





Comune di Costa Volpino (BG)

Riqualificazione, valorizzazione e sviluppo delle aree lacuali della sponda nord del Lago d'Iseo nel territorio comunale di Costa Volpino. Interventi di consolidamento spondale e miglioramento accessibilità a lago

PROGETTO ESECUTIVO

Data revisione:		Indice revisione:		Natura della modifica:	
Ottobre 2024		00		Prima emissione	
Titolo elaborato:					
Relazione geologica - geotecnica					
Ns. Rif.	Data	Scala	Dim. foglio	Elaborato n°	
24BP13	Ottobre 2024	-	A4	002.E.GG.RS_00	
DIRETTORE TECNICO: Dott. Ing. Massimo Sartorelli				Timbro e firma: 	
PROGETTAZIONE: Dott. Ing. Massimo Sartorelli					
 Via Repubblica n.1 21020 - Varano Borghi (VA) tel.: +39 0332.961097 fax: +39 0332.961162 info@bluprogetti.eu bluprogetti@pec.it					
Redazione Dott.ssa geologa Miriam Toaldo Dott.ssa geologa Elena Nostrani		Verifica Dott. Ing. Massimo Sartorelli		Approvazione Dott. Ing. Massimo Sartorelli	

Sommario

1	Premessa	1
2	Inquadramento territoriale e descrizione degli interventi	2
3	Inquadramento geologico e idrogeologico	13
4	Aspetti relativi alla sismicità.....	14
4.1	Breve cenno al quadro normativo.....	14
4.2	Sorgenti sismogenetiche e sismicità storica.....	15
4.3	Pericolosità sismica.....	16
5	Campagna di indagine geologica.....	20
5.1	Prove penetrometriche dinamiche	20
5.2	Indagine sismica	23
6	Modello geologico e di parametrizzazione geotecnica.....	26
7	Modellazione sismostratigrafica	30
8	Categoria di sottosuolo, categoria topografica e stima dell'effetto sismico per l'opera in progetto.....	34
8.1	Verifica alla liquefazione.....	36
9	Vincoli e fattibilità geologica	37
10	Verifiche geotecniche	39
11	Conclusioni e indicazioni progettuali.....	43

Riqualificazione, valorizzazione e sviluppo delle aree lacuali della sponda nord del Lago d'Iseo nel territorio comunale di Costa Volpino. Interventi di consolidamento spondale e miglioramento accessibilità a lago

Progetto Esecutivo

Relazione geologica-geotecnica

1 Premessa

La presente relazione geologica è relativa alla realizzazione degli interventi di sistemazione della sponda del lago d'Iseo nei pressi del centro nautico e dell'area a nord-ovest in comune di Costa Volpino (BG).

Lo studio ha lo scopo di definire i caratteri geologici, geomorfologici ed idrogeologici dell'area interessata dall'intervento, secondo quanto contenuto nella normativa vigente, con particolare riferimento a:

- O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica";
- O.P.C.M. 28.04.2006 N°3519 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone";
- NTC 2018 – "Norme Tecniche delle Costruzioni";
- Circolare n. 617 del 2.02.2009, Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009 – Suppl. Ordinario n. 27: "Istruzioni per l'applicazione delle NTC di cui al D.M. 14 gennaio 2008";
- D.G.R. 2616/ 2011 – Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio";
- D.G.R. 11 luglio 2014 n.2129 "Aggiornamento delle zone sismiche di Regione Lombardia";
- Componente Geologica del P.G.T. del Comune di Costa Volpino;
- Associazione geotecnica italiana "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche" giugno 1977 e "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica", 2005.

Le N.T.C. (§ 6.2.1) prevedono di caratterizzare la geologia del sito, attraverso la ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici e geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio descritti e sintetizzati nel modello geologico di riferimento.

L'importanza del modello geologico è quello di costituire elemento di riferimento per il progettista per inquadrare i problemi geotecnici e per definire il programma delle indagini geotecniche.

In riferimento alla normativa sopra richiamata, il presente documento è volto all'individuazione del modello geologico di sito e all'individuazione della pericolosità sismica di base.

Inoltre, sono stati presi in considerazione anche gli aspetti geotecnici secondo quanto riportato nelle NTC2018.

2 Inquadramento territoriale e descrizione degli interventi

Le aree di intervento sono situate nel Comune di Costa Volpino (BG), in sponda idrografica destra del fiume Oglio, sulle sponde del lago d'Iseo. Esse sono individuabili nella Carta Tecnica Regionale (CTR) al foglio D4 alla scala 1: 50.000 e alla sezione D4a4 alla scala 1: 10.000.



Figura 2.1 – Inquadramento su ortofoto delle aree di intervento.

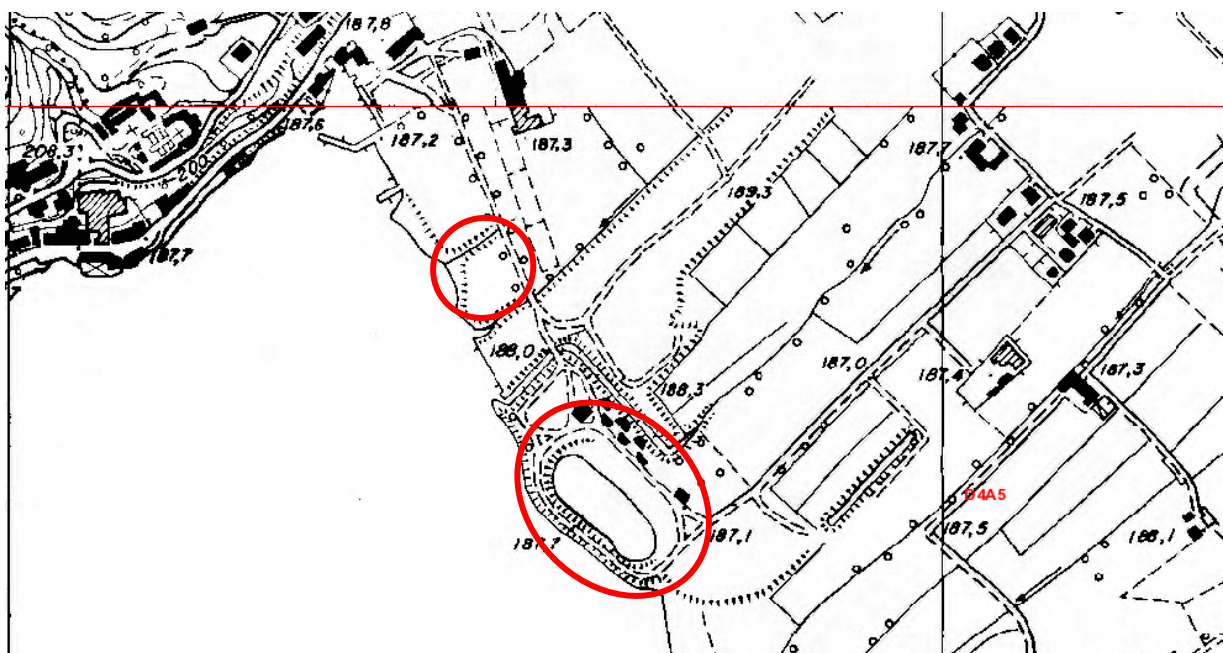


Figura 2.2 – Inquadramento su CTR delle aree di intervento.

Gli interventi previsti, suddivisi per tipologia, sono di seguito sintetizzati e riportati nel layout sottostante:

A. PASSEGGIATA LUNGOLAGO

1. riqualificazione paesaggistica della scogliera

B. SPIAGGETTE

1. spiaggette interne
2. spiaggette a lago

C. INSERIMENTO VEGETAZIONE RIPARIALE

1. fronte lago

D. DISCESA A LAGO

1. gradonata, rampa e spiaggia fronte lago

E. RIQUALIFICAZIONE VEGETAZIONE PALUSTRE ESISTENTE

1. sponde interne



Figura 2.3 – Layout degli interventi in progetto

Per semplificare l'esposizione del progetto si è suddivisa l'area di intervento in due zone: quella a nord e quella a sud; di seguito si presenta la planimetria di progetto e le relative sezioni esplicative.

Per maggiori dettagli rispetto il progetto esecutivo si rimanda ai seguenti elaborati:

- 007.E.IN.PL_00 - Planimetria generale degli interventi,
- 008.E.IN.PS_00 - Planimetria e sezioni area nord,
- 009.E.IN.PS_00 - Planimetria e sezioni area sud,
- 010.E.IN.SZ_00 - Tipologici degli interventi,
- 001.E.GE.EG_00 – Relazione tecnica generale.



Figura 2.4 – Planimetria generale di progetto

Area nord

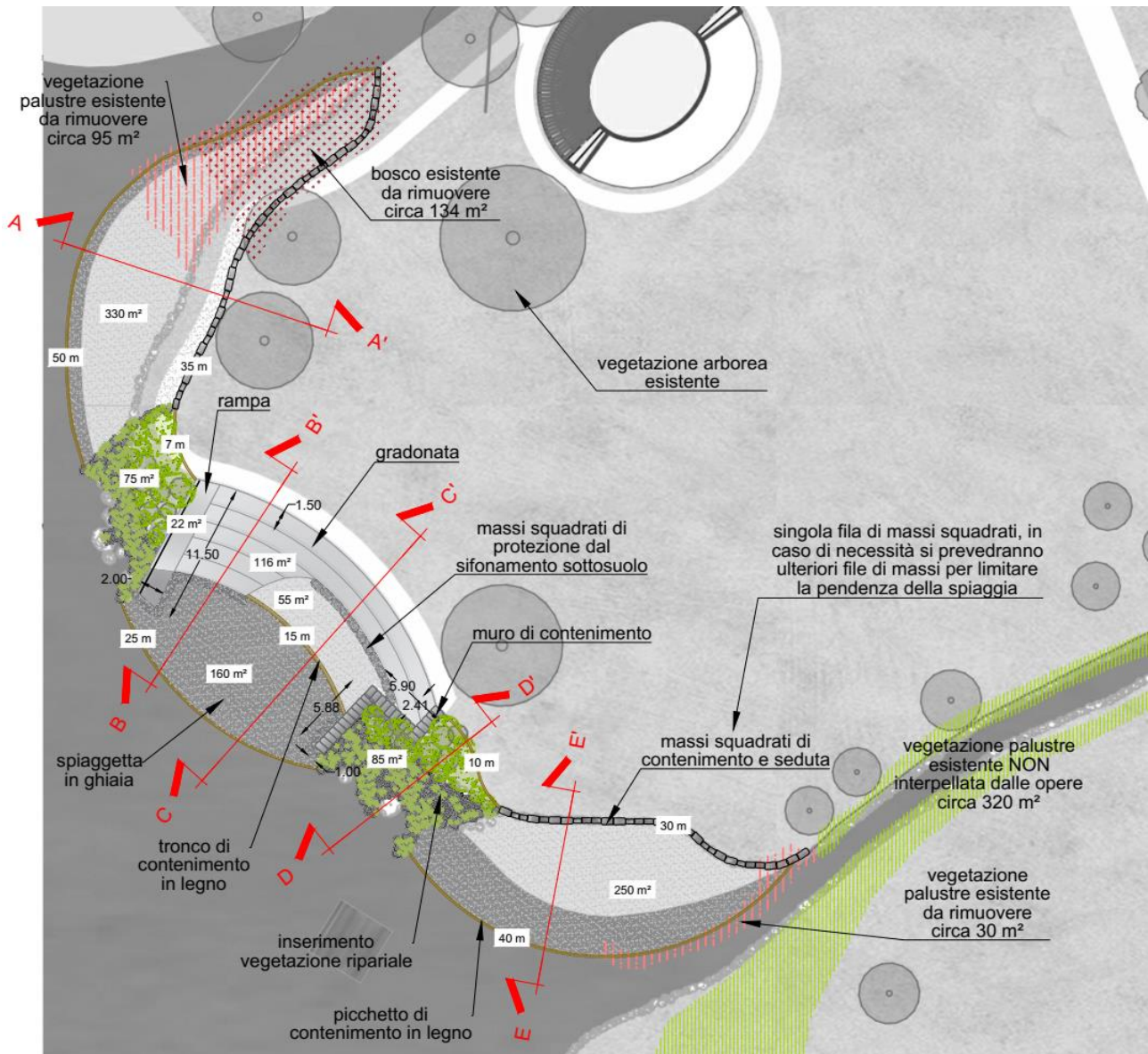


Figura 2.5 – Zoom planimetria di progetto area nord con indicazione sezioni

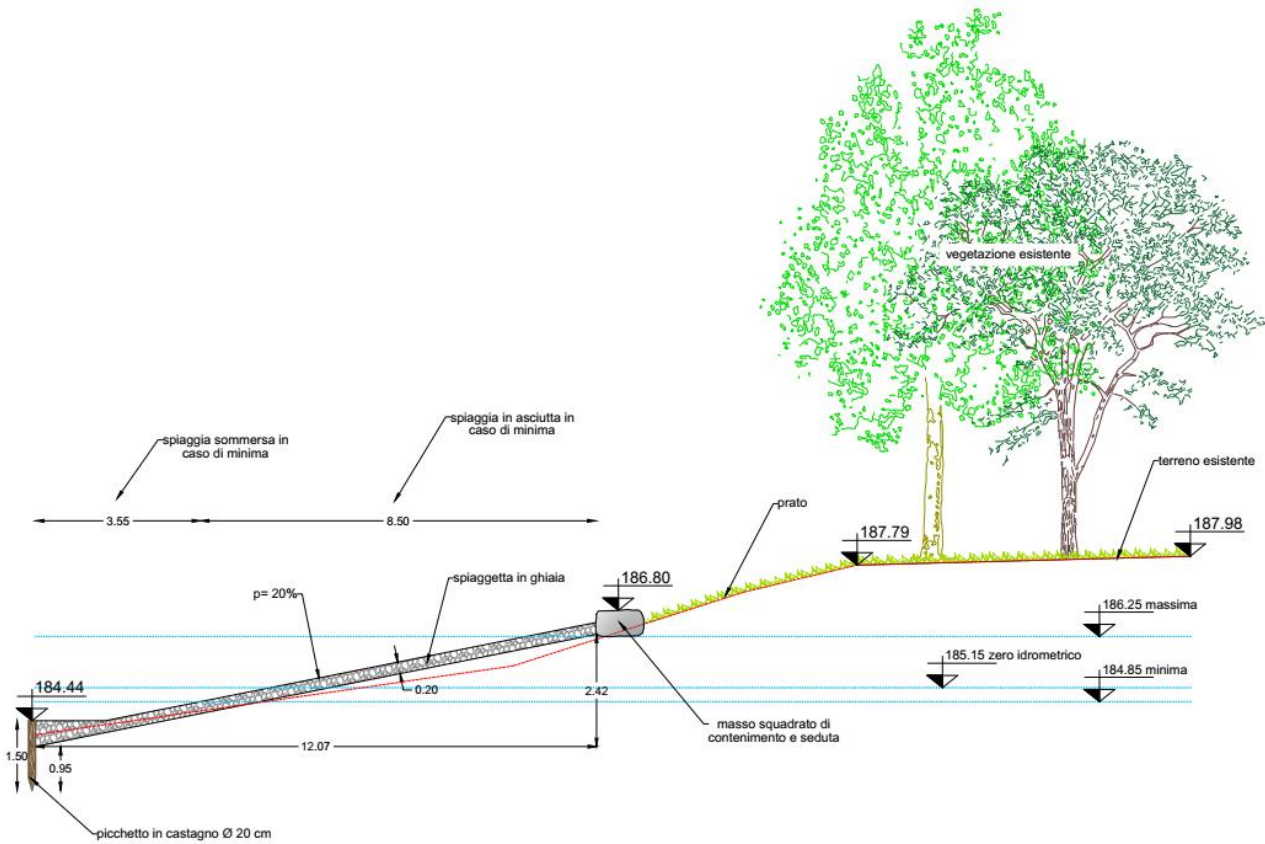


Figura 2.6 – Sezione A-A'

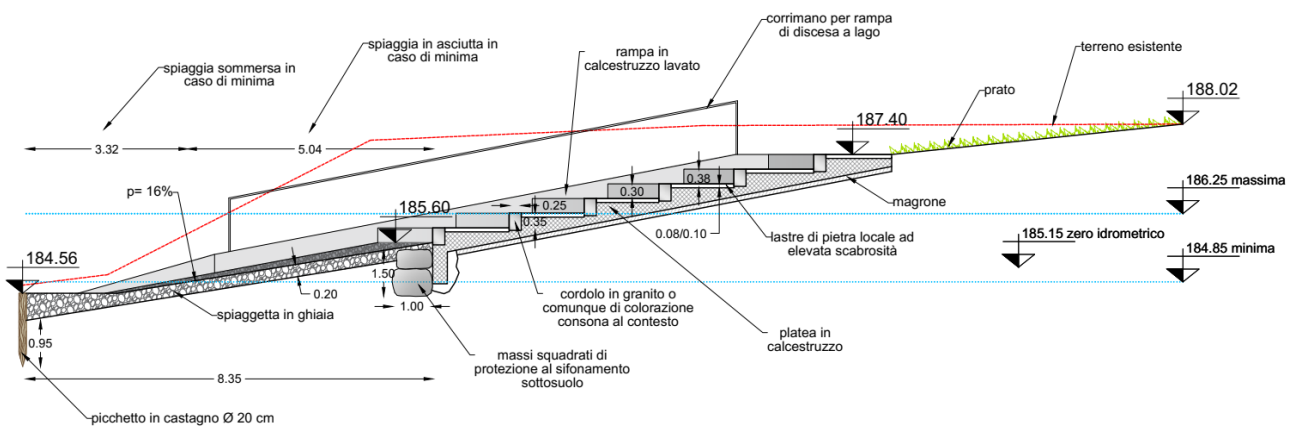


Figura 2.7 – Sezione B-B'

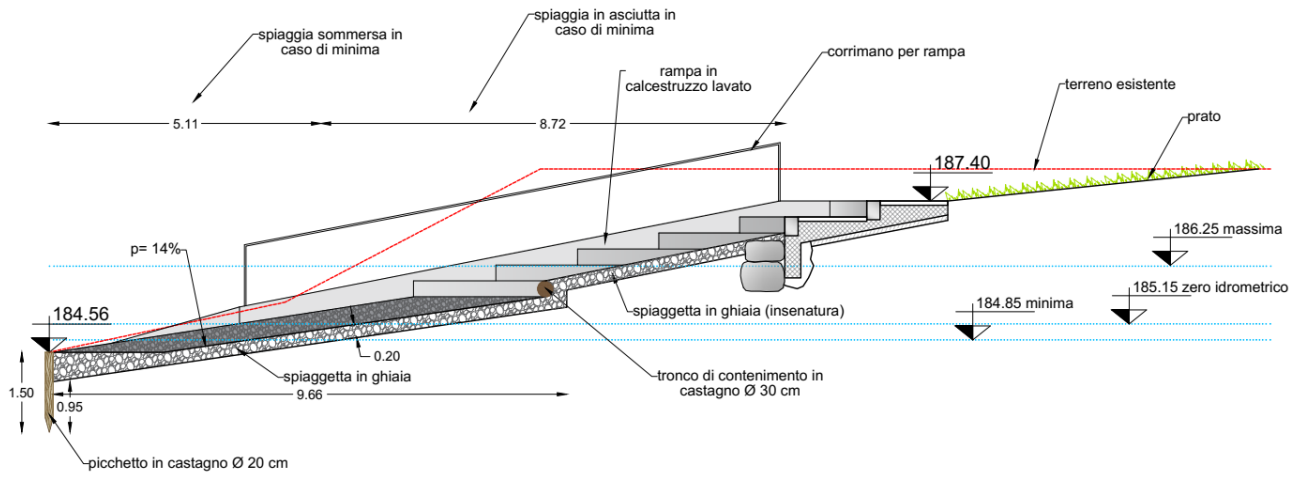


Figura 2.8 – Sezione C-C'

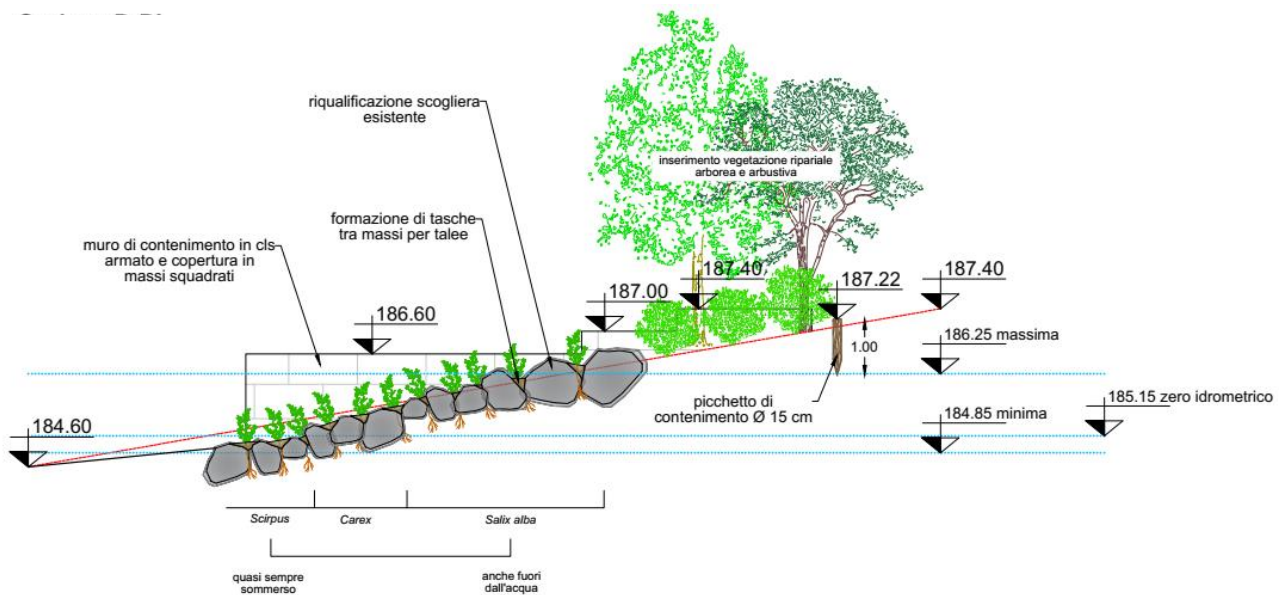


Figura 2.9 – Sezione D-D'

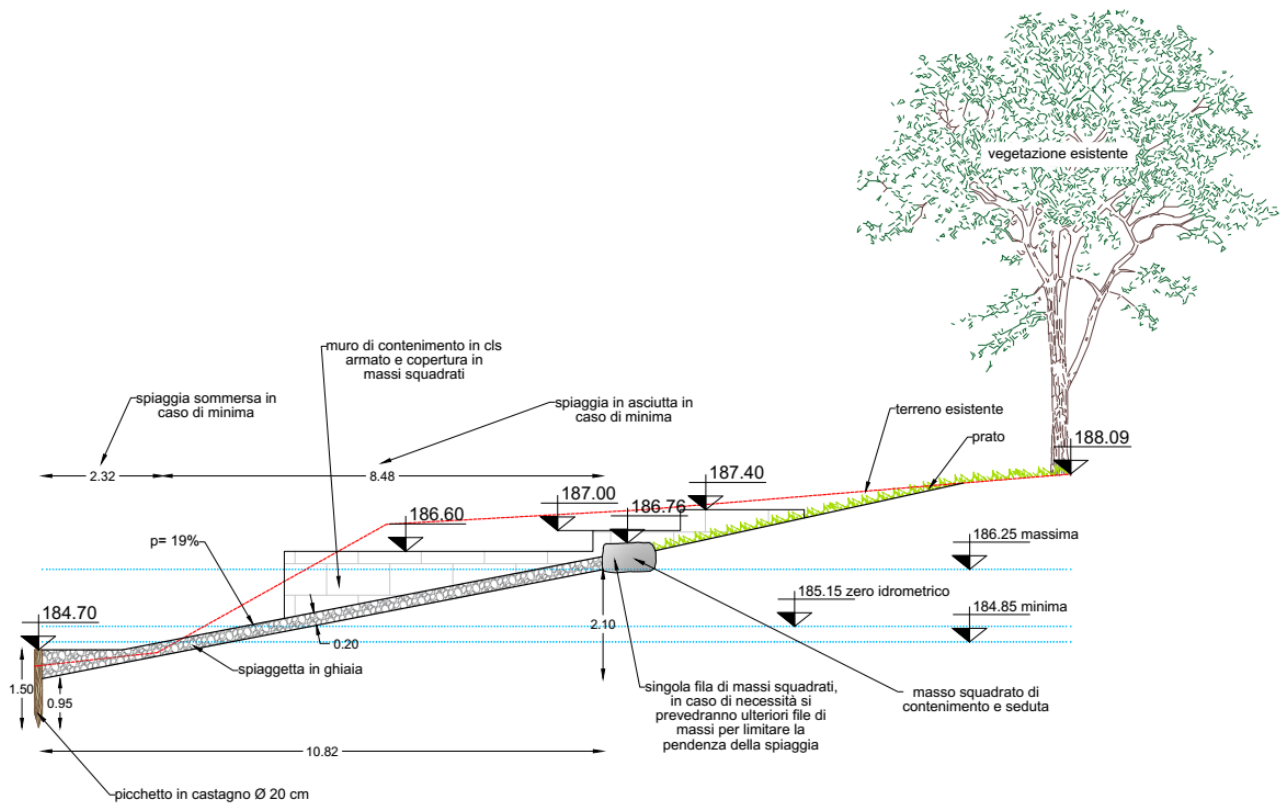


Figura 2.10 – Sezione E-E'

Area sud



Figura 2.11 – Zoom planimetria di progetto area sud con indicazione sezioni

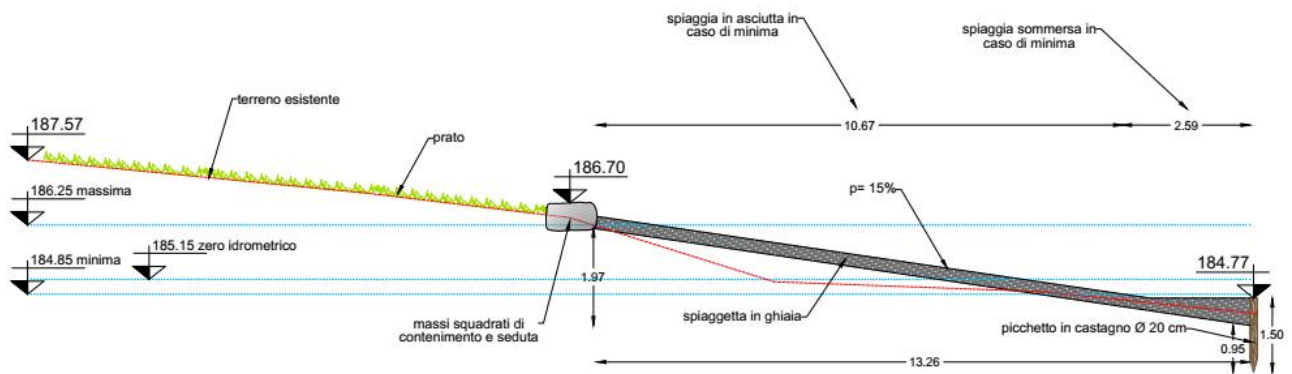


Figura 2.12 – Sezione F-F'

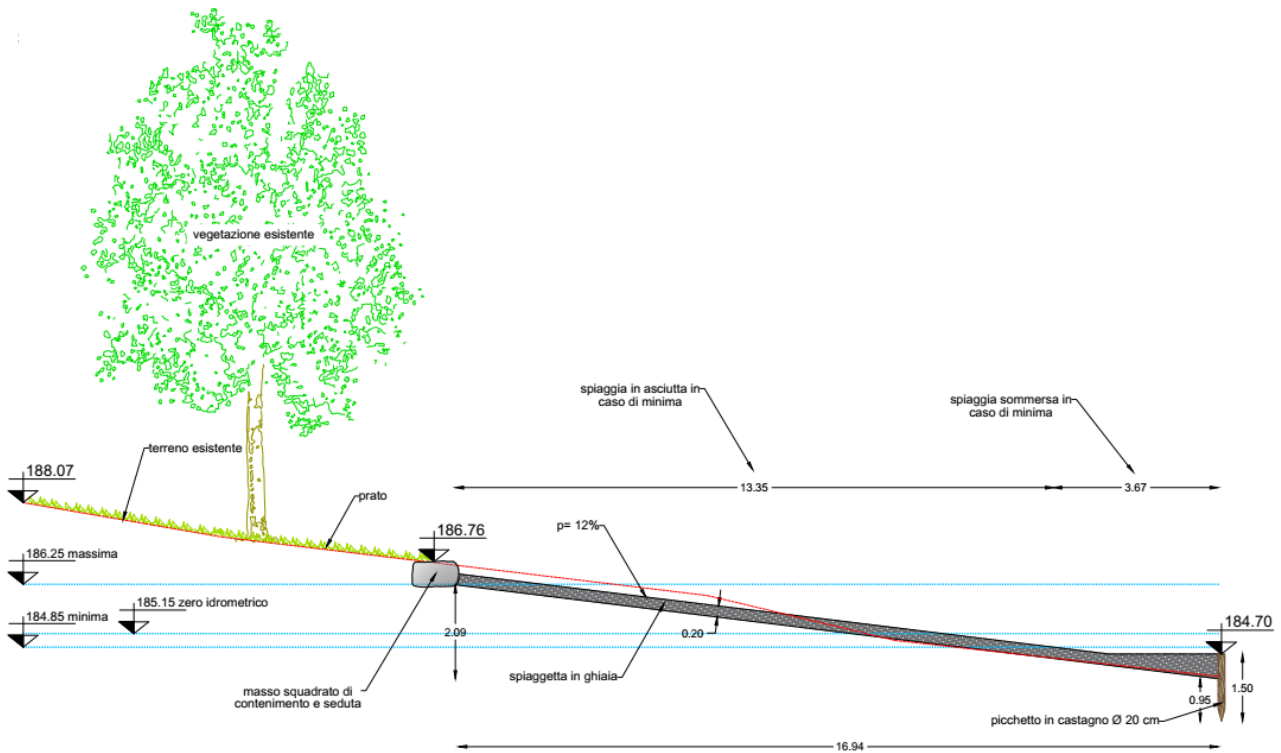


Figura 2.13 – Sezione G-G'

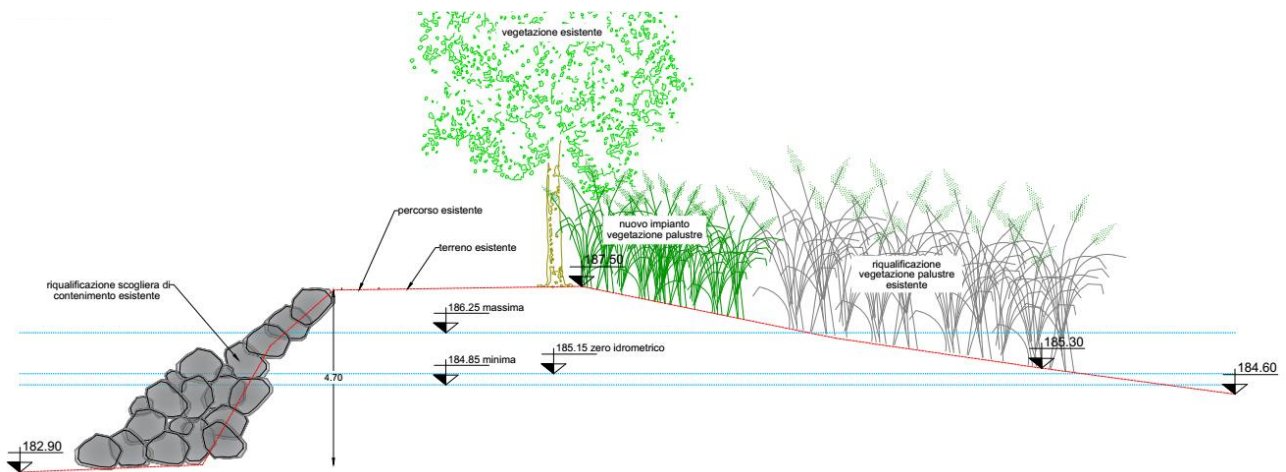


Figura 2.14 – Sezione H-H'

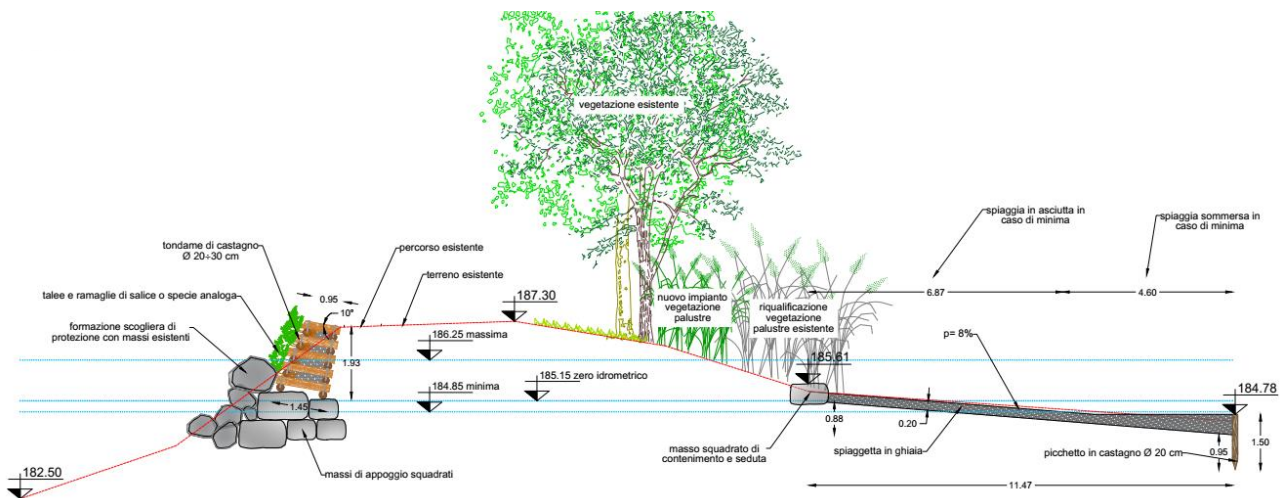


Figura 2.15 – Sezione I-I'

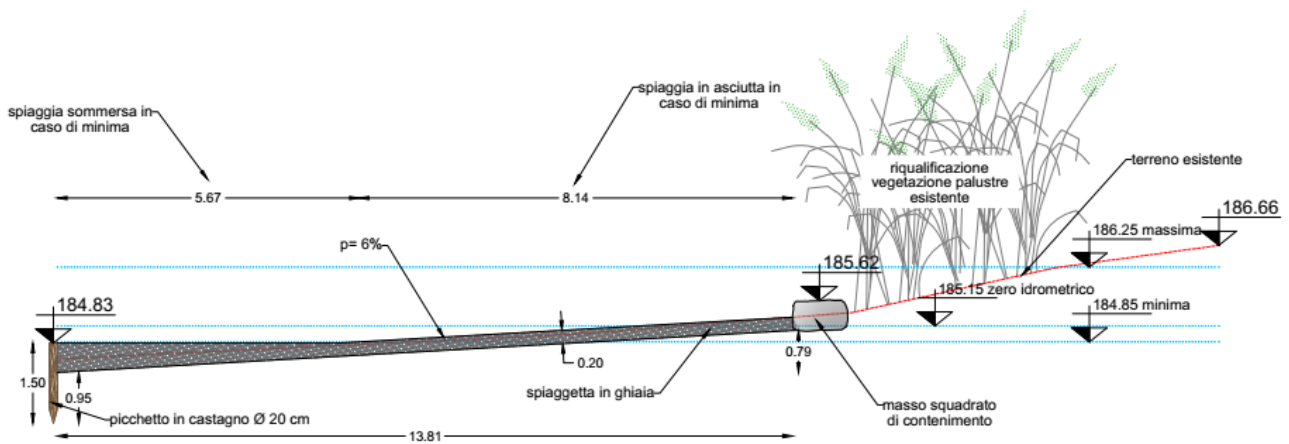


Figura 2.16 – Sezione J-J'

3 Inquadramento geologico e idrogeologico

L'area oggetto di studio è caratterizzata dalla presenza di depositi alluvionali di fondovalle (119c), trasportati in loco dal fiume Oglio durante le fasi di piena, quando, privo di opere di regimazione, poteva liberamente divagare sul fondovalle.

Tali depositi sono costituiti da ghiaie a ciottoli e blocchi di matrice sabbiosa, sabbie anche con ciottoli, ghiaie ben selezionate. Le ghiaie sono in prevalenza a supporto clastico e ciottoli ben arrotondati; ovviamente nei corsi d'acqua minori e nelle aree di alimentazione la maturità tessiturale del sedimento è minore.

In questi depositi, organizzati in corpi sia lenticolari che stratoidi, si osservano strutture sedimentarie dovute all'azione della corrente, quali ciottoli embricati, laminazioni oblique a basso angolo, laminazione incrociata.

I clasti rispecchiano i litotipi affioranti nel bacino a monte.

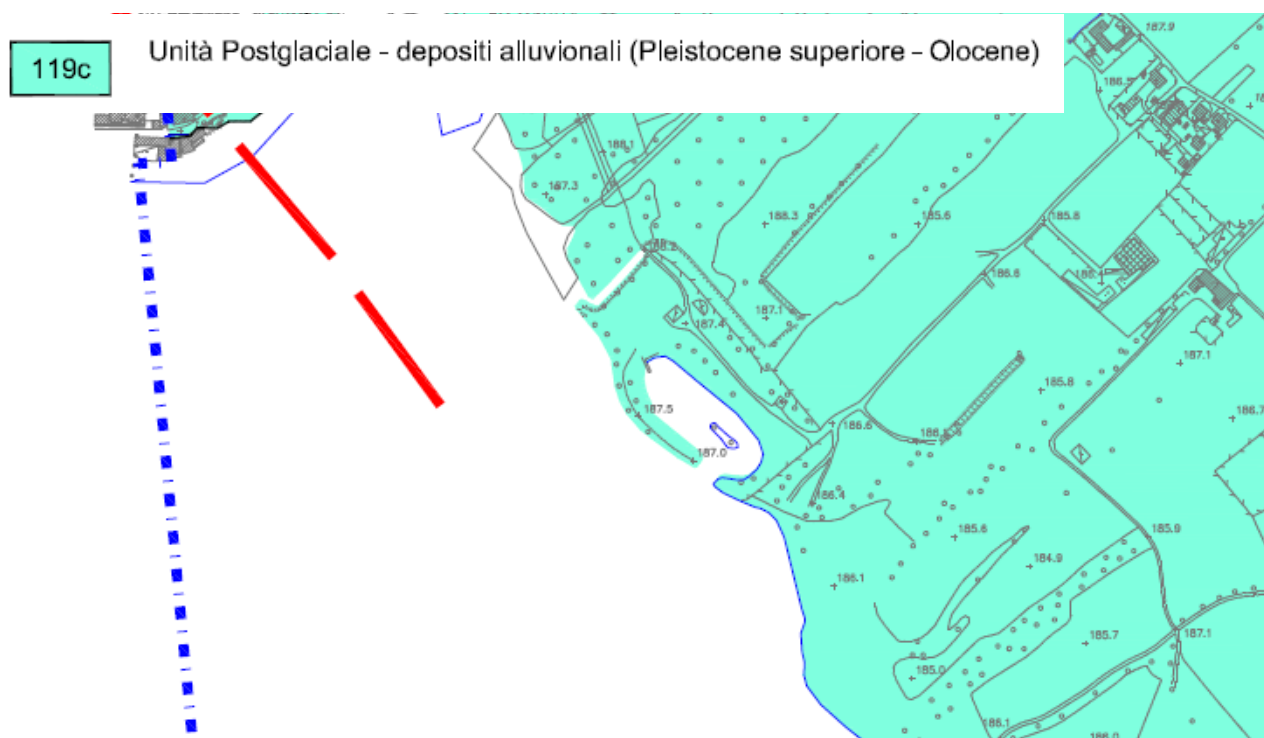


Figura 3.1 – Stralcio della carta geologica da PGT Comunale

Dal punto di vista geomorfologico, ci si trova nell'ambito della piana alluvionale del Fiume Oglio, caratterizzata da un'intensa urbanizzazione. Sono presenti numerose attività estrattive di ghiaia, essendo costituito dai depositi del Fiume Oglio; molte zone sono inoltre caratterizzate da bassa soggiacenza della falda per via della presenza della falda di subalveo del fiume.

Circa le condizioni idrogeologiche, ai depositi alluvionali viene attribuita una permeabilità da elevata a buona ($k > 10^{-2}$ cm/sec).

4 Aspetti relativi alla sismicità

4.1 Breve cenno al quadro normativo

Il Comune di Costa Volpino prima del 2003 non era considerato Comune sismico e non rientrava in alcuna classificazione. L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20/03/2003 introdusse le nuove classificazioni sismiche per tutto il territorio nazionale lasciando alle Regioni la facoltà di poter modificare i parametri del proprio territorio. Tutto il territorio Nazionale è stato suddiviso in 4 zone sismiche, con grado di rischio decrescente dalla 1 alla 4; la suddivisione in classi deriva dalla valutazione della pericolosità sismica su tutto il territorio nazionale, valutata come accelerazione orizzontale massima al suolo, dovuta al sisma, con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Con l'entrata in vigore di cui sopra tutto il territorio nazionale venne classificato sismico, con differenti livelli, ed anche il Comune di Costa Volpino, entrò in questa classificazione in zona sismica 3, quella con rischio medio - basso. Successivamente, la Regione Lombardia ha approvato, con D.g.r. 11 luglio 2014 – n. X/2129, una nuova classificazione sismica del territorio Regionale e, gran parte dei comuni lombardi hanno variato la loro zona sismica. La classificazione è entrata definitivamente in vigore nell'aprile 2016 e il Comune di Costa Volpino ha mantenuto inalterata la sua classificazione.

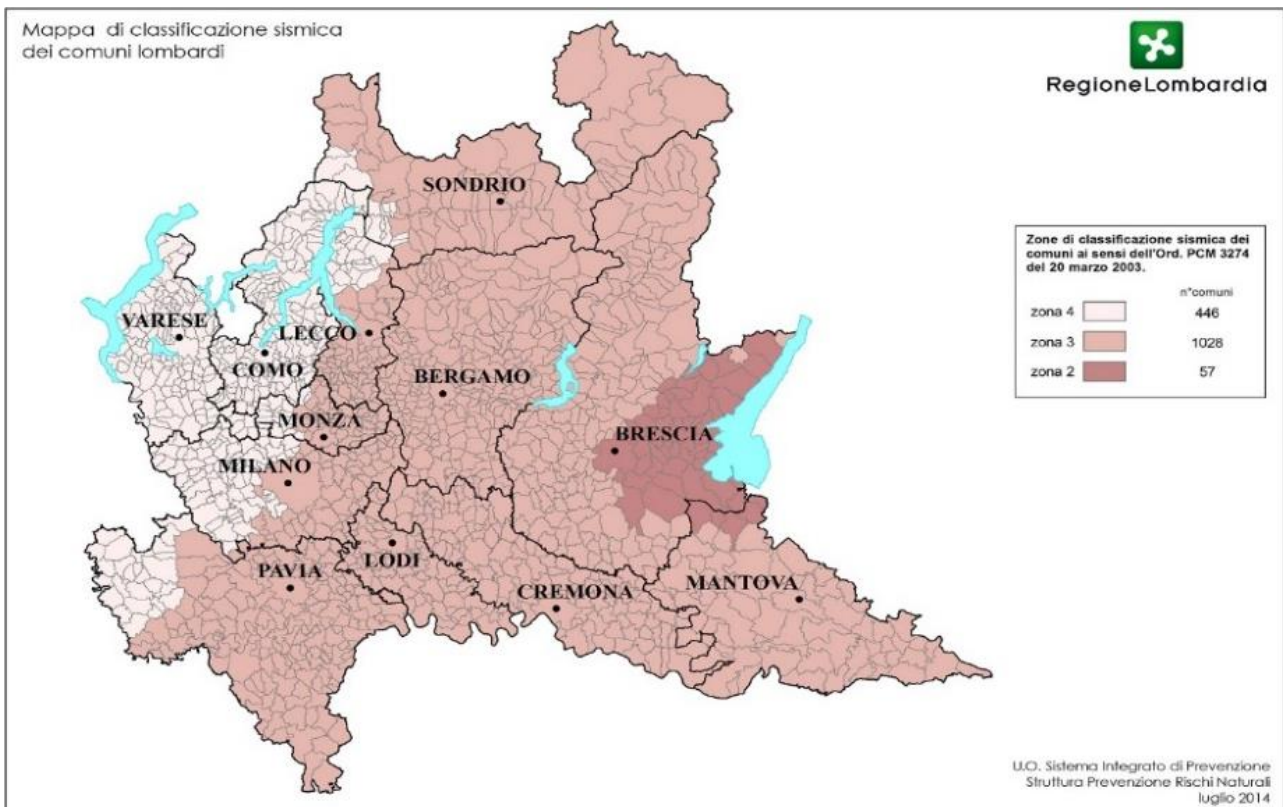


Figura 4.1 - Mappa della classificazione sismica della Lombardia attualmente in vigore.

4.2 Sorgenti sismogenetiche e sismicità storica

Prendendo in considerazione la zonazione sismo - genetica del territorio italiano ZS9, prodotta nel 2004 dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) utilizzata per la valutazione della pericolosità sismica, si riscontra che l'area di intervento risulta interna alla zona sismogenetica 907 "Bergamasco".

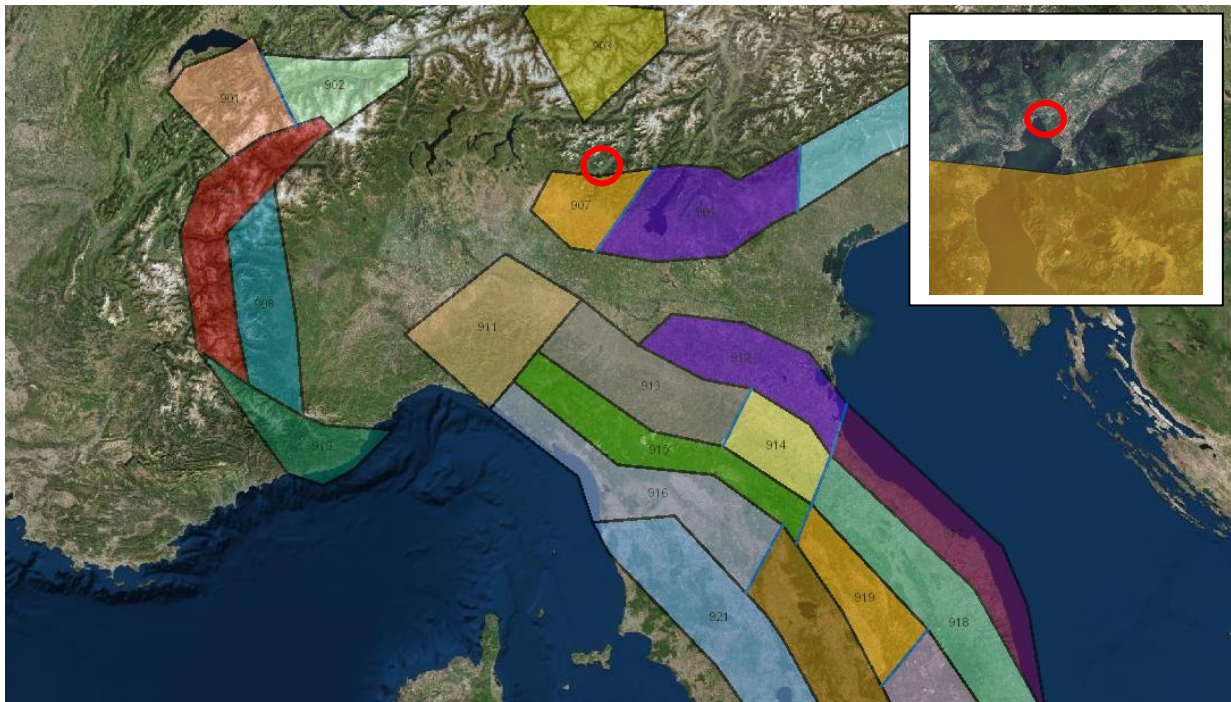


Figura 4.2 - Zonazione sismogenetica ZS9

È stata eseguita un'interrogazione al Database Macrosismico Italiano chiamato DBMI15 (Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. 2016). Questo Database indica una serie di intensità macrosismiche, prendendo in considerazione solo terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014.

La ricerca effettuata per il Comune di Costa Volpino evidenzia la presenza di possibili effetti in 5 terremoti, con un'intensità epicentrale I_0 compresa tra 5 e 7, e una magnitudo momento M_w compresa tra 4,11 e 4,85.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	I_0	M_w
3-4	1989	09	13	21	54	0	Prealpi Vicentine	779	6-7	4.85
NF	1991	11	20	01	54	1	Grigionia, Vaz	468	6	4.70
4-5	1993	12	09	18	16	5	Lago d'Iseo	175	5	4.11
4	2001	07	17	15	06	1	Val Venosta	657	5-6	4.78
5	2002	11	13	10	48	0	Franciacorta	768	5	4.21

Figura 4.3 - Risultati dell'interrogazione al database macrosismico italiano DBMI15 per il Comune di Costa Volpino.

4.3 Pericolosità sismica

Con riferimento alle NTC2018 “Norme tecniche per le costruzioni” la sismicità di base dell’area in esame è definibile in funzione del valore assunto dall’accelerazione massima attesa su suolo rigido per eventi con tempo di ritorno di 475 anni e probabilità di superamento del 10% in 50 anni, in corrispondenza dei nodi del reticolo di riferimento nazionale (Mappa interattiva di pericolosità sismica dell’INGV).

Di seguito si riportano degli stralci della suddetta mappa interattiva centrata sul Comune di Costa Volpino con il relativo grafico di disaggregazione e il valore di accelerazione confrontato anche con quello comunale riproposto dall’ all’Allegato A della D.G.R. di Regione Lombardia n. X – 2129/2014.

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

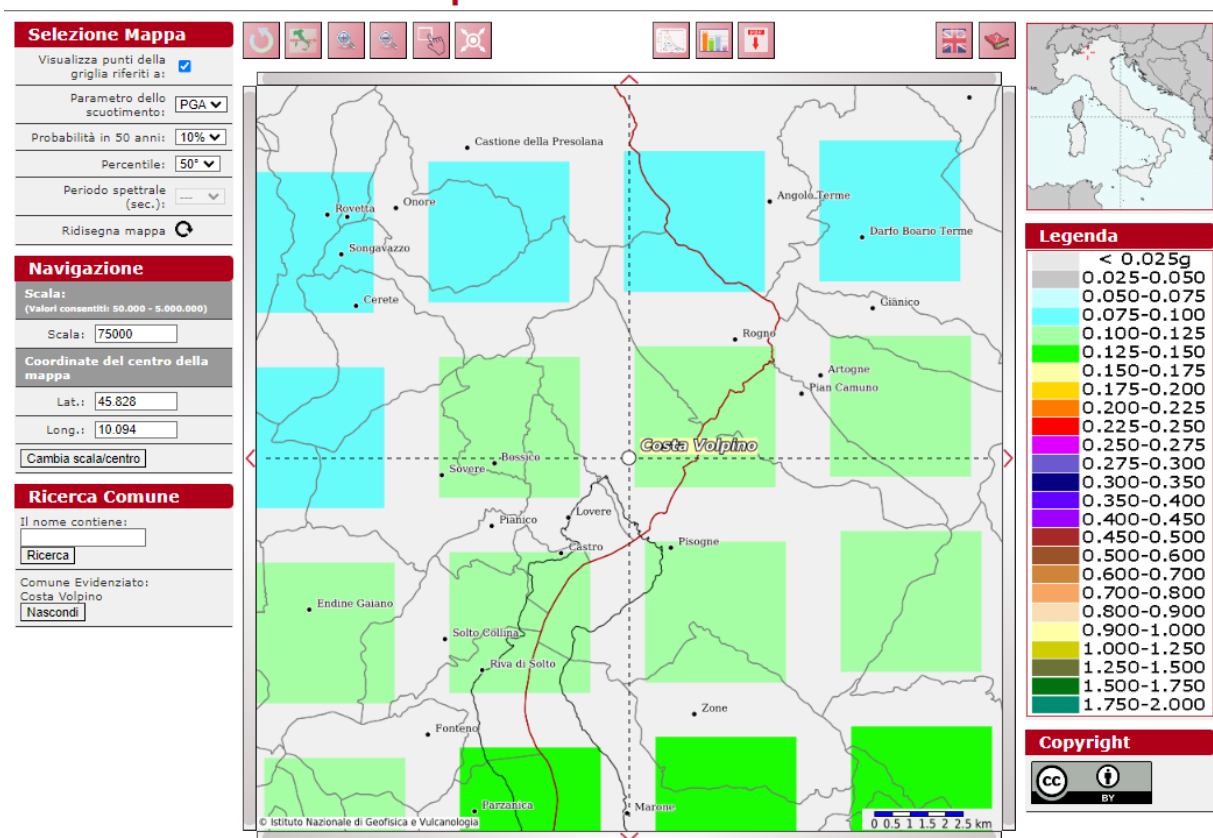


Figura 4.4 - Stralcio Mappa interattiva di pericolosità sismica dell’INGV centrata sul Comune di Costa Volpino.

Come si nota, il valore massimo dell’accelerazione di picco su suolo rigido, a cui corrisponde una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, è compreso tra 0,100 g e 0,125 g. Tale valore massimo (Agmax) in riferimento all’Allegato A della D.G.R. di Regione Lombardia n.X – 2129/2014 è il seguente:

ISTAT	Provincia	Comune	Zona Sismica	AgMax
03016086	BG	COSTA VOLPINO	3	0,111133

Secondo la mappa interattiva di pericolosità sismica dell’INGV, nel territorio del Comune di Costa Volpino sono attesi eventi sismici di Magnitudo (M) media pari a 4,85 per una distanza dal nodo (Coordinate del punto lat: 45.836, lon: 10.050) pari a 18,7 Km.

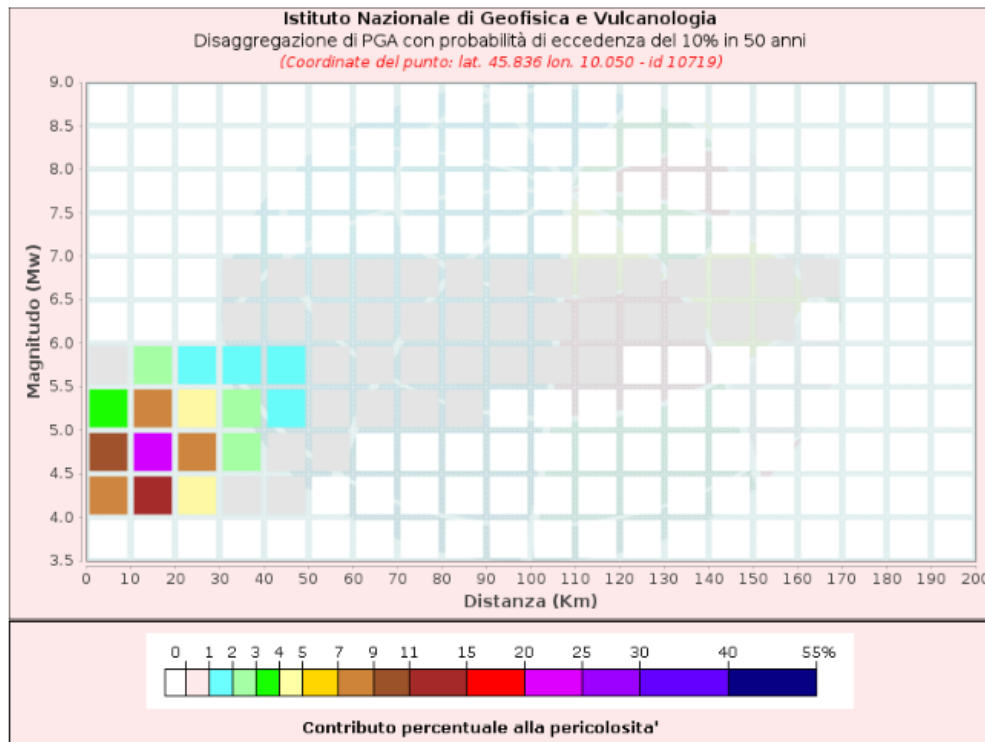


Figura 4.5 - Disaggregazione della pericolosità sismica

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
4.85	18.7	1.07

Per definire l'azione sismica di progetto, occorre determinare l'effetto della risposta sismica locale (RSL) mediante specifiche analisi che, in sintesi, si basano sulla definizione di amplificazione locale del fenomeno, i cosiddetti "effetti di sito". In assenza di analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento e sulle condizioni topografiche.

La normativa vigente identifica 5 categorie di sottosuolo, e la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s, eq}$ (m/s) definita dall'espressione:

$$V_{s, eq} = H / (\sum h_i / V_{si})$$

Dove:

- H= profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s;
- h_i = spessore (m) dello strato i-esimo cui corrisponde una velocità V_{si} .

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti</i> caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,eq}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,eq}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,eq}$ compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Figura 4.6 - Tabella delle categorie di sottosuolo (NTC2018)

Inoltre vengono distinte 4 condizioni topografiche per tenere conto della morfologia del sito.

CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media minore uguale 15°.
T2	Pendii con inclinazione media maggiore di 15°.
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media compresa tra 15° e 30°.
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media maggiore di 30°.

Figura 4.7 - Tabella delle condizioni topografiche (NTC2018)

Nell'ambito del PGT Comunale è stata redatta la Carta della PSL (Pericolosità Sismica Locale) di 2° livello, in cui vengono definite, sulla base della normativa regionale (Allegato 5 – Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio) le aree di amplificazione sismica.

Dalla presa visione della cartografia, si nota che l'area di intervento è inserita nello scenario di amplificazione sismica Z4a: "Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi".



Figura 4.8 - Stralcio della Carta PSL da PGT Comunale.

5 Campagna di indagine geologica

La campagna di indagine, eseguita il giorno 01 ottobre 2024, ha previsto le seguenti attività:

- Esecuzione di n. 2 prove penetrometriche dinamiche superpesanti;
- Analisi dell'andamento medio delle onde di taglio S in profondità e valutazione del parametro $V_{s,eq}$, mediante prospezione sismica MASW.



Figura 5.1 - Ubicazione indagine penetrometrica e sismica

5.1 Prove penetrometriche dinamiche

La prova penetrometrica dinamica SCPT (Standard Cone Penetration Test) è una prova puntuale che consiste nell'infingere verticalmente nel terreno una punta conica metallica, posta all'estremità di un'asta di acciaio prolungabile ad una batteria di aste, e misurare il numero di colpi N_{SCPT} necessari per la penetrazione di 30 cm della punta, nel corso della prova. La diffusione di questo tipo di prova e la sua standardizzazione consentono, attraverso l'utilizzo di alcune correlazioni di bibliografia, di ottenere una soddisfacente caratterizzazione dei terreni indagati ed un'interpretazione dei fondamentali parametri geotecnici.

Sono state eseguite **n° 2 prove penetrometriche dinamiche** con penetrometro PAGANI TG63-200, attrezzatura conforme a quanto previsto dalla configurazione ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering).

Classificazione ISSMFE (1988) dei penetrometri dinamici		
TIPO	Sigla riferimento	Peso Massa Battente M (kg)
Leggero	DPL (Light)	$M \leq 10$
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$
Pesante	DPH (Heavy)	$40 \leq M < 60$
Super pesante	DPSH (Super Heavy)	$M \geq 60$

Figura 5.2 - Classificazione dei penetrometri dinamici (ISSMFE).

Di seguito vengono indicate le caratteristiche del penetrometro utilizzato:

Massa del Maglio: 63,5 kg

Altezza di caduta: 0,20 m

Avanzamento aste: 20 cm

Massa delle aste: 6,2 kg

Lunghezza delle aste: 1,0 m

Area base punta conica: 20 cm²

Angolo apertura punta conica: 90°



Figura 5.3 - Prova penetrometrica P1



Figura 5.4 - Prova penetrometrica P2

Con questo penetrometro le prove dinamiche continue consistono nel rilevare il numero di colpi necessari per ottenere un avanzamento della punta di 20 cm all'interno del terreno con una massa battente di 63,5 kg da un'altezza di 0,75 m.

L'analisi dei grafici delle prove penetrometriche consente di valutare il quadro stratigrafico e di fornire i parametri geotecnici dei livelli di terreno intercettati.

Le due prove penetrometriche hanno raggiunto la profondità di 10m dal locale piano campagna, rilevando acqua in foro a 2,4m dal piano campagna.

I dati raccolti dalle prove sono stati elaborati e correlati fra loro, allo scopo di ricostruire il quadro stratigrafico dei terreni di fondazione in esame. Le indagini penetrometriche permettono infatti di individuare i vari orizzonti che costituiscono il sottosuolo e i relativi parametri geotecnici, tramite correlazioni con la prova di riferimento SPT comunemente adottata.

Per l'interpretazione delle prove sono stati innanzitutto identificati degli orizzonti contraddistinti da valori simili della resistenza alla punta: a questi orizzonti sono stati assegnati i valori corrispondenti alla media dei valori inferiori registrati nella prova, operando in questo modo a favore della sicurezza.

Le elaborazioni sono state effettuate mediante un programma di calcolo automatico Geostru Dynamic Probing, aggiornato all'ultima versione.

Il programma calcola il rapporto delle energie trasmesse (coefficiente di correlazione con SPT) tramite le elaborazioni proposte da Pasqualini 1983 - Meyerhof 1956 - Desai 1968 - Borowczyk-Frankowsky 1981 e, per la stima dei parametri geotecnici, utilizza le correlazioni degli autori più noti nel campo.

5.2 Indagine sismica

Lo stendimento MASW è finalizzato alla misura diretta della velocità equivalente delle onde di taglio per la determinazione della categoria di appartenenza dei terreni del sottosuolo.

L'indagine MASW si è svolta in tre fasi: acquisizione delle onde superficiali (ground roll), costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

Le onde di superficie sono state generate con una mazza battente (sorgente sismica) da un punto di energizzazione e sono state registrate con 12 geofoni lungo uno stendimento di 50 m.

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali. La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (Vs), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: l'acquisizione delle onde superficiali e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

Per ottenere un profilo Vs è necessario produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse è stata utilizzata nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi. L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati. Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale Vs dalla curva di dispersione e vengono solitamente stimati utilizzando misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali. Quando si generano le onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh, vengono generate anche una molteplicità di tipi diversi di onde. Fra queste le onde di corpo, le onde superficiali non piane, le onde riverberate (Back Scattered) dalle disomogeneità superficiali, il rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane. Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale. Quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità, mentre le onde di corpo dirette viaggiano, come è implicito nel nome, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni). Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali. Queste onde, in prossimità della sorgente, seguono un complicato comportamento non lineare

e non possono essere trattate come onde piane. Le onde superficiali riverberate (Back Scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno. La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza indipendentemente dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione. La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale. Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza. La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili (x ; y), il cui legame costituisce la curva di dispersione. È anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma. In questo caso l'indagine MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti S/N (Signal/Noise). Un buon rapporto S/N assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo V_s di inversione. Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una mazza battente o un cannone sismico.

La strumentazione utilizzata per l'esecuzione delle indagini si compone di un sismografo a 12 canali ad elevata sensibilità, 12 geofoni a 4,5 Hz e mazza battente. Il principale vantaggio di un metodo di registrazione multicanale è la capacità di riconoscimento dei diversi comportamenti, che consente di identificare ed estrarre il segnale utile dall'insieme di varie e differenti tipe di onde sismiche. Quando un impatto è applicato sulla superficie del terreno, tutte queste onde vengono simultaneamente generate con differenti proprietà di attenuazione, velocità e contenuti spettrali. Queste proprietà sono individualmente identificabili in una registrazione multicanale e lo stadio successivo del processo fornisce grande versatilità nell'estrazione delle informazioni utili.



Figura 5.5 - Stendimento sismico MASW

6 Modello geologico e di parametrizzazione geotecnica

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni le Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018 (NTC2018) forniscono specifiche indicazioni rispetto sia alla fase di indagine sia alla valutazione dei parametri geotecnici da adottare in fase di progettazione.

Per quanto riguarda la “fase di indagine” si sottolinea in particolare l’importanza di definire un adeguato piano di indagini, programmato in funzione del tipo di opera e/o intervento e che deve permettere la definizione del modello geotecnico di sottosuolo necessario per la progettazione. A partire dai risultati dell’indagine, si deve poi procedere alla ricostruzione di un modello geotecnico di sottosuolo rappresentativo del volume significativo di terreno; tale modello potrà essere suddiviso in unità omogenee sotto il profilo fisico-meccanico, caratterizzate in funzione dello specifico problema geotecnico che si va ad affrontare.

Nel modello geotecnico di sottosuolo devono essere anche definiti il regime delle pressioni interstiziali e i valori caratteristici dei parametri geotecnici. Le NTC 2018 assegnano particolare importanza alla determinazione dei parametri “caratteristici” specificando che essi devono derivare da “...una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato. I valori caratteristici delle proprietà fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere dedotti dall’interpretazione dei risultati di specifiche prove di laboratorio su campioni rappresentativi di terreno e di prove e misure in sito”.

In relazione a quanto espresso dalla circolare 2019 al punto 6.2.2 (“Valori caratteristici dei parametri geotecnici”), per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità.

Nello specifico, i parametri caratteristici adottati saranno quindi quelli prossimi ai valori minimi, al fine di operare a favore di sicurezza.

Di seguito sono rappresentati i dati delle prove penetrometriche tramite i grafici a istogramma, dai quali si evince una buona omogeneità stratigrafica. Il modello geotecnico, di seguito esposto, è stato elaborato dai dati della prova P1, i cui valori di resistenza sono di poco inferiori alla prova P2.

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	Angolo d'attrito ϕ'_k (°)	Modulo di Young $E_{y,k}$ (MPa)	Peso unità di volume (KN/m ³)	Peso unità di volume saturo (KN/m ³)
Strato (1) Sabbia limosa	6,00	0,00-1,00	24,5	4,71	17	19
Strato (2) Sabbia con limo	14,00	1,00-1,80	29,5	10,98	18	20
Strato (3) Sabbia limosa	6,00	1,80-3,40	24,5	4,71	17	19
Strato (4) Limo sabbioso	3,00	3,40-6,00	22	2,35	17	19
Strato (5) Sabbia con limo	9,00	6,00-10,00	27	7,06	17	19

Figura 6.1 - Tabella riepilogativa prove penetrometriche

P1

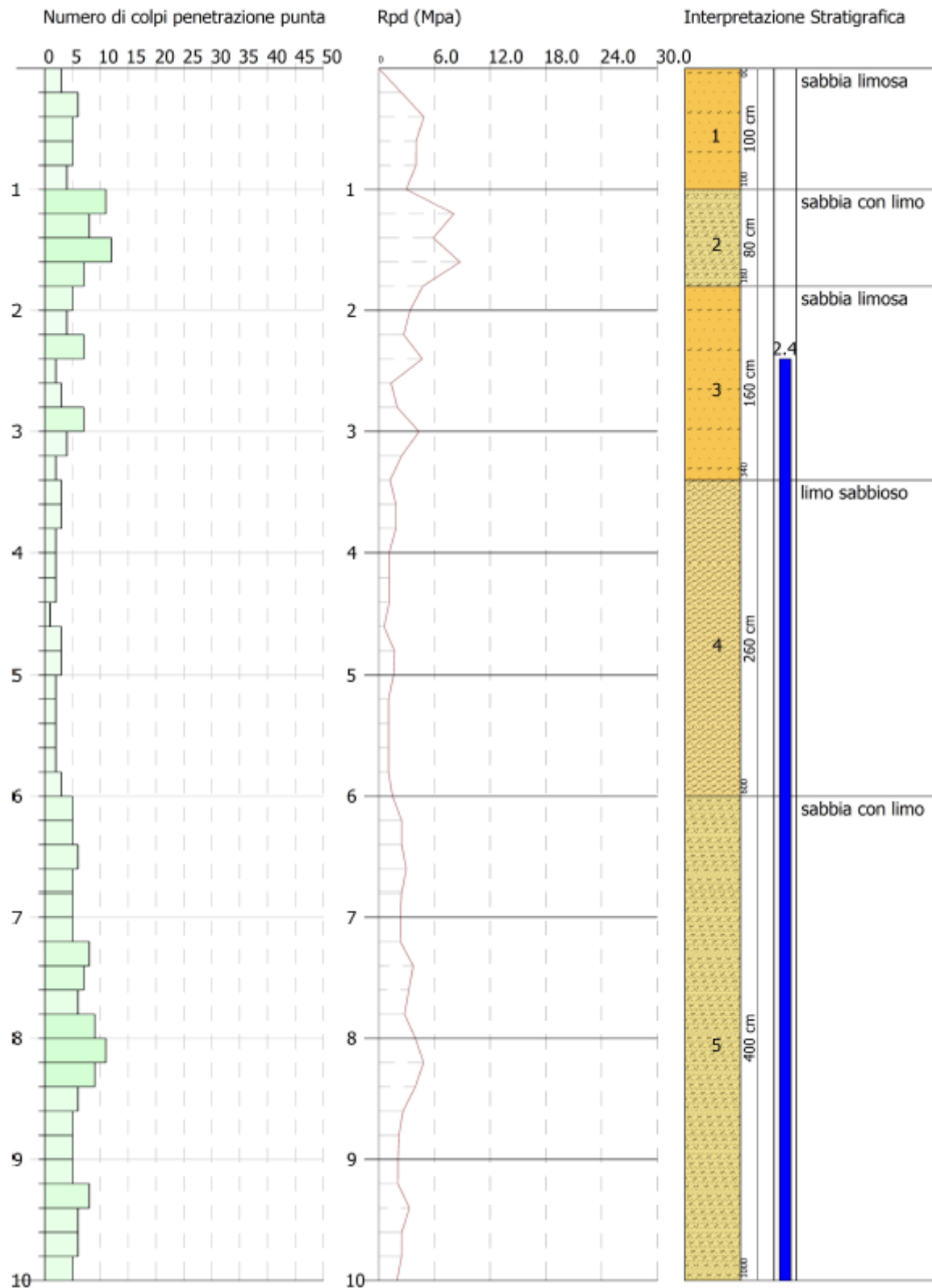


Figura 6.2 - Grafico andamento numero colpi/resistenza (MPa) vs profondità della prova P1

P2

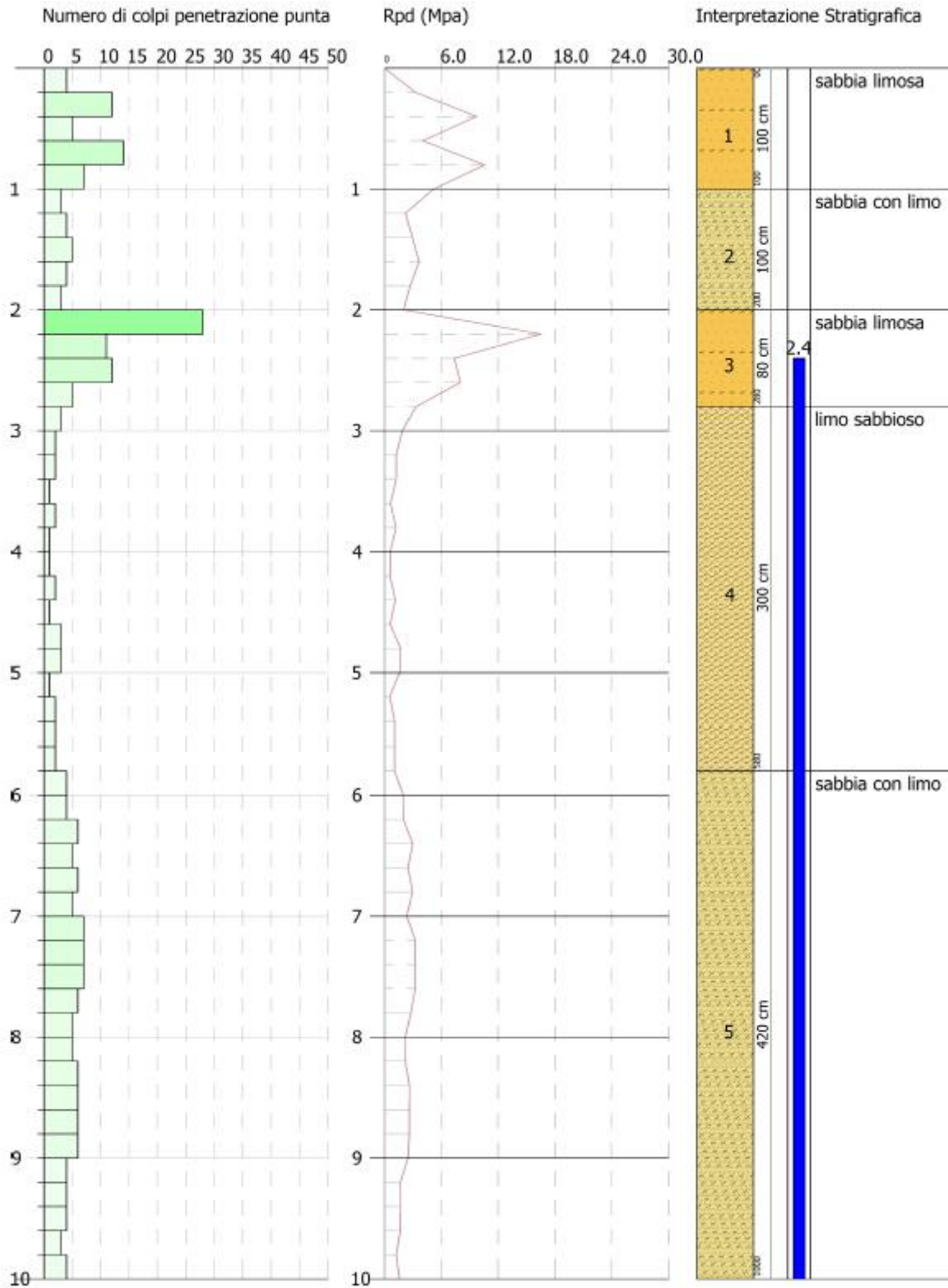
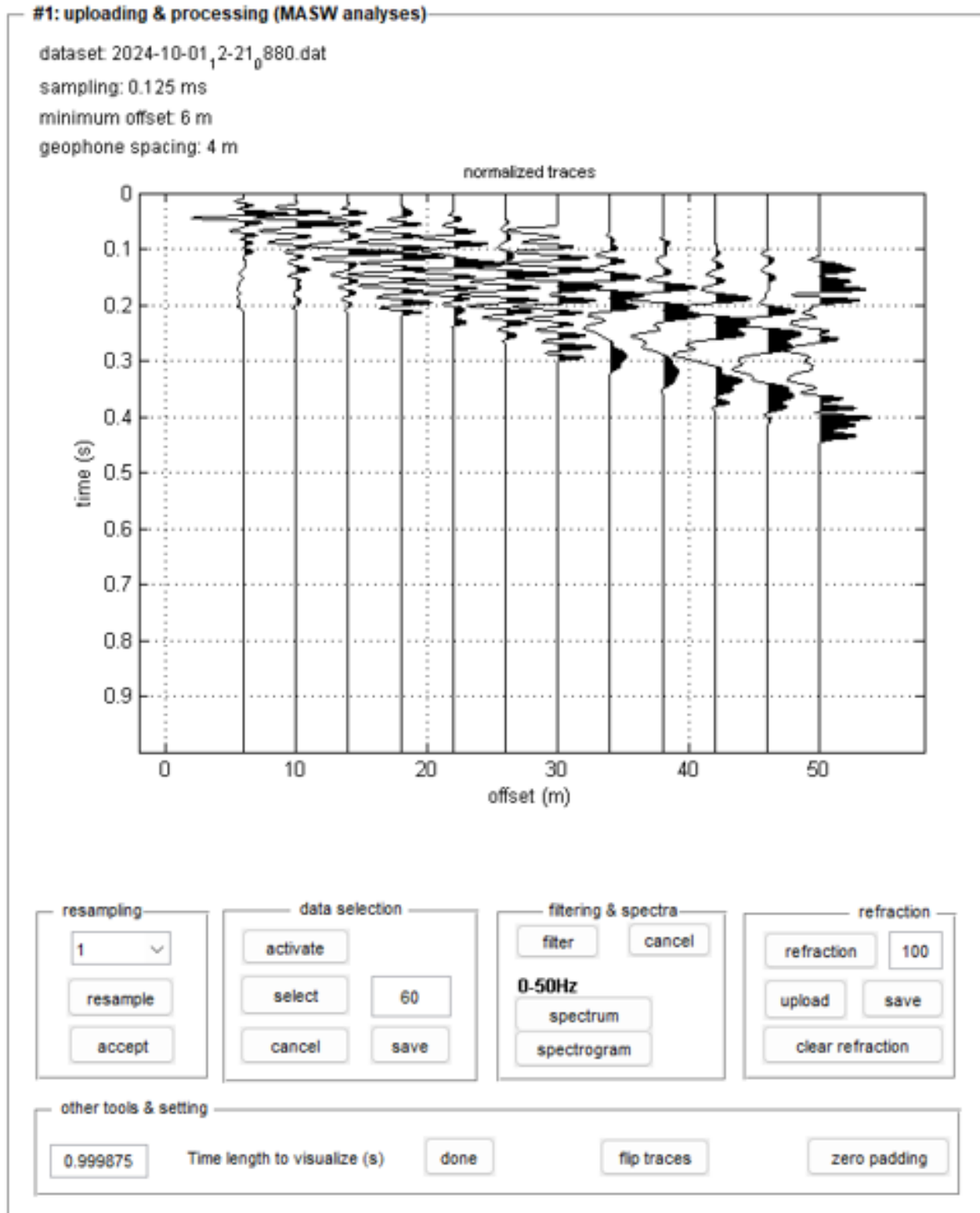


Figura 6.3 - Grafico andamento numero colpi/resistenza (MPa) vs profondità della prova P2

7 Modellazione sismostratigrafica

Di seguito i grafici di campagna e di interpretazione dell'indagine MASW.



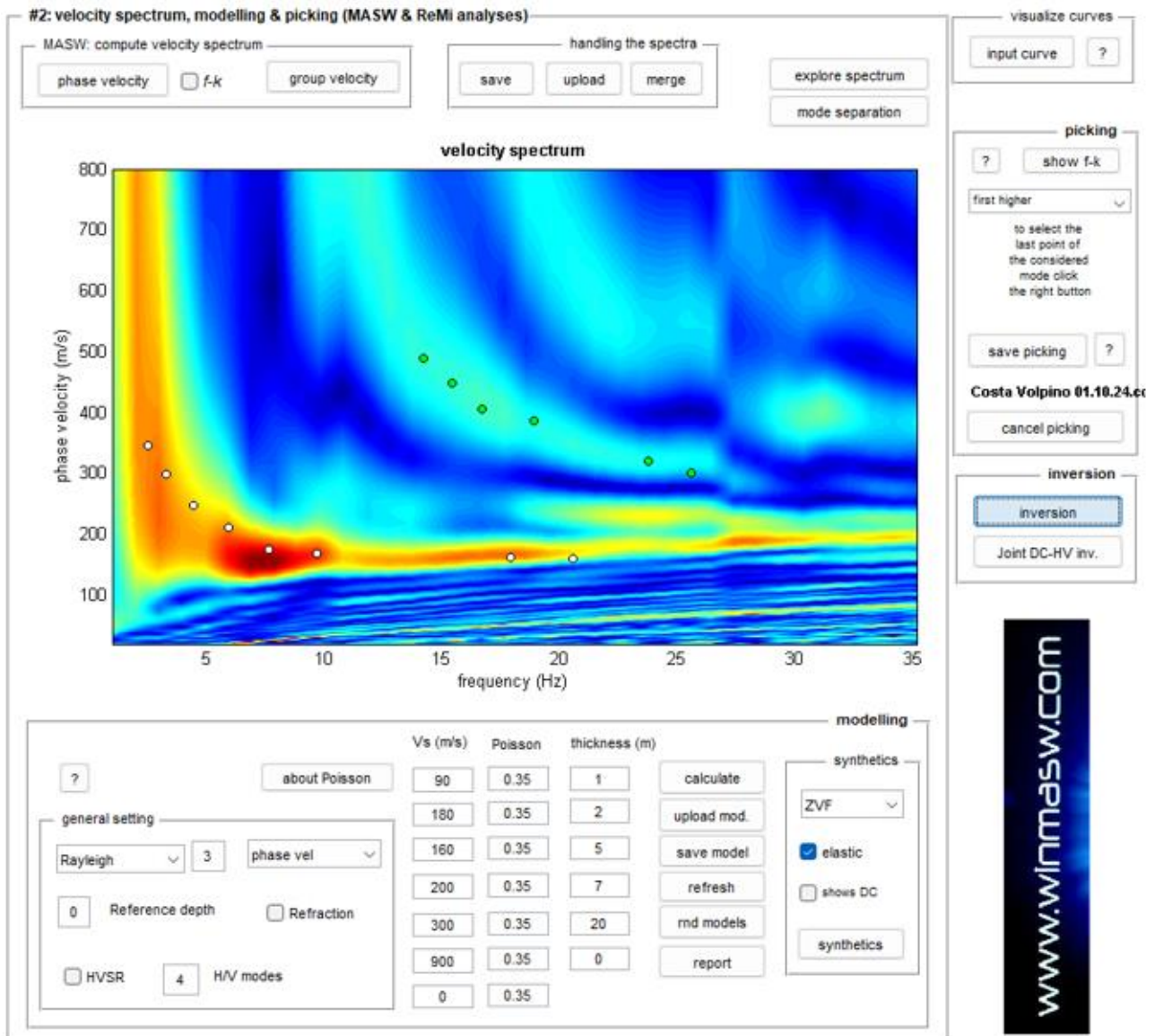
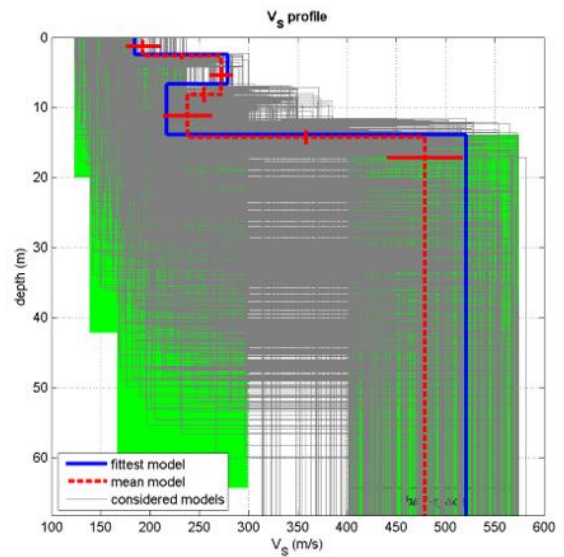
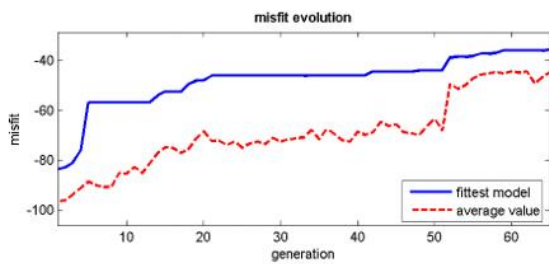
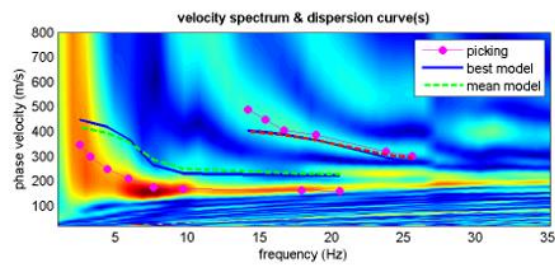


Figura 7.1 - Picking della curva di dispersione.



dataset: 2024-10-01_12-21_0880.dat
dispersion curve: Costa Volpino 01.10.24.cdp
 V_{s30} (best model): 324 m/s
 V_{s30} (mean model): 325 m/s

www.wilmaw.com

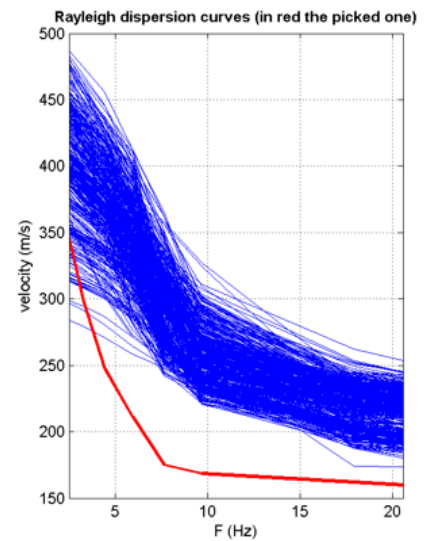
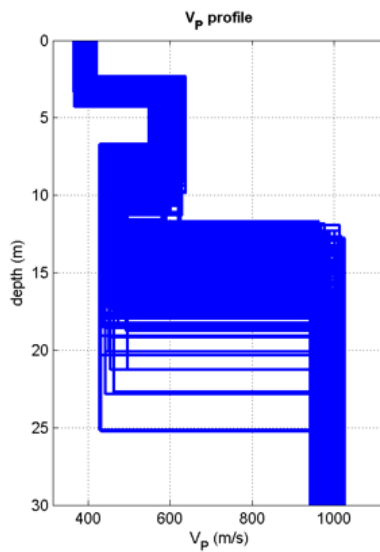
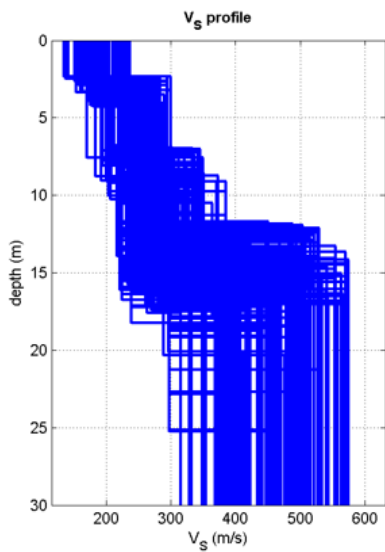


Figura 7.2 - Processo di inversione della curva di dispersione.

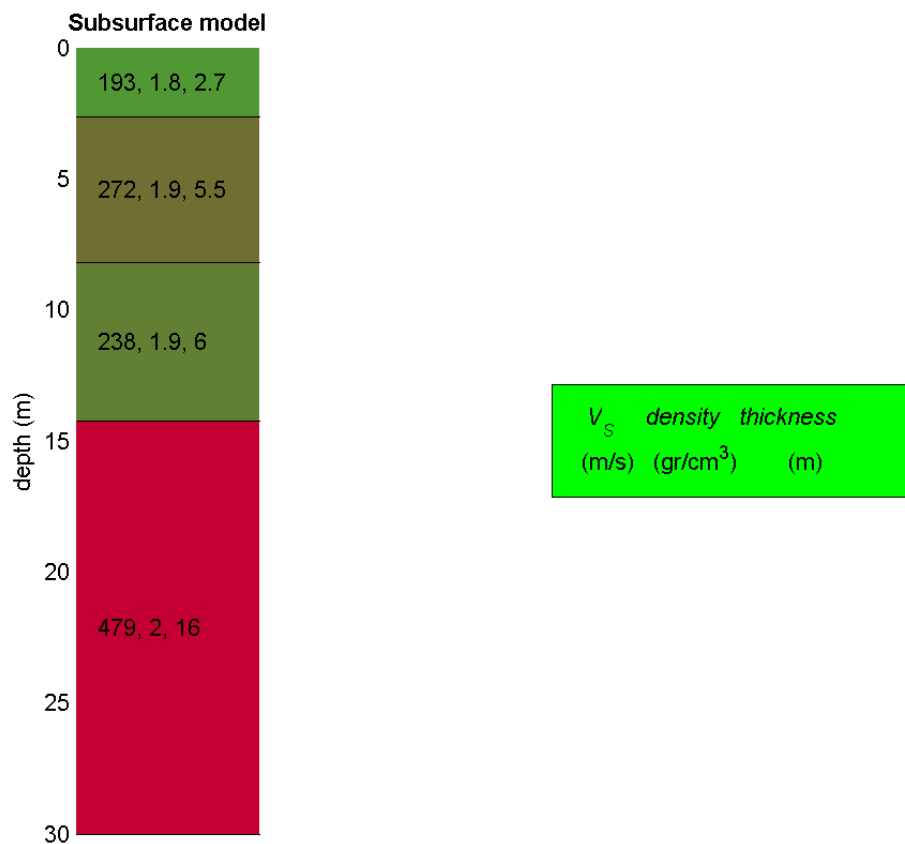


Figura 7.3 - Profilo sismostratigrafico

Il modello sismico monodimensionale (V_s -profondità) costituisce l'aspetto principale sia nella stima degli effetti sismici di sito che nella definizione dell'azione sismica di progetto, in quanto consente di conoscere l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche sulla pericolosità sismica di base (amplificazioni di natura litologica). I risultati dell'indagine MASW sono riportati nelle figure riprodotte precedentemente. **Il valore di $V_{s,eq} = V_{s30}$ calcolato è pari a 324 m/s.** Il valore determinato consente di attribuire ai terreni di fondazione categoria di suolo C (aventi valore di velocità delle onde di taglio comprese tra 180 e 360 m/s).

8 Categoria di sottosuolo, categoria topografica e stima dell'effetto sismico per l'opera in progetto

La categoria di sottosuolo da considerare per il sito è **la categoria di sottosuolo C: "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s"**.

Per quanto riguarda la categoria topografica, si è attribuito **la categoria T1: "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media minore uguale 15°"**.

La definizione del moto sismico sul piano di fondazione avviene in termini di ordinate (T_b , T_c , T_d) dello spettro di risposta elastico $S_e(T)$ in riferimento a delle prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R , dato dal prodotto tra la vita nominale della costruzione V_N e il coefficiente d'uso C_u , funzione della classe d'uso della costruzione.

I valori di V_N e C_u sono riportati in apposite tabelle nelle NTC:

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso C_u

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_u	0,7	1,0	1,5	2,0

Alle opere in progetto si è attribuita una Vita Nominale ≥ 50 anni e una classe d'uso II, a cui corrisponde un coefficiente C_u pari a 1. Pertanto il periodo di riferimento V_R è pari a 50 anni.

In funzione della probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento considerato, si ottengono i valori del tempo di ritorno dell'azione sismica TR riportati nella tabella seguente:

Stato limite	TR
Operatività SLO	30anni
Danno SLD	50 anni
Salvaguardia Vita SLV	475 anni
Prevenzione Collasso SLC	975 anni

Per il sito oggetto di intervento si ottengono, per i diversi tempi di ritorno TR, i valori dei parametri:

- ag: accelerazione orizzontale massima al sito;
- Tc*: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale;
- F0: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.

Attraverso l'applicativo online Geostru Ps sono stati calcolati secondo le NTC2018 i parametri sismici per gli stati limite SLO, SLD, SLV e SLC, oltre che i coefficienti sismici kh e kv e i parametri sismici ag, F0 e Tc*.

Per gli interventi di progetto sono stati considerati:

- CLASSE D'USO DELL'EDIFICIO: II – Affollamento normale;
- VITA NOMINALE: ≥ 50 anni – Opere ordinarie;
- COEFFICIENTE DI UTILIZZO: Cu pari a 1;
- PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA: 50 anni.

STATO LIMITE	T _r (anni)	a _g (g)	F ₀ (-)	T _c * (s)
SLO	30	0,033	2,459	0,201
SLD	50	0,042	2,482	0,219
SLV	475	0,108	2,462	0,279
SLC	975	0,139	2,485	0,289

Tabella 8.1 - Valori di ag, F0 e Tc associati agli stati limite da verificare

A partire dai valori di questi parametri, si possono ricostruire le ordinate dello spettro elastico in accelerazione delle componenti orizzontali, che sono riportate nelle NTC2018, e che andranno poi considerate nelle verifiche strutturali. Tali espressioni sono anche funzione del coefficiente S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, in funzione dei parametri caratteristici che definiscono l'amplificazione stratigrafica (Ss e Cc) e topografica (St).

Di seguito si riportano le tabelle delle NTC2018 dalle quali è possibile desumere il valore dei coefficienti Ss, Cc e St.

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S _T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_s e di C_c

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_E}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_E}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_E}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_E}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

I valori di S_s , C_c e St derivanti sono di seguito tabellati:

STATO LIMITE	S_s	C_c	St	kh	kv	$A_{max} (m/s^2)$	β
SLO	1,50	1,78	1,00	0,010	0,005	0,492	0,200
SLD	1,50	1,73	1,00	0,013	0,006	0,621	0,200
SLV	1,50	1,60	1,00	0,039	0,019	1,592	0,240
SLC	1,49	1,58	1,00	0,050	0,025	2,034	0,240

Tabella 8.2 - Valori di S_s , C_c , St , kh , kv , A_{max} e β associati ai diversi stati limite

8.1 Verifica alla liquefazione

Non si ritiene necessario procedere alla verifica a liquefazione, trattandosi di un'opera per buona parte sommersa o comunque potenzialmente interessata da oscillazioni del livello del lago

9 Vincoli e fattibilità geologica

Per quanto riguarda i vincoli legati al PAI e PGRA, si segnala come il sito sia ricompreso parzialmente nella fascia C (a nord) e B (a sud) del fiume Oglio e negli scenari di esondazione del Lago d'Iseo.

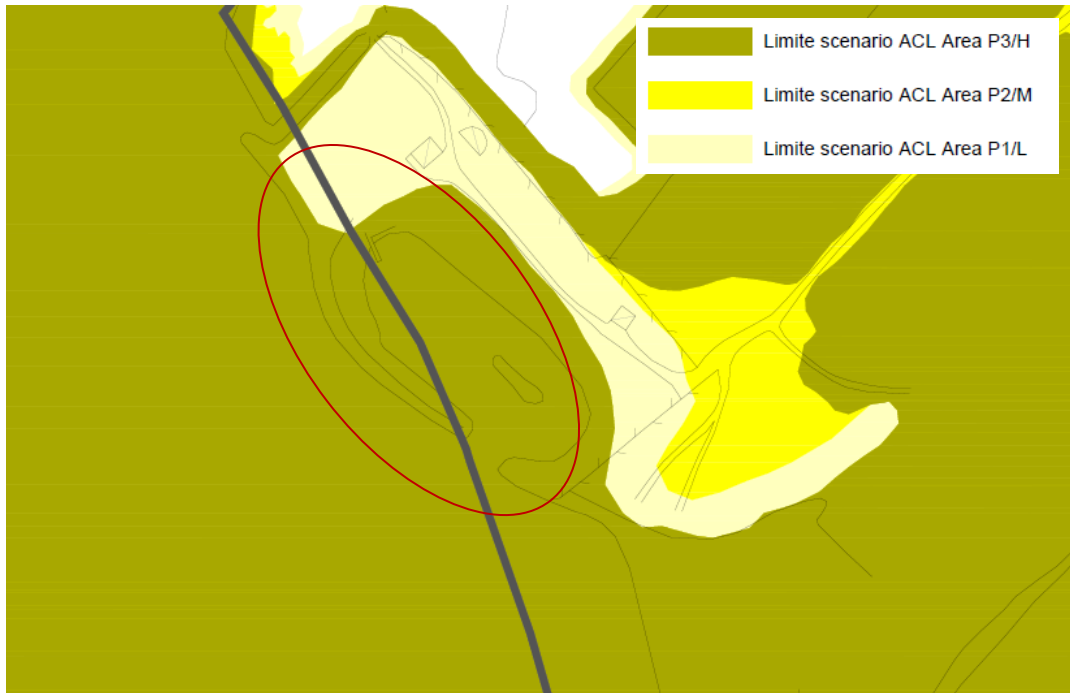


Figura 9.1 - Stralcio della carta PAI/PGRA da PGT Comunale (area sud)



Figura 9.2 - Stralcio della carta PAI/PGRA da PGT Comunale (area nord)

Dal punto di vista della fattibilità geologica, l'area di intervento ricade in Classe 3: "Fattibilità con consistenti limitazioni", in riferimento alle seguenti sottoclassi, dettate sia da problematiche idrogeologiche che idrauliche:

- 3fluvB: aree ricadenti in fascia fluviale B (Fonte PAI);
- 3fluvC: aree ricadenti in fascia fluviale C (Fonte PAI);
- 3lac: aree interessate da esondazioni di carattere lacuale (Fonte PGRA);
- 3idr: aree a bassa soggiacenza della falda.

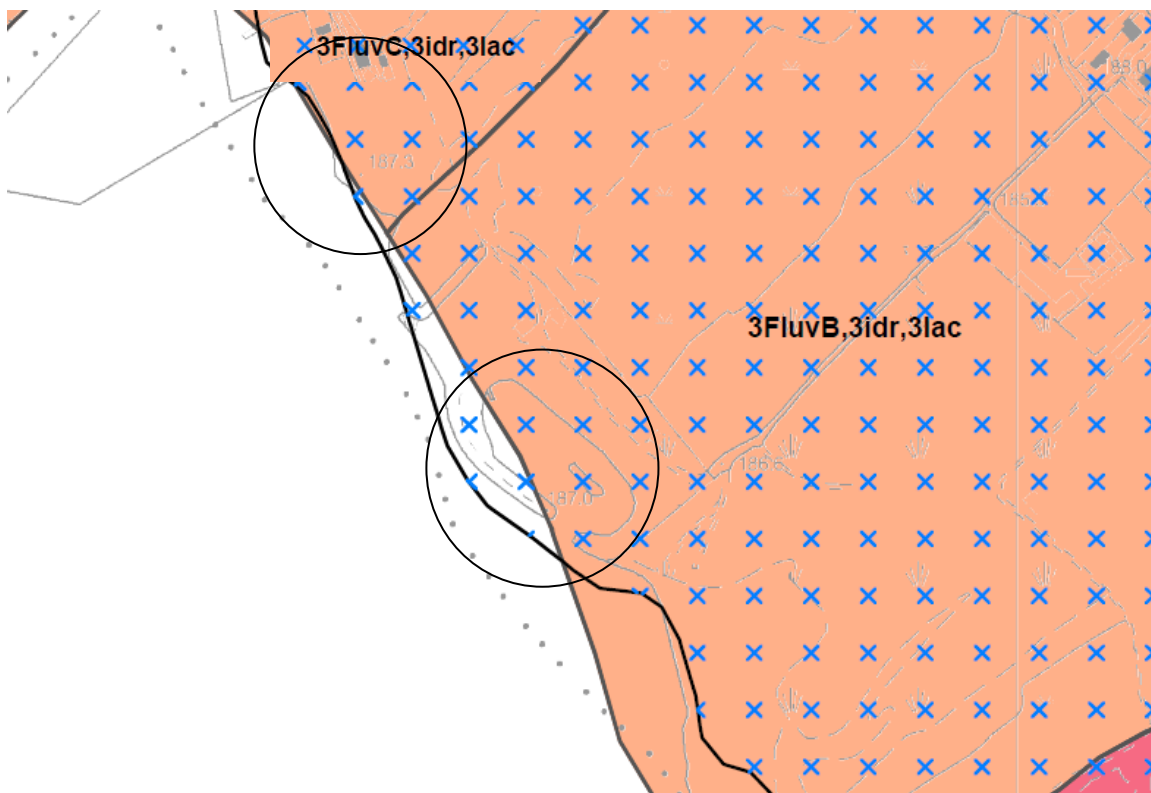
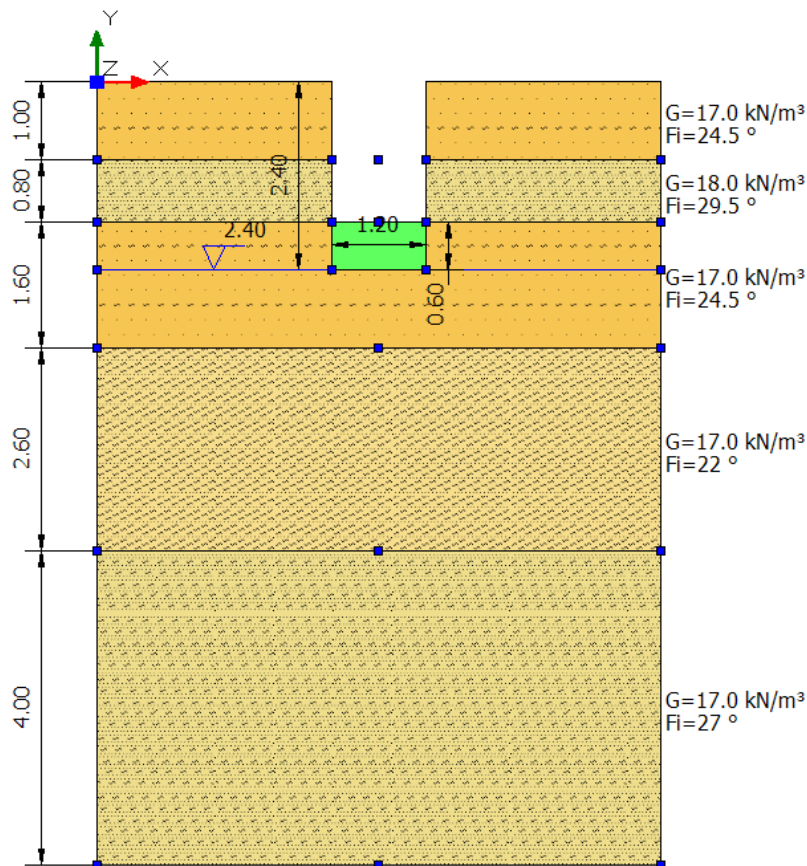


Figura 9.3 - Stralcio della carta di fattibilità geologica da PGT Comunale.

10 Verifiche geotecniche

Nel presente capitolo vengono sviluppate le verifiche geotecniche per la fondazione della gradonata a lago. Per il calcolo è stata impiegata la geometria della sezione BB', consultabile nel capitolo relativo agli interventi in progetto. Considerando il piano di posa della fondazione, di spessore 0,6 metri, in corrispondenza dello scalino a quota minima, si sono ipotizzati valori di carico agli SLE e agli SLU rispettivamente pari a 20 kPa e 30 kPa.



DATI GENERALI

Normativa NTC_2018

Larghezza fondazione	1,2	m
Lunghezza fondazione	30,0	m
Profondità piano di posa	2,4	m
Altezza di incastro	0,6	m
Profondità falda	2,4	m

COEFFICIENTI SISMICI

Accelerazione massima (a_{max}/g)	0,162
Effetto sismico secondo Paolucci, Pecker (1997)	
Coefficiente sismico orizzontale	0,0389

STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore strato [m]	Peso unità di volume [kN/m ³]	Peso unità di volume saturo [kN/m ³]	Angolo di attrito [°]	Modulo Elastico [kN/m ²]
1,0	17,0	19,0	24,5	4710,0
0,8	18,0	20,0	29,5	10980,0
1,6	17,0	19,0	24,5	4710,0
2,6	17,0	19,0	22,0	2350,0
4,0	17,0	19,0	27,0	7060,0

Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	Tipo
1	A1+M1+R3	30	Progetto
2	SISMA	30	Progetto
3	S.L.E.	20	Servizio

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef. Rid. Capacità portante orizzontale
1	No	1	1	1	1	1	2,3	1,1
2	Si	1	1	1	1	1	1,8	1,1
3	No	1	1	1	1	1	1	1

PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

=====

Peso unità di volume 17 kN/m³
 Peso unità di volume saturo 19 kN/m³
 Angolo di attrito 24,5°

A1+M1+R3

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

=====

Fattore [Nq] 10,12
 Fattore [Nc] 20,01
 Fattore [Ng] 8,31

Fattore forma [Sc]	1,02
Fattore profondità [Dc]	1,38
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1,0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1,0
Fattore inclinazione base [Bc]	1,0
Fattore forma [Sq]	1,02
Fattore profondità [Dq]	1,35
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1,0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1,0
Fattore inclinazione base [Bq]	1,0
Fattore forma [Sg]	0,99
Fattore profondità [Dg]	1,0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1,0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1,0
Fattore inclinazione base [Bg]	1,0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1,0
Fattore correzione sismico inerziale [zg]	1,0
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	1,0

=====		
Carico limite	186,46	kN/m ²
Resistenza di progetto	81,07	kN/m ²
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata	
=====		

SISMA

Autore: Brinch - Hansen 1970 (Condizione drenata)

=====		
Fattore [Nq]	10,12	
Fattore [Nc]	20,01	
Fattore [Ng]	8,31	
Fattore forma [Sc]	1,02	
Fattore profondità [Dc]	1,38	
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1,0	
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1,0	
Fattore inclinazione base [Bc]	1,0	
Fattore form [Sq]	1,02	
Fattore profondità [Dq]	1,35	
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1,0	
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1,0	
Fattore inclinazione base [Bq]	1,0	
Fattore forma [Sg]	0,99	
Fattore profondità [Dg]	1,0	
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1,0	
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1,0	
Fattore inclinazione base [Bg]	1,0	
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	0,89	

Fattore correzione sismico inerziale [zg]	0,85	
Fattore correzione sismico inerziale [zc]	0,96	
=====		
Carico limite	163,67	kN/m ²
Resistenza di progetto	90,93	kN/m ²
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata	
=====		

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler 6546.68 kN/m³

11 Conclusioni e indicazioni progettuali

La presente relazione geologica-geotecnica è relativa alla realizzazione degli interventi di sistemazione della sponda del lago d'Iseo nei pressi del centro nautico e dell'area a nord-ovest, in comune di Costa Volpino (BG).

Si sono inoltre svolti approfondimenti specifici per caratterizzare con maggior dettaglio l'area oggetto di realizzazione della gradonata a lago. Dai dati delle prove penetrometriche è stato possibile ricostruire la stratigrafia locale, con presenza di terreni di riporto prevalentemente granulari, in linea con le evidenze delle trincee esplorative. La prima coltre superficiale, costituita da sabbie limose talora ghiaiose, si sviluppa per uno spessore di circa 3 metri in entrambi i punti di indagine. Al di sotto di tale strato, sono state individuate alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose, dotati di modeste caratteristiche geotecniche, anche dovuto a uno scarso stato di addensamento per la presenza di acqua, intercettata a partire da 2,4 metri dal locale piano campagna.

In relazione all'amplificazione litologica è stata assegnata la categoria di sottosuolo C ottenuta dall'elaborazione dell'indagine MASW svolta in prossimità delle prove penetrometriche, mentre in riferimento alla condizione topografica, essenzialmente pianeggiante, è stata assegnata la categoria T1.

La verifica alla liquefazione eseguita dal Geol. Feriti nell'ambito del progetto generale ha dato esito negativo; si sottolinea che per l'intervento di progetto non è rilevante tale fenomeno, collocandosi l'opera in ambiente sommerso.

Nonostante i vincoli derivanti dai dissesti PAI e scenari PGRA, associati a consistenti limitazioni (=classe di fattibilità 3), l'intervento risulta senz'altro compatibile dal punto di vista geologico se non migliorativo in quanto trattasi di interventi di consolidazione spondale e di miglioramento di accessibilità al lago.

Le verifiche agli stati limite ultimi per il dimensionamento geotecnico delle fondazioni (GEO) condotte con la Combinazione (A1+M1+R3), sia in condizione statica che in condizione sismica, sono state soddisfatte. Qualora in fase di scavo si riscontrino spessori maggiori di materiali fini e/o presenza di livelli argillosi, si raccomanda la sostituzione con materiale di pezzatura superiore, peraltro già prevista dagli interventi di progetto con la posa di massi ciclopici della scogliera esistente, anche nell'ottica di riutilizzo in cantiere.

Si ricorda infine che le presenti considerazioni sono valide esclusivamente per le previsioni di progetto e per i dati forniti; ulteriori modificazioni andranno adeguatamente supportate da opportuni approfondimenti di carattere geologico e geotecnico.