



**PROTEZIONE CIVILE**  
 Presidenza del Consiglio dei Ministri  
 Dipartimento della Protezione Civile

**REGIONE  
 TOSCANA**



Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

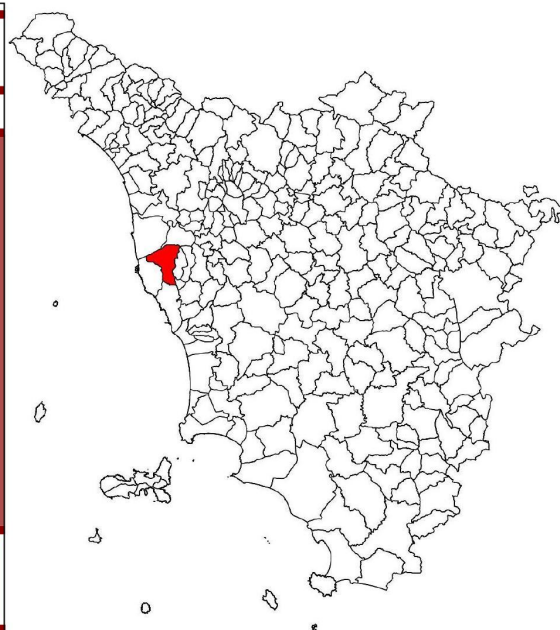
## Livello I e II

### Relazione Illustrativa

Regione Toscana

Comune di Collesalveti

|   |  |
|---|--|
| <b>PIANO STRUTTURALE</b>  |  |
| <small>ai sensi dell'art.92 della Legge Regionale Toscana n.65 del 10 Novembre 2014</small> |  |
| <b>QUADRO CONOSCITIVO</b>   |  |
|   | SINDACO<br><b>Adelio ANTOLINI</b>  |
|   | ASSESSORE ALL'URBANISTICA<br><b>Mila GIOMMETTI</b>   |
|   | COORDINATORE PROGETTISTA E RES.<br>PROCEDIMENTO<br><b>Arch. Leonardo ZINNA</b><br>(Servizio urbanistica) |
|   | <b>All. 1a</b>   |



|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| Regione Toscana | <b>Soggetto realizzatore:</b><br>Geol Sergio Crocetti<br><br><b>Collaboratori MZS:</b><br>Geol. Francesca Biasci<br>Geol Silvia Caccavale<br>Geol. Roberto Maggiore<br><br><b>Collaboratori CLE:</b><br>Ing. Federico Bernardini<br>Ing. Francesca Novelli | Marzo 2019 |
|-----------------|--|------------|

## Sommario

|   |    |
|---|----|
| PREMESSA.....   | 4  |
| 1. INTRODUZIONE .....   | 4  |
| 2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO .....              | 8  |
| 2.1 Cenni storici e considerazioni su "IL TERREMOTO DI ORCIANO" (1846) .....                | 14 |
| 2.2 Cenni storici e considerazioni su "IL TERREMOTO DEL GABBRO" (1950).....                 | 15 |
| 3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....  | 16 |
| 3.1 Inquadramento Geografico.....   | 16 |
| 3.2 Inquadramento Geologico e Geomorfologico .....  | 21 |
| 3.2.1. I dati cartografici .....  | 21 |
| 3.2.2 Definizione di substrato e terreni di copertura. ....                                 | 22 |
| 3.2.3 Evoluzione tettonico-sedimentaria.....  | 25 |
| 3.2.4 Il Substrato geologico.....   | 27 |
| 3.2.5 La geomorfologia .....  | 37 |
| 4.DATI DI SOTTOSUOLO, GEOTECNICI E GEOFISICI.....   | 41 |
| 4.1 Le indagini esistenti .....   | 41 |
| 4.2 Le indagini geofisiche.....   | 42 |
| 4.2.1 Esecuzione della campagna di misure di vibrazioni ambientali a stazione singola ..... | 43 |
| 4.2.2 Esecuzione della campagna di misure di vibrazioni ambientali con antenna sismica..... | 47 |
| 5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO .....   | 49 |
| 5.1 Parrana San Giusto, Parrana San Martino, Pietreto, La Casa .....                        | 49 |
| 5.2 Colognole – Le Case .....   | 54 |
| 5.3 Crocino .....   | 57 |
| 5.4 Castell'Anselmo – Torretta Vecchia .....  | 59 |
| 5.5 Nugola Vecchia-Nugola Nuova .....   | 61 |
| 5.6 Collesalvetti.....  | 64 |
| 5.7 Vicarello .....   | 69 |
| 5.8 Mortaiolo .....   | 72 |
| 5.9 Guasticce-Interporto.....   | 73 |
| 5.10 Stagno .....   | 77 |
| 6. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE .....   | 82 |
| 7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI .....  | 83 |
| 7.1 Classe di qualità della Carta di livello I di MS.....                                   | 83 |
| 8 ELABORATI CARTOGRAFICI .....  | 84 |
| 8.1 Carta delle Indagini .....  | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.2 Carta Geologico-Tecnica - CGT.....                                | 85  |
| 8.3 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)..... | 88  |
| 8.4 Carta di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 2.....             | 99  |
| 10. APPENDICI E TAVOLE .....  | 106 |
| 11. BIBLIOGRAFIA.....   | 107 |

## **PREMESSA**

A seguito dell'ammissione al finanziamento da parte della Regione Toscana con Decreto Dirigenziale G.R.T. n.16585 del 06/11/2017, l'Amministrazione Comunale di Collesalveti ha incaricato con Determina n.6 del 05/03/2018 – Registro Generale n.137, lo studio del Dott. Geol. Sergio Crocetti alla redazione di indagini e studi di microzonazione sismica (MS) di I e II livello, all'analisi per la condizione limite per l'emergenza (CLE) ed all'aggiornamento delle cartografie geologiche di supporto al nuovo Piano Strutturale.

Il sottoscritto ha pertanto provveduto ad aggiornare nei contenuti ed alla luce delle nuove specifiche tecniche lo studio preliminare di microzonazione redatto dall'Università di Siena nel 2014. Nel corso della fase di aggiornamento ed implementazione del precedente studio preliminare di I-II livello sono state eseguite nuove indagini sismiche in situ, rilevamenti geomorfologici sul territorio e reperiti dati che hanno consentito un arricchimento della Carta delle Indagini e dei dati necessari alla modellazione sismo-stratigrafica richiesta per l'attuazione del II Livello.

Infatti la Regione Toscana sulla base delle indicazioni di cui all'art. 5 e 6 dell'Ord. 171/2014, Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 145 del 25 giugno 2014, e in riferimento alle Linee Guida per la Microzonazione Sismica Nazionali ha predisposto le nuove specifiche tecniche regionali per la realizzazione dei suddetti studi di MS recependo come documento tecnico di riferimento gli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome, nonché utilizzando gli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica 4.0 (ottobre 2015).

Tale documento sostituisce integralmente ed amplia le precedenti specifiche tecniche regionali per la redazione degli studi di MS di cui alla Del. GRT n. 971/2013.

Nell'ambito di tale documentazione rientrano le "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)", approvate dalla Conferenza delle Regioni e Province Autonome, nella seduta del 7/5/2015.

## **1. INTRODUZIONE**

L'attività di valutazione su un territorio (alla scala comunale) delle modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico-tecniche locali e dalle condizioni topografiche locali viene chiamata **Microzonazione Sismica (MS)**. Tale attività rientra in un quadro più generale nei programmi di prevenzione e di mitigazione degli effetti di un terremoto, in cui è necessario individuare in via preliminare con criteri speditivi le zone a più elevato rischio sismico da sottoporre a studi particolareggiati. Si definiscono **"condizioni locali di sito"**:

- la geologia e la geomorfologia locale;
- condizioni geotecniche e stratigrafiche locali;
- prossimità ad una faglia sismicamente attiva.



Le condizioni locali di sito sono responsabili degli effetti locali di sito che possono schematicamente essere così riassunti:

- modifica delle caratteristiche dello scuotimento rispetto a quanto definito in termini di pericolosità di base;
- fenomeni di instabilità del terreno.

Per ciò che attiene alla modifica del moto sismico, si tratta di definire la pericolosità sismica locale. Ciò comporta in generale un'amplificazione del moto sismico, la cui causa è riconducibile a motivi stratigrafici (presenza di depositi soffici poggianti su substrato roccioso), topografici (amplificazione del moto sismico lungo pendii o alla sommità di scarpate o pendii) oppure riferibile alla presenza di particolari geometrie sepolte, in grado di modificare le caratteristiche del moto sismico sia in termini di intensità sia per quanto concerne il contenuto spettrale. Per ciò che attiene ai fenomeni di instabilità dei terreni e delle rocce gli aspetti rilevanti sono quelli che riguardano:

- liquefazione e/o densificazione dei depositi sabbiosi;
- eccessivi cedimenti e deformazioni permanenti del suolo;
- instabilità di pendio in terreni e roccia;
- attività di faglia.

Danni consistenti possono ricorrere quando la frequenza di risonanza di un terreno (depositi alluvionali, falde di detrito) raggiunta durante un evento sismico corrisponde a quella propria dell'edificio (fenomeno della doppia risonanza).

Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di MS può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabilità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico. In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3:

- il **livello 1** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, esecuzione di nuove indagini in situ e realizzazione di elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee;
- il **livello 2** introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di Microzonazione Sismica (MS);
- il **livello 3** restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

La microzonazione sismica di primo livello di approfondimento, così come descritta negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica dalla Conferenza delle Regioni e delle

Province Autonome (ICMS - 2008) con le integrazioni richieste dalla Regione Toscana (<http://www.regione.toscana.it/-/specifiche-tecniche-regionali-per-la-microzonazione-sismica>), rappresenta innanzitutto uno strumento di conoscenza del territorio in rapporto alle possibili problematiche indotte dall'occorrenza di eventi sismici potenzialmente distruttivi (carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica o MOPS). In seconda istanza fornisce informazioni importanti per attività di pianificazione territoriale volte alla riduzione del rischio sismico. Infine serve alla pianificazione delle ricerche necessarie alla realizzazione delle carte di microzonazione sismica di II livello e, laddove necessario, di III livello. Queste ultime conterranno elementi di carattere quantitativo non richiesti nelle carte di I livello.

Nello specifico la MS individua e caratterizza:

- **Le Zone Stabili:** sono zone nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato sismico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata) e pertanto gli scuotimenti attesi sono equivalenti a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- **Le Zone stabili suscettibili di amplificazione sismica:** sono le zone in cui il moto sismico viene modificato a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- **Le Zone di attenzione per le instabilità:** sono le zone suscettibili di attivazione dei fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale).

In linea di principio, la carta di I livello non determina alcuna forma di prescrizione sull'uso del territorio, quanto piuttosto orienta il pianificatore nella identificazione di possibili criticità che richiedono particolari cautele in fase di progettazione o nella definizione dei possibili priorità negli interventi di ripristino o rinforzo alle strutture; mentre il II livello, nel quale si introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee mediante metodologie di analisi numerica di tipo semplificato (abachi regionalizzati, modellazione 1D, leggi empiriche) e l'esecuzione di ulteriori e più mirate indagini, è finalizzato alla stesura della vera e propria "Carta di Microzonazione Sismica".

La procedura utilizzata per la realizzazione delle carte tematiche richieste si sviluppa tutta all'interno degli Indirizzi e Criteri citati sopra, e la stesura finale della Carta delle MOPS e della Microzonazione Sismica sono il frutto di una lettura e interpretazione attenta sia delle indagini effettuate nel corso degli anni nella zona di studio sia di esperienze dirette di campagna le quali sono state fondamentali per un aggiornamento della carta geologica – geomorfologica punto fondamentale di partenza per la realizzazione di tutte le conseguenti carte derivate.

Le tabelle sottostanti sintetizzano le modalità operative ed i criteri utilizzati per la stesura del Livello 1 applicato ai centri abitati (Collesalveti, Stagno, Vicarello, Guasticce e Nugola, Parrana San Martino, Parrana San Giusto e Colognole) e del Livello 2 applicato

esclusivamente ai principali centri abitati (Collesalveti, Stagno, Vicarello, Guasticce e Nugola).

### LIVELLO 1

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>INDAGINI MINIME OBBLIGATORIE</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Raccolta di tutti i dati pregressi esistenti nell'area</u>: rilievi geologici, geomorfologici, geologico-tecnici, indagini geofisiche, sondaggi e stratigrafie desunte da pozzi;</li> <li>• <u>Rilevamenti geologici di controllo sul terreno</u>;</li> <li>• <u>Nuove indagini</u>: Esecuzione di ulteriori indagini geofisiche e geotecniche, qualora la raccolta dei dati pregressi non consenta la ricostruzione di un quadro conoscitivo sufficientemente attendibile rispetto agli obiettivi del livello 1;</li> <li>• <u>Misura passive del rumore ambientale</u>, mediante tecnica a stazione singola;</li> </ul> |
| <b>ANALISI ED ELABORAZIONI</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Sintesi dei dati e delle cartografie disponibili</u>;</li> <li>• <u>Rilettura, sintesi dei dati ed eventuali nuovi rilievi geologici</u>.</li> </ul>  |
| <b>PRODOTTI FINALI OBBLIGATORI</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Carta delle indagini</u> (sia esistenti che di nuova realizzazione);</li> <li>• <u>Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000;</li> <li>• <u>Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000;</li> <li>• <u>Relazione tecnica illustrativa della carta MOPS</u>;</li> <li>• <u>Carta delle frequenze fondamentali dei depositi</u>.</li> </ul>  |

### LIVELLO 2

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <b>INDAGINI MINIME OBBLIGATORIE</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Programmazione ed esecuzione di nuove indagini</u>: indagini geofisiche attive di superficie, prove geofisiche in foro, sondaggi geognostici, prove geotecniche in situ e in laboratorio</li> </ul>  |
| <b>ANALISI ED ELABORAZIONI</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Correlazioni e confronto con i risultati del livello 1</u>,</li> <li>• <u>Definizione del modello geologico-tecnico di sottosuolo</u>,</li> <li>• <u>Utilizzo di abachi regionali per i fattori di amplificazione, abachi e formule empiriche per le instabilità di versante e per la liquefazione</u>.</li> </ul>   |
| <b>PRODOTTI FINALI OBBLIGATORI</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Carta delle indagini</u>, implementata rispetto a quella del livello 1 con le nuove indagini;</li> <li>• <u>Carta di Microzonazione Sismica</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000 (compresa l'eventuale revisione della cartografia di MS di livello 1);</li> <li>• <u>Relazione tecnica illustrativa della Carta di Microzonazione Sismica</u>.</li> </ul> |

Fa parte del presente studio di MS, anche l'analisi della **Condizione Limite per l'Emergenza (CLE)**, che è stata redatta dall'Ing. Federico Bernardini.

L'analisi della CLE è stata introdotta a partire dalla seconda annualità (O.P.C.M.4007/2012) del "Fondo per la prevenzione del rischio sismico" istituito ai sensi dell'art. 11 della Legge n. 77/2009 ("Decreto Abruzzo"), in concomitanza alla redazione degli studi di Microzonazione sismica, al fine di incentivare e promuovere tutte le iniziative volte al miglioramento delle attività di emergenza a seguito di eventi sismici. Le analisi, una volta realizzate, devono essere recepite all'interno dei Piani di Emergenza comunali o intercomunali, al fine di poter individuare le eventuali criticità nel corso della fase emergenziale.

Tra le diverse condizioni limite definibili per gli insediamenti urbani, la CLE corrisponde a quella condizione per cui, a seguito di un evento sismico, l'insediamento urbano nel suo complesso subisce danni fisici e funzionali tali da condurre all'interruzione di quasi tutte le funzioni urbane presenti - compresa la residenza - ma conserva la funzionalità della maggior parte delle funzioni strategiche per l'emergenza e la loro connessione ed accessibilità rispetto al contesto territoriale.

Tale analisi comporta:

- l'individuazione degli edifici e delle aree che garantiscono le funzioni strategiche per l'emergenza;
- l'individuazione delle infrastrutture di connessione tra gli elementi di cui al punto precedente e di accessibilità rispetto al contesto territoriale;
- l'individuazione degli aggregati strutturali e delle singole unità strutturali che possono interferire con le infrastrutture di connessione e accessibilità.

## 2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

Secondo l'aggiornamento della classificazione sismica della Regione Toscana pubblicato con Delibera GRT n.421 del 26/05/2014, il territorio comunale di Collesalvetti ricade nella Zona3:

[http://www.regione.toscana.it/documents/10180/11700788/Delibera\\_n.421\\_del\\_26-05-2014-Allegato-1.pdf/bfac6954-8d04-43ef-b7ff-4455b5744043](http://www.regione.toscana.it/documents/10180/11700788/Delibera_n.421_del_26-05-2014-Allegato-1.pdf/bfac6954-8d04-43ef-b7ff-4455b5744043) (Fig. 1).

Nell'ambito di questa classificazione, il territorio di Collesalvetti viene quindi indicato come soggetto a classificazione sismica ma caratterizzato da livelli di pericolosità relativamente ridotti.



Figura. 1 Classificazione sismica delle Regione Toscana. In rosso la posizione del Comune di Collesalvetti

Nella Carta di Pericolosità Sismica dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) le accelerazioni massime orizzontali caratterizzate da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni risultano, per il Comune Collesalvetti, comprese tra 0,125 e 0,150 g (Fig. 2).

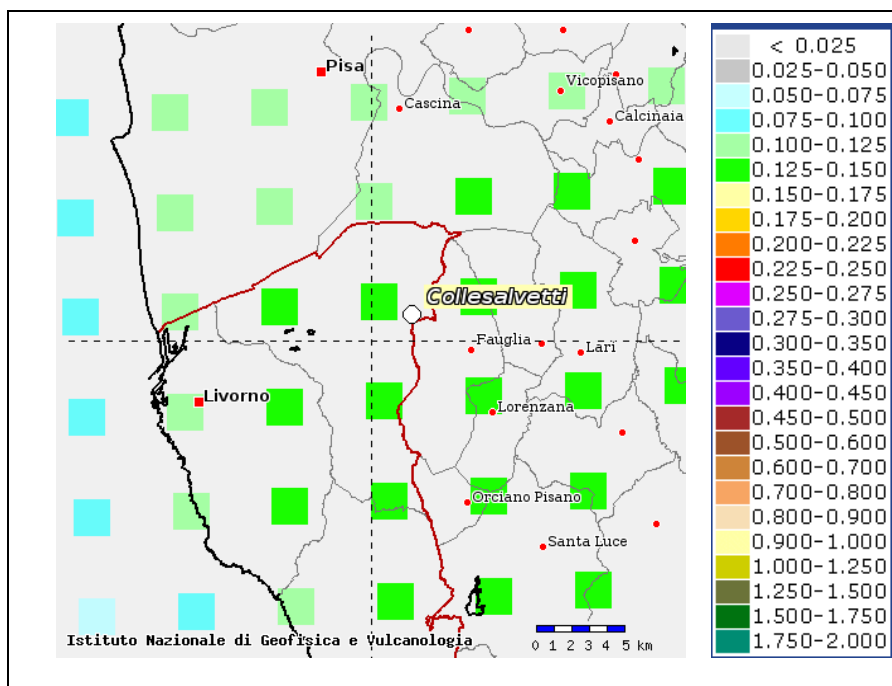


Figura 2. Carta di pericolosità sismica dell'area della Toscana Nord Occidentale. I colori si riferiscono alle accelerazioni orizzontali (in frazioni dell'accelerazione di gravità) caratterizzate da una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

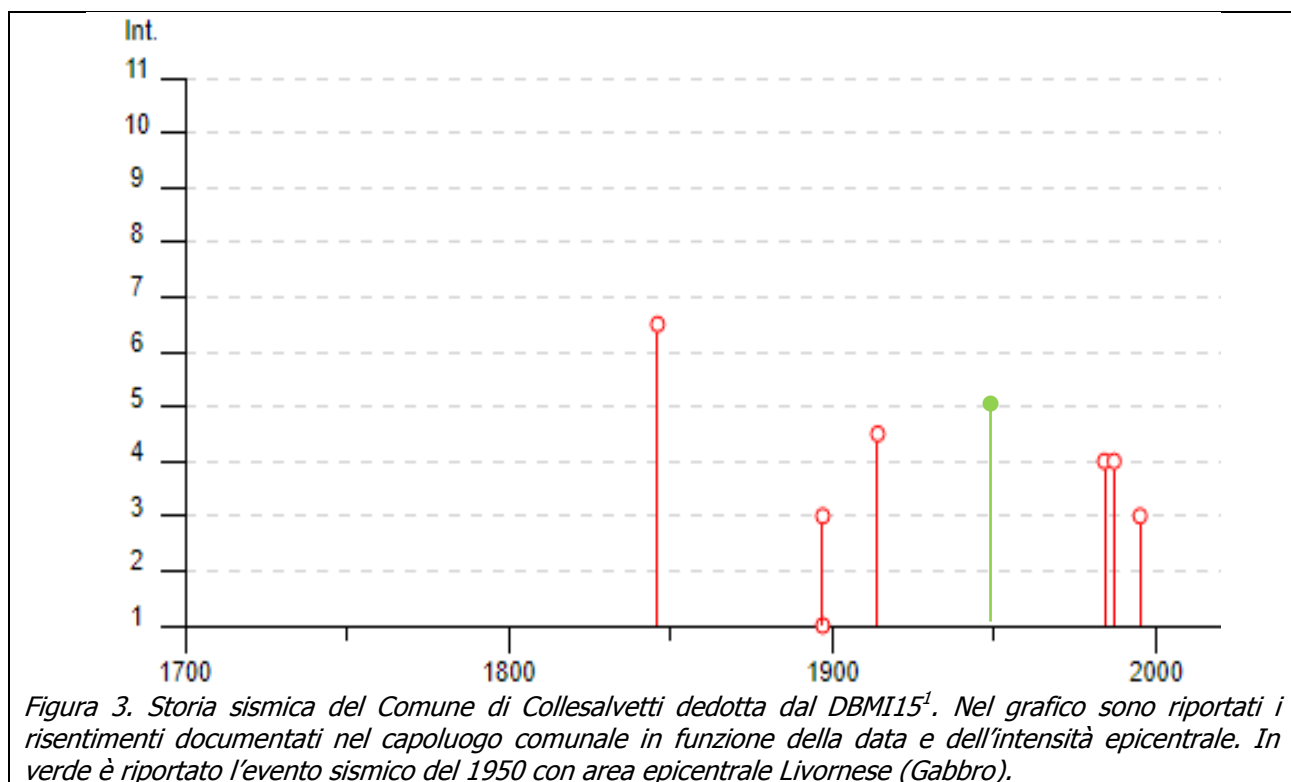


Figura 3. Storia sismica del Comune di Collesalvetti dedotta dal DBMI15<sup>1</sup>. Nel grafico sono riportati i risentimenti documentati nel capoluogo comunale in funzione della data e dell'intensità epicentrale. In verde è riportato l'evento sismico del 1950 con area epicentrale Livornese (Gabbro).

Il primo passo per la definizione della pericolosità è la conoscenza dei dati di intensità macrosismica presenti nel Database Macrosismico Italiano la cui ultima versione è il DBMI15, rilasciato a Luglio 2016 dall'INGV; all'interno del catalogo possono essere selezionati gli eventi di maggiore rilevanza che hanno interessato una data località.

In Fig. 3 è riportata la storia sismica del Comune di Collesalvetti così come dedotta dal DBMI15. Le informazioni disponibili riguardano il periodo successivo al 1800 per il quale nel territorio comunale sono documentati sette eventi principali tra i quali quello avvenuto nel 1846 è il più significativo con intensità epicentrale MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg)  $I_0 = 9$ .

Nella Tabella 1 sono invece riportate le indicazioni di dettaglio riguardo ai principali terremoti documentati nel territorio comunale. Su un totale di sette eventi, si evince che due sono stati caratterizzati da sorgenti sismiche poste nell'area di Livorno (eventi 1984 – 1987) ed uno nella zona delle Colline Pisane; quest'ultimo risulta essere l'evento più antico e più potente supposto nell'area di Collesalvetti.

| Effetti | In occasione del terremoto del |    |    |    |    |    |                        |      |     |      |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|------------------------|------|-----|------|
| Int.    | Anno                           | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale       | NMDP | Io  | Mw   |
| 6-7     | 1846                           | 08 | 14 | 12 |    |    | Colline Pisane         | 121  | 9   | 6.04 |
| NF      | 1897                           | 05 | 15 | 13 | 42 | 3  | Tirreno meridionale    | 85   | 5   | 4.52 |
| 3       | 1897                           | 09 | 06 | 03 | 10 | 4  | Valdarno inferiore     | 104  | 5-6 | 4.59 |
| 4-5     | 1914                           | 10 | 27 | 09 | 22 |    | Lucchesia              | 660  | 7   | 5.63 |
| 4       | 1984                           | 04 | 22 | 17 | 39 | 2  | Costa pisano-livornese | 39   | 6   | 4.61 |
| 4       | 1987                           | 01 | 22 | 05 | 10 | 5  | Costa pisano-livornese | 157  | 5-6 | 4.15 |
| 3       | 1995                           | 10 | 10 | 06 | 54 | 2  | Lunigiana              | 341  | 7   | 4.82 |

Tabella 1. Dettagli relativi agli eventi sismici principali che hanno interessato il Comune di Collesalvetti.

Seppur non riportato tra gli eventi sismici principali che hanno coinvolto il Comune di Collesalvetti, un ulteriore sisma da considerare per gli effetti risentiti nel territorio comunale è quello storicamente noto come "Terremoto del Gabbro" avvenuto nel Comune di Rosignano M.mo. Di seguito, in Tabella 2, si riportano le caratteristiche dell'evento:

| In occasione del terremoto del |    |    |    |    |    |                  |      |    |      |  |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|------------------|------|----|------|--|
| Anno                           | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale | NMDP | Io | Mw   |  |
| 1950                           | 04 | 01 |    |    |    | Livornese        | 15   | 6  | 4.99 |  |

Tabella 2. Dettaglio relativo all'evento sismico del Gabbro.

Come integrazione ai dati elencati nel database *DBMI15* citato sopra si fa anche riferimento ad uno studio effettuato dove vengono evidenziati in modo dettagliato una



serie di terremoti avvenuti in un lasso di tempo dal 1168 al 1975 con collocazione epicentrale nell'area Livorno o nelle zone limitrofe. Tuttavia questo non aggiunge nulla alle conoscenze più aggiornate e riportate nel database DBMI15: riguardo agli effetti di questi eventi nel comune di Collesalveti le documentazioni disponibili sono solo relative agli eventi in Tabella 1.

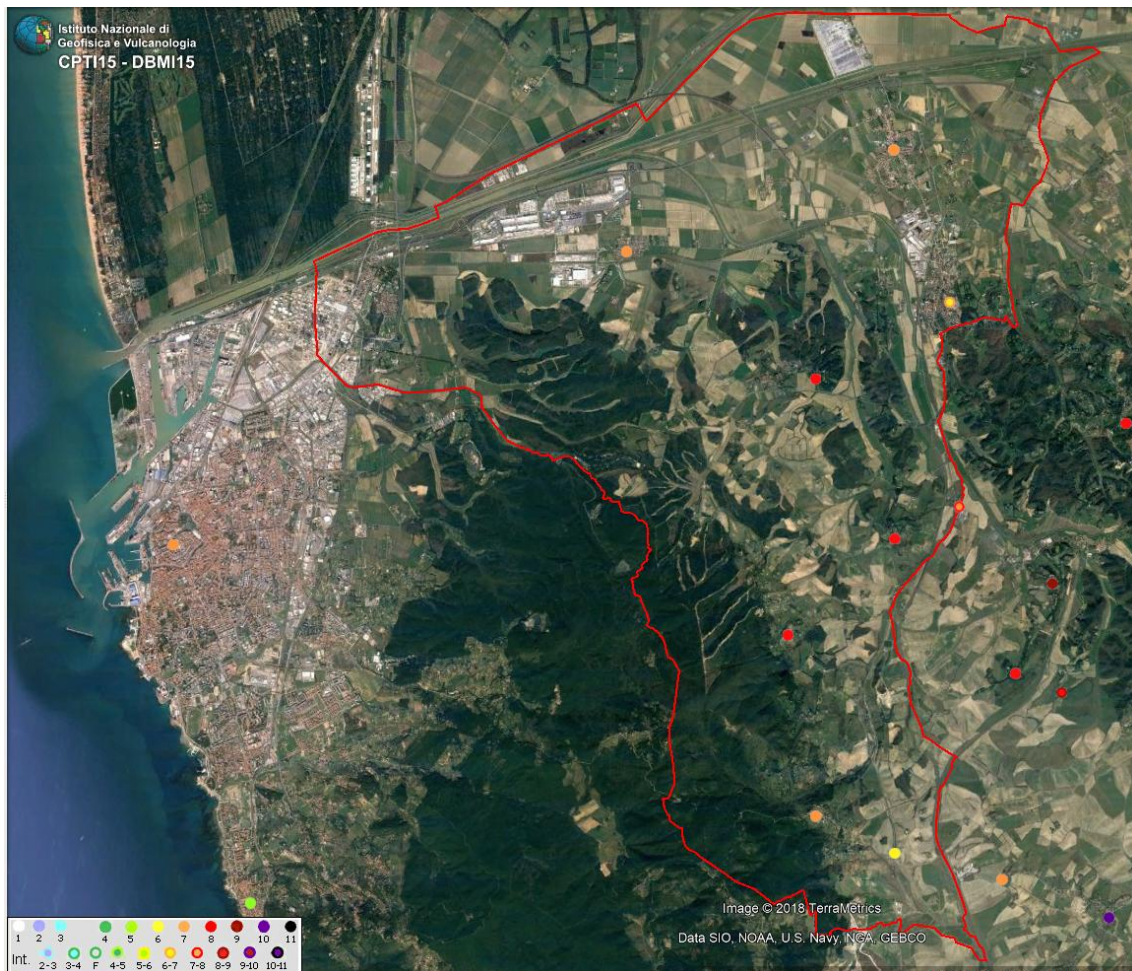


Figura 4. Distribuzione delle intensità massime osservate nel territorio comunale in occasione del terremoto delle Colline Pisane del 14/08/1846 (Fonte DBMI15)

Per la valutazione delle faglie attive e capaci sono state utilizzate le informazioni contenute nel progetto ITHACA (ITaly HAZard from CApable faults) sviluppato dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA (<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>) e quelle riportate nel DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) sviluppato dall'INGV (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>). Il catalogo ITHACA (Fig. 5) riporta la presenza di possibili lineamenti attivi nel settore più a nord lungo il versante sud-occidentale dei Monti Pisani ed al di sotto della pianura di Pisa anche se la loro individuazione è problematica e controversa.



Figura 5. *Faglie capaci riportate nel progetto ITHACA - CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI elaborato dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA. In rosso il territorio comunale di Collesalveti.*

Nell'ambito del progetto DISS è indicata una possibile sorgente sismogenetica (DISS-ID ITIS066 Orciano Pisano) definita principalmente sulla base dell'attività tettonica connessa all'evento sismico del 1846 e perfezionata dalla sequenza sismica del 1984. Questo modello è considerato coerente con la presenza di una faglia attiva/capace lungo il versante orientale delle Colline Livornesi. Quest'ultima corrisponderebbe alla faglia bordiera dei cosiddetti graben mio-pliocenici della Toscana già noti in letteratura (es. Mazzanti 1984, Carmignani et al., 1994, 2001). La Toscana costiera è infatti caratterizzata da una successione di pilastri (horst) e fosse tettoniche (graben), separate da fasci di faglie dirette con direzione appenninica.

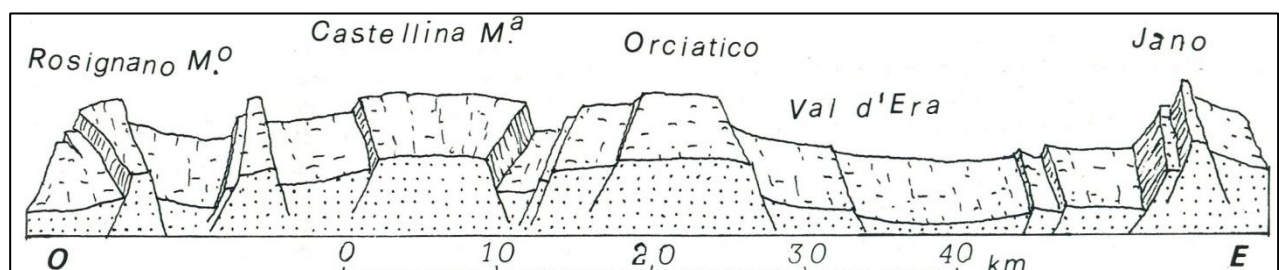


Figura 6. *Esempio di successione horst-graben nella Toscana costiera (da Trevisan e Tongiorni, 1976).*



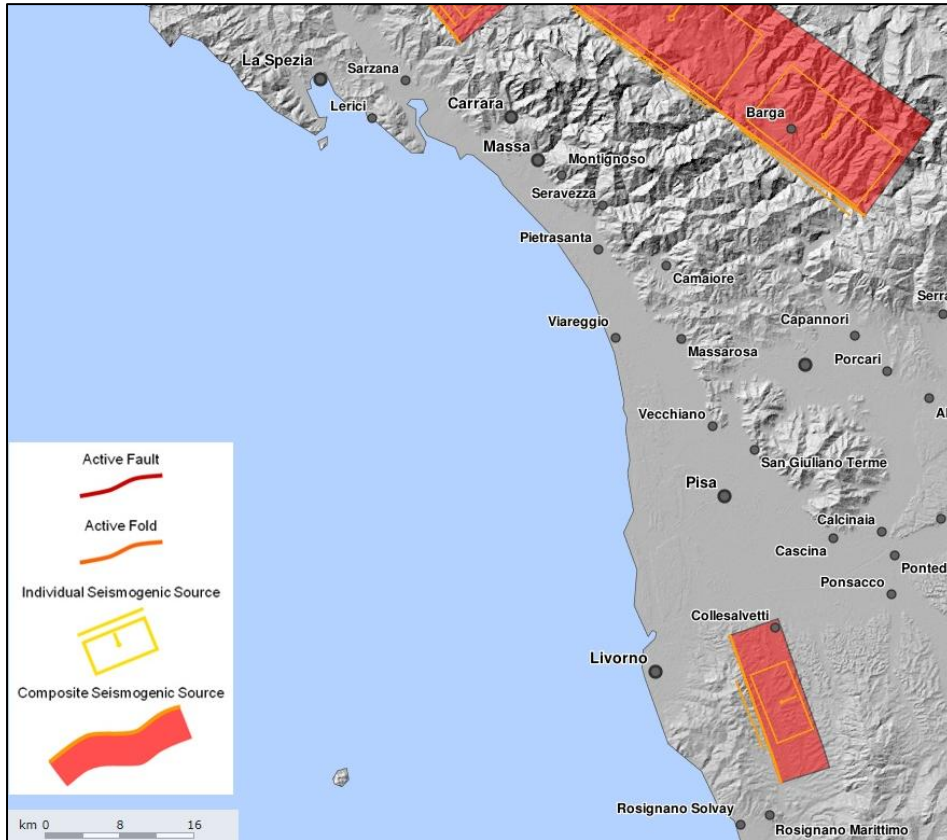


Figura 7. Sorgenti sismogenetiche potenzialmente responsabili dei massimi risentimenti sismici individuate nell'ambito del progetto DISS – Database of Individual Seismogenic Sources realizzato dall'INGV.

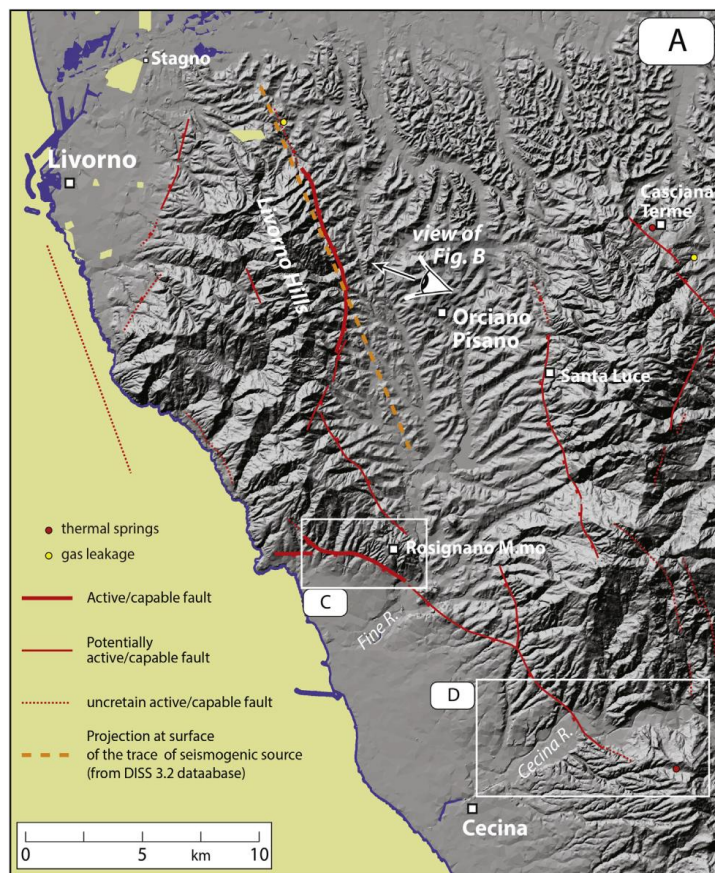


Figura 8. Faglia capace nell'area delle Colline Livornesi-Val di Fine e proiezione della sorgente sismogenetica "Orciano Pisano" sulla superficie (in arancione) (Piccardi et al.,2017)

Secondo gli ICMS è considerata attiva una faglia che si è attivata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni ed è considerata capace quando quest'ultima raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione nel terreno. Dagli studi esistenti e dai rilevamenti di campagna effettuati, nel territorio comunale di Collesalveti non si hanno evidenze di linee tettoniche che abbiano provocato deformazioni della superficie topografica negli ultimi 40.000 anni. È comunque da ritenersi presente la lineazione tettonica appenninica sepolta, attribuita nel corso di questo studio a "faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta)" e sepolta. Tale elemento risulta ad oggi mascherato in campagna dalla discordanza erosiva posizionata tra il contatto dei depositi miocenici e dei terreni pre-miocenici appartenenti alle Unità Liguri.

## **2.1 Cenni storici e considerazioni su "IL TERREMOTO DI ORCIANO" (1846)**

Il sisma del 14 agosto 1846 colpì l'area collinare della Toscana occidentale compresa fra le valli dei fiumi dell'Arno e del Cecina. La scossa più forte durò circa 25-30 secondi e si verificò alle 12:00, seguita da un'altra alle 21:00 del giorno stesso. Gli effetti distruttivi si estesero per una superficie di circa 250 kmq.

Il paese più colpito fu quello di Orciano Pisano, dove il terremoto causò il crollo totale o parziale di tutti gli edifici, anche per le caratteristiche scadenti degli edifici contadini. A Guardistallo e Luciana la maggior parte delle abitazioni subirono danni molto gravi; in altre 18 località, fra cui Livorno e Pisa, ci furono forti danni.

A Livorno il campanile del duomo si lesionò, nella chiesa in costruzione di S. Maria del Soccorso il corpo centrale del fabbricato si spostò di "un centesimo di braccio" (5 mm), la torre del Fanale subì il danneggiamento di 126 cristalli della lanterna, alcune Ville a Montenero riportarono danneggiamenti.

La replica del 27 agosto causò ulteriori danni. Il sisma in porto fu accompagnato da una ondata violenta, nel podere detto "Stagno" si aprì una fessura nel terreno (di oltre 12 braccia – 6 m) dalla quale usciva sabbia verdiccia mescolata a frammenti di conchiglie.

In altre località si aprirono fenditure nel terreno, in particolare una spaccatura lunga 200 m e larga circa 30 cm fu rilevata nel territorio di Rosignano presso la foce del Fine. Nella zona di Lorenzana nelle argille si formarono "conetti" da cui uscirono acqua e sabbia azzurra. Si verificarono dissesti gravitativi e smottamenti a Castellina e Levigliani. A Lari, Lajatico, Casciana e Livorno furono osservati cambiamenti nel regime delle acque sotterranee con formazione di nuove scaturigini e variazioni di colore nelle acque termali. Le repliche alle scosse dell'Agosto 1846 proseguirono con uno sciame che durò fino al dicembre. Secondo le fonti ufficiali vi furono complessivamente 60 morti, di cui 18 ad Orciano; il numero di feriti fu circa 400 e nel solo paese di Pisa ci furono ricoverati 150 feriti provenienti dai paesi limitrofi.

## 2.2 Cenni storici e considerazioni su “IL TERREMOTO DEL GABBRO” (1950)

L'evento sismico del 1 Aprile 1950 rappresenta il terremoto più recente che ha creato i maggiori danni sulle colline livornesi. Il sisma, con epicentro Gabbro, avvenne alle 22.55 e fece registrare un'intensità di 6 gradi della scala Mercalli e magnitudo 5. Le scosse, ad intervalli più o meno brevi, si rinnovarono per una settimana e più, lasciando centinaia di case lesionate o semidistrutte specialmente al Gabbro e negli abitati dei monti Livornesi (Castelnuovo della Misericordia, Nibbiaia, Colognole) (da cronache del Tirreno – Edizione Livorno).



*Foto 1. Tendopoli allestita in occasione del sisma del 1950 (Foto archivio storico Luciano Ciriello)*

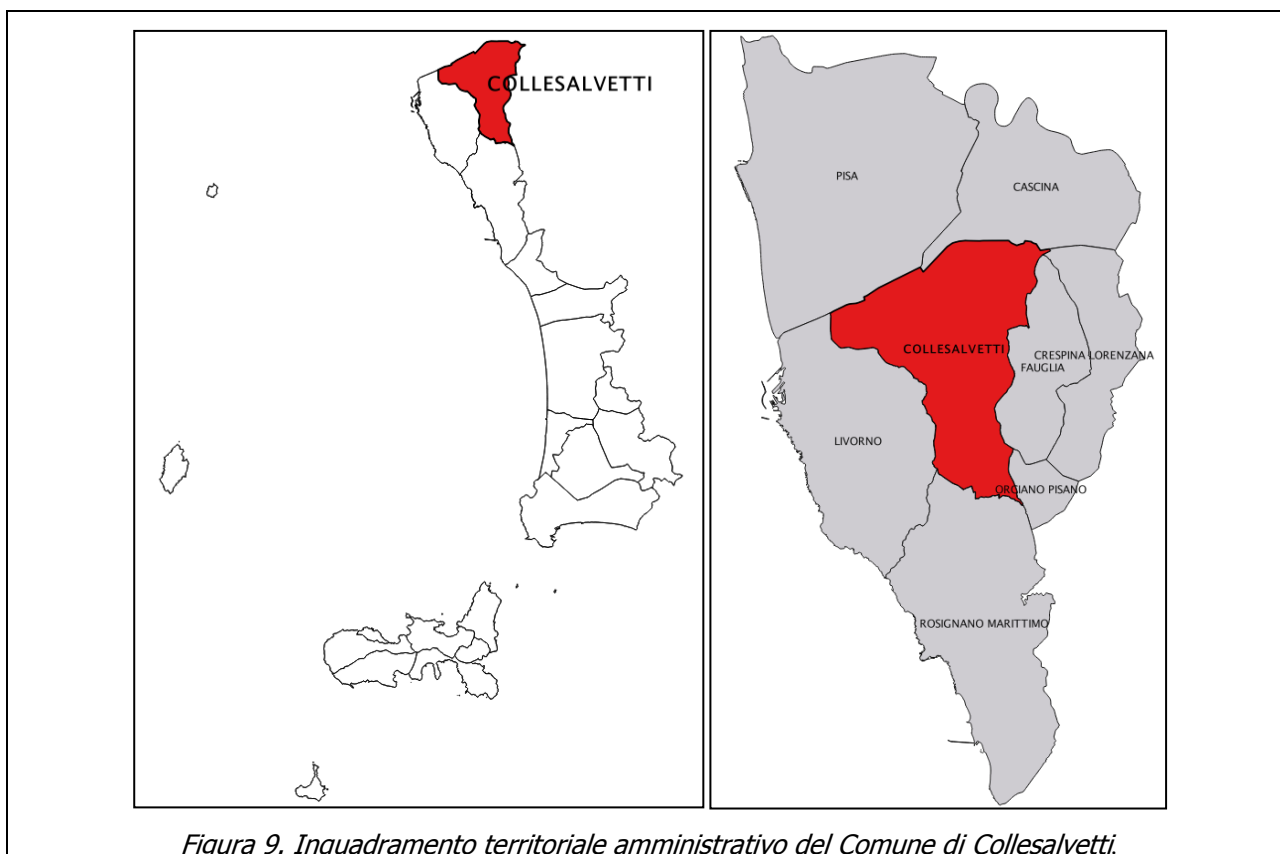


*Foto 2. Edificio puntellato in seguito al sisma del 1950 (Foto archivio storico Luciano Ciriello)*

### 3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

#### 3.1 Inquadramento Geografico

Il territorio oggetto di questo studio è rappresentato dal comune di Collesalveti che si estende per una superficie di circa 110 kmq che confina a Nord con il comune di Pisa e Cascina, ad Est con il comune di Fauglia, Crespina-Lorenzana ed Orciano Pisano, ad Ovest con il comune di Livorno ed a Sud con quello di Rosignano Marittimo (Fig. 9).



Dal punto di vista fisiografico l'area può essere suddivisa in tre principali Unità di Paesaggio:

1. Il settore dei "Monti Livornesi" (Fig. 10) nella parte sudoccidentale del territorio, caratterizzato dall'energia del rilievo più accentuata dell'area, con quote che raggiungono i 460 m s.l.m.m. in corrispondenza di Poggio Lecceta. La forma dei rilievi è prevalentemente simmetrica, con sommità a bassa energia del rilievo o spianate mentre i versanti presentano un'acclività piuttosto elevata. Il reticolo di drenaggio, relativamente denso, è costituito prevalentemente da canali singoli che confluiscono nelle valli principali che sono profondamente incassate nel rilievo. Le testate delle vallecole, prevalentemente con forma a U, è di forma semicircolare a formare delle nicchie. Questa parte del territorio è prevalentemente boscata, si estende da Sud a Nord per circa 5 km da Monte Maggiore a Le Bresciate ed è privo

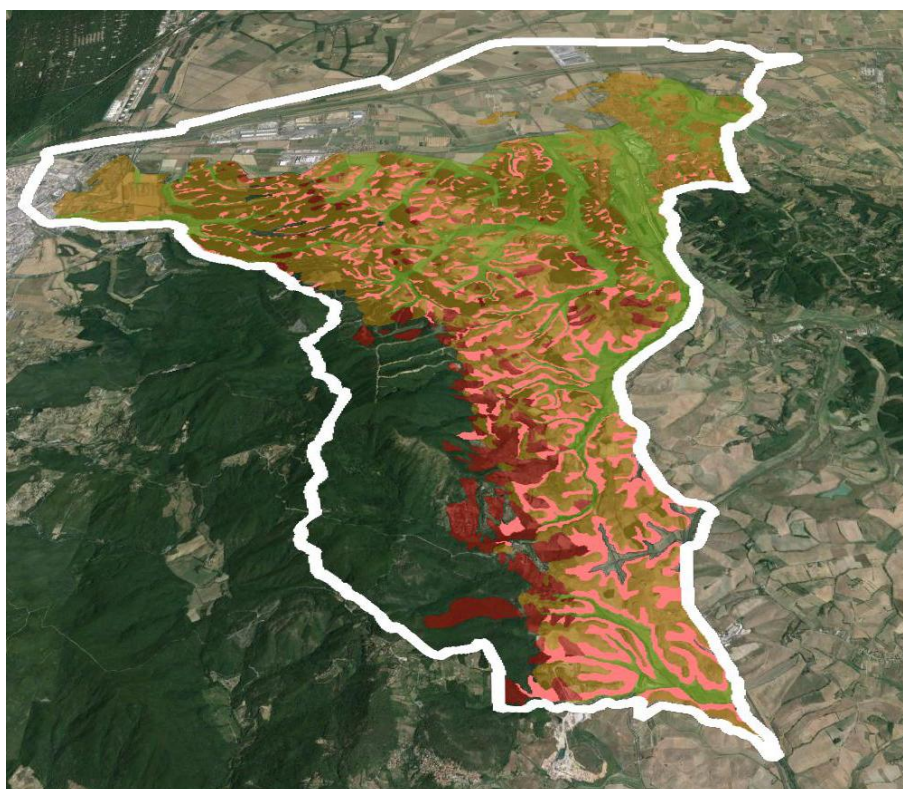


di insediamenti antropici significativi eccezion fatta per alcune abitazioni isolate. Ad est si osserva la brusca rottura di pendio che si realizza con andamento lineare da Staggiano a Sud alla Fattoria di Cordecimo a Nord al piede della quale sono ubicati i principali insediamenti di questa porzione di territorio.



*Figura 10. Vista dei versanti dell'area dei Monti Livornesi da NE.*

2. Il settore "collinare" (Fig. 11) che si estende da sud verso nord fino alla pianura alluvionale dell'Arno e costituisce la gran parte del territorio comunale. Questo è delimitato nella porzione meridionale dai rilievi dei Monti Livornesi. All'interno di questo settore possono essere riconosciuti, sulla base delle forme del rilievo diversi sottosectori:



*Figura 11. Il settore collinare dell'area*

- a. Il settore prossimo alla dorsale montuosa, lungo il quale si allineano i principali centri abitati ubicati alla sommità dei rilievi (Le Case, Colognole, Parrana fino a Pietreto a Nord), dove l'energia del rilievo è maggiore con quote comprese tra 200 e 120 m s.l.m.m.. I corsi d'acqua che drenano verso est uscendo dal settore montano scorrono all'interno di valli molto incise e strette, con fondivalle di

dimensioni limitate. La sommità dei rilievi localmente è costituita da crinali smussati mentre localmente presentano sommità sub orizzontali di maggiore estensione (Fig. 12).



*Figura 12. I rilievi collinari più elevati immediatamente a ENE della dorsale dei Monti Livornesi, visti da NE.*

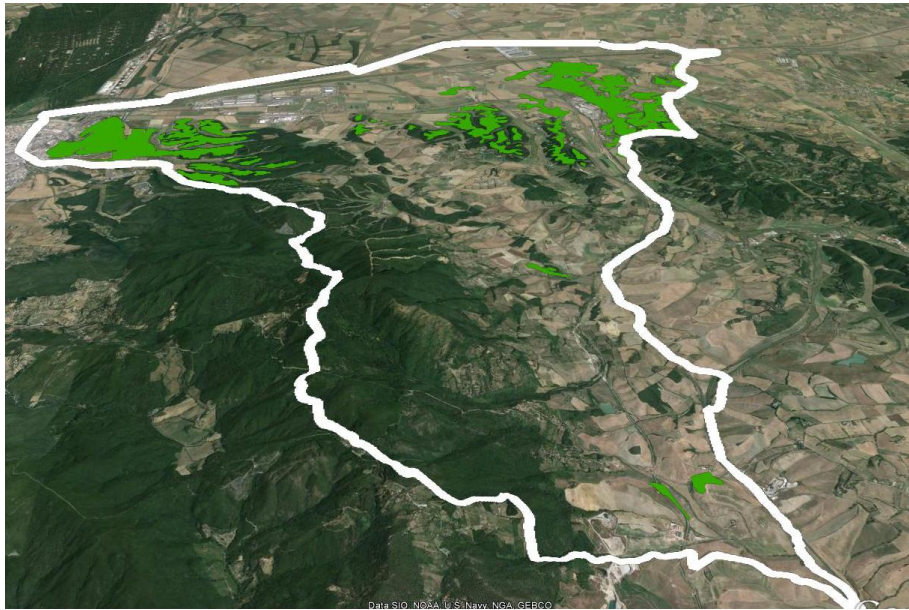
- b. Il settore sudorientale, attraversato dalle valli del T. Salvalano, Cumella, Morra, Vallanico caratterizzato da una minore energia del rilievo, con quote comprese tra 30 e 120 m s.l.m.m. (Castell'Anselmo), versanti ondulati solcati da numerose ampie vallecole a U e valli più ampie con fondovalle pianeggianti più estesi (Figura 13). Questo settore si estende in direzione nord fino alle aree prospicienti la pianura alluvionale dell'Arno, con quote progressivamente decrescenti. I principali insediamenti di quest'area sono Castell'Anselmo e Nugola Nuova-Nugola Vecchia (ubicate alla sommità dei rilievi) e Crocino (ubicato sul fondovalle del T. Morra) oltre a numerose abitazioni o nuclei di abitazioni e insediamenti agricoli sparse sui rilievi e sui fondovalle.



*Figura 13. Caratteristiche morfologie ondulate dei rilievi collinari nel settore più settentrionale dell'area*

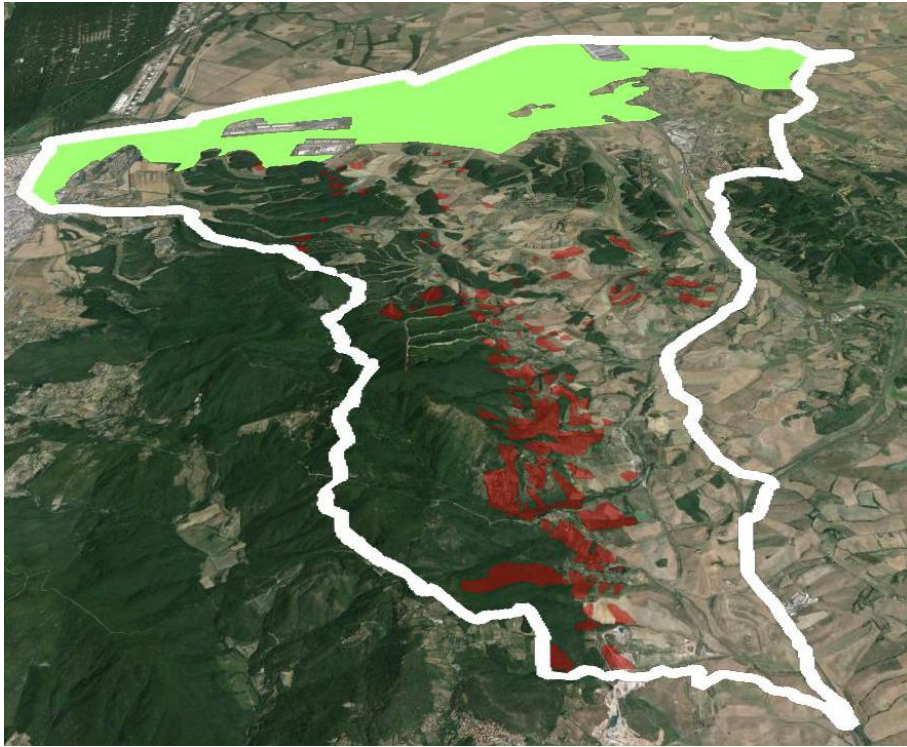


- c. Il settore dei terrazzi alluvionali (Figura 14), prospicienti alla pianura alluvionale dell'Arno, costituito da rilievi con superfici sub pianeggianti che si allungano in direzione S-N con quote decrescenti verso nord. Questo tipo di paesaggio caratterizza prevalentemente il settore orientale, dove sono ubicati i centri abitati di Collesalveti e Vicarello e il settore occidentale dove è ubicato il Villaggio Emilio attraversato anche dal tratto finale della A12 e dalla bretella di collegamento per Livorno.



*Figura 14. In verde i terrazzi alluvionali dell'area.*

- d. Il settore dei fondovalle che drenano verso la pianura dell'Arno. Il principale e più esteso è costituito dal T. Morra che drena verso nord all'interno di una pianura alluvionale pianeggiante che si amplia progressivamente verso nord a partire da Crocino fino a raggiungere Torretta. Altri importanti fondovalle sono quelli del T. Tanna che drena da SO verso NE per deviare bruscamente verso N all'altezza di Nugola e il fondovalle del T. Ugone che drena verso ovest a sud di Stagno. I corsi d'acqua sono regimati e rettificati attraverso arginature artificiali, canalizzazioni e regimazioni. Lungo il fondovalle del T. Tanna e del T. Morra-Tora corre l'A12 e la ferrovia mentre il fondovalle del T. Morra-Tora all'altezza di Collesalveti è sede di insediamenti commerciali e produttivi.
3. La pianura alluvionale dell'Arno (Fig. 15). Caratterizza il settore settentrionale del territorio comunale e si estende per circa 15 km da E (Grecciano) verso O (Stagno). E' caratterizzata da una morfologia pianeggiante a quote comprese tra 5 e 1 m s.l.m. La pianura è caratterizzata dalla presenza del canale scolmatore dell'Arno che scorre all'interno di imponenti argini artificiali e del T. Tora, anch'esso arginato artificialmente. Lungo la pianura sono ubicati i centri abitati di Mortaiolo, Guasticce e Stagno ed inoltre sono presenti importanti infrastrutture quali la SGC FI-PI-LI, la A12 oltre alle aree dei principali insediamenti industriali.



*Figura 15. In verde chiaro la pianura alluvionale dell'Arno nel settore settentrionale dell'area*



## 3.2 Inquadramento Geologico e Geomorfológico

### 3.2.1. I dati cartografici

Le tre Unità di Paesaggio descritte sopra corrispondono a tre diversi contesti geologici. Tali contesti si differenziano essenzialmente in base al tipo di rocce affioranti che sono il riflesso della complessa storia tettonica, sedimentaria e geomorfologica che hanno condotto al modellamento del paesaggio attuale.

La Carta Geologica dell'area è stata realizzata attraverso la consultazione ed integrazione dei dati esistenti e l'esecuzione di rilevamento ex-novo in corrispondenza dei centri abitati finalizzati alla definizione di alcuni aspetti importanti in prospettiva sismica.

La Legenda dei terreni affioranti si basa sulla Legenda del *Continuum Geologico della Regione Toscana in scala 1:10.000* (Regione Toscana-Servizio Cartografico, 2011), che è stato ritenuto essere il documento cartografico di sintesi più recente disponibile ed univoco per la Regione Toscana. Pertanto il presente studio, aggiorna la redazione dell'ultima versione della Carta Geologica del Comune di Collesalveti, redatta dall'Università di Siena nel 2014, nonché prende in considerazione anche i dati derivanti dalla letteratura e dalle cartografie esistenti (*Carta Geologica dei Comuni di Livorno e di Collesalveti in scala 1:25:000*; Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1990; Lazzarotto et al., 1990; *Cartografia Geologica e Geomorfológica del Piano Strutturale del Comune di Collesalveti*, Crocetti S. e Tocchini C. - 2004).

I rilevamenti ex-novo sono stati mirati

- 1) alla caratterizzazione dei corpi rocciosi dal punto di vista litotecnico (addensamento, consistenza, cementazione, fratturazione etc..)
- 2) alla ulteriore verifica dei limiti dei corpi franosi, della loro tipologia e in alcuni casi del loro stato di attività. Il punto di partenza è stata la più recente cartografia IFFI-PAI oltre a quella comunale esistente redatta nel 2004. Poiché le aree in frana nella Carta delle MOPS costituiscono delle Zone di Attenzione per Instabilità si è ritenuto opportuno aggiornare le carte esistenti.
- 3) Verifica dei limiti dei depositi colluviali, anche in questo caso resosi necessario data la scarsa rappresentazione nelle carte esistenti e al fine di caratterizzare sia le Zone Stabili Suscettibili di amplificazione sia le zone potenzialmente instabili per cedimenti differenziali.
- 4) Verifica ed aggiornamento del rilevamento geomorfologico finalizzato all'individuazione degli elementi utili in prospettiva sismica (terrazzi alluvionali, scarpate di erosione etc..)
- 5) definizione delle lineazioni tettoniche con particolare importanza per la faglia bordiera sepolta dell'area della Dorsale dei Monti Livornesi che dall'analisi dei documenti cartografici poneva qualche dubbio circa la sua reale esistenza e geometria.

### 3.2.2 Definizione di substrato e terreni di copertura.

La descrizione delle Formazioni e delle Unità geologiche che segue si basa sulla distinzione, necessaria in prospettiva sismica, tra Formazioni o Unità del Substrato e Formazioni o Unità cosiddette dei Terreni di Copertura.

All'interno dei documenti ICMS (2009, 2012, 2014 e aggiornamenti) viene riportata la problematica dell'individuazione delle unità del Substrato basata su diverse prospettive.

Nella cartografia geologica classica la distinzione tra "substrato geologico" (SG) e "terreni di copertura in prospettiva geologica" (TCG) viene tradizionalmente e nella maggior parte dei casi effettuata attribuendo a questi ultimi tutte le unità del Quaternario ed in particolare depositi continentali (incluse le frane), costieri o marini, generalmente di limitato spessore e scarsa cementazione.

Nel caso del territorio di Collesalveti (Tab. 3) "SG" è perciò costituito dal Complesso Alloctono Ligure (CAL) e dalle unità mioceniche (UM) e plioceniche (UP) e che costituiscono appunto il substrato su cui poggiano i "Terreni di copertura in prospettiva geologica (TCG)" corrispondenti ai depositi del Quaternario marino (QM), del Pleistocene medio-superiore e dell'Olocene (QC) messi in posto con il definitivo sollevamento dell'area.

Tuttavia in prospettiva sismica la distinzione tra "substrato sismico" (SS) e "terreni di copertura in prospettiva sismica" (TCS) viene effettuata sulla base del valore di  $V_s$ , il cui limite è arbitrariamente posto a 800 m/s per le porzioni non alterate. Una ulteriore definizione di substrato (substrato ingegneristico) in realtà non pone limiti arbitrari di  $V_s$ , che devono essere definiti e valutati caso per caso, ma introduce anche il concetto topografico di superfici sub-pianeggianti.

Nel caso di Collesalveti la scarsità di indagini sismiche disponibili nelle aree montante non abitate, nonché le risultanze di quelle pregresse e di quelle *ex-novo* non hanno consentito di identificare alcun substrato sismico (SS), in quanto anche le formazioni litoidi affioranti sui Monti Livornesi del Complesso Ligure Alloctono (CAL) presentano in superficie valori di  $V_s < 800$  m/sec; i terreni miocenici (UM), pliocenici (UP) e quaternari marini (QM), stratigraficamente sovrastanti, mostrano sempre valori di  $V_s$  più bassi e possono essere quindi classificati come TCS.

L'informazione riguardante l'attribuzione o meno al SG o SS è contenuta nei valori delle tabelle tipo\_gt che identificano le categorie litotecniche principali contenute nella Carta Geologico Tecnica. Quindi nell'attribuzione del **tipo\_gt**, funzionale alla riclassificazione e alla definizione della Carta Geologico-Tecnica si usa la distinzione in prospettiva geologica tra Substrato (SG) e Terreni di copertura in prospettiva geologica (TCG).

Successivamente, per la realizzazione della Carta delle MOPS, la riclassificazione viene effettuata in prospettiva sismica, cioè con l'attribuzione del **tipo\_z**, relativo all'individuazione delle Zone Stabili (tipo\_z=10xx) o Stabili Suscettibili di fenomeni di amplificazione (tipo\_z=20xx). Le caratteristiche di Zone di Attenzione per instabilità vengono attribuite con il **tipo\_i**.

In questo caso quindi l'attribuzione del tipo\_z=10xx o 20xx è funzione dell'attribuzione delle unità in prospettiva sismica al substrato (SS,  $V_s > 800$  m/s) o ai Terreni di copertura (TCS,  $V_s < 800$  m/s).

Nella tabella sottostante si riporta l'attribuzione per le varie formazioni alla tipologia di substrato o copertura. Se da una parte il *Continuum Geologico* ha permesso l'omogeneizzazione del dato geologico su tutto il territorio regionale, dall'altra l'accorpamento di più formazioni geologiche aventi caratteristiche formazionali simili fa perdere l'attribuzione delle "formazioni storiche" presenti nelle precedenti legende delle carte geologiche. Pertanto è stata inserita la colonna "ex-formazioni" al fine di agevolare la lettura della carta geologica-tecnica.

|   |   | sigla_cart   | nome_ULF                               | tipo_gt   | Ex-formazioni                                 | Stato  | Gen  |  |  |
|---|---|--|--|---|---|--|--|--|--|
| TCG Terreni di copertura in prospettiva geologica | TCS Terreni di copertura in prospettiva sismica (Vs <800 m/s) | Quaternario continentale QC                              | b                                      | Depositi eluvio - colluviale                                  | SC  | (area della pianura)   | 12   | ec   |  |
|   |   |  | b                                      | Depositi eluvio - colluviale                                  | ML  | (area delle colline)   | 24   | ec   |  |
|   |   |  | bna1                                   | Alluvioni attuali e oloceniche della valle dell'Arno          | SM  | t – sedimenti palustri, alluvionali e di colmata (sabbie di Stagno)  | 13   | cl   |  |
|   |   |  | bna1                                   | Alluvioni attuali e oloceniche della valle dell'Arno          | CL  | t – sedimenti palustri, alluvionali e di colmata (argille di Guasticce)  | 25   | pi   |  |
|   |   |  | bna2                                   | Alluvioni attuali e oloceniche delle valli laterali           | CL  | a – alluvioni attuali  | 24   | pi   |  |
|   |   |  | bnb2                                   | Terrazzi alluvionali del Pleistocene superiore                | SC  | at – alluvioni terrazzate<br>q11- sabbie e limi di Vicarelo<br>q9 – Sabbie di Ardenza<br>q8 – Conglomerati di S. Stefano | 12   | tf   |  |
|   |   |  |  | Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina (non affiorante) | GW  | -  | 11   | dl   |  |
|   |   |  | bnb1                                   | Terrazzi alluvionali del Pleistocene medio - finale           | GM  | q6 – Conglomerati, sabbie e limi di casa Poggio ai Lecci   | 12   | tf   |  |
|   |   | QM   | PLE                                    | Depositi marini e costieri pleistocenici                      | SC  | q3 – Sabbie di Nugola Vecchia<br>q2 – Sabbie ed Argille ad Arctica   | 12   | zz   |  |
|   |   | SG Substrato geologico                                   | S Substrato non sismico (Vs < 800 m/s) | Unità plioceniche UP  | FAAe  | Formazione delle Argille Azzurre - litofacies sabbiosa   | GRS  | p4 – Calcareniti e sabbie ad "Amphistegina"<br>p3 – Sabbie gialle  |  |
|   | FAA   |  |  |   | Formazione delle Argille Azzurre              | CO   | p – Argille Azzurre  |  |  |
|   | Unità mioceniche UM   |  |  | EMO   | Argille e marne con lenti di gesso            | COS  | m5 – Marne e marne argillose<br>m7 - Gessi<br>m8 – Sabbie e conglomerati di Villa Poggio Piano<br>m5 – Marne e marne argillose |  |  |
|   |   |  |  | EMOr  | Arenarie e conglomerati                       |  |  |  |  |
|   |   |  |  | RAQ   | Argille e argille sabbiose con lenti di gesso |  |  |  |  |
|   |   |  |  | ROS   | Calcari, arenarie e conglomerati              | GRS  |  | m4 – Calcari di Castelnuovo<br>m3 – Conglomerati di Villa Mirabella<br>m – Conglomerati rossi e verdi talora lignitiferi |  |
|   | Complesso Alloctono Ligure CAL                                |  |  | MLL   | Formazione di M. Morello                      | LPS  | pe2 - Flysch calcareo-marnoso di Poggio S. Quirico con livelli di Brecce   |  |  |
|   |   |  |  | SIL   | Formazione di Sillano                         | ALS  | c5a – Argilliti varicolori del Fortulla con banchi di brecciole, litidi, calcari a grana fine ed arenarie                      |  |  |
|   |   |  |  | RCH   | Argilliti e calcari di Poggio Rocchino        | ALS  | c6 – Arenarie, siltiti, argilliti con "Phitonella"   |  |  |
|   |   |  |  | OMT   | Flysch di Ottone-Monteverdi                   | LPS  | c7 - Flysch calcareo-marnoso di Monteverdi Mmo   |  |  |
|   |   | OMTa   | Brecce                                 | GR  |   |  |  |  |  |
| APA   |   | Argilliti e calcari silicei "Palombini" (cretaceo inf)   | ALS                                    | c2 – Argilliti e calcari silicei "Palombini"                  |   |  |  |  |  |
| PRN   |   | Peridotiti serpentizzate con filoni gabbrici e basaltici | LP                                     | E - Serpentiniti  |   |  |  |  |  |
| BRG   |   | Basalti con strutture a pillow-lava                      | LP                                     |   |   |  |  |  |  |
| GBB   | Gabbri con filoni basici                                      | LP   | G - Gabbri                             |   |   |  |  |  |  |

Tabella 3. Tabella riassuntiva contenente le informazioni utili alle definizioni (i colori riprendono le tonalità di quelli indicati nella Carta Geologica Tecnica)

### 3.2.3 Evoluzione tettonico-sedimentaria

Le unità più antiche affioranti nell'area sono quelle che caratterizzano il settore dei "Monti Livornesi" dove affiorano le Formazioni del cosiddetto *Complesso Alloctono Ligure* (CAL, Fig. 16), un complesso di rocce sedimentarie e magmatiche (complesso ofiolitifero) depositatesi all'interno dell'oceano Ligure a partire dal Giurassico con la formazione di crosta oceanica (il complesso ofiolitifero) a cui ha fatto seguito la deposizione di rocce sedimentarie di mare più o meno profondo. Successivamente in seguito ad una fase tettonica compressiva denominata Fase Ligure (Cretacico superiore – Eocene medio) le Unità (Elter et alii, 1964) sono state deformate con il coinvolgimento della crosta oceanica e relativa copertura sedimentaria. Durante questa fase tettonica si registrano più eventi deformativi (Elter & Marroni, 1991). Successivamente, a partire dall'Oligocene superiore si realizzano le fasi compressive denominate Toscane durante le quali le Unità Liguri, già strutturate nel ciclo precedente, si accavallano sul Dominio Toscano, non affiorante nell'area di studio. Le faglie e i sovrascorrimenti che interessano queste unità sono relative alle fasi tettoniche descritte e sono perciò da considerarsi inattive.

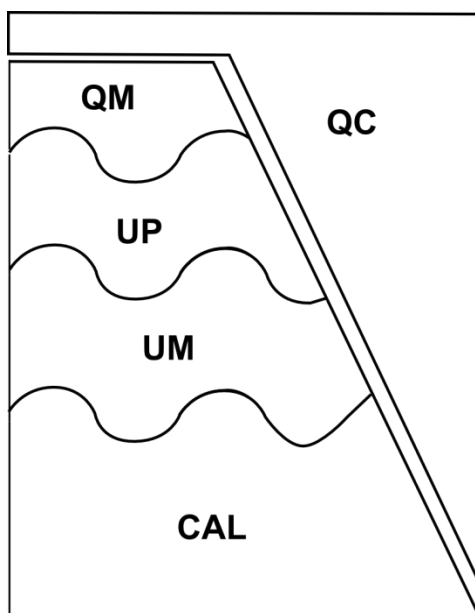


Figura 16. Schema dei rapporti stratigrafici delle Unità geologiche del territorio. CAL – *Complesso Alloctono Ligure*; UM – *Unità mioceniche*; UP – *Unità plioceniche*; QM – *Quaternario marino*; QC – *Quaternario continentale*.

Successivamente alla messa in posto delle unità sopradescritte, a partire dal Messiniano inferiore si osservano le prime evidenze di emersione dell'area con la deposizione della successione miocenica (Unità mioceniche, UM, Fig. 12). Alla base sono presenti i terreni della successione Pre-Evaporitica del Messiniano inferiore costituita da alternanze di conglomerati, sabbie e calcari (ROS) e argille (RAQ) di ambiente continentale, costiero e marino. In continuità o in paraconcordanza si depongono i terreni della successione continentale e costiera Post-Evaporitica del Messiniano superiore costituita da alternanze di argille con gessi (EMO), sabbie e conglomerati (EMOr). A questa fase di emersione fa seguito la trasgressione marina del Pliocene Inferiore con la deposizione in discordanza

angolare della successione costituita dai terreni argillosi (FAA) e sabbioso-conglomeratici (FAAe) della Formazione delle Argille Azzurre (Unità plioceniche, UP, Fig. 16). Le facies indicano ambienti variabili da prossimali a più profondi in relazione alle variazioni eustatiche del livello marino. La tendenza generale della sedimentazione pliocenica è regressiva con un aumento della frequenza e dello spessore delle facies di mare basso verso l'alto della successione. Nell'area questa è testimoniata dalla presenza delle potenti alternanze sabbiose in facies di spiaggia contenenti molluschi di ambiente litorale (es. Nugola) e dalla presenza delle Calcareni ad *Amphistegina* segnalate alla sommità della successione (Castell'Anselmo). La deposizione della successione pliocenica termina con il Piacenziano (Lazzarotto et al., 1990). Un'importante discordanza taglia la successione marina pliocenica ed è seppellita dai depositi marini quaternari (PLE) caratterizzati alla base dalla presenza di *Arctica islandica* ed attribuibile quindi alla seconda parte del Pleistocene Inferiore (ca. 1.8-1.2 Ma) (Quaternario marino, QM, Fig.16). Lo *hiatus* seguito alla deposizione marina pliocenica sarebbe dunque di lunga durata e riferibile con ogni probabilità alle variazioni del livello marino legate alle alternanze di cicli Glaciali e Interglaciali durante il Quaternario. La porzione basale della successione marina pleistocenica è quindi costituita da sabbie e ghiaie di ambiente di spiaggia che indicano la presenza di aree emerse, probabilmente in corrispondenza del settore dei Monti Livornesi. La successione è continua verso l'alto senza importanti discordanze e la sedimentazione mostra la tendenza a diventare più fine (Sabbie di Nugola Vecchia; Lazzarotto et al., 1990b) e gli ambienti diventano variabili tra la spiaggia e la laguna costiera. L'età della deposizione di questi sedimenti è stata attribuita al Pleistocene medio sulla base della presenza di depositi vulcanici al tetto (oggi non più visibili a causa delle attività estrattive) datati circa 0,6 Ma (Lazzarotto et al., 1990b).

La complessa evoluzione sedimentaria a partire dal Messiniano è legata, come già detto, sia alle variazioni eustatiche del livello marino, sia agli eventi tettonici che hanno portato al sollevamento dell'area. La visione classica di questa evoluzione strutturale (es. Lazzarotto et al., 1990b) individua una fase di tettonica distensiva iniziata nel Miocene superiore durante la quale si originarono grandi bacini sedimentari sia marini che lagunari in subsidenza situati all'interno della catena Appenninica in emersione, i cui lembi oggi sono rappresentati dai Monti Livornesi. La tettonica distensiva avrebbe generato dei *graben* o *semi-graben* alternati ad *horst* rappresentato nell'area dalla dorsale dei Monti Livornesi. La tettonica distensiva avrebbe continuato quindi a giocare un ruolo decisivo fino al Pliocene quando la deposizione marina sarebbe avvenuta ancora all'interno di questi bacini subsidenti. Recentemente altri Autori (Coltorti e Pieruccini, 1997; Boccaletti et al., 1999) hanno messo in evidenza come le faglie dirette che bordano i bacini, dove presenti, sono più recenti della sedimentazione plio-pleistocenica e quindi durante il Messiniano-Pliocene i bacini si sono evoluti per fenomeni di subsidenza e progressivo piegamento, legato a fasi tettoniche compressive (Boccaletti et al., 1995) o distensive a basso angolo (Calamita et al., 1999). Questo è il caso dell'area di studio dove il contatto tra le successioni mio-plioceniche lungo il versante orientale dei Monti Livornesi è stato classicamente interpretato come una faglia diretta. Tuttavia indagini di campagna non ne

hanno permesso l'individuazione, ma consentono di ipotizzare una faglia sepolta. Il contatto tra i terreni messiniani e le unità dell'Alloctono Ligure è ovunque discordante e ad alto angolo suggerendo che la deformazione si è verificata a causa del sollevamento differenziale del settore della dorsale rispetto alla subsidenza del settore bacinale. La progressiva deformazione dei terreni messiniani, pliocenici e pleistocenici è indicata anche dall'inclinazione degli strati che tende a diminuire, insieme all'inclinazione delle superfici di discordanza, verso est-nord.

La definitiva emersione dell'area e l'inizio del modellamento del paesaggio attuale è marcato dall'inizio della deposizione all'interno di sistemi vallivi corrispondenti agli attuali (Quaternario continentale, QC, Fig. 16). Il terrazzo alluvionale più antico (bnb1) è posto a circa 40 m sul fondovalle attuale a quote progressivamente decrescenti verso nord. Si trattava con ogni probabilità di un sistema di conoidi alluvionali alimentati dai primi corsi d'acqua che drenavano verso nord che si interdigitavano con i depositi di pianura alluvionale del paleo-Arno. Trattandosi del terrazzo alluvionale più antico dell'area ed essendo alterato al tetto da un paleosuolo relitto evoluto può essere attribuito all'ultima fase del Pleistocene medio (Coltorti e Pieruccini, 2006). Successivamente a questa fase di deposizione durante l'Ultima Glaciazione (Pleistocene superiore) si deposita un altro terrazzo alluvionale (bnb2), molto esteso e ben rappresentato nell'area di Collesalveti-Vicarello e più ad est nell'area di Stagno. Anche in questo caso le quote (ca. 10 m sul fondovalle attuale) decrescono progressivamente verso la valle dell'Arno a suggerire di nuovo la presenza di conoidi alluvionali. Infine, con la fine dell'Ultima Glaciazione e la trasgressione marina olocenica, il settore della valle dell'Arno è stato inizialmente trasgredito dal mare con formazione di sistemi di lagune e stagni costieri e successivamente riempito da sedimenti, prevalentemente fini, provenienti dai corsi d'acqua (bna1, bna2) seguito alle importanti fasi di erosione del suolo registrate a partire almeno da 3000 BP. La bonifica definitiva delle aree di fondovalle è avvenuta in epoca storica attraverso opere di regimazione, arginatura e di colmata dei settori più depressi.

### **3.2.4 Il Substrato geologico**

#### ***3.2.4.1 Complesso Alloctono Ligure (CAL)***

##### ***PRN: Peridotiti Serpentinizzate (Giurassico).***

Rocce di origine magmatica, si tratta di lherzoliti serpentinizzate con contenuti molto subordinati, clorite, brucite, e magnesite; presentano caratteri di metamorfismo di alta temperatura e di bassa pressione in facies anfibolitica. Litotipo lapideo (LP), poco fratturato, affiora nella porzione estrema occidentale del territorio comunale (Monte Maggiore, Poggio delle Fate, Poggio Gabbruccio ecc.). Lo spessore totale valutabile è di circa 200 metri.

***Ex formazione denominata "Σ – Serpentiniti"***

***GBB: Gabbri e Breccie di Gabbro (Giurassico superiore).***

Rocce magmatiche associate alle serpentiniti e considerate magmatiti intrusive di crosta oceanica. Sono coinvolti nella strutturazione del Complesso Alloctono e sono spesso intercalati nelle argilliti e calcari silicei. Nel complesso costituiscono un substrato lapideo (LP). Affiorano estesamente a Poggio Gabbruccio e in prossimità di Colognole. Lo spessore totale valutabile è dell'ordine di alcune decine di metri.

***Ex formazione denominata "G – Gabbri"***

***APA: Argilliti e Calcari silicei "Palombini" (Cretaceo Inferiore).***

Si tratta di calcari silicei grigio scuri (i "Palombini") e da alternanze di strati e banchi di argilliti laminate di colore grigio marrone. Le condizioni di sedimentazione potevano essere riferite ad un ambiente marino emipelagico interessato da eventi torbidity molto fini. Gli strati sono da molto spessi a sottili, la fratturazione variabile ma generalmente scarsa. Nel complesso costituiscono un substrato lapideo caratterizzato da alternanze di litotipi diversi (ALS). Questa Formazione affiora localmente nel settore occidentale dell'area di studio. Lo spessore, di difficile valutazione a causa della presenza di numerosi sovrascorrimenti e faglie, è di circa 100 m.

***Ex formazione denominata "c2 – Argilliti e calcari silicei Palombini"***

***OMTa: Breccie (Cretaceo Superiore).***

Breccie ad elementi ofiolitici cementati (GR) presenti come olistoliti o olistostromi all'interno della sedimentazione cretacea. Si tratta di frane sottomarine avvenute durante la sedimentazione di OMT. Lo spessore è variabile da pochi metri a circa 20 metri.

***OMT: Flysch calcareo marnoso di Ottone - Monteverdi M.mo, (Cretaceo superiore).***

Si tratta prevalentemente di calcari e calcari marnosi stratificati in strati da spessi a molto spessi. Sono presenti intercalazioni sottili di marne arenacee, arenarie, siltiti, argilliti grigie, arenarie argillose e ciottoli di varia natura e dimensioni cementati da una matrice argillosa e marnosa. Nel complesso si tratta di un substrato lapideo stratificato (LPS) (Fig. 17). Affiorano estesamente in tutto il settore sud – occidentale e principalmente nella zona Le Bresciate - Poggio la Quercia.

I caratteri litologici e sedimentologici della formazione rivelano l'associazione di facies indicative di un ambiente di piana sottomarina. Lo spessore totale è difficilmente valutabile poiché deformate e sovrascorse da unità più antiche ma è valutabile nell'ordine di circa 200 m.

***Ex formazione denominata "c7 - Flysch calcareo-marnoso di Monteverdi M.mo"***





Figura 17. Alternanze di calcari e marne.

***RCH: Argilliti e calcari di Poggio Rocchino : (Cretaceo Superiore)***

Si tratta prevalentemente di argilliti magnesifere rosse e verdi, in strati di spessore decimetrico, con sottili intercalazioni di siltiti, liditi, calcari marnosi a grana fine, marne e calcareniti. Questi ultimi possono raggiungere lo spessore di 2 metri. Nel complesso si tratta di un substrato costituito dall'alternanza di diversi litotipi stratificati (ALS). Affiorano a Poggio Leccetta presso il confine sud-occidentale del territorio Comunale (Valle Benedetta). Lo spessore totale, di difficile valutazione, è di circa 100 m.

***Ex formazione denominata "c6 – Arenarie, siltiti, argilliti con Phitonella"***

***SIL:Formazione del Sillano: (Cretaceo sup. -Eocene inferiore)***

Argilliti e argilliti siltose, grigio scure e marroni, spesso manganesifere in strati da medi a spessi alternate a arenarie calcaree grigio marroni, calcari a grana fine di colore nocciola, marne calcaree e calcari marnosi grigi in strati da spessi a molto spessi. L'ambiente deposizionale è tipicamente di piana sottomarina interessata da episodi torbidity. Si tratta di un substrato caratterizzato da alternanze stratificate di diversi litotipi (ALS). Affiorano limitatamente al settore settentrionale della dorsale e al versante orientale del rilievo di Gabbro con uno spessore massimo di circa 100 m.

***Ex formazione denominata "c5a – Argilliti varicolori del Fortulla con banchi di brecciole, liditi, calcari a grana fine ed arenarie"***

***MLL:Formazione di Monte Morello (Paleocene Superiore – Eocene Inferiore/Medio).***

Si tratta di calcari e calcari marnosi in strati da spessi a molto spessi alternati a marne con, argillitici ed arenarie e livelli di breccie ad elementi calcareo marnosi. Si tratta di un

substrato lapideo stratificato (LPS). Affiorano limitatamente soltanto alla destra idrografica del Torrente Ugione sul confine occidentale del territorio comunale, per uno spessore di poche decine di metri.

***Ex formazione denominata "pe2-Flysch calcareo marnoso di Poggio San Quirico con livello di brecce"***

### ***3.2.4.2 Le Unità mioceniche (UM)***

Affiorano in discordanza angolare su CAL sia sul fianco orientale che su quello settentrionale della Dorsale dei Monti Livornesi. Il contatto per faglia riportato sulle cartografie precedenti non è di tipo sepolto e non osservabile direttamente in campagna dove invece si osserva bene il contatto discordante.

#### ***Il Messiniano pre-evaporitico***

#### **ROS: Calcari, arenarie e conglomerati (Fig. 18)**

All'interno di questa Unità sono comprese diverse unità presenti nelle carte geologiche esistenti. Si tratta di un complesso costituito alla base da conglomerati da grossolani (fino a 40 cm) a fini, con abbondante matrice sabbiosa alternati a livelli e lenti arenacee grossolane, localmente gradate, che verso l'alto passano ad arenarie medio grossolane con granuli grossolanamente stratificate. (m-Conglomerati di Villa Mirabella, m<sub>3</sub>-Conglomerati rossi e verdi talora lignitiferi). Localmente sono presenti calcarentiti e calciruditi biancastri di spessore ed estensione laterale limitata (Calcari di Rosignano, m<sub>4</sub>-Calcari di Castelnuovo). L'ambiente di deposizione è di transizione dal continentale al marino, conoidi alluvionali, delta, spiaggia, piccole scogliere. Depositi granulari stratificati, cementati, molto addensati (GRS).

***Ex formazioni denominate "m-Conglomerati di Villa Mirabella", "m3-Conglomerati rossi e verdi talora ligniti ferì", "m4-Calcari di Castelnuovo"***



*Figura 18. Conglomerati ed arenarie stratificati.*

### **RAQ: Argille e argille sabbiose con lenti di gesso**

Si tratta di argille con livelli di materiale carbonioso e talora lignitiferi, arenarie da fini a grossolane e livelli di conglomerati da fini a grossolani. Localmente sono presenti lenti e livelli di gesso dello spessore di pochi metri e di limitata estensione laterale. Depositi coesivi stratificati (COS).

*Ex formazione denominata "m5 – Marne e marne argillose"*

### ***Il Messiniano post-evaporitico***

#### **EMO: Argille e Marne con lenti di gesso:**

Marne, marne calcaree e argillose, argilliti di colore variabile dal nocciola al grigio chiaro con intercalazioni di diatomiti e di gessi. Depositi coesivi stratificati (COS).

#### **EMOr: Arenarie e Conglomerati:**

Alternanze di banchi sabbiosi e lenti di ciottoli di spessore localmente decametrico. Costituiscono dei livelli e delle lenti più o meno continui lateralmente. Depositi coesivi stratificati, talora granulari cementati (COS).

*Ex formazioni denominate "m7 – Gessi", "m8 – Sabbie e conglomerati di Villa Poggio Piano"*

### **3.2.4.3 Le Unità plioceniche (UP)**

L'evento trasgressivo dell'inizio del Pliocene porta all'istaurarsi di ambienti marini più franchi e alla deposizione della successione pliocenica in discordanza angolare sui terreni miocenici.

#### **FAA: Formazione delle Argille Azzurre** (Pliocene Inferiore medio) (Fig. 19)

E' una formazione litologicamente relativamente omogenea caratterizzata da argille bluastre e argille marnose con sottili livelli e lamine siltose e sabbiose. Sono grossolanamente stratificate e l'ambiente deposizionale è riferibile al neritico prossimale. Depositi coesivi (CO).

*Ex formazione denominata "p – Argille Azzurre"*

#### **FAAe: Litofacies sabbiosa**

Sono sabbie da fini a grossolane, sabbie limose, con livelli ghiaiosi, stratificate, con stratificazioni incrociate planari. Si osservano in tre principali corpi sedimentari spessi alcune decine di metri. La parte alta della successione pliocenica è caratterizzata dalla presenza di potenti bancate sabbiose grossolane (es. tra Nugola Vecchia e Castell'Anselmo) che indicano la tendenza regressiva del ciclo sedimentario. Al tetto della successione sono segnalati anche episodi di deposizione biodetritica (Calcarei ad *Amphistegina*). Il contenuto fossilifero e le facies indicano un ambiente deposizionale prossimale, di spiaggia. Depositi granulari stratificati (GRS), da debolmente cementati a cementati, molto addensati.

*Ex formazioni denominate "p3 – Sabbie gialle", "p4 – Calcareni e sabbie ad Amphistegina"*



Figura 19. Le argille della Formazione delle Argille Azzurre.

#### **3.2.4.4 Il Quaternario marino (QM)**

##### **PLE: Depositi marini e costieri pleistocenici (Fig. 20)**

Si tratta dei depositi di spiaggia, costieri e lagunari depositatisi durante le fasi trasgressivo-regressive che si sono alternate nel Quaternario.

I depositi si trovano in discordanza angolare sui depositi marini del Pliocene (FAA e FAAe). Appartengono a questa unità le "Sabbie ed Argille ad *Arctica*" (Lazzarotto et al., 1990b), attribuibili sulla base delle malacofaune al Pleistocene inferiore. Si tratta di una alternanza di sabbie ed arenarie e argille e argille sabbiose (SC). La parte basale è caratterizzata anche dalla presenza di sabbie e lenti di conglomerati a ciottoli medio-fini. Questa parte della successione (con uno spessore di circa 50 m) affiora in Val di Nugola e in sinistra del Torrente Tora da Nugola Nuova fino alle zone più orientali. Verso l'alto e senza apparenti discordanze importanti sono presenti le "Sabbie di Nugola Vecchia" attribuite ad un generico Pleistocene inferiore-medio. Si tratta in prevalenza di sabbie fini stratificate molto omogenee e povere di strutture sedimentarie e di fossili. Verso l'alto la stessa successione diventa progressivamente più fine e caratterizzata dalla presenza di notevoli spessori di argille, argille limose e limo di ambiente lagunare.

**Ex formazioni denominate "q3 – Sabbie di Nugola Vecchia", "q2 – Sabbie ed Argille ad *Arctica*"**





*Figura 20. Alternanze di sabbie e ghiaie in località Nugola.*

### **3.2.4.5 Il Quaternario continentale**

#### **Depositi alluvionali terrazzati**

##### **bnb1: Terrazzi alluvionali del Pleistocene medio finale (Fig. 21)**

Si tratta dei depositi alluvionali terrazzati più alti dell'area e quindi i testimoni più antichi dell'emersione dell'area stessa dopo la sedimentazione marina mio-plio-pleistocenica. Sono presenti prevalentemente nella porzione nord-orientale del territorio e sono caratterizzati dalla presenza di superfici di terrazzo sub-pianeggianti più o meno ampie alla sommità dei rilievi collinari compresi tra Nugola Vecchia e Collesalveti, poste a circa 30 m sugli alvei attuali con quote progressivamente decrescenti verso nord. Il deposito, di spessore irregolare che può raggiungere circa 30 m, è costituito alla sommità da ghiaie poligeniche, eterometriche, sub arrotondate, con contenuto variabile di matrice sabbioso-limoso. Dati di sottosuolo mostrano che lateralmente le ghiaie possono passare a depositi sabbiosi e sabbioso-limosi. Si tratta comunque nel complesso di terreni granulari poco addensati, non cementati (GM). La morfologia dei terrazzi e le caratteristiche sedimentologiche lasciano supporre la loro deposizione in ambienti di conoidi alluvionali alimentate dai corsi d'acqua provenienti da sud.

***Ex formazione denominata "q6 – Conglomerati, sabbie e limi di Casa Poggio ai Lecci"***



Figura 21. Le ghiaie del terrazzo alluvionale del Pleistocene medio finale

### **bnb2: Depositi di Terrazzi alluvionali del Pleistocene superiore**

Si tratta dei depositi alluvionali che caratterizzano gli estesi terrazzi alluvionali di Vicarello e Stagno oltre ad altri lembi minori. Anche in questo caso le quote dei terrazzi decrescono verso valle, da circa 15 metri a 5 metri sugli alvei attuali. Lembi minori di terrazzi attribuibili alla stessa fase climatica si rinvengono anche nel settore meridionale. Si tratta prevalentemente di sabbie e limi, alternati a sottili livelli di ghiaie fini, non cementati e da poco a molto addensati (SC). Anche in questo caso è plausibile la loro deposizione in ambiente di conoide alluvionale alimentato dai corsi d'acqua provenienti da sud. Lo spessore è variabile ma generalmente compreso tra i 10 e i 30 m.

***Ex formazioni denominate "at-alluvioni terrazzate", "q11 – Sabbie e limi di Vicarello", "q9 – Sabbie di Ardenza", "q8 – Conglomerati di S. Stefano"***

### **Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina – *NON AFFIORANTE***

Questa formazione non affiora in superficie, ma è facilmente individuabile nelle stratigrafie dei pozzi realizzati nella pianura. Rappresenta un elemento geologico molto rilevante avente funzione di "livello guida" per la ricostruzione stratigrafica del sottosuolo della Pianura di Pisa e del margine settentrionale delle Colline Pisane. Si tratta di un orizzonte costituito da ciottoli arrotondati e fortemente eterometrici, con prevalenza di elementi del "Verrucano" del Monte Pisano, immersi in una matrice che presenta una granulometria variabile tra la sabbia grossolana ed il ghiaietto.

La deposizione del livello è avvenuta in ambiente fluviale, durante una fase glaciale di forte abbassamento marino (prima fase wurmiana) ad opera dell'Arno e del Serchio, quando unitamente solcavano la Pianura Pisana (Mazzanti R., 2001).

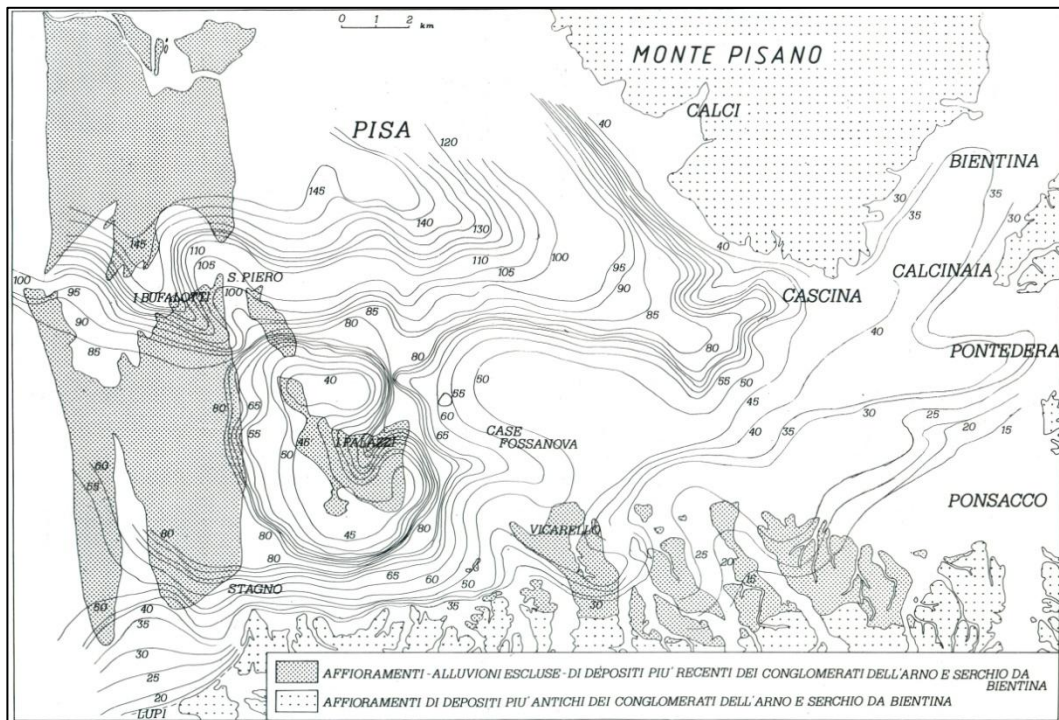


Figura 22. Profondità del tetto del livello dei conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina nel sottosuolo della Pianura Pisana (da Fancelli et al. 1986)

### **bn<sub>a1</sub> - Alluvioni attuali e oloceniche della pianura dell'Arno (Fig. 23)**

*Ex formazione denominata "t – sedimenti palustri, alluvionali e di colmata"*

### **bn<sub>a2</sub> - Alluvioni attuali e oloceniche delle valli laterali**

*Ex formazione denominata "a – alluvioni attuali"*

Si tratta del riempimento recente ed attuale dei fondi valle. Sono stati distinti poiché sono caratterizzati da spessori e geometrie diverse. Nel caso di **bn<sub>a1</sub>** si tratta di spessori anche superiori ai 20-30 metri generalmente sovrapposti a spessori variabili di depositi alluvionali più antichi (Pleistocene superiore) che costituiscono nel complesso il riempimento della valle sepolta dell'Arno, associata ai bassi stazionamenti marini del Pleistocene superiore. Nella zona di Stagno ad Ovest del Fosso Cateratto, nei primi metri del sottosuolo prevalgono le sabbie e sabbie limose attribuibili ai paleo-tomboli (SM), viceversa proseguendo in direzione est prevalgono i depositi palustri, retro-dunali ed alluvionali limo argillosi torbosi (CL) talora con orizzonti sabbio-limosi, con livelli e spessori limitati in prossimità delle colline che si approfondiscono fino -40/50 metri nella piana di Guasticce-Biscottino.

Nel caso di **bn<sub>a2</sub>** si tratta di riempimenti di spessore molto variabile direttamente in discordanza sui terreni attraversati dal reticolo di drenaggio proveniente da sud. Sia nel primo caso sia nel secondo la loro geometria e i loro rapporti laterali e verticali con gli altri terreni costituiscono dei contrasti di impedenza significativi in prospettiva sismica. I depositi della pianura dell'Arno sono generalmente fini, limo-sabbiosi o argillosi in facies lagunare o comunque di bassa energia associate alla presenza della linea di costa in posizione molto prossima al tratto di valle considerato. Successivamente all'avanzamento della linea di costa e agli interventi di bonifica, il fondovalle è stato bonificato



prevalentemente per colmata e i depositi relativi possono raggiungere spessori notevoli, maggiori di 30 metri in eteropia di facies con i cordoni dunali sabbiosi nella zona di Stagno. I depositi delle vali laterali sono generalmente più grossolani, sabbioso-limosi, e poggiano in discordanza su tutti i terreni attraversati dal reticolo di drenaggio, costituendo localmente degli elementi molto significativi dal punto di vista sismico a causa del forte contrasti di impedenza osservato al contatto basale.



*Figura 23. La presenza di suoli argillosi determina nel tratto di pianura dell'Arno fenomeni di ristagno in concomitanza con i periodi più piovosi*

#### **b - Depositi eluvio colluviali (Fig. 24)**

Si tratta di depositi presenti al piede dei versanti o all'interno delle vallecole che solcano il paesaggio collinare dell'area. Sono messi in posto per meccanismi misti di ruscellamento e gravitativi o in parte formati in sito per alterazione.

La tessitura dei depositi è fortemente dipendente dalle caratteristiche litologiche dei sedimenti affioranti nei luoghi in cui si sono originati. Nelle aree collinari sono in genere derivati dall'alterazione diretta del substrato litoide e si presentano pertanto prevalentemente come "farina di roccia" mista a ciottoli con matrice limo-argillosa (ML). Viceversa nelle aree di pianura sono in genere sabbioso-limosi o limoso-argillosi e possono contenere clasti grossolani in proporzioni variabili o dispersi nella massa (SC), soprattutto in prossimità degli alvei. Sono moderatamente addensati/consistenti. Il loro spessore è molto variabile, da pochi metri fino a una decina di metri, soprattutto in corrispondenza di versanti più acclivi.





*Figura 24. Caratteristiche dei depositi eluvio-colluviali costituiti da clasti immersi in matrice sabbioso-limosa*

#### **h - Coltri antropiche di riempimento**

Sono coltri eterogenee messe in posto ad opera dell'attività umana; si tratta in genere di riempimenti per bonifica estesi lateralmente e con spessori che superano il metro, come quelle effettuate nell'area dell'Interporto Toscano Amerigo Vespucci, alcune porzioni dell'area del Biscottino e della Ex – CMF.

#### **3.2.5 La geomorfologia**

Sotto il profilo geomorfologico, il territorio Comunale di Collesalveti presenta tre aree ben distinte: la pianura, le colline ed i Monti Livornesi.

Un'estesa area settentrionale pianeggiante, con aree talvolta a quote altimetriche depresse (zone Biscottino, Grecciano, lago della Contessa), costituita dal margine meridionale della Pianura di Pisa e da una parte della piana più propriamente livornese.

Alla prima appartengono le zone agricole, in buona parte di antica e più recente bonifica e le aree a nuova destinazione artigianale ed industriale (Piana di Guasticce ed il Faldo); tali zone dalla tenuta di Grecciano, si estendono, in destra ed in sinistra dello Scolmatore dell'Arno, oltre l'abitato di Stagno "Vecchia" fin quasi al mare (Le Fornaci Vecchie); Sono caratterizzate da una quasi totale assenza di elementi geomorfologici naturali, i pochi presenti sono essenzialmente legati al reticolo idrografico o di origine antropica (chiari, arginature, aree umide soggette a ristagno) per la presenza di una fitta rete di canali e fossi di bonifica.

Per piana livornese ci riferiamo all'area pianeggiante e debolmente declive verso la linea di costa che corrisponde al terrazzamento "basso" tra il mare stesso, Suese, la Gronda dei Lupi fino oltre la frazione livornese di Ardenza, dovuto alla trasgressione eustatica "Tirreniana". In essa rientrano quindi le aree in debole rilievo all'estremità nord-occidentale del territorio comunale tra la Fattoria di Suese-Villaggio Emilio, Valle delle

Mignatte e l'Aiaccia. Fino al XVIII secolo le zone sopra descritte erano caratterizzate dalla presenza di numerosi paduli (zona Stagno- Ponte Ugione) che sono stati prosciugati e bonificati nel tempo, ad eccezione dell'area dell'Oasi della Contessa, che ad oggi conserva la valenza di area umida, seppur regolato da un impianto idrovoro privato.

Procedendo in direzione Sud la pianura si raccorda con i blandi rilievi collinari, a prevalente costituzione argilloso-sabbiosa-ciottolosa, che caratterizzano l'ampia fascia settentrionale che dalla Fattoria di Suese, ad Ovest, si estende fino alle colline su cui sorgono gli abitati di Nugola, Montecandoli, Badia e Collesalveti. Rilievi con medesimi caratteri morfologici e geologici, con prevalenza di litologie argillose, sono inoltre presenti nella porzione sud-orientale del territorio comunale tra il confine orientale (Castell'Anselmo, Torretta Vecchia e Crocino) e, ad Ovest, l'allineamento Monte Massi-Fattoria Acquaviva – Poggio ai Frati - Parrana San Martino – Parrana Nuova – Casa Staggiano.

In generale si tratta di zone agricole, trasformate negli ultimi anni in agrituristiche, per lo più a vocazione cerealicola (dove prevalgono terreni argillosi), e di bosco a vegetazione mediterranea (lecci, corbezzoli, pini etc.) impiantatosi sulle litologie sabbiose e sabbio-ciottolose. Su queste ultime sono altresì presenti colture viticole e ad uliveto.

Infine la terza area che caratterizza morfologicamente il territorio comunale, è costituita dal Nord e Nord-Est dei Monti Livornesi, i cui rilievi, per quanto nettamente al di sotto dei 500 metri di altitudine, presentano versanti alquanto più ripidi (per lo più superiori al 35%) e forme ben più aspre e con maggiore propensione al dissesto rispetto a quelle collinari precedentemente descritte.

Questi rilievi sia per l'ossatura lapidea delle litologie presenti, sia per la mancanza o scarsità di depositi alluvionali nelle incisioni vallive, come pure per la estesa e pressoché continua copertura boschiva, si presentano in netto contrasto rispetto al circostante paesaggio delle colline.

Le principali culminazioni sono allineate lungo il confine Sud-occidentale del Comune e corrispondono a Poggio alla Quercia (315 m s.l.m.m.), Poggio Vaccaie (449 m), Poggio Lecceta (457 m), Monte Maggiore (453 m) e Monte Auto (372 m). Altre cime significative sono rappresentate da Poggio Stipeto (401 m), ad Ovest di Parrana San Giusto, da Poggio alle Fate (365 m) e Poggio Gabbruccio (247 m) a SO di Colognole.

Il modellamento del paesaggio attuale è iniziato nel Pleistocene medio con il sollevamento definitivo dell'area e l'istaurarsi del reticolo di drenaggio simile a quello attuale. A partire da questo momento infatti si depositano le conoidi alluvionali alimentate dai corsi d'acqua che da sud drenano verso l'Arno e che successivamente vengono dissecate a formare i terrazzi alluvionali osservabili oggi (bnb1, bnb2). Con il sollevamento si generano gli estesi versanti che bordano i Monti di Livorno verso est e anche la morfogenesi gravitativa inizia ad avere effetto con l'attivazione di numerosi fenomeni gravitativi di diversa estensione e tipologia. L'erosione dei versanti ha inoltre

condotto al modellamento di numerose forme di erosione selettiva (scarpata morfologica). Legate cioè alla presenza di corpi geologici con contrasto di competenza, comuni soprattutto all'interno delle successioni UM e UP dove si alternano terreni arenaceo-conglomeratici ed argillosi. L'assetto giaciturale con immersione verso NE dell'intera successione è marcato anche dalla presenza di scarpate di erosione selettiva sul lato a reggipoggio dei più importanti corpi a tessitura grossolana.

Scarpate importanti, anche se in gran parte smussate e rimodellate dall'attività antropica, sono anche quelle che bordano i terrazzi alluvionali nelle porzioni di territorio più prossime alla pianura alluvionale dell'Arno.

### **3.2.5.1 Le frane**

La porzione di territorio maggiormente interessata dai movimenti gravitativi è quella dei versanti orientali dei Monti livornesi, dove la maggior acclività, la maggiore incisione valliva, la presenza di circolazione sotterranea e la presenza di importanti contrasti litologici (materiali lapidei-granulari, materiali granulari-coesivi) al contatto tra UM ed i terreni litoidi del Complesso Alloctono Ligure (CAL) costituiscono i principali fattori predisponenti il dissesto. Localmente i medesimi i fattori, sopra descritti, possono generare dissesti anche al contatto o all'interno di UM ed UP. Le frane, distinte secondo il principale tipo di movimento e lo stato di attività, presentano spessori coinvolti nel movimento molto vari, da pochi metri ad alcune decine di metri e dimensioni localmente superiori al chilometro; trattasi, ad eccezione dei crolli, di fenomeni a cinematica gravitativa molto lenta.

#### **Frane di crollo o ribaltamento**

Frane di questo tipo si manifestano più frequentemente lungo i bordi dei terrazzi fluviali caratterizzati da litologie prevalentemente sabbiose. Nel complesso la maggior parte dei corpi franosi, in stato quiescente, si rinvergono lungo i bordo dei terrazzi che delimitano Pian della Tanna e nella zona prospiciente gli abitati di Nugola e di Castell'Anselmo. Tale fenomeno è inoltre ben evidente al bordo della ex-cava di ofioliti in corrispondenza della Valle Benedetta, dove possono manifestarsi rotolamenti di massi.

#### **Frane per scorrimento**

Si tratta di frane estese da poche decine a molte centinaia di metri che si generano in corrispondenza del substrato litoide o dei lineamenti tettonici che mettono in contatto le formazioni allotcone con quelle mioceniche e che, rappresentando zone di debolezza, favoriscono il manifestarsi di fenomeni gravitativi. La maggior parte dei corpi franosi è caratterizzato da uno stato di attività quiescente e coinvolge i centri abitati di Parrana San Martino, Parrana San Giusto e borda gli abitati di Colognole e Le Case; viceversa le limitate frane ad oggi attive risultano tutte al di fuori dei principali centri abitati. L'osservazione delle caratteristiche dei copri di frana, dove visibili, mostrano l'eterogeneità dell'ammasso roccioso coinvolto nel movimento costituito da frammenti e

blocchi lapidei frammisti a matrice sabbioso-argillosa, che talora evolve in movimenti gravitativi lenti complessi.



*Figura 25. Caratteristiche dei grandi corpi di frana di Parrana*

### **Frane per colamento**

Questa tipologia di frana si rinviene per la maggior parte nelle aree collinari del territorio comunale, caratterizzate dai depositi prevalentemente argillosi delle unità plioceniche. In questa categoria di movimento franoso sono state considerate anche le aree caratterizzate da franosità diffusa o da deformazioni superficiali. Le prime sono principalmente frane superficiali facilmente obliterate dalle lavorazioni presenti in corrispondenza dei depositi argillosi pliocenici o talora, in corrispondenza del substrato geologico; le seconde sono sparse in tutto il territorio comunale in corrispondenza dei terrazzi alluvionali, delle aree collinari e montuose.

#### ***3.2.5.2 Orli di scarpate morfologiche naturali o artificiali***

Le principali forme di erosione selettiva (fig. 26) sono costituita da scarpate (orli di scarpata morfologica) che raramente posso raggiungere anche alcune decine di metri di altezza e che seguono l'andamento giaciturale dei principali corpi sabbioso-arenaceo-conglomeratici alternati alle litofacies argillose di UM e UP. Alcune di queste scarpate si seguono lateralmente per notevoli distanze, dove l'approfondimento fluviale sia parallelo alla direzione degli strati.



Figura 26. Scarpate di erosione selettiva in corrispondenza delle alternanze sabbiose all'interno della successione pliocenica (UP)

### **3.2.5.3 Orli di terrazzo fluviale**

Le principali forme legate ad episodi di erosione prolungata da parte di corsi d'acqua connessa all'abbassamento del livello di base della rete idrografica sono rappresentate dalle scarpate che identificano i terrazzi alluvionali. Questi si presentano con altezze variabili da 5 a 20 metri, generalmente smussati o rielaborati ad opera delle attività antropiche.

## **4.DATI DI SOTTOSUOLO, GEOTECNICI E GEOFISICI**

### **4.1 Le indagini esistenti**

Le indagini esistenti sono state reperite in parte dal Piano Strutturale del Comune di Collesalveti, dagli studi preliminari di Microzonazione redatti dall'Università di Siena, dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), dal progetto VEL, ed in parte provengono da lavori che sono stati effettuati nel corso degli ultimi anni da altri geologi professionisti e dal sottoscritto sull'area comunale.

La selezione è avvenuta su base esperta tenendo conto delle finalità del Progetto e cioè prevalentemente in base:

1. alla loro posizione geografica (criterio di distribuzione),
2. al loro significato in relazione alle principali problematiche da investigare, quali l'andamento del substrato in profondità, lo spessore delle coltri detritiche, alluvionali e di frana ecc..
3. alla loro importanza in funzione delle profondità raggiunte e del dettaglio della stratigrafia.

Questa selezione è risultata necessaria sia in tutte quelle situazioni in cui le indagini risultavano molto ravvicinate fra di loro e raggiungevano le stesse profondità di esplorazione, sia in quei casi in cui le prove effettuate erano poco profonde e mostravano delle semplificazioni nelle stratigrafie.

In generale, le indagini selezionate consistono in:

- sondaggi a stratigrafia nota, ponendo particolare attenzione a quelli maggiormente profondi;
- stratigrafie di pozzi per sfruttamento idrico;

- prove penetrometriche statiche con punta meccanica, elettrica, piezocono o cono sismico, per lo più localizzate nel settore della pianura e con profondità superiore a -10/15 metri;
- indagini di sismica attiva e passiva quali MASW, sismica a rifrazione, Down-Hole e HVSR;
- prove penetrometriche dinamiche medie e super pesanti;
- prove dilatometriche.

Per quanto riguarda le prove penetrometriche dinamiche, sia leggere sia pesanti, seppur presenti in numerose quantità, nel database delle indagini non sono state inserite, ad eccezione di quelle ritenute più significative. Ciò è dovuto al fatto che spesso tali prove risultano associate ad indagini più rilevanti e che nella maggior parte dei casi hanno lo scopo di investigare i primi metri di sottosuolo risultando perciò poco utili ai fini di uno studio come quello legato alla microzonazione sismica.

## **4.2 Le indagini geofisiche**

La ricostruzione della geometria sepolta dei diversi corpi geologici non può compiersi valendosi del solo rilevamento di superficie ed inoltre, ai fini della caratterizzazione delle diverse unità in ambito sismico, è necessario definire, nelle diverse parti del territorio, i principali contrasti d'impedenza sismica potenzialmente responsabili di fenomeni di risonanza e quindi d'amplificazione del moto sismico atteso in superficie.

A questo scopo, è necessario caratterizzare i diversi litotipi presenti in termini di rigidità, ovvero dei differenti valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ).

Per integrare le informazioni già disponibili ottenute attraverso le indagini geofisiche pregresse e, più in generale, per fornire informazioni di supporto alla formulazione del modello geologico ed alla preliminare caratterizzazione sismica del sottosuolo dei centri abitati appartenenti al Comune di Collesalveti, l'Università di Siena ha condotto una campagna di misure geofisiche nel 2013.

In seguito al finanziamento ottenuto da parte della Regione Toscana al Comune di Collesalveti, le indagini precedentemente eseguite sono state integrate dal Geol. Sergio Crocetti con ulteriori n.7 indagini ESAC-MASW e con l'esecuzione di n. 30 misure di frequenze naturali dei terreni (HVSR).

La tecnica geofisica utilizzata è quella della sismica passiva, legata cioè alla misura delle vibrazioni ambientali, in configurazioni sia a stazione singola (tecnica HVSR), che a stazione multipla (antenna sismica o array sismico). Una descrizione generale di questo genere di procedure si può trovare in Foti et al. (2011).

#### **4.2.1 Esecuzione della campagna di misure di vibrazioni ambientali a stazione singola**

Con l'intento di valutare la presenza dei suddetti fenomeni di risonanza, potenzialmente responsabili di locali amplificazioni del moto sismico, è stata realizzata una campagna di misure di vibrazioni ambientali a stazione singola, facendo uso di un sismografo tridirezionale, le cui acquisizioni sono state analizzate secondo l'approccio HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios).

Per quanto riguarda le indagini preliminari, eseguite dall'Università di Siena nel 2013, sono state effettuate tramite l'ausilio di tromografi digitali portatili del tipo TROMINO™, prodotti da MicromedSpA e dotati d'un sistema d'acquisizione a 24 bit equivalenti.

Nella più recente campagna di acquisizione (2018) invece, eseguita dal Geol. Roberto Maggiore e dal Geol. Sergio Crocetti, è stato impiegato il tromografico digitale SR04 a tre componenti prodotto da SARA Electronic Instruments s.r.l., dotato di un sistema di acquisizione a 24 bit effettivi.

Le 30 misure effettuate, in aggiunta alle precedenti 99 misure preliminari, hanno coperto gran parte del Comune di Collesalvetti, interessando i territori urbanizzati delle sue frazioni, come mostrato in Fig. 27 – Tabella 4. La configurazione dei punti di misura è stata inoltre condizionata dalla necessità d'indagare le più importanti unità litostratigrafiche e morfologiche identificate nelle campagne di rilevamento geologico e geomorfologico, nonché dall'includere i punti in corrispondenza dei più interessanti sondaggi stratigrafici e prove geofisiche in foro disponibili.



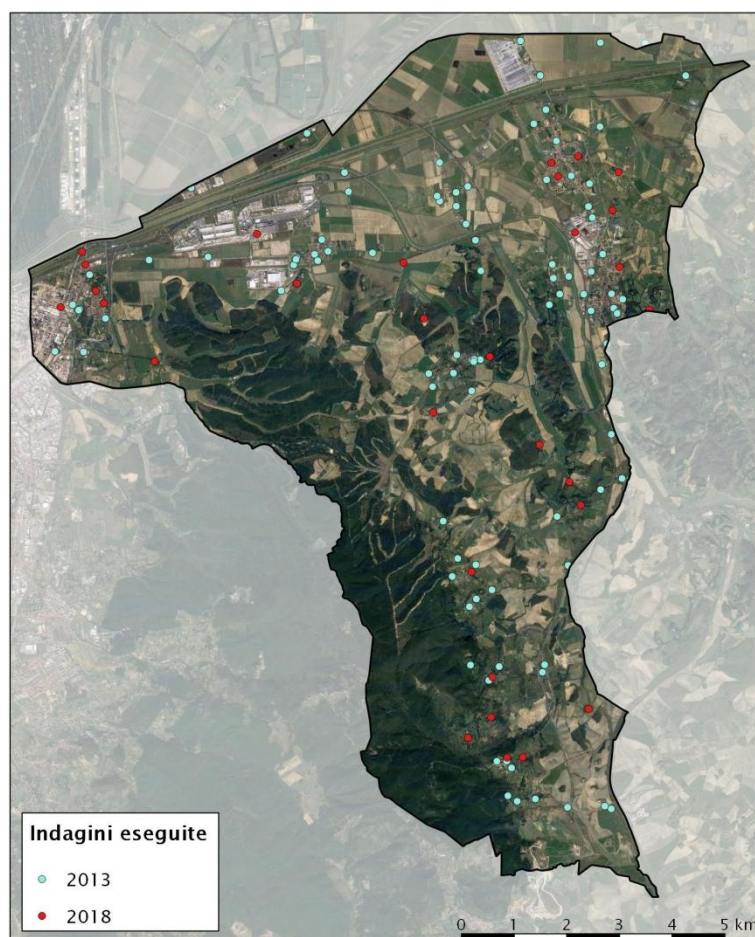


Figura 27. Distribuzione delle misure di vibrazioni ambientali a stazione singola (HVSr) effettuate all'interno del Comune di Collesalveti

Obiettivo di queste misure è l'individuazione di possibili fenomeni di risonanza sismica indotti dalla presenza in profondità di contrasti di impedenza sismica capaci di intrappolare le sismiche e produrre fenomeni di amplificazione potenzialmente pericolosi. In particolare, attraverso queste indagini è possibile individuare quali frequenze di vibrazione del terreno potrebbero essere oggetto di amplificazione (frequenze di risonanza). D'altro canto, il valore di queste frequenze è determinato dal rapporto fra la velocità media delle onde S nelle coperture e lo spessore di queste ultime. Per questo motivo, i risultati di queste misure possono essere utilizzati per vincolare il modello geologico e, una volta note le velocità delle onde di taglio nelle coperture, definire la morfologia sepolta del basamento sismico o delle unità litostratigrafiche che costituiscono il substrato geologico.

| HVSR | LOCALITA'                                 | X          | Y           | DATA       |
|------|---|------------|-------------|------------|
| 1    | Stagno - Scuole Elementari/Piazza         | 125023.334 | 4837007.588 | 24/03/2018 |
| 2    | Stagno - Via Modigliani                   | 125162.112 | 4836764.358 | 20/03/2018 |
| 3    | Stagno Vecchio – Campo di calcetto/Chiesa | 124819.230 | 4837771.649 | 24/03/2018 |
| 4    | Stagno                                    | 124863.132 | 4837524.222 | 24/03/2018 |
| 5    | Stagno - Mc Donald                        | 124333.766 | 4836749.543 | 15/04/2018 |
| 6    | Colognole - SP della Valle                | 132478.843 | 4827561.745 | 25/03/2018 |
| 7    | Colognole - zona feste/parcheggio         | 132182.051 | 4827576.662 | 25/03/2018 |



|    |  |            |             |            |
|----|--|------------|-------------|------------|
| 8  | Pandoiano - Piazzetta parcheggio                     | 131933.157 | 4828365.596 | 25/03/2018 |
| 9  | Pandoiano - I Loti                                   | 131467.438 | 4828003.788 | 25/03/2018 |
| 10 | Rimazzano  | 133793.966 | 4828388.152 | 31/03/2018 |
| 11 | Parrana San Giusto                                   | 132013.118 | 4829127.623 | 31/03/2018 |
| 12 | Interporto   | 128161.321 | 4837867.827 | 25/03/2018 |
| 13 | Villa Orsini - Guasticce                             | 128849.911 | 4836875.843 | 14/04/2018 |
| 14 | Collesalveti - Fattoria del Pallone/Villa Carmignani | 135496.284 | 4835890.309 | 10/04/2018 |
| 15 | Vicarello - Via del Pero                             | 133948.784 | 4838549.766 | 25/03/2018 |
| 16 | Collesalveti - Zona industriale/Depuratore           | 134195.403 | 4837460.877 | 09/04/2018 |
| 17 | Collesalveti - Magazzino Comunale                    | 134984.680 | 4836745.754 | 30/03/2018 |
| 18 | Vicarello  | 133840.512 | 4838816.991 | 15/04/2018 |
| 19 | Vicarello  | 134355.023 | 4838906.456 | 20/03/2018 |
| 20 | Vicarello - Guinceri                                 | 135097.962 | 4838546.443 | 11/04/2018 |
| 21 | Ca' Lo Spelli  | 131207.268 | 4836035.277 | 14/04/2018 |
| 22 | Nugola Vecchia                                       | 132404.560 | 4835217.877 | 12/04/2018 |
| 23 | Guasticce - strada per andare a Ca' Lo Spelli        | 130896.453 | 4837124.771 | 14/04/2018 |
| 24 | Collesalveti   | 134929.705 | 4837829.036 | 07/04/2018 |
| 25 | Parrana San Martino – Loc. Pietreto/L'Aietta         | 131762.233 | 4831152.696 | 15/05/2018 |
| 26 | Poggio ai Grilli                                     | 131255.985 | 4834237.290 | 15/04/2018 |
| 27 | Castell'Anselmo                                      | 133926.240 | 4832274.162 | 07/04/2018 |
| 28 | Castell'Anselmo - Cimitero                           | 133742.357 | 4832730.444 | 07/04/2018 |
| 29 | Montecandoli/Pozzuolo                                | 133227.819 | 4833473.722 | 07/04/2018 |
| 30 | L'Aiaccia  | 126042.266 | 4835590.588 | 15/04/2018 |

Tabella 4. Elenco delle indagini HVSR eseguite nel 2018. Le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento WGS84 UTM 33N così come previsto negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica".

I risultati delle misure effettuate sono sintetizzati nella figura 28, la quale evidenzia significativi aumenti della pericolosità locale soprattutto nella zona a nord del territorio comunale. La situazione in queste aree è del tutto analoga a quella della Pianura Padana che ha causato estesi danneggiamenti al patrimonio industriale che è caratterizzato da fenomeni di risonanza sismica per frequenze dell'ordine di 1 Hz (Paolucci et al., 2015), in prossimità delle frequenze di risonanza tipiche degli edifici, soprattutto di quelli con dimensioni significative (capannoni industriali, ecc.). Nella zona a sud, le frequenze di risonanza si spostano progressivamente verso valori più elevati.

In prima approssimazione si può immaginare la presenza di orizzonti risonanti nell'intera area di studio che risultano però caratterizzati da profondità differenti. Queste risultano maggiori nella parte nord e via via minori scendendo verso sud.

Per una prima valutazione di queste profondità si può fare riferimento alla tabella che segue (Tab.5; Albarello e Castellaro, 2011) grazie alla quale è possibile attribuire una stima (assai approssimativa) della profondità dell'interfaccia risonante a partire dalla misura della frequenza di risonanza dedotta dalle misure HVSR. Se si considerano i valori in Fig. 28, queste profondità risultano dell'ordine di parecchie decine di metri nella parte più settentrionale per scendere fino a poche decine o addirittura qualche metro nella parte più meridionale. Alla luce dei valori di ampiezza dei massimi HVSR riscontrati ( $A_0$  in Fig.28), questi orizzonti sembrano corrispondere a contrasti di impedenza sismica significativi soprattutto nella parte più settentrionale del territorio comunale, dove i fenomeni di amplificazione sismica attesi sono maggiori.

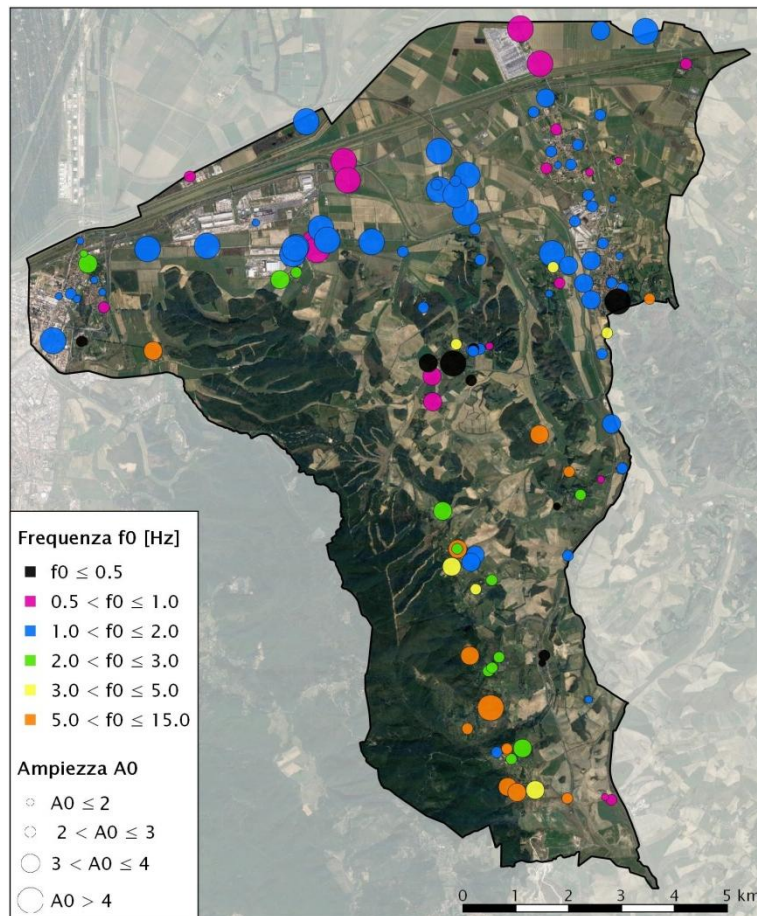


Figura 28. Risultati delle misure delle frequenze di risonanza delle coperture ottenute con la tecnica della stazione singola (HVSR). La dimensione dei cerchi è proporzionale all'ampiezza dei massimi HVSR osservati ( $A_0$ ), mentre il colore è rappresentativo della relativa frequenza ( $F_0$ ).

| $F_0$ (Hz) | $h$ (m) |
|------------|---------|
| <1         | >100    |
| 1-2        | 50-100  |
| 2-3        | 30-50   |
| 3-5        | 20-30   |
| 5-8        | 10-20   |
| 8-20       | 5-10    |
| >20        | <5      |

Tabella 5. Abaco per la stima dello spessore delle coperture ( $h$ ) a partire dai valori delle frequenze di risonanza ( $F_0$ ) determinate dalle misure H/V (Albarellò D., Castellaro S., 2011)

#### 4.2.2 Esecuzione della campagna di misure di vibrazioni ambientali con antenna sismica

Per meglio utilizzare a fini sismostratigrafici le informazioni fornite dalle misure a stazione singola è quindi necessario disporre di stime delle velocità di propagazione delle onde di taglio nelle coperture.

A questo scopo ad integrazione delle misure già disponibili, sono state eseguite misurazioni di rumore ambientale con antenna sismica.

La strumentazione impiegata dall'Università di Siena nel 2013, era consistita in un'antenna costituita da 16 geofoni verticali con frequenza propria pari a 4,5 Hz, collegati ad un acquisitore a 24 bit equivalenti del tipo BrainSpy™, prodotto da Micromed SpA, e disposti irregolarmente lungo le braccia d'una croce asimmetrica. La lunghezza del braccio maggiore delle antenne messe in opera variava fra 70 ed 84 m, mentre quella del braccio minore era compresa fra 34 e 65 m. La durata di ciascuna acquisizione era stata di 20 minuti, con frequenza di campionamento di 128 Hz.

Le indagini effettuate nel 2018, dal Geol. Roberto Maggiore e dal Geol. Sergio Crocetti, sono consistite in indagini di sismica passiva ESAC, ovvero *array* 2D ortogonali, associati ad indagini di sismica attiva MASW (Tab. 6). Nel primo caso lo stendimento è costituito da 9 geofoni mentre nel secondo è costituito da 24 geofoni con frequenza pari a 4,5 Hz entrambi collegati ad un sismografo analogico a 24 canali "SYSMATRACK" prodotto da M.A.E. S.r.l.. Il tempo di registrazione dell'ESAC è stato pari a 330 secondi.

Da queste misure è possibile ottenere stime della velocità di propagazione di Rayleigh in funzione della frequenza al di sotto dello stendimento (curve di dispersione). Mediante opportune tecniche di inversione numerica condotte considerando congiuntamente le curve di dispersione e le curve ottenute dalle misure HVSR in corrispondenza di ciascuna antenna (Albarello et al., 2011; Foti et al., 2011), è possibile stimare i profili di velocità delle onde di taglio nelle diverse zone esaminate. Queste stime possono poi essere utilizzate per valutare le profondità dell'interfaccia risonante al di sotto dei diversi punti di misura, con una accuratezza maggiore di quella ottenibile attraverso il semplice abaco in Tabella 5.

| ESAC-MASW | LOCALITA'                                  | X          | Y           | DATA       |
|-----------|--|------------|-------------|------------|
| 1         | Stagno - Scuole Elementari                 | 125042.631 | 4836922.296 | 23/03/2018 |
| 2         | Vicarello                                  | 134345.791 | 4838875.138 | 20/03/2018 |
| 3         | Collesalveti - Zona Industriale/Depuratore | 134036.022 | 4837531.774 | 20/03/2018 |
| 4         | Interporto Toscano Amerigo Vespucci        | 127711.332 | 4837931.763 | 23/03/2018 |
| 5         | Le Case                                    | 132176.443 | 4826763.871 | 23/03/2018 |
| 6         | Crocino                                    | 132723.977 | 4828948.494 | 23/03/2018 |
| 7         | Castell'Anselmo                            | 133877.483 | 4832223.916 | 23/03/2018 |

Tabella 6. Elenco delle indagini ESAC-MASW eseguite nel 2018. Le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento previsto WGS84 UTM 33N così come previsto negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica".

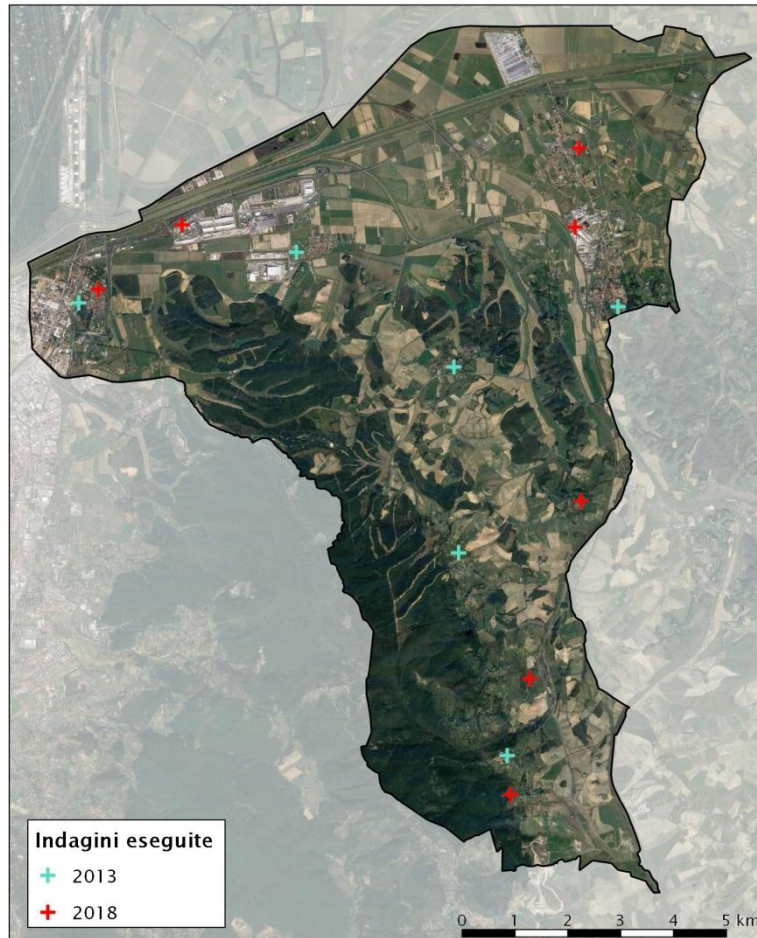


Figura 29. Distribuzione delle misure condotte con la tecnica dell'antenna sismica (seismic array)

Nel complesso sono state eseguite 13 antenne sismiche nel tentativo di completare la caratterizzazione di terreni presenti nelle diverse aree del territorio comunale (Fig.29). Per quanto riguarda le misure ottenute dall'Università di Siena, i risultati sono stati interpretati congiuntamente stimando profili di velocità delle onde S fino a profondità dell'ordine del centinaio di metri dal piano campagna. Viceversa, dai risultati ottenuti dalla più recente campagna geofisica sono stati estrapolati modelli congiunti (MASW+ESAC) di distribuzione della velocità delle onde S fino a 30 m di profondità. I profili ottenuti sono stati poi interpretati alla luce delle informazioni geologiche e geofisiche disponibili nelle diverse aree del territorio esplorato ed utilizzate per la definizione del modello geologico di riferimento.

## **5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO**

### **5.1 Parrana San Giusto, Parrana San Martino, Pietreto, La Casa**

Gli abitati di Parrana San Giusto, Parrana San Martino, Pietreto e La Casa sono costituiti da gruppi di abitazioni distribuite irregolarmente sui rilievi collinari immediatamente ad est dei versanti orientali dei Monti Livornesi. Le abitazioni sono ubicate prevalentemente in corrispondenza del grande corpo di frana stabilizzato che si allunga per più di un chilometro in direzione nord (Ceppeto-Parrana San Giusto) e lungo l'orlo di scarpata morfologica che si allunga in direzione N-S che marca la presenza delle alternanze di arenarie, conglomerati e argille all'interno delle unità mioceniche (Fig.25). In tutti i casi, gli insediamenti sono prossimi alla zona di contatto tra le Unità Mioceniche (UM) e il Complesso Alloctono Ligure (CAL), che corrisponde al passaggio tra il substrato litoide non sismico (CAL) ed i terreni di copertura (UM) (Fig.25, Fig.30). Seppur non visibile in affioramento il contatto fra il substrato non sismico ed i terreni della copertura è di tipo tettonico con faglie di tipo diretto potenzialmente attive e capaci sepolte.



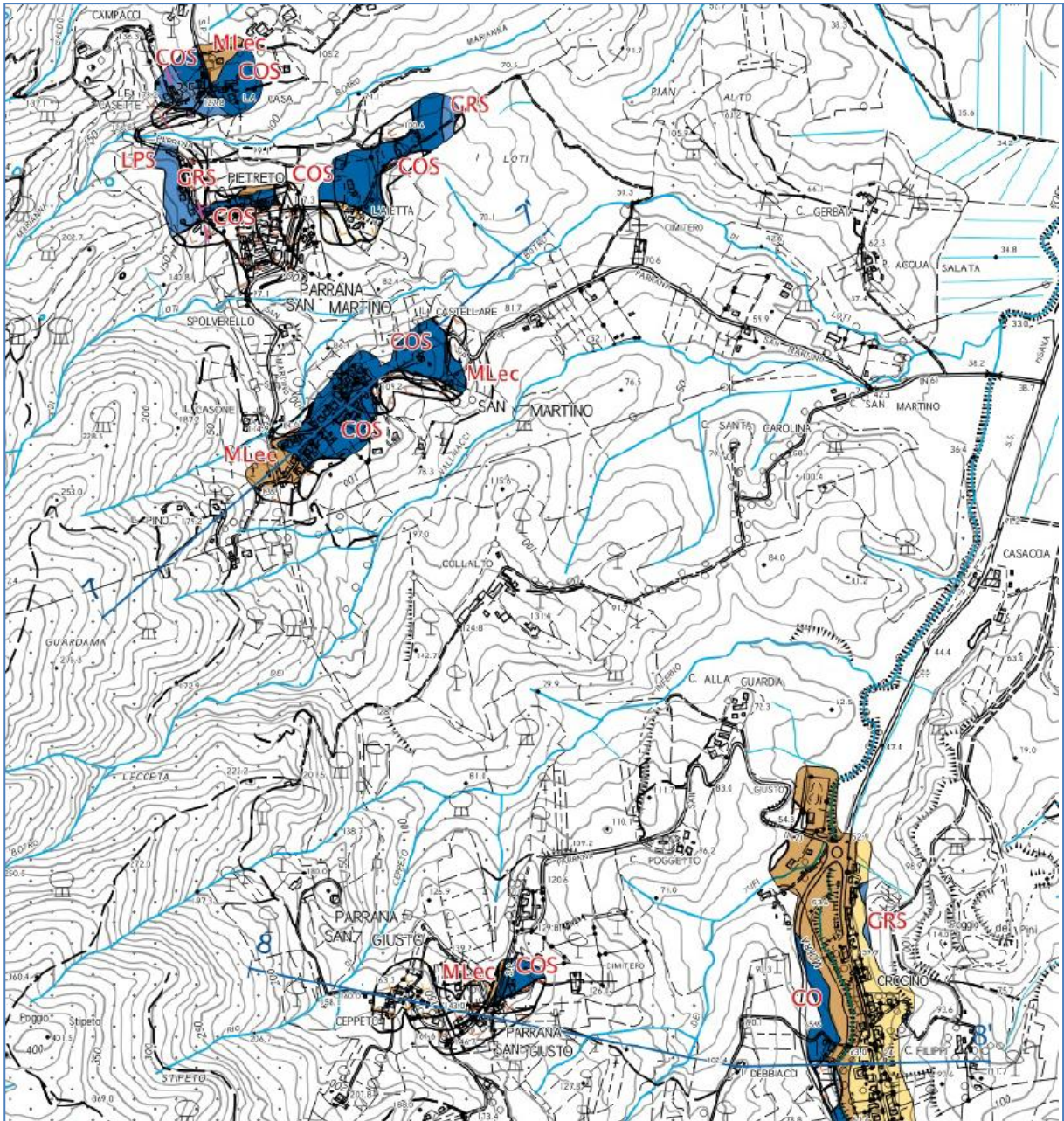


Figura 30 – Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Parrana San Martino - Pietreto

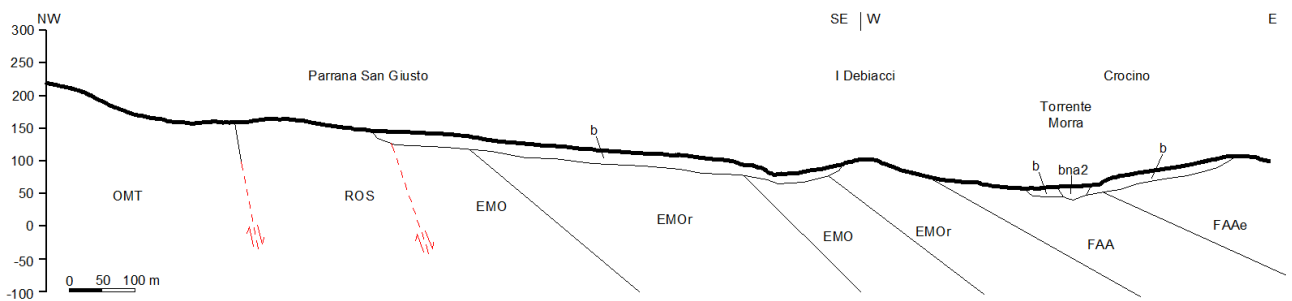


Figura 31. Sezione geologica dell'area di Parrana San Giusto – Crocino (Sezione 8)

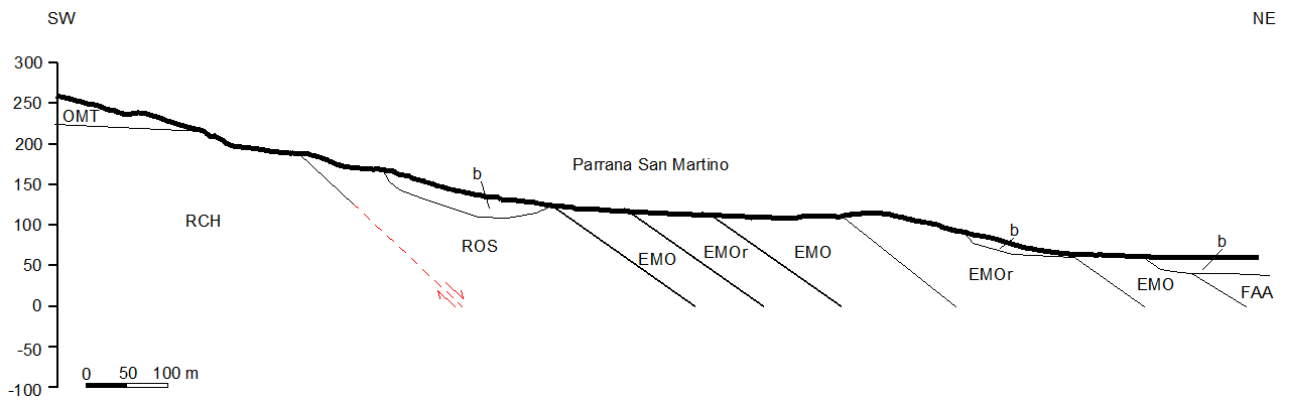


Figura 32. Sezione geologica dell'area di Parrana San Martino (Sezione 7)

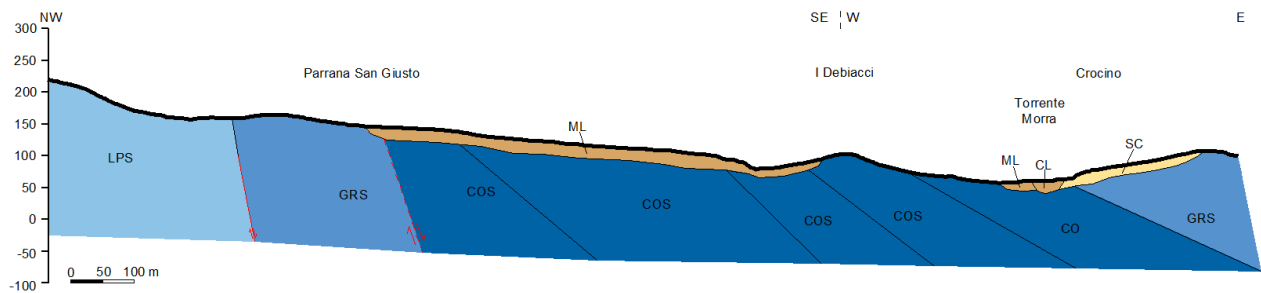


Figura 33. Sezione geologico-tecnica dell'area di Parrana San Giusto - Crocino (Sezione 8)

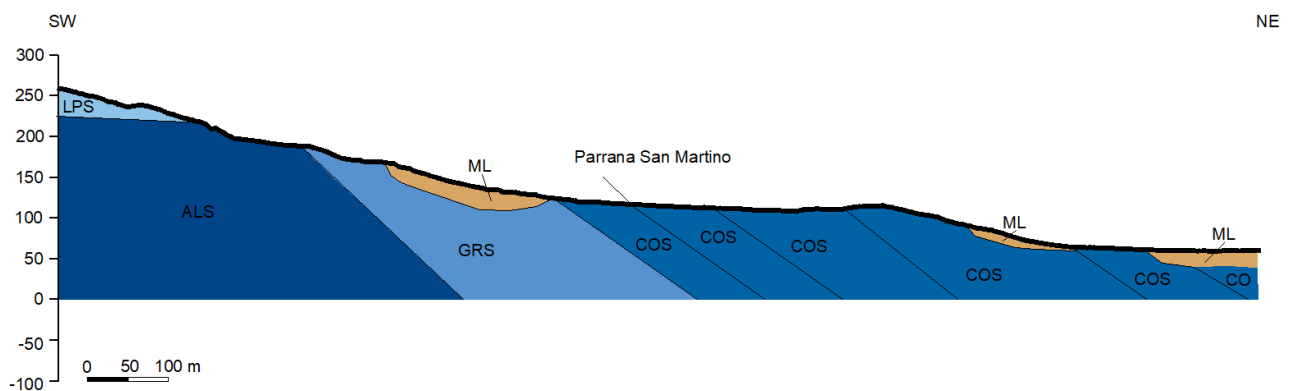


Figura 34. Sezione geologico-tecnica dell'area di Parrana San Martino (Sezione 7)

Le misure HVSR effettuate in corrispondenza di questi abitati mostrano la presenza di un picco localizzato nell'intervallo di frequenza 2-2.5 Hz (Fig.35).

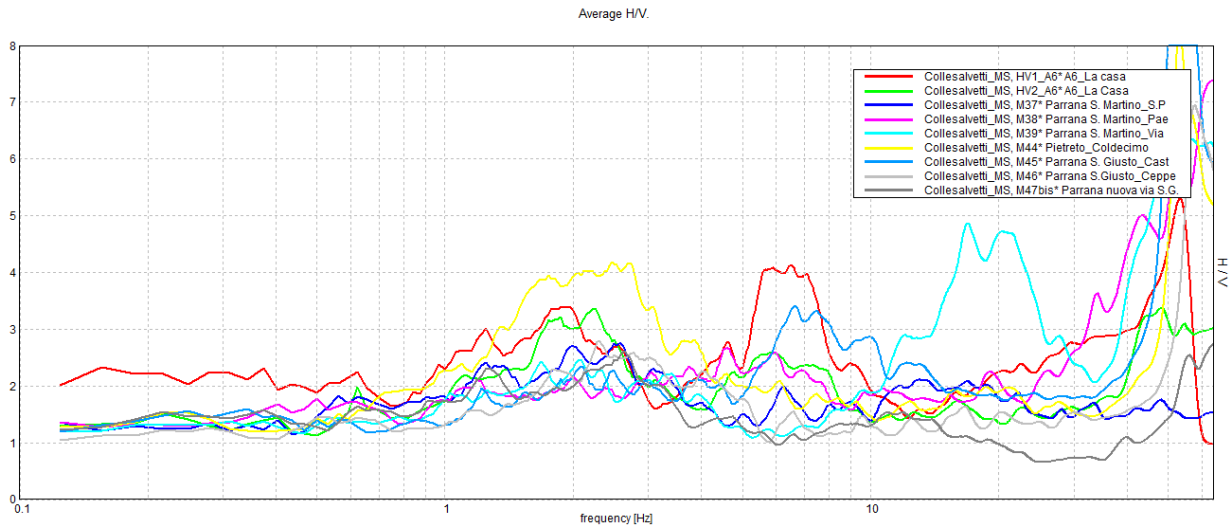


Figura 35. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di Parrana San Giusto, Parrana San Martino, Pietreto e La Casa. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P224HVSR246, P225HVSR247, P118HVSR140, P119HVSR141, P120HVSR142, P125HVSR147, P126HVSR148, P127HVSR149, P129HVSR151

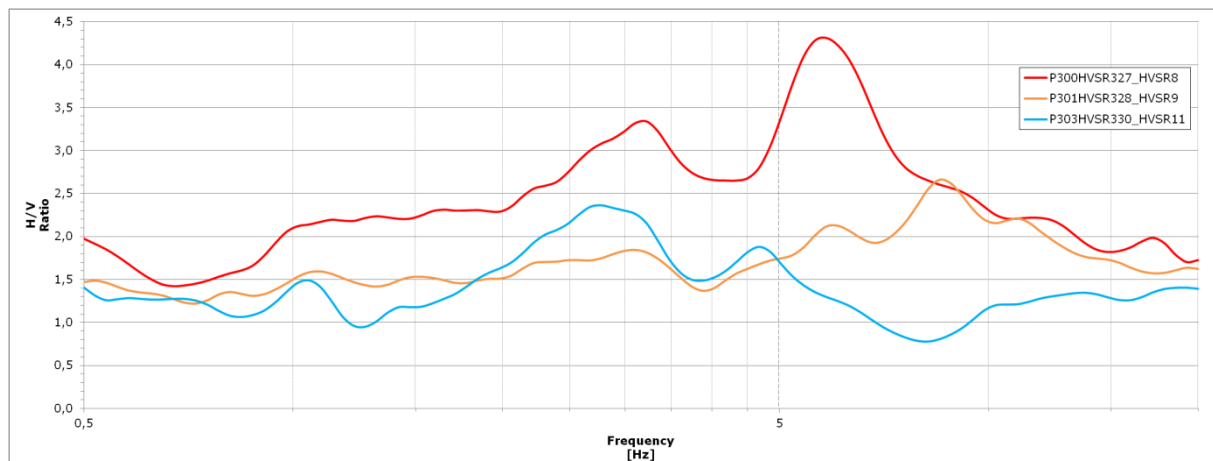


Figura 36. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2018 nell'area di Parrana San Giusto, Parrana San Martino, Pietreto e La Casa. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P300HVSR327, P301HVSR328, P330HVSR330.

Considerando il profilo di velocità delle onde di taglio (Fig.37) ricavato dall'inversione congiunta della curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dall'antenna P186ESAC\_SPAC208 e la curva P225HVSR247 (realizzate presso La Casa), è possibile ipotizzare che tale picco sia riferito ad un contrasto di impedenza localizzato a circa 50 m di profondità probabilmente attribuibile al contatto tra UM e CAL, così come la curva P303HVSR330 (Parrana San Giusto), dove il contatto tra UM e CAL risale fino a circa 30 metri. Tale significato geologico è attribuibile soltanto alle misure localizzate più in prossimità di tale contatto (P224HVSR246, P225HVSR247 e P126HVSR148) in quanto sembra difficile ipotizzare che il passaggio tra le due unità rimanga a profondità costante anche al di sotto delle misure ubicate più ad W (Fig.35). In quest'ultimo caso, il picco a 2-2.5 Hz potrebbe riferirsi ad un contrasto di impedenza dovuto all'eterogeneità di UM



(caratterizzato da alternanze più o meno regolari di arenarie e conglomerati e argille e marne) oppure legato ad un aumento del grado di compattazione all'interno di questa unità. La stessa interpretazione geologica può essere fatta per il massimo a 1.2 Hz della misura P122HVSR144, ubicata a Pietreto nei pressi del contatto tra UM e le formazioni Plioceniche: in questo caso il contrasto di impedenza si trova a circa 70-80 m di profondità.

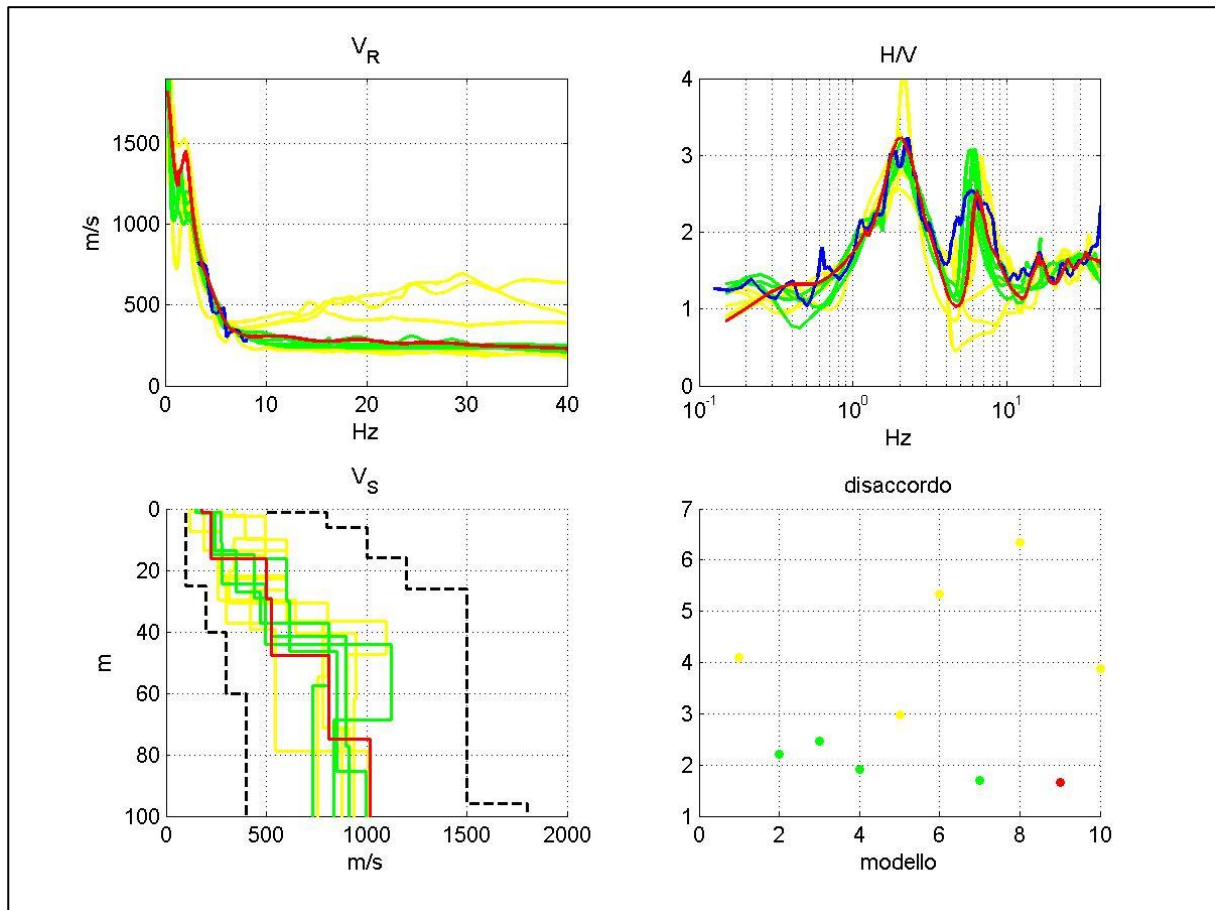


Figura 37 – Risultati dell’inversione congiunta della curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dall’antenna P186ESAC\_SPAC208 e della curva HVSR P225HVSR247 realizzate in località La Casa. In blu sono indicate le curve sperimentali, in rosso il miglior profilo ottenuto con le relative curve sintetiche, in verde i profili (con le corrispondenti curve) il cui disaccordo non supera di oltre il 50% quello del profilo migliore ed in giallo i restanti profili ottenuti. In basso a destra il grafico riporta i valori del disaccordo caratterizzanti i diversi modelli.

Alcune curve (P224HVSR246, P225HVSR247, P119HVSR141 e P126HVSR148; HV1\_A6, HV2\_A6, M38 e M45 in Fig.35 e P300HVSR327) denotano la presenza di un ulteriore picco alla frequenza di 5-6 Hz e di 8,4 Hz (P301HVSR328). Considerando l’inversione in Fig.37, tale massimo potrebbe riferirsi ad un contrasto di impedenza a 15-20 m di profondità, anch’esso probabilmente connesso alle alternanze litologiche presenti all’interno di UM oppure alla presenza di coltri eluvio-colluviali e di frana.

Le indagini HVSR realizzate in quest’area non rilevano la presenza di significativi contrasti di impedenza nell’intervallo di frequenza di interesse ingegneristico relativi al contatto tra i corpi franosi e le Unità Mioceniche.

## 5.2 Colognole – Le Case

L'abitato di Colognole è ubicato sulla sommità del crinale che costituisce lo spartiacque tra il Torrente Morra a N ed il Torrente Salvalano a S, mentre quelle di Le Case sul crinale appena a sud che costituisce lo spartiacque tra il Torrente Savalano a N ed il Botro delle Gallinarelle a S.

La peculiarità geologica di Colognole è quella di trovarsi in corrispondenza di una placca di calcari organogeni ed arenarie mioceniche dello spessore massimo di circa 20 metri in discordanza netta sui calcari marnosi di CAL (Fig.38, Fig.39). I versanti meridionali, settentrionali e orientali del crinale sono interessati da numerosi movimenti gravitativi di diversa tipologia e stato di attività.

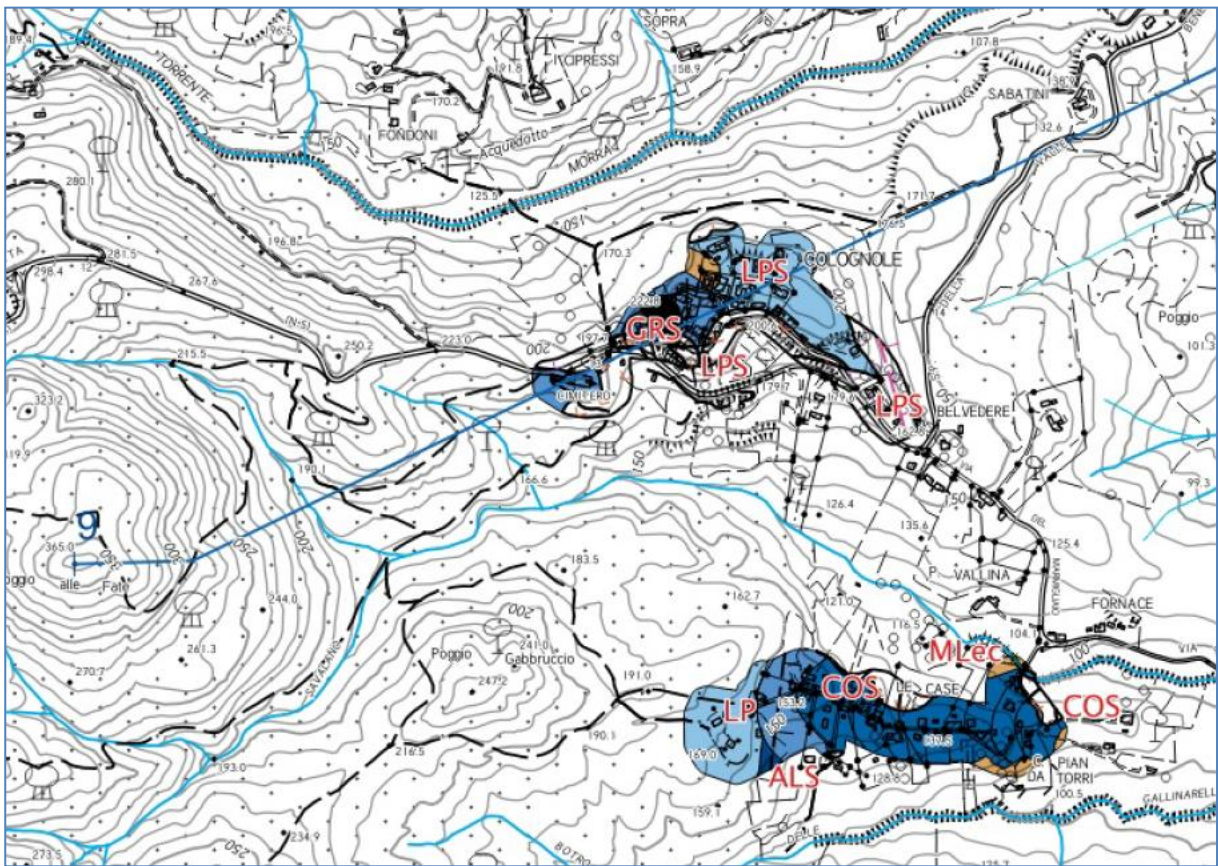


Figura 38 - Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Colognole e Le Case

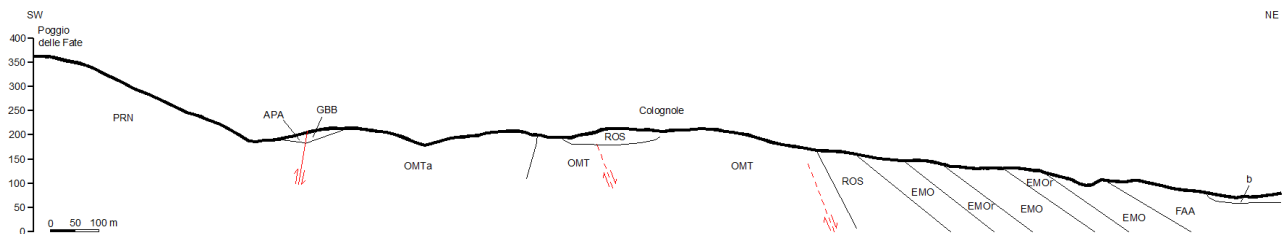


Figura 39. Sezione geologica dell'area di Colognole (Sezione 9)



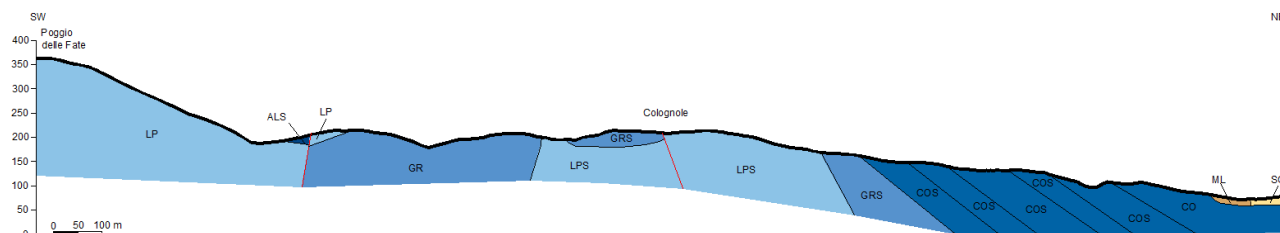


Figura 40. Sezione geologico-tecnica dell'area di Colognole (Sezione 9)

La misura HVSR P135HVS157, realizzata all'interno dell'abitato sull'Unità Miocenica, e le misure P136HVS158, P176HVS198 e P223HVS245, realizzate ad est dell'abitato su CAL, mostrano la presenza di picchi di ampiezza a circa 2 Hz (Fig.41). Alla luce di questa comune caratteristica e dello spessore di UM, tali massimi sono quindi riferibili a deboli contrasti di impedenza all'interno dell'Unità CAL: considerando valori di  $V_S$  di circa 800 m/s dedotti dalla curva di dispersione ottenuta dall'antenna P187ESAC\_SPAC209 (Fig.43), tali contrasti si trovano a profondità di circa 100 m.

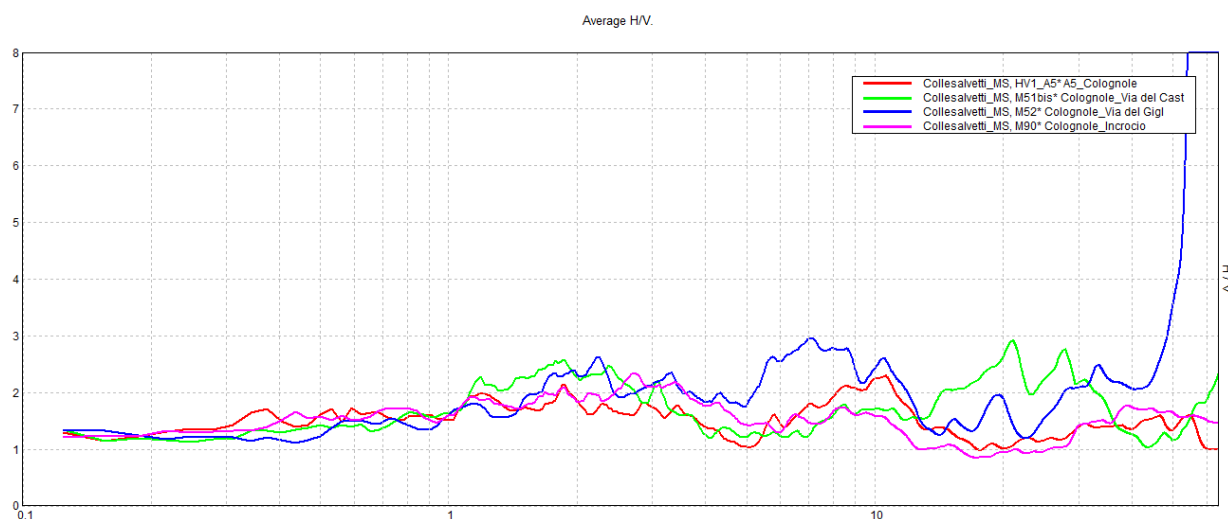


Figura 41. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di Colognole. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P223HVS245, P135HVS157, P136HVS158, P176HVS198

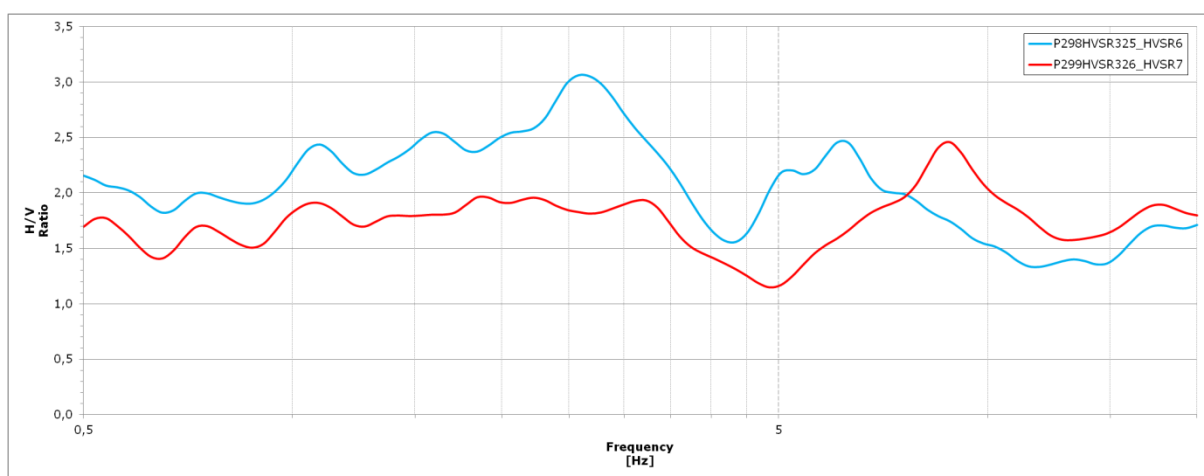


Figura 42. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2018 nell'area di Colognole. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P298HVS325 e P299HVS326

La misura P135HVS157 non evidenzia quindi contrasti di impedenza al contatto tra UM e CAL, probabilmente a causa dell'elevato stato di cementazione dei depositi arenacei in corrispondenza dell'abitato.

I picchi a 7 e 10 Hz delle misure P136HVS158 e P223HVS245 (M52 e HV1\_A5 in Fig.41) sono presumibilmente riferiti alla presenza di depositi antropici di pochi metri di spessore.

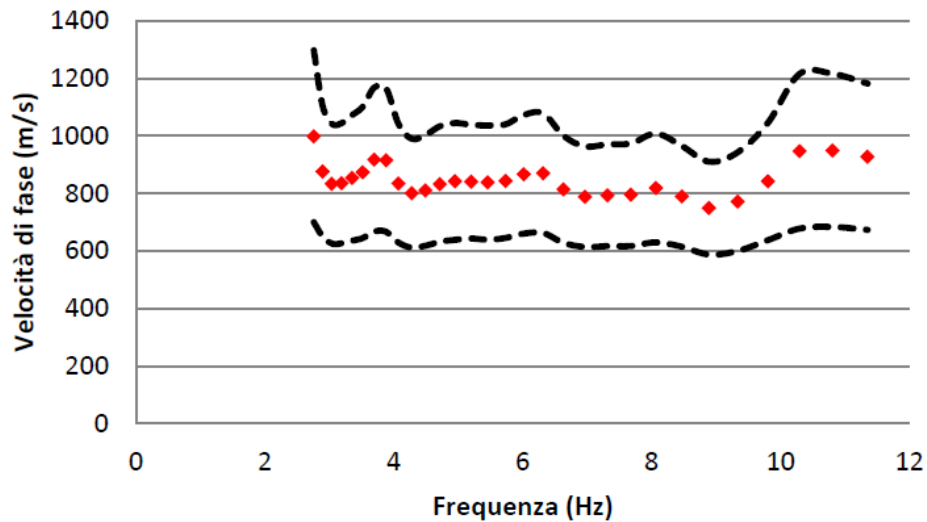


Figura 43. Curva di dispersione delle onde di Rayleigh (punti rossi) ricavata dall'antenna sismica P187ESAC\_SPAC209 ubicata nei pressi dell'abitato di Colognole. Le linee nere tratteggiate rappresentano il relativo intervallo di confidenza

Le misure effettuate in corrispondenza dell'abitato di Le Case, hanno messo bene in evidenza, nel caso dell'HVS P137HVS159, il contrasto di impedenza fra il substrato litoide non sismico (basalti) e le formazioni dell'UM: in questo caso il picco di impedenza pari a 9,0 Hz ed i valori di Vs dedotta dalla prova MASW-ESAC indicano una profondità di 9-10 metri. Procedendo verso est, il picco di 6,97 Hz (P139HVS161) sono invece imputabili alle variazioni litologiche all'interno della copertura UM.

### 5.3 Crocino

L'abitato di Crocino è ubicato sul fondovalle del T. Morra che drena da S verso N. In questo settore la valle è incisa all'interno dei terreni pliocenici (UP) costituiti da alternanze di argille coesive e sabbie addensate. Il fondovalle è molto limitato in estensione e caratterizzato dalla presenza di modesti spessori (max. 10 m) di depositi alluvionali prevalentemente limo-sabbiosi, sciolti o poco addensati, non cementati (Fig.44). Localmente sono presenti in posizione prossima al versante lembi di limitata estensione e spessore ( $i < 3$  m) di depositi alluvionali terrazzati costituiti da sabbie e ghiaie fini sciolte. L'abitato si sviluppa prevalentemente in destra idrografica, in posizione più addossata al versante dove affiorano i terreni sabbiosi di UP con spessori di circa 40-50 metri. I versanti sono caratterizzati dalla presenza di coperture eluvio-colluviali a prevalente tessitura argillo-sabbiosa di spessori valutabili intorno ai 10 metri che sono localmente interessati da fenomeni gravitativi di limitata estensione (prevalentemente colamenti).

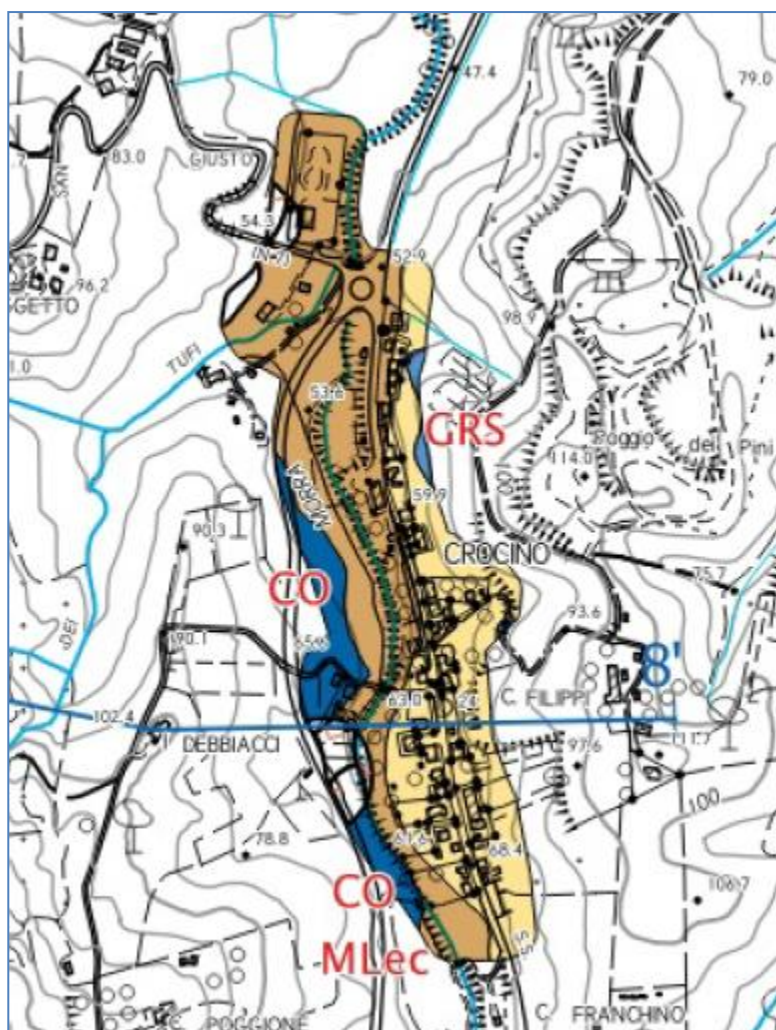


Figura 44– Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Crocino

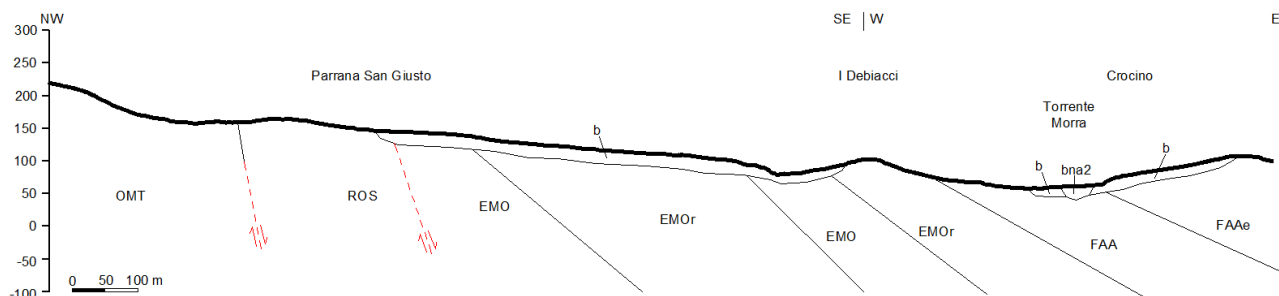


Figura 45. Sezione geologica dell'area di Parrana San Giusto – Crocino (Sezione 8)

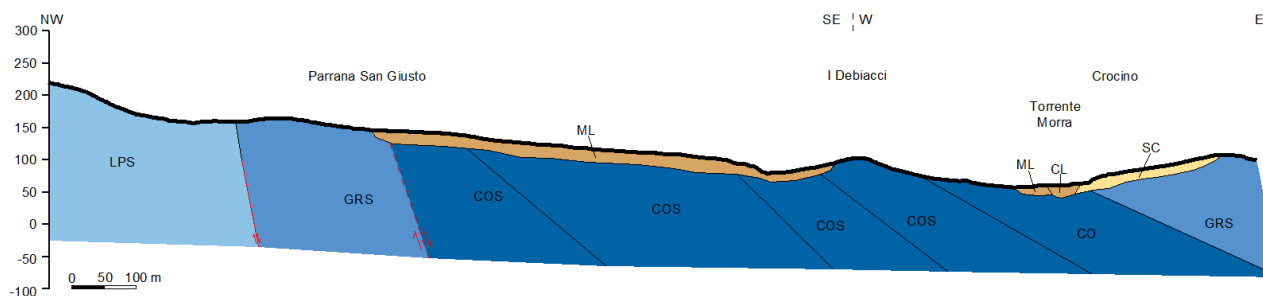


Figura 46. Sezione geologico-tecnica dell'area di Parrana San Giusto – Crocino (Sezione 8)

Le misure P130HVSR152 e P175HVSR197 realizzate nell'abitato non evidenziano significativi contrasti di impedenza nell'intervallo di frequenze 1-10 Hz (Fig.47). L'unico picco rilevante è mostrato dalla P175HVSR197 a circa 0.4 Hz, collegato verosimilmente ad un contrasto di impedenza a qualche centinaia di metri di profondità. Entrambe le misure non sembrano mostrare la presenza di effetti risonanti legati al contatto tra i depositi alluvionali ed eluvio-colluviali e i depositi di UP.

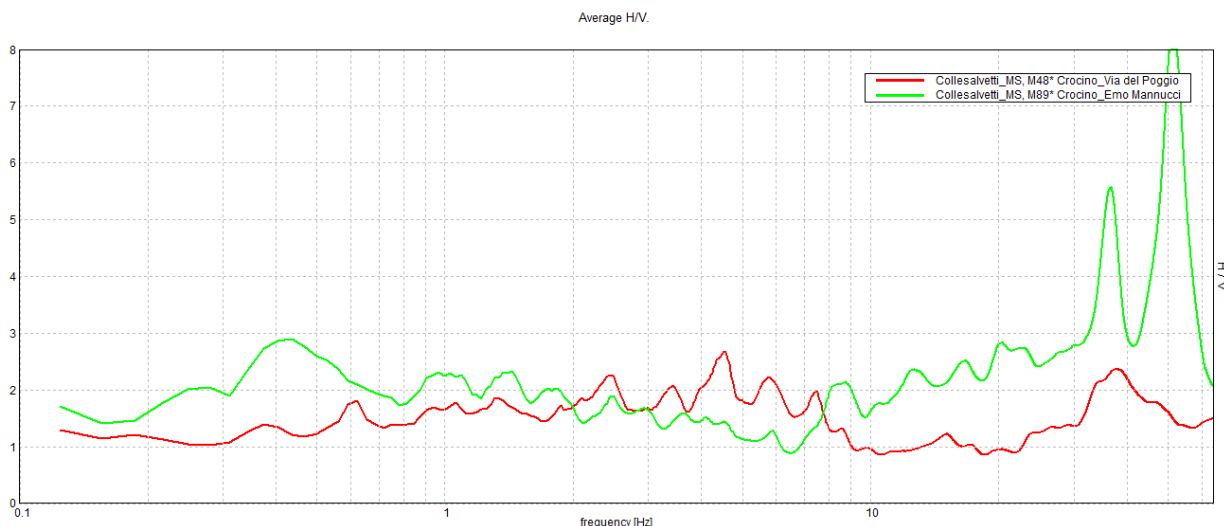


Figura 47 – Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di Crocino. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P130HVSR152 e P175HVSR197

Nella misura P302HVSR329, loc. Rimazzano a sud dell'abitato Crocino, è stato riscontrato un picco da 1,4 Hz presumibilmente attribuibile al passaggio, oltre i -50 m, fra la facies argillosa e quella sabbiosa dei depositi UP.



## 5.4 Castell'Anselmo – Torretta Vecchia

L'abitato di Castell'Anselmo è ubicato sulla sommità di un rilievo posto alla terminazione settentrionale dello spartiacque tra il T. Nugola a N e il Torrente Morra a S. La parte bassa dei versanti è caratterizzata dalla presenza dei terreni coesivi della Formazione delle Argille Azzurre (FAA) mentre alla sommità è presente una successione spessa fino a 40 metri appartenente alla litofacies sabbiosa e calcarenitica della stessa formazione (FAAe), entrambe appartenenti alle unità plioceniche (UP) (Fig.48, Fig.49). La giacitura con immersione verso NE delle sabbie ha favorito il modellamento di un'importante orlo di scarpata morfologica lungo la direzione dell'immersione e cioè sul versante SO del rilievo.

I versanti del rilievo sono interessati da numerosi fenomeni gravitativi caratterizzati da movimenti di tipo diverso in funzione delle litologie prevalenti: per colamento laddove prevalgono terreni argillosi e per crollo e/o fenomeni più complessi dove prevalgono i terreni sabbiosi.

Lungo i versanti nord-orientali del rilievo sono presenti in discordanza angolare su UP i terreni marino-costieri pleistocenici (QM-PLC) immergenti a NE.

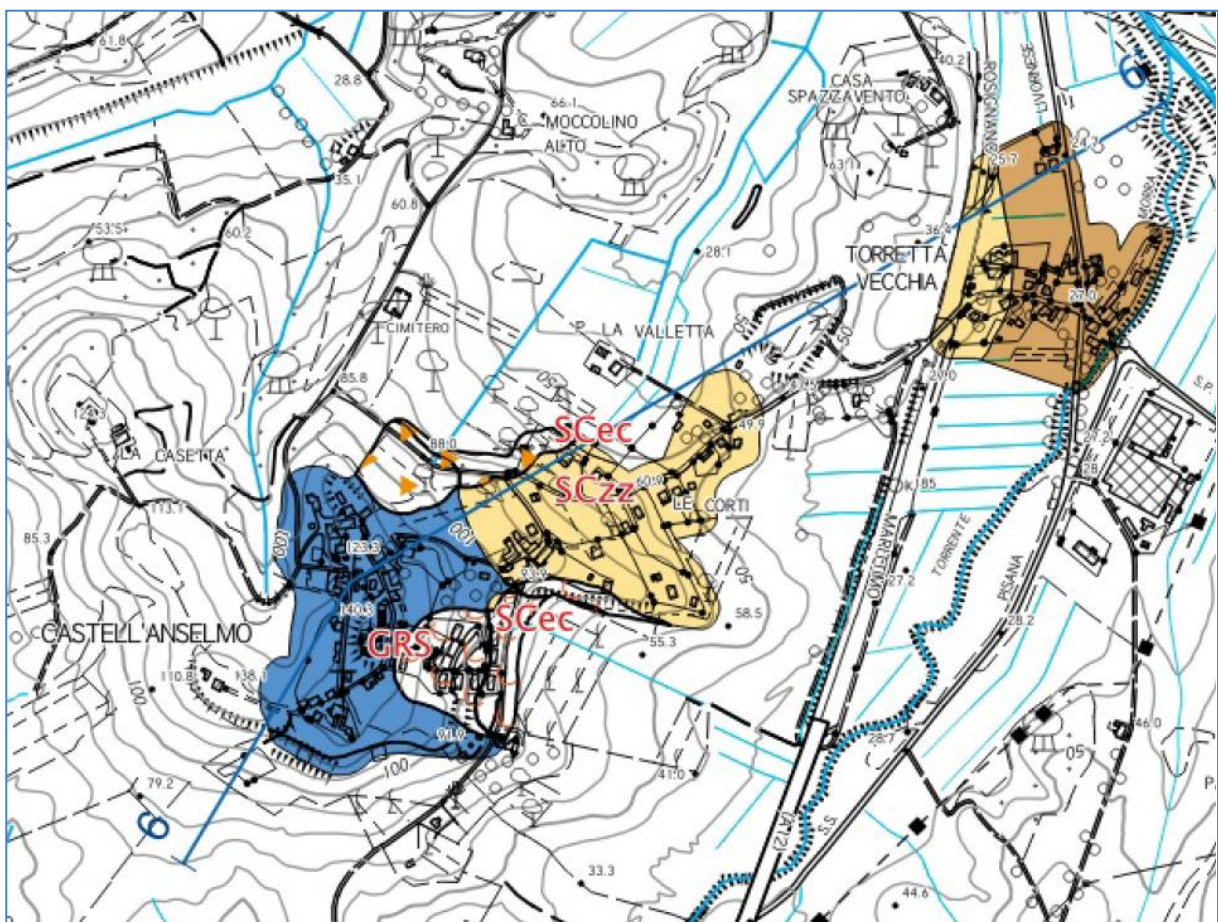


Figura 48. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Castell'Anselmo





Figura 49. Sezione geologica dell'area di Castell'Anselmo (Sezione 6)

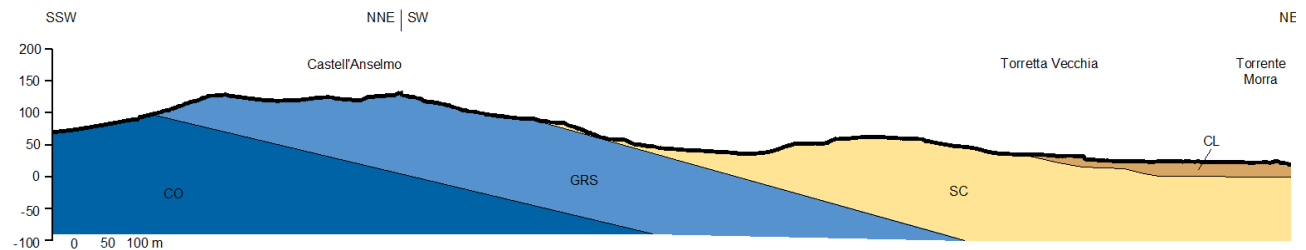


Figura 50. Sezione geologico-tecnica dell'area di Castell'Anselmo (Sezione 6)

La misura P115HVS137, effettuata nella parte sommitale del rilievo sull'Unità Pliocenica FAAe, non rileva la presenza di contrasti di impedenza né tra le diverse litofacies di UP né al contatto in profondità con le unità UM. Il picco presente a circa 2 Hz è riferito ad un disturbo di tipo industriale. Le misure P319HVS346 e P320HVS347 eseguite a NE del centro abitato, evidenziano un picco a circa 2,7 Hz. Dall'analisi congiunta MASW-ESAC P329ESAC\_SPAC356 si ottiene che tale contrasto è attribuibile ad una profondità di circa 50 m, relativo al passaggio dalla facies sabbiosa a quella argillosa delle UP. Il picco di frequenza pari 11,8 Hz nell'HVS P320HVS347 è da attribuirsi esclusivamente alla copertura antropica (riempimento) presente nel piazzale attorno al Cimitero.

Viceversa la misura P321HVS348 eseguita in località Montecandoli, a Nord di Castell'Anselmo, individua un picco di impedenza a frequenze ancora più alte, circa 13,7 Hz, riconducibile alla presenza delle lastre di calcareniti ad "Amphistegina" sub-affioranti appartenenti alle UP.

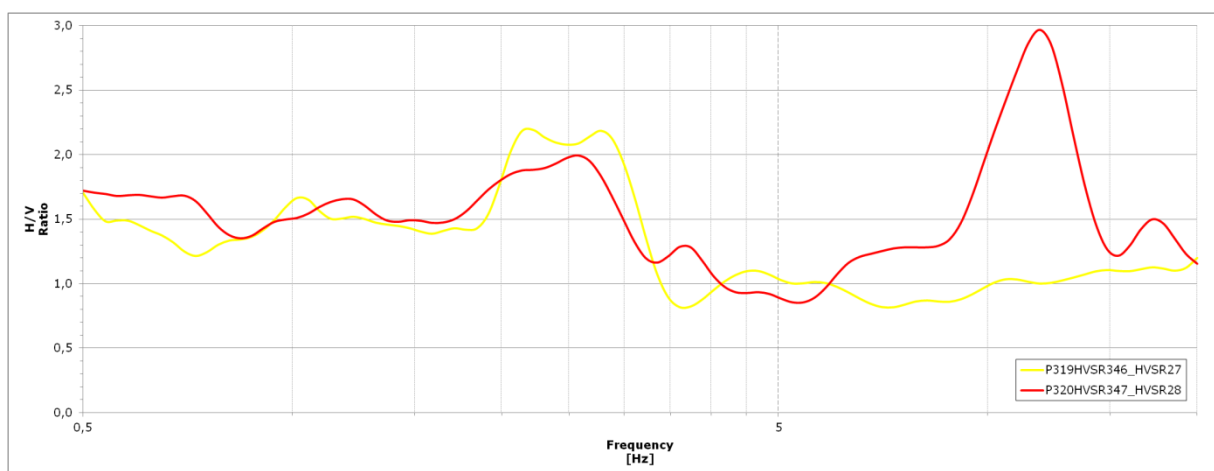


Figura 51. Sovrapposizione delle curve HVS realizzate nel 2018 nell'area di Castell'Anselmo. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P319HVS346 e P320HVS347.

La misura P117HVS139 (M36 in Fig.52), effettuata sui depositi quaternari PLE, e la P172HVS194 (M86 in Fig.52), situata sui depositi alluvionali in zona Torretta Vecchia, presentano un picco di ampiezza 2 a circa 1 Hz: considerando per i depositi QM-PLE valori di  $V_s$  di circa 400-500 m/s (dedotti dall'inversione congiunta realizzata a Collesalveti, vedere capitolo 5.6) questo debole contrasto di impedenza si trova a circa 100 m di profondità e potrebbe essere riferito al contatto tra l'Unità Quaternaria e l'Unità Pliocenica. Un picco analogo è presente anche nella misura P174HVS196 (M88 in Fig.52), situata sul fondovalle presso Torretta Nuova: in questo caso, il debole contrasto di impedenza, situato a profondità simili a precedente, potrebbe riferirsi ad un'interfaccia all'interno delle Unità Pliocenica. Anche questa volta, il picco presente a circa 2 Hz è riferito ad un disturbo di tipo industriale. Come per le misure realizzate presso Crocino, sia la P172HVS194 che la P174HVS196 non rilevano la presenza di interfacce risonanti nell'intervallo 1-10 Hz riferite al contatto tra i depositi alluvionali del torrente Morra e i materiali sottostanti.

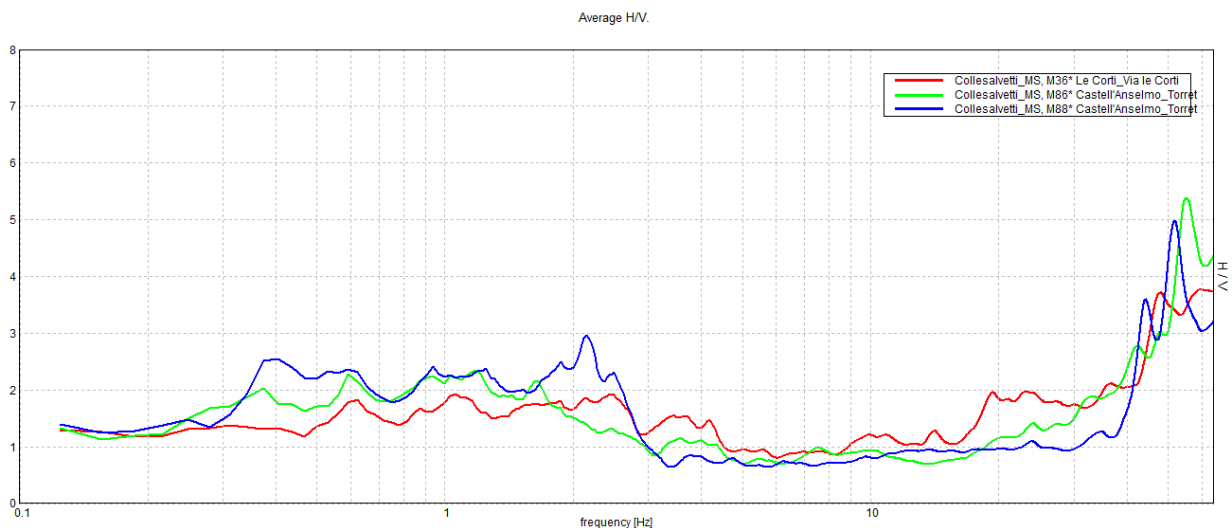


Figura 52. Sovrapposizione delle curve HVS1 realizzate nel 2013 nell'area di Castell'Anselmo. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P117HVS139, P172HVS194 e P174HVS196.

## 5.5 Nugola Vecchia-Nugola Nuova

Il centro abitato si estende lungo un crinale molto irregolare che costituisce lo spartiacque tra il Rio Fontaccia a N e il Torrente Tanna a S. Si tratta di un crinale con la sommità molto ampia la cui quota e la cui morfologia cambia al cambiare dei litotipi presenti. Da SO la prima parte dell'abitato è ubicato in corrispondenza della Formazione delle Argille Azzurre (UP) che verso l'alto e verso NE passa alla litofacies sabbiosa, potente alcune decine di metri la cui presenza è marcata dalla scarpata modellata sul lato a reggipoggio (Fig.53). Verso NE, in prossimità della sella che separa Nugola Nuova da Nugola Vecchia, è presente il contatto discordante con i terreni sabbiosi del Quaternario marino (QM-PLE), anch'essi immergenti verso nord-est (Fig.53, Fig.54). Infine a Nugola Vecchia è presente il terrazzo alluvionale del Pleistocene medio finale (bnb1, QC).

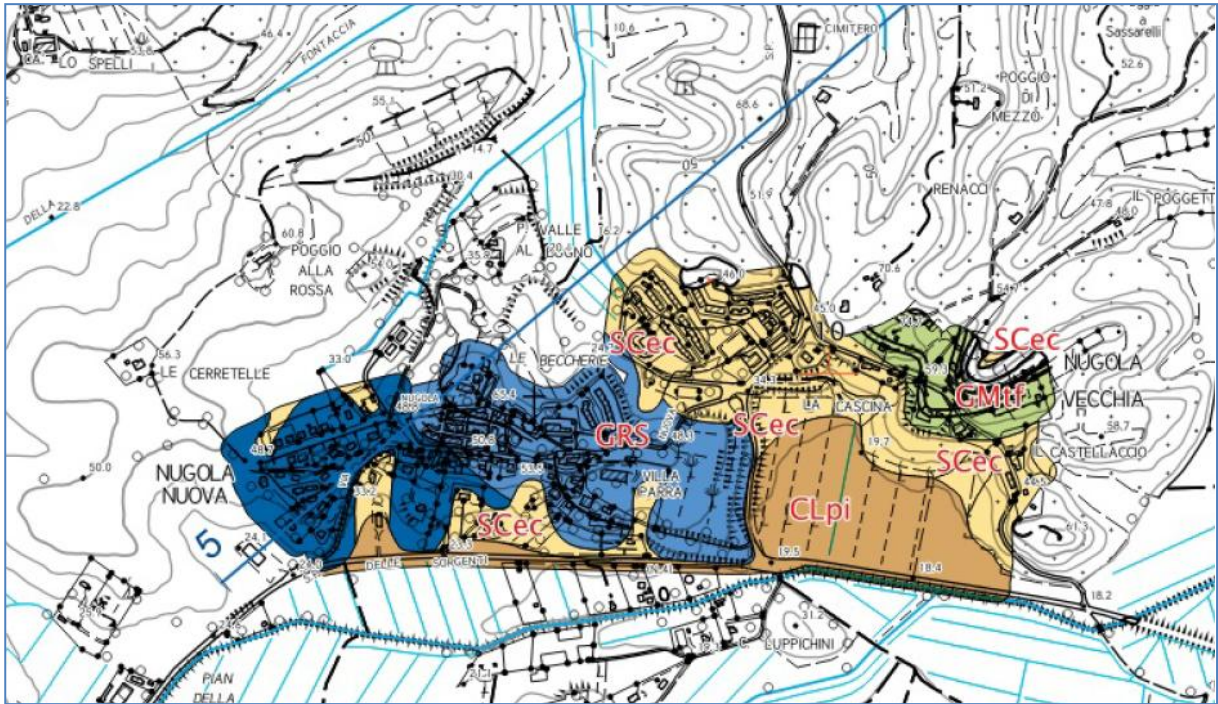


Figura 53. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Nugola

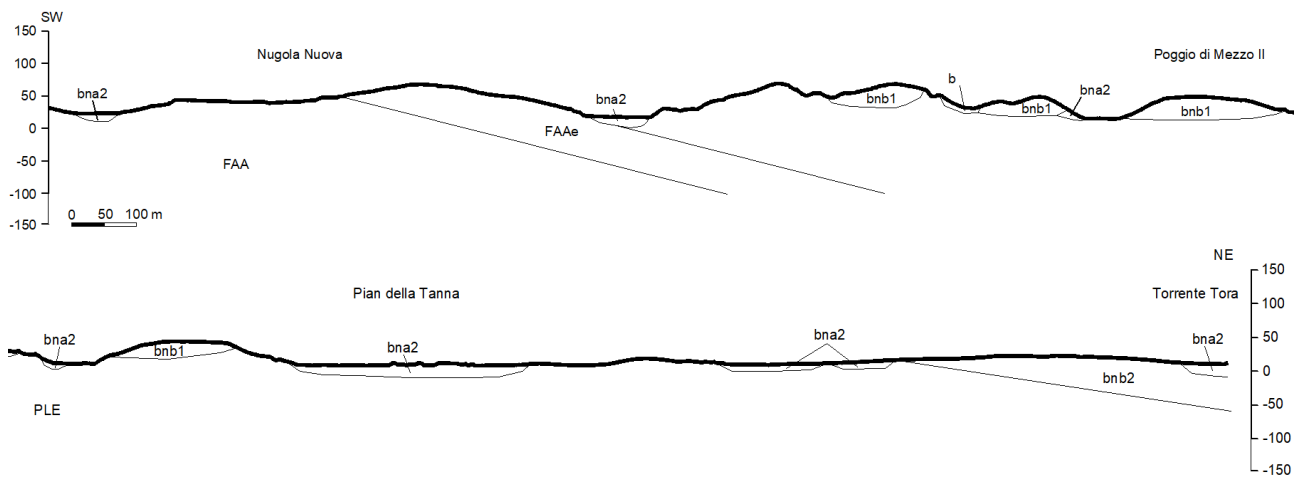


Figura 54. Sezione geologica dell'area di Nugola Vecchia – Nugola Nuova (Sezione 5)

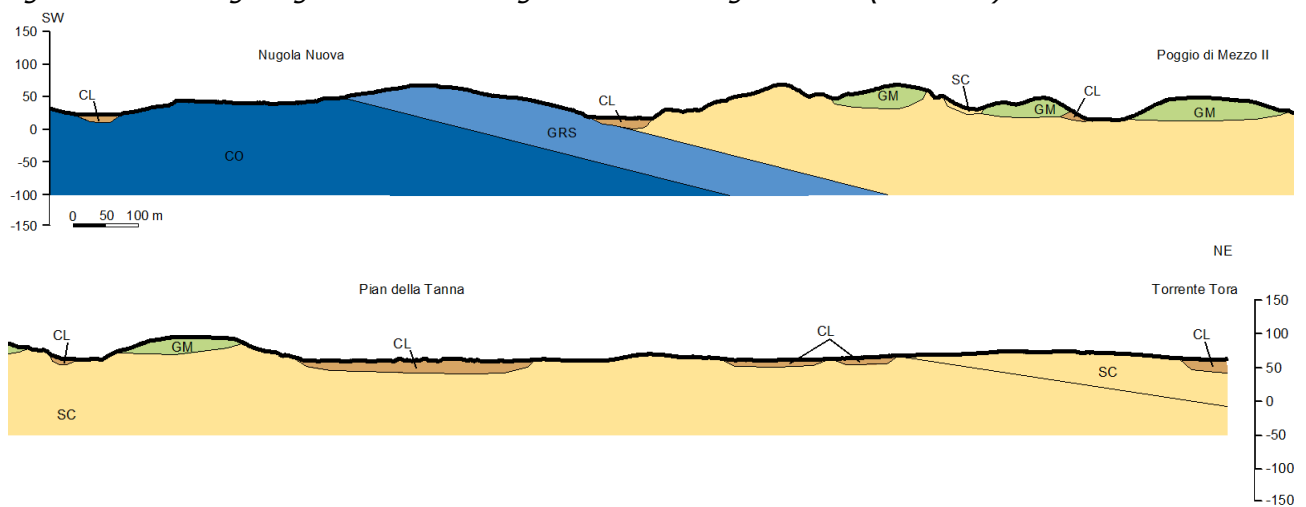


Figura 55. Sezione geologico-tecnica dell'area di Nugola Vecchia – Nugola Nuova (Sezione 5)

Le misure HVSR realizzate presso Nuvola Vecchia e Nuvola Nuova mostrano un picco evidente a circa 0.4 Hz (Fig.56): tale massimo può corrispondere ad un contrasto di impedenza significativo ad una profondità di circa 250-300 metri che potrebbe geometricamente corrispondere al contatto tra UP e UM.

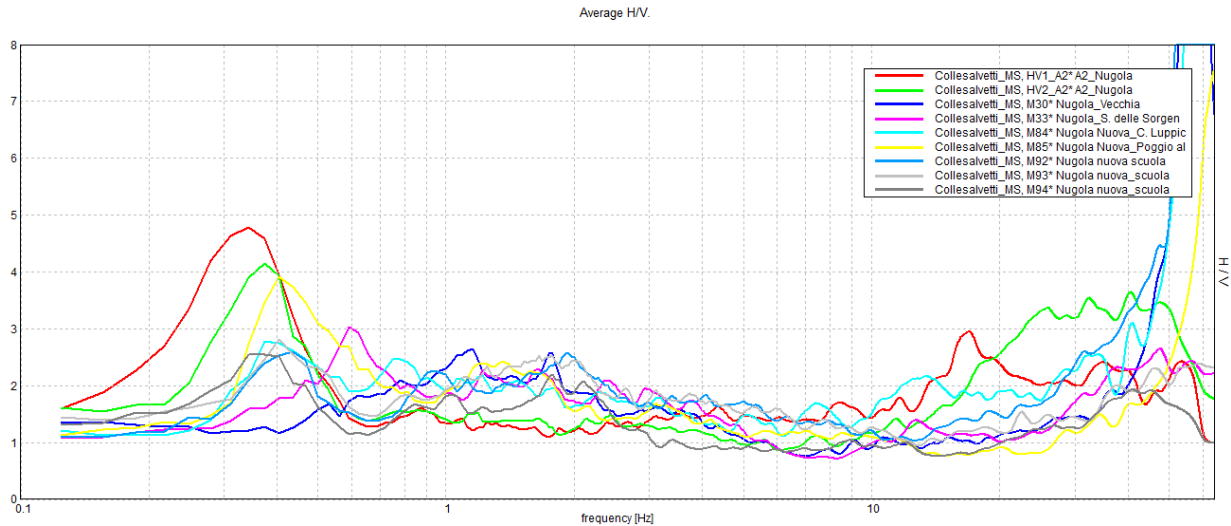


Figura 56. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di Nugola Vecchia – Nugola Nuova. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P217HVSR239, P218HVSR240, P111HVSR133, P114HVSR136, P170HVSR192, P171HVSR193, P178HVSR200, P179HVSR201, P180HVSR202

Tutte le misure, inoltre, sono caratterizzate da un largo picco tra 1 e 2 Hz di ampiezza circa 2, meno evidente nelle misure P217HVSR239 e P218HVSR240 (rispettivamente HV1\_A2 e HV2\_A2 in Fig.56). Prendendo in considerazione i risultati dell'inversione congiunta della curva di dispersione ottenuta dall'antenna P183ESAC\_SPAC205 e la misura P217HVSR239 (Fig.57), questo massimo potrebbe essere riferito al debole contrasto di impedenza riscontrato a circa 65 m di profondità, probabilmente connesso ad aumento del grado di compattazione all'interno di UP.

La misura P112HVSR134 (localizzata presso Valle al Bugno) mostra, a differenza delle altre, un picco a circa 3 Hz. In questo caso, il debole contrasto di impedenza localizzato all'interno di UP, si trova a profondità di circa 30 m.

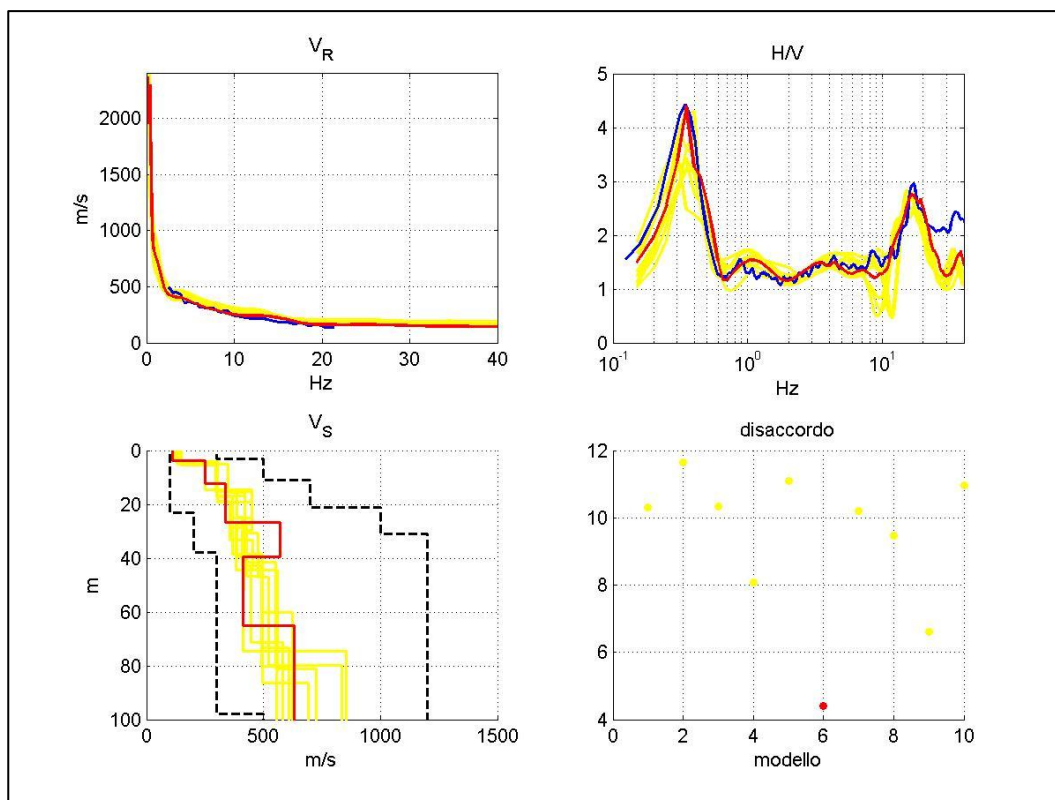


Figura 57. Risultati dell'inversione congiunta della curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dall'antenna P183ESAC\_SPAC205 e dalla curva HVSR P217HVSR239 realizzate in località Nugola Nuova. In blu sono indicate le curve sperimentali, in rosso il miglior profilo ottenuto con le relative curve sintetiche, in giallo i profili (con le corrispondenti curve) il cui disaccordo supera di oltre il 50% quello del profilo migliore. In basso a destra il grafico riporta i valori del disaccordo caratterizzanti i diversi modelli.

## 5.6 Collesalveti

L'abitato di Collesalveti è ubicato sulla sommità del terrazzo alluvionale (bnb1) in destra idrografica del T.Tora con un dislivello di circa 30 metri rispetto al sottostante fondovalle. L'area insediata tuttavia prosegue verso nord lungo la scarpata del terrazzo stesso e occupa in parte la superficie sommitale del terrazzo alluvionale più basso (bnb2) posto a circa 10 metri dal fondovalle mentre una parte importante occupa anche i lembi dello stesso terrazzo alluvionale che si trovano sulla destra del T.Tora estendendosi anche sulla pianura alluvionale stessa (Fig.58). Il terrazzo alluvionale più alto (bnb1) è costituito da ghiaie poligeniche, eterometriche scarsamente addensate e non cementate in matrice limosa, spesse circa 15-20 metri, che poggiano in discordanza sui termini sabbiosi delle unità QM, affioranti sulla scarpata occidentale del terrazzo (Fig.59). I depositi che costituiscono il terrazzo alluvionale più basso (bnb2) sono generalmente costituiti da sabbie limose e limi argillosi con sottili livelli di sabbie e ghiaie fini. La valle del F. Tora è caratterizzato da un riempimento di circa 20 metri di depositi prevalentemente fini che con ogni probabilità comprendono sia i depositi più antichi (Pleistocene superiore) sia quelli più recenti (olocenici) fino ai depositi di colmata conseguenti alla regimazione del corso d'acqua.



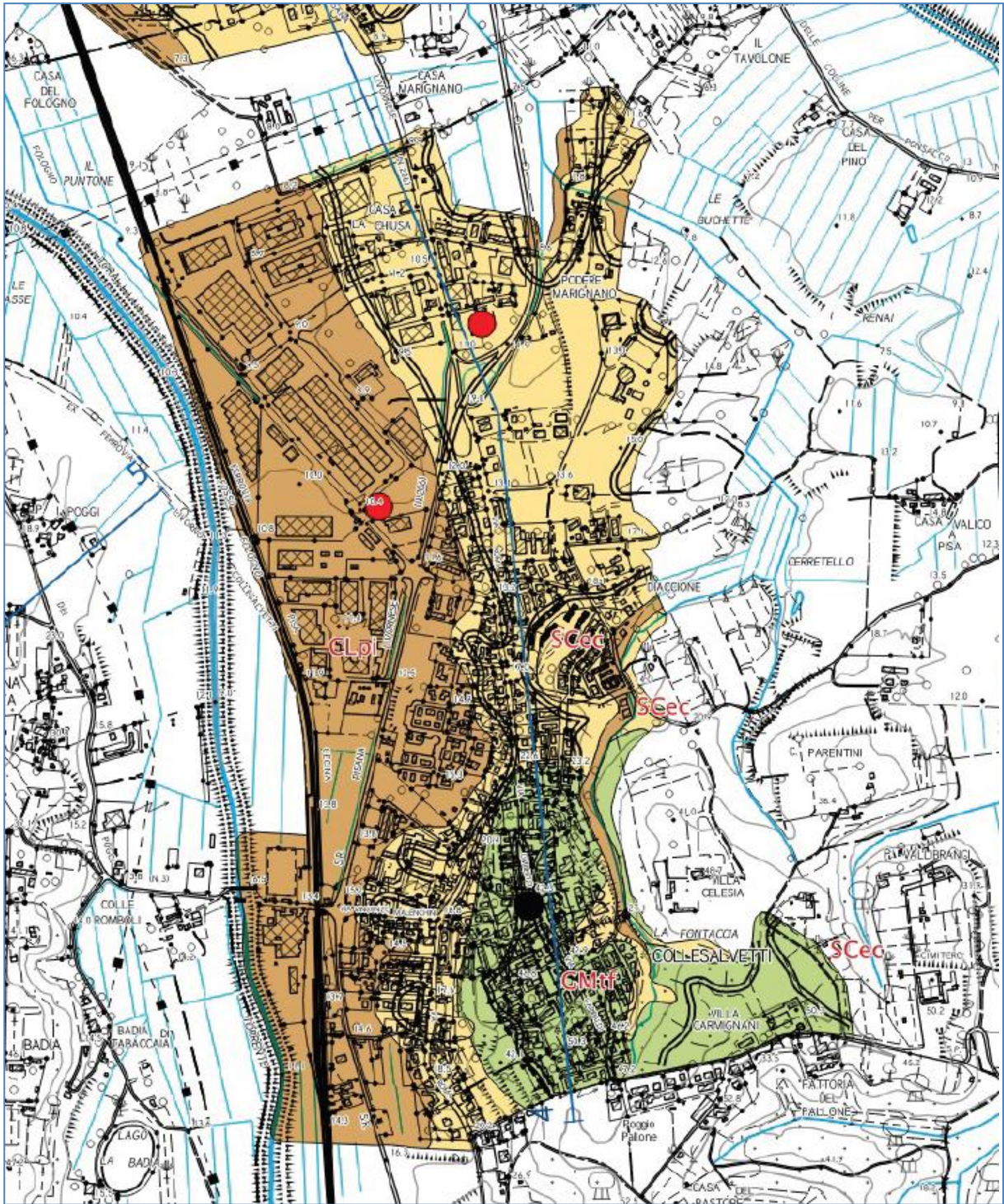


Figura 58. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Collesalveti

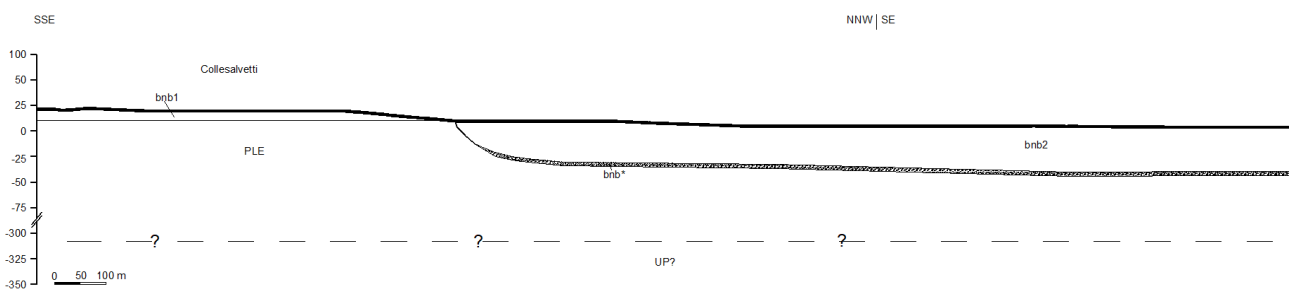


Figura 59. Sezione geologica dell'area di Collesalveti (Sezione 4)

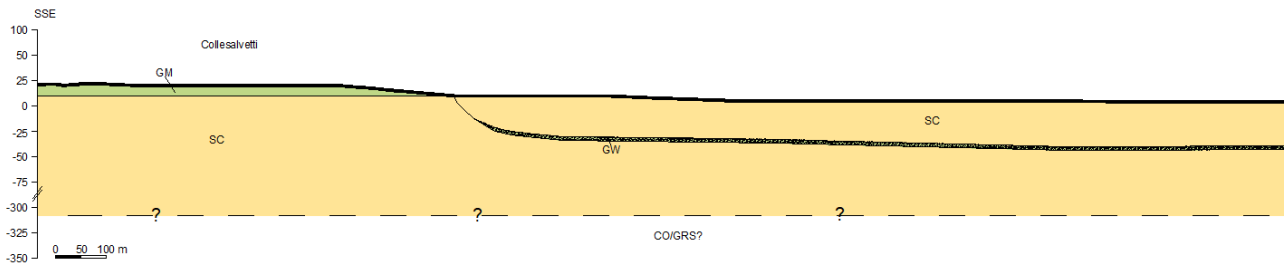


Figura 60. Sezione geologico-tecnica dell'area di Collesalveti (Sezione 4)

Le misure HVSr realizzate nella parte dell'abitato situata sui terrazzi alluvionali Pleistocenici più antichi (bnb1) e più recenti (bnb2) sono caratterizzate da un largo picco tra 1 e 2 Hz di ampiezza circa 2 (Fig.61-62-64).

Prendendo in considerazione i risultati congiunti dell'indagine MASW-ESAC P325ESAC\_SPAC352 e della misura P308HVSr335, questo massimo è presumibilmente riferito al contrasto dovuto alla presenza di un livello di ghiaie posto a circa 35/50 m alla base del terrazzo alluvionale pleistocenico bnb2. Tale contrasto di impedenza è stato rilevato in tutte le misure situate su bnb2 (P90HVSr112, P91HVSr113, P145HVSr167 e P316HVSr343).

Viceversa considerando i risultati dell'inversione congiunta della curva di dispersione ottenuta dall'antenna P182ESAC\_SPAC204 e la misura P216HVSr238 (Fig.63), questo massimo potrebbe essere riferito al debole contrasto di impedenza riscontrato a circa 65 m di profondità. Per le misure situate su bnb1 (P215HVSr237, P216HVSr238, P82HVSr104, P83HVSr105 e P84HVSr106), tale passaggio è probabilmente connesso al contatto tra quest'ultimi e UP.

Il picco ad alte frequenze, 8.1 Hz, individuato nella misura P306HVSr333 in località Villa Carmignani-Poggio Pallone, sempre sui terreni appartenenti al terrazzo bnb1, è molto probabilmente da ricondursi ad una variazione litologica all'interno della formazione stessa (lente di ghiaia) a profondità di circa 8-10 m.

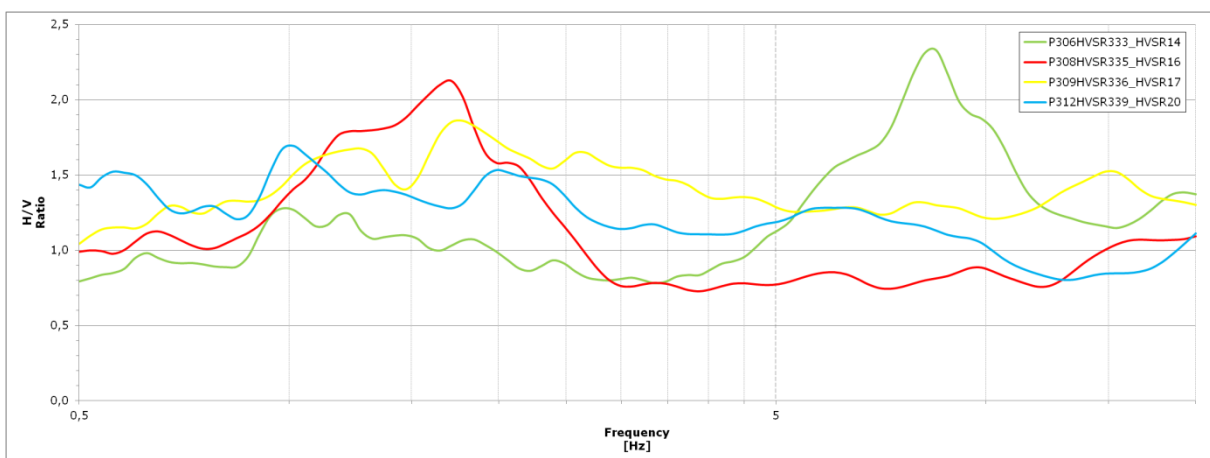


Figura 50 – Sovrapposizione delle curve HVSr realizzate nel 2018 nell'area di Collesalveti. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P306HVSr333, P308HVSr335, P309HVSr336 e P312HVSr339



Deboli contrasti di impedenza localizzati a profondità leggermente superiori, circa 20 m, potrebbero riferirsi al contatto tra i depositi terrazzati sommitali (bnb1) e le unità QM.

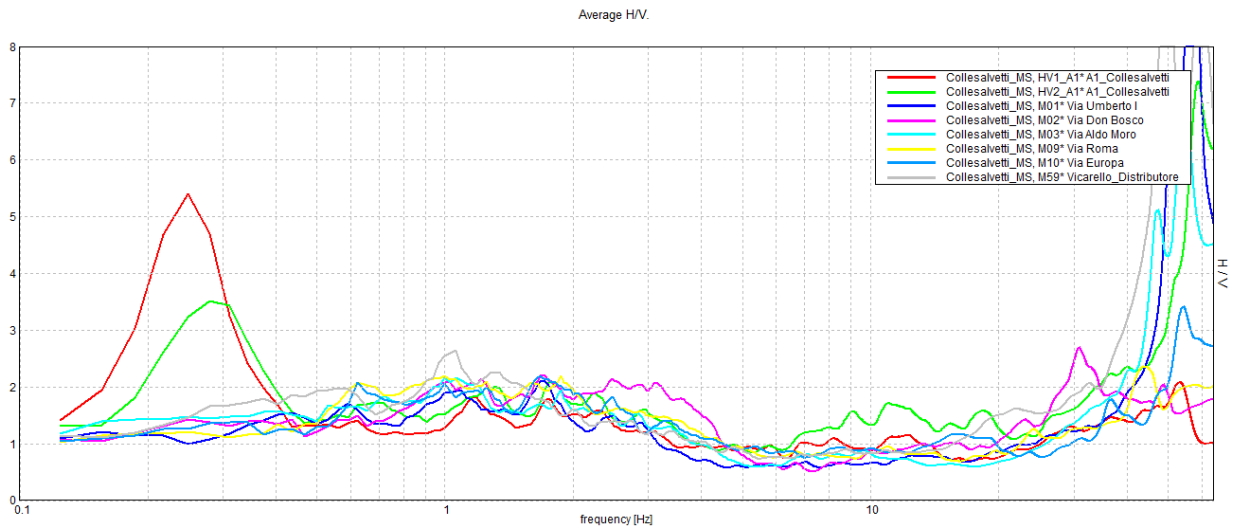


Figura 62 – Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell’area di Collesalvetti. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P215HVSR237, P216HVSR238, P82HVSR104, P83HVSR105, P84HVSR106, P90HVSR112, P91HVSR113, P145HVSR167

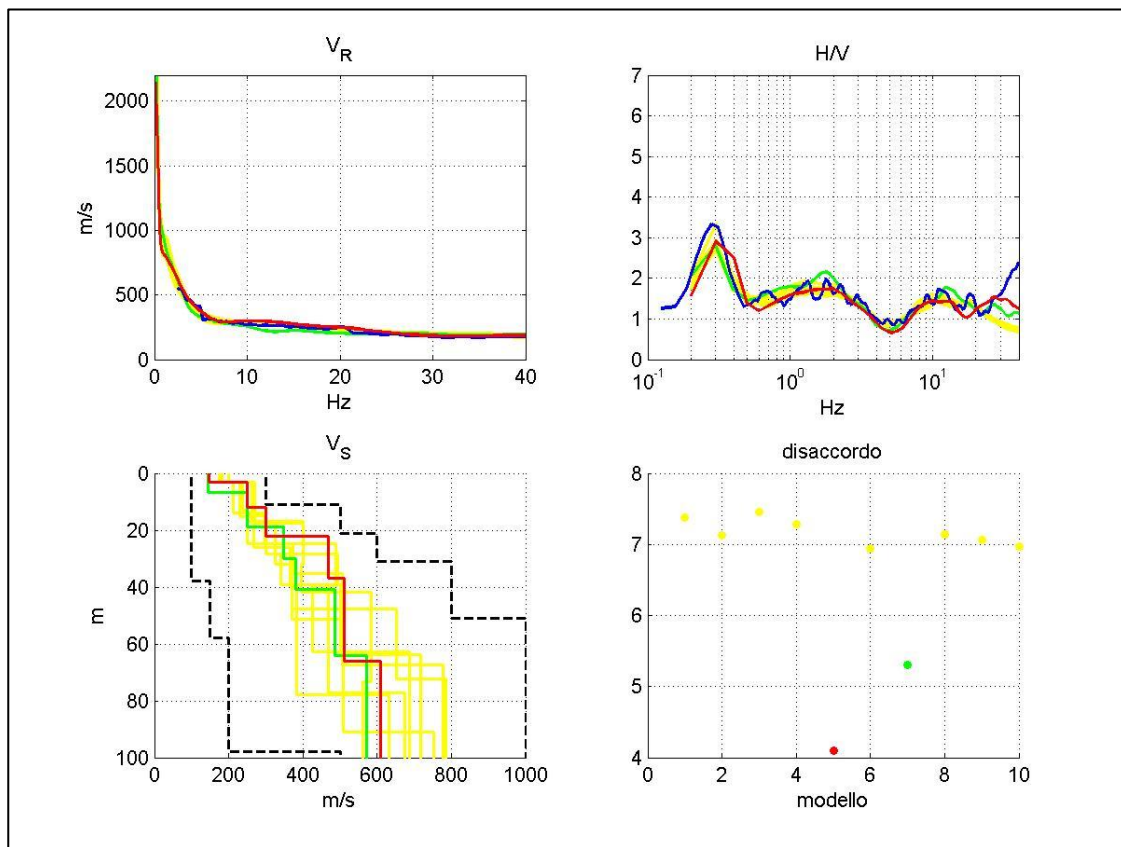


Figura 63. Risultati dell’inversione congiunta della curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dall’antenna P182ESAC\_SPAC204 e della curva HVSR P216HVSR238 realizzate in località Collesalvetti. In blu sono indicate le curve sperimentali, in rosso il miglior profilo ottenuto con le relative curve sintetiche, in verde i profili (con le corrispondenti curve) il cui disaccordo non supera di oltre il 50% quello del profilo

migliore ed in giallo i restanti profili ottenuti. In basso a destra il grafico riporta i valori del disaccordo caratterizzanti i diversi modelli.

Infine, le misure P215HVSR237 e P216HVSR238 (HV1\_A1 e HV2\_A1 in Fig.62) mostrano un picco evidente a circa 0.3 Hz: tale massimo può corrispondere ad un contrasto di impedenza significativo ad una profondità di 300-400 m ipotizzabile con le UP.

Per quanto riguarda le misure HVSR effettuate sulla zona di fondovalle del fiume Tora, queste sono caratterizzate da un "doppio picco" (particolarmente evidente nella P86HVSR108, M05 in Fig.64): il massimo principale, di ampiezza 4, ha una frequenza di circa 1.8 Hz, mentre quello secondario, di ampiezza 2.5-3, è localizzato a circa 1.2 Hz. Considerando i valori di Vs media dedotti dalle prove *down-hole* P78DH97 e P226DH248 realizzati nella piana della Tora, il contrasto di impedenza si trova a circa 30/35 m di profondità e come dalle stratigrafie di pozzi e sondaggi a disposizione, corrisponde al livello compatto di ghiaie sede di un importante acquifero artesiano, alla base dei depositi alluvionali (bna2).

Per quanto riguarda il picco secondario, il contrasto di impedenza ad esso associato si trova a circa 70-80 m di profondità e potrebbe riferirsi alla presenza della formazione PLE o di altri livelli di ghiaia o sabbie cementate.

La misura P153HVSR175 (M67 in Fig.64), ubicata sui depositi terrazzati bnb2 in zona I Poggi, denota un picco principale del tutto simile a quello delle altre ubicate sui materiali alluvionali olocenici: la presenza di un forte contrasto di impedenza indica che i depositi bnb2 in questa zona potrebbero avere caratteristiche dinamiche differenti rispetto a quelli affioranti in zona Collesalvetti-Vicarello, probabilmente a causa di un minor addensamento o di una maggiore presenza di materiale fino.

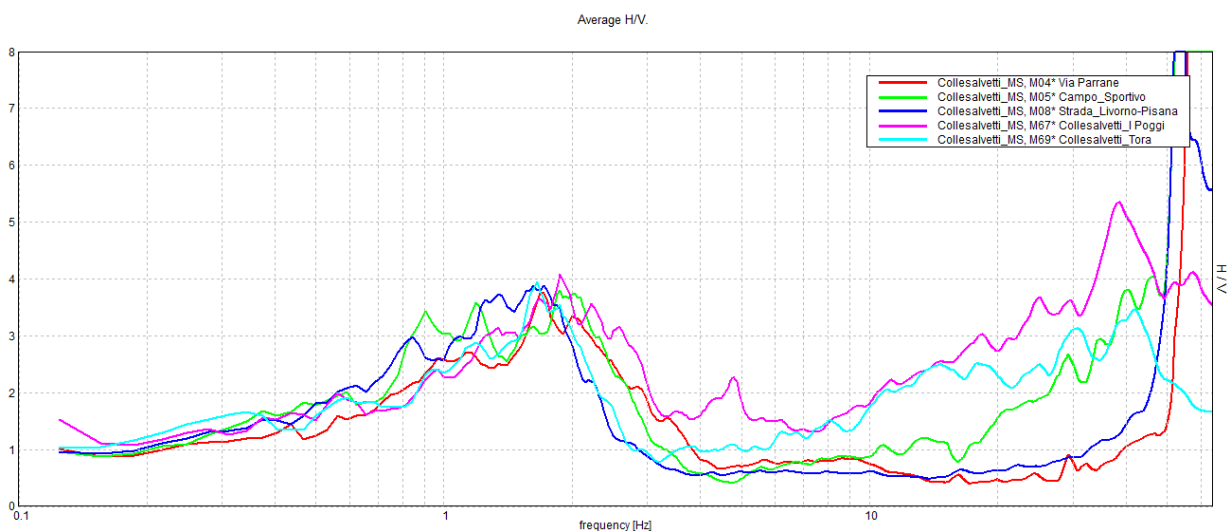


Figura 64. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di fondovalle del fiume Tora. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P85HVSR107, P86HVSR108, P89HVSR111, P153HVSR175, P155HVSR177

## 5.7 Vicarello

L'insediamento è ubicato sulle propaggini settentrionali del terrazzo alluvionale bnb2 che si estende per alcuni chilometri da Collesalveti verso nord (Fig.65). Nel settore di Vicarello il terrazzo è alto circa 5-10 metri sul fondovalle attuale e presenta una scarpata di terrazzo piuttosto sinuosa. Il deposito del terrazzo è costituito da circa 20-30 metri di limi, limi argillosi, limi sabbiosi e argille che nella pianura alluvionale sono seppelliti da circa 20 metri di depositi argillosi e limo-sabbiosi olocenici e recenti (Fig.66).

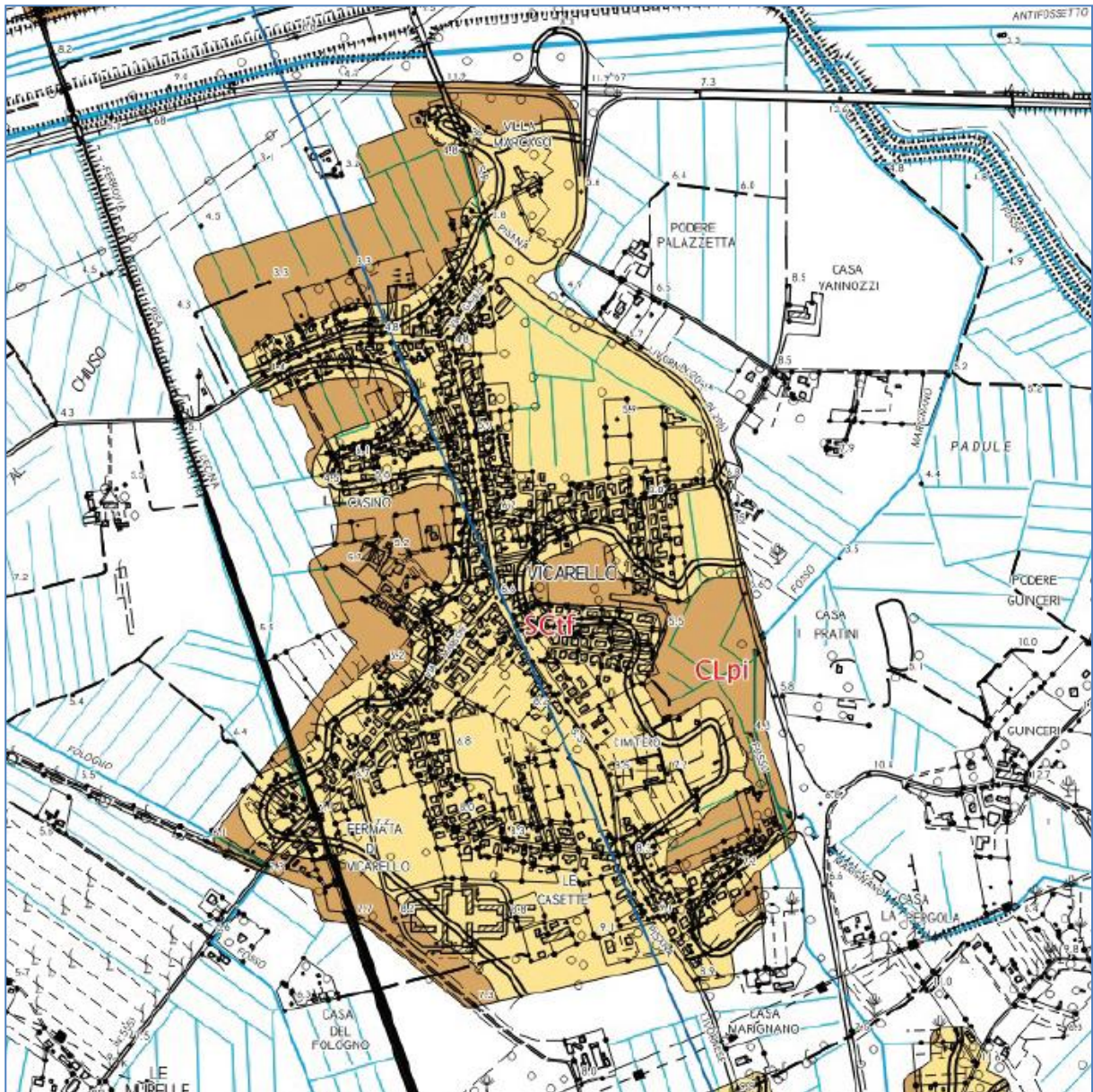


Figura 65. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Vicarello



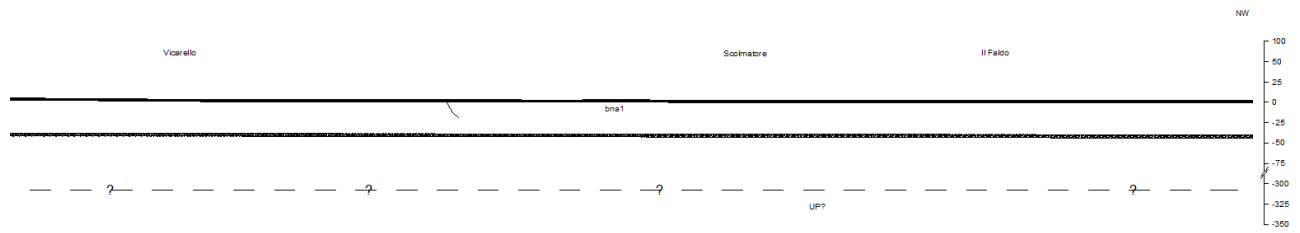


Figura 66. Sezione geologica dell'area di Vicarello (Sezione 4)

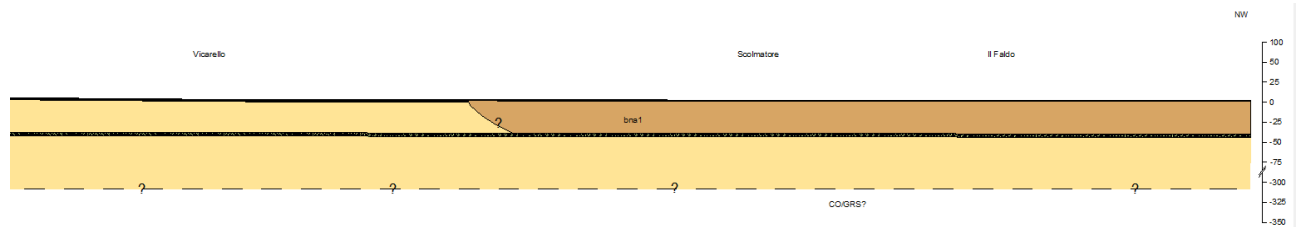


Figura 67. Sezione geologico-tecnica dell'area di Vicarello (Sezione 4)

Le misure HVSR realizzate sui depositi di terrazzo bnb2 sono caratterizzate da un largo picco tra 1 e 2 Hz di ampiezza 2-2.5 (Fig.68). Prendendo in considerazione i valori di  $V_s$  dedotti dall'indagine MASW-ESAC P324ESAC\_SPAC351 e la misura P311HVSR338, tale massimo è riferito ad un contrasto di impedenza ben definito a circa 35 m di profondità associato al livello di ghiaie sabbiose presente nella piana e da cui attinge il primo campo pozzi ad uso potabile di Mortaiolo-Vicarello.

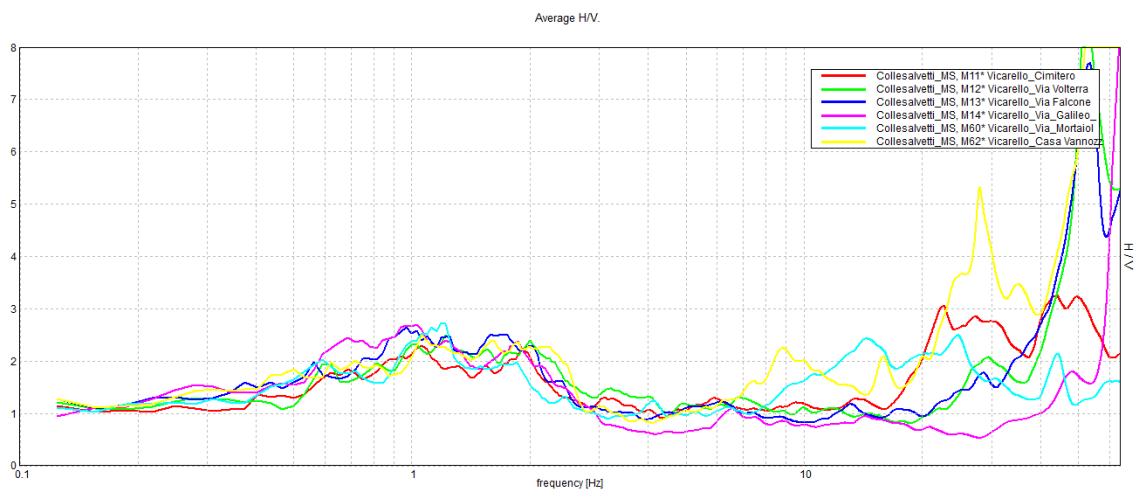


Figura 68. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area dei depositi terrazzati presso Vicarello. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P92HVSR114, P93HVSR115, P94HVSR116, P95HVSR117, P146HVSR168, P148HVSR170

Le misure realizzate nella zona di pianura alluvionale a nord di Vicarello denotano la presenza di forti contrasti di impedenza soprattutto nell'intervallo di frequenza 1-2 Hz (Fig.69). Considerando i valori di  $V_s$  ricavati dall'indagine di sismica a rifrazione L3SR2, il picco a 1 Hz delle misure P96HVSR118, P149HVSR171, P151HVSR173, P152HVSR174, (rispettivamente M15, M63, M65 e M66 in Fig.69) è riferito ad una superficie risonante situata a circa 50 m di profondità; tale interfaccia risonante risale a circa 30 m presso la misura P150HVSR172 (M64 in Fig.69), dove il picco è localizzato alla frequenza di 1.8 Hz.

Questo contrasto di impedenza è coincidente con il livello di ghiaie appartenenti ai "Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina" che rappresentano l'acquifero principale da cui attingono i pozzi profondi presenti nell'area di Grecciano (P194PA216, P195PA217, P196PA218).

È possibile notare come l'acquisizione P147HVS169 (M61 in Fig.69), localizzata nei pressi dei depositi terrazzati, sia caratterizzata da un "doppio picco": uno principale a circa 1.2 Hz ed uno secondario, a circa 1.8 Hz. Tale caratteristica indica due contrasti di impedenza ravvicinati, uno a 25-30 m e l'altro a 50-60 m. Nel primo caso si tratta del contatto tra bna1 ed il livello di ghiaie presente in tutta la piana alluvionale mentre nel secondo è probabilmente connesso a variazioni litologiche interne ai depositi alluvionali il cui grado di consistenza aumenta in profondità.

Le misure P149HVS171, P150HVS172, P151HVS173 e P152HVS174, ubicate nella parte più a nord della pianura, sono inoltre caratterizzate da un massimo a circa 0.5 Hz connesso con una superficie risonante a 200-300 m di profondità, ipotizzabile con le UP.

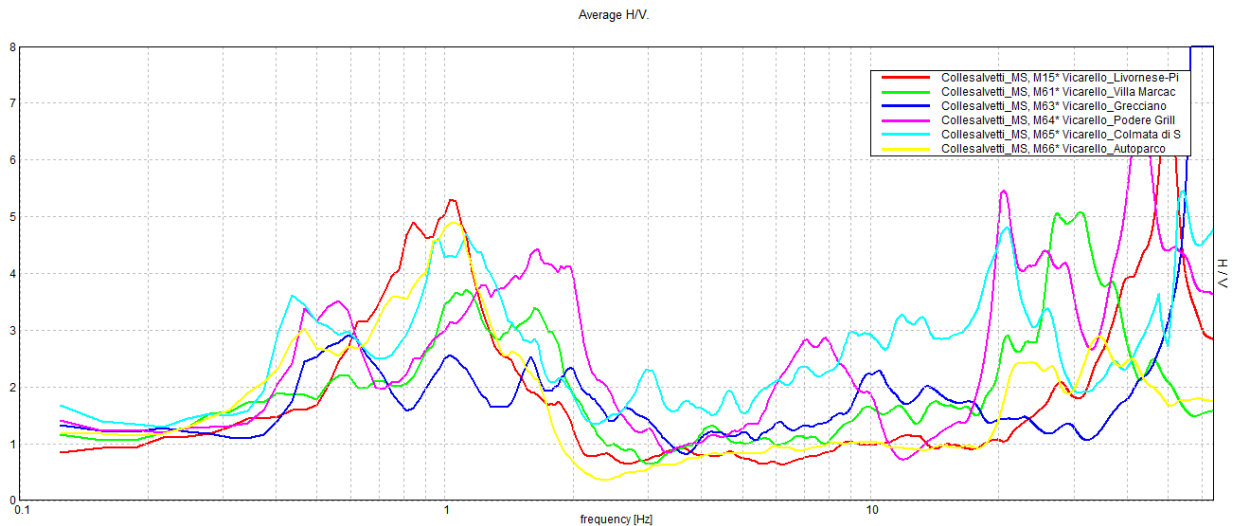


Figura 69. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nell'area di pianura alluvionale presso Vicarello. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P96HVS118, P147HVS169, P149HVS171, P150HVS172, P151HVS173, P152HVS174

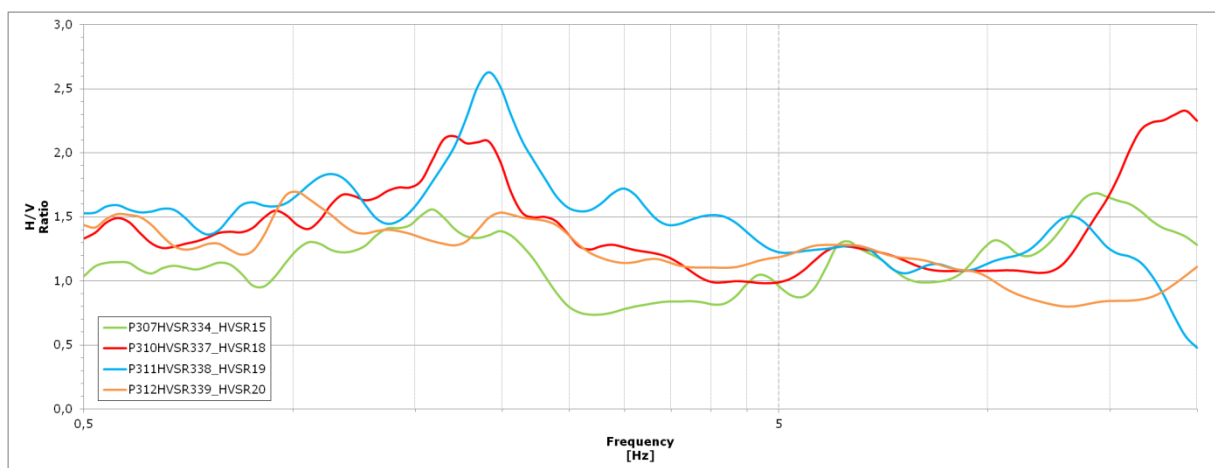


Figura 70. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nell'area di pianura alluvionale presso Vicarello. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P307HVSR334, P310HVSR337, P311HVSR338 e P312HVSR339

## 5.8 Mortaiolo

Il nucleo abitato di Mortaiolo nella pianura dell'Arno, alla sommità di un lembo di terrazzo alluvionale attribuibile al Pleistocene superiore (bnb2) posto a circa 3-5 metri sopra la pianura stessa (Fig.71). La scarpata che borda il lembo di terrazzo è molto rimaneggiata e sinuosa. Il terrazzo alluvionale faceva parte della più ampia conoide alluvionale a cui appartiene anche il terrazzo alluvionale di Vicarello, i cui depositi sono prevalentemente fini, limo-argillosi e limo-sabbiosi.

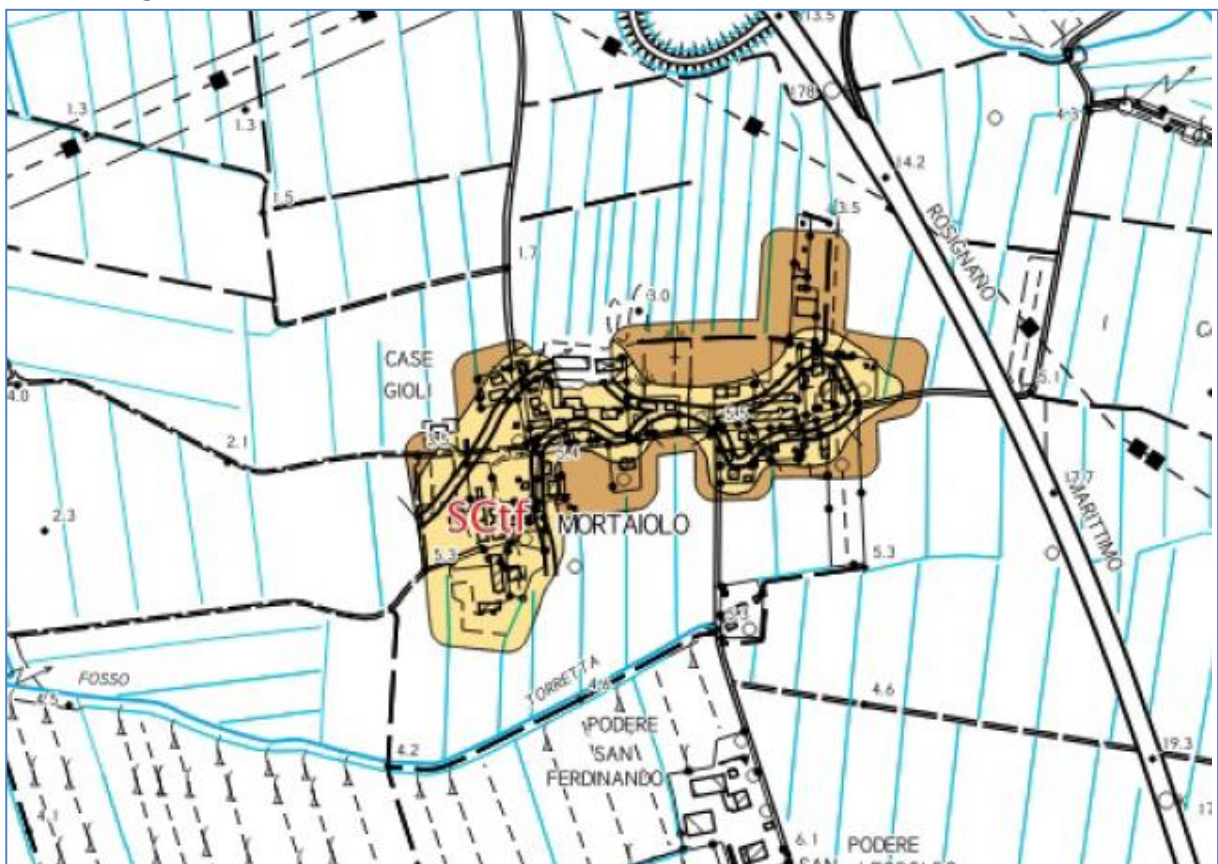


Figura 71. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Mortaiolo

Le misure ubicate sui depositi terrazzati bnb2 sono caratterizzate da curve HVSR molto simili a quelle osservate sugli stessi materiali a Collesalveti e a Vicarello (Fig.72): pertanto, anche in questo caso, il debole contrasto di impedenza si trova a circa 60 m di profondità.

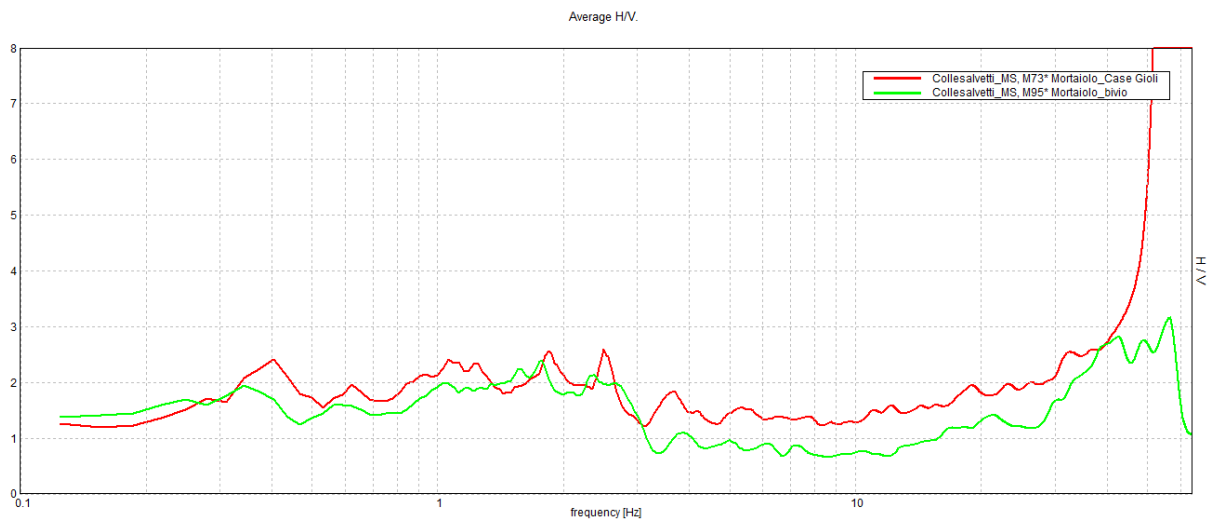


Figura 72. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nei depositi terrazzati presso Mortaiolo. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P159HVSR181 e P181HVSR203

Le acquisizioni effettuate sui depositi olocenici mostrano la presenza di picchi di ampiezza elevata compresi tra 1.2 Hz e 1.8 Hz (Fig.73). Considerando per i materiali affioranti valori di  $V_S$  di 150-200 m/s (dedotti dalle prove sismiche in zona Guasticce), questi forti contrasti di impedenza si riferiscono ad un'interfaccia risonante localizzata alla profondità di circa 25 m per le misure localizzate in prossimità del terrazzo (P160HVSR182 e P161HVSR183; M74 e M75 in Fig.73) e a 35-40 m per le due misure più lontane (P108HVSR130 e P158HVSR180; M27 e M72 in Fig.73); questa caratteristica è coincidente con il livello di ghiaie appartenenti ai "Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina" che rappresentano l'acquifero principale.

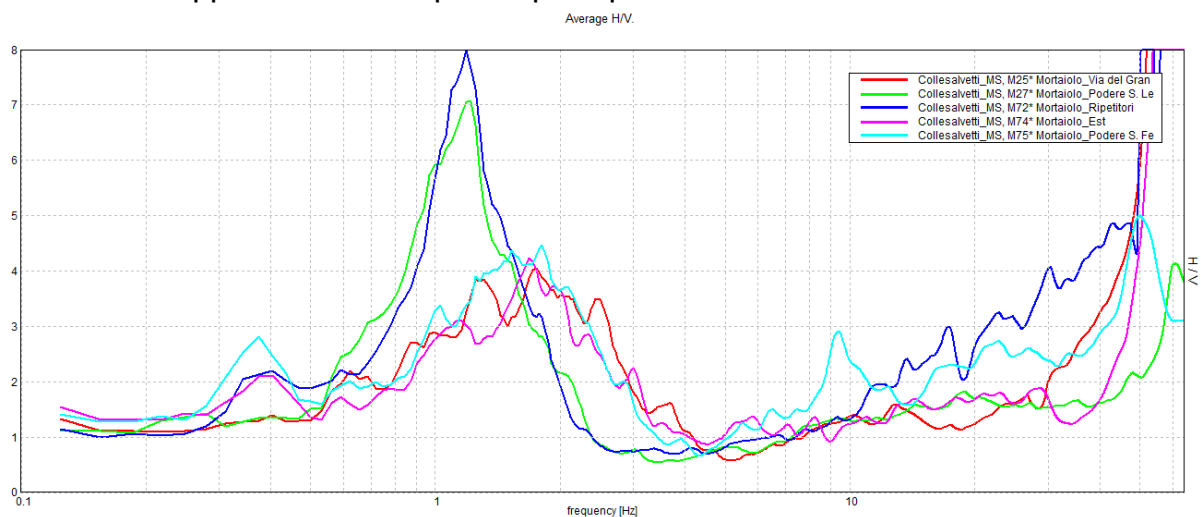


Figura 73. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nel 2013 nell'area di pianura alluvionale presso Mortaiolo. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P106HVSR128, P108HVSR130, P158HVSR180, P160HVSR182 e P161HVSR183

## 5.9 Guasticce-Interporto

Il centro abitato di Guasticce è ubicato nella pianura alluvionale dell'Arno in posizione prossima ai versanti meridionali. La pianura alluvionale è caratterizzata dalla presenza di depositi fini olocenici, limo-argillosi e limo-sabbiosi spessi oltre i 20-30 metri che



poggiano su depositi alluvionali di spessore analogo limo-sabbiosi e limo-argillosi probabilmente deposti durante il Pleistocene superiore (Fig.74, Fig.75).

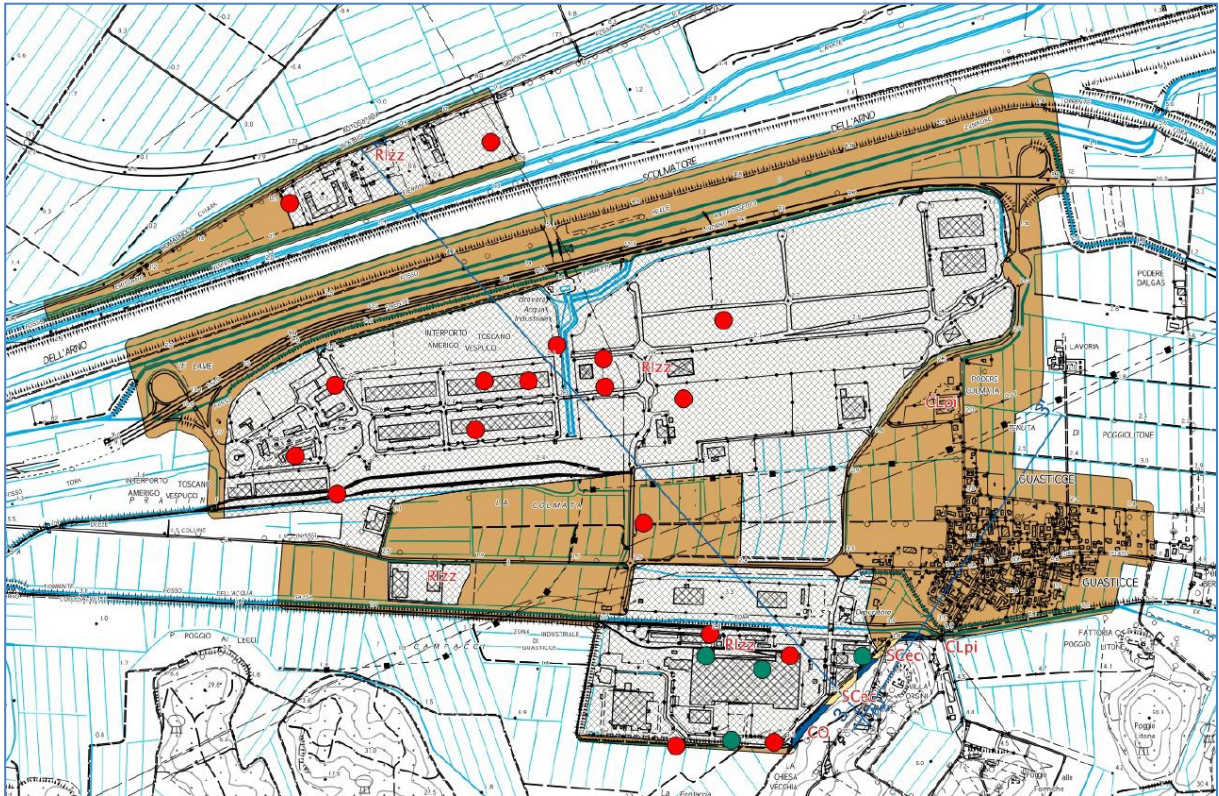


Figura 74. Stralcio Carta Geologico-Tecnica dell'area di Guasticce-Interporto

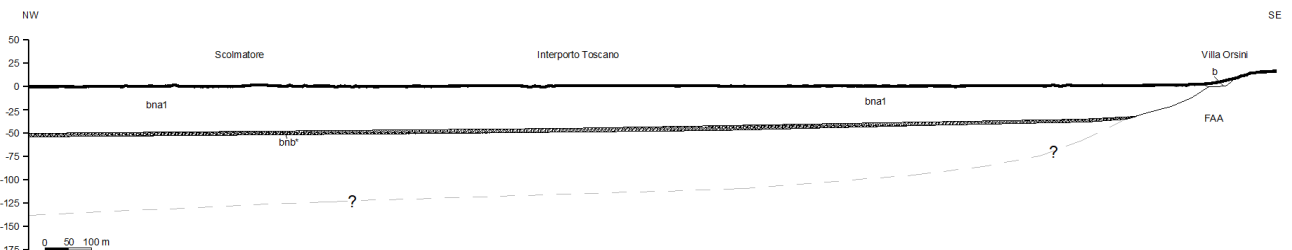


Figura 75. Sezione geologica dell'area dell'Interporto di Guasticce (Sezione 2)

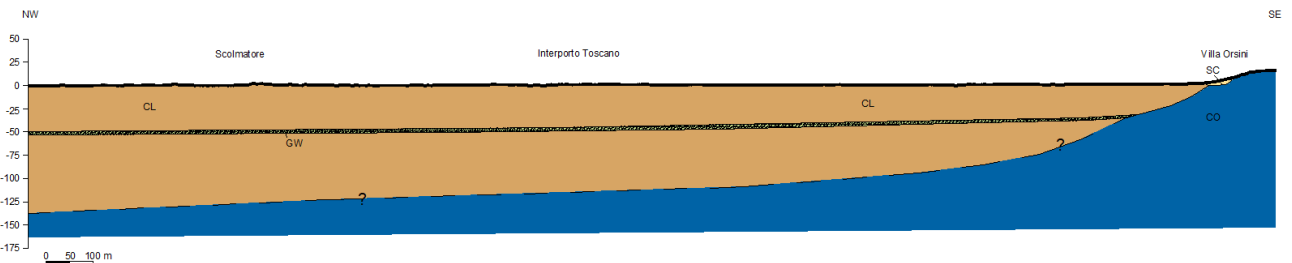


Figura 76. Sezione geologico-tecnica dell'area dell'Interporto di Guasticce (Sezione 2)

Le misure HVSR eseguite a sud-ovest del centro abitato di Guasticce P164HVSR186, P219HVSR241 e P220HVSR242 individuano la presenza di un picco di ampiezza elevata (compresa tra 5 e 7) all'interno dell'intervallo di frequenza 1,5-2,7 Hz (Fig.77). Dalla Vs media ricavata da un'indagine di archivio (P228SCPT252 – prova penetrometrica con

cono sismico) questa interfaccia risonante è riferita ad un contrasto di impedenza identificato a circa 30 m di profondità riferibile all'evidente passaggio litologico, da argille-argille torbose prive di consistenza a sabbie limose mediamente addensate, individuato in tutte le stratigrafie di pozzi e sondaggi vicini. Viceversa, il contrasto di impedenza individuato nella misura P104 eseguita a ridosso delle propaggini collinari, è relativo al contatto tra i depositi alluvionali bna1 e le UP così come evidenziato dai sondaggi limitrofi. Le Unità Plioceniche (FAA), affioranti sui rilievi limitrofi, non si rinvencono nella piana alluvionale, prossimi alla superficie, poiché erose nei vari cicli di trasgressione-regressione marina.

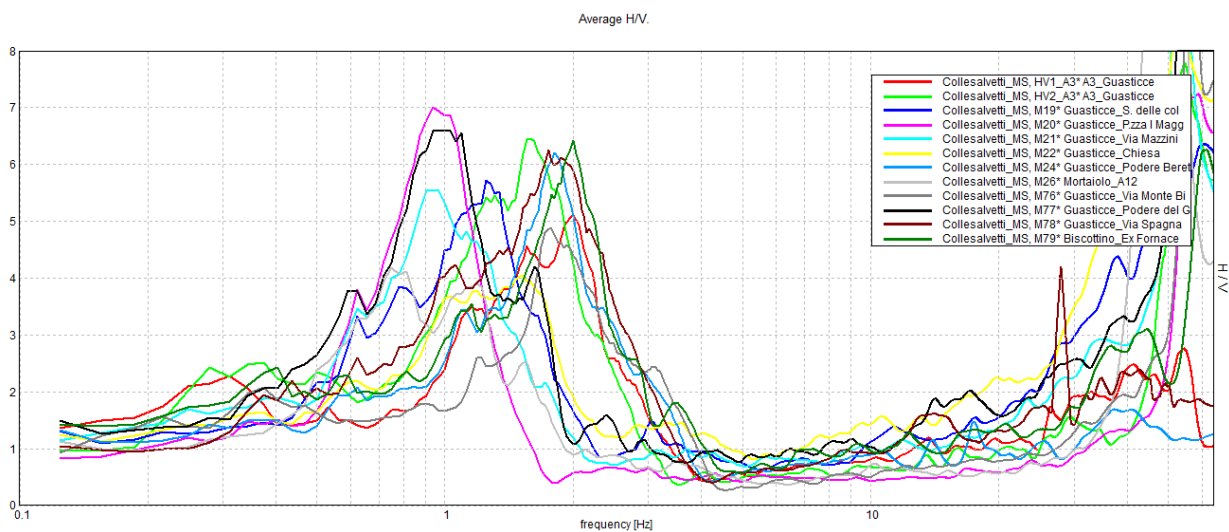


Figura 77. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nell'area di Guasticce. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P219HVS241, P220HVS242, P100HVS122, P101HVS123, P102HVS124, P103HVS125, P105HVS127, P107HVS129, P162HVS184, P163HVS185, P164HVS186, P165HVS187

Anche la misura P304HVS331 elaborata congiuntamente all'indagine MASW-ESAC P326ESAC\_SPAC353 individua un leggero contrasto a profondità di circa 20-30 metri di profondità; dalle stratigrafie di sondaggi e pozzi eseguiti nell'area dell'Interporto Toscano (P247PA271, P277S304, P278S305, P279S306, P283S310, P286S313, P288S315 e P290S317) tale impedenza è connessa al passaggio da depositi prevalentemente argillo-limosi di bassa consistenza a sabbie e sabbie-limose o limo-argillosi maggiormente addensate.

In corrispondenza del centro abitato di Guasticce i picchi di frequenza registrati dalle misure di microtremore (P101HVS122, P102HVS124, P103HVS125 e P105HVS127) evidenziano un alto contrasto (ampiezze comprese tra 4 e 7) alla profondità di circa 25 m – 40 m. Tale contrasto sembra approfondirsi fino a circa 50 m a nord di Guasticce (misure P107HVS129-P163HVS185) caratterizzate da un picco tra 0.8-1.0 Hz e coerente con la stratigrafia del pozzo ubicato in prossimità dello svincolo FI-PI-LI dove, a tale profondità, si rinviene l'orizzonte sabbio-ghiaioso, anche esso sede dell'acquifero artesianico ed attribuito al paleolaveo dell'"Arno e Serchio da Bientina".

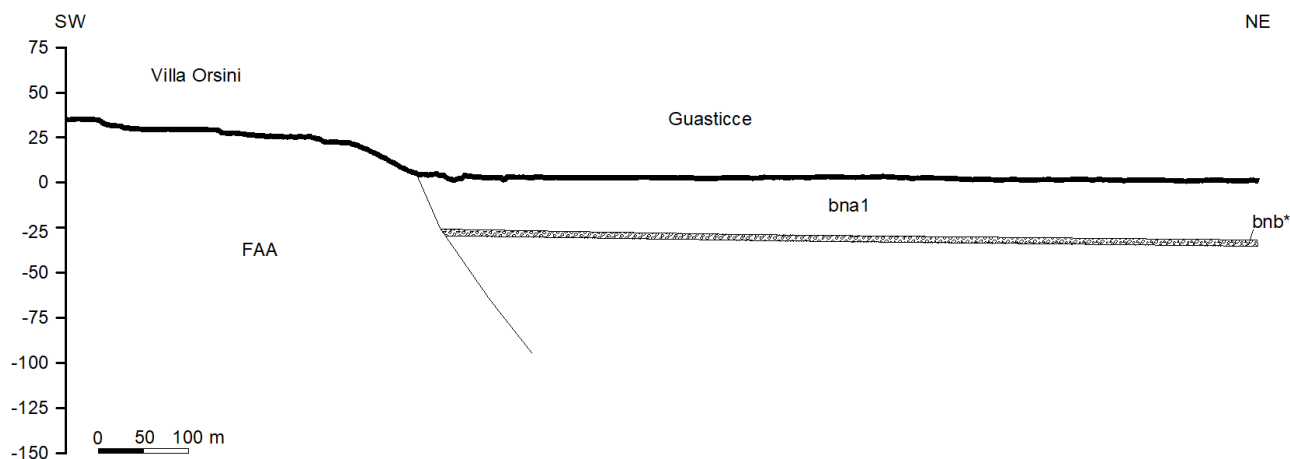


Figura 78. Sezione geologica dell'area di Guasticce (Sezione 3)

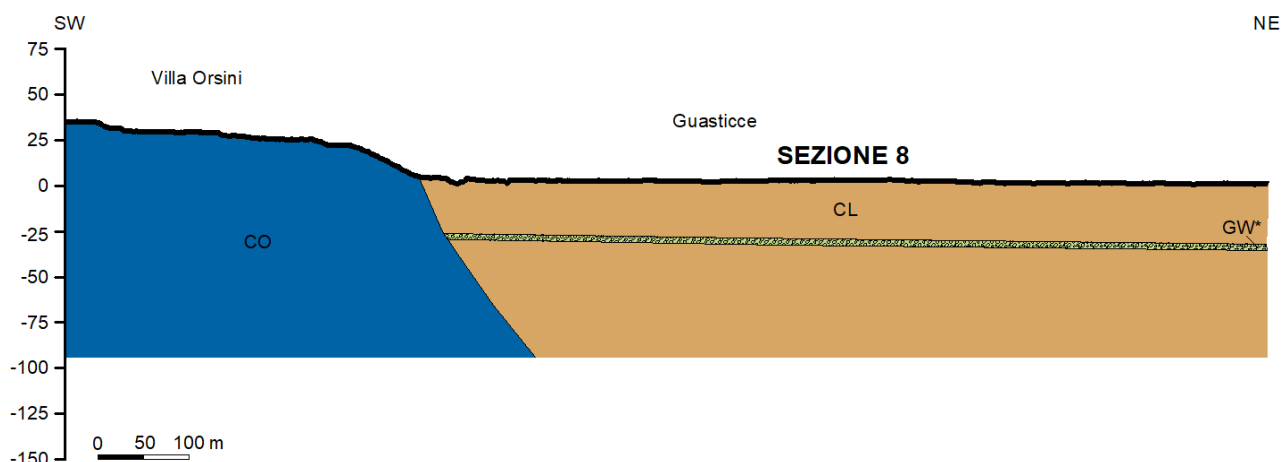


Figura 79. Sezione geologico-tecnica dell'area di Guasticce (Sezione 3)

In località Biscottino, al limite settentrionale del territorio comunale, il principale picco di frequenza registrato nella misura P165 individua alla profondità di circa 15-20 m, un contrasto anch'esso connesso a variazioni litologiche fra terreni a bassissima consistenza a depositi sabbiosi maggiormente addensati; un debole contrasto è individuato nell'intervallo di frequenze 0.4-0.6, relativo a profondità comprese tra 50-70 m, coerente con la presenza del livello di ghiaie appartenenti ai "Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina" che procedendo verso la zona centrale della Pianura di Pisa tendono ad approfondirsi; tale elemento è confermato dalle stratigrafie dei sondaggi realizzati lungo l'autostrada A12 Genova – Rosignano Mmo.

In linea generale la porzione estrema meridionale della Piana di Pisa, inserita nel Comune di Collesalveti, evidenzia la presenza di sedimenti olocenici (bna1) retrodunali e palustri fino alla profondità di -20/30 metri, oltre tale profondità si rinvencono sedimenti sabbio-limosi, i quali giacciono sul tetto delle ghiaie (Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina). La profondità del tetto varia all'interno della pianura approfondendosi da sud verso nord e nord-ovest. Tale livello presente a Guasticce a -35 m, scende a -45 m all'interporto fino oltre i -45-50 m in zona Biscottino.

L'interpretazione della stratigrafia del sondaggio DOCUP (P77DH96) risulta errata e fuorviante in quanto i depositi argillosi incontrati alla profondità di -26 m non hanno le

caratteristiche litologiche delle Argille Azzurre; così pure il fatto di attribuire le ghiaie alla formazione ex-q6 è del tutto non corretta dal punto di vista paleogeografico.

### **5.10 Stagno**

L'insediamento di Stagno comprende una estesa area residenziale ad Est della Via Aurelia ed un importante polo produttivo e commerciale ad ovest della stessa, entrambi orientati secondo la direzione principale dei sistemi dunali che marcavano la presenza della linea di costa fino a tempi recenti. I depositi e le morfologie costiere sono state successivamente colmate ad opera delle bonifiche idrauliche.

Parte dell'insediamento (Villaggio Emilio) si estende invece sulla sommità del terrazzo alluvionale del Pleistocene superiore che qui è posto a circa 3-5 metri al di sopra della pianura alluvionale (Fig.80). I depositi della pianura sono caratterizzati da lenti più o meno continue lateralmente di sabbie e sabbie limose di probabile origine marina che si alternano a depositi più fini di probabile origine palustre e/o alluvionale (Fig.81). La fascia intermedia fra l'abitato di Stagno ed il Villaggio Emilio (ad est del Fosso Cateratto) appartiene invece ad una fascia retrodunale/palustre, che a nord aprendosi a ventaglio si collega alla Pianura di Pisa. In questo ambito si sviluppa l'abitato denominato "Stagno Vecchio" con litologie superficiali prevalentemente limo-argillose.





Le misure P297HVSR324, P97HVSR119 e P168HVSR190 realizzate sui depositi olocenici dell'estremo settore occidentale del territorio comunale, caratterizzati da litologie prevalentemente sabbiose, denotano picchi di frequenza nell'intervallo 1.2-2 Hz con ampiezze variabili (Fig.83-85). La misura P296HVSR323, eseguita a nord in corrispondenza delle medesime litologie, evidenzia un importante contrasto a frequenze maggiori (2.7 Hz). Considerando la  $V_s$  del down-hole P227DH250 l'interfaccia risonante sembra risalire da sud (circa 45 m) verso nord (circa 20 m) e corrisponde a litologie a maggior grado di addensamento (ghiaie e sabbie). Tale dato è confermato anche dall'inversione congiunta della curva di dispersione ottenuta dall'antenna P185ESAC\_SPAC207 e della curva HVSR P221HVSR243 (Fig.84),

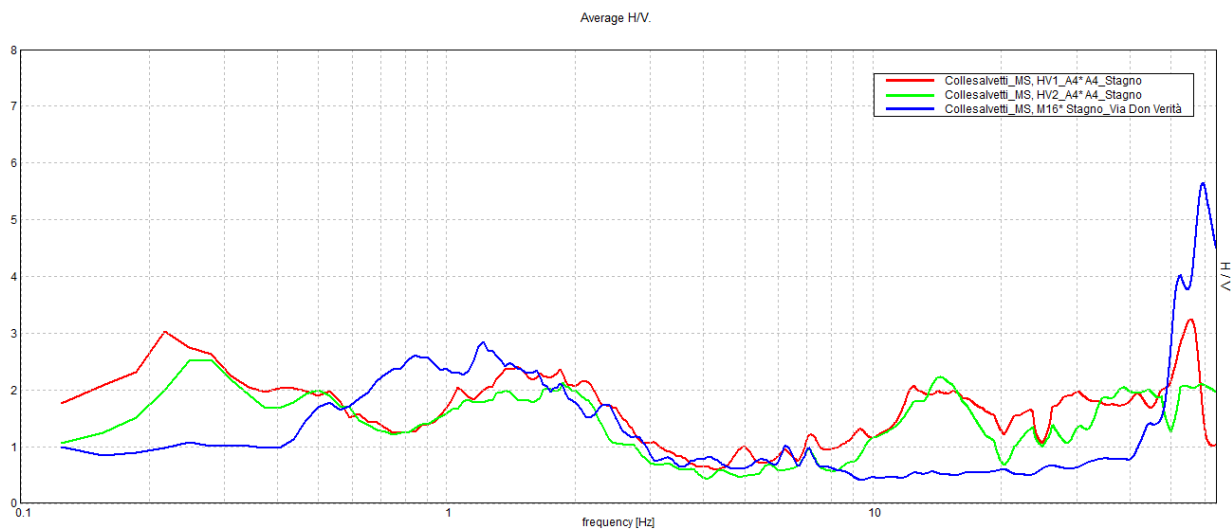


Figura 83. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate nella parte centrale dell'abitato di Stagno. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P221HVSR243, P222HVSR244 e P97HVSR119

Le misure P99HVSR121 e P168HVSR190 (realizzate rispettivamente nella zona nord e sud dell'abitato) mostrano, al contrario delle precedenti, la presenza di significativi contrasti di impedenza.

Prendendo in considerazione i valori di  $V_s$  individuati dalla linea sismica L1MASW1, il picco a circa 2.5 Hz dell'acquisizione P99HVSR121 identifica un'interfaccia risonante a circa 15-20 m di profondità che potrebbe corrispondere al passaggio tra i depositi alluvionali e costieri più superficiali e quelli più antichi appartenenti al terrazzo alluvionale.



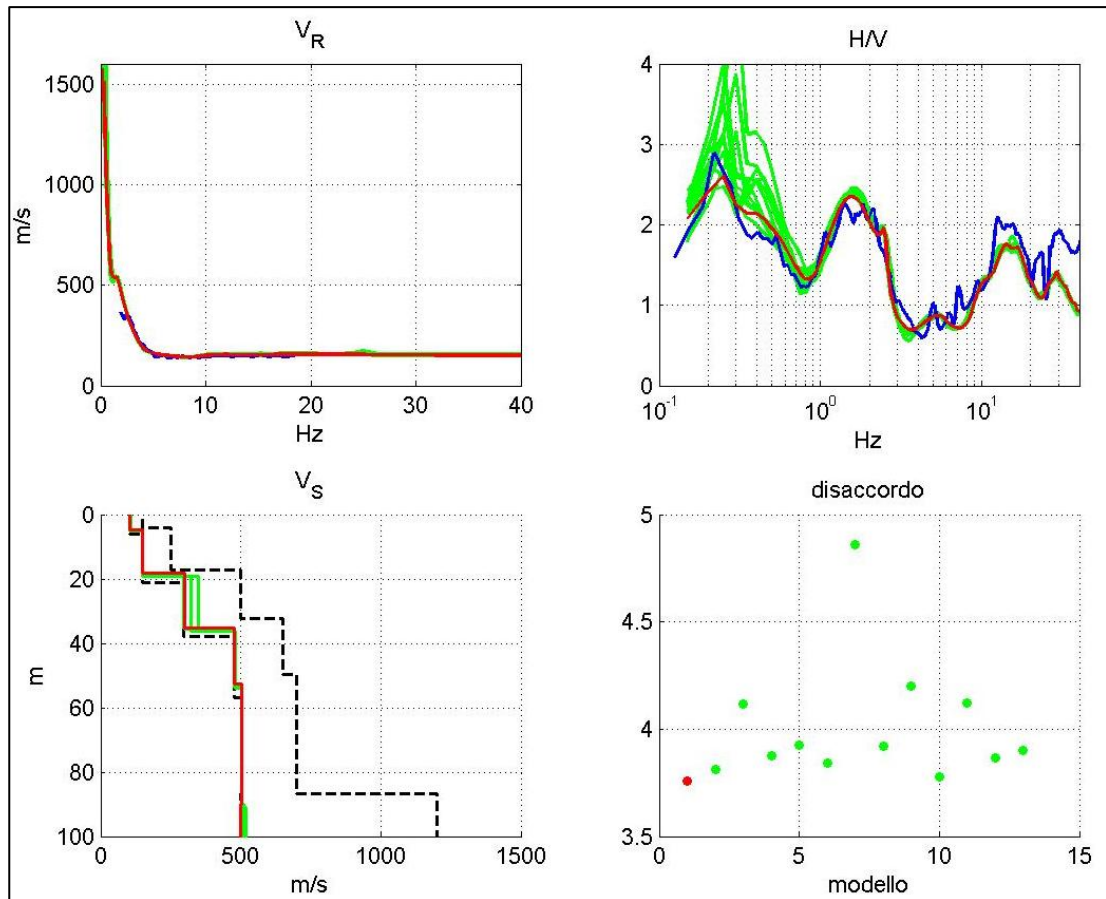


Figura 84. Risultati dell'inversione congiunta della curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dall'antenna P185ESAC\_SPAC207 e della curva HVSr P221HVSr243 realizzate in località Stagno. In blu sono indicate le curve sperimentali, in rosso il miglior profilo ottenuto con le relative curve sintetiche, in verde i profili (con le corrispondenti curve) il cui disaccordo non supera di oltre il 50% quello del profilo migliore ed in giallo i restanti profili ottenuti. In basso a destra il grafico riporta i valori del disaccordo caratterizzanti i diversi modelli

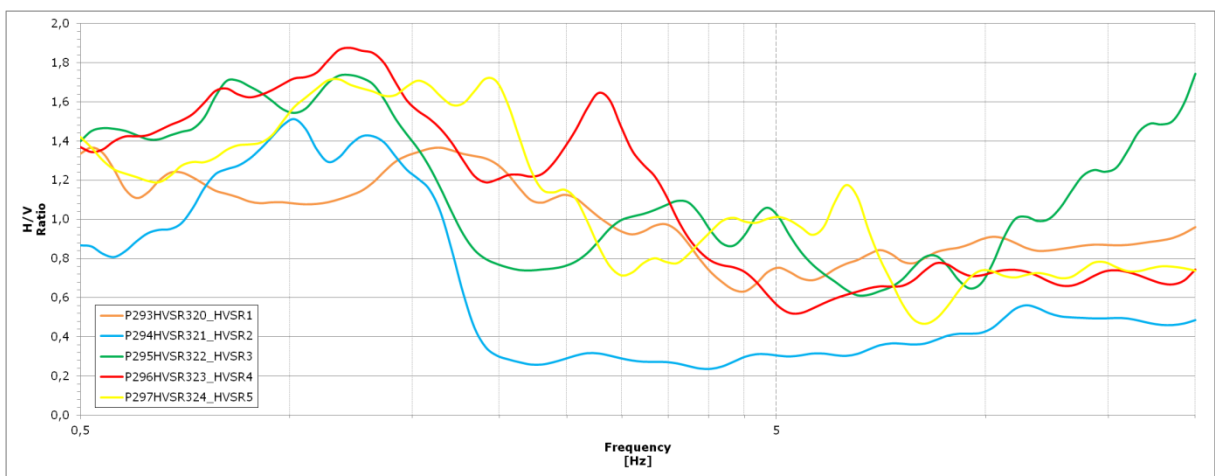


Figura 85. Sovrapposizione delle curve HVSr realizzate nel 2018 nella parte centrale dell'abitato di Stagno. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P293HVSr320, P294HVSr321, P295HVSr322, P296HVSr323 e P297HVSr324

Le acquisizioni realizzate sulla parte dell'abitato situata sui depositi terrazzati bnb2 mostrano l'assenza di effetti di risonanza significativi nell'intervallo di frequenza 1-10 Hz (Fig.86). Le misure P293HVSR320 e P294HVSR321 evidenziano bassi contrasti di impedenza a circa 1.1-1.6 Hz che, da un'analisi congiunta con l'antenna sismica P323ESAC\_SPAC350, sono riferibili a profondità oltre i 40 m e sono presumibilmente dovuti a variazioni litologiche all'interno delle UP che giacciono al di sotto dei depositi pleistocenici. L'assenza di forti contrasti di impedenza è concorde con i valori di  $V_S$  ricavati dalla linea sismica L8SR7 e dalla prova down-hole P79DH98 realizzate sui medesimi materiali: entrambe le indagini, infatti, non evidenziano elevati salti di velocità almeno fino alla profondità di 20-30 m.

Infine, quasi tutte le misure realizzate nell'area di Stagno presentano un evidente picco in bassissima frequenza che varia da circa 0.3 Hz a 0.7 Hz muovendosi da ovest verso est: tale massimo può corrispondere ad un contrasto di impedenza significativo ad una profondità che varia da 300-400 m a 150-200 m.

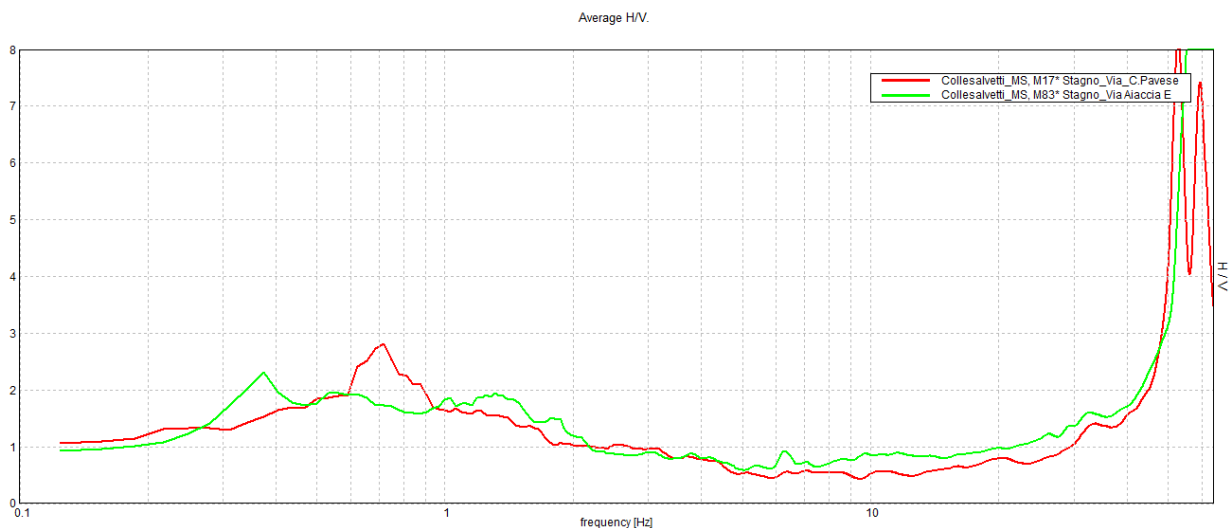


Figura 86. Sovrapposizione delle curve HVSR realizzate sui depositi terrazzati presso Stagno. Le curve visualizzate sono riferite rispettivamente alle misure P98HVSR120 e P169HVSR191

Ad est di Stagno, in località L'Aiaccia, la misura di rumore P322HVSR349 individua un alto contrasto di impedenza a frequenze di 6.3 Hz presumibilmente riferibile al contatto tra bnb2 e le UP/UM.



## 6. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Le misure geofisiche, in particolare quelle di sismica passiva condotte nell'ambito di questo studio, hanno avuto come scopo principale l'individuazione delle unità stratigrafiche potenzialmente rappresentative del substrato sismico, ovvero del contrasto di impedenza sismica più rappresentativo. Si tratta di un'analisi svolta in stretta connessione quella volta alla ricostruzione del modello geologico e geomorfologico in prospettiva sismica che rappresenta l'esito principale della MZS di primo livello ulteriormente approfondita (dati di base, indagini di sismica passiva) per la redazione del secondo livello. In questo senso, le misure geofisiche svolgono un ruolo essenziale ma non esclusivo da implementarsi e raffrontarsi con dati stratigrafici certi del sottosuolo (stratigrafie di sondaggi, pozzi e prove sismiche in foro).

Un dato osservativo importante riguarda gli effetti di risonanza identificati dalle misure HVSR realizzate sulle Unità Mioceniche. Queste acquisizioni hanno rilevato la presenza di contrasti di impedenza significativi riferibili al contatto fra i materiali coesivi e granulari di UM e il substrato lapideo delle Unità del complesso alloctono Ligure solo per le misure realizzate in prossimità di tale contatto. Per le misure localizzate più ad est, i contrasti di impedenza individuati, generalmente meno significativi, sono riferibili alle eterogeneità di UM (caratterizzata da alternanze più o meno regolari di arenarie e conglomerati e argille e marne) oppure ad un aumento del grado di compattazione all'interno di questa unità. La mancanza nella zona più ad est di contrasti riferibili al passaggio Unità Mioceniche-Unità Liguri può essere spiegato con l'aumento dello stato di rigidità dei terreni miocenici in seguito al seppellimento da parte di centinaia di metri di spessori di depositi pliocenici e quaternari prima di essere riesumati. Il carico litostatico e la diagenesi quindi possono aver giocato un ruolo importante nell'uniformare progressivamente fino a diventare trascurabile la differenza litotecnica tra le due Unità.

Si nota anche la sostanziale assenza di contrasti significativi di impedenza sismica in corrispondenza delle discordanze tra le Unità Mioceniche (UM) – Unità Plioceniche (UP) e il Quaternario Marino (QM). Anche in questo caso le caratteristiche in affioramento dei depositi differiscono soprattutto per stato di addensamento e localmente per la cementazione. In ogni caso, i maggiori contrasti di impedenza sono quelli che coinvolgono le coperture più recenti, soprattutto se sono costituite da depositi fluviali o palustri fini come avviene nella parte più settentrionale del Comune.

Nell'area di pianura si identificano più contrasti di impedenza sismica legati alle transizioni fra i depositi olocenici-pleistocenici soprattutto in corrispondenza dei livelli ghiaiosi addensati o dei livelli fortemente scadenti senza comunque riuscire ad individuare con certezza il passaggio alle unità più profonde (UP, UM, etc.) su cui poggiano in discordanza. Tali passaggi stratigrafici richiederebbero per la loro identificazione il ricorso a misure più precise (*cross-hole* e sondaggi profondi).

## 7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

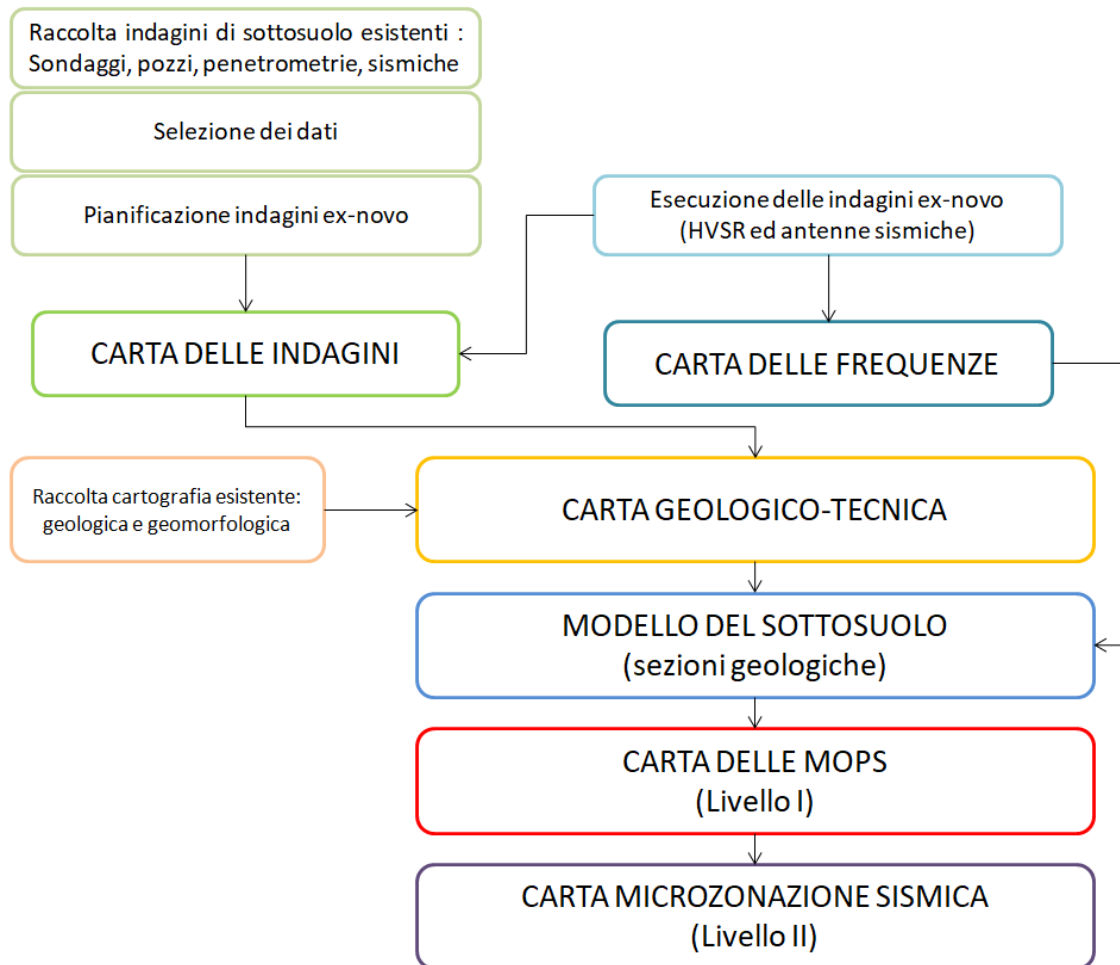


Figura 87. Diagramma del flusso di lavoro per la realizzazione delle carte di Livello I e II

### 7.1 Classe di qualità della Carta di livello I di MS

La qualità della Carta del livello 1 di microzonazione sismica estesa all'intero territorio comunale, sulla base delle indagini pregresse e/o nuove, è stata valutata mediante la procedura semiquantitativa prevista dalle specifiche tecniche regionali, il cui risultato è riportato nella figura sottostante.

Nel dettaglio:

- La cartografia geologica soddisfa le condizioni all'88%
- I sondaggi a distruzione soddisfano le condizioni al 22%
- I sondaggi a carotaggio continuo soddisfano le condizioni al 77%
- Le indagini geofisiche soddisfano le condizioni al 22%
- Le prove geotecniche soddisfano le condizioni al 11%
- Le misure di rumore ambientale soddisfano le condizioni al 49%

| a   | Parametro                      | 4                 |                  |                  |                        |  |
|-----|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------------|--|
|     |                                |                   |                  |                  |                        | Inserire il valore <i>gola</i> nelle celle colorate in viola   |
| b   | Carta Geologico tecnica        | 1                 | Anno Rilevamento | Progetto         | Scala                  |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.66             | 1                      |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| c   | Sondaggi a distruzione         | 0.5               | Numero sondaggi  | % celle occupate | Num. Sondaggi bedrock  |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.33             | 0                      |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| d   | Sondaggi a carotaggio continuo | 1                 | Numero sondaggi  | % celle occupate | Num. Sondaggi bedrock  |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.33             | 1                      |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| e   | Indagini geofisiche            | 0.5               | Numero misure    | % celle occupate | % indagini al bedrock  |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.33             | 0                      |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| f   | Prove geotecniche              | 0.25              | Numero prove     | % celle occupate | % prove al bedrock     |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.33             | 0                      |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| g   | Misure Frequenze               | 0.75              | Numero misure    | % celle occupate | Classe di affidabilità |  |
|     | <i>Punteggi indicatori</i>     |                   | 1                | 0.33             | 0.66                   |  |
|     | <i>Pesi indicatori</i>         |                   | 0.33             | 0.33             | 0.33                   |  |
| tot |                                |                   |                  |                  |                        |  |
|     | <b>25</b>                      | punteggi parziali |                  | <b>CLASSE</b>    | <b>VALORI</b>          | <b>INDICAZIONI</b>   |
|     | <b>0.88</b>                    | 21.9              |                  | <b>A</b>         | <b>≥ 75%</b>           | Carta di livello 1 di ottima qualità   |
|     | <b>0.22</b>                    | 5.5               |                  | <b>B</b>         | <b>50%-74%</b>         | Sarebbero auspicabili migliorare almeno uno dei parametri  |
|     | <b>0.77</b>                    | 19.2              |                  | <b>C</b>         | <b>25%-49%</b>         | Sarebbero auspicabili ulteriori indagini che mancano o che sono valutate di scarsa qualità                       |
|     | <b>0.22</b>                    | 5.5               |                  | <b>D</b>         | <b>≤ 25%</b>           | Carta di livello 1 di scarsa qualità: non risponde ai requisiti minimi richiesti da ICMS08 e Linee Guida Regione |
|     | <b>0.11</b>                    | 2.7               |                  |                  |                        |  |
|     | <b>0.49</b>                    | 12.3              |                  |                  |                        |  |
|     | <b>67.2</b>                    | <b>67.2</b>       | classe B         |                  |                        |  |

| Parametro (peso parametro)  | Peso Indicatore | Indicatore  | Valutazione indicatore (punteggio) |                |                            |                |
|---|-----------------|---|------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
|   |                 |   | Nulla (0)                          | Bassa (0.33)   | Media (0.66)               | Alta (1)       |
| Carta geologico-tecnica (1)   | 0.33            | Anno rilevamento  | No data                            | < 2000         | 25.000-26.000              | > 2000         |
|   | 0.33            | Progetto  | No data                            | Altro          | Allegato piano urbanistico | Ad hoc         |
| Sondaggi a distruzione (0.50)   | 0.33            | Scala rilevamento                                       | No data                            |                |                            |                |
|   | 0.33            | Numero di sondaggi a distruzione                        | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
|   | 0.33            | Percentuale di celle occupate da sondaggi a distruzione | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
|   | 0.33            | Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido        | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
| Sondaggi a carotaggio continuo (1)  | 0.33            | Numero di sondaggi a carotaggio                         | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
|   | 0.33            | Percentuale di celle occupate da sondaggi a carotaggio  | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
|   | 0.33            | Numero sondaggi che arrivano al substrato rigido        | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
|   | 0.33            | Percentuale di misure occupate da indagini              | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
| Indagini geofisiche (0.50)  | 0.33            | Percentuale indagini che arrivano al substrato rigido   | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
|   | 0.33            | Numero di prove   | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
|   | 0.33            | Percentuale di celle occupate da prove                  | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
| Prove geotecniche in situ (Prove Penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (0.25) | 0.33            | Percentuale prove che arrivano al substrato rigido      | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
|   | 0.33            | Numero di misure  | No data                            | 1-5            | 6-10                       | >10            |
|   | 0.33            | Percentuale di celle occupate da misure                 | No data                            | 1-33%          | 34-66%                     | >66%           |
| Misure delle frequenze del sito (0.75)  | 0.33            | Classe di affidabilità misura (albanio et alii)         | No data                            | Classe A < 33% | Classe A 34-66%            | Classe A > 66% |
|   | 0.33            | Classe di affidabilità misura (albanio et alii)         | No data                            | Classe A < 33% | Classe A 34-66%            | Classe A > 66% |

\* D. Albaricco, C. Cosi, V. Ialenti, F. Giannini, E. Lanoldi, E. Paoletti, D. Pizzigallo, L.M. Pizzilli - Il contributo della sismica passiva nella microzonazione di due macroaree abruzzesi. In stampa su Boll. Geofis. Torr. Appl.

Figura 88 – Classe di qualità della carta di livello 1 di Microzonazione Sismica sull'intero territorio comunale

Il punteggio raggiunto di 67,2 ci attribuisce la Classe "B".

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 8.1 Carta delle Indagini

Le indagini riportate nella "Carta delle Indagini" e sintetizzate nella tabella sottostante, sono state archiviate tramite il software per l'archiviazione dei dati SoftMS 4.0 predisposto dalla Protezione Civile. In totale sono stati inseriti 317 indagini puntuali e 46 indagini lineari (Tab. 7).

| INDAGINI PUNTUALI                          |      |                |
|--|------|----------------|
| TIPO DI INDAGINE                           |      | NUMERO         |
| Espansione laterale libera                 | ELL  | 3 <sup>1</sup> |
| Penetrometrica statica                     | CPT  | 19             |
| Penetrometrica statica con punta elettrica | CPTE | 3              |
| Penetrometrica statica con piezocono       | CPTU | 12             |

<sup>1</sup> Trattandosi di un indagine di laboratorio (GL) negli "Standard di Rappresentazione ed Archiviazione Informatica" non è prevista uno specifico simbolo pertanto tale tipologia di indagine non è stata riportata nella Carta delle Indagini.

|   |           |               |
|---|-----------|---------------|
| Dilatometrica (Marchetti)                                   | DMT       | 2             |
| Penetrometrica dinamica super pesante                       | DS        | 1             |
| Sondaggio a carotaggio continuo                             | S         | 70            |
| Sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato | SS        | 2             |
| Sondaggio a distruzione di nucleo                           | SD        | 2             |
| Sondaggio con prelievo campioni                             | SC        | 1             |
| Sondaggio con piezometro                                    | SP        | 16            |
| Prova penetrometrica con cono sismico                       | SCPT      | 2             |
| Pozzo per acqua   | PA        | 26            |
| Microtremori a stazione singola                             | HVSR      | 135           |
| Esac  | ESAC_SPAC | 13            |
| Down-Hole   | DH        | 5             |
| Tomografia elettrica  | ERT       | 4             |
| Sismica a rifrazione  | SR        | 1             |
| <b>INDAGINI LINEARI</b>                                     |           |               |
| <b>TIPO DI INDAGINE</b>                                     |           | <b>NUMERO</b> |
| MASW  | MASW      | 31            |
| Sondaggio Elettrico Verticale                               | SEV       | 1             |
| Sismica a rifrazione  | SR        | 15            |

Tabella 7. Elenco delle indagini puntuali e lineari archiviate tramite lo strumento informatico SoftMS.

## 8.2 Carta Geologico-Tecnica - CGT

Nella Carta Geologico - Tecnica per la Microzonazione Sismica sono state riportate tutte le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche ed idrogeologiche), derivate da carte ed elaborati esistenti. I dati cartografici reperiti hanno necessitato di integrazioni di campagna soprattutto volte a dettagliare l'estensione delle coperture eluvio-colluviali e la presenza, distribuzione e stato di attività dei fenomeni franosi.

Per quanto riguarda i fenomeni franosi, il dato di partenza è consistito nella banca dati del progetto PAI-IFFI.

Nella Carta Geologico-Tecnica si è scelto di riportare nel tematismo delle instabilità di versante, le perimetrazioni della pericolosità da frana derivante dal PAI+IFFI pertanto il poligono riportato in carta include, oltre all'area fisicamente interessata dal dissesto franoso (dalla corona al piede), anche la fascia di rispetto/influenza intorno all'area stessa.

Particolare attenzione è stata volta all'individuazione del sistema di faglie segnalato sul versante orientale dei Monti Livornesi. Dai rilevamenti di dettaglio non è stata evidenziata la presenza di lineazioni strutturali che abbiano provocato deformazioni nella superficie topografica negli ultimi 40.000 anni; a tal proposito è stata pertanto attribuita la definizione di "faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta)", in quanto sepolta. Sono state inoltre riportate ulteriori elementi lineari e puntuali (geologici e idrogeologici) utili alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla successiva realizzazione della Carta delle MOPS.

Per quanto riguarda la definizione delle unità geologico-tecniche il principale dato di partenza è stato, come già detto, la Carta Geologica. È stata pertanto realizzata una



prima tabella in cui alle diverse unità geologiche sono state attribuite una sigla (Tipo\_Forma), un nome formale od informale (nome\_ULF) ed infine una descrizione utile alla caratterizzazione in prospettiva sismica (Descrizione).

Lo scopo principale della CGT\_MS consiste nella distinzione tra terreni di copertura (> 3m) e substrato geologico; quest'ultima è avvenuta sulla base delle informazioni litologiche ottenute dalle indagini di archivio. Ad entrambi è stato attribuito un codice ed un simbolo, riportati in carta. Per i terreni di copertura è stata attribuita inoltre la descrizione litologica e dell'ambiente deposizionale così come indicato negli "Standard di Rappresentazione ed Archiviazione Informatica", riportati nelle colonne "Tipo", "Stato" e "Gen" della tabella sottostante.

Sono state individuate cinque diverse tipologie di coperture:

**GM:** ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo. Individuate nei depositi alluvionali terrazzati pleistocenici (tf).

**SM:** sabbie limose, miscela di sabbia e limo. Individuate nei depositi costieri e retrodunali (paleo tomboli o cordoni - cl) facenti parte dei depositi alluvionali sabbiosi (zona di Stagno).

**SC:** sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla. Presenti nei depositi alluvionali terrazzati (tf) o come depositi eluvio-colluviali (ec)

**ML:** limi inorganici, farine di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità. Presenti soprattutto sui versanti come depositi eluvio-colluviali (ec), a copertura del substrato.

**CL:** argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre. Sono individuate nei depositi alluvionali delle valli laterali e nei sedimenti palustri e di colmata della piana dell'Arno (pi).

E' stata inoltre individuata la tipologia **GW** (ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaie e sabbie), non affiorante attribuita alle ghiaie sabbiose presente nella Pianura di Pisa che sono riferibili al paleo alveo dell'Arno e Serchio da Bientina, importanti in quanto costituiscono un elemento ben definito di impedenza sismica.

Per quanto riguarda il substrato geologico sono state assegnate 7 categorie:

- **LP:** lapideo
- **GR:** granulare cementato
- **CO:** coesivo sovra consolidato
- **LPS:** lapideo, stratificato
- **GRS:** granulare cementato, stratificato
- **COS:** coesivo sovra consolidato, stratificato
- **ALS:** alternanza di litotipi, stratificato

|   |   |                             | Tipo_forma  | nome_ULF  | Descrizione   | tipo_gt  | Stato   | Gen |    |    |
|---|---|-----------------------------|---|---|---|--|---|-----|----|----|
| TCG Terreni di copertura in prospettiva geologica | TCS Terreni di copertura in prospettiva sismica (Vs <800 m/s) | Quaternario continentale QC | b   | Depositi eluvio - colluviale                                  | Depositi prevalentemente sabbioso-limosi, con granuli e ciottoli, moderatamente addensati.  | SC   | 12  | ec  |    |    |
|   |   |                             | b   | Depositi eluvio - colluviale                                  | Depositi derivati dall'alterazione diretta del substrato litoide, ciottoli con matrice limo-argillosa, moderatamente consistenti.   | ML   | 24  | ec  |    |    |
|   |   |                             | bna1  | Alluvioni attuali e oloceniche della valle dell'Arno          | Depositi alluvionali sabbioso-limosi da sciolti a mediamente addensati  | SM   | 13  | cl  |    |    |
|   |   |                             | bna1  | Alluvioni attuali e oloceniche della valle dell'Arno          | Depositi alluvionali di origine palustre e retro-dunali limo argillosi torbosi da molli a debolmente consistenti.   | CL   | 25  | pi  |    |    |
|   |   |                             | bna2  | Alluvioni attuali e oloceniche delle valli laterali           | Depositi limo-sabbiosi o argillosi da debolmente a mediamente consistente   | CL   | 24  | pi  |    |    |
|   |   |                             | bnb2  | Terrazzi alluvionali del Pleistocene superiore                | Sabbie, ghiaie fini e limi in alternanze irregolari, da poco a mediamente addensati.  | SC   | 12  | tf  |    |    |
|   |   |                             | -   | Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina (non affiorante) | Ghiaie e sabbie addensate con scarsa matrice limosa   | GW   | 11  | dl  |    |    |
|   |   |                             | bnb1  | Terrazzi alluvionali del Pleistocene medio - finale           | Ghiaie e sabbie in alternanze irregolari con livelli limosi lenticolari. Clasti eterometrici da subarrotondati a subangolosi. Da poco a mediamente addensati.   | GM   | 12  | tf  |    |    |
|   |   | QM                          | PLE   | Depositi marini e costieri pleistocenici                      | Alternanze irregolari di sabbie medio fini e ghiaie fini in livelli e lenti, da moderatamente a poco addensate e argille, argille limose, limi e limi sabbiosi. Localmente livelli decimetrici fortemente cementati.  | SC   | 12  | zz  |    |    |
|   |   | SG Substrato geologico      | TCS Terreni di copertura in prospettiva sismica (Vs <800 m/s) | Unità plioceniche UP  | FAAe  | Formazione delle Argille Azzurre - litofacies sabbiosa | Sabbie da fini a grossolane in strati da sottili a spessi, con intercalazioni argillose e limose. Localmente sono presenti sottili livelli e lenti di ghiaie fini. Cementazione variabile da scarsa a fortemente cementate. Da poco addensate ad addensate.       | GRS | 12 | zz |
|   |   |                             |   |   | FAA   | Formazione delle Argille Azzurre                       | Argille grigie e bluastre, in strati da sottili a spessi, da massive a laminate con intervalli caratterizzati da lamine e sottili livelli sabbioso-limosi. Coesive da consistenti a molto consistenti.  | CO  | 23 | zz |
|   |   |                             |   | Unità mioceniche UM   | EMO   | Argille e marne con lenti di gesso                     | Marne, marne calcaree e argillose, argilliti di colore variabile dal nocciola al grigio chiaro con intercalazioni di diatomiti e di gessi.  | COS |    |    |
|   |   |                             |   |   | EMOr  | Arenarie e conglomerati                                | Alternanze di banchi sabbiosi e lenti di ciottoli di spessore localmente decametrico. Costituiscono dei livelli e delle lenti più o meno continui lateralmente.   |     |    |    |
|   |   |                             |   |   | RAQ   | Argille e argille sabbiose con lenti di gesso          | Argille con livelli di materiale carbonioso e talora lignitiferi, arenarie da fini a grossolane e livelli di conglomerati da fini a grossolani. Localmente sono presenti lenti e livelli di gesso dello spessore di pochi metri e di limitata estensione laterale |     |    |    |
|   |   |                             | ROS   | Calcari, arenarie e conglomerati                              | Alternanze irregolari e lenticolari di conglomerati da molto grossolani a fini, in strati da molto spessi a sottili, e arenarie da fini a grossolane in strati da spessi a sottili. Localmente sono presenti calcarentiti e calciruditi biancastri di spessore ed estensione laterale limitata. | GRS  |   |     |    |    |

|  |                                |      | Tipo_forma   | nome_ULF  | Descrizione | tipo_gt | Stato | Gen |
|--|--------------------------------|------|--|---|-------------|---------|-------|-----|
| S Substrato litoidale non sismico ( $V_s < 800$ m/s) | Complesso Alloctono Ligure CAL | MLL  | Formazione di M. Morello                                 | Flysch carbonatici, calcari marnosi e marne   | LPS         |         |       |     |
|  |                                | SIL  | Formazione di Sillano                                    | Argilliti grigio-brune e calcilutiti  | ALS         |         |       |     |
|  |                                | RCH  | Argilliti e calcari di Poggio Rocchino                   | Argilliti varicolori mangesifere con marne, calcari marnosi e calcareniti   | ALS         |         |       |     |
|  |                                | OMT  | Flysch di Ottone-Monteverdi                              | Calcari, calcari marnosi, marne ed argilliti calcaree torbiditiche con intercalazioni di arenarie e siltiti                 | LPS         |         |       |     |
|  |                                | OMTa | Brecce   | Brecce ad elementi ofiolitici   | GR          |         |       |     |
|  |                                | APA  | Argilliti e calcari silicei "Palombini"                  | Strati di calcari silicei grigio – ferro intensamente tettonizzati e da alternanze di strati e banchi di argilliti laminate | ALS         |         |       |     |
|  |                                | PRN  | Peridotiti serpentinizzate con filoni gabbri e basaltici | Peridotiti serpentinizzate con filoni gabbri e basaltici  | LP          |         |       |     |
|  |                                | BRG  | Basalti con strutture a pillow-lava                      | Basalti con strutture a pillow-lava   | LP          |         |       |     |
|  |                                | GBB  | Gabbri con filoni basici                                 | Gabbri con filoni basici  | LP          |         |       |     |

Nella CGT sono riportate inoltre le zone di attenzione per instabilità di versante distinte sulla base del loro stato di attività e della tipologia di movimento secondo le indicazioni riportate dagli Standard ICMS (Fig. 89).

| Instabilità di versante | 1 - crollo o ribaltamento | 2 - scorrimento | 3 - colata | 4 - complessa | 5 - non definito | CMYK                           |
|-------------------------|---------------------------|-----------------|------------|---------------|------------------|--------------------------------|
| 1 - attiva              |                           |                 |            |               |                  | 50,70,0,0 (fondo trasparente)  |
| 2 - quiescente          |                           |                 |            |               |                  | 0,75,90,0 (fondo trasparente)  |
| 3 - inattiva            |                           |                 |            |               |                  | 0,51,100,1 (fondo trasparente) |
| 4 - non definita        |                           |                 |            |               |                  | 0,0,0,100 (fondo trasparente)  |

Figura 89. Simbologia zone di attenzione per instabilità di versante per la Carta Geologico-Tecnica

### 8.3 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) risulta essere l'elaborato finale previsto per il Livello 1 di Microzonazione Sismica.

L'individuazione delle Microzone è stata effettuata attribuendo i caratteri di stabilità o instabilità ai diversi contesti geologici e geomorfologici rappresentati nella CGT.

Le microzone della carta sono classificabili in tre categorie:

- ✓ **Zone Stabili**, per le quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo (substrato in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata - pendii con inclinazione inferiore a 15°);
- ✓ **Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali**, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale;
- ✓ **Zone di attenzione per le instabilità**, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio (non sono necessariamente esclusi per queste zone anche fenomeni di amplificazione del moto). I principali tipi di instabilità sono:
  - instabilità di versante;
  - liquefazioni;
  - faglie attive e capaci;
  - cedimenti differenziali.

Sulla base della successione litologica è attribuito un codice formato da 4 cifre che descrive la tipologia della zona: Tipo\_z = 1000 nel caso di Zone stabili e Tipo\_z = 2000 nel caso di Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

Per quanto riguarda le Zone di attenzione per instabilità, queste vengono definite attraverso l'attribuzione di un codice Tipo\_i, che nel caso specifico, consiste in 8 cifre dove le prime quattro descrivono la tipologia di instabilità mentre le ultime quattro la tipologia della zona sulla base della successione litologica.

Per il territorio comunale di Collesalveti, le Zone di Attenzione corrispondono a quelle aree dove, nella CGT, sono state cartografate delle instabilità di versante (**ZAFR**) e dove sono state verificate, sulla base di dati pregressi, le condizioni predisponenti per il fenomeno della liquefazione (**ZALQ**).

### ***Zone Stabili***

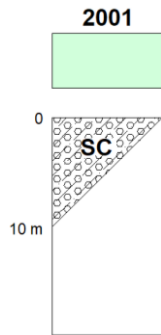
All'interno del territorio comunale non sono state individuate per la MS "Zone Stabili".

### ***Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali***

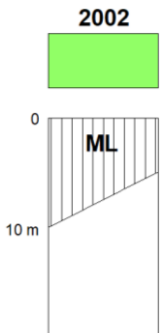
Le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali corrispondono alle aree caratterizzate da substrato affiorante o sub-affiorante con pendenze maggiori di 15°, al substrato caratterizzato da  $V_s < 800$  m/sec od alle aree caratterizzate da terreni di copertura.

Le "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" sono di seguito descritte:

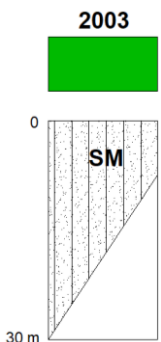




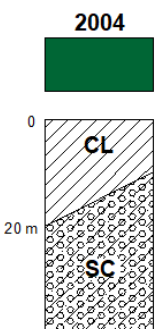
**ZONA 1:** caratterizzata da depositi eluvio-colluviali sabbioso-limosi o limoso-argillosi (SC) con talora clasti grossolani in proporzioni variabili, che poggiano al di sopra delle Unità Plioceniche e Quaternarie. Il loro spessore è molto variabile da pochi metri fino a una decina di metri, soprattutto in corrispondenza di versanti più acclivi. Sono moderatamente addensati/consistenti.



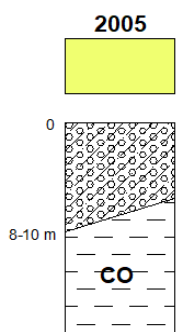
**ZONA 2:** caratterizzata dai depositi eluvio-colluviali derivati dall'alterazione diretta del substrato litoide e si presentano pertanto prevalentemente come "farina di roccia" mista a ciottoli con matrice limo-argillosa (ML). Il loro spessore è molto variabile da pochi metri fino a una decina di metri, soprattutto in corrispondenza di versanti più acclivi. Sono da moderatamente a mediamente consistenti.



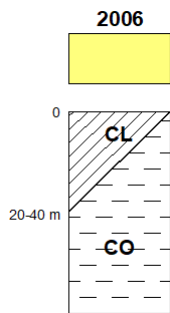
**ZONA 3:** corrispondente alla zona di Stagno, ad Ovest del fosso Cateratto, dove nei primi metri del sottosuolo i depositi olocenici sono costituiti prevalentemente da sabbie e sabbie limose da sciolte a mediamente addensate attribuibili a paleo-tomboli (SM). Lo spessore varia dai 5-6 metri ai 30 metri.



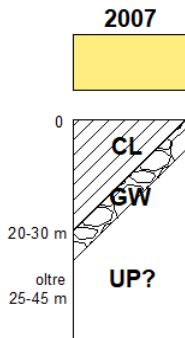
**ZONA 4:** localizzata nella fascia intermedia tra l'abitato di Stagno ed il Villaggio Emilio, caratterizzata nei primi metri del sottosuolo da depositi palustri e retro-dunali limo argillosi torbosi (CL) poco consistenti che poggiano al di sopra del terrazzo alluvionale pleistocenico (SC). In profondità si rinviene il substrato geologico pliocenico coesivo (UP). Spessori variabili da pochi metri fino a 20 metri



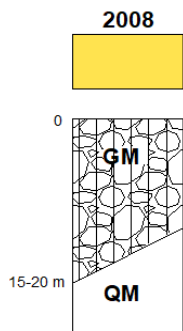
**ZONA 5:** caratterizzata dai depositi terrazzati (bnb2) limo-sabbiosi o argillosi mediamente consistenti/addensati, di spessore variabile da qualche metro fino a 8-10 m, poggianti sul substrato argilloso non rigido pliocenico (UP), che si estendono dal Villaggio Emilio verso est fin sulle estremità occidentali dei rilievi collinari.



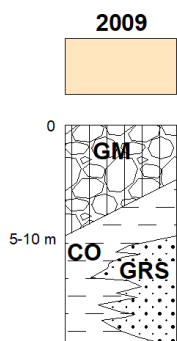
**ZONA 6:** caratterizzata dai sedimenti palustri e alluvionali limo argillosi torbosi (CL) da debolmente a mediamente consistenti, che poggiano al di sopra delle argille ed argille marnose. Il contatto fra i depositi alluvionali ed il substrato geologico pliocenico (CO-UP) varia da circa -20 m di profondità alla base dei rilievi collinari fino a -40 m verso la piana alluvionale.



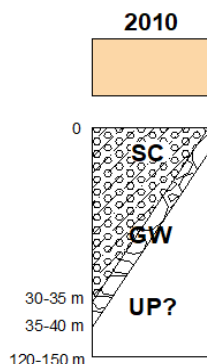
**ZONA 7:** corrisponde alla vasta pianura alluvionale. Questa microzona è caratterizzata da sedimenti alluvionali limo argillosi torbosi a bassissima consistenza con i contenuti in acqua sino al 50% (CL) fino a circa -20/-30 m di profondità, passanti a sabbie mediamente addensate e successivamente ad argille maggiormente consistenti. Alla base di questo pacco di sedimenti si rinviene un orizzonte costituito da ciottoli arrotondati e fortemente eterometrici immersi in una matrice che presenta una granulometria variabile tra la sabbia grossolana ed il ghiaietto (GW). Questo livello è presente in tutta la piana alluvionale e tende ad approfondirsi da sud-est (-25-30 m) verso nord-ovest fino a oltre i -45/-50 m nella zona di Biscottino. Lo spessore delle ghiaie e sabbie è dell'ordine dei 5-10 metri. Al di sotto si rinviene una alternanza di sedimenti coesivi prevalentemente argillosi di difficile attribuzione cronostratigrafica (UP?).



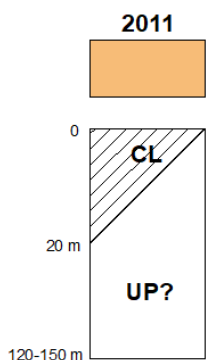
**ZONA 8:** caratterizzata dai terreni granulari da poco a mediamente addensati, non cementati (GM) dei terrazzi alluvionali del pleistocene medio (bnb1). Sono prevalentemente ghiaie poligeniche, eterometriche e sub-arrotondate, con contenuto variabile di matrice sabbioso-limosa. Lo spessore è variabile ma generalmente è compreso tra 15-20 m. Tali sedimenti poggiano in discordanza sui termini sabbiosi delle unità QM. Questa microzona è presente nella porzione nord-orientale del territorio comunale, sui rilievi collinari compresi tra Nugola Vecchia e Collesalvetti.



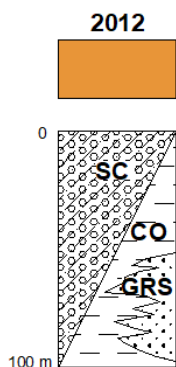
**ZONA 9:** caratterizzata dai terreni granulari da poco a mediamente addensati, non cementati (GM) dei terrazzi alluvionali del Pleistocene medio (bnb1). Sono prevalentemente ghiaie poligeniche, eterometriche e sub-arrotondate, con contenuto variabile di matrice sabbioso-limosa. Lo spessore è variabile ma generalmente è compreso tra 5-10 m. Tali sedimenti poggiano in discordanza sui depositi argillosi (CO) e sabbiosi (GRS) pliocenici (UP: FAA e FAAe). Questa condizione si rinviene a nord di Nugola Nuova, sui rilievi collinari in sinistra idrografica del Fosso dell'Acqua Salsa e nel settore nord-occidentale del territorio comunale.



**ZONA 10:** caratterizzata da sabbie e limi, alternati a sottili livelli di ghiaie fini, non cementati e da poco a molto addensati (SC) con spessori variabili fino a -30/35 m di profondità. Dati di sottosuolo evidenziano che al di sotto è presente un orizzonte costituito da ciottoli arrotondati e fortemente eterometrici immersi in una matrice che presenta una granulometria variabile tra la sabbia grossolana ed il ghiaietto (GW) di spessore dell'ordine dei 5 metri. Al di sotto si rinvengono terreni prevalentemente argillosi talora con intercalati livelli sabbiosi fino a profondità di -120/150 m, di difficile attribuzione cronostratigrafica (UP?). Questa situazione si rinviene attorno agli abitati di Vicarello, La Tanna e Mortaiolo.



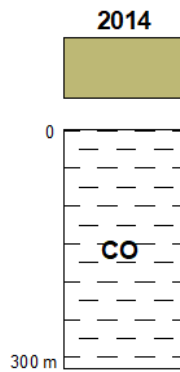
**ZONA 11:** corrisponde ai depositi alluvionali delle valli laterali dell'Arno. Sono generalmente argillo-sabbiosi-limosi con grado di consistenza variabile e poggiano in discordanza su tutti i terreni attraversati dal reticolo di drenaggio, costituendo localmente degli elementi significativi dal punto di vista sismico. Il loro spessore è molto variabile fino ad un massimo di 20 metri. Al di sotto si rinvengono terreni prevalentemente argillosi talora con intercalati livelli sabbiosi di difficile attribuzione cronostratigrafica (UP?).



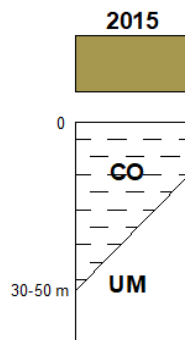
**ZONA 12:** caratterizzata da un'alternanza di sabbie, sabbie cementate (arenarie), argille ed argille sabbiose (SC). La parte basale è caratterizzata anche dalla presenza di sabbie e lenti di conglomerati a ciottoli medio-fini. Questa microzona è presente in Val di Nugola e in sinistra del Torrente Tora da Nugola Nuova fino alle zone più orientali. Lo spessore massimo desumibile è di circa 100 m. I depositi si trovano in discordanza angolare sui depositi argillosi (CO) e sabbiosi (GRS) marini del Pliocene (UP:FAA e FAAe).



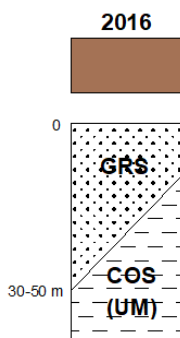
**ZONA 13:** caratterizzata da sabbie da fini a grossolane, sabbie limose, con livelli ghiaiosi, stratificate, con stratificazioni incrociate planari (GRS), generalmente da addensate a molto addensate. Si osservano in tre principali corpi sedimentari spessi fino a 100 m, trattasi della litofacies sabbiosa della formazione delle Argille Azzurre (FAAe).



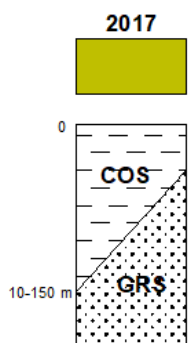
**ZONA 14:** caratterizzata da argille bluastre e argille marnose con sottili livelli e lamine limose e sabbiose, grossolanamente stratificate, plastiche e consistenti (CO). Lo spessore massimo desumibile è maggiore di 300 m trattasi della litofacies argillosa della formazione pliocenica FAA.



**ZONA 15:** caratterizzata da argille bluastre e argille marnose consistenti con sottili livelli e lamine limose e sabbiose, grossolanamente stratificate (CO) che poggiano in discordanza sulle Unità Mioceniche (UM) le quali si rinvencono a circa 30-50 m di profondità e si identificano con litologie prevalentemente coesive sovra-consolidate e stratificate (COS).

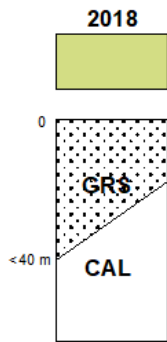


**ZONA 16:** caratterizzata da sabbie da fini a grossolane, sabbie limose, con livelli ghiaiosi, stratificate, con stratificazioni incrociate planari (GRS), che poggiano in discordanza sulle Unità Mioceniche (UM) le quali si rinvencono a circa 30-50 m di profondità e si identificano con litologie coesive sovra-consolidate e stratificate (COS).

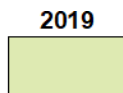


**ZONA 17:** caratterizzata dai litotipi delle Argille e Marne con lenti di gesso (EMO) alternati irregolarmente sia verticalmente che lateralmente con arenarie e conglomerati (EMOr), spessi fino ad alcune decine di metri, passanti ad argille e argille sabbiose con lenti di gesso (RAQ). Nel complesso costituiscono una successione di depositi coesivi sovraconsolidati stratificati (COS). Lo spessore totale varia allontanandosi dai rilievi con profondità comprese fra i 10 ed i 150 m. Inferiormente poggiano sui conglomerati con abbondante matrice sabbiosa e calcareniti-calciruditi-calcarei organogeni (ROS).

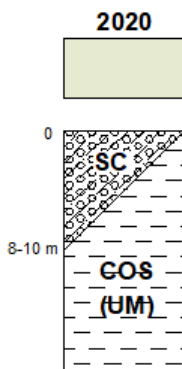




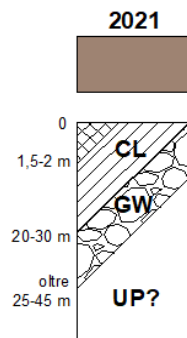
**ZONA 18:** caratterizzata da depositi granulari stratificati (GRS), cementati, molto addensati costituiti da conglomerati con abbondante matrice sabbiosa e localmente da calcareniti, calciruditi biancastre e calcari organogeni massivi di spessore ed estensione laterale limitata. Si rinvengono su tutto il fianco orientale e settentrionale della Dorsale dei Monti Livornesi, con spessore variabile inferiore ai 30-40 m. Poggiano in discordanza sul substrato litoide non sismico (S) rappresentato dai litotipi del Complesso Alloctono Ligure (CAL).



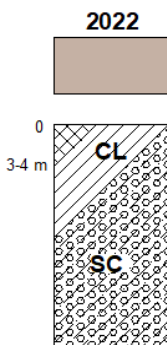
**ZONA 19:** corrispondente all'area posta al centro di Collesalveti dove sono segnalate cavità sotterranee riferibili a magazzini dismessi utilizzati in passato per lo stoccaggio di cereali e derrate alimentari.



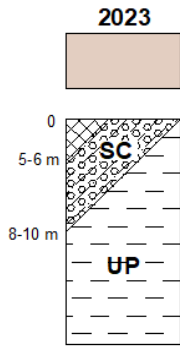
**ZONA 20:** caratterizzata da terreni limo-sabbiosi o argillosi che affiorano sui terrazzi (bnb1) di Poggio Sbrana e Poggio Tondo, lungo il limite occidentale del territorio comunale, con spessori variabili da qualche metro fino a 8-10 m, poggianti sul substrato geologico delle Unità Mioceniche (UM), caratterizzato da litologie coesive sovra-consolidate e stratificate (COS).



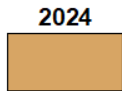
**ZONA 21:** caratterizzata dalla presenza di terreni contenenti resti di attività antropica (riempimenti/riporti - RI), con spessori fino a 1,5/2,0 m, poggianti al di sopra della successione sedimentaria che caratterizza la Zona 7. Questa microzona è presente in corrispondenza dell'Interporto Toscano di Guasticce, zona industriale Biscottino e dell'Autoparco Il Faldo.



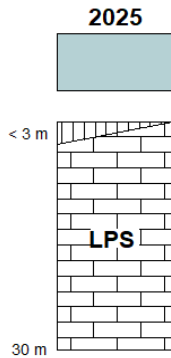
**ZONA 22:** caratterizzata dalla presenza di terreni contenenti resti di attività antropica (riempimenti/riporti - RI), con spessori fino ad un massimo di 3/4 m, localizzata nella fascia intermedia tra l'abitato di Stagno ed il Villaggio Emilio e poggiante al di sopra della successione sedimentaria che caratterizza la Zona 4.



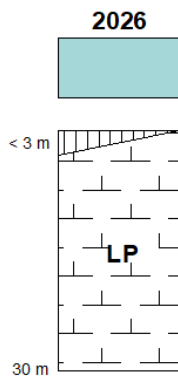
**ZONA 23:** caratterizzata dalla presenza di terreni contenenti resti di attività antropica (riempimenti/riporti - RI), con spessori fino ad un massimo di 5/6 m, in località Valle delle Mignatte, poggianti al di sopra della successione sedimentaria che caratterizza la Zona 5.



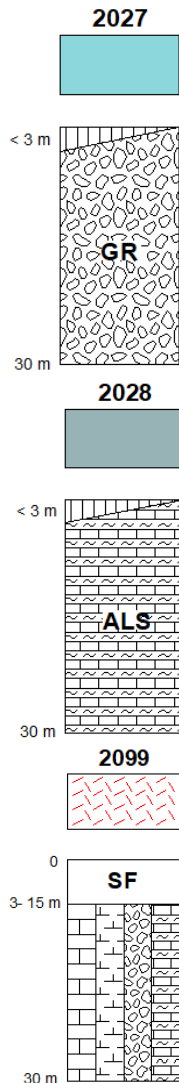
**ZONA 24:** Caratterizzata dall'affioramento del substrato non sismico rappresentato dai litotipi del Complesso Alloctono Ligure, su versanti con pendenze maggiori di 15°. La suscettibilità di amplificazione sismica è essenzialmente dovuta a fattori topografici. Tale microzona è diffusa su tutta la Dorsale dei Monti Livornesi.



**ZONA 25:** Caratterizzata dall'affioramento del substrato non sismico contraddistinto da litotipi lapidei, stratificati (argilliti e calcari marnosi) appartenenti al complesso flyshoide di Ottone Monterverdi (OMT) e di Monte Morello (MLL), talora con presenza di copertura di alterazione inferiore a 3 m e con valori di  $V_s < 800$  m/sec.



**ZONA 26:** Caratterizzata dall'affioramento del substrato non sismico contraddistinto da litotipi lapidei appartenenti al complesso ofiolitico (Peridotiti serpentinizzate – PRN, Basalti - BRG e Gabbri – GBB) e talora con presenza di copertura di alterazione inferiore a 3 m e valori superficiali di  $V_s < 800$  m/sec.



**ZONA 27:** Caratterizzata dall'affioramento del substrato non sismico contraddistinto da litotipi granulari cementati (Brecce OMTa) talora con presenza di copertura di alterazione inferiore a 3 m e valori superficiali di  $V_s < 800$  m/sec.

**ZONA 28:** Caratterizzata dall'affioramento del substrato non sismico contraddistinto da alternanza di litotipi stratificati (argilliti, siltiti, marne e calcari marnosi) appartenenti alle formazioni di Sillano (SIL), Argilliti, Calcari di Poggio Rocchino (RCH) ed Argilliti e Calcari Silicei "Palombini" (APA). Presenza di copertura di alterazione inferiore a 3 m e con valori di  $V_s < 800$  m/sec.

**ZONA 99:** Substrato non sismico (LP, LPS, ALS, GR) caratterizzato da una fascia di alterazione (SF) appartenente alle aree con instabilità di versante (frane) con spessori compresi tra 3 e 15 m.

Vista l'esiguità degli affioramenti e la marginalità rispetto ai principali centri abitati, in località Vallelunga nella fascia di collegamento fra le formazioni mioceniche, plioceniche e pleistoceniche, relativamente ai tre poggi della località Fattoria Vallelunga, è stato scelto di attribuire la MOPS 2009 (bnb1 su FAA) in quanto a livello di amplificazione sismica le facies distali mioceniche (argillo-gessose) presentano un comportamento molto simile alle argille più consolidate del Pliocene.

### **Zone di Attenzione per le instabilità**

Come già detto, per il territorio comunale di Collesalveti, le Zone di Attenzione sono connesse all'instabilità di versante ( $Z_{A_{FR}}$ ) e per Liquefazione ( $Z_{A_{LQ}}$ ).

Le zone di attenzione per instabilità di versante ( $Z_{A_{FR}}$ ) sono distribuite prevalentemente sui versanti orientali dei Monti livornesi viceversa le zone di attenzione per liquefazione ( $Z_{A_{LQ}}$ ) si estendono in quasi tutta la pianura fino a ridosso della fascia costiera, laddove sono presenti sedimenti sabbiosi fini poco addensati, argille limose molli e con falda prossima al piano campagna.

### ***Instabilità per liquefazione ( $ZA_{LQ}$ )***

Alla luce di quanto asserito sopra, sono state eseguite n.2 verifiche alla liquefazione prendendo come riferimento n.2 prove penetrometriche statiche (P281 e P237), considerate rappresentative di due aree oggetto di particolare attenzione, ovvero l'abitato di Stagno e l'Interporto Toscano A. Vespucci – zona Guasticce.

Le verifiche alla liquefazione sono state effettuate in ottemperanza al D.M. 17.01.2018, al fine di valutare se i valori del coefficiente di sicurezza rientrano nei limiti stabiliti. La verifica può essere svolta con l'ausilio di diversi metodi di calcolo, in particolare è stato utilizzato il seguente approccio:

- procedura proposta dall'Eurocodice 8;

A livello nazionale, la pericolosità sismica di base è stata aggiornata in seguito alla più recente revisione della macrozonazione sismogenica del territorio nazionale, nota con la semplice sigla "**ZS9**" (2004) e prodotta dall'*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*.

Essa rappresenta, al momento, il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano. In particolare l'ambito studiato ricade nell'ampia **zona 921** che rappresenta la fascia più esterna occidentale dell'arco appenninico settentrionale, a questa zona sismogenica viene attribuita una magnitudo massima **M = 6,14** dunque caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto elevate intensità.

### EUROCODICE 8

Le verifiche della suscettibilità a liquefazione sono state condotte in entrambe le prove con il metodo che utilizza le misure di resistenza alla punta e laterale misurate.

La procedura implica il calcolo di due parametri: il livello di sollecitazione ciclica del suolo causato dal sisma, espresso come indice o rapporto di sollecitazione ciclica **CSR** (*Cyclic Stress Ratio*) e la resistenza del terreno alla liquefazione espressa come indice o rapporto di resistenza ciclica **CRR** (*Cyclic Resistance Ratio*).

Il rapporto tra **CRR/CSR** rappresenta il fattore di sicurezza e deve risultare superiore a 1 affinché non si abbia liquefazione:

$$FS: \left( \frac{CRR}{CSR} \right) \geq 1$$

I valori della Resistenza Ciclica CRR e della Sollecitazione Ciclica CSR sono determinati come segue:

$$CSR = 0,65 \cdot (a_{max}/g) \cdot (\sigma_{vd}/\sigma'_{vo}) \cdot r_d$$

Dove:

$a_{g,max}$  = accelerazione orizzontale massima in superficie  
g = accelerazione di gravità

$\sigma_{vo}, \sigma'_{vo}$  = tensioni totali ed efficace alla profondità considerata  
 $r_d$  = coeff. di riduzione degli sforzi di taglio alla profondità

$$CRR_{eq} = CRR_{7.5} \cdot MSF \cdot k\alpha \cdot k\sigma$$

Dove:

MSF = fattore di correzione della magnitudo

$K\alpha$  = fattore di correzione per la tensione tangenziale mobilizzata

$K\beta$  = fattore di correzione per la pressione efficace litostatica

Con:

$$CRR_{7.5} = 0,833 \cdot [(q_{c1N})_{cs} / 1000] + 0,05 \text{ se } (q_{c1N})_{cs} < 50$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot q_{c1N}$$

Dove:

$CRR_{7.5}$  = capacità di resistenza ciclica per un terremoto di magnitudo 7.5

$Q_{c1N}$  = resistenza penetrometrica normalizzata

$(Q_{c1N})_{cs}$  = correzione di  $Q_{c1N}$  a un equivalente valore di sabbia pulita

$CRR_{eq}$  = capacità di resistenza ciclica corretta

$K_c$  = fattore di correzione per le caratteristiche granulometriche

Per quanto riguarda la prova CPT (P237), eseguita in corrispondenza dell'abitato di Stagno, la verifica condotta in corrispondenza dell'orizzonte sabbio-limoso ed argillo-limoso con resti vegetali a basso grado di addensamento/consistenza, presente fino a circa -6,0 m di profondità, ha ottenuto un valore di **Fs=0,9** quindi minore di 1 per cui è possibile ipotizzare fenomeni di liquefazione, comunque con un basso potenziale di suscettibilità alla liquefazione stessa (0,278).

Oltre tale profondità, il maggior grado di addensamento dei terreni sabbiosi e sabbio-limosi porta invece ad escludere la liquefazione, avendo ottenuto un valore di **Fs=5,0** quindi nettamente maggiore di 1.

Per l'area dell'Interporto Toscano A. Vespucci-Guasticce, utilizzando i dati forniti dalla prova CPTU (P281), è stata effettuata una verifica in corrispondenza dell'orizzonte limo-argilloso debolmente sabbioso presente fino a circa -7,0 m da p.c. ed in corrispondenza dell'orizzonte limo argilloso con intercalati livelletti torbosi neri e livelli sabbiosi grossolani con resti fossiliferi marini, da debolmente consistente a molle con contenuto in acqua sino al 50%, presente fino a circa -19,0 m da p.p..

Per entrambi gli orizzonti si è ottenuto un valore di **Fs** rispettivamente pari a **0,4** e **0,5** quindi minore di 1 per cui i terreni risultano liquefacibili con un elevato potenziale di suscettibilità alla liquefazione, nonostante il fuso granulometrico indichi terreni argillosi.



Pertanto si è ritenuto opportuno estendere le aree di instabilità alla liquefazione ( $Z_{ALQ}$ ) ad entrambe le Microzone 2003 e 2007.

## 8.4 Carta di Microzonazione Sismica (MS) – Livello 2

La Carta di Microzonazione Sismica rappresenta il passaggio dal Livello 1 al Livello 2. Tale approfondimento ha riguardato solamente i sistemi insediativi e produttivi dei principali centri abitati quali Collesalveti, Vicarello, Guasticce-Interporto, Stagno e Nugola.

La realizzazione della carta di MS è stata possibile solamente in seguito alla verifica di congruenza tra il modello di geologico reale e quello definito nello studio di primo livello, tramite controlli incrociati fra sezioni geologico-tecniche, indagini pregresse ed eseguite e la stesura della cartografia MOPS. Fondamentale, per la costruzione della carta, è la disponibilità di dati ( $f_0$  e  $V_s$ ) necessari per la corretta applicazione degli abachi.

Difatti per la definizione del fattore di amplificazione sismica nelle aree analizzate, si è fatto uso degli abachi regionali che, tramite un approccio semplificato, consentono di quantificare l'amplificazione attesa nelle zone "stabili suscettibili di amplificazione".

Tali abachi si differenziano sulla base dei seguenti fattori:

- 1) Area geografica
- 2) Tipologia dell'input sismico
- 3) Presenza di substrato sismico a profondità maggiore o minore a 30m
- 4) Tipo di fattore di amplificazione

Per la realizzazione della Carta MS si è pertanto proceduto ad assegnare alle varie Microzone individuate nello studio di Livello 1, i valori del Fattore di Amplificazione secondo la procedura indicata nelle Specifiche Tecniche Regionali (2018).

Il Comune di Collesalveti fa parte della **Macroarea Toscana Interna** ed i sistemi insediativi analizzati ricadono in **Ag<sub>475anni</sub> ≥ 0,125g**, così come indicato nella griglia dei valori INGV, con profondità del substrato maggiore di 30 m.

L'abaco regionale di riferimento risulta pertanto il seguente:

| Toscana interna (substrato geologico > 30 m) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| Valore di ag (TR=475 anni) ≥ 0.125g          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
| 0.1 - 0.5 s                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
| Vs30 (m/s)   f0(Hz)                          | <1  | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | ≥ 8 | 75° perc. |
| <200   | 1.0 | 1.3 | 2.0 |     |     |     |     |     |     | 1.2       |
| 300  | 1.1 | 1.4 | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 2.0 | 2.0 | 1.8 | 1.4       |
| 500  | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.4       |
| 700  | 0.9 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.2       |
| ≥800   | 1.0 | 1.0 | 1.0 |     |     |     |     | 1.2 | 1.1 | 1.0       |
| 0.5 - 1 s                                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
| Vs30 (m/s)   f0(Hz)                          | <1  | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | ≥ 8 | 75° perc. |
| <200   | 1.8 | 2.2 | 2.3 |     |     |     |     |     |     | 2.1       |
| 300  | 1.4 | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.8 | 1.8       |
| 500  | 1.2 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.5       |
| 700  | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.2 | 1.2       |
| ≥800   | 1.1 | 1.2 | 1.2 |     |     |     |     | 1.0 | 1.0 | 1.1       |

Il fattore di amplificazione (fattore di amplificazione di Housner – FHa), che si distingue in FHa (0.1-0.5 s) e FHa (0.5-1.0 s), è funzione delle classi relative ai valori dei due parametri rappresentativi dalla situazione sismo-stratigrafica locale ovvero della frequenza fondamentale ( $f_0$ ) e della velocità media  $V_{s30}/V_{sh}$ .

| Classi         |                            |
|----------------|----------------------------|
| frequenza (Hz) | $f_0 < 1$                  |
|                | 1.5   $1 \leq f_0 < 2$     |
|                | 2.5   $2 \leq f_0 < 3$     |
|                | 3.5   $3 \leq f_0 < 4$     |
|                | 4.5   $4 \leq f_0 < 5$     |
|                | 5.5   $5 \leq f_0 < 6$     |
|                | 6.5   $6 \leq f_0 < 7$     |
|                | 7.5   $7 \leq f_0 < 8$     |
|                | $\geq 8$                   |
| velocità (m/s) | $V_s < 200$                |
|                | 300   $200 \leq V_s < 400$ |
|                | 500   $400 \leq V_s < 600$ |
|                | 700   $600 \leq V_s < 800$ |
|                |                            |

In sintesi, per ciascuna Microzona sono state definite le condizioni al contorno ( $A_g$  e profondità del substrato) ed individuate le misure di rumore presenti nonché le indagini sismiche utili alla definizione della  $V_s$  necessarie alla determinazione delle classi di frequenza e velocità per l'utilizzo degli abachi.

Nelle microzone 2008 e 2005 sono state individuate, per una migliore classificazione, due sottozone con valori di  $V_s$  e di  $f_0$  coerenti fra di loro.

### ***Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali***

#### **ZONA 2008**

| Indagini HVSR      |     |     |              |               | Indagini Sismiche |     |              |
|--------------------|-----|-----|--------------|---------------|-------------------|-----|--------------|
| HVSR               | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE          | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| <b>Sottozona 1</b> |     |     |              |               |                   |     |              |
| P84                | 1,2 | 2,1 | 1,5          | Collesalvetti | L30               | 285 | 300          |
| P82                | 1,7 | 2,2 | 1,5          | Collesalvetti | P211              | 316 | 300          |
| <b>Sottozona 2</b> |     |     |              |               |                   |     |              |
| P215               | 0,3 | 5   | $f_0 < 1$    | Collesalvetti | P182              | 428 | 500          |
| P216               | 0,3 | 3,5 | $f_0 < 1$    | Collesalvetti |                   |     |              |
| P306               | 0,9 | 1,8 | $f_0 < 1$    | Collesalvetti |                   |     |              |
| P314               | 0,9 | 1,9 | $f_0 < 1$    | Nugola        |                   |     |              |
|                    |     |     |              |               |                   |     |              |

Per quanto riguarda la misura HVSR P306, questa risulta caratterizzata da un doppio picco. Quello principale, riportato anche nella carta delle frequenze, corrisponde ad una frequenza di 8,2 Hz mentre quello secondario indica una frequenza di circa 0,9 Hz. Quest'ultimo valore risulta coerente con quelli delle misure di rumore circostanti, che caratterizzano la porzione sud del centro abitato di Collesalvetti ed i rilievi collinari di Nugola.

Per la microzona 2008 è stato pertanto ritenuto opportuno individuare due diverse sottozone.

Gli stessi fattori di amplificazione della "sottozona 1" sono stati attribuiti alla microzona posta al centro di Collesalvetti, dove sono segnalate cavità sotterranee (microzona 2019). Per questa microzona si ritengono necessarie, durante la redazione del Livello 3, eventuali indagini mirate alla corretta definizione delle geometrie delle cavità e delle condizioni litostratigrafiche locali.

|                       | <b>Sottozona 1</b> | <b>Sottozona 2</b> |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| <b>F0</b>             | 1,5                | f0<1               |
| <b>Vs</b>             | 300                | 500                |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4                | 1,1                |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0                | 1,2                |

### **ZONA 2010**

| <b>Indagini HVSR</b> |           |           |                     |               | <b>Indagini Sismiche</b> |           |                     |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVSR</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b>   | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P90                  | 1,9       | 2,3       | 1,5                 | Collesalvetti | L24                      | 307       | 300                 |
| P91                  | 1,7       | 2,3       | 1,5                 | Collesalvetti | L25                      | 301       | 300                 |
| P316                 | 1,3       | 1,9       | 1,5                 | Collesalvetti | L27                      | 402       | 500                 |
| P93                  | 1         | 2         | 1,5                 | Vicarello     | L21                      | 228       | 300                 |
| P92                  | 1,1       | 2,5       | 1,5                 | Vicarello     | L22                      | 294       | 300                 |
| P307                 | 1,6       | 1,9       | 1,5                 | Vicarello     | L11                      | 285       | 300                 |
| P94                  | 1         | 2,7       | 1,5                 | Vicarello     |                          |           |                     |
| P310                 | 1,8       | 2,1       | 1,5                 | Vicarello     |                          |           |                     |
| P95                  | 1         | 2,7       | 1,5                 | Vicarello     |                          |           |                     |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>F0</b>             | 1,5 |
| <b>Vs</b>             | 300 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4 |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0 |

### **ZONA 2011**

| <b>Indagini HVSR</b> |           |           |                     |               | <b>Indagini Sismiche</b> |           |                     |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVSR</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b>   | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P85                  | 2         | 3,9       | 2,5                 | Collesalvetti | P78                      | 205       | 300                 |
| P86                  | 1,9       | 3,9       | 1,5                 | Collesalvetti | L12                      | 247       | 300                 |
| P309                 | 1,8       | 1,9       | 1,5                 | Collesalvetti |                          |           |                     |
| P311                 | 1,9       | 2,6       | 1,5                 | Vicarello     | L42                      | 251       | 300                 |
| P89                  | 1,7       | 4         | 1,5                 | Collesalvetti | P325                     | 224       | 300                 |
| P308                 | 1,6       | 2,1       | 1,5                 | Collesalvetti |                          |           |                     |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>F0</b>             | 1,5 |
| <b>Vs</b>             | 300 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4 |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0 |

### ZONA 2007

| Indagini HVSr |     |     |              |            | Indagini Sismiche |     |              |
|---------------|-----|-----|--------------|------------|-------------------|-----|--------------|
| HVSr          | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE       | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| P146          | 1,2 | 2,9 | 1,5          | Vicarello  |                   |     |              |
| P147          | 1,1 | 3,8 | 1,5          | Vicarello  |                   |     |              |
| P162          | 1,8 | 5   | 1,5          | Guasticce  | L20               | 147 | Vs<200       |
| P103          | 1,5 | 4,2 | 1,5          | Guasticce  | L10               | 196 | Vs<200       |
| P102          | 1   | 5,8 | 1,5          | Guasticce  |                   |     |              |
| P101          | 0,9 | 7,1 | f0<1         | Guasticce  |                   |     |              |
| P219          | 2   | 5   | 2,5          | Guasticce  |                   |     |              |
| P220          | 1,6 | 6   | 1,5          | Guasticce  |                   |     |              |
| P100          | 1,2 | 5,8 | 1,5          | Interporto | P77               | 161 | Vs<200       |
|               |     |     |              |            | L13               | 130 | Vs<200       |
| P165          | 1,9 | 6,5 | 1,5          | Biscottino |                   |     |              |
| P295          | 1,2 | 6   | 1,5          | Stagno     | L6                | 181 | Vs<200       |

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| <b>F0</b>             | 1,5    |
| <b>Vs</b>             | Vs<200 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,3    |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,2    |

### ZONA 2021

| Indagini HVSr |     |     |              |            | Indagini Sismiche |     |              |
|---------------|-----|-----|--------------|------------|-------------------|-----|--------------|
| HVSr          | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE       | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| P304          | 2   | 1,7 | 2,5          | Guasticce  | P258              | 150 | Vs<200       |
| P152          | 1   | 5   | 1,5          | Il Faldo   | L3                | 160 | <200         |
| P96           | 1   | 5,5 | 1,5          | Il Faldo   |                   |     |              |
| P164          | 1,7 | 6   | 1,5          | Interporto | L18               | 198 | Vs<200       |
| P304          | 2   | 1,7 | 2,5          | Interporto | P326              | 145 | Vs<200       |
|               |     |     |              | Interporto | L19               | 130 | Vs<200       |
|               |     |     |              | Interporto | P258              | 150 | Vs<200       |
| P166          | 1   | 3   | 1,5          | Biscottino | L38               | 166 | Vs<200       |

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| <b>F0</b>             | 1,5    |
| <b>Vs</b>             | Vs<200 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,3    |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,2    |

## ZONA 2012

| Indagini HVSR |     |     |              |                            | Indagini Sismiche |     |              |
|---------------|-----|-----|--------------|----------------------------|-------------------|-----|--------------|
| HVSR          | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE                       | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| P111          | 1,1 | 2,5 | 1,5          | Nugola                     |                   |     |              |
| P180          | 2   | 2,5 | 1,5          | Nugola                     | P330              | 297 | 300          |
|               |     |     |              | Contesto geologico analogo | L47               | 349 | 300          |

Per la definizione della Vs necessaria all'utilizzo dell'abaco, sono state considerate indagini sismiche realizzate in corrispondenza del centro abitato di Nugola Vecchia ed in un contesto geologico analogo.

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>F0</b>             | 1,5 |
| <b>Vs</b>             | 300 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4 |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0 |

## ZONA 2001

| Indagini HVSR |     |     |              |                            | Indagini Sismiche |     |              |
|---------------|-----|-----|--------------|----------------------------|-------------------|-----|--------------|
| HVSR          | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE                       | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| P179          | 0,4 | 2,6 | f0<1         | Nugola                     |                   |     |              |
| P178          | 2   | 2,6 | 2,5          | Nugola                     |                   |     |              |
| P112          | 3,3 | 2,8 | 3,5          | Nugola                     | P330              | 297 | 300          |
|               |     |     |              | Contesto geologico analogo | L47               | 349 | 300          |

La Microzona 2001 è caratterizzata da depositi eluvio-colluviali che poggiano al di sopra di litotipi diversi fra loro, appartenenti alle Unità Plioceniche e Quaternarie. La loro variabilità sia in termini di spessore che in termini di consistenza/addensamento nonché la diversità nelle litologie alla base, danno origine a picchi di frequenza contrastanti fra di loro pertanto si è ritenuto opportuno far riferimento ai valori di FHa scaturiti dal 75° percentile.

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| <b>F0</b>             | 75°perc |
| <b>Vs</b>             | 300     |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4     |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 1,8     |

## ZONA 2013

| Indagini HVSR |     |     |              |        | Indagini Sismiche |     |              |
|---------------|-----|-----|--------------|--------|-------------------|-----|--------------|
| HVSR          | F0  | A0  | CLASSE ABACO | NOTE   | NUMERO            | VS  | CLASSE ABACO |
| 217           | 0,3 | 4,4 | f0<1         | Nugola | P183              | 415 | 500          |
| 218           | 0,4 | 4   | f0<1         | Nugola |                   |     |              |



|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>F0</b>             | f0<1 |
| <b>Vs</b>             | 500  |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,1  |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 1,2  |

### **ZONA 2014**

| <b>Indagini HVS</b> |           |           |                     |             | <b>Indagini Sismiche</b> |           |                     |
|---------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVS</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b> | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P171                | 0,4       | 4         | f0<1                | Nugola      | L48                      | 276       | 300                 |
| P318                | 0,6       | 3,2       | f0<1                | Nugola      |                          |           |                     |

Per la definizione della Vs necessaria all'utilizzo dell'abaco, in assenza di una linea sismica in prossimità del centro abitato di Nugola Nuova, è stata presa a riferimento un'indagine ubicata in un contesto geologico analogo

|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>F0</b>             | f0<1 |
| <b>Vs</b>             | 300  |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,1  |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 1,4  |

### **ZONA 2004 (2022)**

| <b>Indagini HVS</b> |           |           |                     |             | <b>Indagini Sismiche</b> |           |                     |
|---------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVS</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b> | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P99                 | 2,5       | 3,6       | 2,5                 | Stagno      | L1                       | 194       | Vs<200              |
| P221                | 1,4       | 2         | 1,5                 | Stagno      | L8                       | 370       | 300                 |
| P222                | 1,9       | 2         | 1,5                 | Stagno      | P185                     | 163       | Vs<200              |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>F0</b>             | 1,5  |
| <b>Vs</b>             | <200 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,3  |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,2  |

### **ZONA 2005 (2023)**

| <b>Indagini HVS</b> |           |           |                     |             | <b>Indagini Sismiche</b> |           |                     |
|---------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVS</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b> | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| <b>Sottozona 1</b>  |           |           |                     |             |                          |           |                     |
| P293                | 1,6       | 1,4       | 1,5                 | Stagno      | L15                      | 276       | 300                 |
| P294                | 1,1       | 1,2       | 1,5                 | Stagno      | L16                      | 323       | 300                 |
| <b>Sottozona 2</b>  |           |           |                     |             |                          |           |                     |
| P98                 | 0,7       | 3         | f0<1                | Stagno      | L41                      | 271       | 300                 |
| P169                | 0,4       | 2,3       | f0<1                | Stagno      | P79                      | 254       | 300                 |
| P322                | 0,6       | 3,2       | f0<1                | Stagno      |                          |           |                     |

Per quanto riguarda la misura HVS P322, questa risulta caratterizzata da un doppio picco. Quello principale, riportato anche nella carta delle frequenze, corrisponde ad una

frequenza di 6,3 Hz mentre quello secondario indica una frequenza di circa 0,6 Hz. Quest'ultimo valore risulta coerente con quelli delle misure di rumore circostanti, che caratterizzano la porzione meridionale del sistema produttivo di Stagno.

Per la Microzona 2005 è stato pertanto ritenuto opportuno individuare due diverse sottozone.

|                       | <b>Sottozona 1</b> | <b>Sottozona 2</b> |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| <b>F0</b>             | 1,5                | f0<1               |
| <b>Vs</b>             | 300                | 300                |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4                | 1,1                |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0                | 1,4                |

### **ZONA 2003**

| <b>Indagini HVSr</b> |           |           |                     |             | <b>Indagini sismiche</b> |           |                     |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVSr</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b> | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P296                 | 2,8       | 1,6       | 2,5                 | Stagno      | P227                     | 218       | 300                 |
| P97                  | 1,2       | 3         | 1,5                 | Stagno      |                          |           |                     |
| P297                 | 1,9       | 1,7       | 1,5                 | Stagno      |                          |           |                     |
| P168                 | 1,2       | 4,5       | 1,5                 | Stagno      |                          |           |                     |
| P297                 | 1,9       | 1,7       | 1,5                 | Stagno      |                          |           |                     |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>F0</b>             | 1,5 |
| <b>Vs</b>             | 300 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 1,4 |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,0 |

### **ZONA 2006**

| <b>Indagini HVSr</b> |           |           |                     |             | <b>Indagini sismiche</b> |           |                     |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------|
| <b>HVSr</b>          | <b>F0</b> | <b>A0</b> | <b>CLASSE ABACO</b> | <b>NOTE</b> | <b>NUMERO</b>            | <b>VS</b> | <b>CLASSE ABACO</b> |
| P104                 | 2,7       | 3,1       | 2,5                 | Guasticce   | L5                       | 140       | <200                |
|                      |           |           |                     | Guasticce   |                          |           |                     |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>F0</b>             | 2,5  |
| <b>Vs</b>             | <200 |
| <b>FHa (0.1-0.5s)</b> | 2,0  |
| <b>FHa (0.5-1.0s)</b> | 2,3  |

### ***Zone di attenzione per instabilità***

Nelle aree instabili per frana, non sono presenti linee sismiche né misure di rumore. Per l'attribuzione del fattore di amplificazione, considerata la sola presenza di zone di attenzione lungo il perimetro esterno del centro abitato di Nugola, sono stati considerati i valori delle microzone in cui ricadono.

Anche per quanto riguarda le zone di attenzione per liquefazione, sono stati attribuiti gli stessi parametri di amplificazione delle corrispondenti microzone.

## **10. APPENDICI E TAVOLE**

Fanno parte del presente studio le seguenti tavole ed appendici:

- Carta Geologica (Fogli A-B-C)
- Carta Geomorfologica (Fogli A-B-C)
- Carta delle Frequenze (Fogli A-B-C)
- Carta delle Indagini (Fogli A-B-C)
- Carta Geologico-tecnica (Fogli A-B-C)
- Sezioni Geologiche
- Sezioni Geologico-tecniche
- Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica – MOPS (Fogli A-B-C)
- Carta di Microzonazione Sismica – MS (Fogli A-B-C)
- Appendice 1: Indagini di campagna 2018 e 2013
- Appendice 2: Analisi della Condizione Limite per l’Emergenza – CLE

## 11. BIBLIOGRAFIA

ALBARELLO D., CESI C., EULILLI V., GUERRINI F., LUNEDEI E., PAOLUCCI E., PILEGGI D., PUZZILLI L.M. (2011). *The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April 2009 L'Aquila (Italy) earthquake*. Boll. Geofis. Teor. Appl., 52, 3, 513-538, doi:10.4430/bgta0013.

ALBARELLO D., CASTELLARO S. (2011). *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. Ingegneria Sismica, Anno XXVII, 2 (Suppl.), 32-63.

BOCCALETTI, M., BONINI, M., MORATTI, G. & SANI, F. (1995) - *Le fasi compressive neogenico-quadernarie nell'Appennino settentrionale: relazioni con l'evoluzione dei bacini interni e con la tettonica del basamento*. Studi Geologici Camerti, Volume Speciale 1, p. 51-72.

BOCCALETTI, M., BONINI, M., MORATTI, G. & SANI, F. (1999) - *Compressive Neogene-Quaternary tectonics in the Hinterland area of the Northern Apennines*. Journal of Petroleum Geology, v. 22 (1), p. 37-60.

CALAMITA, F., COLTORTI, M., PIERUCCINI, P. & PIZZI, A. (1999a) - *Evoluzione strutturale e morfogenesi plio-quadernaria dell'appennino umbro-marchigiano tra il pedappennino umbro e la costa adriatica*. Bollettino Società Geologica Italiana, v.118, p.125-139.

CERRINA FERONI A., MARTINELLI P., PERILLI N. (1989) - *La fase tettonica del Pliocene inferiore nel settore Nord-orientale delle Colline Livornesi in Toscana*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mam. serie A, Vol. XCVI

COLTORTI, M. & PIERUCCINI, P. (1997b) - *Middle-Upper Pliocene 'Compression' and Middle Pleistocene 'Extension' in the east Tiber Basin: from 'synform' to 'extensional' basins in the Tyrrhenian side of the Northern Apennines (Central Italy)*. Il Quaternario v.10 (2), p.521-528.

COMMISSIONE TECNICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA (2017). *Microzonazione sismica. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.0*. Roma, ottobre 2015

COMUNE DI COLLESALVETTI (2004). *Cartografia Geologica e Geomorfologica del Piano Strutturale del Comune di Collesalveti*.

ELTER P., GRATZIU C. & LABESSE B. (1964). *Sul significato dell'esistenza di una unità tettonica alloctona costituita da formazioni terziarie nell'Appennino settentrionale*. Boll. Soc. Geol. It., 83(2):373-394

ELTER P. & MARRONI M. (1991). *Le Unità Liguri dell'Appennino Settentrionale: sintesi dei dati e nuove interpretazioni*. Mem. Descr. Serv. Geol. Italiano, XLVI: 121-138.

FANCELLI R., GRIFONI R., MAZZANTI R., MENCHELLI S., NENCINI C., PASQUINUCCI M. & TOZZI C. (1986) - *Il contesto geomorfologico*. In "Terre e Paduli", Pisa: 23-39.

FOTI S., PAROLAI S., ALBARELLO D., PICOZZI M. (2011). *Application of surface wave methods for seismic site characterization*. *Surv Geophys* 32(6):777–825. doi:10.1007/s10712-011-9134-2.

ISPRA (1994). Quaderno n. 4 - Carta geomorfologica d'Italia 1:50.000 - Guida al Rilevamento. Servizio Geologico di Stato, Roma.

LAMMA-REGIONE TOSCANA (2012). Continuum territoriale geologico della Toscana. <http://www.geologiatoscana.unisi.it/>

LAZZAROTTO A., MAZZANTI R., NENCINI C. (1990a). *Carta Geologica dei comuni di Livorno e di Collesalveti in scala 1:25:000*. Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno,11.

LAZZAROTTO A., MAZZANTI R., NENCINI C. (1990b). *Geologia e geomorfologia dei Comuni di Livorno e Collesalveti*. Suppl. 2 ai Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno, 11, 1-85.

LOCATI M., CAMASSI R., ROVIDA A., ERCOLANI E., BERNARDINI F., CASTELLI V., CARACCILOLO C.H., TERTULLIANI A., ROSSI A., AZZARO R., D'AMICO S., CONTE S., ROCCHETTI E. (2016). *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15

MAZZANTI R. (1985) – *Geomorfologia del territorio comunale di Rosignano M.mo*. Suppl. n°1 ai Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno (6), 207-246.

MAZZANTI R. (2001) – *Geomorfologia del bacino versiliese-pisano con particolare riferimento alla "Gronda dei Lupi", scarpata fossile che separa le colline livornesi con i loro terrazzi eustatici, dalla pianura alluvionale di Pisa*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Memorie Serie A: 165-189.

PAOLUCCI E., ALBARELLO D., D'AMICO S., LUNEDEI E., MARTELLI L., MUCCIARELLI M., PILEGGI D. (2015). *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*. *Bull. Earthquake Eng.*, 13(11): 3187-3206, DOI: 10.1007/s10518-015-9767-5.

PICCARDI L., VITTORI E., BLUMETTI A., COMERCI V., DI MANNA P., GUERRIERI L., BAGLIONE M. E D'INTINOSANTE V. (2017) - *Mapping capable faulting hazard in a moderate-seismicity, high heat-flow environment: The Tuscia province (southern Tuscany-northern Latium, Italy)*. *Quaternary International* (451), 11-36.

ICMS - PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI (2009). Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Dipartimento per la Protezione Civile, Roma.

ICMS - PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI (2012). Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica ICMS. Dipartimento per la Protezione Civile, Roma