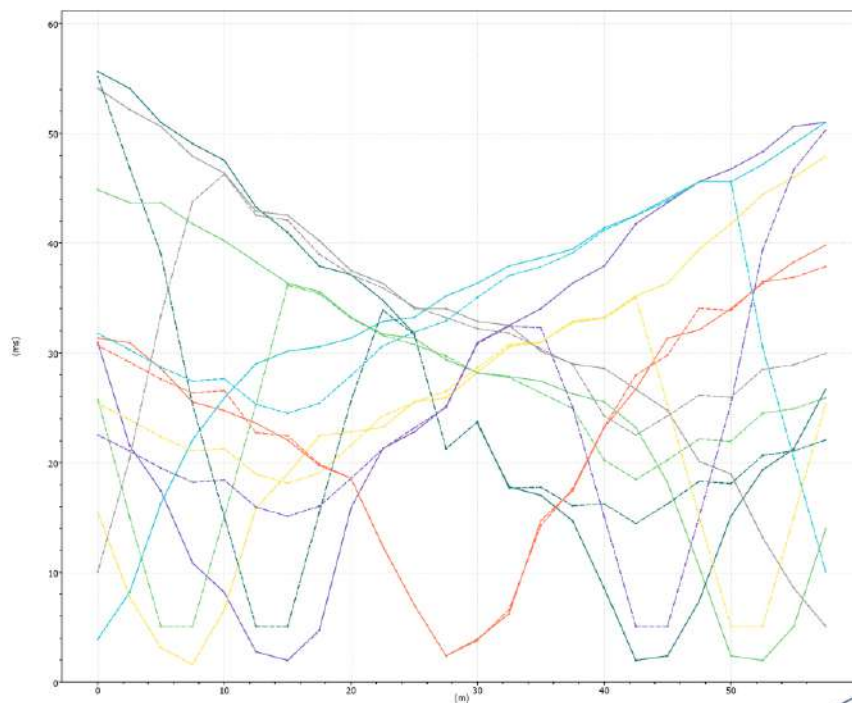




Traccia Ritorno



Dromocrone



Indagine di Tomografia sismica – stendimento n.2

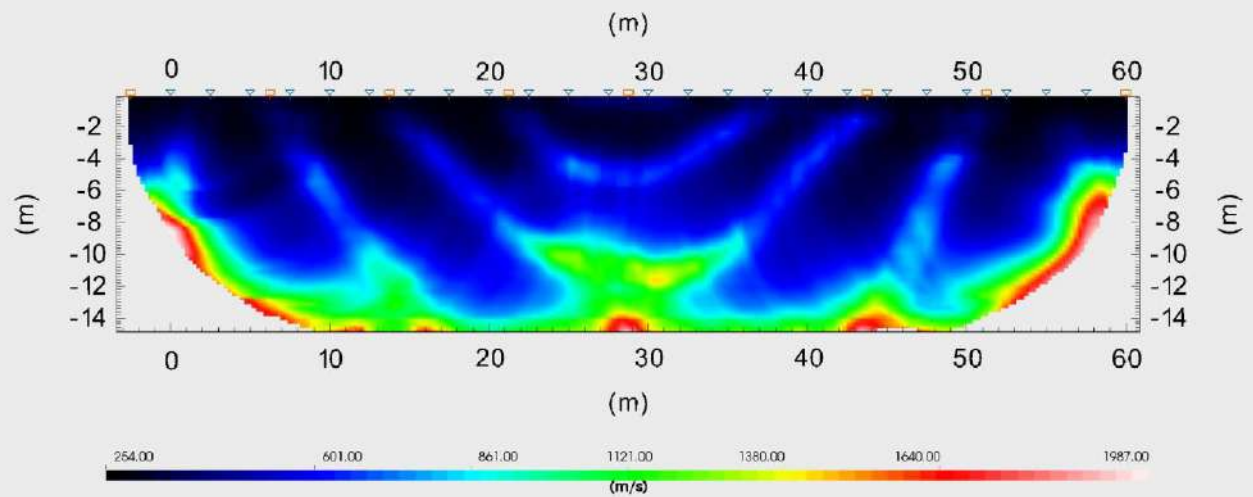
Dati generali

Descrizione	Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-Pecorini a mare
Zona	Isola di Filicudi (ME)
Operatore	Dott. Geol. Antonino Spinali
Data	19/03/2021

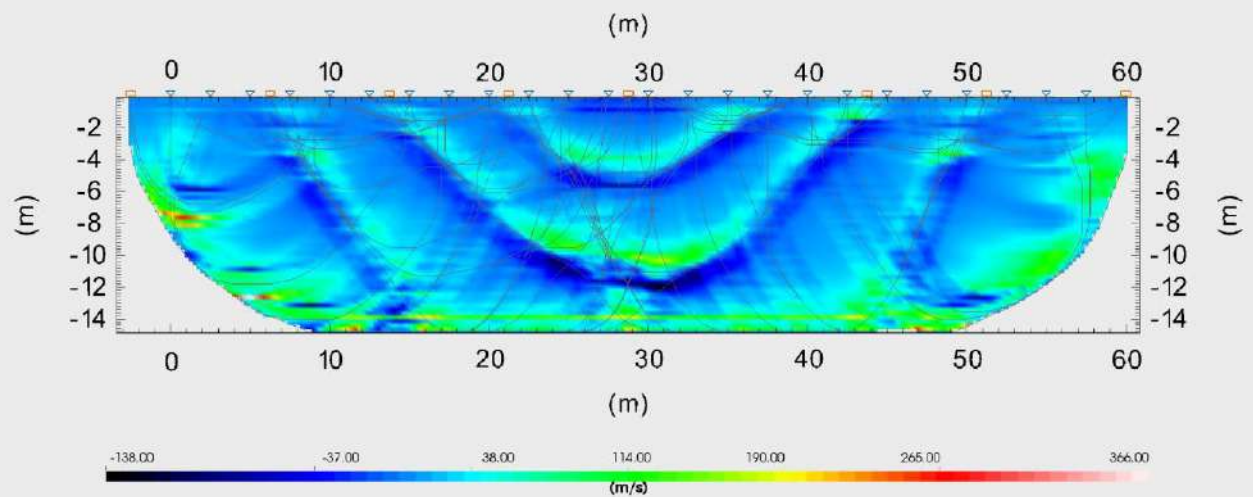


Esecuzione del sondaggio sismico

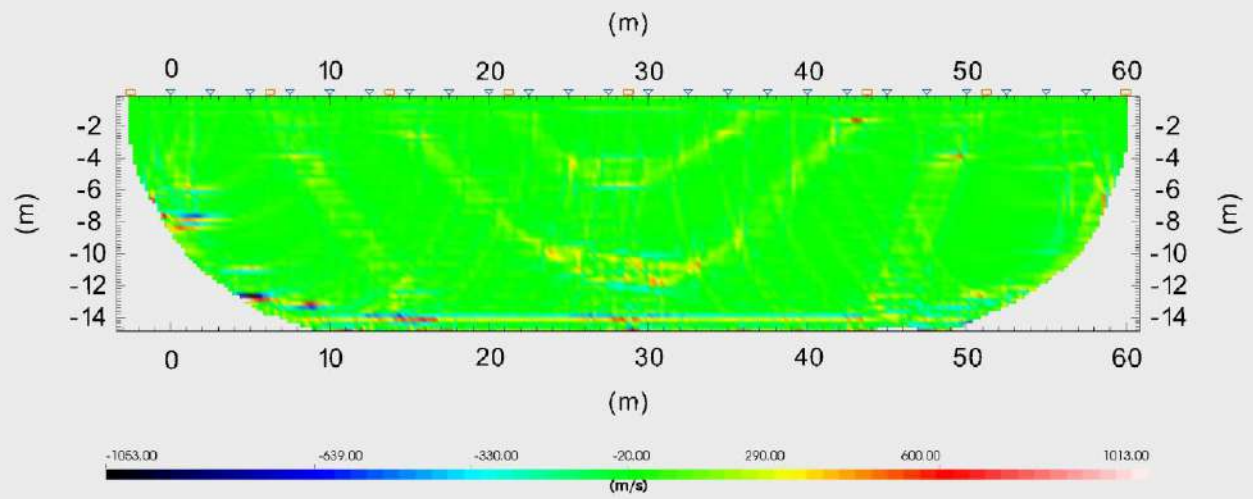
Tomographic Profile - Velocity



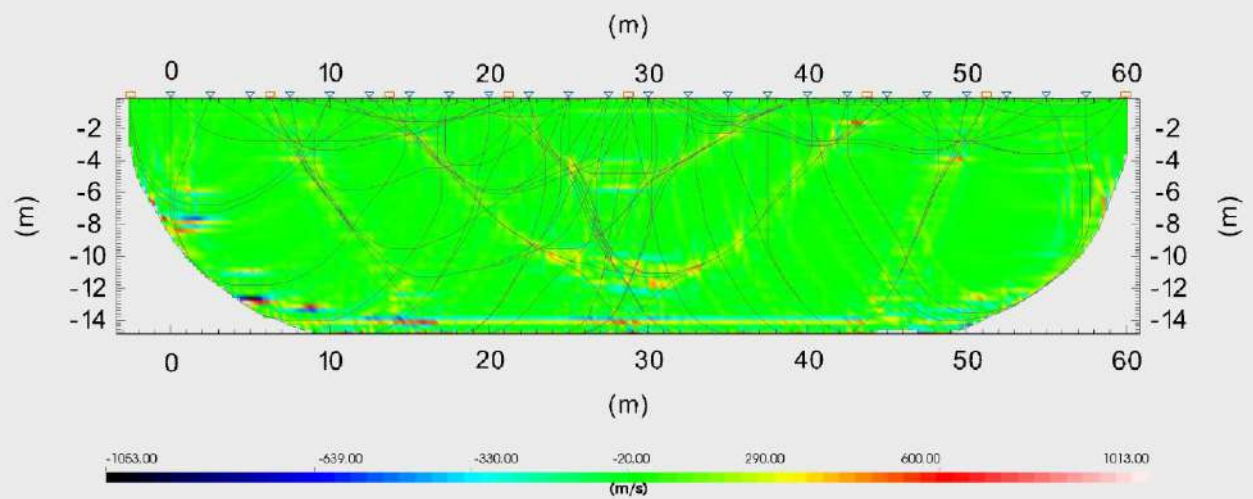
Tomographic Profile - Vertical Gradient with Rays



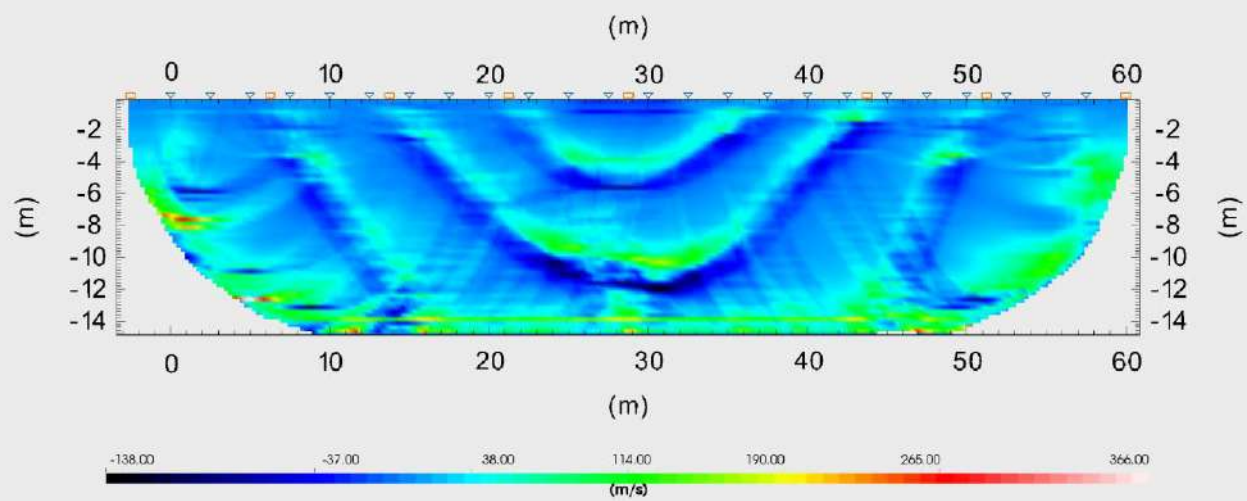
Tomographic Profile - Laplacian Gradient



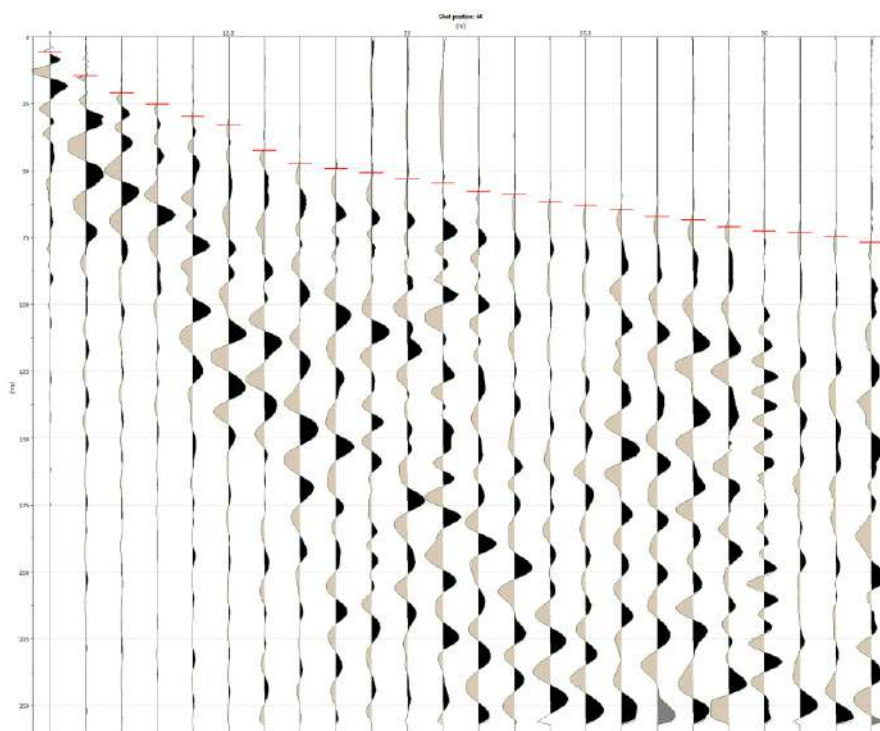
Tomographic Profile - Laplacian Gradient with Rays

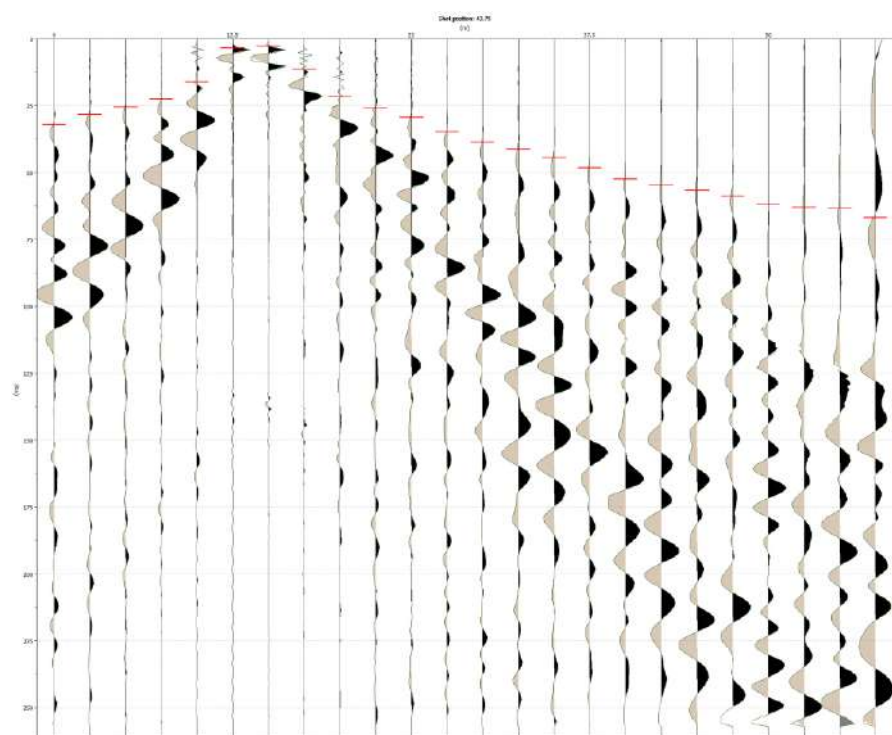
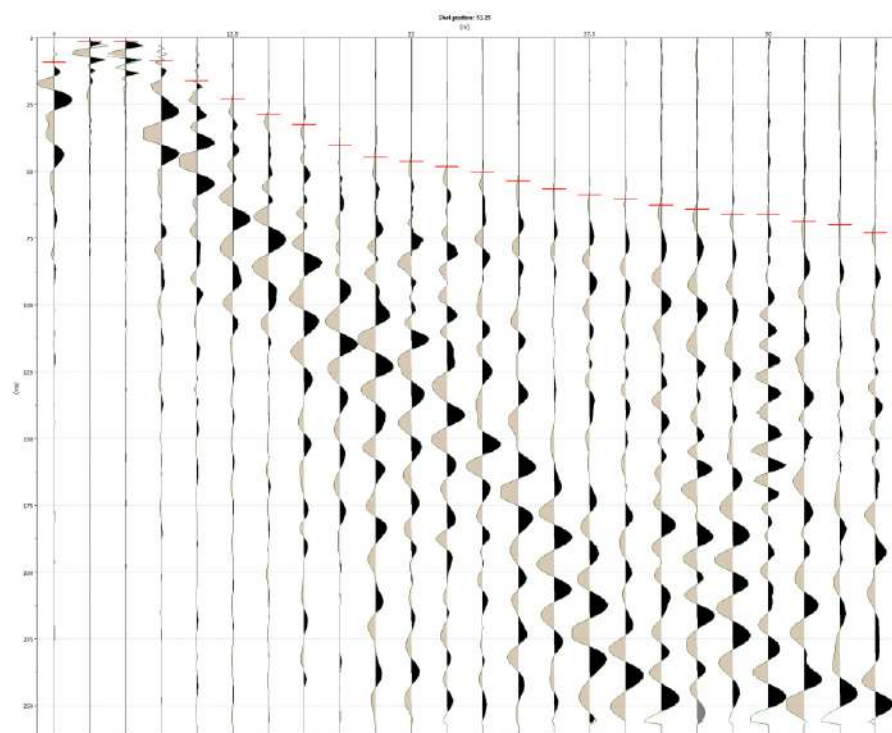


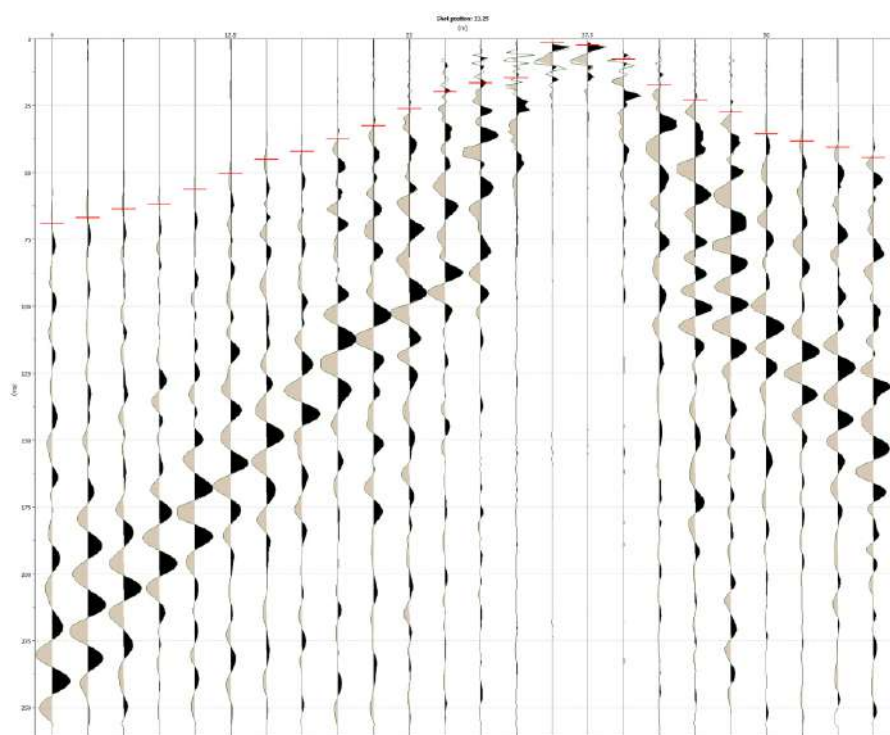
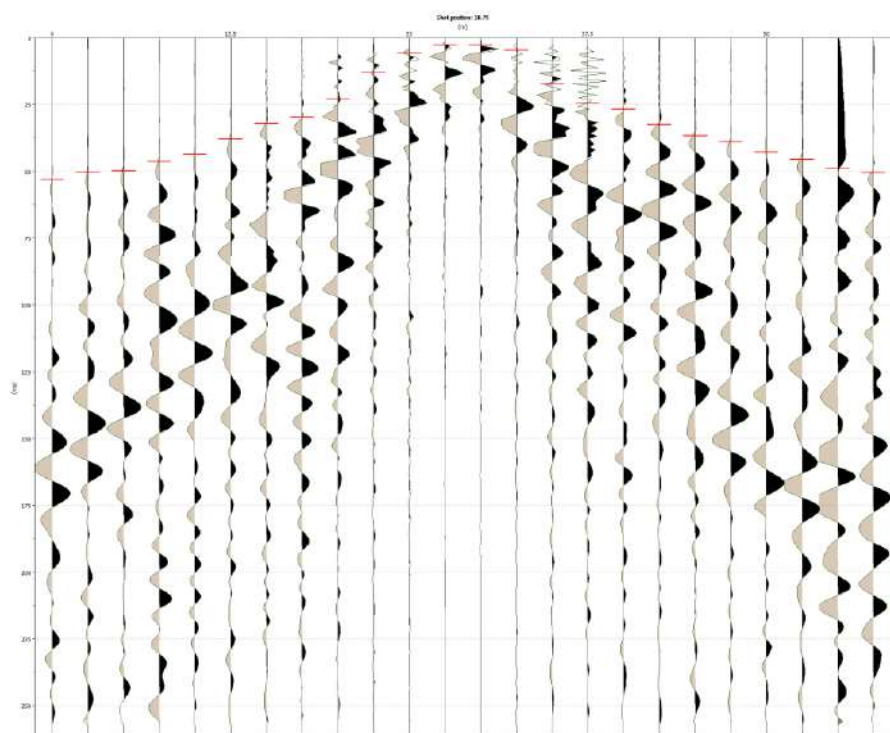
Tomographic Profile - Vertical Gradient

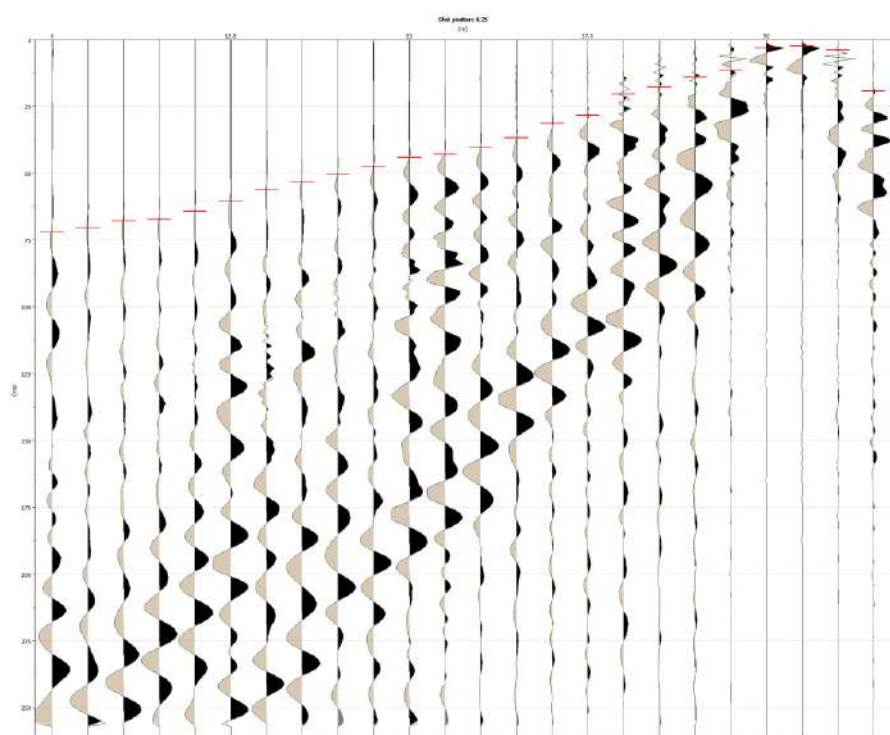
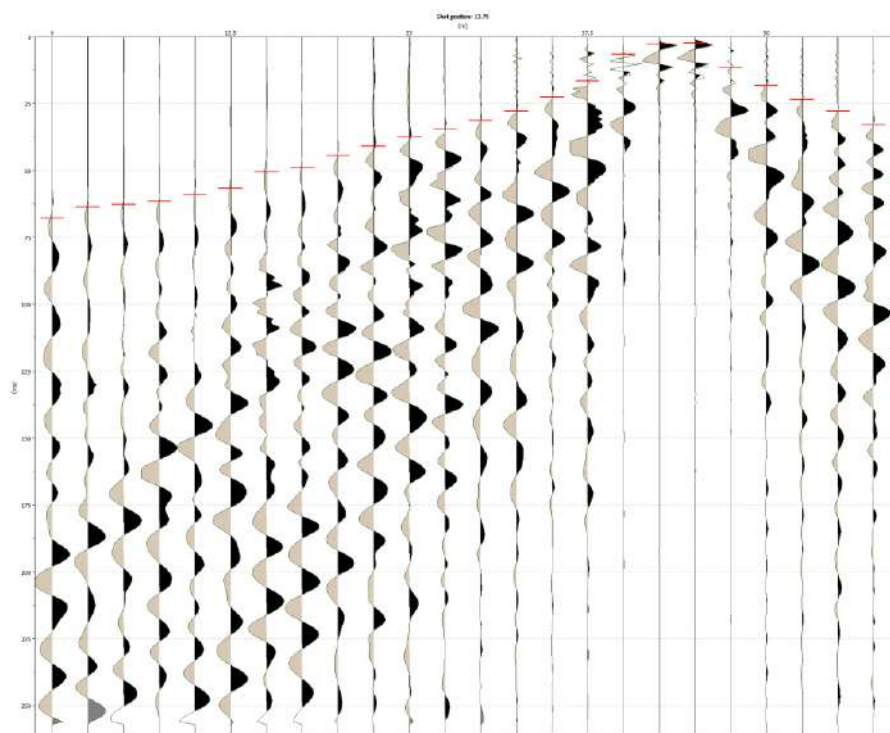


Traccia Andata

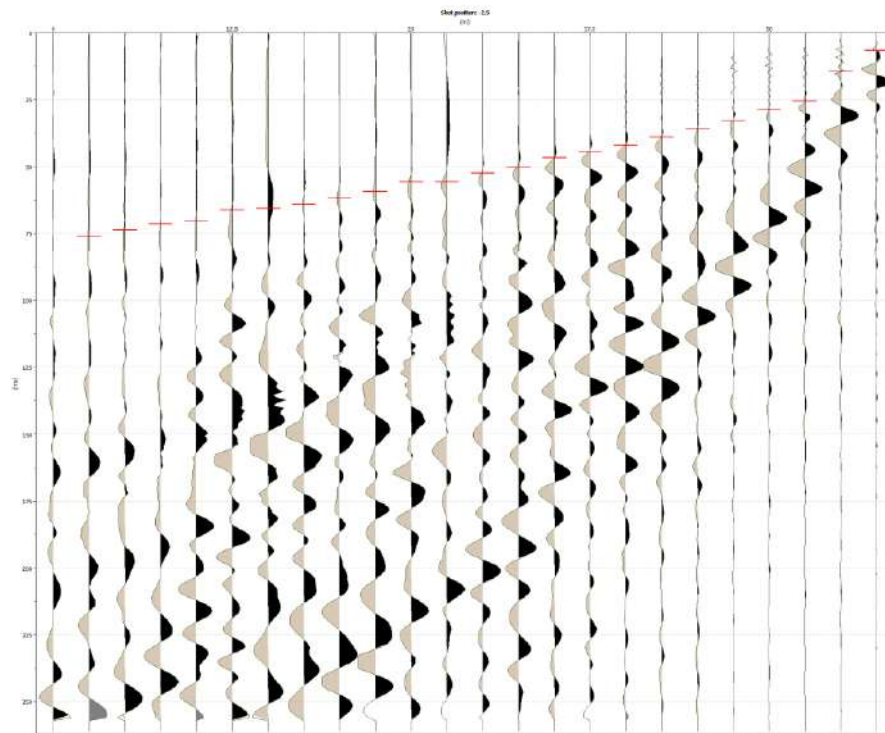




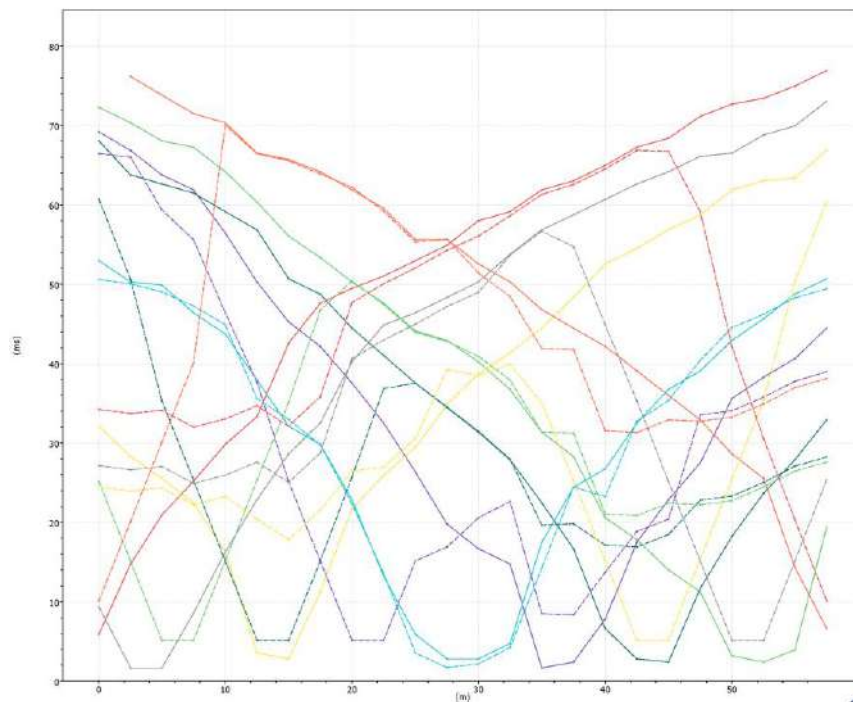




Traccia Ritorno



Dromocrone



Handwritten signature

Indagine di sismica tipo “MASW” Dati generali

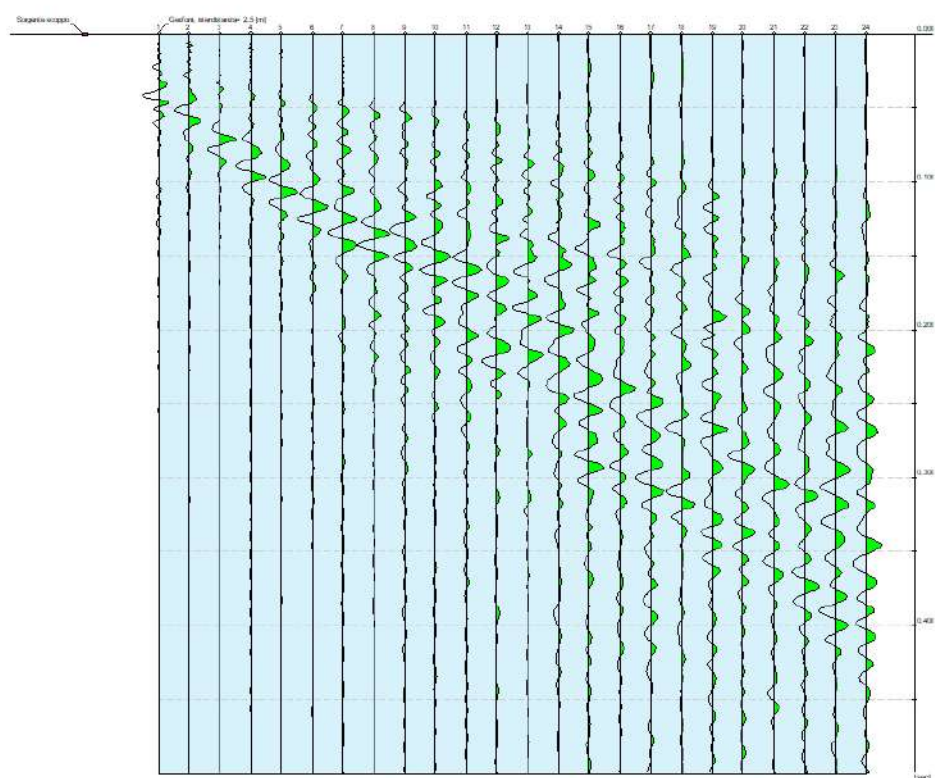
Committente	Si.Ar. Trivellazioni - Comune di Lipari
Cantiere	Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-Pecorini a mare
Località	Isola di Filicudi (ME)
Operatore	Dott.Geol. Antonino Spinali
Data	19/03/2021



Area di esecuzione dell'indagine

Tracce

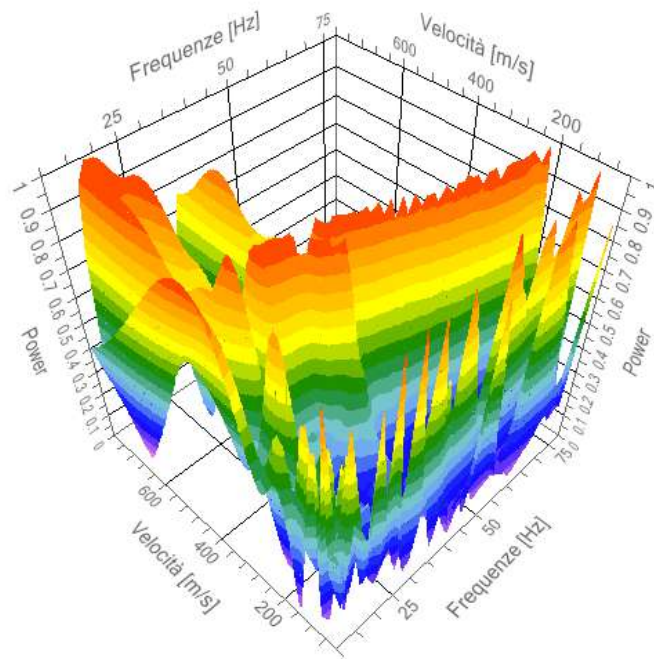
N. tracce	24
Durata acquisizione [msec]	500.7
Interdistanza geofoni [m]	2.5
Periodo di campionamento [msec]	1.024



Analisi spettrale

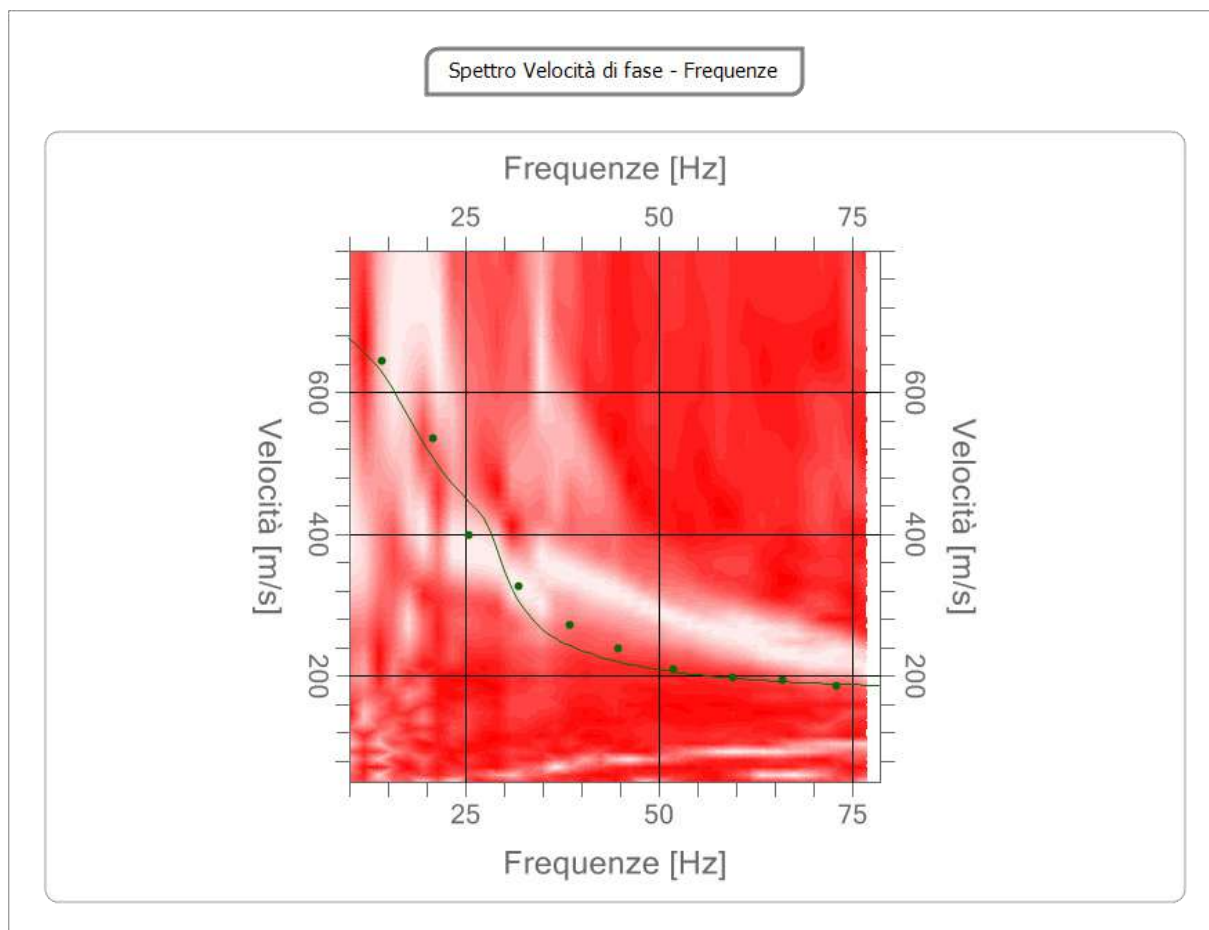
Frequenza minima di elaborazione [Hz]	10
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	80
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	50
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	800
Intervallo velocità [m/sec]	1

Spettro Velocità di fase - Frequenze



Curva di dispersione

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	14.2	645.0	0
2	20.8	535.5	0
3	25.6	398.9	0
4	31.9	326.9	0
5	38.6	271.1	0
6	44.8	238.0	0
7	52.0	209.1	0
8	59.6	198.8	0
9	66.0	194.6	0
10	73.0	186.4	0

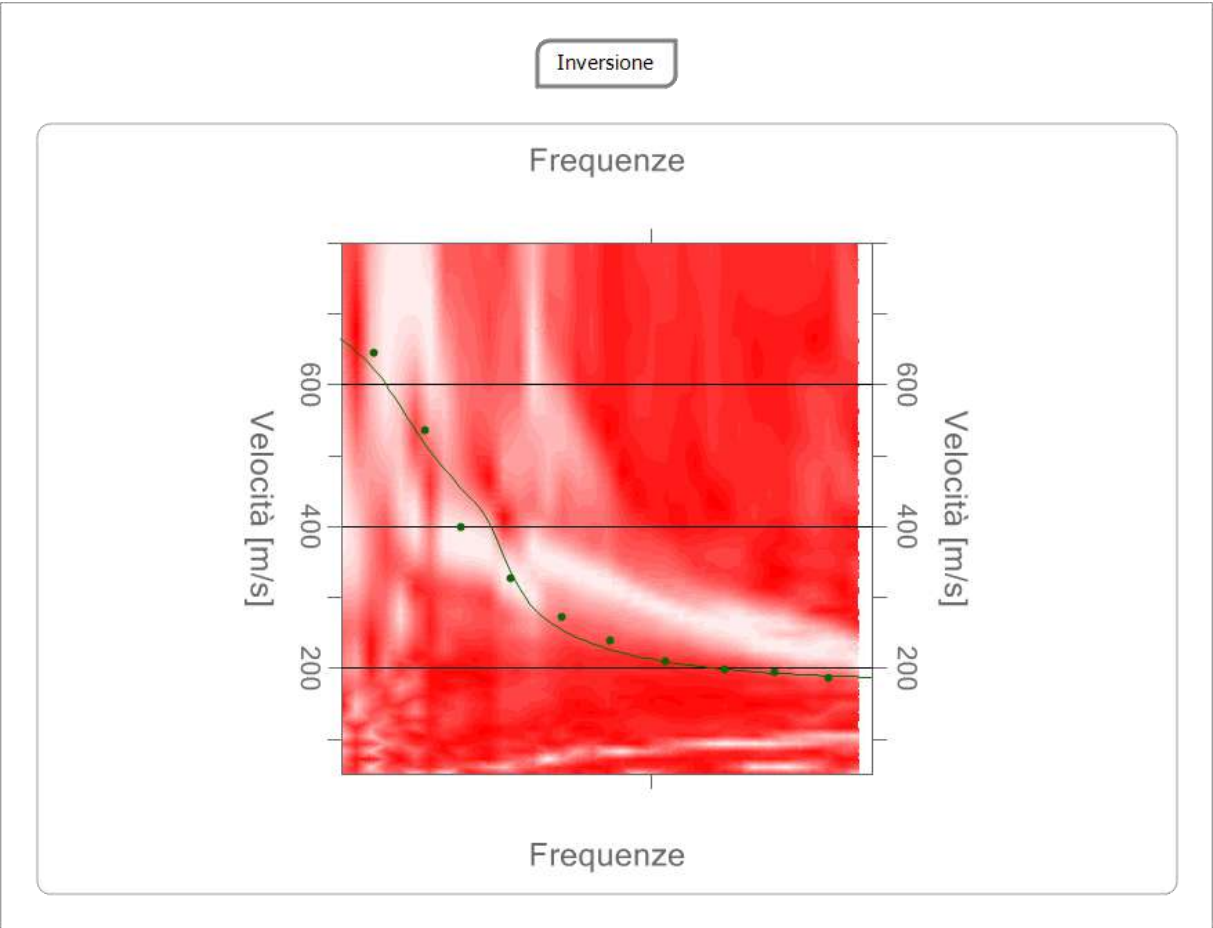


Inversione

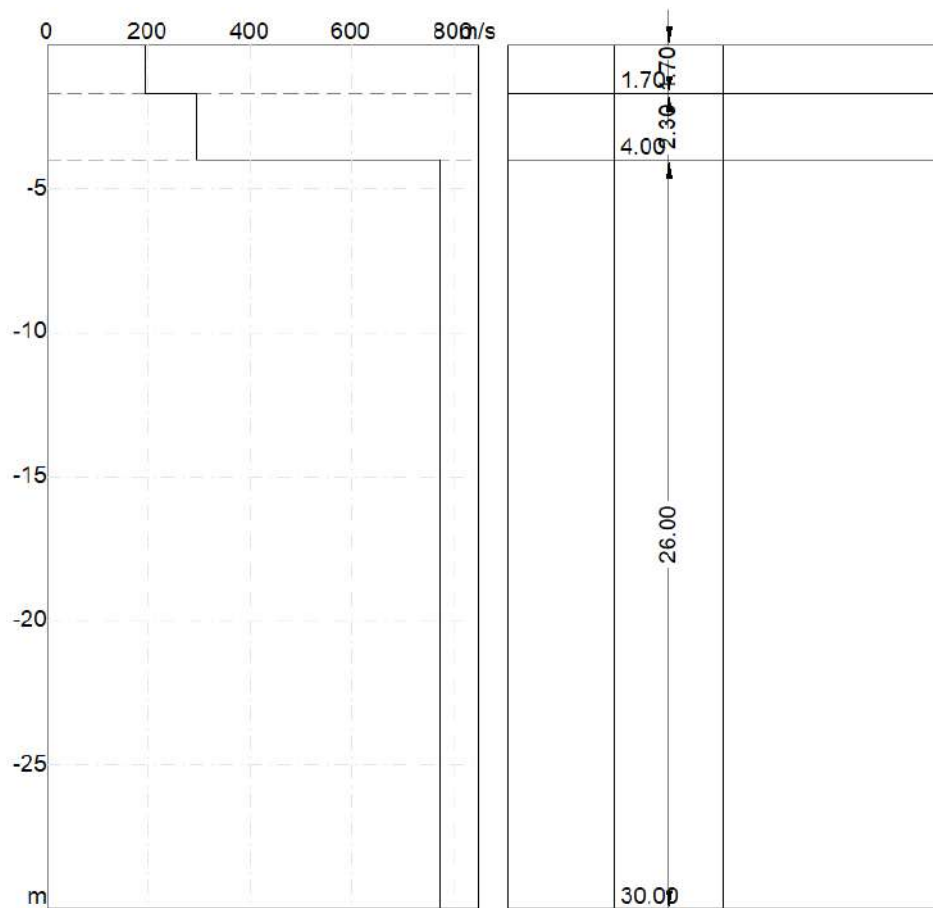
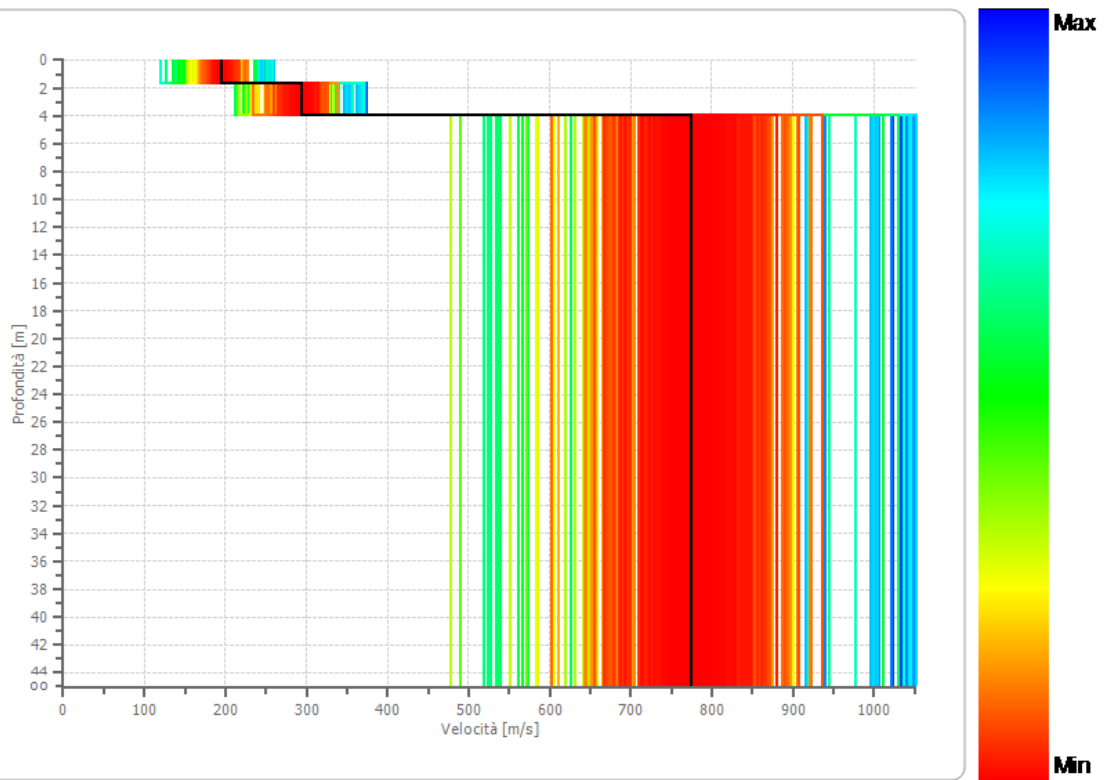
n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	1.70	1.70	2200.0	0.3	No	364.2	194.7
2	4.00	2.30	2300.0	0.3	No	551.0	294.5
3	oo	oo	2400.0	0.3	No	1450.2	775.2

Percentuale di errore 0.347 %

Fattore di disadattamento della soluzione 0.053



Profilo di velocità



Risultati

Profondità piano di posa [m]	0.00
$V_{\text{Sequivalente}}$ [m/sec]	599.00
Categoria del suolo	B

CATEGORIA DEL SUOLO DI FONDAZIONE, ai sensi delle NTC2018: Cat. "B" con
 $V_{\text{Sequivalente},30}=599$ m/s

Altri parametri geotecnici

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	V_s [m/s]	V_p [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G_0 [MPa]	E_d [MPa]	M_0 [MPa]	E_y [MPa]
1	1.70	1.70	194.67	364.19	2000.00	0.30	75.79	265.27	164.21	197.06
2	4.00	2.30	294.50	550.97	2200.00	0.30	190.81	667.84	413.43	496.11
3	oo	oo	775.17	1450.20	2300.00	0.30	1382.03	4837.10	2994.40	3593.28

G_0 : Modulo di deformazione al taglio;

E_d : Modulo edometrico;

M_0 : Modulo di compressibilità volumetrica;

E_y : Modulo di Young;



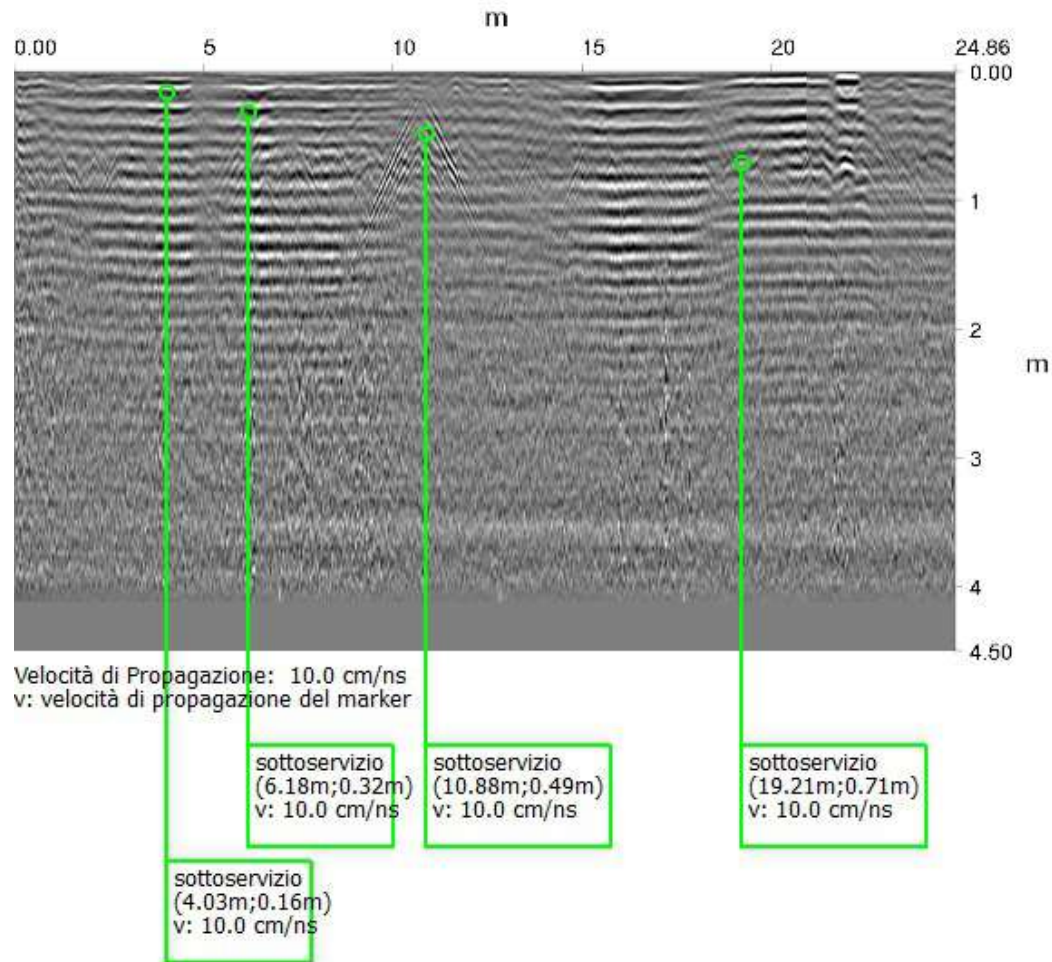


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

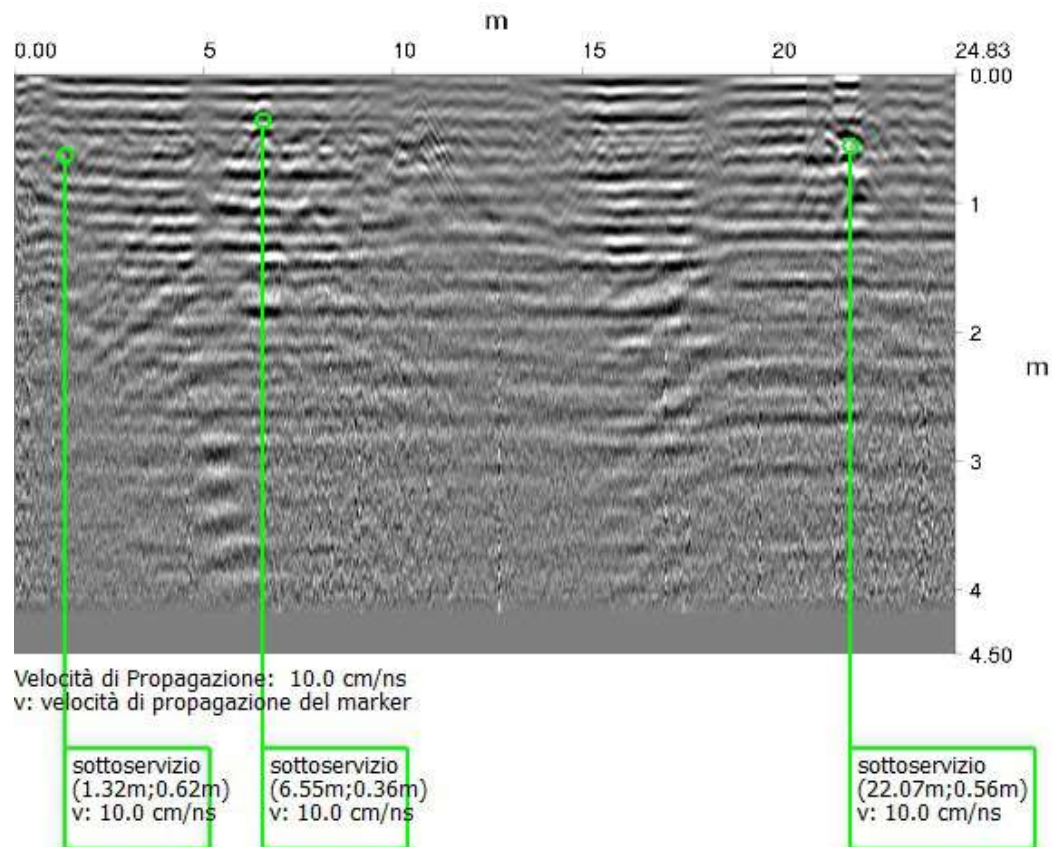
REPORT DI ANALISI DATI

- L1-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



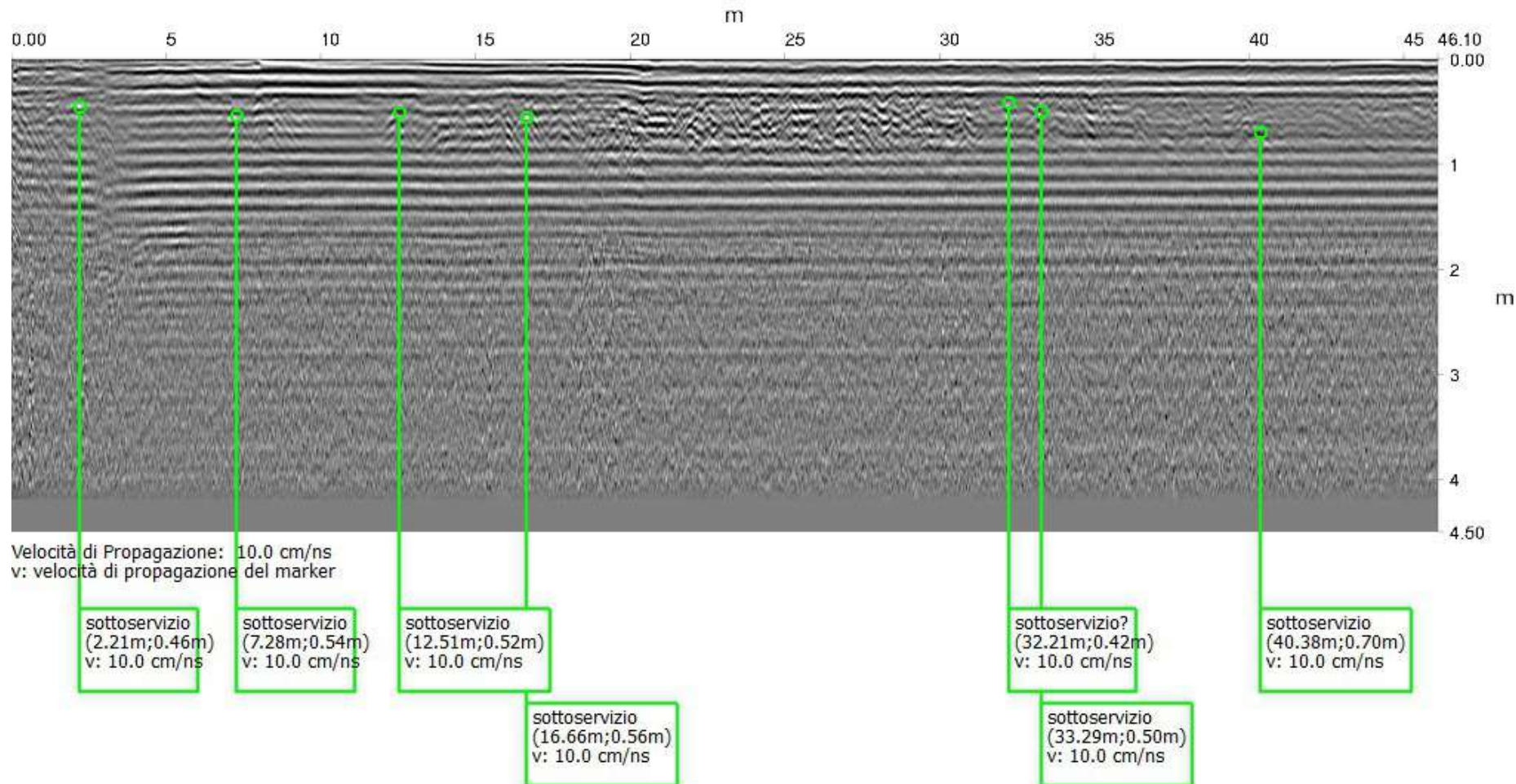


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

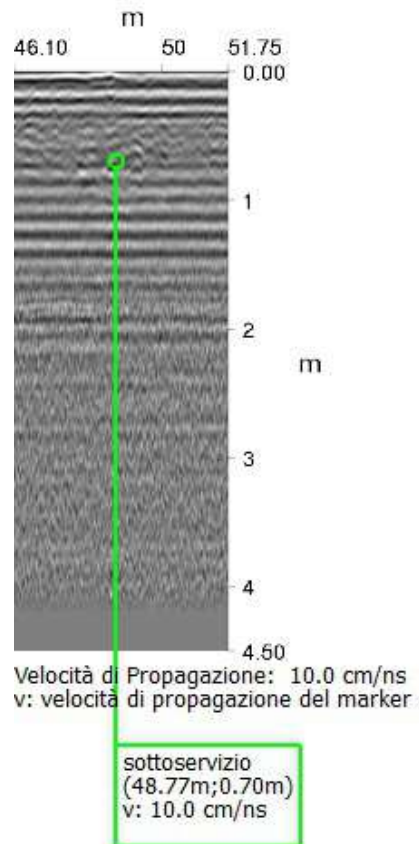
REPORT DI ANALISI DATI

-L2-

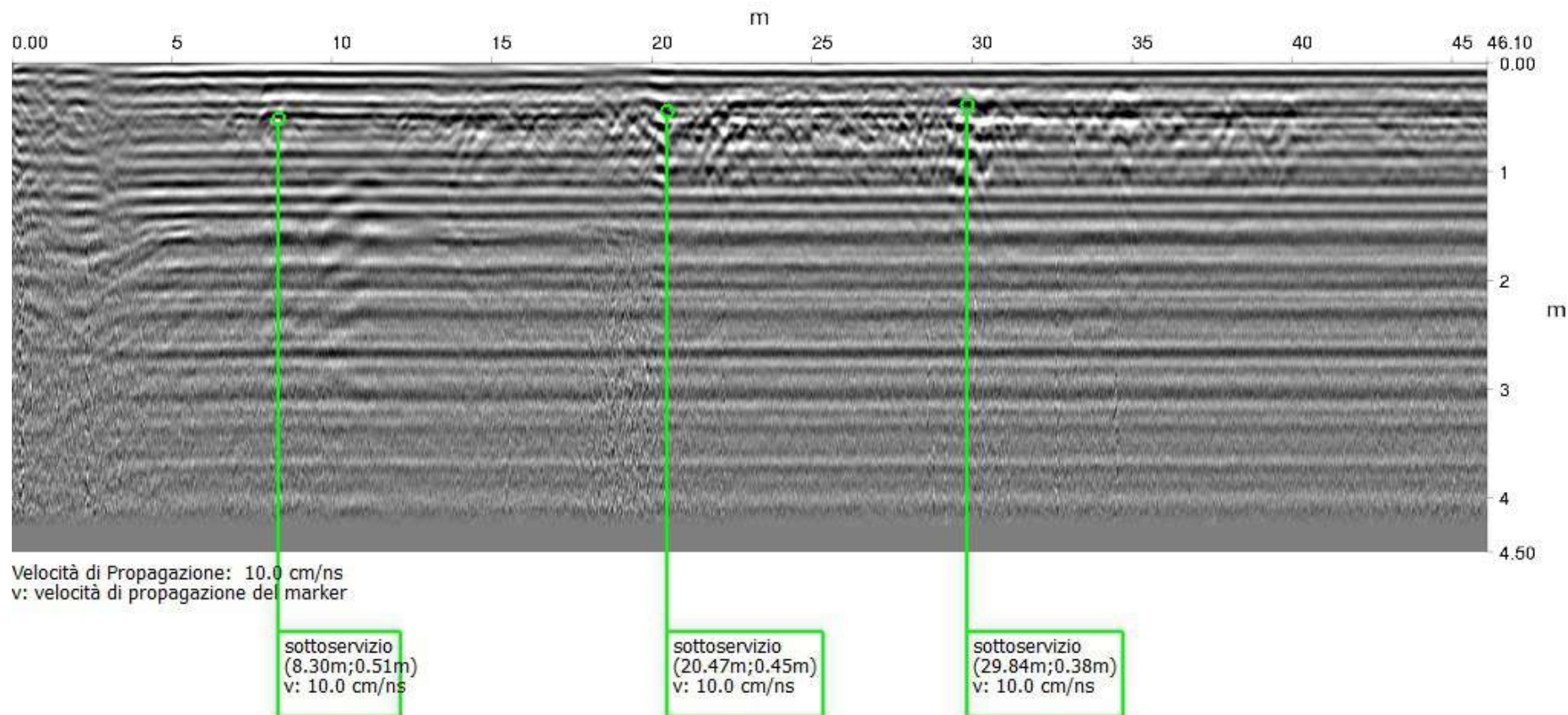
**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



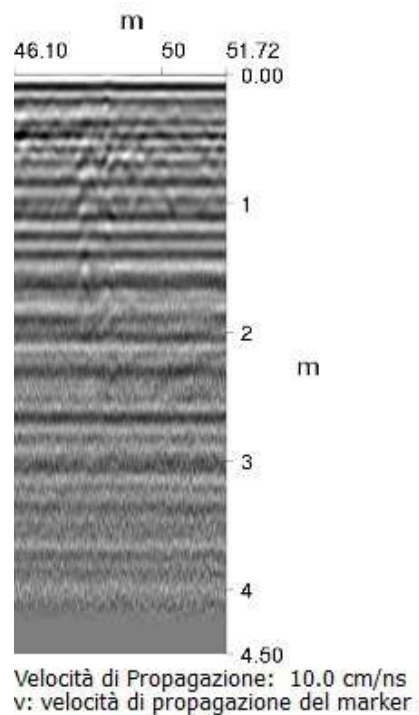
**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



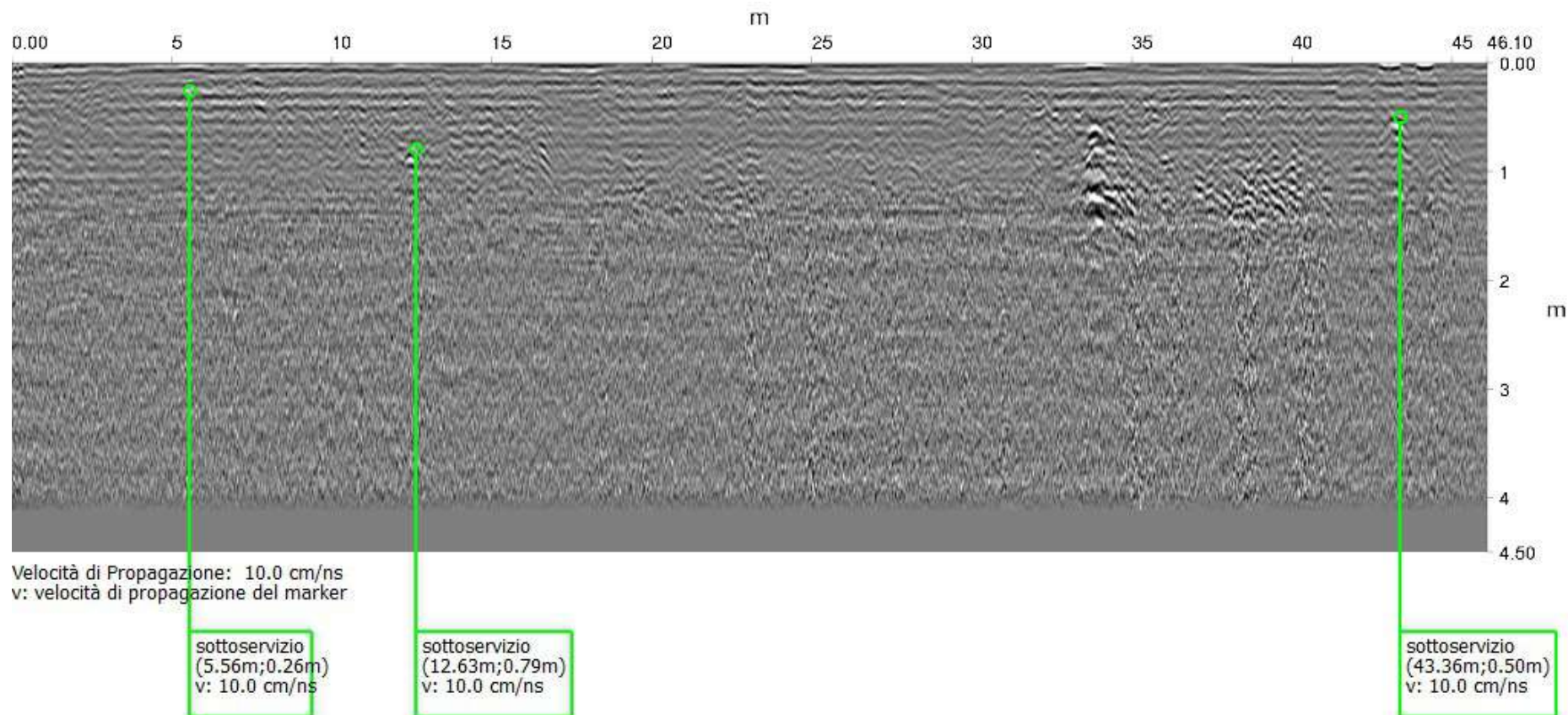


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

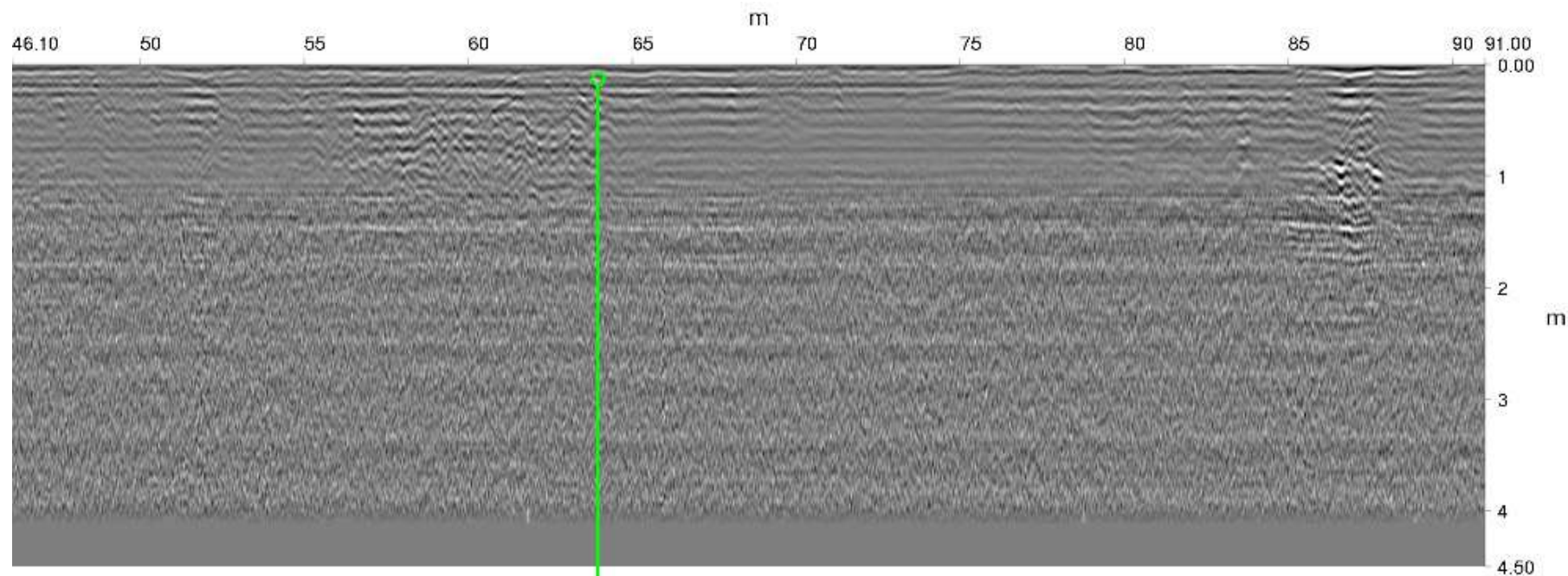
REPORT DI ANALISI DATI

-L3-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



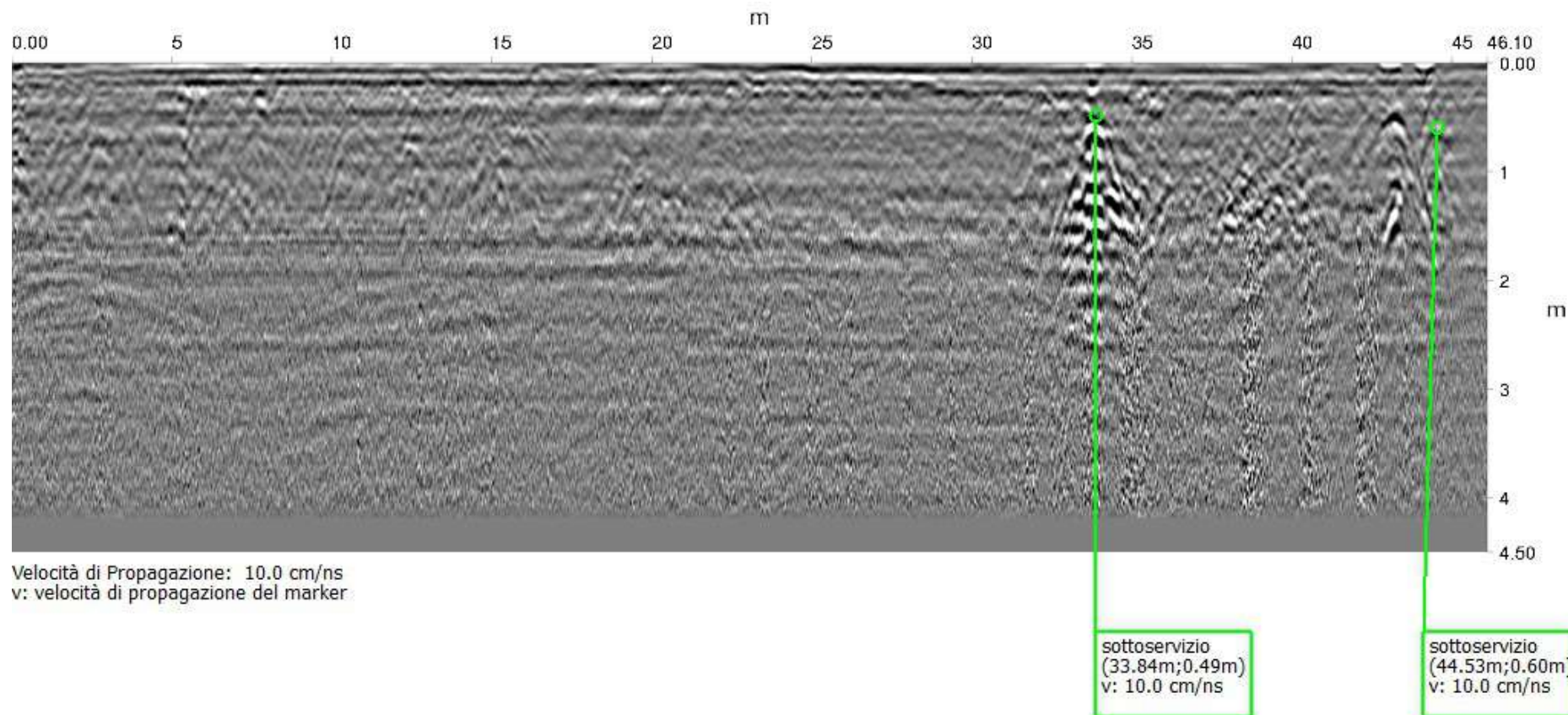
**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



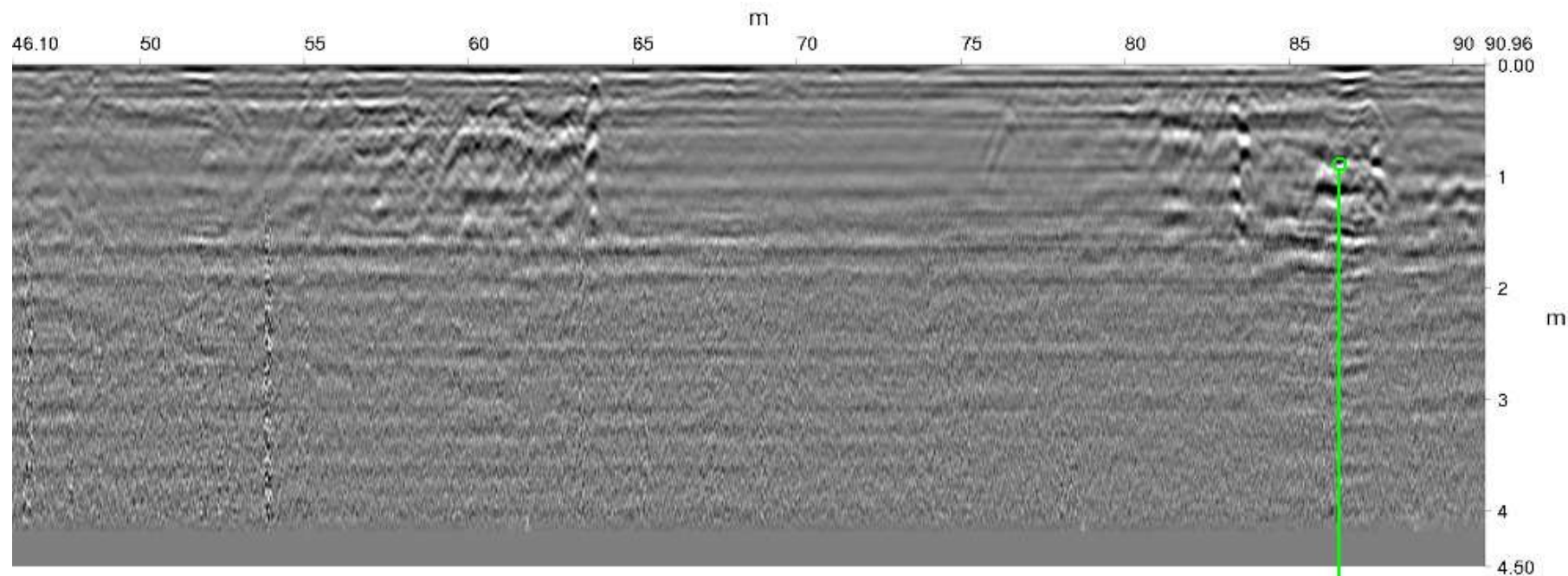
Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

sottoservizio
(63.95m;0.14m)
v: 10.0 cm/ns

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

sottoservizio
(86.51m;0.90m)
v: 10.0 cm/ns

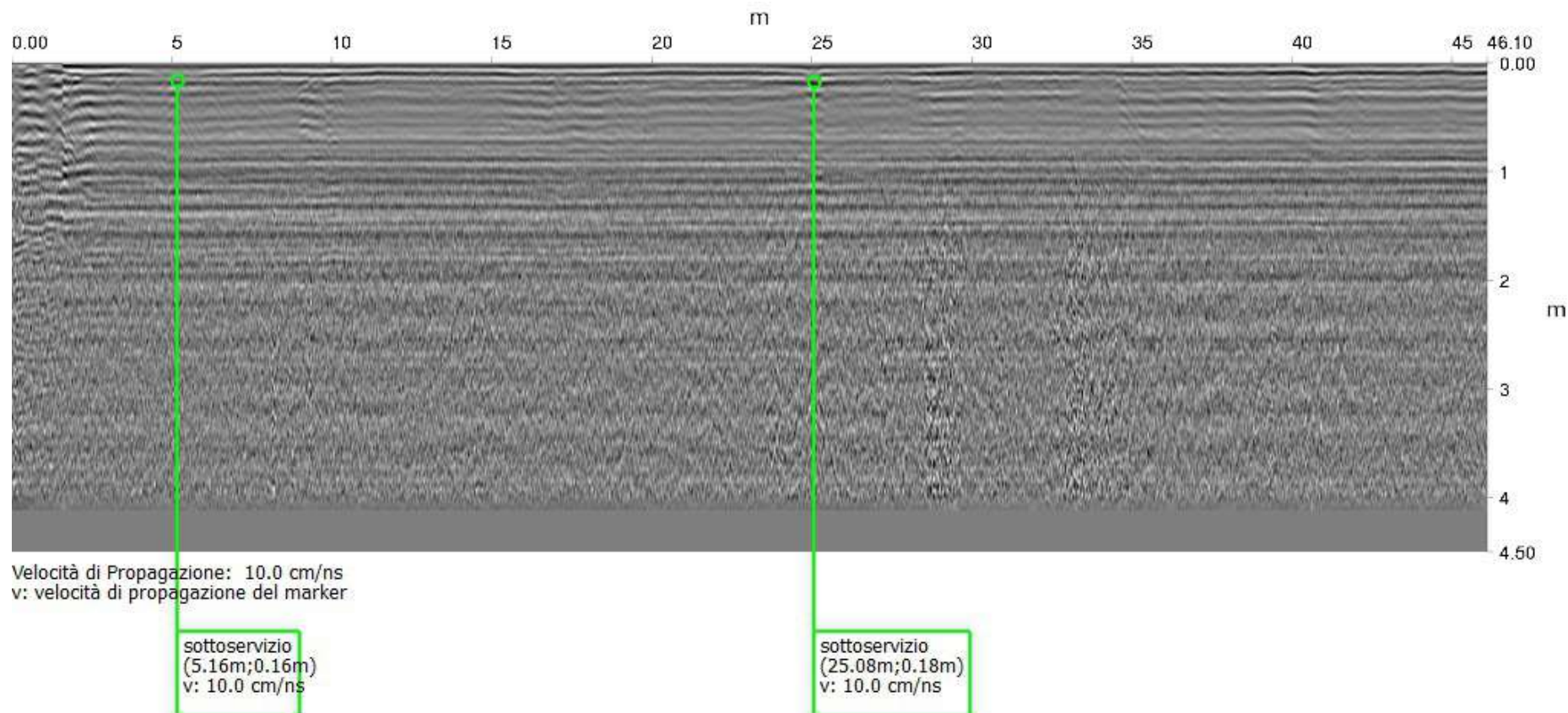


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

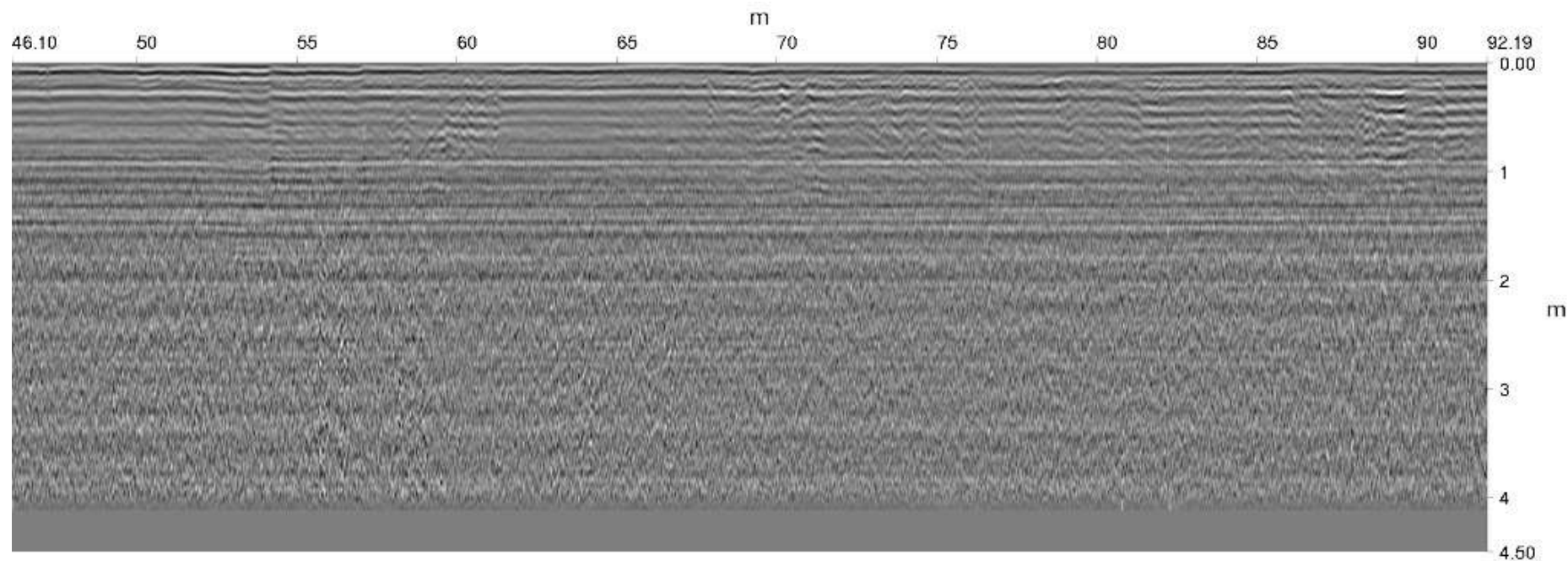
REPORT DI ANALISI DATI

-L4-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



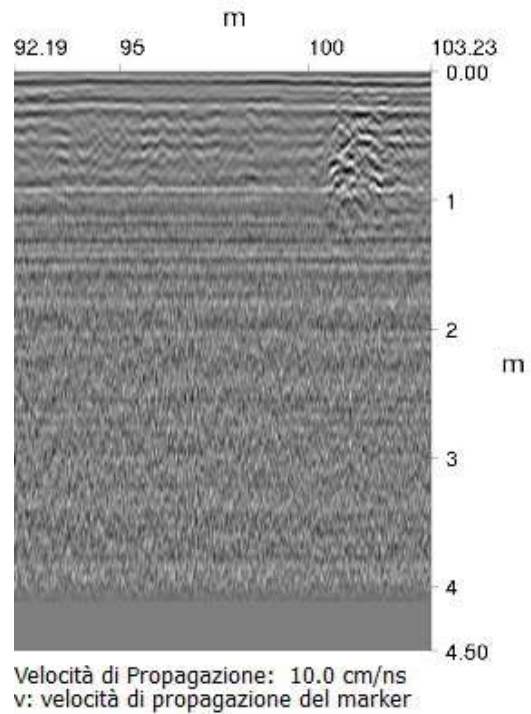
**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



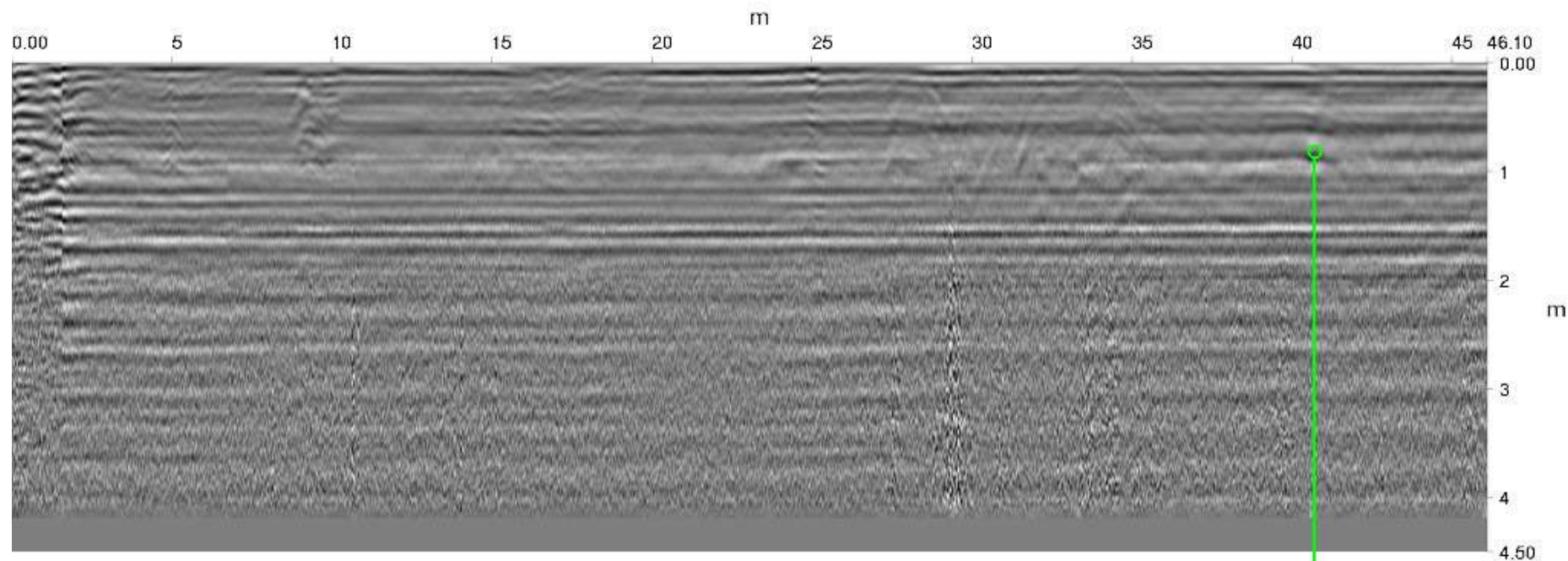
Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**

Filicudi (ME)



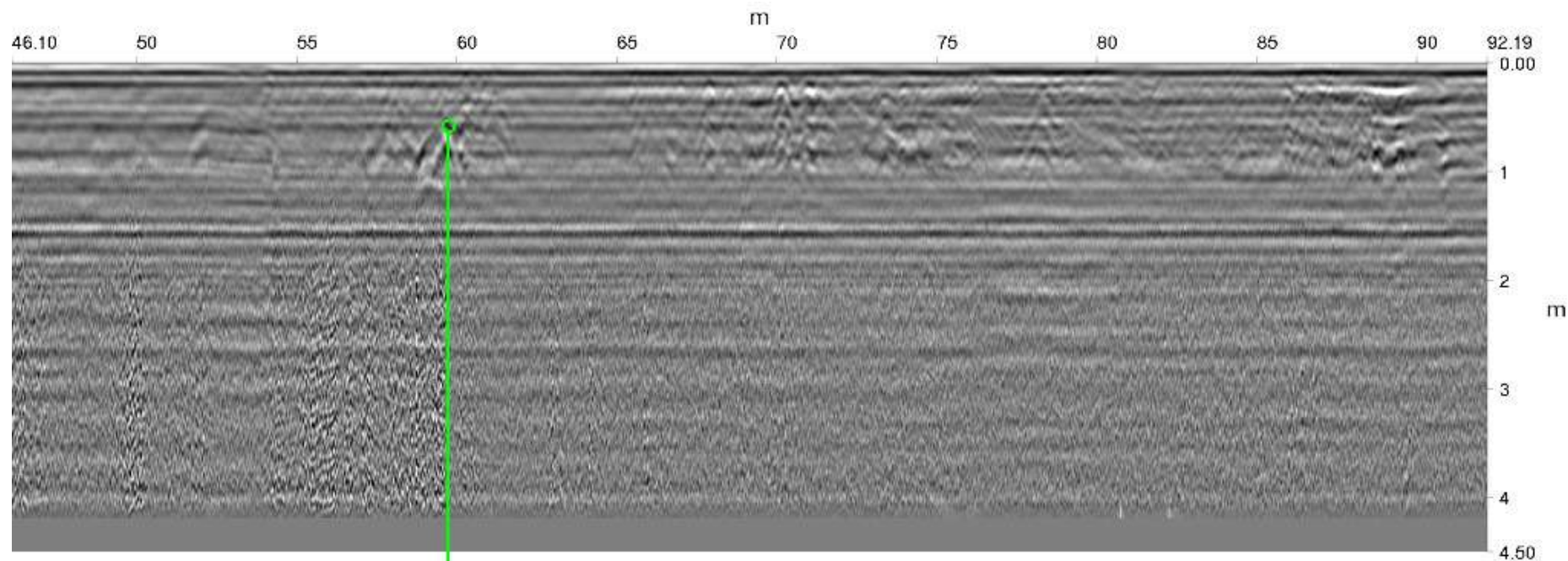
**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

sottoservizio
(40.69m;0.82m)
v: 10.0 cm/ns

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)

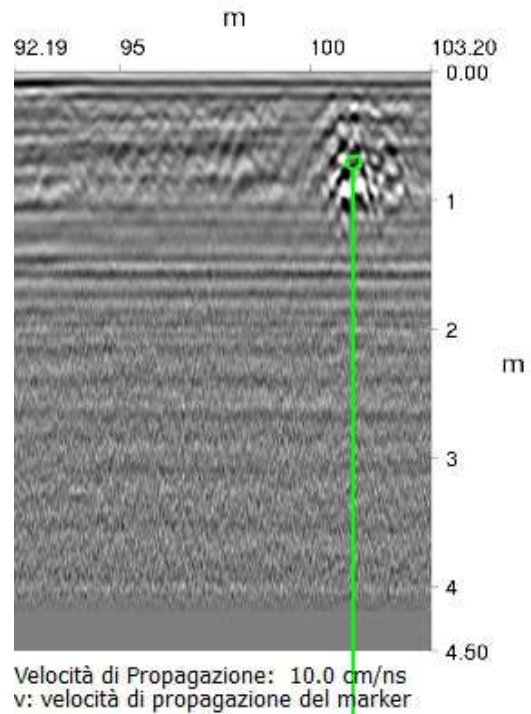


Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

sottoservizio
(59.74m;0.59m)
v: 10.0 cm/ns

Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

Filicudi (ME)



sottoservizio
(101.16m;0.71m)
v: 10.0 cm/ns

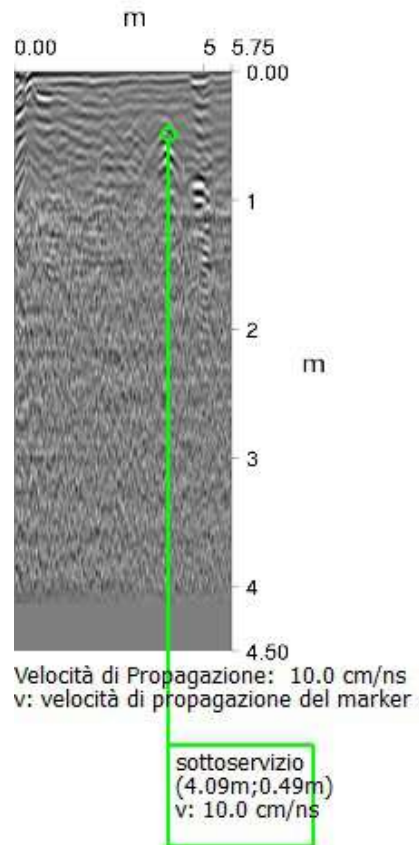


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

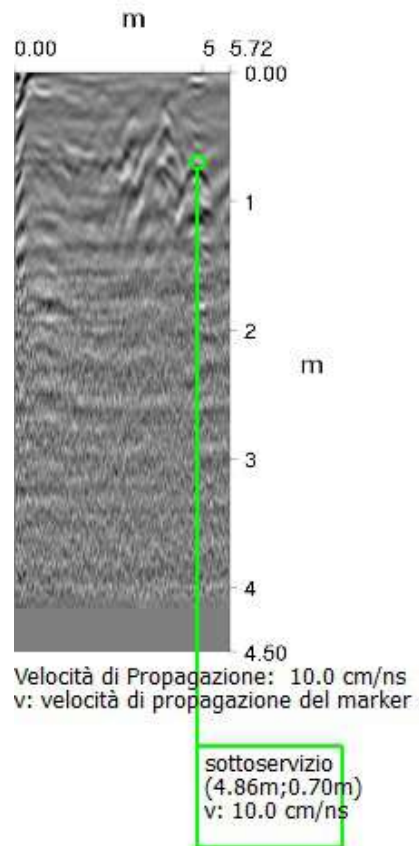
REPORT DI ANALISI DATI

-T1-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



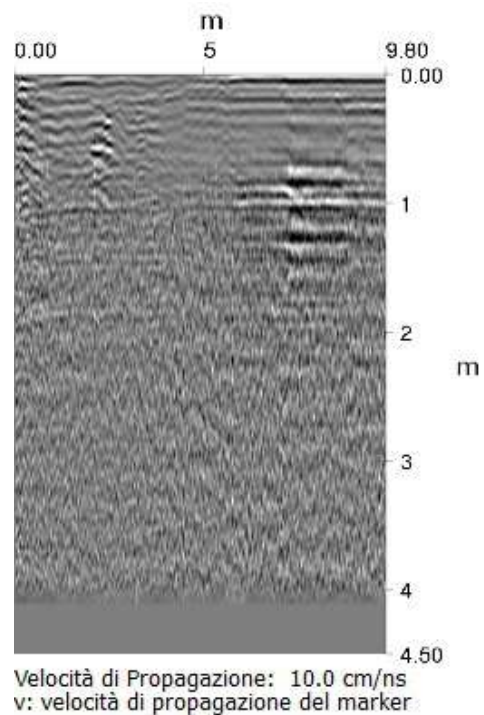


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

REPORT DI ANALISI DATI

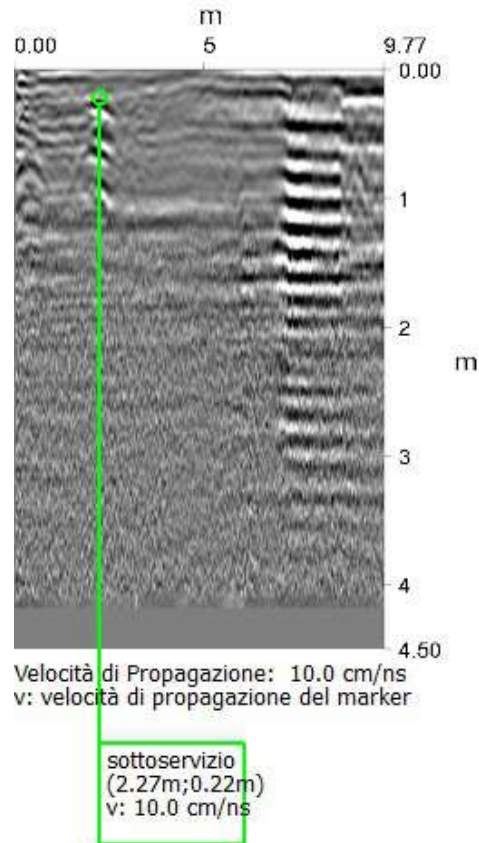
-T2-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

Filicudi (ME)



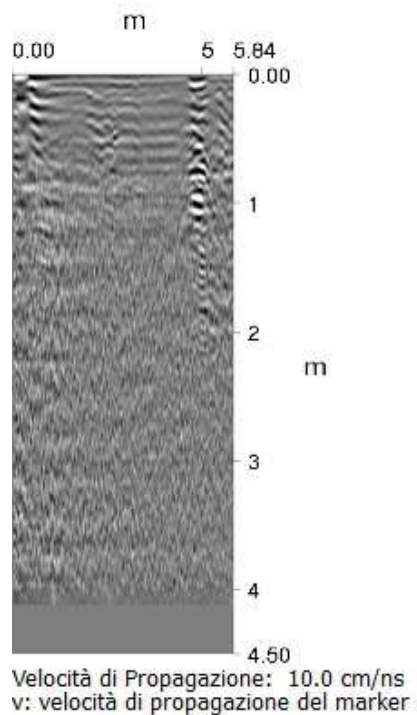


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

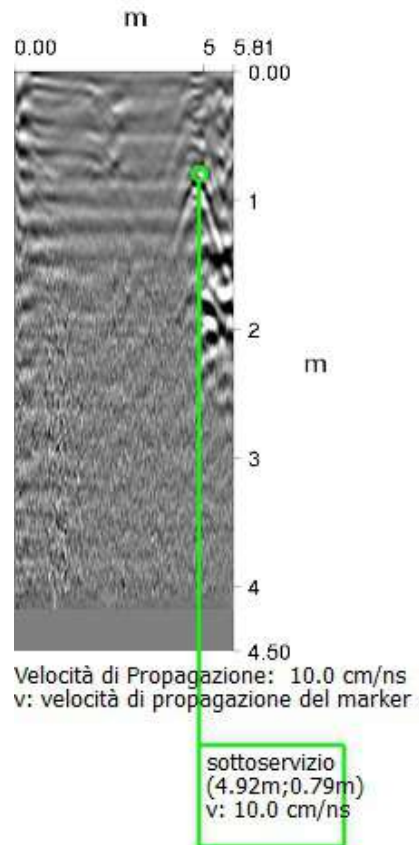
REPORT DI ANALISI DATI

-T3-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



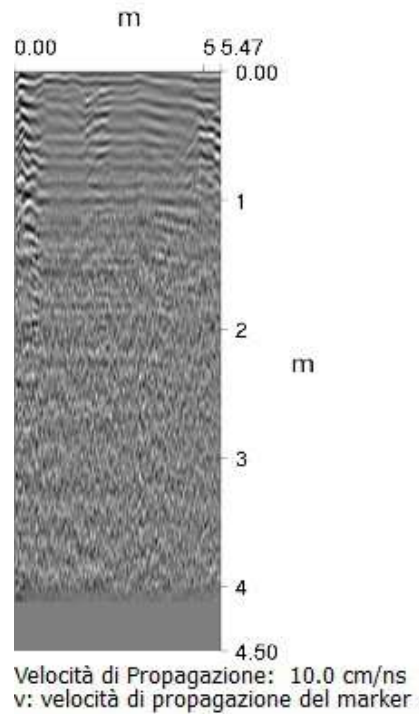


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

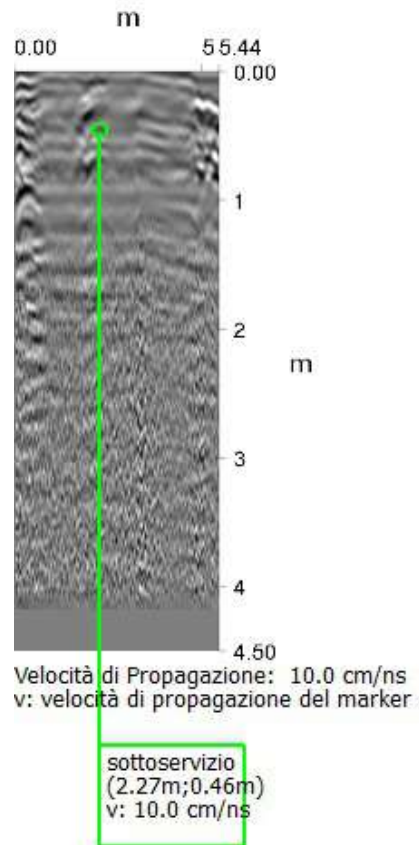
REPORT DI ANALISI DATI

-T4-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



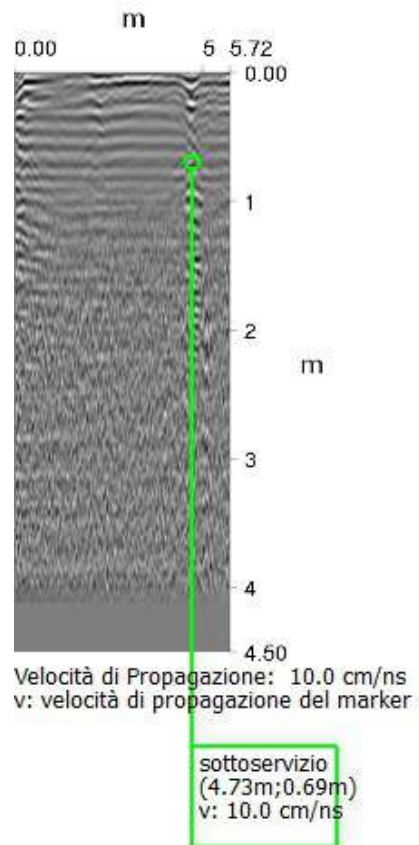


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

REPORT DI ANALISI DATI

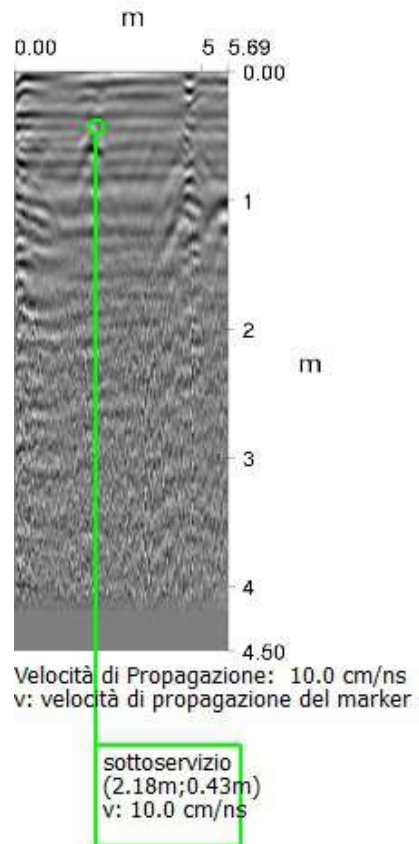
-T5-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

Filicudi (ME)



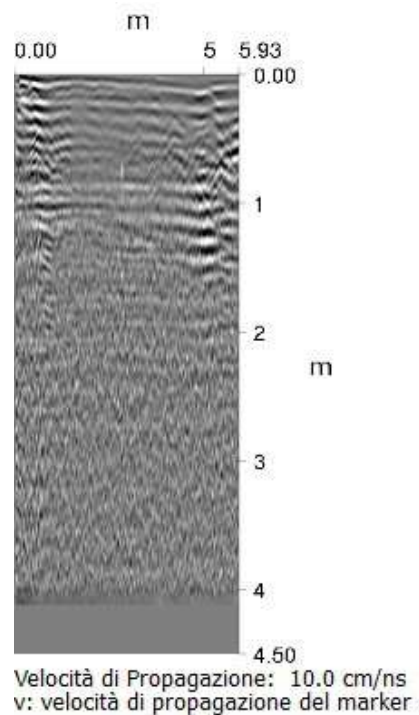


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

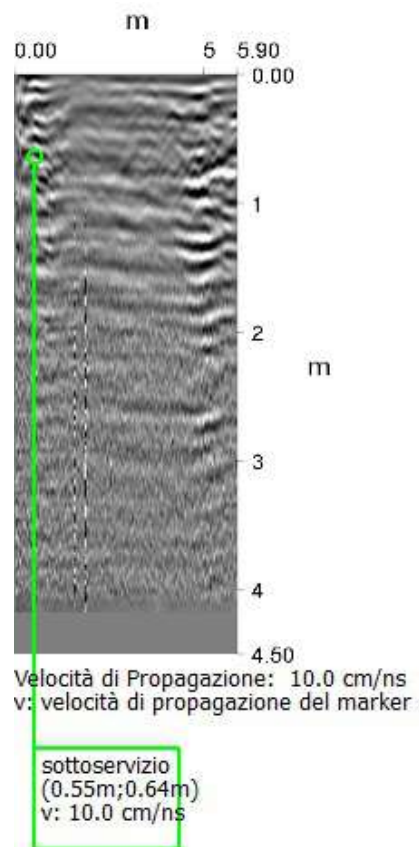
REPORT DI ANALISI DATI

-T6-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



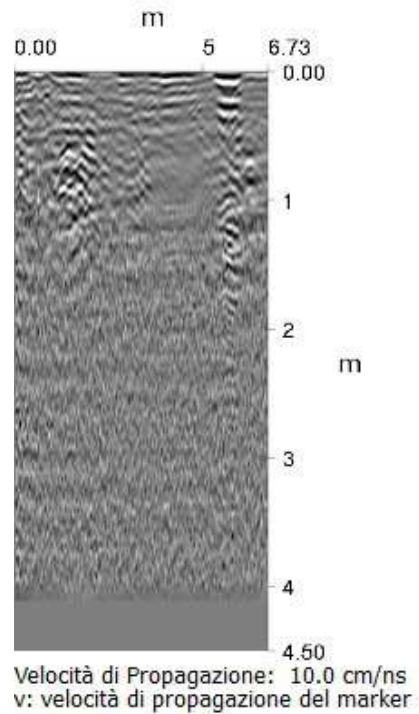


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

REPORT DI ANALISI DATI

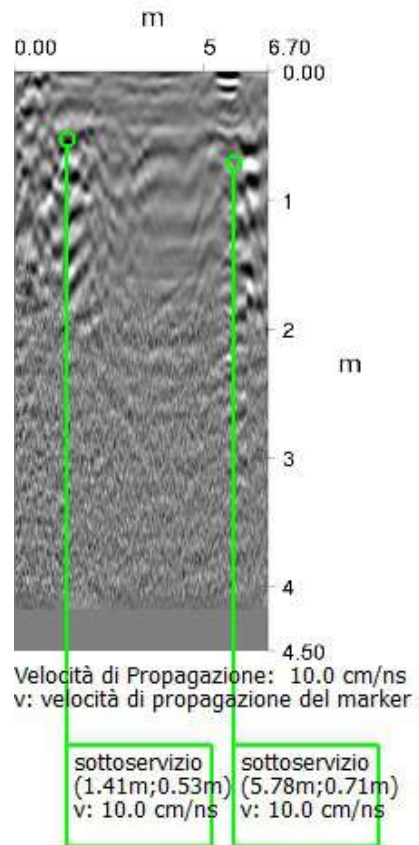
-T7-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

Filicudi (ME)



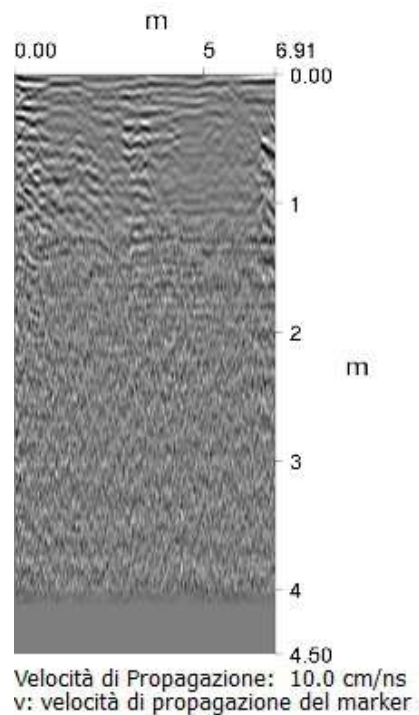


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

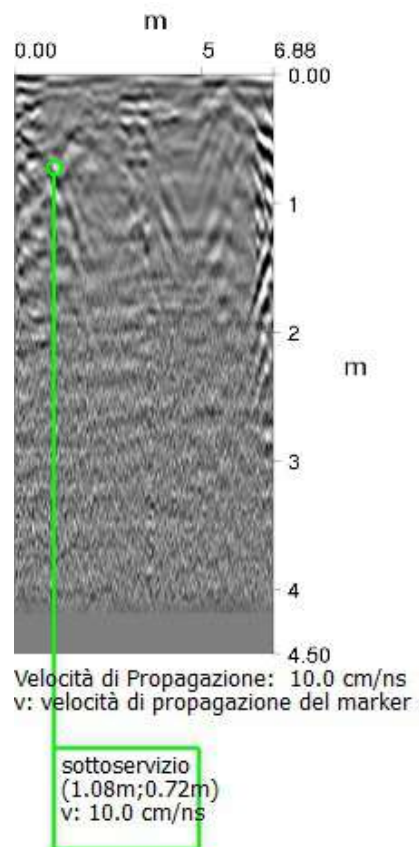
REPORT DI ANALISI DATI

-T8-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)

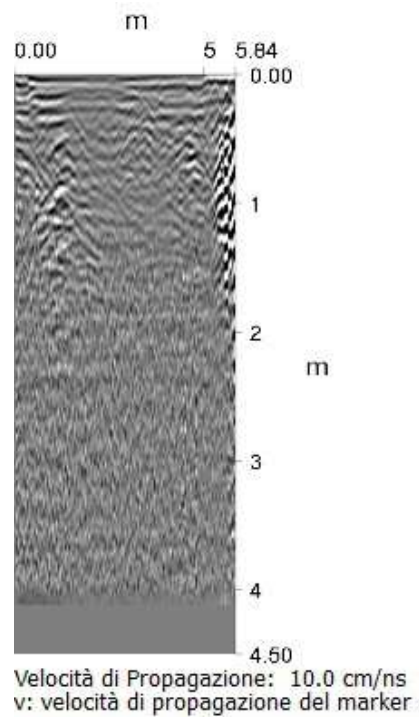




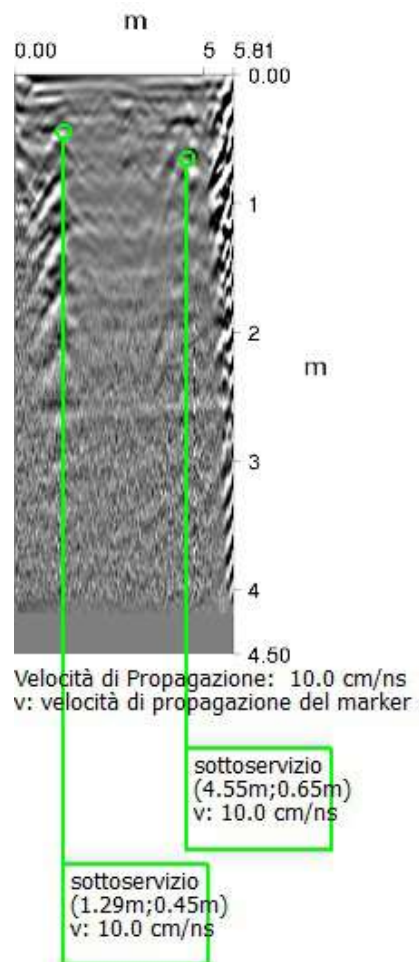
Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

REPORT DI ANALISI DATI

-T9-



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



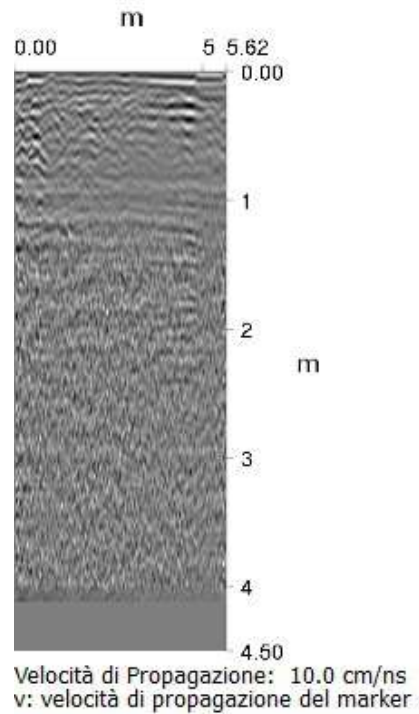


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

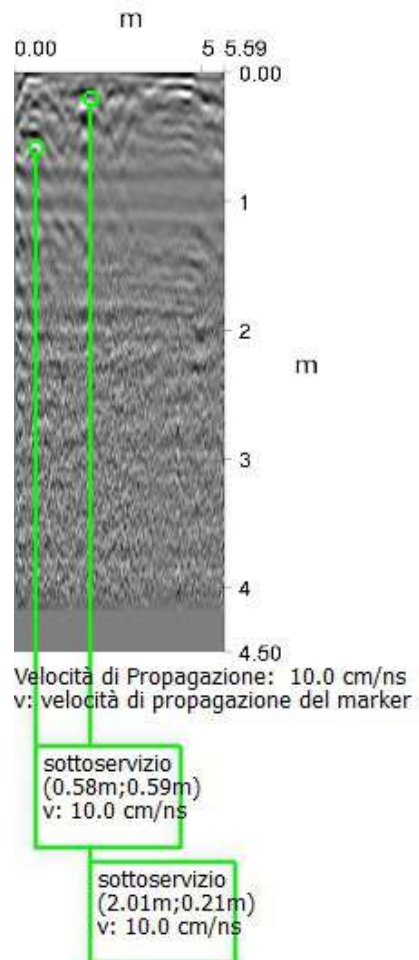
REPORT DI ANALISI DATI

-T10-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



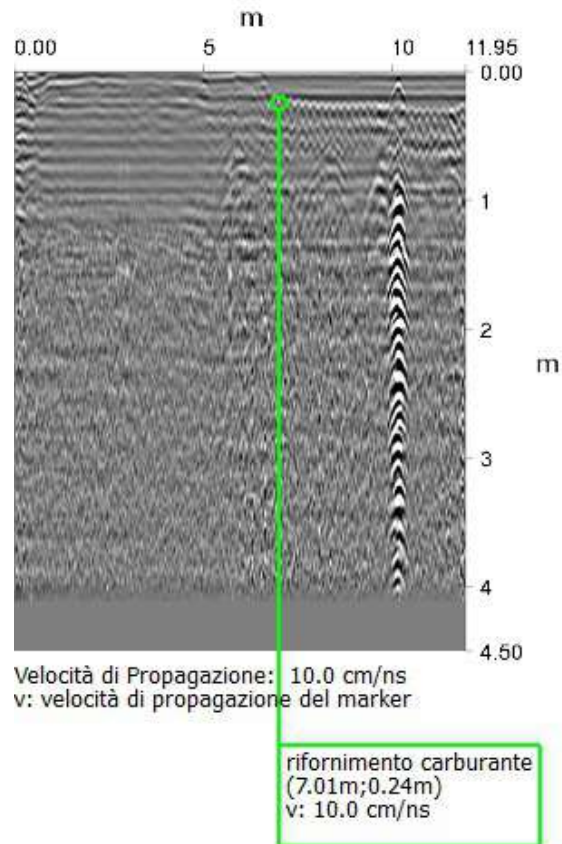


Messa in sicurezza e rifunionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

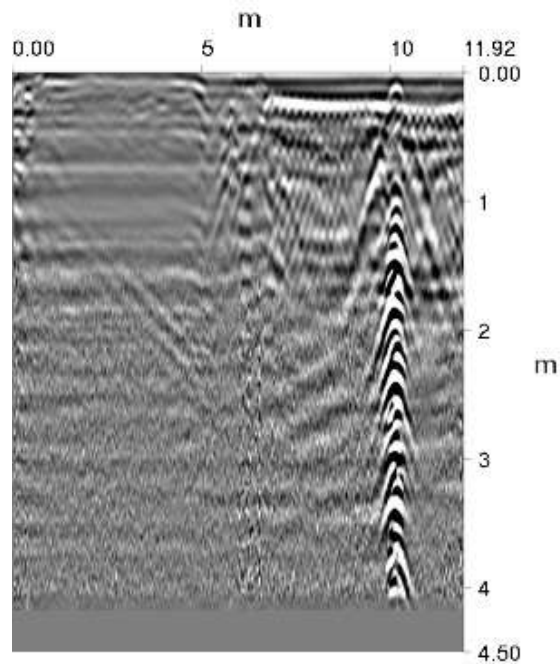
REPORT DI ANALISI DATI

-T11-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

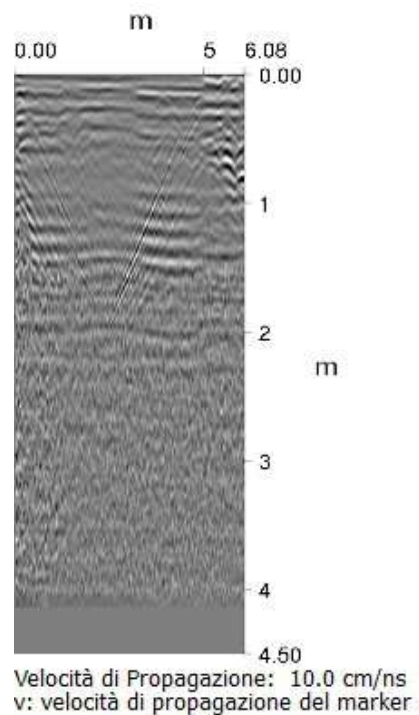


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

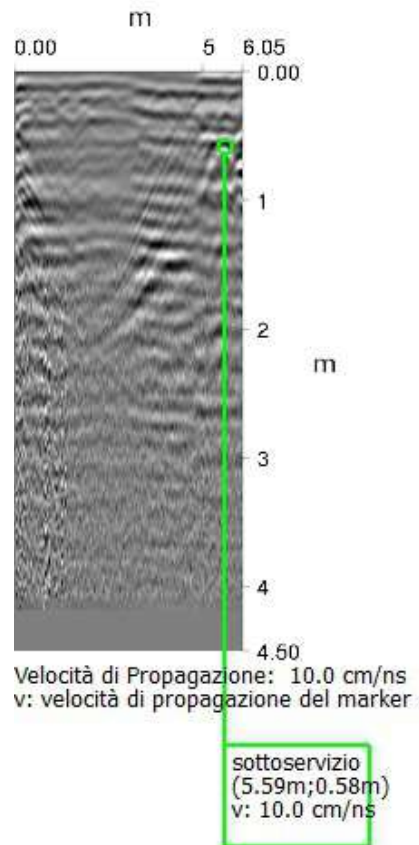
REPORT DI ANALISI DATI

-T12-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



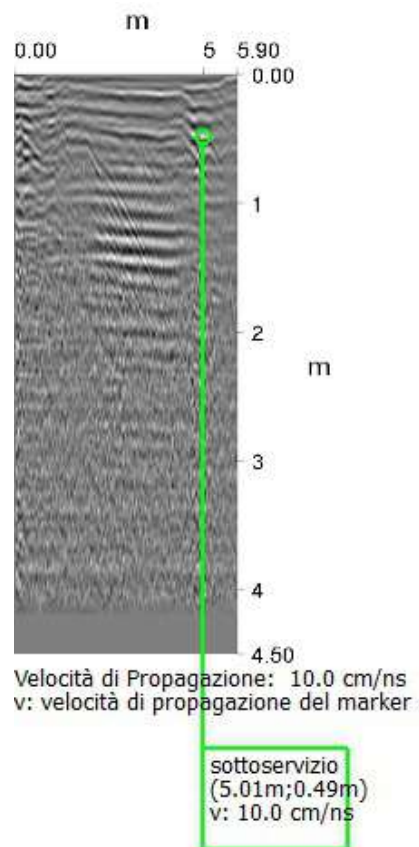


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

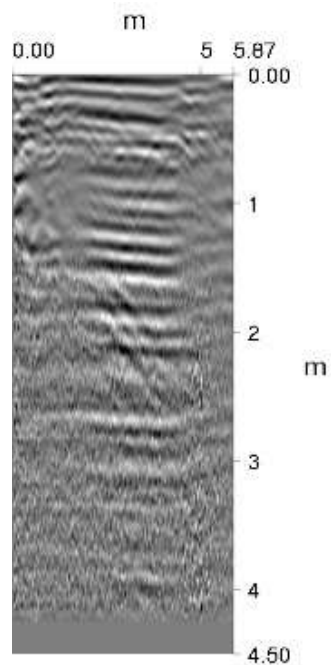
REPORT DI ANALISI DATI

-T13-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Velocità di Propagazione: 10.0 cm/ns
v: velocità di propagazione del marker

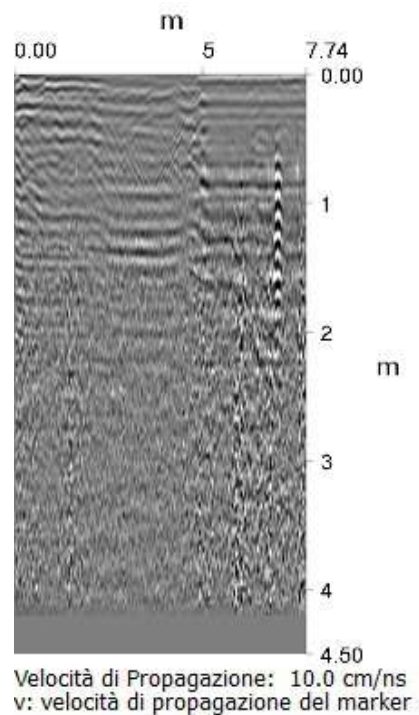


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

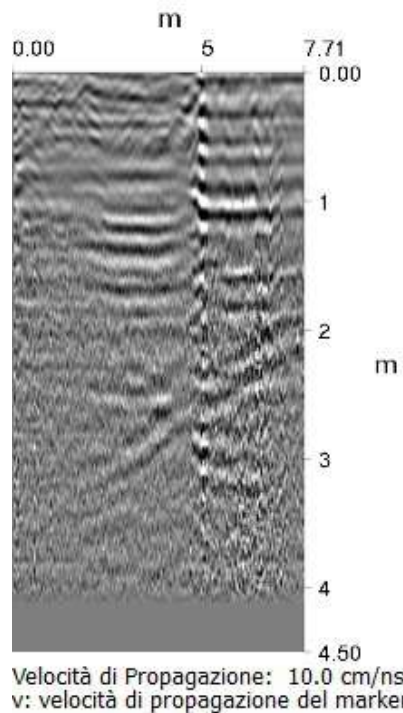
REPORT DI ANALISI DATI

-T14-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



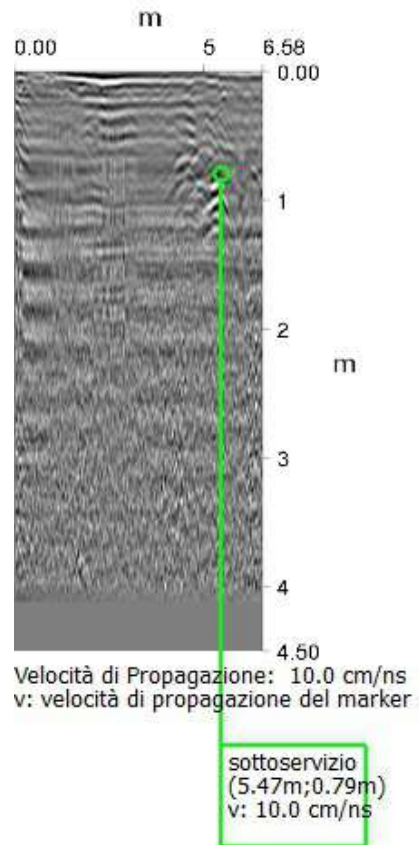


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

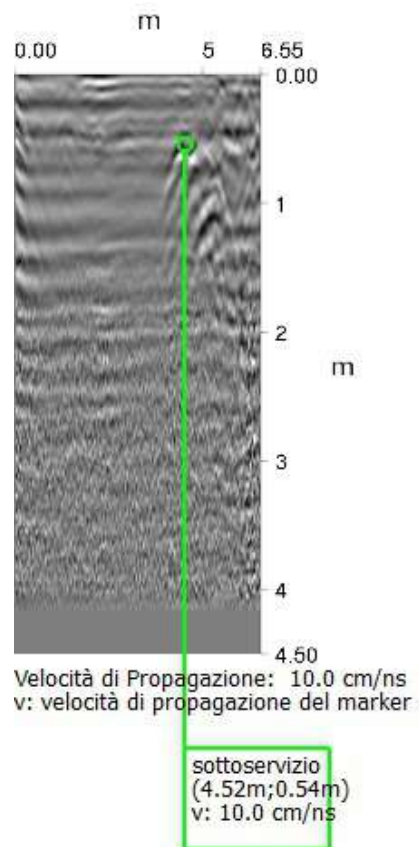
REPORT DI ANALISI DATI

-T15-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



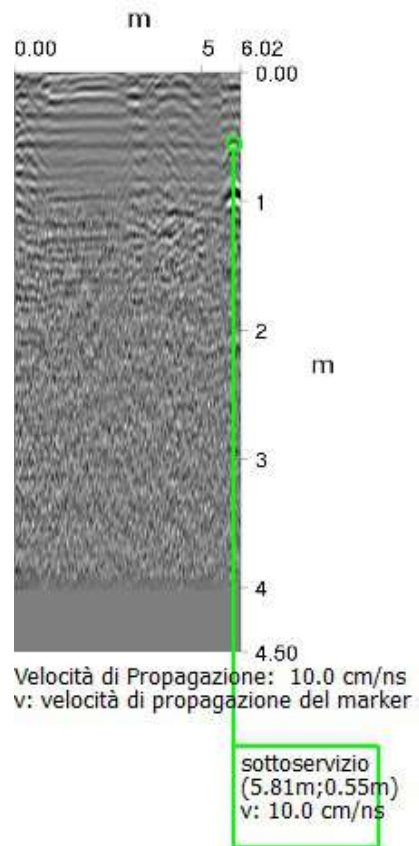


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

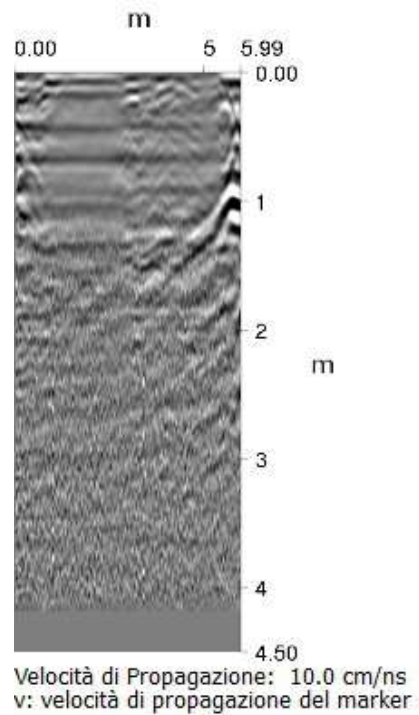
REPORT DI ANALISI DATI

-T16-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



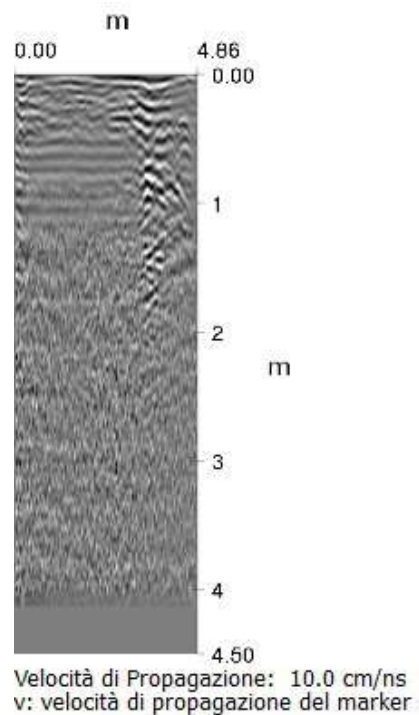


Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della strada di collegamento centro abitato-frazione di Pecorini a mare

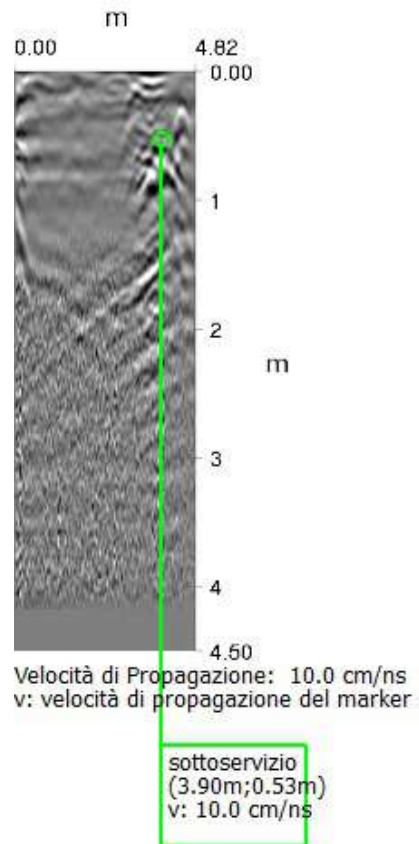
REPORT DI ANALISI DATI

-T17-

**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



**Messa in sicurezza e rifunzionalizzazione della
strada di collegamento centro abitato-frazione
di Pecorini a mare**
Filicudi (ME)



Indicazione planimetrica dei probabili sottoservizi individuati mediante indagine "GPR"

Scala 1: 1000

LEGENDA

- Sottoservizio n.1 - Profondità 0,45-0,79 m
- Sottoservizio n.2 - Profondità 0,42-0,70 m
- Sottoservizio n.3 - Profondità 0,22-0,69 m

