

Via Valsellustra 32
40060 Dozza - BOLOGNA



Studio Samuel Sangiorgi
Geologia Applicata

Comune:

COMUNE DI BENTIVOGLIO (BO)

Oggetto:

PIANO URBANISTICO ATTUATIVO
Ambito ANS-C 10 — Comparto 10.2
RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA (DGR 476/2021)

Stesura:

aprile 2022

Elaborazione:

Dott. Geol. Samuel Sangiorgi



Committente:

Mercurio Center Srl

tel/fax 0542 640279

mail info@studiosamuelsangiorgi.eu

www.studiosamuelsangiorgi.eu



Indice generale

1	PREMESSA.....	2
2	METODO DI LAVORO.....	4
2.1	Contenuti della relazione e metodi analitici perseguiti.....	4
2.2	Dati di riferimento e di repertorio.....	4
2.3	Nuove indagini geognostiche/geofisiche (aprile 2022).....	5
3	CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA.....	8
3.1	Geologia.....	8
3.2	Contesto idrogeologico ed elementi di pericolosità idraulica.....	10
4	CATTERIZZAZIONE SISMICA.....	13
4.1	Pericolosità sismica di base.....	13
4.2	Gli studi di pericolosità sismica elaborati per la pianificazione territoriale e urbanistica.....	15
4.2.1	<i>Gli Indirizzi tecnici regionali di riferimento: DGR 476/2021.....</i>	<i>15</i>
4.2.2	<i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna.....</i>	<i>16</i>
4.2.3	<i>La microzonazione sismica comunale vigente.....</i>	<i>17</i>
5	APPROFONDIMENTI SISMICI (DGR 476/2021).....	19
5.1	Approfondimenti sismici di primo e secondo livello.....	19
5.2	Approfondimenti sismici di terzo livello: verifiche quantitative della liquefazione.....	21
5.2.1	<i>Aspetti generali.....</i>	<i>21</i>
5.2.2	<i>Metodologia delle verifiche.....</i>	<i>22</i>
5.2.3	<i>Esiti delle verifiche.....</i>	<i>24</i>
6	ORIENTAMENTI GEOTECNICI.....	26
6.1	Modellazione geotecnica di massima.....	26
6.2	Ulteriori indicazioni geotecniche.....	29
7	SINTESI DELLO STUDIO.....	32

ALLEGATI:

REPORT INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

REPORT VERIFICHE LIQUEFAZIONE E CEDIMENTI POST SISMA

1 PREMESSA

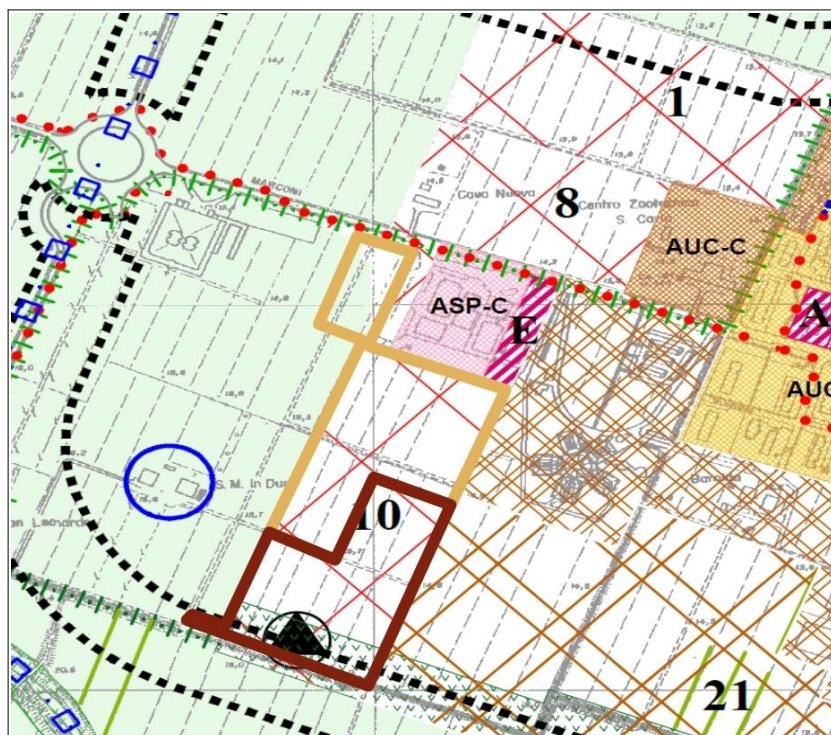
Lo Scrivente è stato incaricato di redigere lo studio geologico e sismico propedeutico alla redazione del secondo stralcio attuativo (comparto 10.2) dell'Ambito di PSC classificato ANS-C 10. (figure 1.1 e 1.2).

Tale porzione d'ambito è stato inserito nel Piano Operativo Comunale (adottato con delibera C.C. n.44 del 27/11/2017).

Il progetto attuativo prevede, in sintesi, la realizzazione di nuovi insediamenti a destinazione residenziale, viabilità d'accesso privata, parcheggi pubblici e privati aree a verde pubblico e privato (figura 1.3).

Figura 1.1 – Localizzazione nella cartografia del PSC dell'Ambito ANS-C10 comprendente anche il comparto in attuazione - 2° stralcio (TAV.1 – Assetto Territoriale, scala 1:10.000).

I perimetri indicativi dei comparti n.1 e n.2 sono riportati dallo Scrivente rispettivamente con linea marrone chiaro e marrone scuro



La presente Relazione geologica e sismica è redatta ai sensi della LR 24/2017 e della LR 19/2008 ("Norme per la riduzione del rischio sismico"). Lo studio ha ulteriormente analizzato gli elementi geologici e sismici locali in coerenza con quanto indicato nelle conclusioni (scheda di sintesi) della Relazione Geologica e Sismica elaborata per la proposta di inserimento nel POC dell'area in attuazione (Sangiorgi, 2017). In particolare, si sono ulteriormente approfonditi gli aspetti di caratterizzazione geotecnica e sismica ai sensi della DGR 476/2021.

Occorre precisare che le indagini in situ (penetrometrie CPTU/CPTE; stendimento sismico MASW; registrazione HVSR) e le analisi geologiche e sismiche espletate per la proposta di inserimento dell'area di studio nel POC di Bentivoglio (geol. S. Sangiorgi, 2017), successivamente approfondite per lo studio geologico e sismico a supporto del PUA, hanno permesso di effettuare le analisi sulla pericolosità sismica nel comparto n.1 ai sensi della DGR DGR 630/2019¹.

Per questo secondo stralcio attuativo sono state eseguite ulteriori indagini geognostiche e

¹ Cfr. <<Relazione geologica e sismica ambito ANS-C 10 – Comparto 10.1>> (geol. S. Sangiorgi, 2020)

An aerial photograph of a large agricultural field. A green line outlines a large, irregularly shaped area that covers most of the field. Within this green-outlined area, there is a smaller, roughly rectangular section in the lower right corner that is filled with red diagonal hatching. The field itself is brown and appears to be fallow or recently harvested. To the right of the field, there is a road and some buildings, including a large white industrial-style building. To the left, there are some trees and a smaller building. The overall scene is a rural landscape.

Figura 1.2 – Evidenziazione dell'ambito di intervento (in verde: l'ambito n.1; in rosso l'ambito n.2)



Figura 1.3 – Planimetria progettuale del secondo stralcio attuativo previsto per il comparto ANS-C 10 (gli interventi previsti nell'area di interesse sono rappresentati in colore)

2 METODO DI LAVORO

2.1 Contenuti della relazione e metodi analitici perseguiti

La presente Relazione descrive gli esiti delle seguenti analisi:

1. la raccolta delle indagini e dei dati di repertorio, di riferimento per questo lavoro, e la descrizione del piano delle indagini integrative;
2. la caratterizzazione geologica e in particolare la descrizione degli aspetti più generali di geologia, geomorfologia idrogeologia e pericolosità idraulica;
3. la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti compresi nel “volume significativo”, basata sull’analisi dei dati delle indagini geognostiche di repertorio, in particolare delle prove CPTe/CPTU eseguite nel comparto n.1 e delle prove CPTe di nuova esecuzione eseguite nel comparto n.2. Queste indagini permettono la stima dei parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati mediante correlazioni empiriche desunte dalle seguenti fonti bibliografiche scientifiche, ampiamente accreditate: “Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010” (Robertson, P.K., Cabal K.L.) e “Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11), 2009” (Robertson, P.K.);
4. La disanima della pericolosità sismica locale, basata sull’analisi della sismicità storica dell’area (pericolosità sismica di base) e sull’elaborazione delle verifiche quantitative degli effetti cosismici potenzialmente attesi (amplificazione; liquefazione e cedimenti post sisma) in coerenza con la DGR 476/2021.

Per quanto riguarda le verifiche di liquefacibilità nei sedimenti granulari e fini poco coesivi, si sono espletate analisi quantitative di tipologia deterministica, basate sugli esiti delle prove CPTe/CPTU e utilizzando il riconosciuto metodo di valutazione stocastica sviluppato da Boulanger & Idriss (2014) aggiornato da Robertson (2009; 2010). Si fornisce, infine, un’ulteriore analisi del rischio di liquefazione, anche in considerazione dell’edificazione di progetto, mediante il calcolo dell’indice del potenziale di liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) e la stima del parametro LSN (Liquefaction Severity Number), proposto da Tonkin & Taylor (2013).

2.2 Dati di riferimento e di repertorio

- Per il contesto geologico e geolitologico → ci si è riferiti alla Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna (pubblicata nel sito internet del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli – SGSS – della nostra Regione). Per il modello geologico profondo si sono inoltre considerate le sezioni geologiche RER anch’esse pubblicate nel sito internet del SGSS e la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS RER e CNR, 2006);

- Per il contesto idrogeologico → ci si è riferiti alla Carta Idrogeologica elaborata alla scala 1:25.000 (tav.AC.1.2b) per il Quadro Conoscitivo del PSC dei Comuni delle associazioni “Reno-Galliera” e “Terre d'Acqua”, e ai dati piezometrici ricavati direttamente dalle prove eseguite nell'area di interesse;
- Per la pericolosità idraulica → ci si è riferiti a primo aggiornamento del Piano di Gestione rischio Alluvioni (PGRA) realizzato dall'Autorità di Bacino distrettuale del Fiume Po, in recepimento alla “direttiva alluvioni 2007/60/CE”.
- Per il contesto di pericolosità sismica locale → ci si è riferiti allo studio pericolosità e microzonazione sismica elaborata alla scala 1:5.000 (Tavola 1a e Tavola 2a) per il PSC di Bentivoglio (S. Sangiorgi, 2013) e al successivo aggiornamento della MS validato nell'ottobre 2018 dalla CTMS (OCDPC 171/2014; DGR 1227/2015). Si sono inoltre considerati gli elementi di pericolosità riportati nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna e in particolare la <<Tavola 4 - Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> alla scala 1:65.000 (per la pianura), approvata con Delibera del consiglio metropolitano n.16 del 12/05/2021;
- Indagini geognostiche e geofisiche pregresse → sono disponibili prove geognostiche e geofisiche di repertorio (Banca Dati Geognostica SGSS; microzonazione sismica comunale) eseguite nell'area di progetto e in aree limitrofe e in particolare: penetrometrie CPT; sondaggi a carotaggio; registrazioni HVSR. Per lo studio geologico e sismico relativo al primo stralcio attuativo (comparto n.1) sono state realizzate in ulteriori indagini e in particolare: **penetrometrie CPTE/CPTU**, uno **stendimento sismico MASW** e una **registrazione sismica HVSR**. La successiva figura 2.1 localizza le indagini di repertorio utili per questo studio.

2.3 Nuove indagini geognostiche/geofisiche (aprile 2022)

Per il secondo stralcio attuativo sono state eseguite altre indagini “in situ” e in particolare:

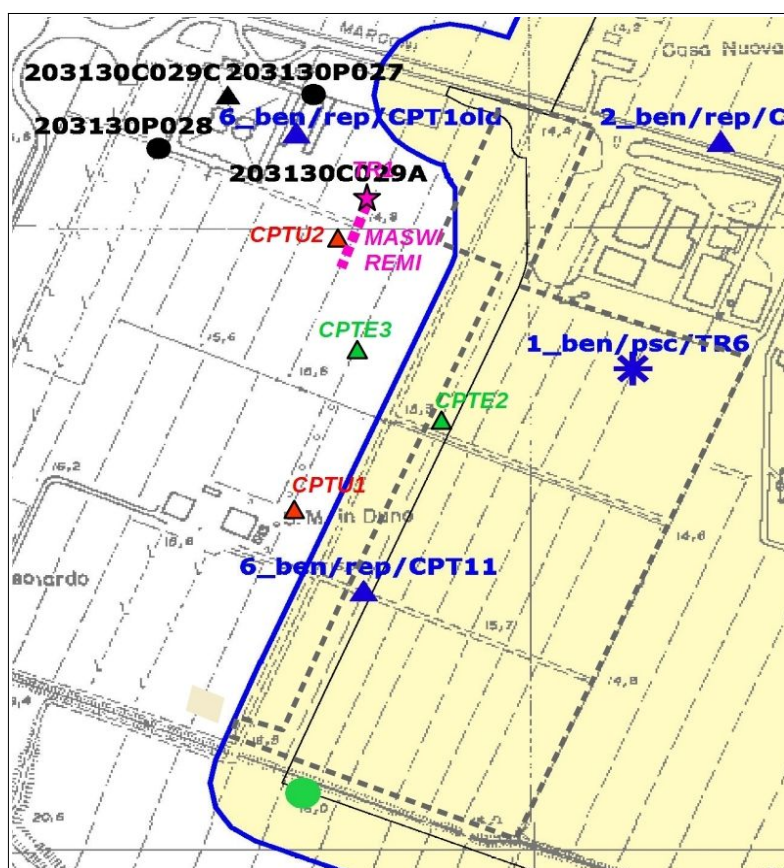
- n. 2 penetrometrie statiche con puntale elettrico (CPTE1; CPTE2) → sono state tutte approfondite fino a circa -15,7 metri dal p.c. Le terebrazioni sono state realizzate con un penetrometro dotato di spinta da 200 kN, montato su mezzo semovente cingolato. La punta piezometrica utilizzata presenta caratteristiche standard e la speciale attrezzatura utilizzata permette l'acquisizione dei dati ogni cm di avanzamento attraverso lettura diretta delle resistenze. I dati di penetrazione (qc; fs) sono stati elaborati per le verifiche quantitative della liquefazione e cedimenti post sisma e per la stima automatica dei principali parametri meccanici fondamentali: quota di falda locale, resistenza alla punta normalizzata (Q_{c1n}), I_c , D.R., ϕ' , cu, OCR, Modulo Edometrico, conducibilità idraulica, ecc. In calce al testo si allegano i grafici di sintesi delle prove CPTE eseguite.
- n. 1 registrazione del rumore sismico (microtremori) del sottosuolo con tecnica HVSR → è stata eseguita una registrazione (TR1) con strumentazione tromografica portatile in dotazione dello Studio scrivente. Lo strumento dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità

(moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. L'elaborazione del microtremore misurato, fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970), risultando efficace per la stima delle frequenze fondamentali di risonanza f_r del sottosuolo: $f_r = V_s/4*H$ (con H = spessore dello strato).

In questo modo, gli esiti delle misure tromografiche, opportunamente calibrate con la stratigrafia direttamente desunta dalle penetrometrie e dai dati di sottosuolo pregressi forniscono un ulteriore e utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo e alla stima della velocità media delle onde di taglio nel volume di sottosuolo investigato. La stima delle frequenze amplificanti del terreno consente anche una preliminare valutazione delle eventuali “doppie risonanze” con le tipologie di manufatti di progetto. In calce al testo si allega il report dell'aquisizione tromografica eseguita.

La figura 2.1 riporta uno stralcio della Tav.1a del PSC (“Pericolosità sismica: tavola comunale delle aree suscettibili di effetti locali” alla scala 1:5.000) che localizza le indagini di repertorio già disponibili. La figura 2.1 sovrappone anche le indagini “in situ” eseguite nel comparto n.1 a supporto della proposta di inserimento nel POC dell'ambito in questione.

Figura 2.1 – Stralcio della Tav.1a del PSC (“aree suscettibili di effetti locali”). Sono localizzate le indagini geognostiche/geofisiche di repertorio (in nero: Banca Dati SGSS; in blu: archivio PSC). Sono inoltre sovrapposte le prove “in situ” eseguite a supporto della proposta di inserimento nel POC dell'ambito ANS-C 10 (in rosso CPTU; in verde CPTe; in fuxia MASW/REMI e HVSR. Il limite approssimativo dell'ambito è rappresentato con il tratteggiato in grigio



La figura 2.2 rappresenta, invece, la migliore localizzazione delle indagini di riferimento per il comparto n.2 (prove di repertorio e prove di nuova realizzazione) sulla planimetria di progetto attuativo.

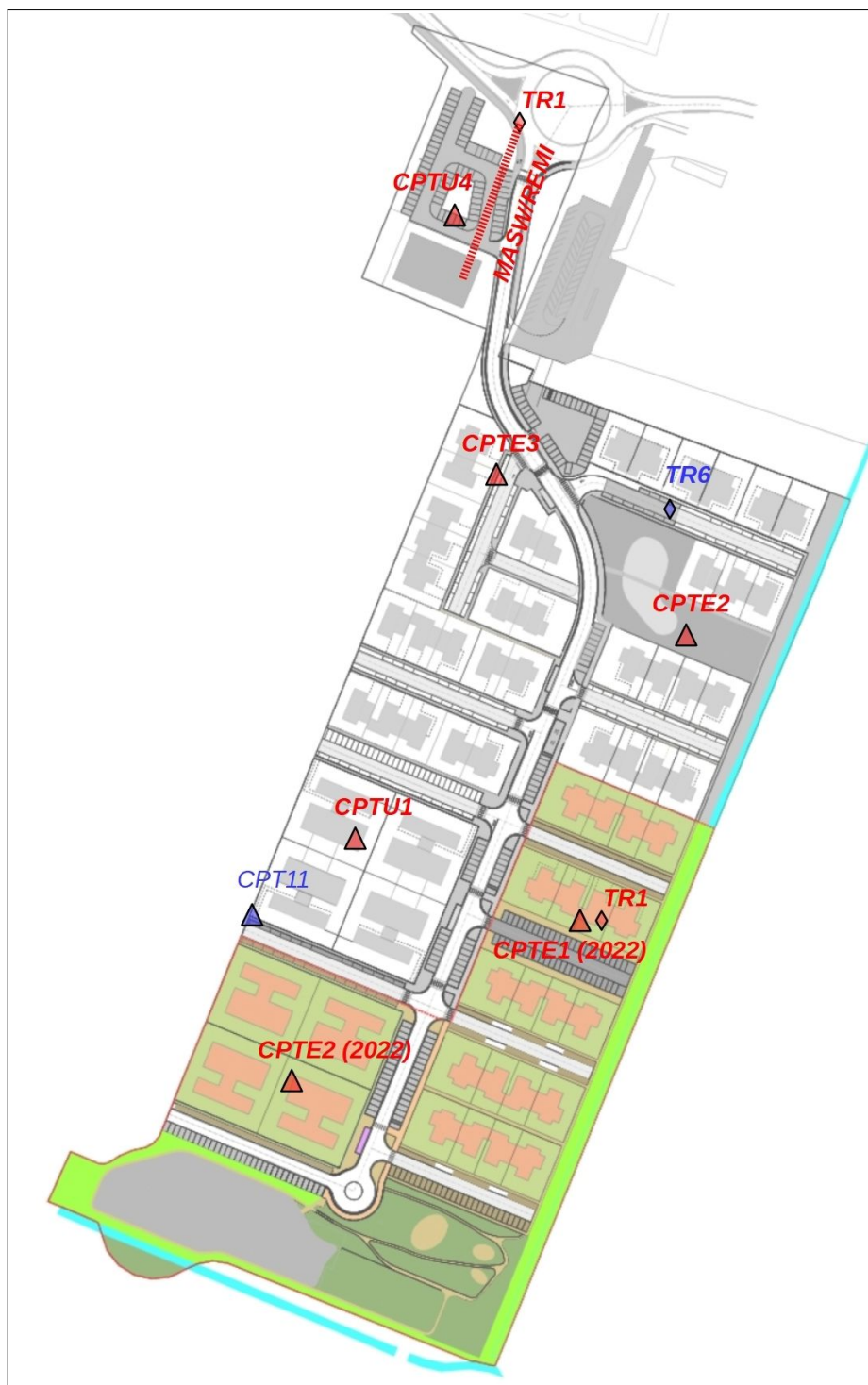


Figura 2.2 –
Sovrapposizione delle
indagini
geognostiche/geofisiche di
riferimento con la
planimetria di progetto del
primo stralcio attuativo

3 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA

3.1 Geologia

Riprendendo quanto già scritto nella Relazione Geologica e Sismica del POC (geol. S. Sangiorgi, 2017), l'area studiata si colloca nel contesto più generale di pianura alluvionale e più in particolare in ambito deposizionale di “depositi di argine, canale e rotta fluviale” attribuibili al corso d'acqua Savena (IV – VI secolo d.c.). Morfologicamente, è situata a circa 15,5÷14,0 metri s.l.m. con blando declivio verso NE.

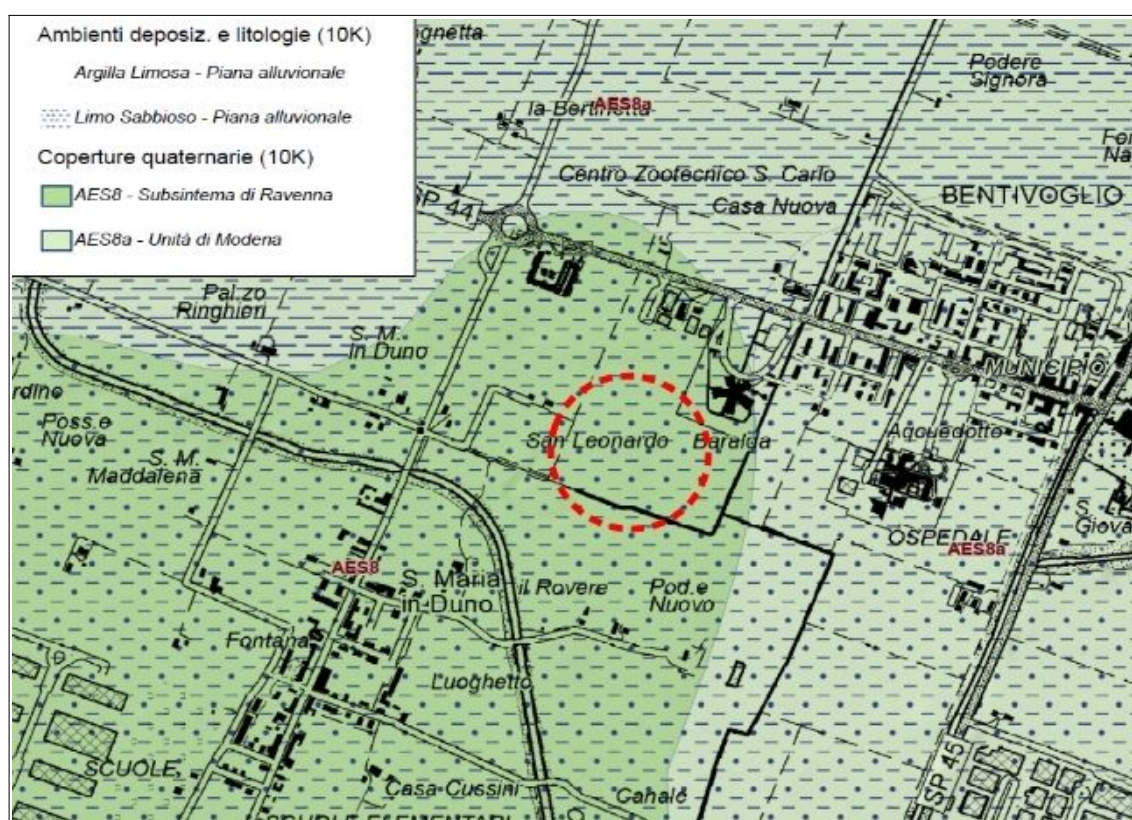


Figura 3.1 – Cartografia geologica interattiva pubblicata nel sito internet del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (SGSS). L'area di studio è localizzata nel cerchiato in tratteggio rosso

La figura 3.1 riporta uno stralcio della cartografia geologica interattiva delle RER pubblicata dal SGSS regionale: essa distingue le Unità continentali alluvionali secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale “Supersistema Emiliano-Romagnolo” (RER, ENI-AGIP, 1998). I depositi alluvionali vengono attribuiti al “Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore” (AES) e sono suddivisi in sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico (subsistemi identificati con sigle da AES5 – più antichi - ad AES8 – più recenti) delimitati in genere da scarpate di erosione. Ciò detto, i sedimenti affioranti nell'area di studio vengono compresi nel “Subsistema di Ravenna” (identificati con sigla AES8).

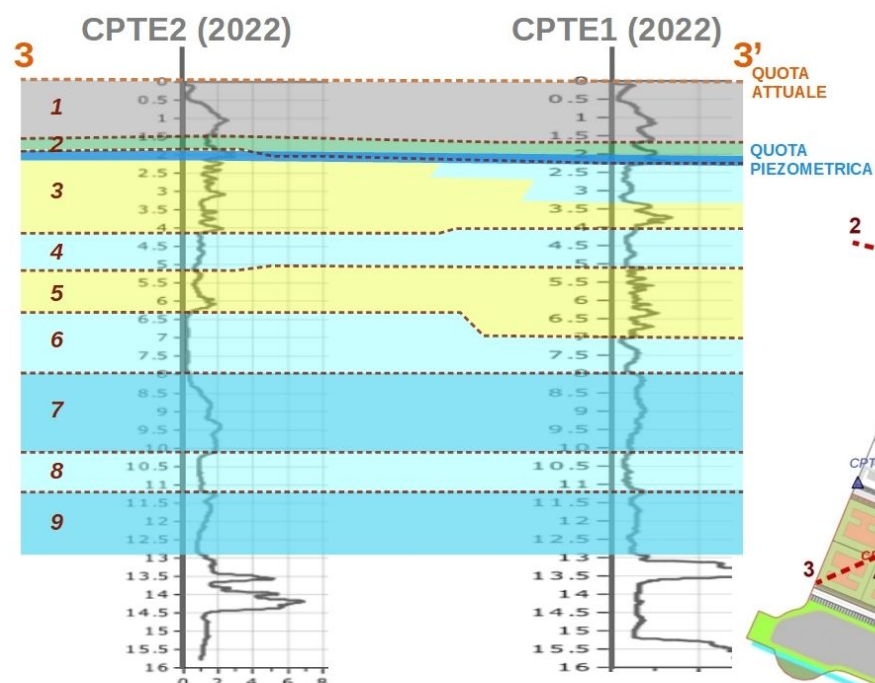
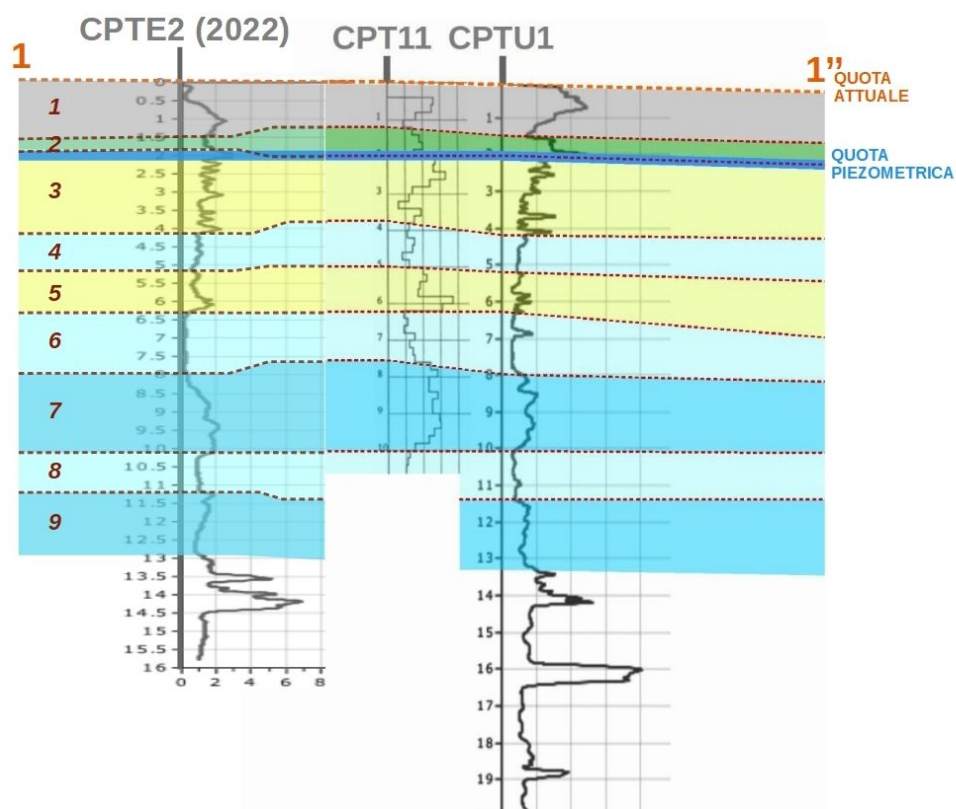


Figura 3.2 – Sezioni lito-geotecniche elaborate per l'area di studio (in grigio: intervallo insaturo essiccato e/o più alterato; in verde: zona di frangia capillare; in giallo: limi argillosi con livelli/strati limoso sabbiosi; in azzurro chiaro: argille scarsamente consistenti; in azzurro scuro: limi/argille più consistenti)

Si tratta di depositi alluvionali recenti (Olocene), che possono comprendere sedimenti caratterizzati da tessiture variabili da ghiaie sabbiose e/o sabbie a limi e argille.

Rispetto a quanto già scritto per il POC, i dati tessiturali ricavati dalle prove penetrometriche sono stati ulteriormente analizzati sia per quanto riguarda il primo stralcio attuativo (comparto n.1. già descritto nella Relazione geologica e sismica a corredo del PUA - geol. S. Sangiorgi, 2020), sia per questo secondo stralcio attuativo (comparto n.2).

In questo senso, la figura 3.2 rappresenta un aggiornamento delle sezioni litotecniche elaborate per l'ambito ANS-C 10. In particolare, sono rappresentate le sezioni che interessano il comparto 10.2 e cioè la sezione 1-1''' e la sezione 3-3' (elaborata per questo studio). È dunque possibile sintetizzare il seguente contesto litostratigrafico (a partire dalla superficie):

- ✓ dal p.c. fino a 1,5÷1,7 m → sedimenti più superficiali finisaturi, caratterizzati da condizioni di alterazione e/o essiccamento variabile da elevato a moderato ("strato 1"). Come noto, si tratta di una condizione da ritenersi generalmente reversibile;
- ✓ da 1,5÷1,7 m fino a 1,8÷2,3 m → sedimenti prevalentemente limoso argillosi con livelli e strati sabbiosi sciolti ("strato 2") parzialmente saturi (zona di frangia capillare);
- ✓ da 1,8÷2,3 m fino a 6,2÷7,0 m → sedimenti prevalentemente limoso argillosi scarsamente consistenti ("strato 4") con livelli e strati limoso sabbiosi poco addensati e saturi ("strato 3" e "strato 5");
- ✓ da 6,2÷7,0 m a fine prova (20 m) → sedimenti prevalentemente argillosi, con alternanze di intervalli scarsamente consistenti (es. "strato 6" e "strato 8") e relativamente più consistenti (es. "strato 7") con rare intercalazioni di strati limoso sabbiosi.

3.2 Contesto idrogeologico ed elementi di pericolosità idraulica

La tavola A.C.1.2b "Carta Idrogeologica" elaborata alla scala 1:25.000 per il PSC dei Comuni delle unioni "Reno – Galliera" e "Terre di Pianura", riporta la geometria della tavola d'acqua meno profonda (figura 3.3): si evince un blando deflusso sotterraneo diretto verso NE e un livello statico a circa 14 metri slm.

Nell'area di studio, la prima falda risulterebbe dunque caratterizzata da una soggiacenza media locale di circa 1,5÷2,0 metri. Si tratta, tuttavia, di una falda superficiale con mediocri caratteristiche idrogeologiche in termini di permeabilità e trasmissività, ospitata nei modesti intervalli di sedimenti limoso sabbiosi riscontrati a tale profondità. La ricarica è principalmente legata a ricarica per infiltrazione verticale e per infiltrazione dalla rete scolante limitrofa.

Le ulteriori indagini complessivamente eseguite nell'ambito hanno confermato il quadro idrogeologico sopra descritto. Le penetrometrie CPTe/CPTU eseguite nel comparto oggetto del primo stralcio attuativo (10.1) hanno infatti riscontrato presenza di acqua nei fori a profondità comprese tra 2,1÷2,2 metri. Queste prove sono state realizzate in un periodo caratterizzato da scarse precipitazioni meteoriche (luglio 2017). Anche le due prove CPTe eseguite per questo

studio sono state effettuate in un periodo piuttosto siccitoso, riscontrando una soggiacenza ancora compresa tra 2,0÷2,2 metri.

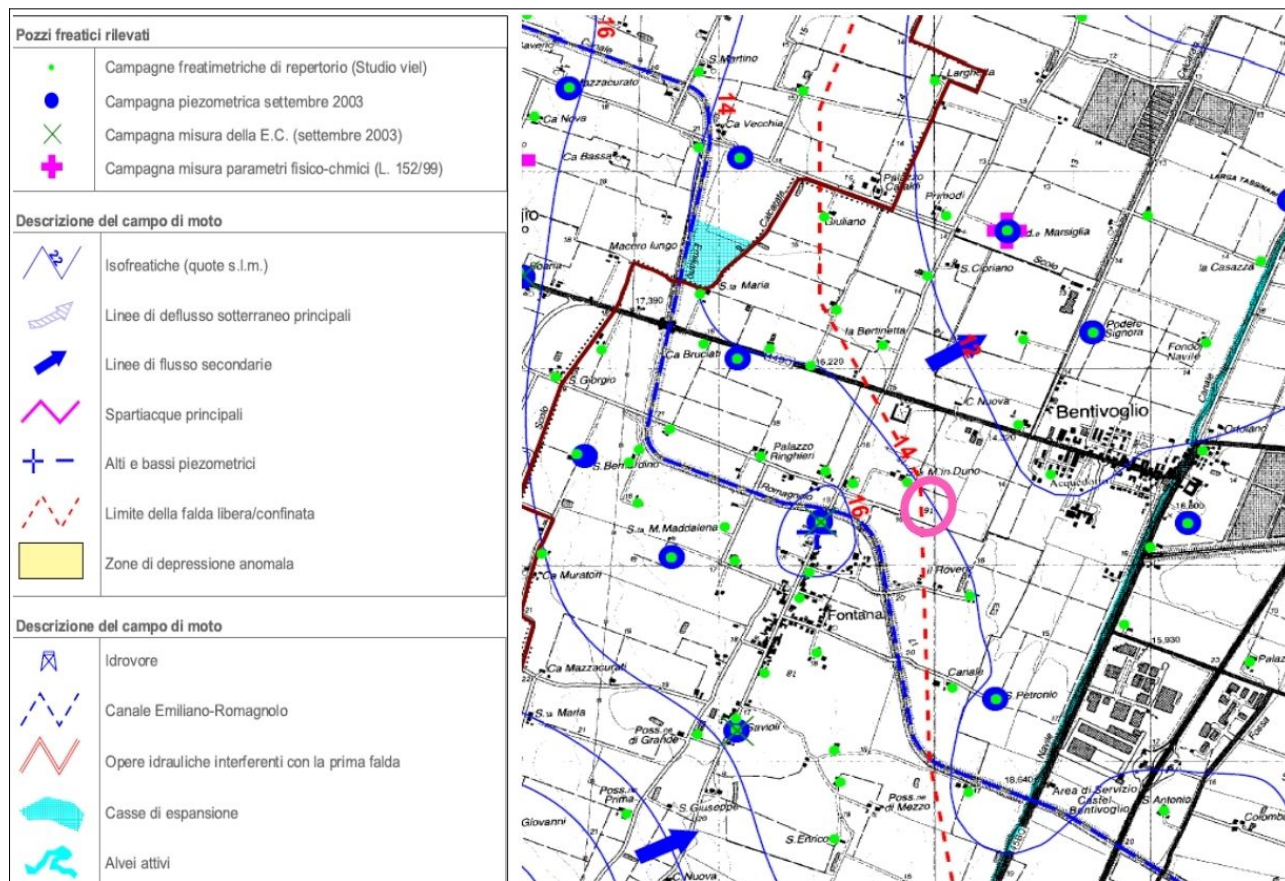


Figura 3.3 – Stralcio della Carta Idrogeologica – Tav. A.C.1.2b – alla scala 1:25.000, elaborata per il QC del PSC delle Unioni di Comuni “Reno – Galliera” e “Terre di Pianura”. L'area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

Dal punto di vista idraulico, la regimazione locale secondaria è fornita dai fossi di testata e trasversali dei campi agricoli. Il comparto 10.2 è delimitato da uno scolo delle “acque basse” mentre più a sud (a circa 200 metri) scorre il Canale Emiliano-Romagnolo. L'area di interesse rimane a circa 850 metri di distanza dal Canale Navile, situato verso est. Non sussistono, comunque, particolari criticità idrauliche. Ciò è confermato anche dalla cartografia prodotta per il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (Direttiva Europea 2007/60/CE), che inserisce l'area studiata nello scenario “P2” (alluvioni poco frequenti: TR 100-200 anni) relativamente al reticolo naturale (principale e secondario) e al reticolo secondario artificiale. La figura 3.4 riporta uno stralcio della <<Tavola 3 – Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti>> (foglio 1) alla scala 1:25.000, elaborato del PTM che rappresenta la pericolosità idraulica desunta dal PGRA e dalla pianificazione di bacino.

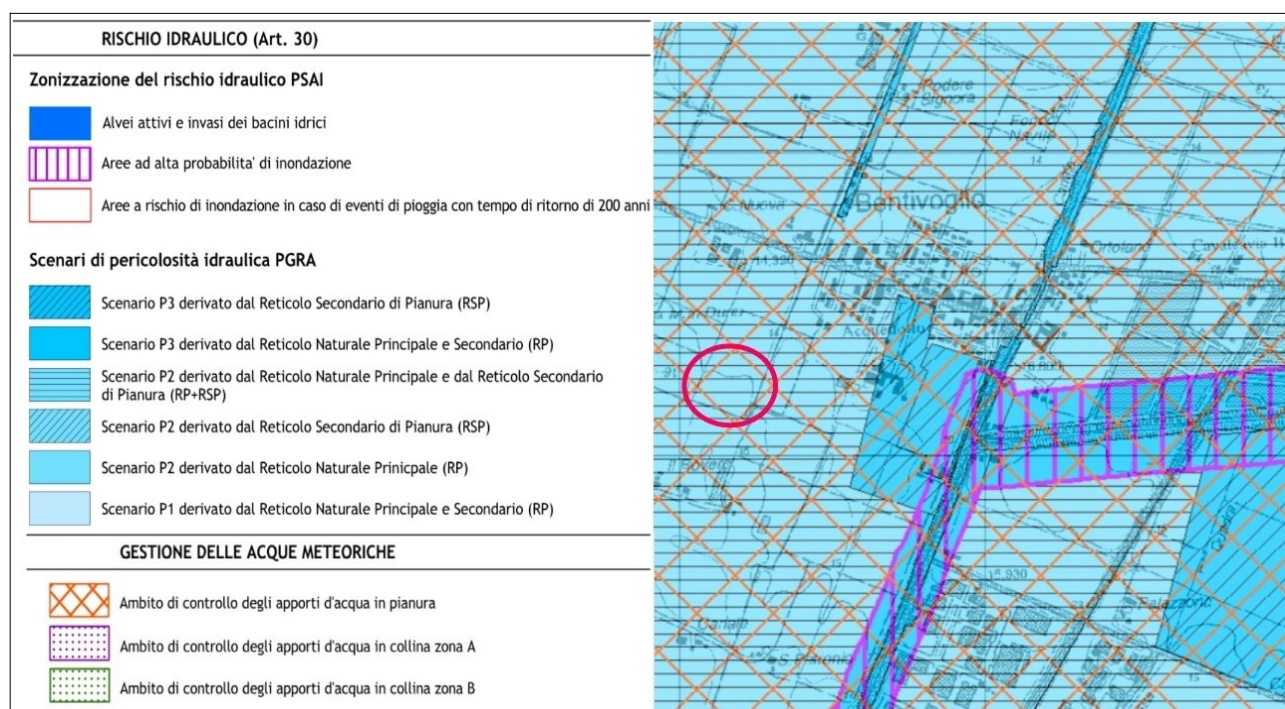


Figura 3.4 – Stralcio della cartografia del PTM di Bologna: <<Tavola 3 – Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti>> (foglio 1) alla scala 1:25.000

4 CATERIZZAZIONE SISMICA

4.1 Pericolosità sismica di base

L'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale è nota con la semplice sigla "ZS9" (2004), prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, elaborata riferendosi anche i più recenti background informativi sui terremoti ed in particolare le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane DISS² e il catalogo CPTI³.

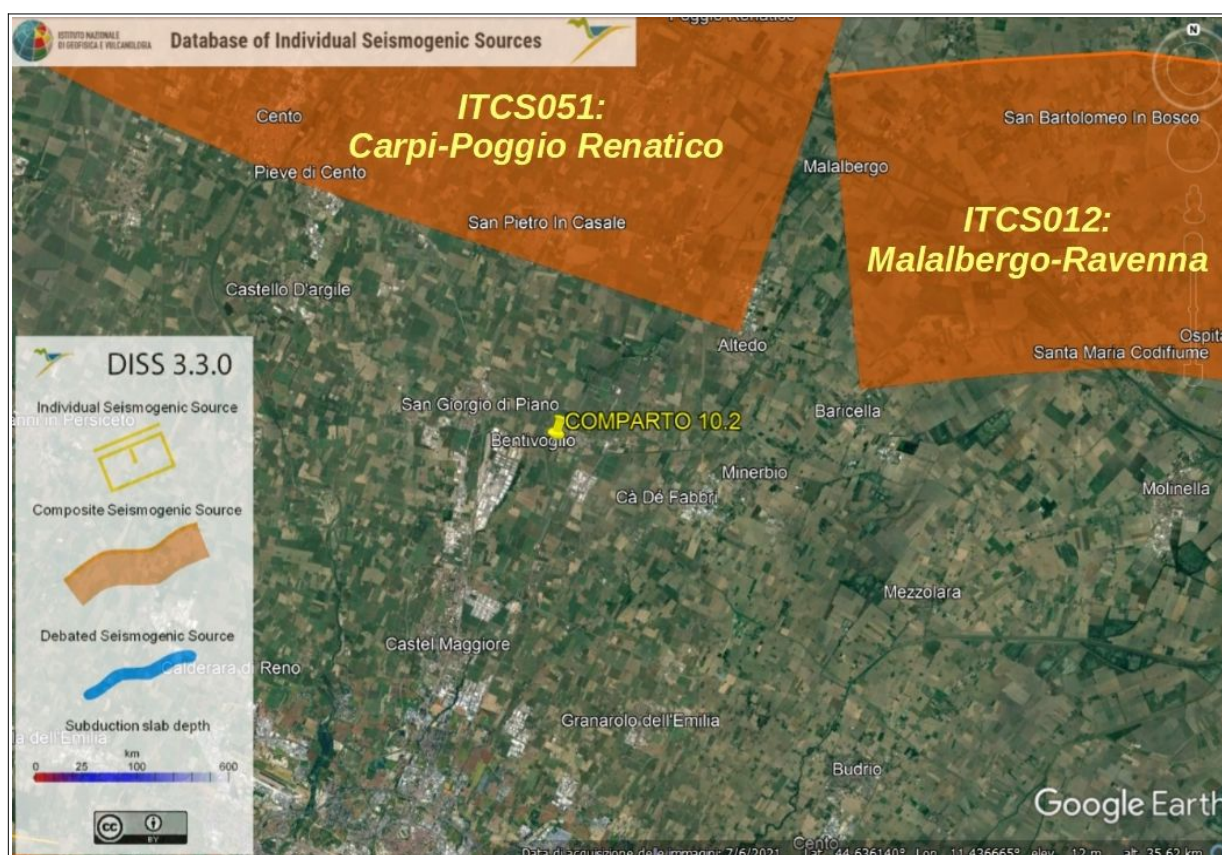


Figura 4.1 - Distribuzione delle sorgenti sismogeniche contenute in DISS 3.3.0 (foto aerea: Google Earth). Le sigle ITCS corrispondono alle zone sismogeniche composite

L'area di studio ricade nella macrozona sismogenica 912 (ZS9), con magnitudo massima attribuita $M = 6,14$; la sismicità è correlabile alla tettonica attiva del fronte compressivo del margine appenninico sepolto. Più nel dettaglio (figura 4.1) la banca dati DISS 3.3.0 indica che l'area studiata ricade a sud della sorgente sismogenica complessa denominata ITCS051 "Carpi-Poggio Renatico", alla quale vengono attribuiti rari terremoti storici di magnitudo M_w fino a 6,0. Questa

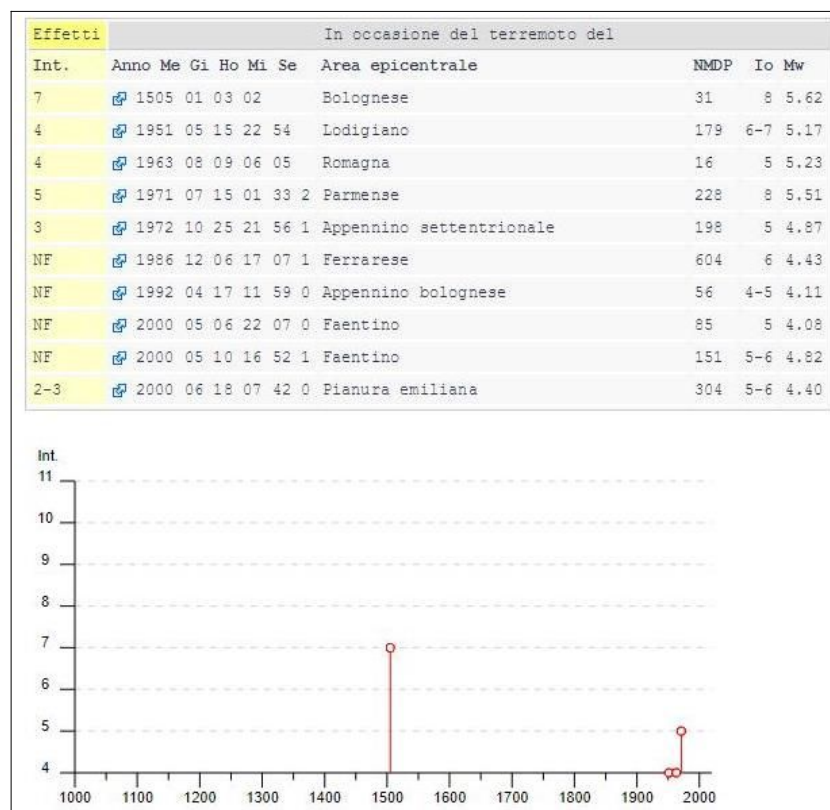
² <<Database of Potential Sources for Earthquake Larger than $M_{5.5}$ in Italy">> (Valensise e Pantosti, 2001)

³ <<Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani", Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002">>

sorgente composita include anche la faglia “Mirandola” recentemente riattivata (terremoti emiliani 2012), con tempi di ritorno (per eventi significativi) tuttavia non chiaramente valutabili.

Dai cataloghi storici e dalla Banca Dati delle intensità macrosismiche elaborato da INGV, per Bentivoglio è documentato un solo evento sismico di significativa intensità (terremoto bolognese del 1501, con intensità stimata pari a 7), come evidenziato nella figura 4.2. Questo sisma è peraltro ascrivibile alla sorgente sismogenica del margine appenninico emerso ITCS047 “Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme”.

Figura 4.2 - Diagramma temporale dei principali eventi sismici che hanno interessato Bentivoglio e le relative intensità macrosismiche (fonte: DBMI15 – scaricabile dal sito internet INGV)



La pericolosità sismica locale di riferimento, sia per la pianificazione territoriale (DGR 476/2021) sia per la progettazione di costruzioni (NTC 2018), viene inoltre definita mediante un approccio “sito dipendente” e basato su una “griglia di riferimento” di punti, costruita per l’intero territorio nazionale; ad ogni punto vengono attribuiti, a seconda del periodo di ritorno atteso per il terremoto, valori di a_g di riferimento al “bedrock rigido” ($a_{g,ref}$) e dei principali parametri “spettrali” da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica. La griglia di riferimento ed i dati di pericolosità sismica sono forniti dall’INGV e pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

Nello specifico, la $a_{g,ref}$ per l’area di studio è determinata sulla base delle coordinate corrispondenti grossomodo al baricentro dell’ambito in oggetto, ricavate con il supporto della georeferenziazione proposto dal programma on-line <<GeoStru Parametri Sismici>> (figura 4.3).

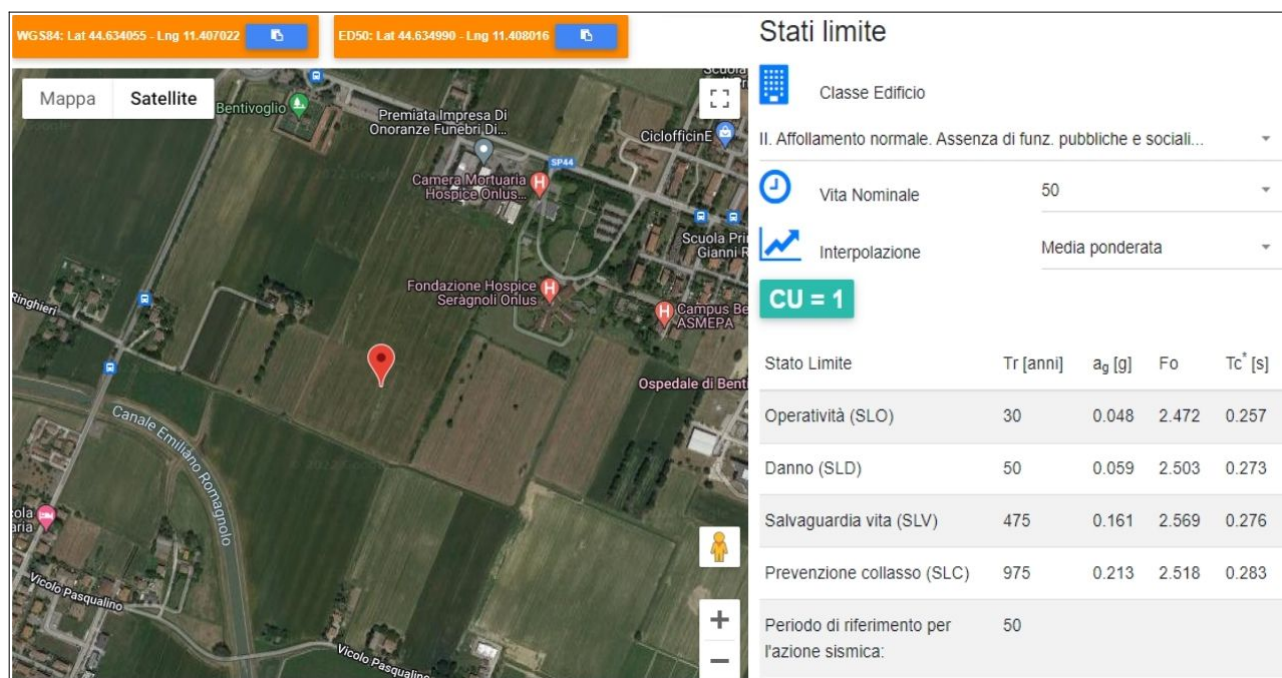


Figura 4.3 – Determinazione dei parametri sismici di base da utilizzare per l'analisi della risposta sismica locale (DGR 476/2021) e per le verifiche dell'azione sismica (progettazione ordinaria)

4.2 Gli studi di pericolosità sismica elaborati per la pianificazione territoriale e urbanistica

4.2.1 Gli Indirizzi tecnici regionali di riferimento: DGR 476/2021

La Regione Emilia-Romagna è dotata di indirizzi tecnici di riferimento per gli studi di pericolosità e microzonazione sismica a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica: la DAL 112/2007 e le successive deliberazioni d'aggiornamento (DGR 2193/2015; DGR 630/2019; DGR 476/2021). Con l'emanazione delle Delibere successive alla DAL 112/2007 vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Tali aggiornamenti hanno infatti tenuto conto delle successive Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/1/2008), delle ulteriori esperienze derivate dall'applicazione della DAL 112/2007 e delle specifiche esperienze seguite agli eventi sismici italiani di L'Aquila 2009 e della pianura emiliana del 2012. In sintesi, le principali novità consistono:

- nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate ("livello 2");
- nella definizione di fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale SA_1 , SA_2 , SA_3 , SA_4 (per intervalli di periodo T rispettivamente di 0,1-0,5s, 0,4-0,8s, 0,7-1,1s, 0,5-1,5s);
- nella definizione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner SI_3 (per l'intervallo di periodo T compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- nella definizione dell'input sismico (a_g al sito di riferimento) che ora è definito in base ai

valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a $0,05^\circ$ (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008);

- nella predisposizione di cartografie delle frequenze naturali (per gli studi territoriali di “livello 1”).

I più recenti aggiornamenti agli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno infine riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di terzo livello. Rispetto ai precedenti indirizzi, approvati con DGR 630/2019, la differenza consiste quindi nella sostituzione dell'Allegato A4.

4.2.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitano di Bologna

Il PTM di Bologna è dotato di uno studio di pericolosità sismica preliminare relativo a tutto il territorio amministrativo competente. Gli esiti di tali studi sono descritti nel Quadro Conoscitivo e ulteriormente sintetizzati nella tavola 4 “Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali” alla scala 1:65.000 (per la pianura), con stesura approvata nel maggio 2021. Tale tavola costituisce il primo livello di approfondimento sismico richiesto dagli Indirizzi regionali di riferimento e dalla LR 24/2017 e identifica gli scenari di pericolosità sismica locale dell'intero territorio provinciale. La citata Tavola fornisce anche le prime indicazioni sui limiti e sulle condizioni richieste per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.

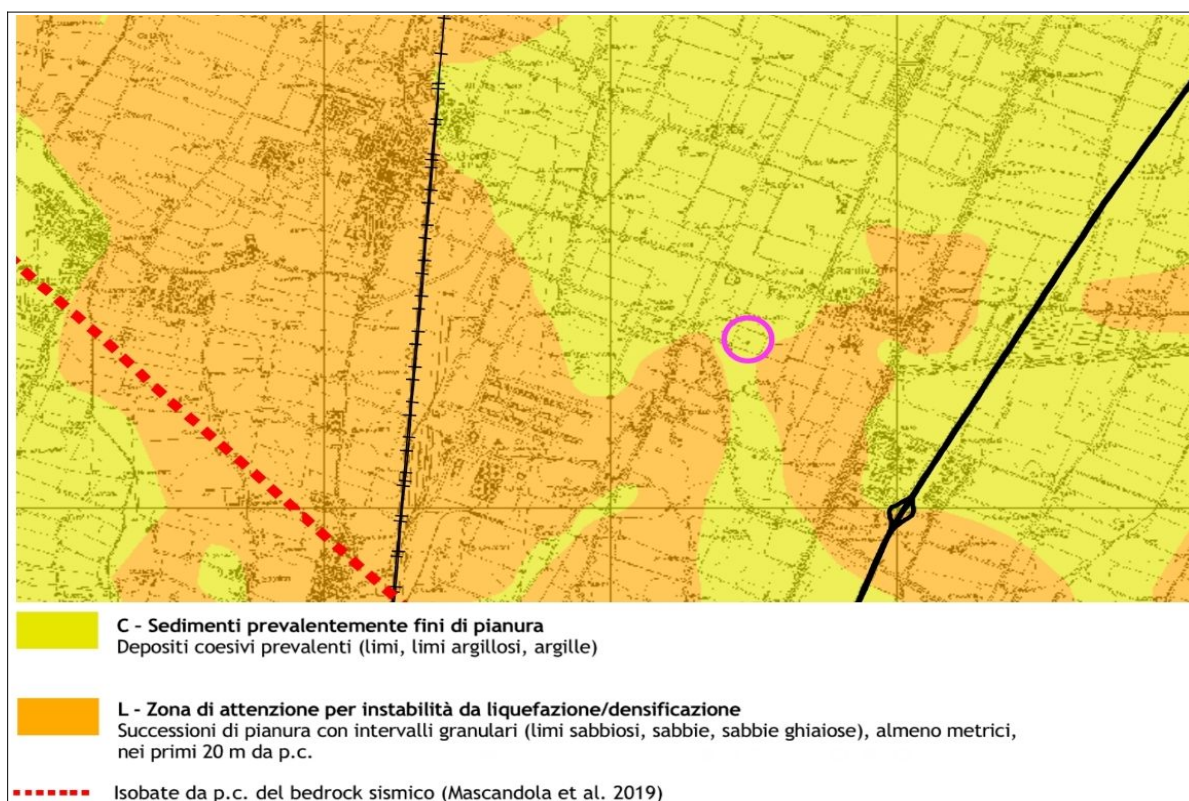


Figura 4.4 – Stralcio della tavola 4 “Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali” alla scala 1:65.000 (foglio 1). L'area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

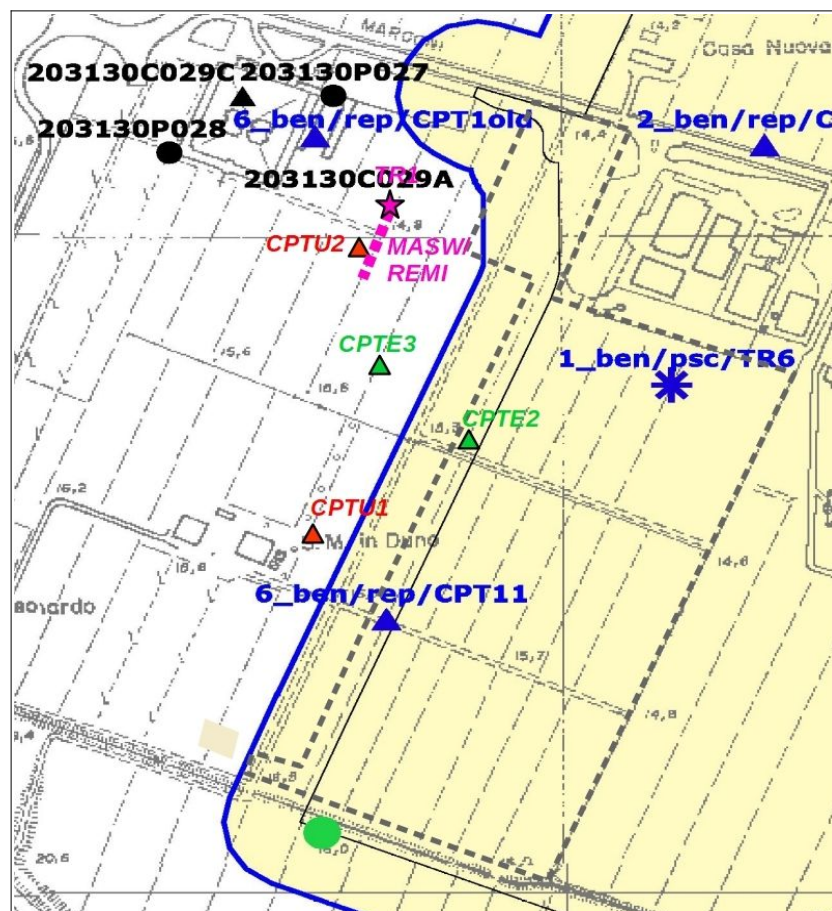
Occorre rammentare che i contenuti sul “rischio sismico” riportati nel PTM rappresentano un ulteriore aggiornamento degli approfondimenti sismici preliminari già aspletati in precedenza per il PTCP (vedi <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>>, approvata nel 2013).

La tavola 4 del PTM include l'ambito in oggetto nell'areale “C” e cioè in <<sedimenti prevalentemente fini di pianura (depositi coesivi prevalenti – limi, limi argillosi, argille)>> (figura 4.4). Per tale area, ai sensi della DGR 476/2021 sono ritenuti sufficienti approfondimenti sismici di “livello 2” da espletare nelle fasi di pianificazione territoriale/urbanistica comunale.

4.2.3 La microzonazione sismica comunale vigente

Il Comune di Bentivoglio dispone di uno studio di microzonazione sismica di “livello 2” elaborato per a supporto della Variante al PSC di Bentivoglio in materia di rischio sismico (MS 2013). Lo studio è stato tuttavia aggiornato nel 2018 ai sensi OCDPC 171/2014 e dell'DGR 1227/2015. Le figure 4.5 e 4.6 propongono, rispettivamente, uno stralcio della tavola 1a del PSC "Aree suscettibili di effetti locali" alla scala 1:5.000 e della relativa legenda: si evince che l'area di studio ricade nella zona “C” con possibilità di amplificazione stratigrafica e di cedimenti post sisma. Per l'area di studio non vengono, pertanto, richiesti approfondimenti sismici di “livello 2”.

Figura 4.5 – Stralcio della Tav.1a del PSC (aree suscettibili di effetti locali). Sono inoltre sovrapposte le prove “in situ” eseguite a supporto della proposta di inserimento nel POC dell'ambito ANS-C 10 (in rosso CPTU; in verde CPTE; in fuxia MASW/REMI e HVSR. Il limite approssimativo dell'ambito è rappresentato con il tratteggiato in grigio



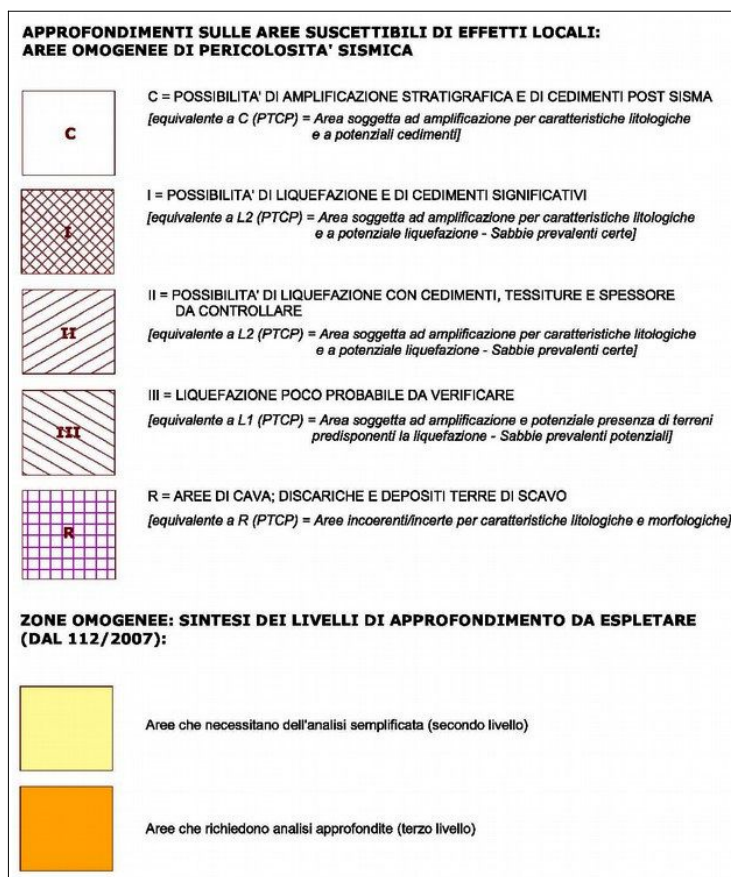


Figura 4.6 – Stralcio della legenda della Tav.1a del PSC (aree suscettibili di effetti locali)

Tale contesto di pericolosità sismica viene confermato anche nel successivo aggiornamento della MS di livello 2 del 2018 (OCDPC 171/2014; DGR 1227/2015) non ancora recepito nella pianificazione comunale.

5 APPROFONDIMENTI SISMICI (DGR 476/2021)

5.1 Approfondimenti sismici di primo e secondo livello

Come già premesso, lo studio geologico e sismico (Sangiorgi, 2017) elaborato a corredo della proposta di inserimento dell'area nel POC dell'ambito ANS-C 10, ha consentito un ulteriore approfondimento della pericolosità sismica locale ai sensi della DGR 2193/2015. Più in particolare le analisi si sono concentrate nel comparto 10.1, alla luce del primo stralcio attuativo previsto. In questo senso, sono state effettuate prove geognostiche/geofisiche “in situ” (penetrometrie CPTE/CPTU; stendimento sismico MASW; registrazione sismica HVSR). Sono state eseguite anche analisi numeriche della RSL e verifiche quantitative della liquefacibilità. Gli esiti hanno dimostrato una pericolosità di liquefazione “bassa” ($LPI < 2$; $LSN < 6$) e cedimenti post sisma cumulativi non significativi (< 2 cm). Occorre evidenziare come tali verifiche siano risultate più cautelative (in termini di input sismici considerati) anche rispetto alle verifiche effettuabili ai sensi delle NTC (per opere “ordinarie”). Come vedremo, anche le ulteriori prove CPTE eseguite non riscontrano liquefacibilità dei sedimenti attraversati.

Per questo secondo stralcio attuativo sono state eseguite due ulteriori penetrometrie CPTE e un'ulteriore registrazione sismica HVSR nelle aree di previsione edificatoria del comparto 10.2. Queste indagini hanno sostanzialmente confermato il contesto litostratigrafico estrapolabile all'intero ambito.

Per quanto riguarda la risposta sismica locale, la seguente figura 5.1 riporta il confronto tra le tracce spettrali H/V ricavate dalle registrazioni HVSR di repertorio (in rosso) e lo spettro H/V ottenuto dalla nuova registrazione HVSR eseguita nel comparto 10.2. Gli esiti sono ben correlabili ed evidenziano una massima intensità spettrale a basse frequenze (f_0 tra $0,7 \div 0,9$ Hz) e correlabile a riflettori sismici profondi (> 100 metri). Non si riscontrano ulteriori amplificazioni a frequenze medio alte a dimostrare l'assenza di riflettori sismici significativi superficiali.

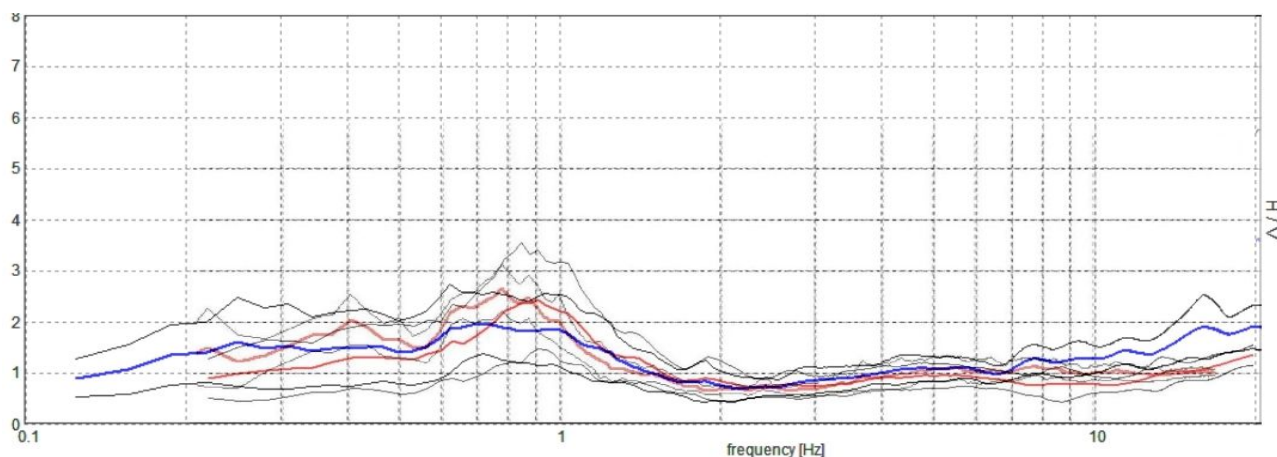
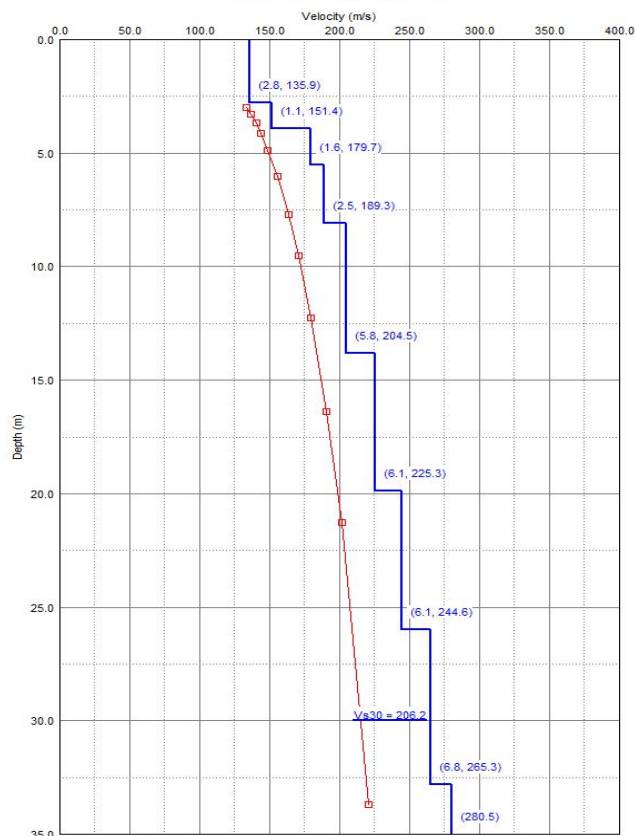


Figura 5.1 - Confronto tra gli spettri H/V di repertorio (registrazioni sismiche HVSR disponibili TR1 e TR6) rappresentate in rosso e lo spettro H/V della nuova registrazione TR1(2022) rappresentata in blu

La stima della velocità delle onde di taglio dei sedimenti è invece ottenuta dalla prova MASW/Re.Mi eseguita nel settore nord dell'ambito. L'indagine ha fornito esiti di Vs30 pari a circa 206 m/s (figura 5.2).

Figura 5.2 - Modello sismostratigrafico ottenuto dalla prova sismica MASW/ReMi eseguita nell'area di studio



Sulla base dei dati disponibili è dunque possibile fornire un aggiornamento delle analisi di "livello 2" ai sensi della DGR 476/2021 (allegato A2). Per quanto riguarda la risposta sismica locale, l'area di interesse può essere ascrivibile al macro contesto di "PIANURA 2" (<<settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 da p.c. e dal tetto del substrato rigido a circa 150 m da p.c.>>).

La seguente tabella 5.1 riporta i fattori di amplificazione semplificati (da abachi RER) attribuibili all'area oggetto di studio, considerando una Vs30 ≈200 m/s:

Vs30 (m/s)	Pga	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
200	1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3

Tabella 5.1

Per la progettazione, gli esiti sismostratigrafici consentono di quantificare la risposta sismica locale basandosi sull'approccio semplificato indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2018). In questo senso, la Vs equivalente pari a Vs30 =206 m/s stimata per l'area di studio permette di includere l'area studiata nella "categoria di sottosuolo C".

5.2 Approfondimenti sismici di terzo livello: verifiche quantitative della liquefazione

5.2.1 Aspetti generali

Il contesto di pericolosità sismica locale non richiede ulteriori approfondimenti sismici di “livello 3”. Si è tuttavia deciso di espletare ulteriori verifiche quantitative della liquefacibilità e dei sedimenti post sisma, vista la disponibilità di dati numerici derivati da prove penetrometriche CPTe.

L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine “liquefazione” si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente, $M > 5.5$) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni “non drenate” durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e la sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni); anche i cedimenti riscontrati per gli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni⁴. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare

⁴ Fonte: “Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012”, C. Crespellani et Al., 2012.

ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche online nel sito del SGSS).

5.2.2 Metodologia delle verifiche

Il presente studio, ha elaborato le analisi del rischio di liquefazione mediante correlazioni empiriche che si basano sui risultati delle prove penetrometriche CPTE eseguite nel comparto 10.2.

Il vantaggio dell'uso delle prove penetrometriche elettriche è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità rispetto ad altre indagini, nella relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità, con informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia. Gli esiti delle prove CPTE sono stati utilizzati per la stima del rischio di liquefazione, procedendo secondo le seguenti fasi:

- 1) stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL);
- 2) stima dei cedimenti post sisma indotti da densificazione volumetrica;
- 3) analisi della pericolosità e del rischio di liquefazione sito specifica attraverso la stima dei parametri LPI (Liquefaction Potential Index).

La stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL) è definito dalla relazione:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

con:

$CRR_{7.5}$ = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta q_t , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità);

CSR = rapporto di sollecitazione ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale del suolo (a_{max}). Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di $M = 7,5$:

$$CSR = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d$$

K_{σ} = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor)

MSF = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor) da applicare per sismi con magnitudo diverse da 7,5.

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL. Le verifiche hanno considerato il metodo di calcolo di Boulanger & Idriss (2014), ritenuto sufficientemente cautelativo rispetto ad altri metodi empirici.

Si rammenta che la punta elettrica rileva l'interfaccia tra diversi tipi di terreno con un ritardo strumentale che risulta funzione della rigidità del suolo. In terreni maggiormente, rigidi si avrà una

zona più ampia di influenza sulle misure. Ciò che appare sul profilo CPTe, è una rapida variazione dei valori di resistenza di punta (q_t) attraverso queste zone di transizione sabbie/argille. Si è accertato che i dati CPTe raccolti attraverso queste zone di transizione non risultano veramente rappresentativi dei sedimenti, in quanto i dati sono in transizione tra strati a differente rigidità. Pertanto, quando i dati CPTe vengono elaborati attraverso gli algoritmi di liquefazione, l'esito non risulta effettivamente rappresentativo degli intervalli sedimentari che ricadono nelle zone di transizione. Questa condizione si traduce in una classificazione di liquefacibilità generalmente sovrastimata, come verificato da recenti test in situ effettuati in aree che hanno subito recenti eventi sismici significativi (es. Imperial Valley e Mississippi River, USA; Christchurch, NZ).

Per questo motivo, il software utilizzato per le verifiche di liquefacibilità è in grado di escludere parzialmente gli intervalli di sedimenti classificati nelle zone di transizione, basandosi sulla velocità di variazione dell'indice I_c dei sedimenti attraversati. Se si riscontra una rapida variabilità di I_c , con valori che sono rappresentativi della zona di transizione tra sabbie e argille ($2,0 < I_c < 3,0$), i dati CPTU sono molto probabilmente all'interno di una zona di transizione tra sabbia e argilla. Ciò detto, nel calcolo di FSL si sono considerate le seguenti condizioni di input:

- si è utilizzata la a_{max} al suolo ottenuta dalla microzonazione semplificata ai sensi della DGR 476/2021 ($a_{max} = 0,27g$);
- si sono implementati gli esiti delle quote d'acqua ricavate dalle indagini penetrometriche;
- sulla base della pericolosità sismica di base, si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ (cfr. zonizzazione macrosismica "ZS9").

Per quanto riguarda la stima dei cedimenti post sisma, in particolare nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi, e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta (q_{c1N})_{cs} e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 5.3).

Per i sedimenti a comportamento fine, il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

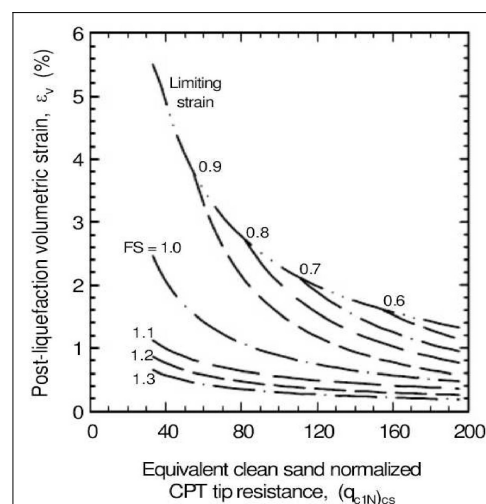
Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M / CSR_M = CRR_{7,5} / CRS_{7,5}$ (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$. Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_{vol} = [0.8 - 2.66 \log (FS)] / [0.33 A (Q_{tn})^3]$$

$$A = 10 - 9 \log (OCR)$$

When $FS \leq 0.84$ set $r_u = 1.0$ & limit $\varepsilon_{vol} \leq 1\%$

Figura 5.3 – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002)



Il rischio di liquefazione viene valutato mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982).

L'Indice di Potenziale Liquefazione si calcola per una profondità "critica" fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[con: $W(z)$ fattore di peso della profondità $= 10 - 0.5z$; F_1 variabile $= 1 - FSL$ (per $FSL < 1,2$) oppure $F_1 = 0$ per $FSL > 1,2$; z = profondità dello strato considerato]

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e quantifica i possibili effetti della liquefazione secondo classi di rischio, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, dello spessore e del valore di FSL degli strati liquefacibili.

5.2.3 Esiti delle verifiche

Le verifiche non hanno riscontrato particolari situazioni di criticità. Non hanno infatti riscontrato presenza di sedimenti granulari liquefacibili (cioè con $FS < 1$) di spessore significativo. In questo senso per le prove CPTE1 e CPTE2 eseguite, gli esiti cumulativi di LPI (vedi figura 5.4) risultano contenuti entro la classe di rischio "basso" e cioè $LPI < 2$ (rispettivamente $LPI = 1,6$ e $LPI = 1,1$).

I cedimenti post sisma (figura 5.15), infine, risultano anch'essi scarsamente significativi in termini di possibile interazione con i manufatti da costruire, sempre in considerazione del fatto che si tratta di valori cumulativi.

Si rammenta come anche le precedenti verifiche espletate per il comparto 10.1 (da prove CPTE/CPTU) abbiano ricavato una pericolosità di liquefazione "bassa" e cedimenti post sisma cumulativi non significativi (< 2 cm).

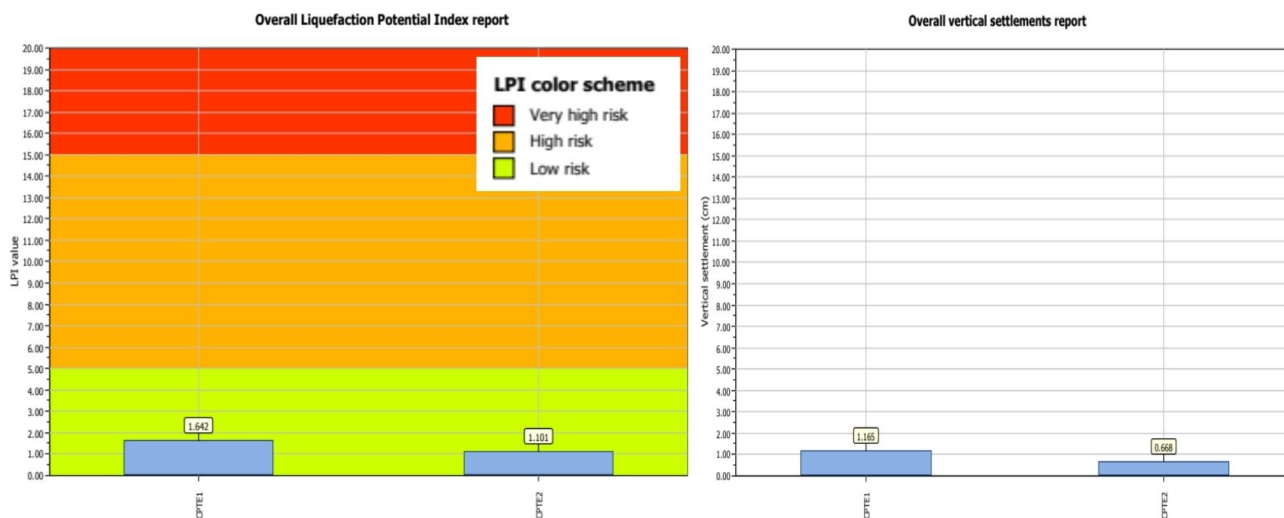


Figura 5.4 – Esiti cumulativi dell'indice LPI e dei cedimenti post sisma ottenuti nelle verticali CPT

Per i manufatti previsti, le analisi indicano un rischio complessivamente basso. In questo senso, la figura 5.5 rappresenta la sintesi grafica delle verifiche effettuate per la prova CPT1, risultata la più “severa” come risultati: si evidenziano soltanto rari livelli limoso sabbiosi liquefacibili di spessore centimetrico nei depositi alluvionali più superficiali (caratterizzati da sedimenti prevalentemente limoso argillosi) e alcuni intervalli sabbioso limosi più profondi e ben confinati (a oltre -13 metri dal p.c.).

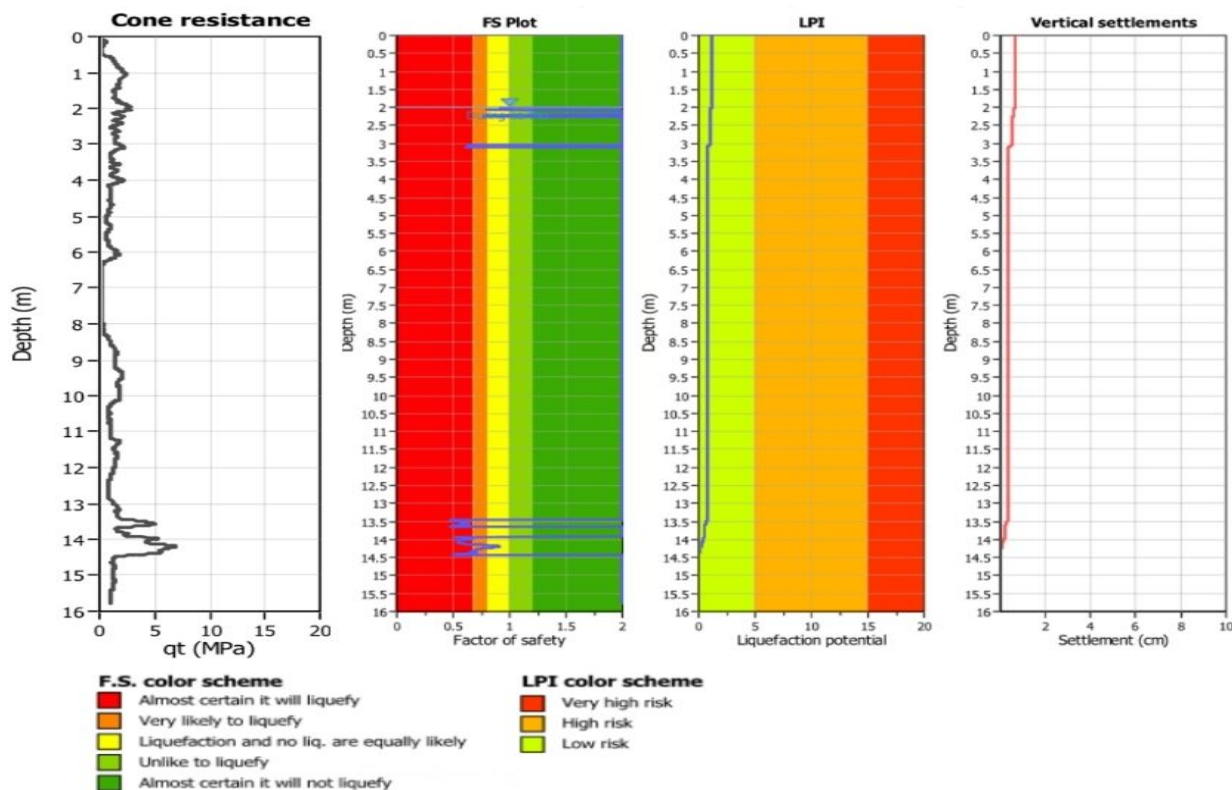


Figura 5.5 – Plottaggio delle verifiche di liquefazione e cedimenti post sisma per la prova CPT1 (input derivati da analisi semplificata DGR476/2021 - magnitudo 6.14)

6 ORIENTAMENTI GEOTECNICI

6.1 Modellazione geotecnica di massima

I dati di sottosuolo derivati dalle penetrometrie disponibili consentono di ricavare una caratterizzazione di massima dei sedimenti attraversati, in sostanza costituito nei primi 20 metri (profondità investigata) da sedimenti prevalentemente fini (argille e limi) con rare intercalazioni di limi e limi sabbiosi.

Le prove penetrometriche CPTe consentono infatti di definire le caratteristiche tessiturali dei sedimenti attraversati attraverso la classificazione bilogaritmica dei terreni proposta da P. K. Robertson (1985; 1990).

La figura 6.1 ripropone le due sezioni litotecniche di sintesi elaborate per il comparto 10.2 e cioè la sezione 1-1' (estensione della sezione già prodotta per il comparto 10.1) e la sezione 3-3' (nuovo modello elaborato per il comparto 10.2). È dunque possibile sintetizzare il seguente contesto litostratigrafico (a partire dalla superficie):

- ✓ dal p.c. fino a 1,5÷1,7 m → sedimenti più superficiali fini insaturi, caratterizzati da condizioni di alterazione e/o essiccamento variabile da elevato a moderato ("strato 1"). Come noto, si tratta di una condizione da ritenersi generalmente reversibile;
- ✓ da 1,5÷1,7 m fino a 1,8÷2,3 m → sedimenti prevalentemente limoso argillosi con livelli e strati sabbiosi sciolti ("strato 2") parzialmente saturi (zona di frangia capillare);
- ✓ da 1,8÷2,3 m fino a 6,2÷7,0 m → sedimenti prevalentemente limoso argillosi scarsamente consistenti ("strato 4") con livelli e strati limoso sabbiosi poco addensati e saturi ("strato 3" e "strato 5");
- ✓ da 6,2÷7,0 m a fine prova (20 m) → sedimenti prevalentemente argillosi, con alternanze di intervalli scarsamente consistenti (es. "strato 6" e "strato 8") e relativamente più consistenti (es. "strato 7") con rare intercalazioni di strati limoso sabbiosi.

Le prove CPTe/CPTU consentono anche la caratterizzazione meccanica dei sedimenti attraversati e in questo senso la figura 6.2 riporta le principali correlazioni⁵ utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti attraversati.

Ai fini della successiva progettazione degli interventi, le NTC vigenti e gli indirizzi in materia (AGI; DM 11/03/1988) esplicitano la necessità di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i sedimenti che costituiscono il "volume significativo", inteso come parte del sottosuolo influenzata direttamente o indirettamente dalla costruzione dei manufatti di progetto.

⁵ Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010

Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

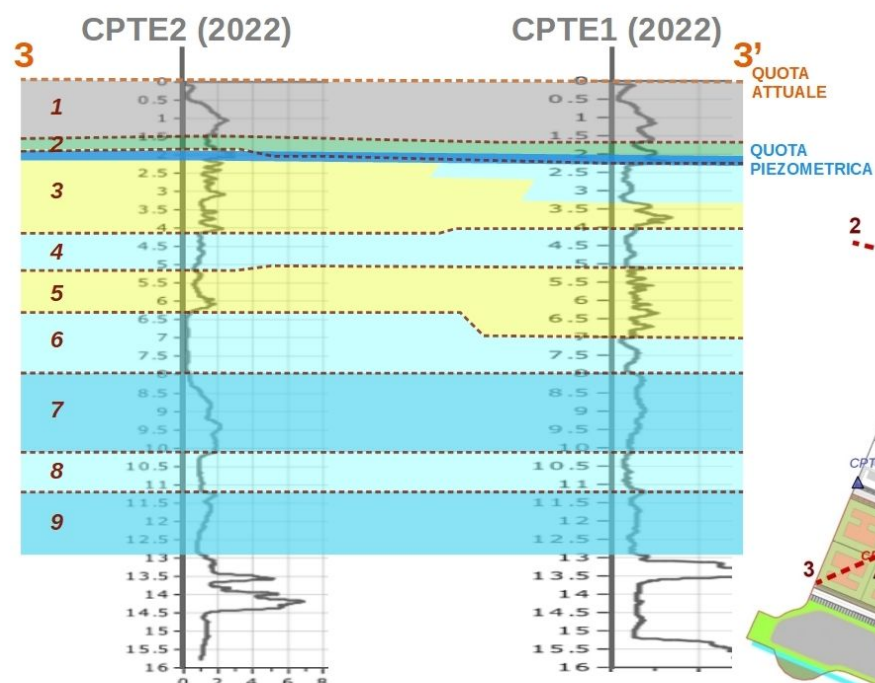
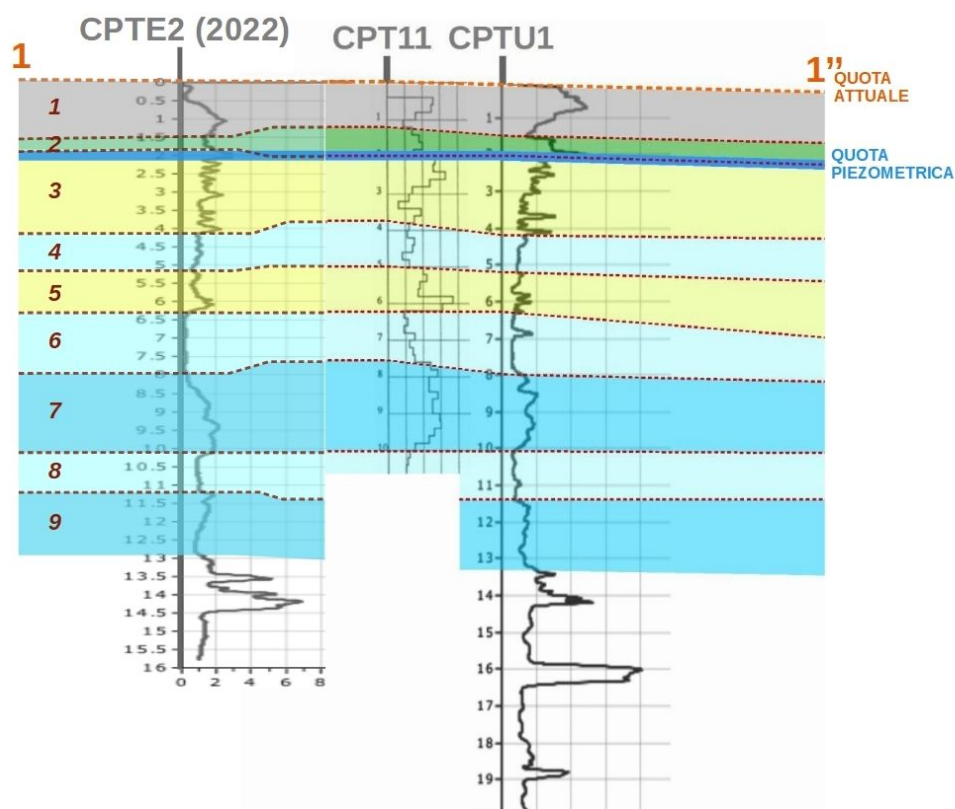


Figura 6.1 – Sezioni lito-geotecniche elaborate per l'area di studio (in grigio: intervallo insaturo essiccato e/o più alterato; in verde: zona di frangia capillare; in giallo: limi argillosi con livelli/strati limoso sabbiosi; in azzurro chiaro: argille scarsamente consistenti; in azzurro scuro: limi/argille più consistenti)

Unit Weight, g (kN/m³) :: $g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$ where g_w = water unit weight Permeability, k (m/s) :: $I_c < 3.27$ and $I_c > 1.00$ then $k = 10^{0.952-3.04 \cdot I_c}$ $I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ then $k = 10^{-4.52-1.37 \cdot I_c}$ N_{SPT} (blows per 30 cm) :: $N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 \cdot I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 \cdot I_c}}$ Young's Modulus, E_s (MPa) :: $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ (applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$) Relative Density, D_r (%) :: $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$ State Parameter, ψ :: $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$ Peak drained friction angle, ϕ (°) :: $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ (applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)	:: 1-D constrained modulus, M (MPa) :: If $I_c > 2.20$ $\alpha = 14$ for $Q_{tn} > 14$ $\alpha = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$ $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$ If $I_c \leq 2.20$ $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) :: $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) :: $V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) :: $N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r)$ or user defined $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) :: $S_{u(rem)} = f_s$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: Overconsolidation Ratio, OCR :: $k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \quad \text{or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)
---	--

Figura 6.2 – Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici da prove CPTE/CPTU

La figura 6.3 riporta gli esiti della modellazione geotecnica (principali parametri meccanici) ricavata dalle prove CPTE eseguite nel comparto 10.2 (e dalla prova CPTU1 eseguita nel comparto 10.1) fino alla profondità di circa -10 metri. Gli esiti della modellazione geotecnica completi sono invece riportati in allegato alla presente Relazione.

Si precisa che il sottosuolo è stato necessariamente semplificato in strati omogenei (layer) ai quali vengono attribuite le caratteristiche geotecniche medie.

Occorre infine segnalare gli esiti di resistenza alla punta q_t “anomali” riscontrati nella prova CPTE2 nell'intervallo -6,2÷8,0. Si tratta, infatti di valori molto bassi <0.2 MPa mai riscontrati nelle altre prove limitrofe e presumibilmente imputabili ad anomalie nell'acquisizione. Nella fase di progettazione si ritiene tuttavia necessario effettuare ulteriori indagini geognostiche di verifica.

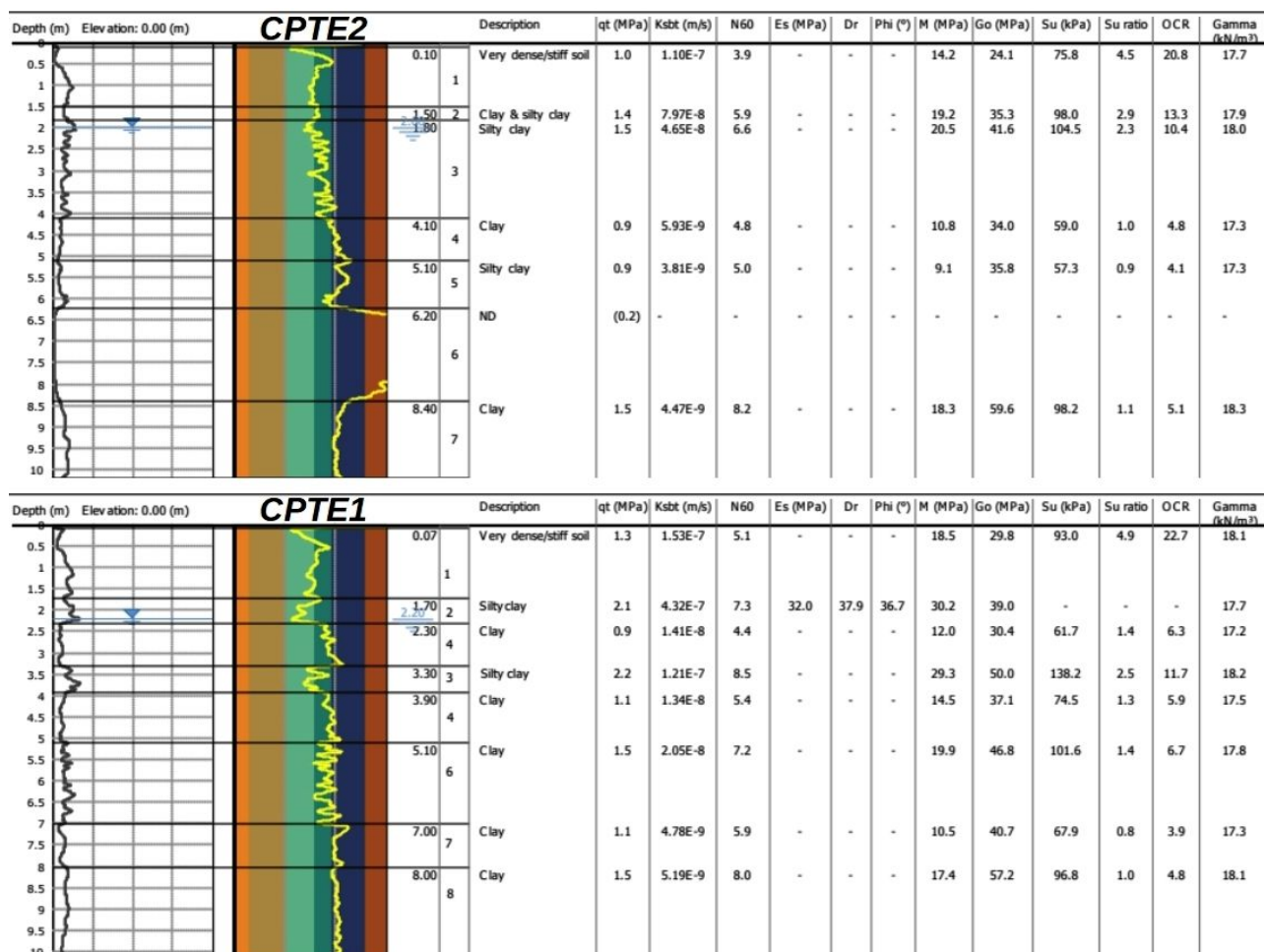


Figura 6.3 – Caratterizzazione geotecnica ricavata dalle penetrometrie CPT (fino a -10 m)

6.2 Ulteriori indicazioni geotecniche

La caratterizzazione geotecnica sopra descritta è da ritenersi esclusivamente di massima e dovrà essere necessariamente approfondita in sede di progettazione esecutiva degli interventi, ai sensi delle vigenti NTC.

Il secondo stralcio attuativo prevede la realizzazione di edifici dotati di opere di fondazione. Per la progettazione delle costruzioni si dovranno pertanto espletare ulteriori indagini e analisi finalizzate all'elaborazione delle verifiche geotecniche. Per questa fase di pianificazione attuativa è tuttavia opportuno fornire alcune indicazioni preliminari, utili alla progettazione delle opere di fondazione.

Come già descritto, le indagini penetrometriche hanno attraversato sedimenti più superficiali fini (limi e argille) insaturi e caratterizzati da condizioni di alterazione e/o essiccamento variabile, da elevato a moderato (vedi "strato 1"). Occorre rammentare che l'essiccamento di sedimenti fini e coesivi è una condizione generalmente reversibile, soprattutto se interessa terreni molto superficiali, dove il grado di umidità può facilmente variare per molteplici cause. Inoltre, la

modificazione del grado di umidità nei sedimenti argillosi può comportare consistenti variazioni volumetriche. Per questa condizione, è consigliabile prevedere una quota di incastro delle fondazioni ad almeno -120 cm dall'attuale piano campagna, per limitare le possibili conseguenze ai maufatti correlabili a variazioni volumetriche differenziali (per essiccamento/rigonfiamento) dei sedimenti. Tale quota potrà tuttavia essere ridotta prevedendo un'adeguata sistemazione e/o sostituzione dei terreni di sottofondazione.

Le penetrometrie hanno inoltre riscontrato intervalli di sedimenti fini (argille e limi) caratterizzati da scarsa consistenza, con resistenze medie alla punta $q_t < 1$ MPa (vedi "strato 4" e "strato 6"). Per questo motivo, le indagini da effettuare per la progettazione degli interventi edificatori dovranno stimare l'entità dei cedimenti attesi (assoluti e/o differenziali).

Si può comunque già affermare che le caratteristiche degli edifici previsti dal piano attuativo, consentono di adottare fondazioni dirette, opportunamente dimensionate. È tuttavia consigliabile procedere con ulteriori verifiche dei cedimenti in fase di progettazione costruttiva dei singoli interventi, sulla base degli esiti delle ulteriori indagini in situ e una volta note le effettive pressioni di progetto degli edifici da realizzare.

Il progetto attuativo prevede anche la realizzazione di opere di urbanizzazione e in particolare la realizzazione dei parcheggi, della viabilità e della rete fognaria (acque bianche e nere).

Per quanto riguarda la realizzazione della nuova viabilità prevista per l'urbanizzazione, occorre premettere che il dimensionamento delle sovrastrutture stradali è necessariamente dipendente dalle caratteristiche di sottofondo e in particolare dalla qualità portante di quest'ultima, cioè dalla sua capacità di sopportare gli stati tensionali derivanti dalla diffusione in profondità dei carichi superficiali ripetuti (traffico), senza subire deformazioni tali da compromettere la funzionalità della pavimentazione. Dal punto di vista pratico, il traffico induce sul sottofondo solo deformazioni recuperabili e pertanto il comportamento sforzo/deformazione per una strada può essere calcolato considerando la teoria dell'elasticità. Ciò detto, la stima della capacità portante non è di semplice quantificazione e può essere definita mediante prove empiriche (prove su piastra; classificazione del terreno; prove CBR; ecc.) correlate con il traffico e gli spessori della pavimentazione (figura 6.4).

Figura 6.4 – Classi di portanza del sottofondo secondo il catalogo delle pavimentazioni CNR

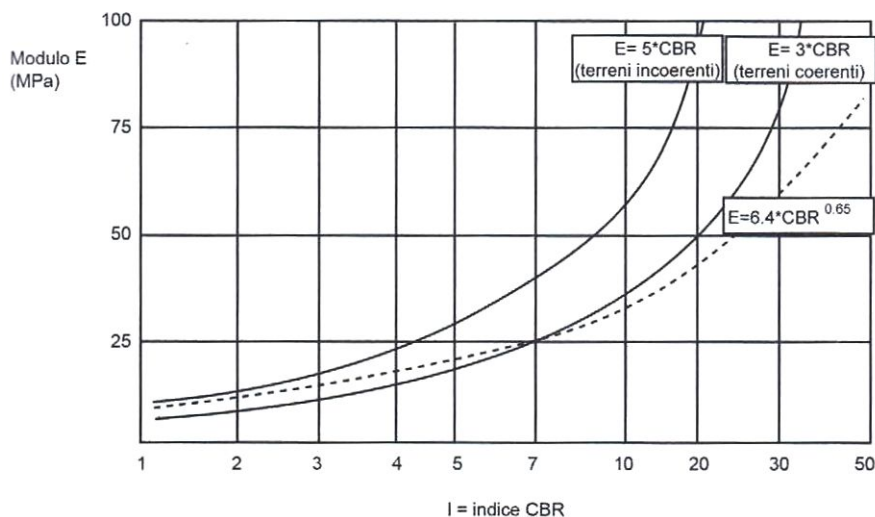
Classe	CBR (%)	M_r (N/mm ²)	K (kPa/mm)
Scadente	0-3	30	20
Scarsa	4-7		
Media	8-20	90	60
Buona	21-50	50	100
Eccellente	> 50	1	

È tuttavia possibile fornire una valutazione della portanza basandoci sugli esiti delle prove penetrometriche CPTe in quanto consentono di ricavare indirettamente la stima del Modulo di Young E_s (cfr. figura 6.3). Il modulo di deformazione M_d e il modulo di Young sono equivalenti a

meno della conoscenza del coefficiente di Poisson (per i sedimenti fini risulta generalmente pari a 0,5), inoltre in letteratura sono note numerose correlazioni fra i vari parametri di portanza (statici e dinamici). A titolo d'esempio, in figura 6.5 sono riportate alcune note correlazioni fra modulo elastico e CBR.

In conclusione, è possibile attribuire i sedimenti in posto (fino a una profondità di circa 3 m) ad una classe di portanza “scarsa” (con: $E_{\text{medio}} < 30 \text{ MPa}$).

Figura 6.5 – Correlazione fra modulo elastico E e l'indice CBR



7 SINTESI DELLO STUDIO

Si riassumono gli esiti delle indagini espletate e gli ulteriori elementi prescrittivi per le successive fasi di intervento diretto.

Indagini geognostiche/geofisiche di riferimento (cfr. paragrafi 2.2 e 2.3) → nel comparto 10.2 sono state eseguite n. 2 penetrometrie CPTe spinte fino a -15,7 m dal p.c. e n. 1 registrazione sismica HVSR. Sono inoltre disponibili penetrometrie CPT/CPTe/CPTU, registrazioni HVSR e stendimento MASW di repertorio eseguite nel comparto 10.1.

Contesto geomorfologico e geologico (cfr. paragrafo 3.1) → l'Ambito presenta una blanda acclività verso NE e quote comprese tra circa 15,5 m e 14,0 m s.l.m. Ricade in un contesto di pianura alluvionale, più in particolare di “depositi di argine, canale e rotta fluviale” del Savena (IV–VI secolo d.c.). I sedimenti superficiali sono attribuiti al “Subsistema di Ravenna” (sigla AES8) di età deposizionale recente (Olocene). Le prove eseguite riscontrano sedimenti argilloso limosi, con rari livelli limoso sabbiosi.

Contesto idrogeologico e aspetti idraulici locali (cfr. paragrafo 3.2) → la tavola A.C.1.2b “Carta Idrogeologica” elaborata per il PSC dei Comuni delle unioni “Reno – Galliera” e “Terre di Pianura”, evidenzia un blando deflusso sotterraneo della falda meno profonda diretto verso NE e un livello statico a circa 14 metri slm (soggiacenza media di circa 1,5÷2,0 metri, confermata dalle indagini “in situ”). Dal punto di vista idraulico, la regimazione locale secondaria è fornita dai fossi di testata e trasversali dei campi agricoli. Il comparto dista circa 200 metri dal Canale Emiliano-Romanolo (a sud) e circa 850 metri dal Canale Navile (a est). Non sussistono particolari criticità idrauliche.

Pericolosità sismica di base (cfr. paragrafo 4.1) → l'area ricade a sud della sorgente sismogenica composita ITCS051 “Carpi – Poggio Renatico”, alla quale vengono attribuiti rari terremoti storici di magnitudo Mw fino a 6,0. La sorgente include la faglia “Mirandola” recentemente riattivata (terremoti emiliani 2012). L'archivio DBMI dell'INGV documenta per il Capoluogo risentimenti di intensità macrosismica non particolarmente elevate, con un solo evento con I stimata pari a 7 (terremoto bolognese, 1501). Nel paragrafo 4.1 si riportano i parametri sismici di base desunti dalla griglia di pericolosità sismica INGV e calcolati indicativamente baricentro del comparto.

Microzonazione sismica comunale e pericolosità sismica di area vasta (cfr. paragrafo 4.2) → il comparto ricade in un contesto stabile suscettibile di amplificazioni stratigrafiche (cfr. areale “C” - tavola 4 PTM Bologna), contesto confermato anche dagli studi di MS comunale.

Approfondimenti sismici locali ai sensi della DGR 476/2021 (capitolo 5) → Le registrazioni sismiche HVSR (comparto 10.1 e 10.2) evidenziano massime amplificazioni spettrali H/V a basse frequenze (f_0 tra 0,70÷0,9 Hz), associabili a riflettori sismici profondi oltre 100 metri. Possibili risonanze con edifici molto elevati, cioè >10 piani. Lo stendimento sismico eseguito nel settore nord dell'ambito ha fornito esiti di Vs30 pari a circa 206 m/s. Nella tabella 5.1 vengono riportati i fattori di amplificazione attribuibili al comparto (approssimabile al macrocontesto “Pianura 2” con

Vs30 $\approx$ 200 m/s). Per lo studio a corredo del POC sono stati eseguiti ulteriori approfondimenti della RSL (modellazioni numeriche) e verifiche della liquefacibilità ai sensi della DGR 2193/2015 relative al comparto 10.1. Le ulteriori verifiche effettuate nel comparto 10.2 (DGR 476/2021) hanno confermato come l'ambito non presenti particolari criticità legate a liquefazioni e cedimenti in caso di sisma, con un rischio locale che è da ritenersi complessivamente "basso" (LPI <2). Le verifiche espletate risultano più cautelative rispetto alle medesime verifiche espletate secondo le vigenti NTC (per opere "ordinarie").

Caratterizzazione geologico tecnica del sottosuolo (capitolo 6)→ Le penetrometrie hanno fornito esiti di resistenza utili per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti attraversati. Le prove riscontrano uno spessore più superficiale (circa 1,5÷1,7 m) di sedimenti limoso argillosi caratterizzati da condizioni di alterazione e/o essiccamento più significativo. Quest'ultima condizione è da ritenersi generalmente reversibile e quindi da tenere in considerazione in fase di progettazione. Sono poi attraversati sedimenti prevalentemente limoso argillosi e argillosi con livelli sabbiosi sciolti. Le caratteristiche di resistenza alla penetrazione risultano variabili anche in relazione alla tessiture. Nel paragrafo 6.1 vengono riportate due sezioni lito-geotecniche del sottosuolo investigato e la stima dei principali parametri geotecnici. Per la presenza di sedimenti superficiali variamente alterati e/o essiccati si consiglia una quota d'incastro delle fondazioni ad almeno -120 cm dall'attuale p.c. per limitare possibili conseguenze sui manufatti causate da variazioni volumetriche differenziali (per essiccamento/rigonfiamento) dei sedimenti. Tale quota potrà tuttavia essere ridotta prevedendo un'adeguata sistemazione e/o sostituzione dei terreni di sottofondazione.

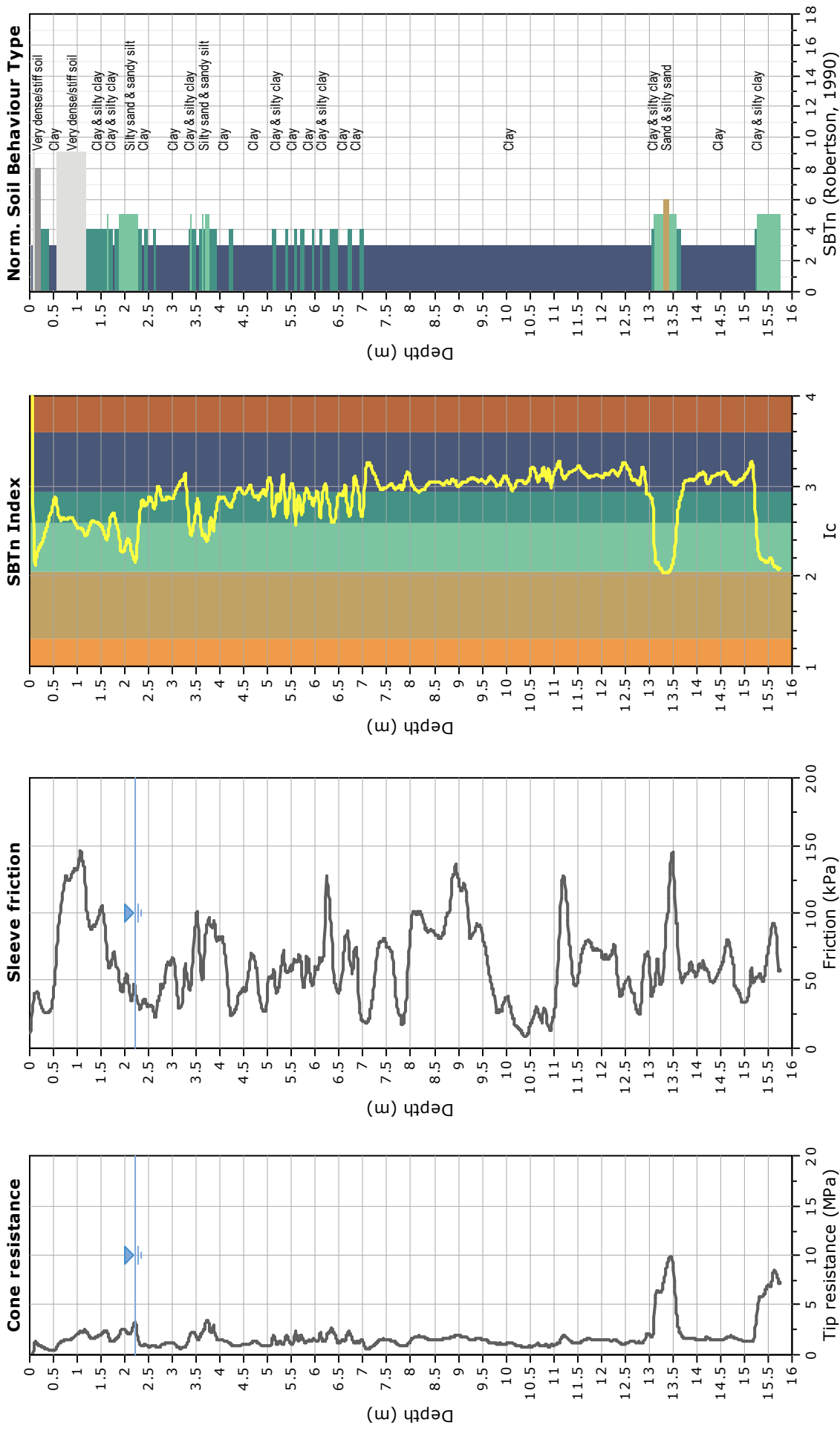
Le penetrometrie hanno inoltre riscontrato alcuni intervalli limoso argillosi scarsamente consistenti a profondità comprese nel presumibile "volume significativo" di sedimenti. Le indagini da effettuare per la progettazione degli interventi edificatori dovranno pertanto stimare l'entità dei cedimenti attesi (assoluti e/o differenziali). La prova CPTe2 ha inoltre registrato valori di q_t "anomali" nell'intervallo -6,2÷8,0, mai riscontrati nelle altre prove limitrofe e presumibilmente imputabili ad anomalie nell'acquisizione. Nella fase di progettazione si ritiene tuttavia necessario effettuare ulteriori indagini geognostiche di verifica.

Si può comunque affermare che le caratteristiche degli edifici previsti dal piano attuativo, consentono di adottare fondazioni dirette, opportunamente dimensionate. È tuttavia consigliabile procedere con ulteriori verifiche dei cedimenti in fase di progettazione costruttiva dei singoli interventi, sulla base degli esiti delle ulteriori indagini in situ e una volta note le effettive pressioni di progetto degli edifici da realizzare. Per quanto riguarda la nuova viabilità, sulla base degli esiti delle penetrometrie è possibile attribuire i sedimenti in posto più superficiali (fino a una profondità di circa 3 m) ad una classe di portanza del sottofondo "scarsa".

Elaborazione:

geol. Samuel Sangiorgi

ALLEGATI:
REPORT INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE
REPORT VERIFICHE LIQUEFAZIONE E CEDIMENTI POST SISMA

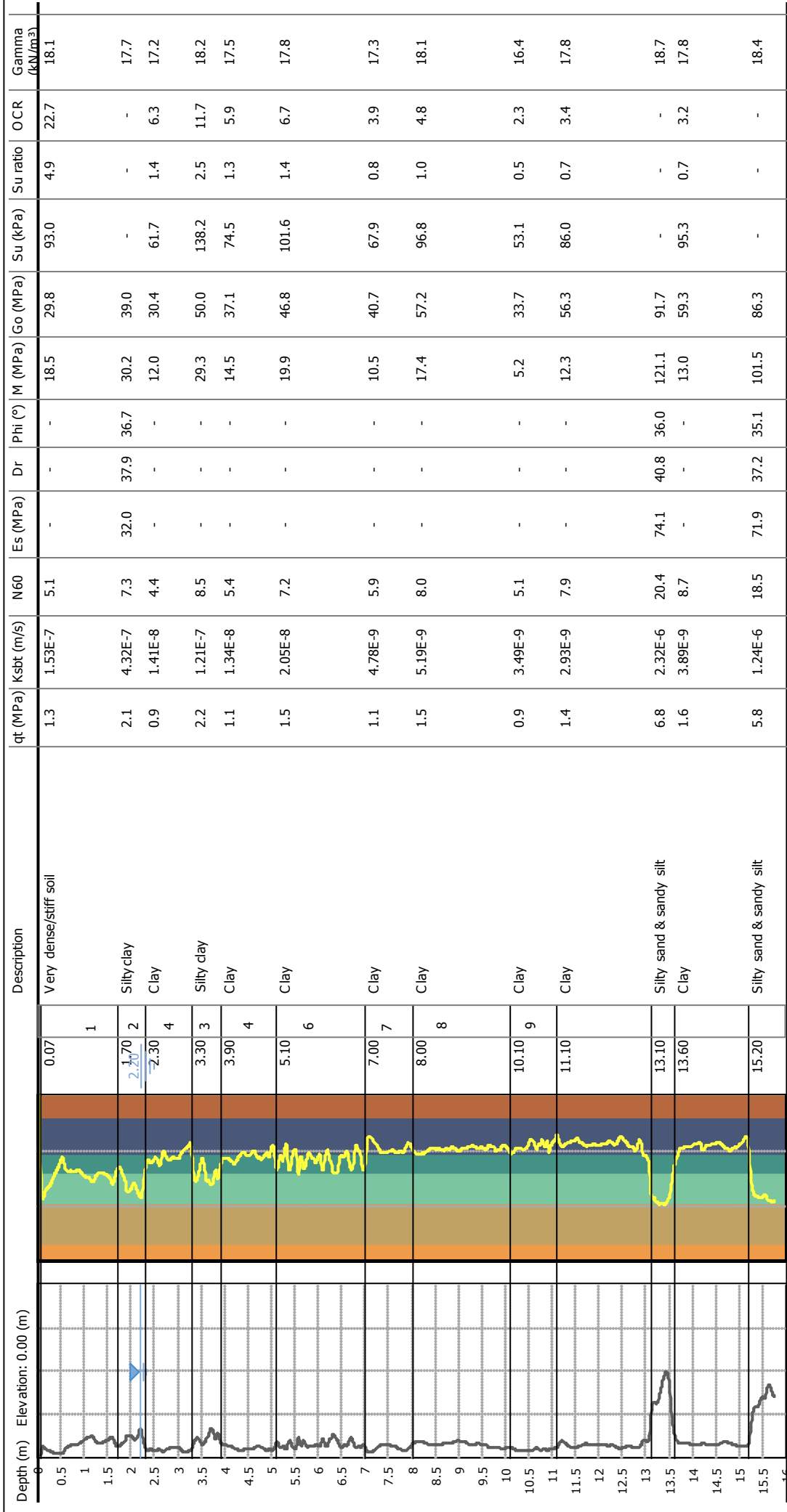


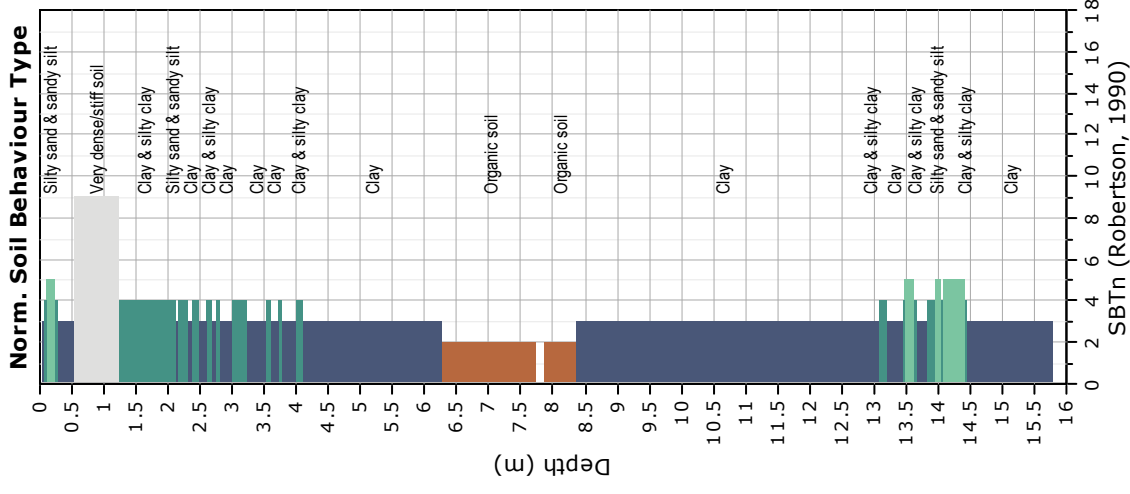
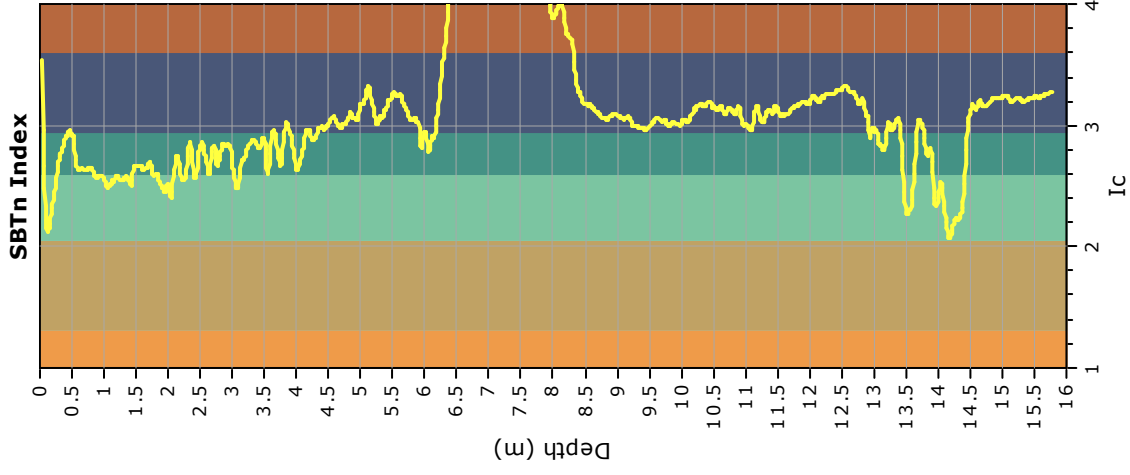
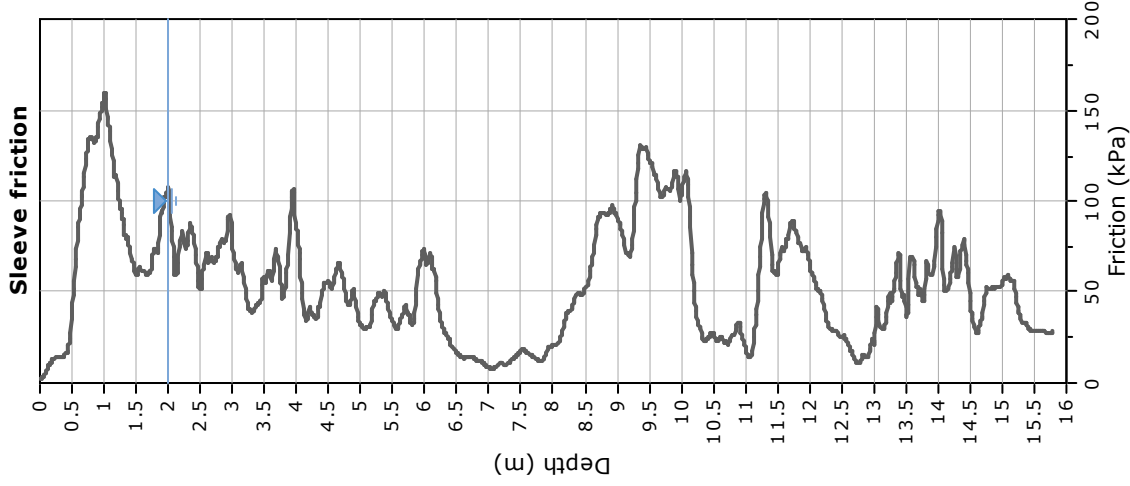
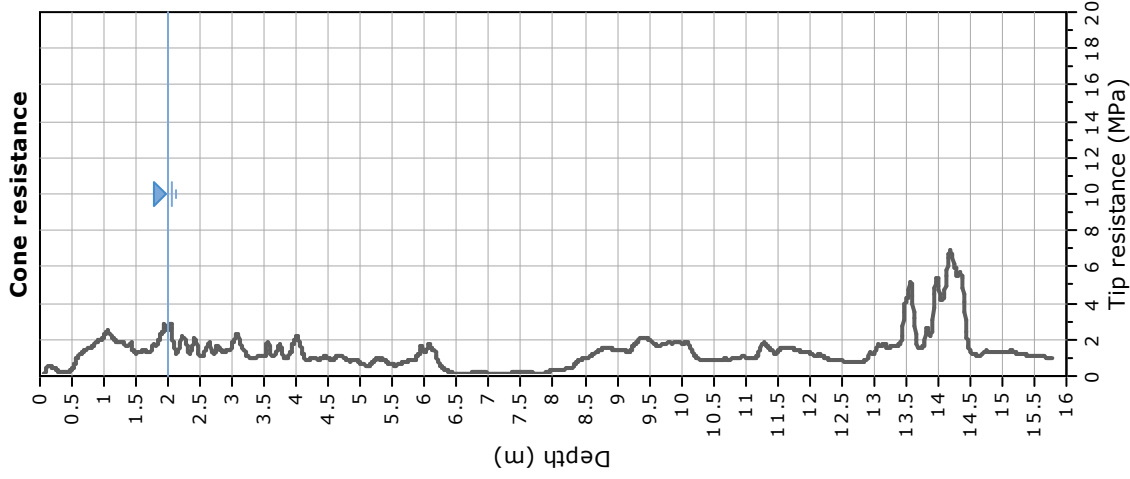
Project: PUA Ambito ANS_C10_comparto 10.2

Location: Bentivoglio (BO)

CPT: CPTe1 (2022)

Total depth: 15.76 m, Date: 13/04/2022

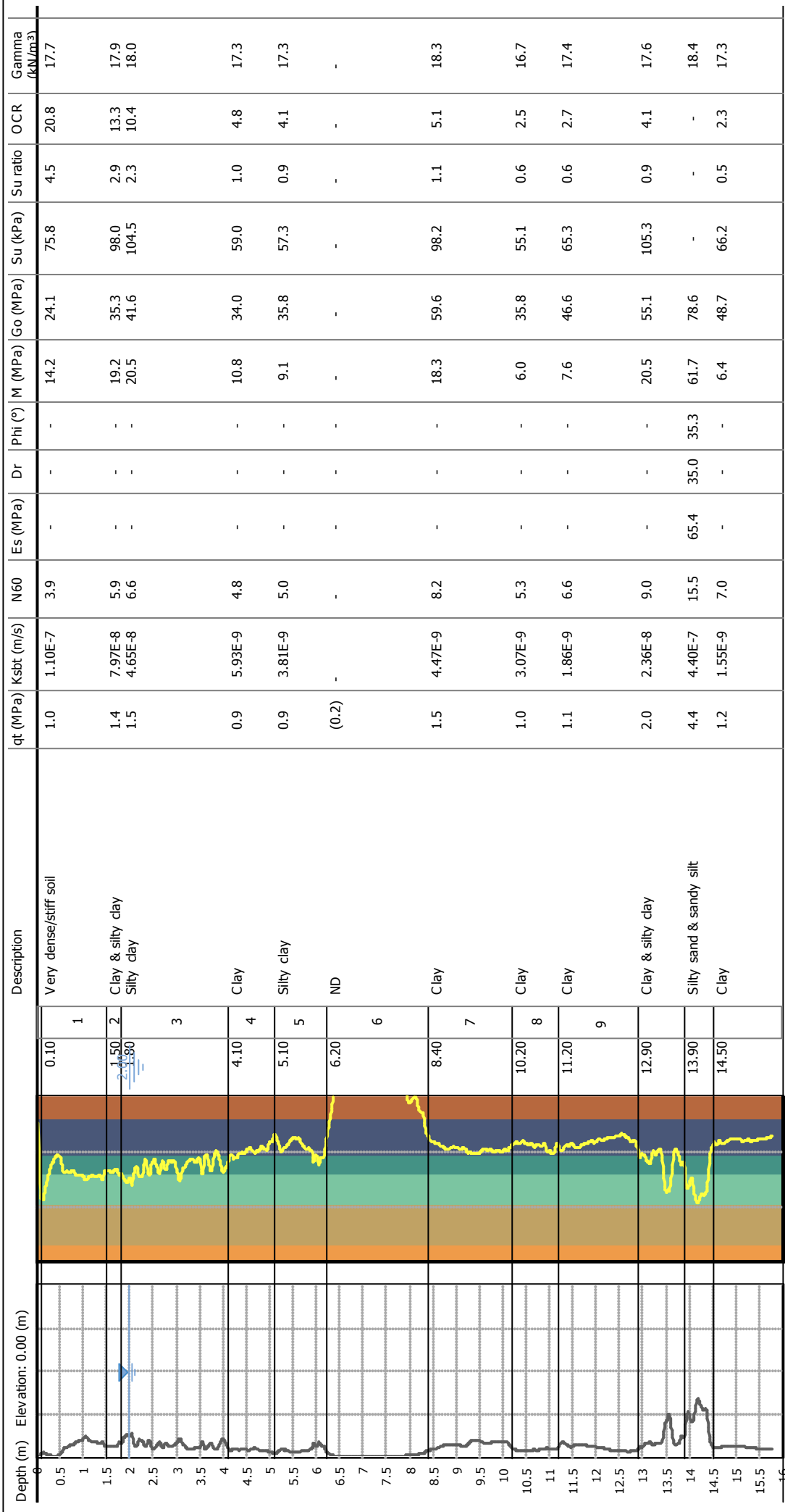




Project: PUA Ambito ANS_C10_comparto 10.2
Location: Bentivoglio (BO)

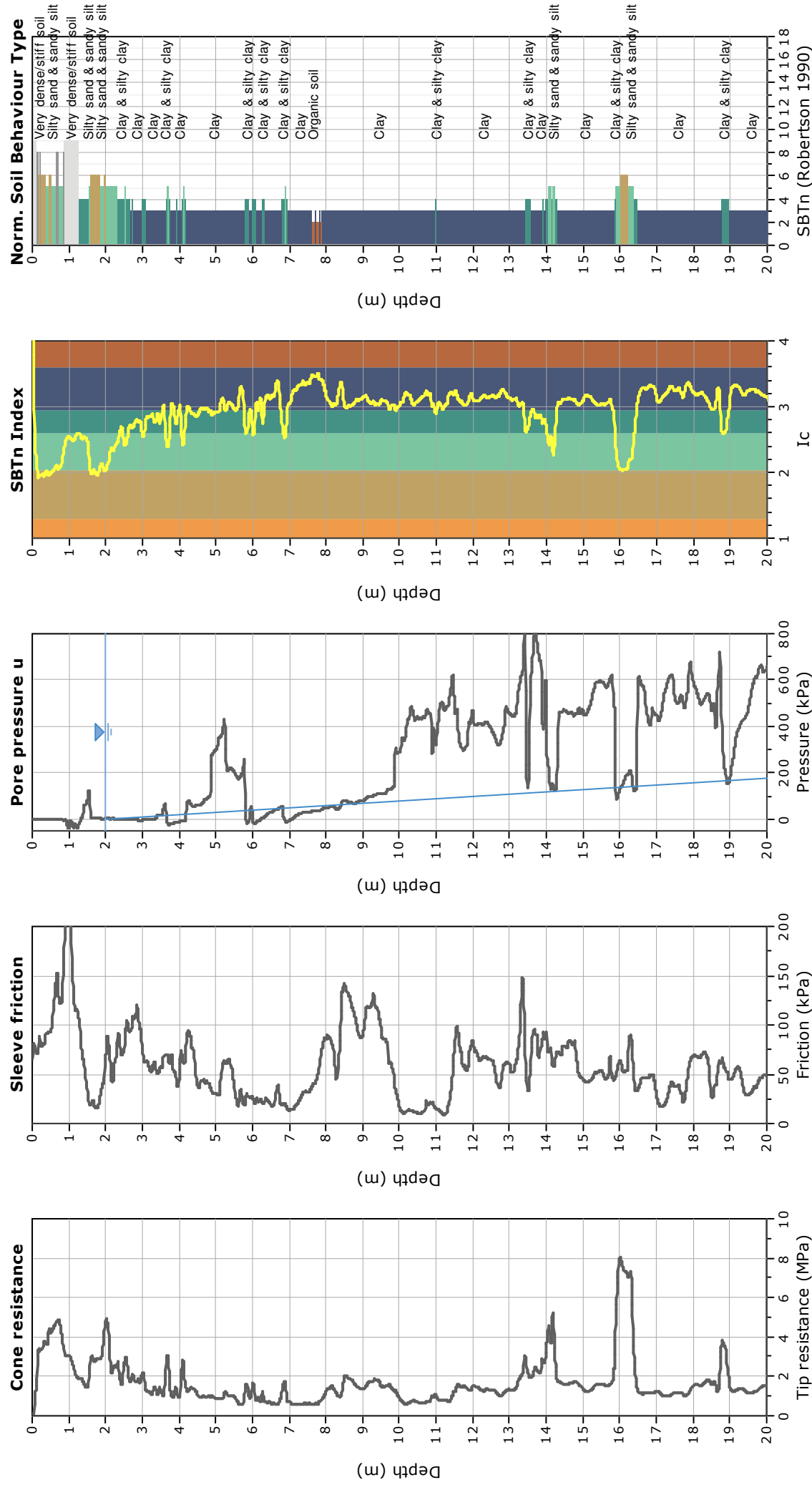
CPT: CPTe2 (2022)

Total depth: 15.78 m, Date: 13/04/2022



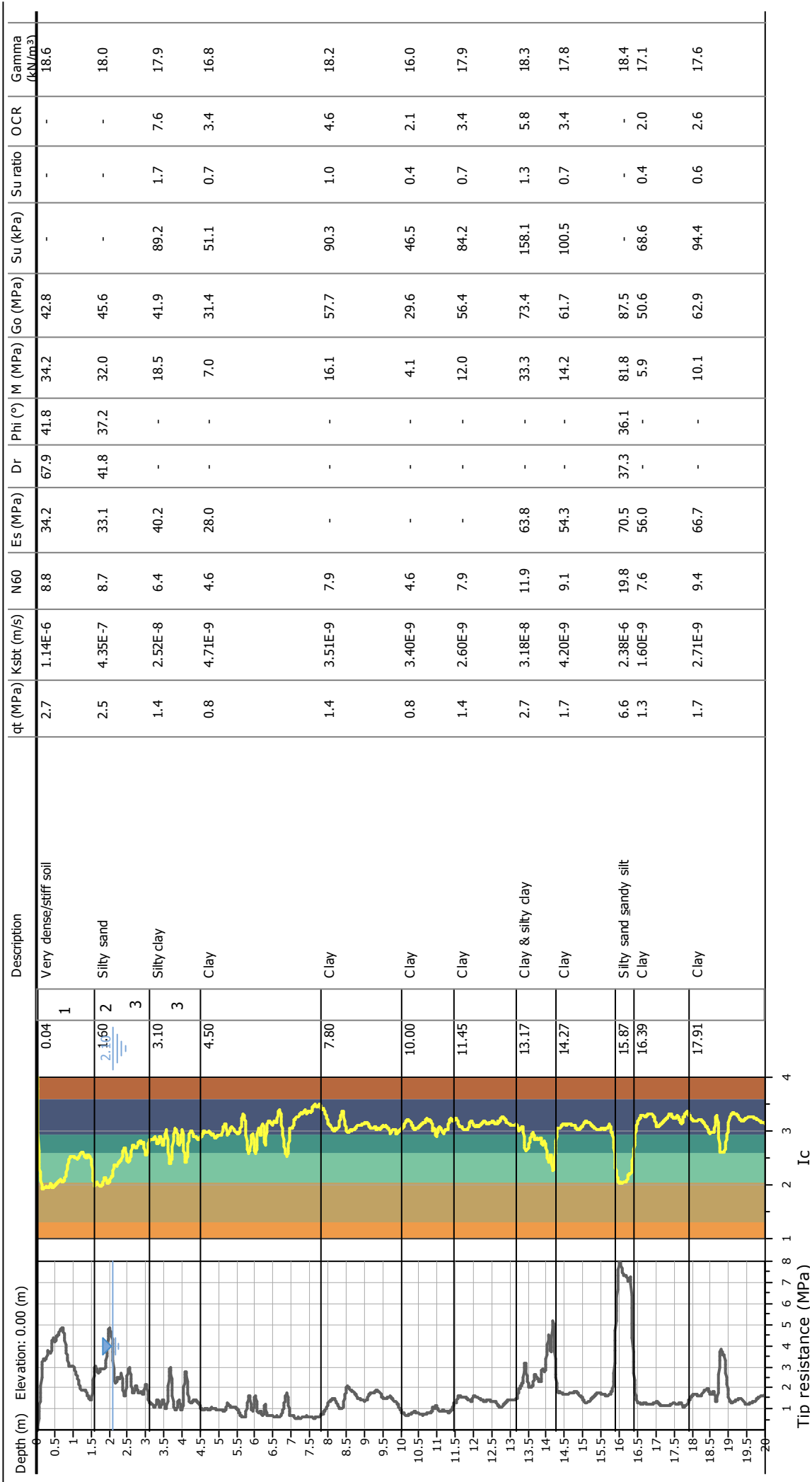
Project:

Location: via Marconi - Bentivoglio (BO)



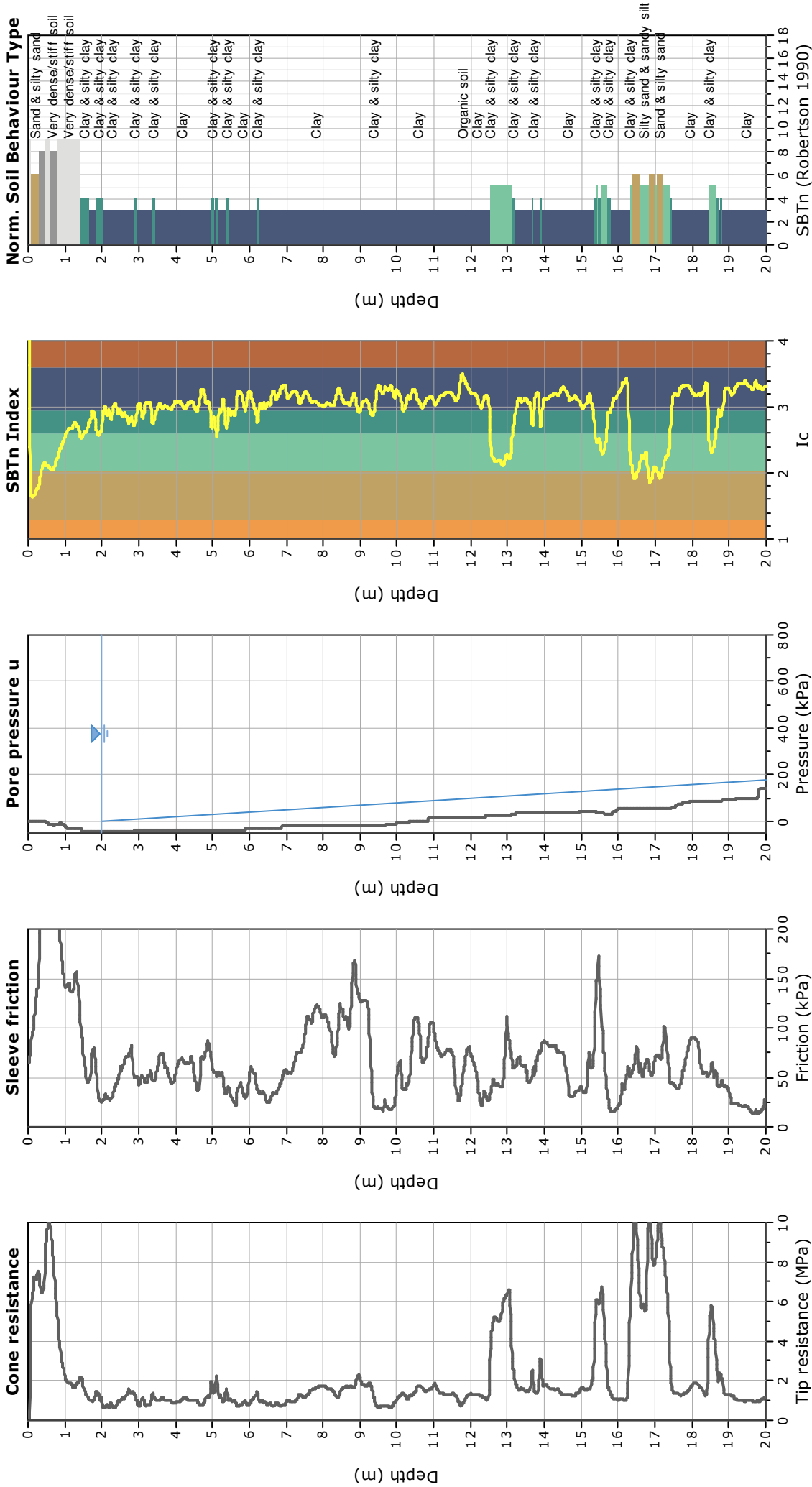
Project:

Location: via Marconi - Bentivoglio (BO)



Project:

Location: via Marconi - Bentivoglio (BO)



Studio Samuel Sangiorgi

via Valsellustra 32, 40060 - Dozza (BO)

info@studiosamuelsangiorgi.eu

Tel. 0542-640279

CPT: CPTE2

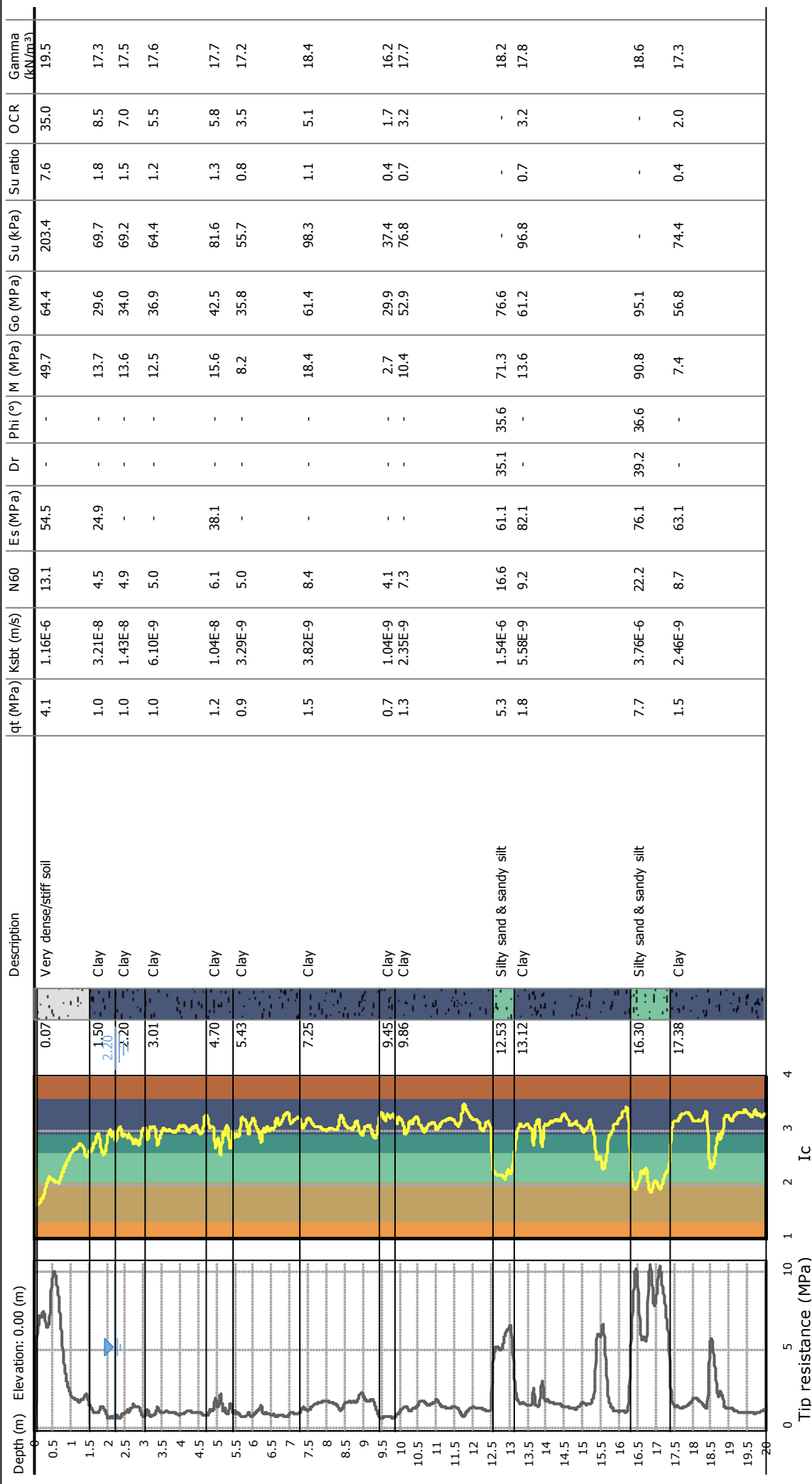
Total depth: 20.13 m, Date: 19/07/2017

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: Unknown

Cone Operator: Unknown

Project:**Location:**

Ditta esecutrice: Viel & Galassi

Comune: Bentivoglio

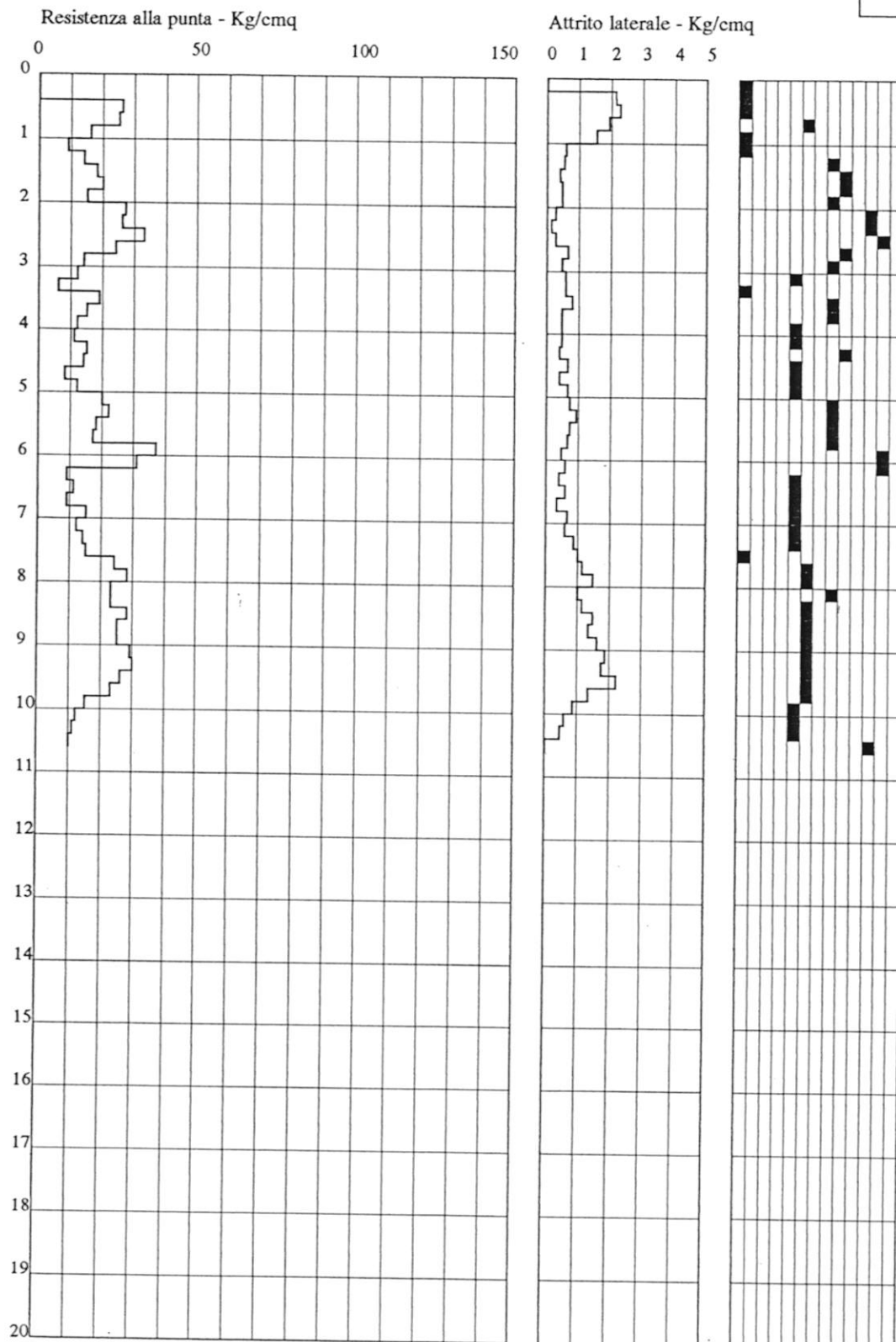
Cantiere:

Committente: Comune

Via:

Data esecuzione: 30/09/98

Prova N. 11



Certificato Numero:

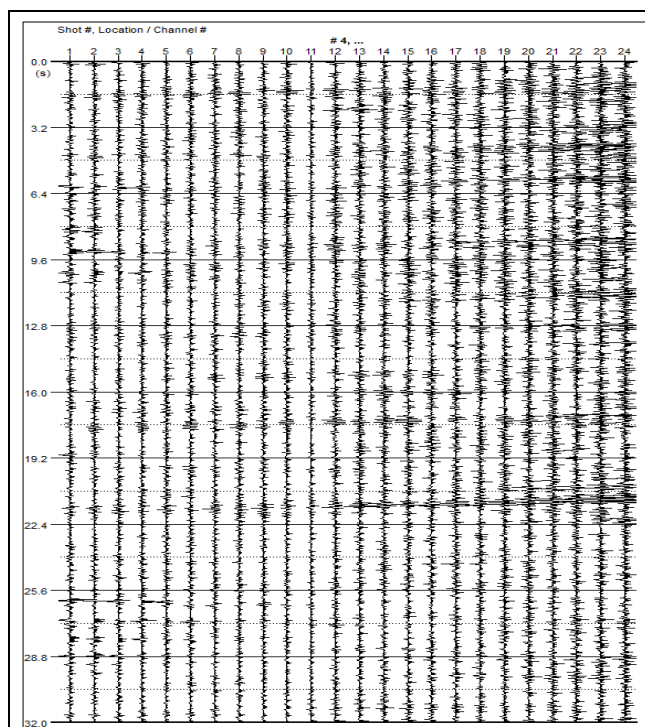
Argilla organica
 Argilla molto tenera
 Argilla tenera
 Argilla media
 Argilla compatta
 Argilla molto compatta
 Sabbia compatta
 Sabbia
 Sabbia sciolta
 Sabbia e limo
 Sabbia lim.-arg.
 Argilla sab.-lim.
 Argilla inorganica

PROSPEZIONE SISMICA CON METODOLOGIA ATTIVA/PASSIVA MASW/Re.Mi.

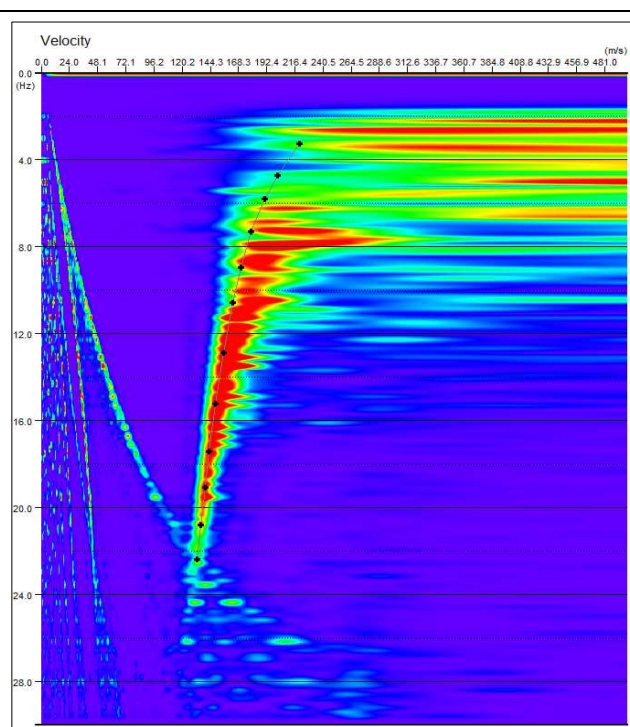
Proposta inserimento POC – via Marconi, Bentivoglio (BO)

n° tracce	Δx (m)	L tot (m)	Δt (ms)	T (s)
25	3,0	69,0	0,5/2,0	2,0/32,0

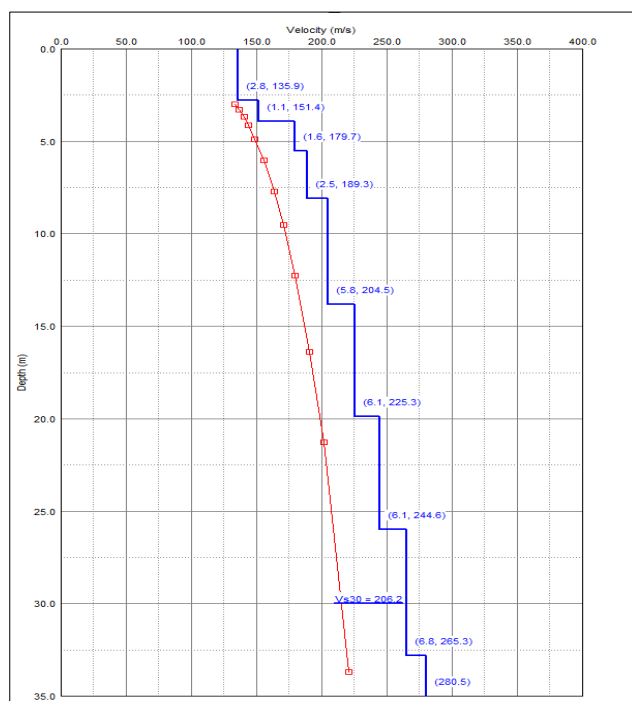
Δx : interdistanza geofonica; L tot: lunghezza profilo; Δt : passo di campionamento; T: durata registrazione.



Sismogramma registrato durante le acquisizioni di microtremore sismico. In ascissa la distanza tra i geofoni (m), in ordinata il tempo (ms).



Spettro di potenza nel dominio $f-v$ e Picking della curva sperimentale delle onde R (croci nere).



Modello di sottosuolo (1D) descritti in termini di V_s e spessore dei sismostrati (spezzata blu) e curva di dispersione sperimentale delle onde R (curva rossa).

Tabella di sintesi

n. Strato	Profondità letto (m dal p.c.)	Spessore (m)	V_s (m/s)
1	2.8	2.8	135.9
2	3.9	1.1	151.4
3	5.5	1.6	179.7
4	8.0	2.5	189.3
5	13.8	5.8	204.5
6	19.9	6.1	225.3
7	26.0	6.1	244.6
8	32.8	6.8	265.3
9	∞	∞	280.5

$$V_{s30} = 206.2 \pm 10 \text{ [m/s]}$$

Sintesi dei parametri del modello di sottosuolo ottenuto e Valore di V_{s30} calcolato.

BENTIVIGLIO - PUA COMPARTO 10.2 - TR1 (2022)

Instrument: TRZ-0108/01-10

Start recording: 13/04/02 10:52:34 End recording: 13/04/02 11:12:35

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Trace length: 0h20'00". Analyzed 70% trace (manual window selection)

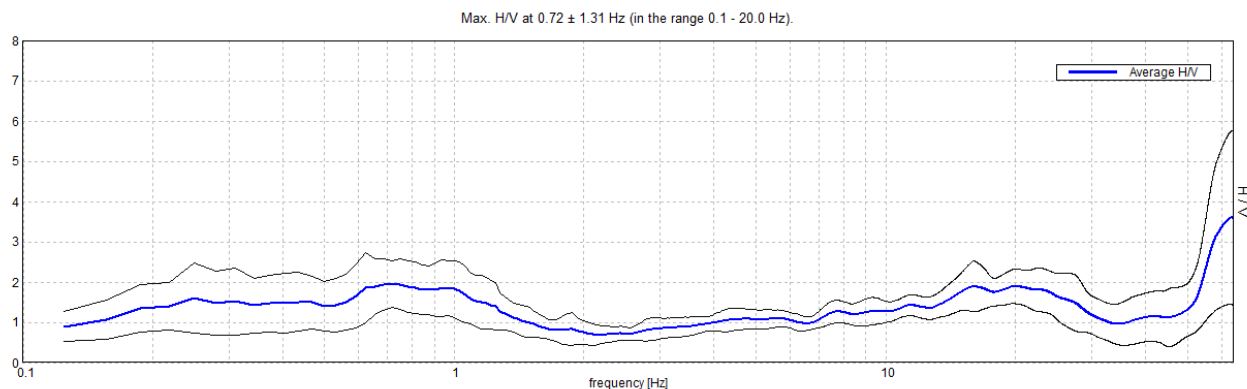
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

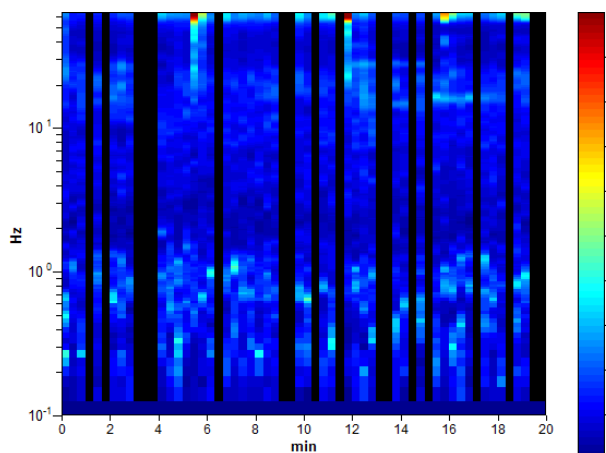
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

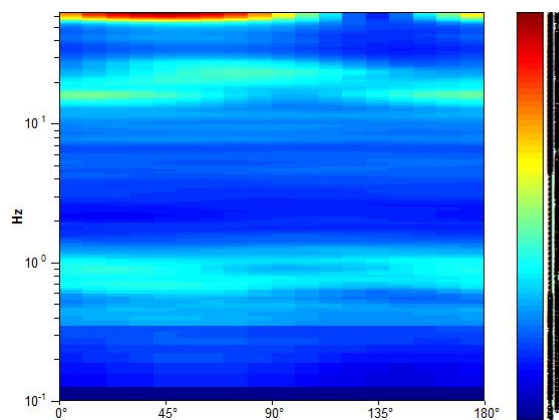
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



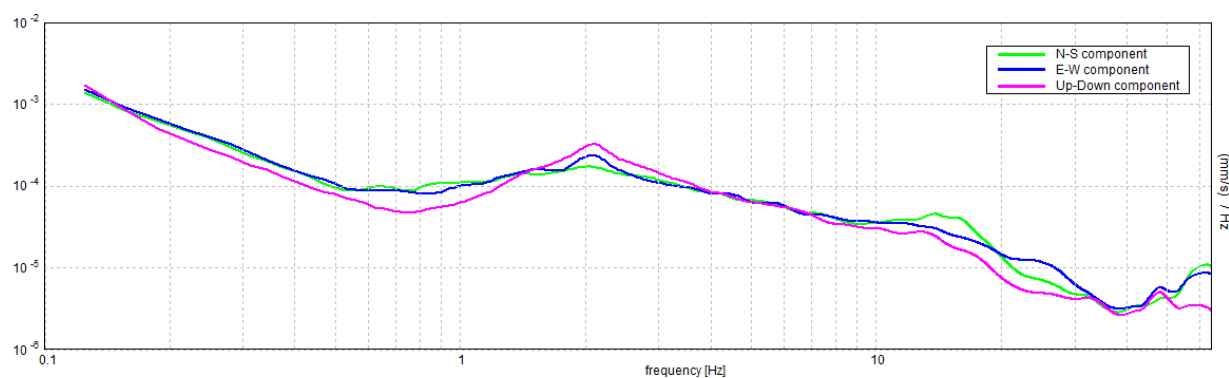
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 0.72 ± 1.31 Hz (in the range 0.1 - 20.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.72 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$603.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 36 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.531 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$1.94 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.89434 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.64281 < 0.10781$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2844 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	$0.2 - 0.5$	$0.5 - 1.0$	$1.0 - 2.0$	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

BENTIVOGLIO TR1

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 21/07/17 17:22:22 Fine registrazione: 21/07/17 17:42:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 75% tracciato (selezione manuale)

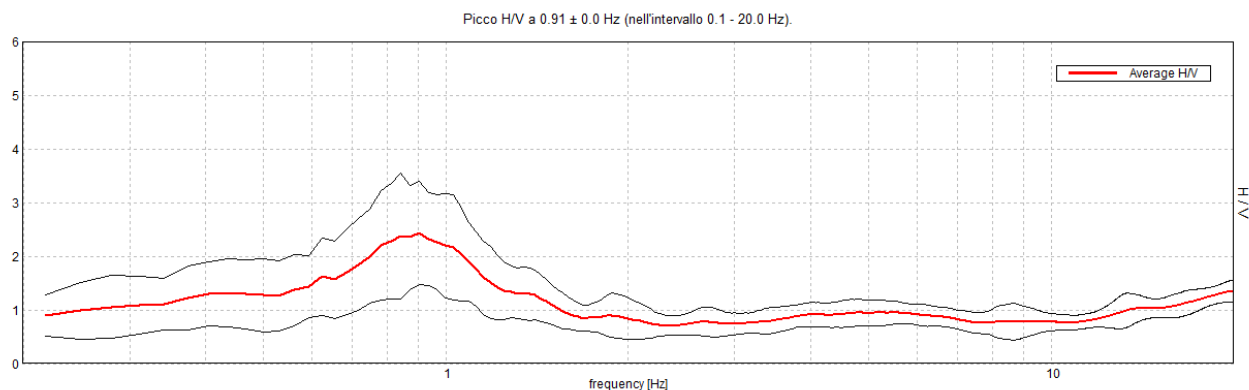
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

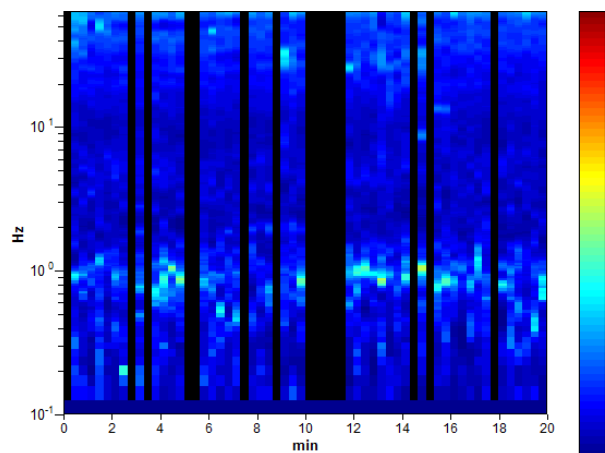
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

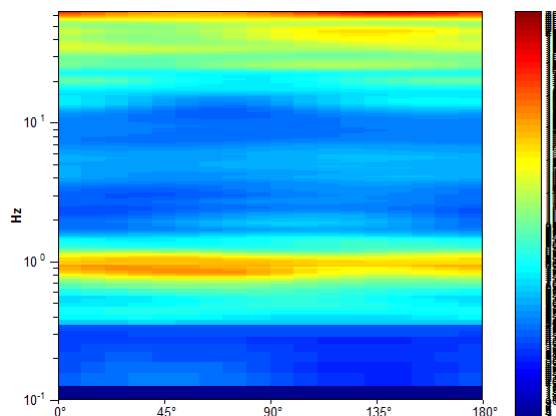
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



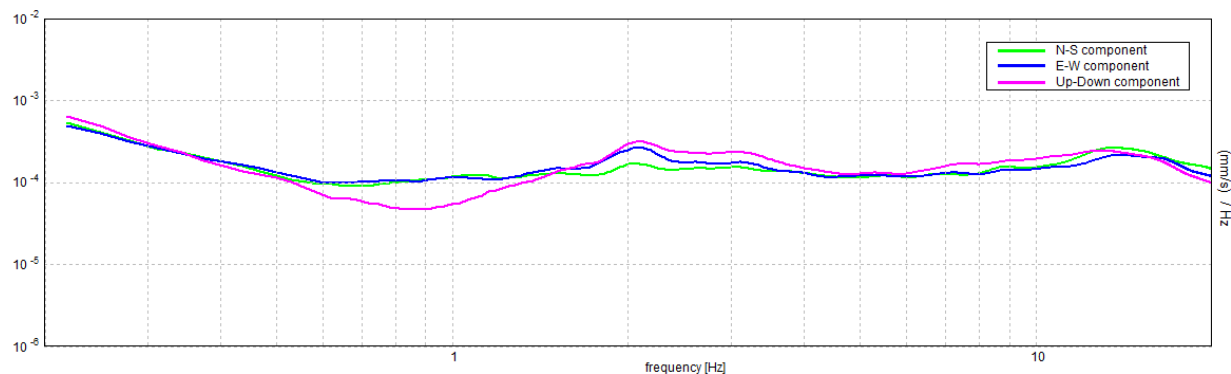
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.91 ± 0.0 Hz (nell'intervallo 0.1 - 20.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.91 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$815.6 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 44	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

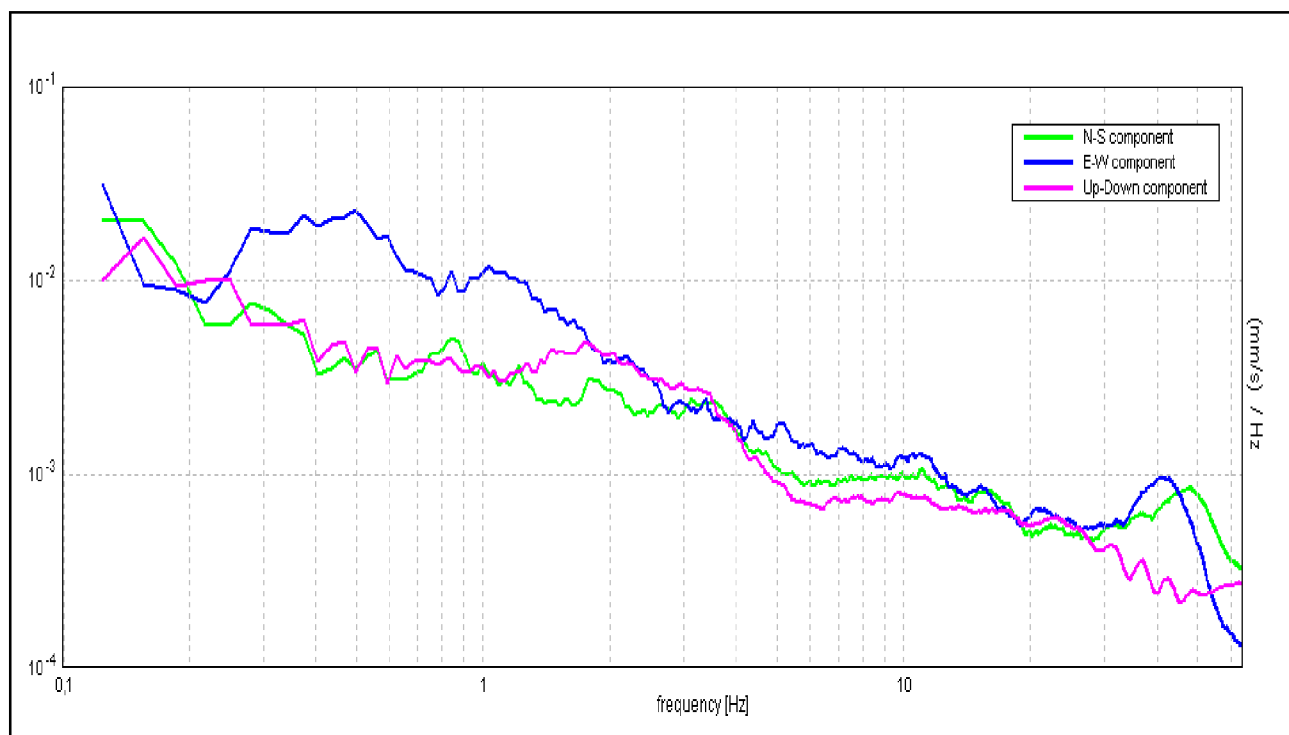
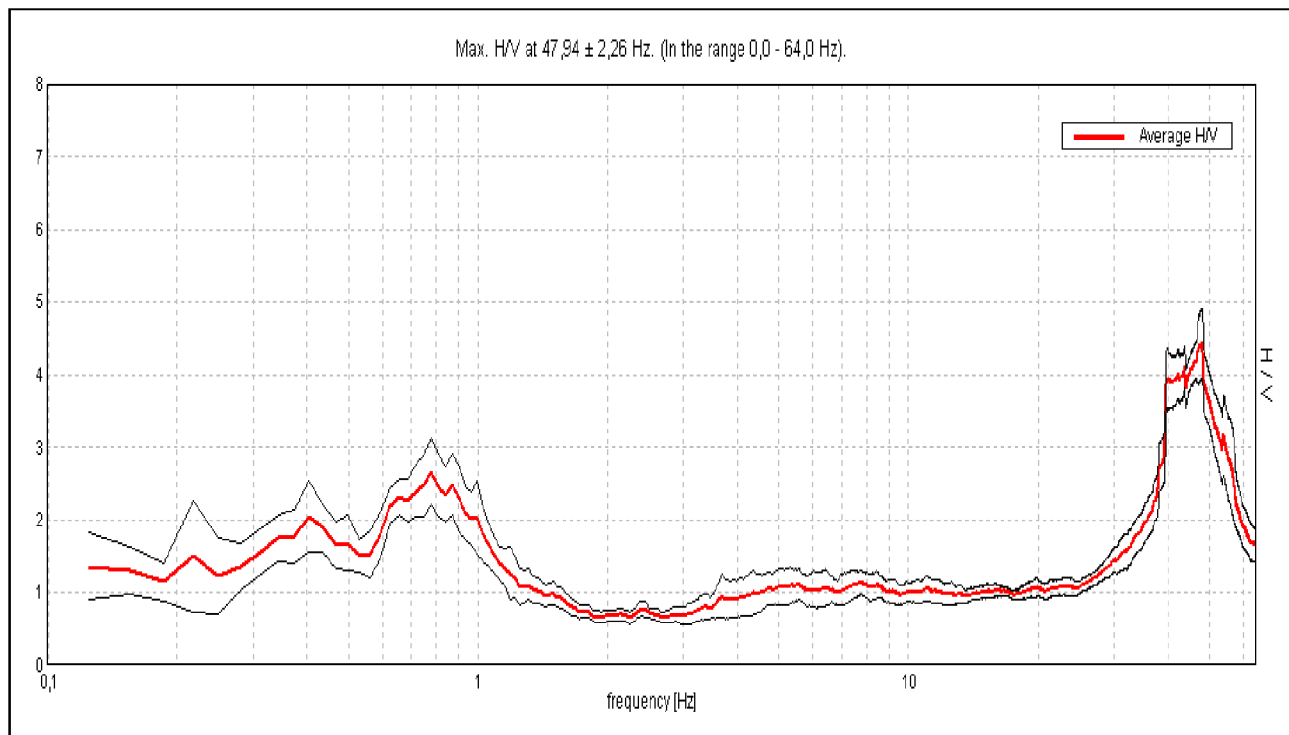
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.344 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.438 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.43 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00217 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00196 < 0.13594$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4679 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20



Tr 6

1_ben/psc/TR6

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

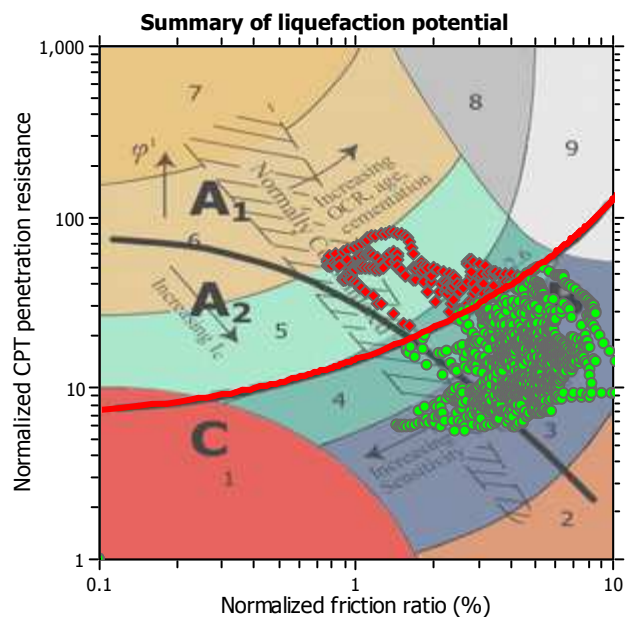
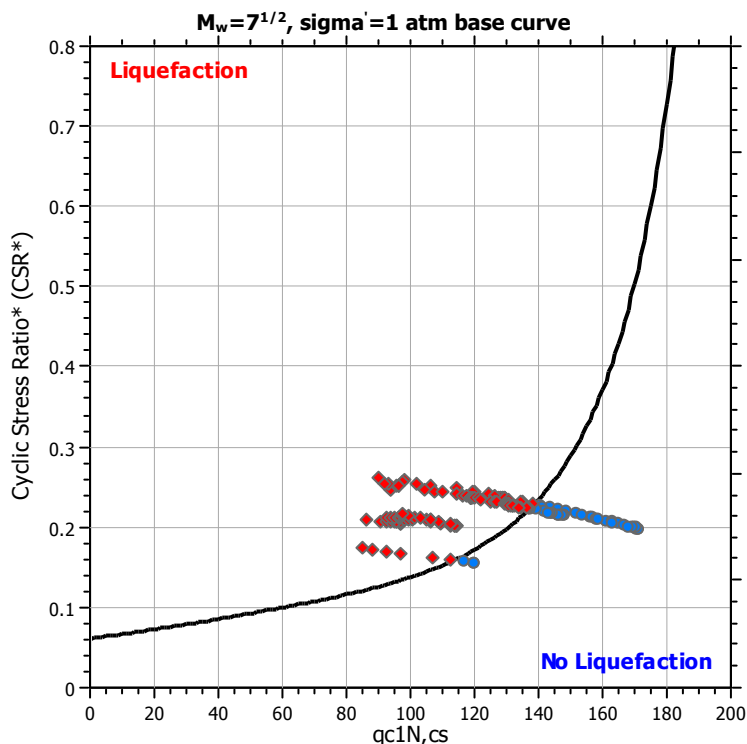
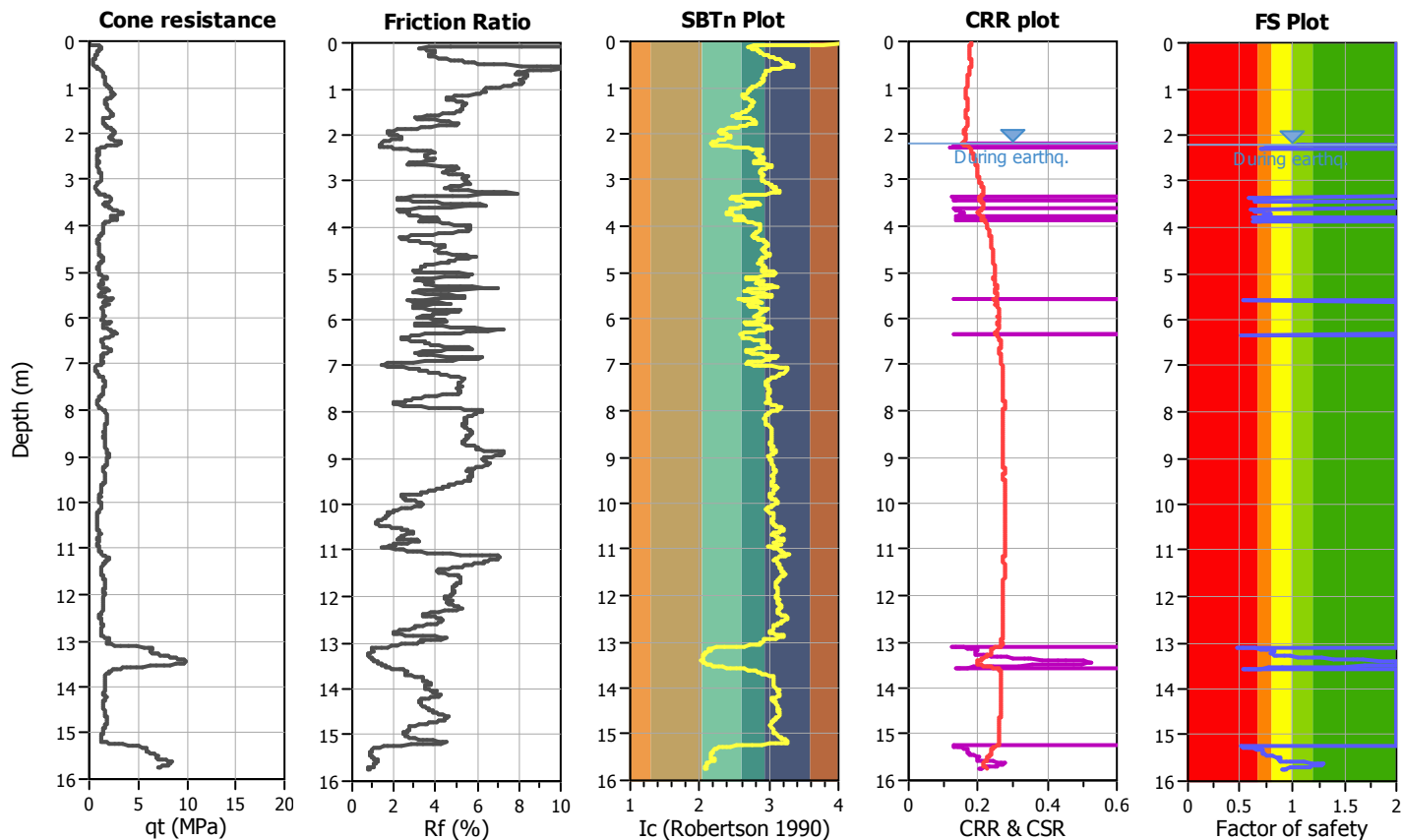
Project title :

Location :

CPT file : CPTE1 (2022)

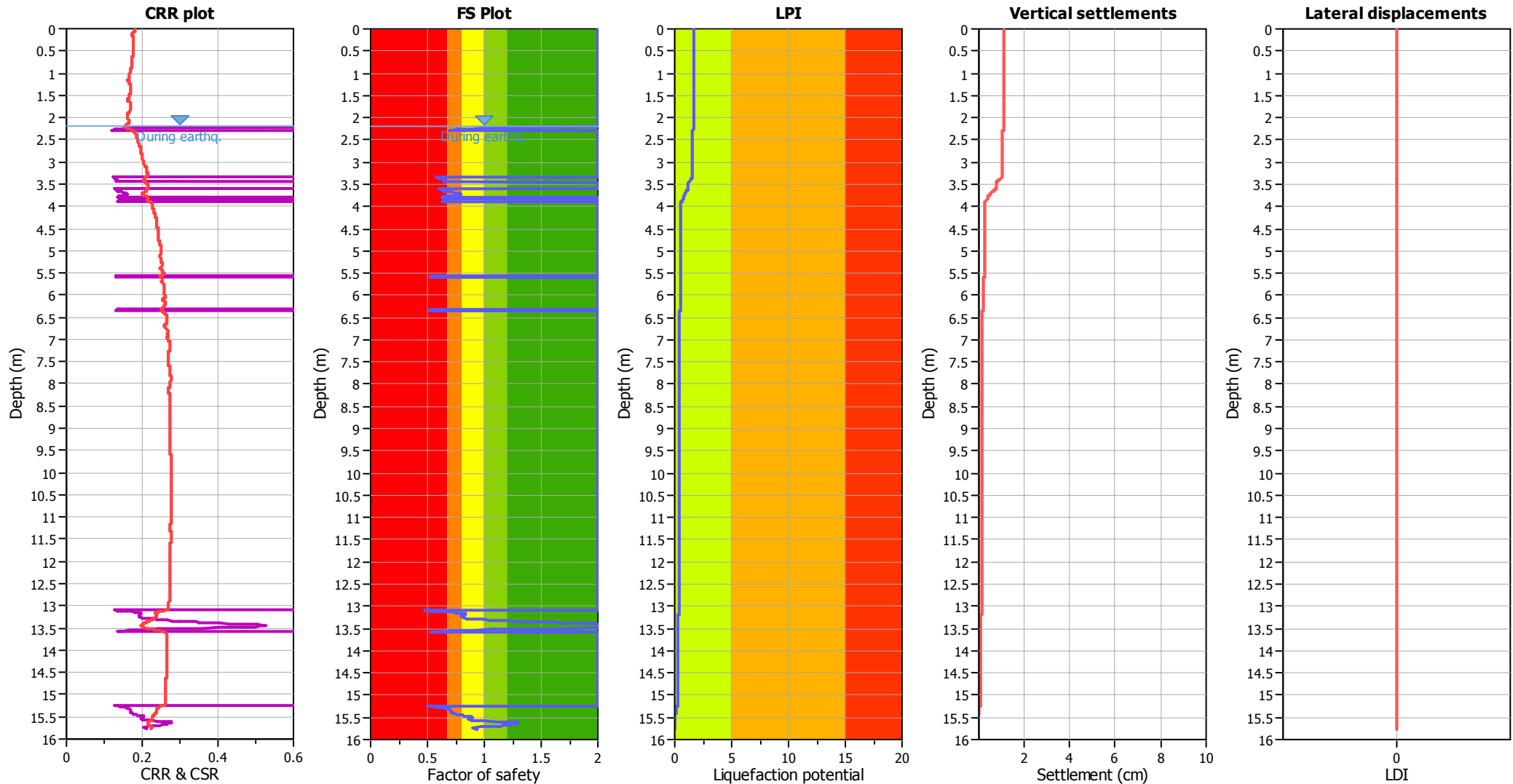
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.27	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

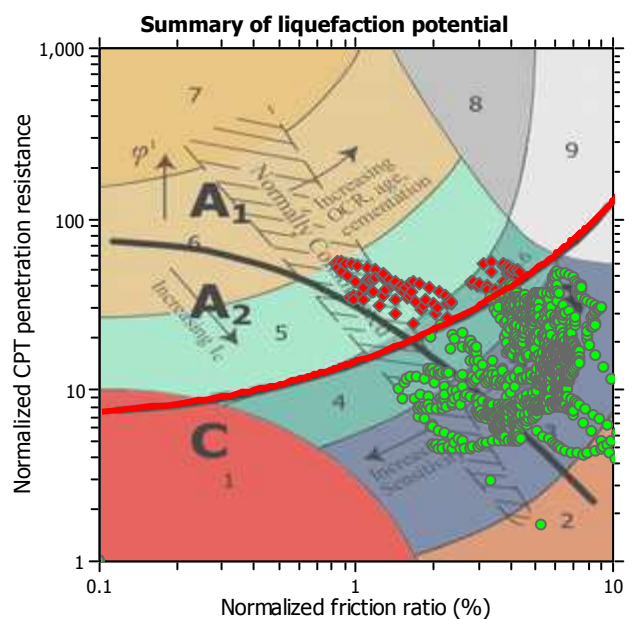
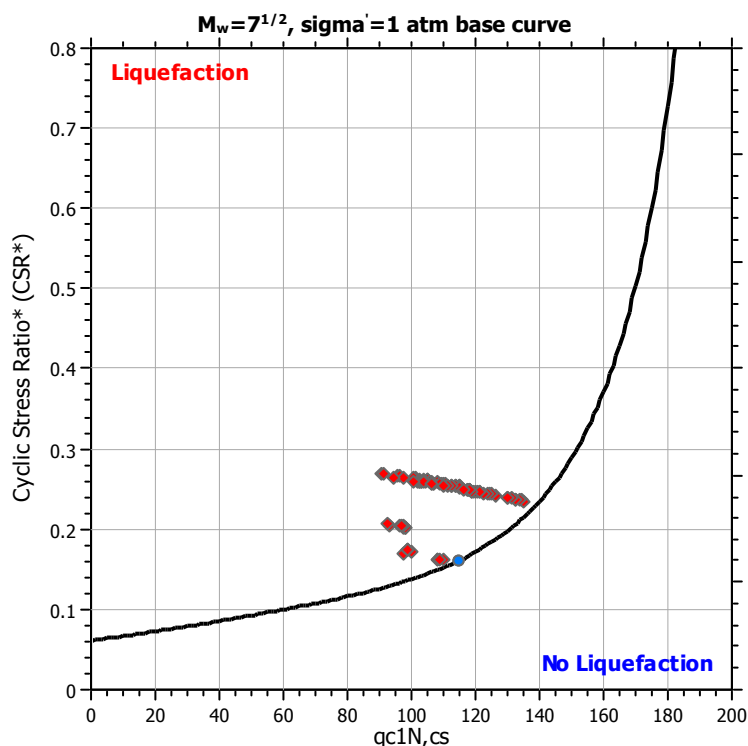
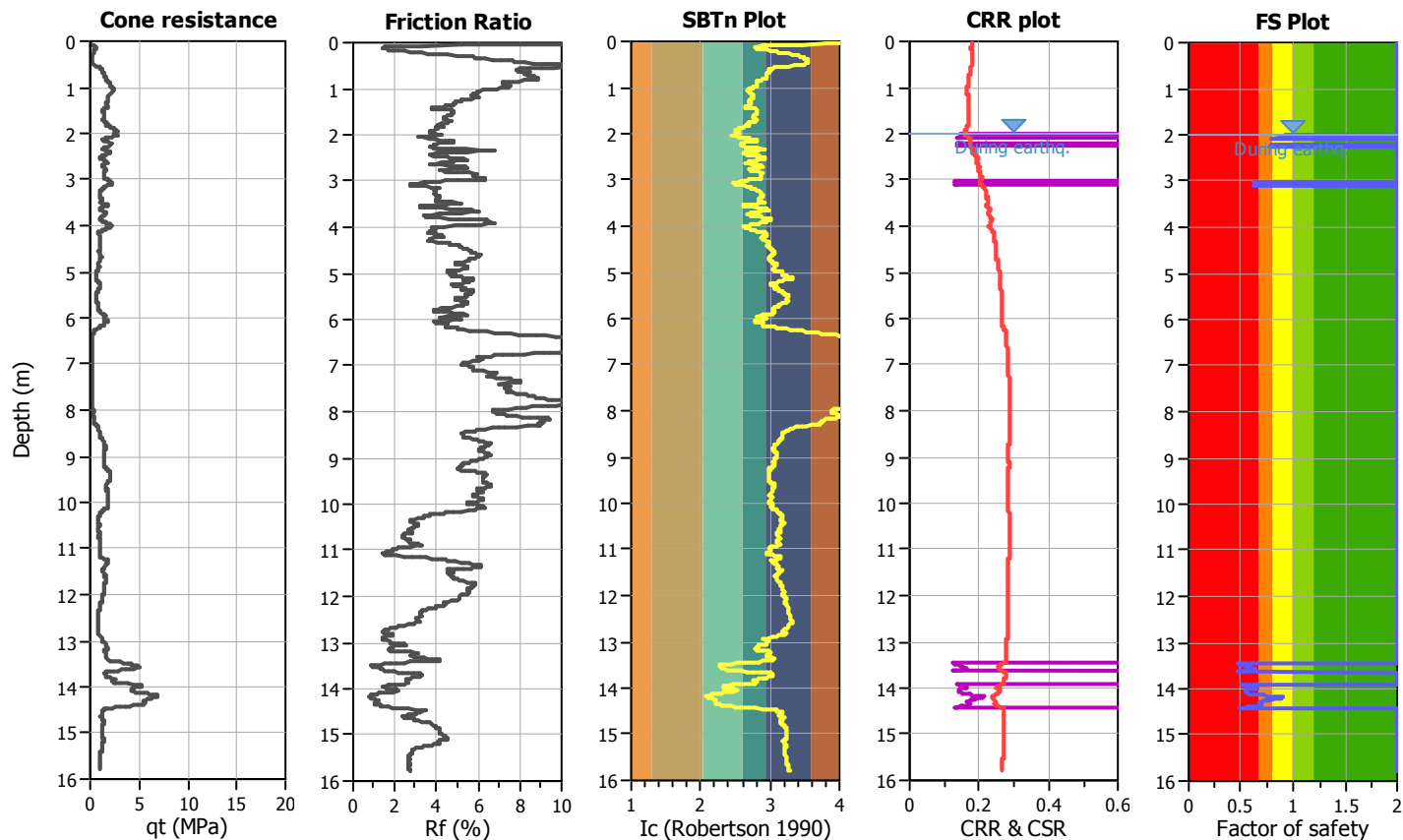
Project title :

Location :

CPT file : CPTE2 (2022)

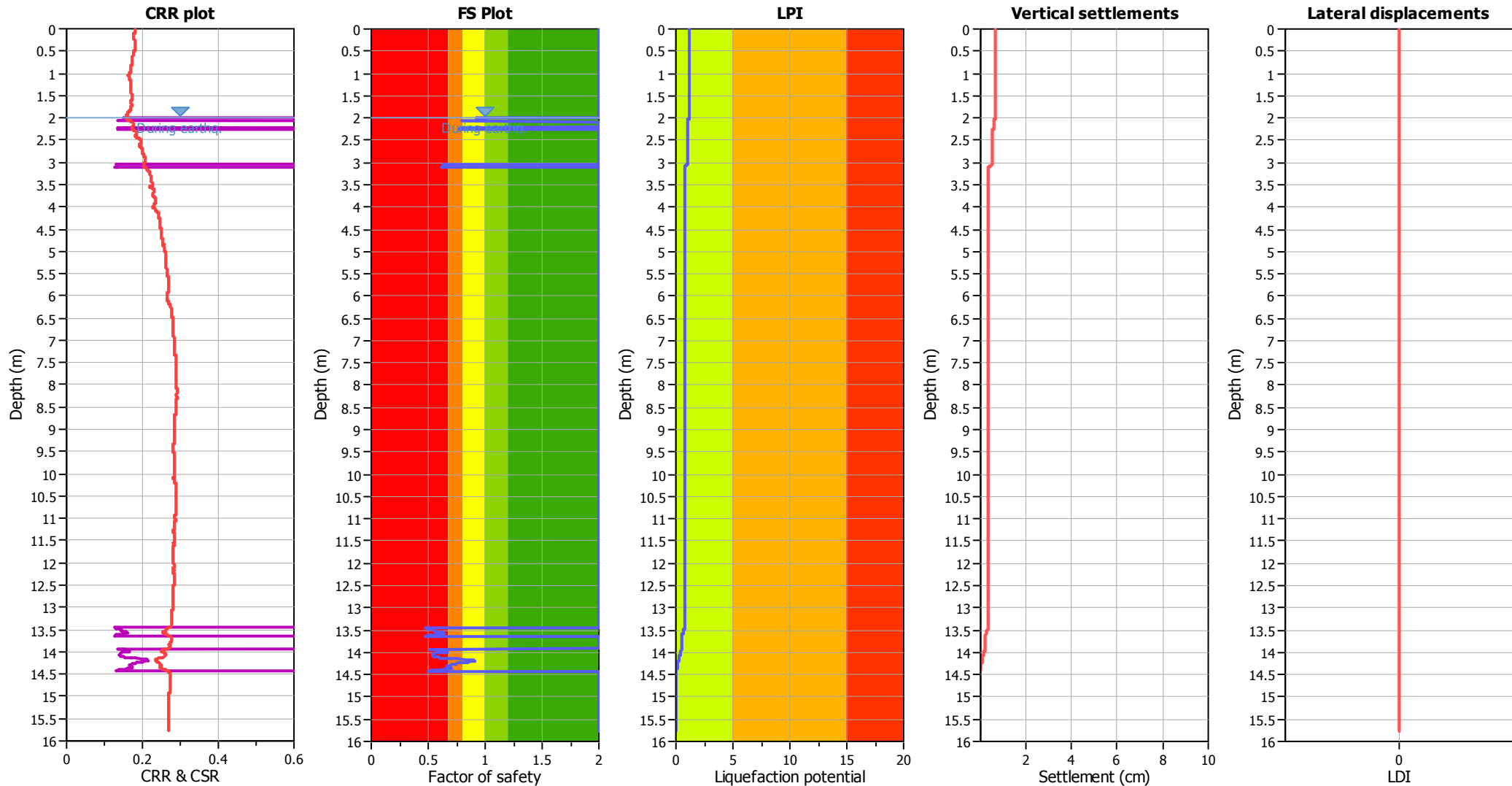
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
Fines correction method: B&I (2014)
Points to test: Based on I_c value
Earthquake magnitude M_w : 6.14
Peak ground acceleration: 0.27
Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.00 m
Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
Unit weight calculation: Based on SBT
Use fill: No
Fill height: N/A

Fill weight: N/A
Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
Clay like behavior applied: Sands only
Limit depth applied: Yes
Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

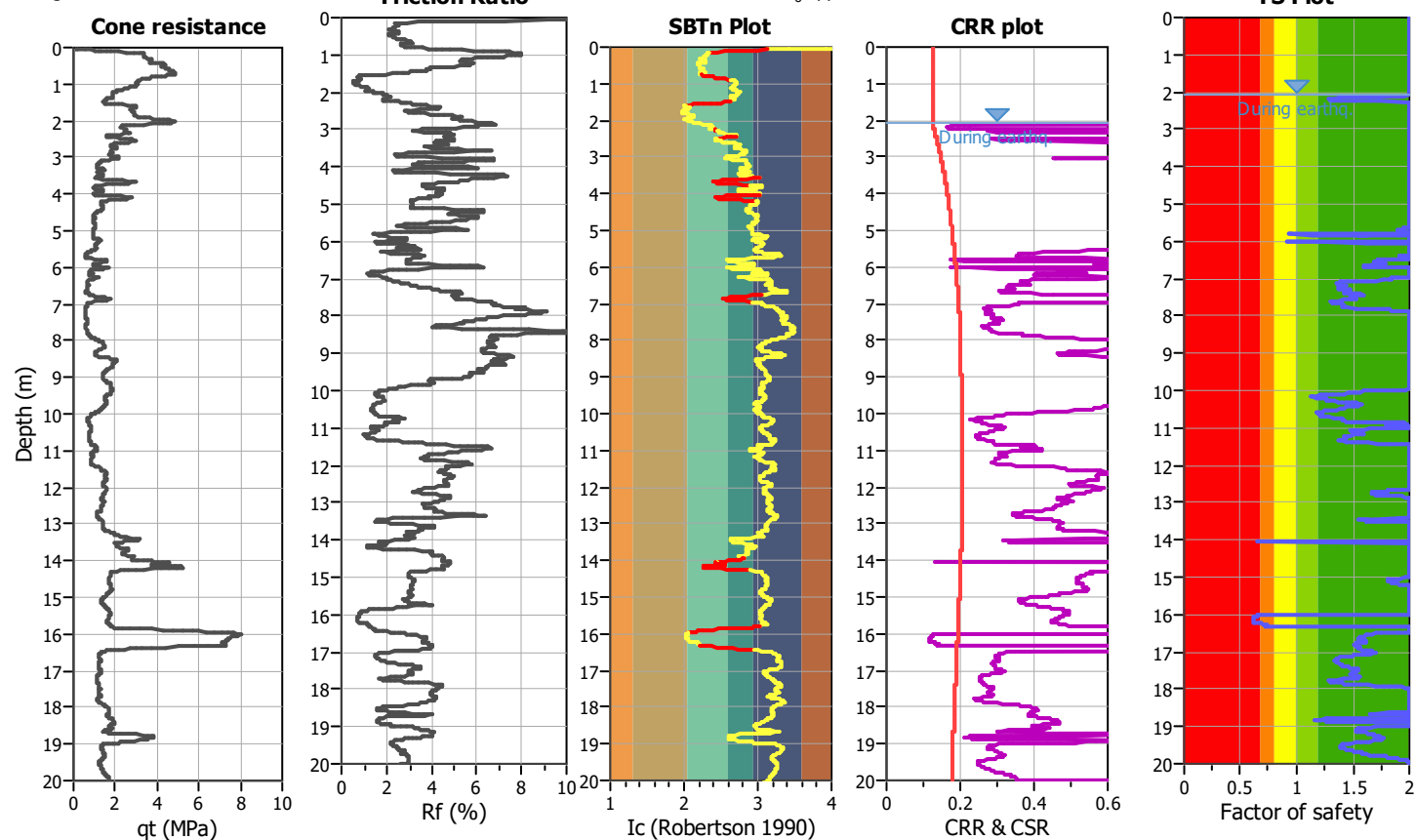
Project title :

Location : via Marconi - Bentivoglio (BO)

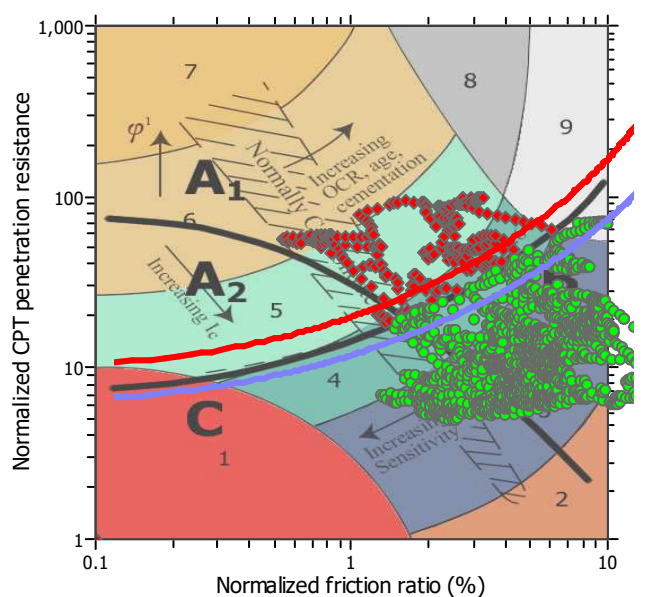
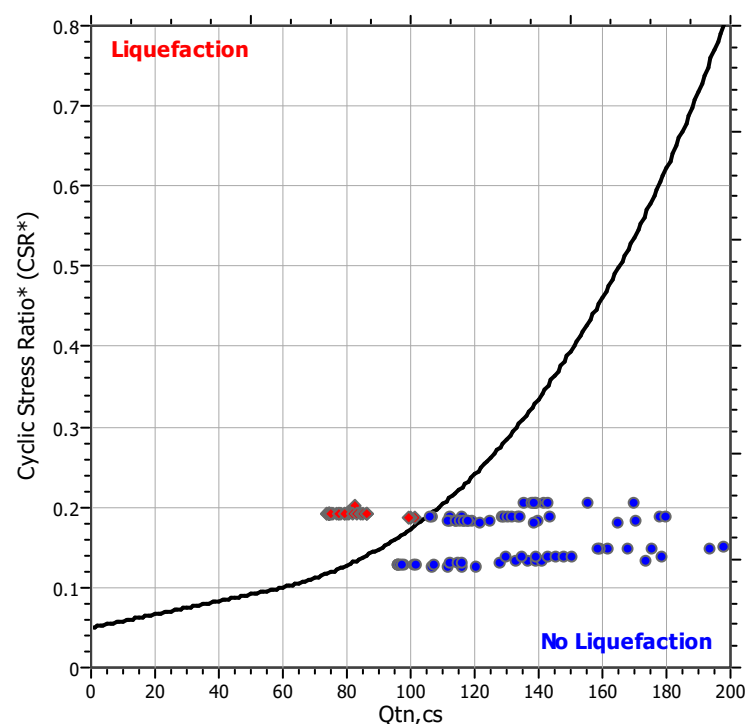
CPT file : CPTU1

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.10 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF	
Peak ground acceleration:	0.27	on:	Based on SBT	K_g applied:	Yes		

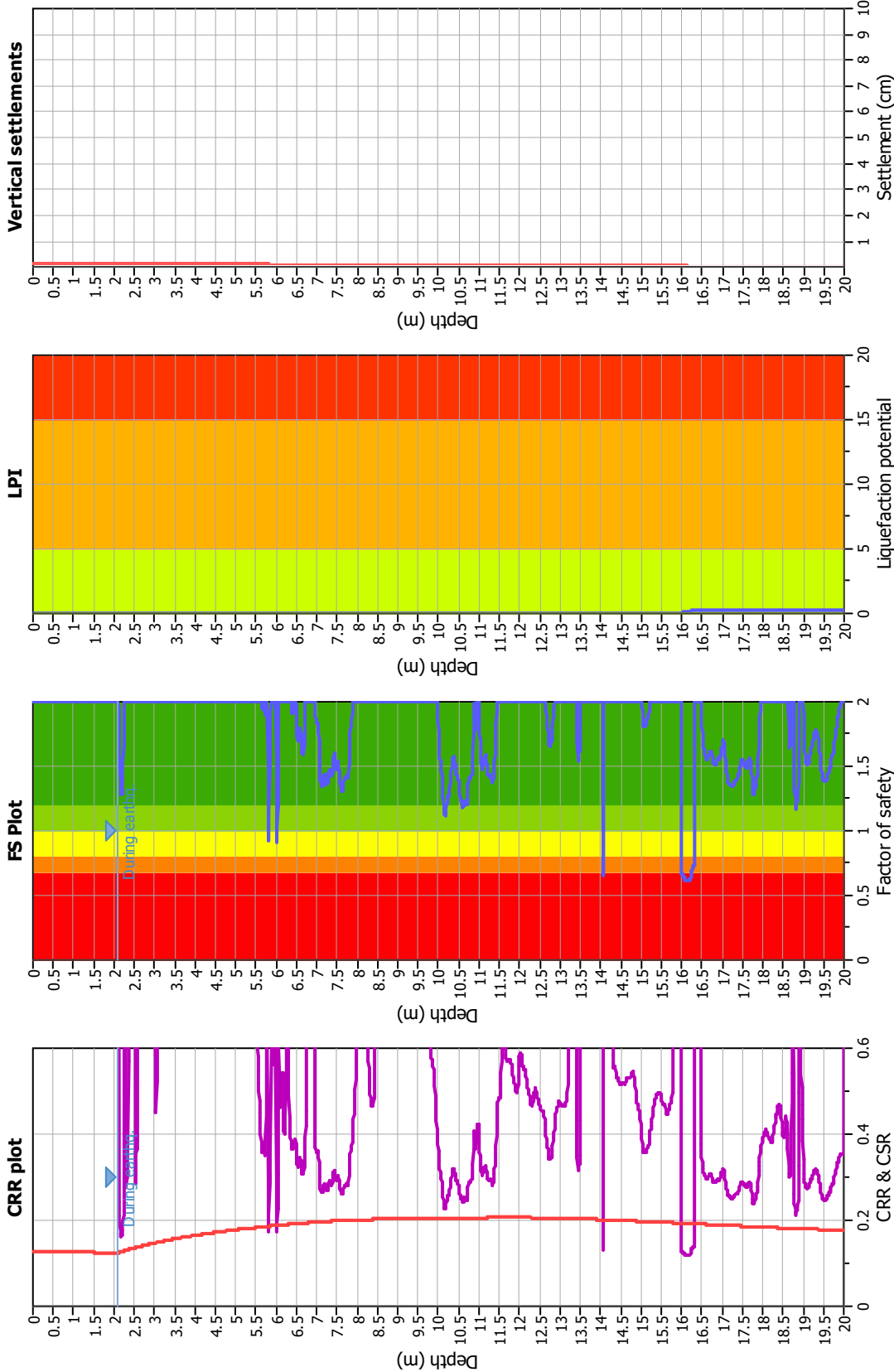


$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.10 m
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.27	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	2.10 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect: applied:	Yes
		K_0 applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	All soils
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Almost certain it will liquefy	Very high risk
Very likely to liquefy	High risk
Liquefaction and no liq. are equally likely	Low risk
Unlikely to liquefy	
Almost certain it will not liquefy	

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

via Marconi - Bentivoglio (BO)

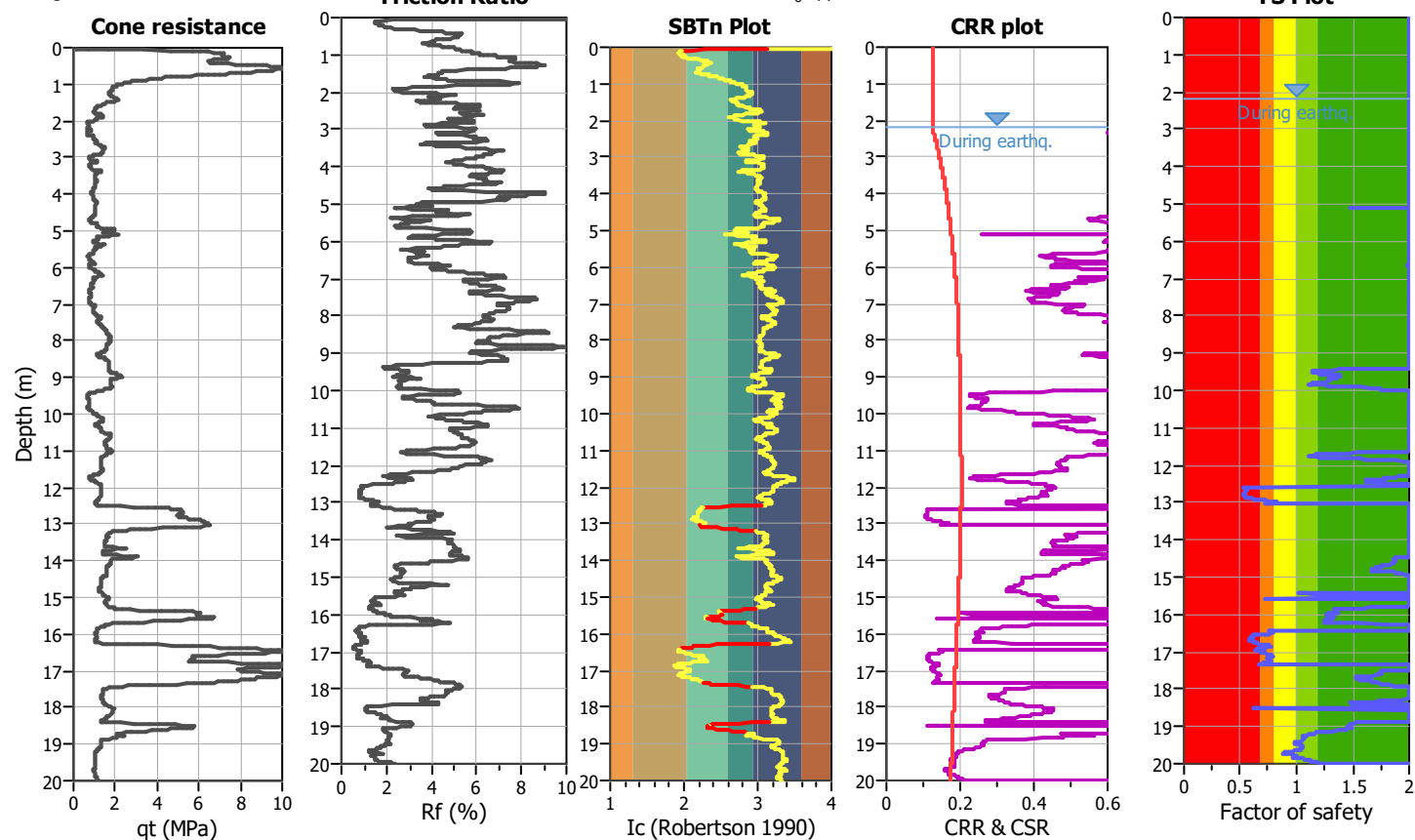
Project title :

Location :

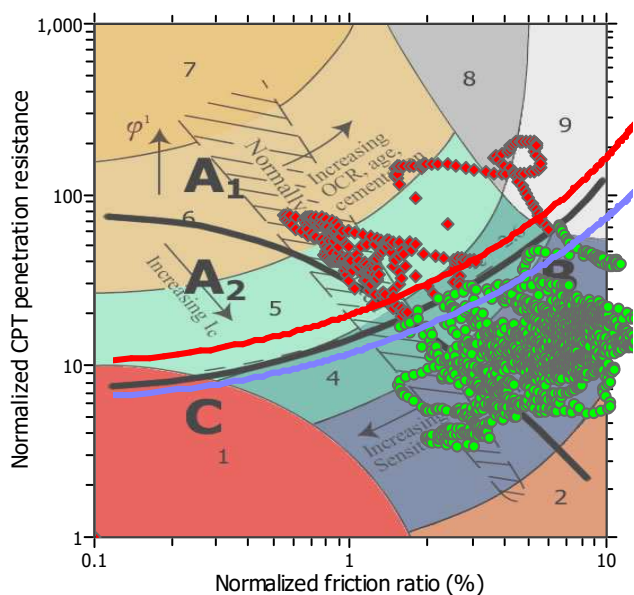
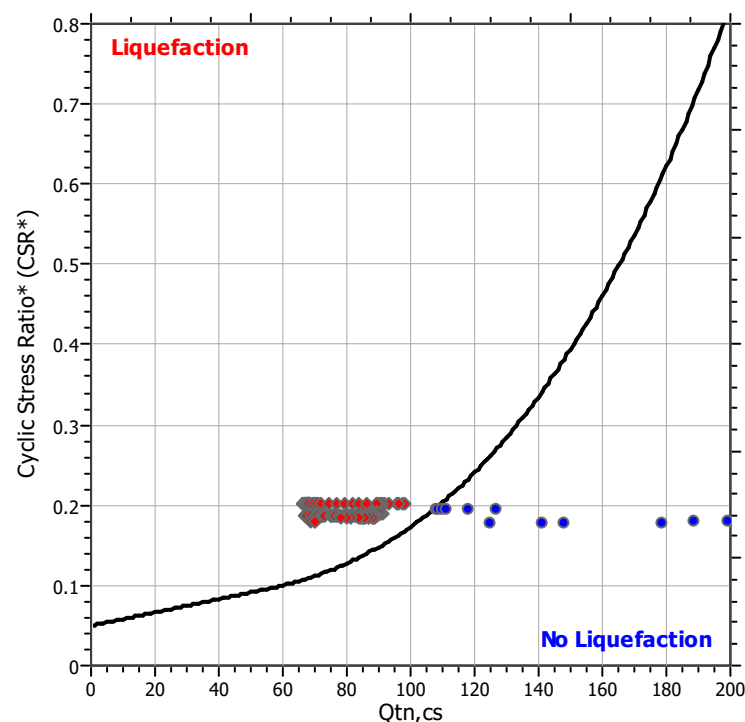
CPT file : CPTE2

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF	
Peak ground acceleration:	0.27	on:	Based on SBT	K_g applied:	Yes		

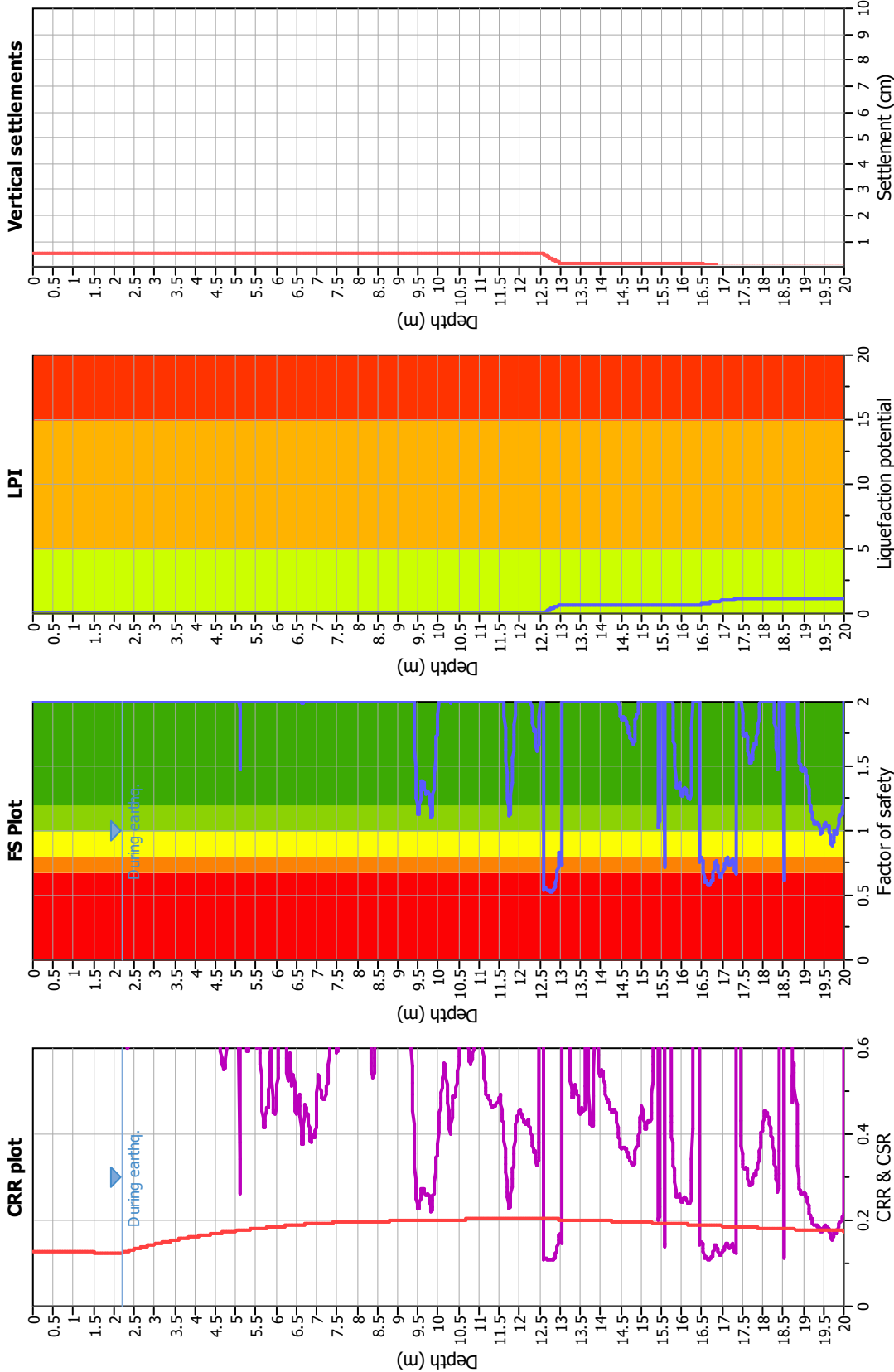


$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.20 m
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.27	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect: applied:	Yes
		K_0 applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	All soils
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

Almost certain it will liquefy	Very high risk
Very likely to liquefy	High risk
Liquefaction and no liq. are equally likely	Low risk
Unlikely to liquefy	
Almost certain it will not liquefy	

LPI color scheme

Almost certain it will liquefy	Very high risk
Very likely to liquefy	High risk
Liquefaction and no liq. are equally likely	Low risk
Unlikely to liquefy	
Almost certain it will not liquefy	