



## PROVINCIA DI MANTOVA COMUNE DI PORTO MANTOVANO

### PROGETTO PER L'AMPLIAMENTO DELLE STRUTTURE SPORTIVE ALLA CA' ROSSA IN LOCALITA' BANCOLE NEL TERRITORIO COMUNALE DI PORTO MANTOVANO

COMMITTENZA:



**COMUNE DI PORTO MANTOVANO**

Strada Cisa n. 112 – 46047 PORTO MANTOVANO

### RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA E SULLA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA AI FINI SISMICI ai sensi

D.M. 17 Gennaio 2018 – D.P.R. 5 Giugno 2001, n. 328

IL GEOLOGO

DANIELE DE TOGNI



IL GEOLOGO

FRANCESCO GABRIELLI



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## INDICE

1 - PREMESSA.....	Pag. 2
2 - REFERIMENTI NORMATIVI.....	Pag. 2
3 - STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA UTILIZZATA.....	Pag. 4
3.1 Premessa.....	Pag. 4
3.2 Misura a stazione singola del microtremore sismico.....	Pag. 4
3.3 Indagine geofisica MASW.....	Pag. 7
4 - INTERPRETAZIONI DELLE MISURE SISMICHE ESEGUITE.....	Pag. 9
5 - RISPOSTA SISMICA LOCALE E STABILITA' DEL SITO.....	Pag. 14
6 - DEFINIZIONE DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE F.A.....	Pag. 17
Analisi di secondo livello ai sensi D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011 .....	Pag. 17
7 - VALUTAZIONE DEL POTENZIALE RISCHIO DI LIQUEFAZIONE .....	Pag. 19
8 - CONCLUSIONI.....	Pag. 24

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## 1. PREMESSA

La presente relazione sulla modellazione sismica concernente la pericolosità sismica di base del sito, è stata redatta a supporto del progetto per gli interventi di ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.

Lo studio è stato condotto nel rispetto delle normative vigenti in materia, D.M. 17.01.2018 “Norme tecniche per le Costruzioni” (C3 Azioni sulle Costruzioni – C3.2 Azione sismica; C7 Progettazione per azioni sismiche – C7.11 Opere e sistemi geotecnici; C.7.11.2 Caratterizzazione geotecnica ai fini sismici; C.7.11.3 Risposta sismica e stabilità del sito; C3.2.2. “Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche”), il quale definisce i criteri metodologici per la valutazione della stabilità nei confronti della liquefazione nonché l’azione sismica di progetto che per la quale, in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull’individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento e sulle condizioni topografiche.

Per l’analisi degli effetti sismici, comprensivi della valutazione dell’amplificazione locale mediante la definizione del fattore di amplificazione F.A., si è fatto riferimento ai criteri decritti nell’Allegato 5 alla D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011, “*Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione all’art. 57, comma 1, della L.R. 11 marzo 2005, n. 12 approvati con D.G.R. 22/12/2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con D.G.R. 28 maggio 2008 n. 8/7374*”.

Per le procedure di riferimento finalizzate alla valutazione della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione si è fatto riferimento agli indirizzi regionali per la microzonazione sismica di cui alla Deliberazione di Assemblea Legislativa n. 112/2007 (D.A.L. 112/2007, <http://ambiente.regione.emiliaromagna.it/geologia/temi/sismica>), derivate dalla pubblicazione a cura dell’Associazione Geotecnica Italiana “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee Guida” (AGI 2005, <http://www.associazionegeotecnica.it/pubblicazioni/aspetti-geotecnici-della-progettazione-zona-sismica>).

La relazione si articola nel seguente modo:

- riassunto metodica impiegata;
- definizione della categoria sismica dei terreni di fondazione;
- definizione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica;
- stabilità nei confronti della liquefazione;
- stima dell’entità dei cedimenti post-sismici.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 2
--	---	---	--------



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Per la caratterizzazione litostratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione, nel mese di Ottobre 2019 sono state eseguite tre prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT, spinte alla profondità massima di 18 metri dal piano campagna.

Per la classificazione sismica dei terreni di fondazione, è stata eseguita una doppia misura a stazione singola del rumore sismico ambientale in seguito elaborate con la tecnica di Nakamura (H.V.S.R.) con finestra di campionamento di 30 minuti, in grado di evidenziare la frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo, oltre a stimare in maniera rapida la sismo-stratigrafia e l'andamento delle Vs con la profondità, associata a uno stendimento sismico attivo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la definizione delle Vs30 e la categoria sismica del sottosuolo.

## 2. RIFERIMENTI NORMATIVI

La realizzazione del presente studio è stata eseguita in ottemperanza alle indicazioni fornite dalla normativa vigente con particolare riferimento alle seguenti norme:

### **DECRETO MINISTERIALE 18 GENNAIO 2018**

Aggiornamento delle *“Norme Tecniche per le Costruzioni”*.

### **CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI**

*“Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale”*.

### **DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE DELLA LOMBARDIA 28 MAGGIO – N. 8/7374**

Aggiornamento dei “Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1 della l.r. 11 Marzo 2005, n. 12”, approvati con d.g.r. 22 Dicembre 2005, n. 8/1566.

### **DELIBERA GIUNTA REGIONALE DELLA LOMBARDIA N. 14964 DEL 07 NOVEMBRE 2003**

Disposizioni preliminari per l’attuazione dell’Ordinanza Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 Marzo 2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.

### **D.G.R. N. IX/2616 DEL 30/11/2011 – ALLEGATO 5**

“Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione all’art. 57, comma 1, della L.R. 11 marzo 2005, n. 12 approvati con D.G.R. 22/12/2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con D.G.R. 28 maggio 2008 n. 8/7374”.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 3
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

**D.P.R. 5 GIUGNO 2001, N. 328**

## **Articolo 41 – Attività professionali**

“punto c) le indagini geognostiche e l'esplorazione del sottosuolo anche con metodi geofisici; le indagini e consulenze geologiche ai fini della relazione geologica per le opere di ingegneria civile mediante la costruzione del modello geologico-tecnico; la programmazione e progettazione degli interventi geologici e la direzione dei lavori relativi, finalizzati alla redazione della relazione geologica...;”.

## **3. STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA UTILIZZATA**

### **3.1 Premessa**

Ai fini del presente studio sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche;

- **n. 02 analisi del microtremore passiva con TROMINO** al fine di valutare l'intervallo all'interno del quale risuona il terreno fornendo un intervallo di frequenza di risonanza ( $f_r$ ), l'andamento delle velocità  $V_s$  con la profondità; il tipo di stratigrafia si basa sul concetto di *contrasto di impedenza*.  
Per *strato* si intende cioè un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.
- **n. 01 stendimento sismico attivo (MASW)** (Multichannel Analysis of Surface Waves) (Park et alii, 1999) al fine di valutare la risposta del terreno all'azione sismica, mediante la valutazione della velocità media delle onde di taglio nei primi 30 metri sotto il piano di posa delle fondazioni ( $V_{s30}$ ).

### **3.2 Misura a stazione singola del microtremore sismico**

La tecnica dei rapporti spettrali o HVSR (Horizontal to Verticale Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di “doppia risonanza” estremamente pericolosi
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 4
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

- la **velocità media delle onde di taglio Vs** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. E' necessario, per affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la Vs30 e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle Norme tecniche per le Costruzioni del 14 Gennaio 2008;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0,5 e 700 metri di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri.

Il principio su cui si basa la presente tecnica in termini di stratigrafia del sottosuolo è rappresentato dalla definizione di strato inteso come una unità distinta da quella sopra e sottostante per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s;
2. dal percorso dell'onda sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
3. dalla risposta dello strumento.

Il rumore sismico ambientale è generato da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale modello *Tromino* che rappresenta la nuova generazione di strumenti leggeri e compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni.

Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz.

I dati vengono memorizzati in una scheda di memoria interna da 512 Mb, evitando così la presenza di qualsiasi cavo che possa introdurre rumore meccanico ed elettronico.

I dati ottenuti sono stati convertiti in file ASCII mediante software "*Grilla*", fornito a supporto dello strumento utilizzato, quindi elaborati per ottenere spettri di velocità in funzione della frequenza.

In fase operativa si sono seguite le seguenti operazioni:

1. il rumore sismico è stato registrato nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo dell'ordine delle decine di minuti (circa 20 minuti);
2. la registrazione è stata suddivisa in intervalli della durata di qualche decina di secondi ciascuno;
3. per ogni segmento viene eseguita un'analisi spettrale del segmento nelle sue tre componenti;

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 5
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

4. per ciascun segmento si calcolano i rapporti spettrali tra le componenti del moto sui piani orizzontale e verticale;
5. vengono calcolati i rapporti spettrali medi su tutti i segmenti.

Per considerare la misura ottenuta come una stima dell'ellitticità delle onde di Rayleigh è necessario che:

1. i rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano “stabili” ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato;
2. gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano state sorgenti “dominanti”;
3. la misura non contenga errori sistematici (per esempio dovuti ad un cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno).

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (HVSr) basati sulla simulazione del campo di onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli secondo la teoria descritta in AKI (1964) e Ben-Menahem e Singh (1981).

Il codice può elaborare modelli con qualsiasi numero di strati, in qualsiasi intervallo di frequenze e in qualsiasi numero di modi (fondamentale e superiori).

Operativamente si costruisce un modello teorico HVSr avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita; successivamente, tramite specifico algoritmo, si cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale.

In questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde VS.

Il metodo HVSr consiste nello studio del rapporto spettrale tra la componente orizzontale del rumore e quella verticale (H/V spectrum). Il valore di tale rapporto è direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocità delle onde e densità del materiale).

Nel presente lavoro si sfrutterà la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale H/V) con quello effettivamente misurato in superficie.

Considerando due strati con differente impedenza acustica, la **frequenza di risonanza (fr)** è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio Vs del primo strato dalla seguente relazione:

$$fr = V_{s1} / 4 h_1$$

$V_{s1}$  = velocità delle onde S del primo strato;

$h_1$  = spessore primo strato.

Nakamura (1989) ha inoltre dimostrato che i massimi dei rapporti spettrali H/V consentono di individuare correttamente la frequenza e quindi il periodo fondamentale di risonanza per le onde S. Negli ultimi anni un progetto europeo denominato SESAME (Site Effects Assessment using Ambient Excitations) si è occupato

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 6
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola e array. Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSr e la significatività dei picchi H/V eventualmente trovati.

La registrazione è avvenuta impostando i seguenti parametri strumentali:

- Frequenza di campionamento 128 Hz;
- Durata 16 minuti;
- Orientamento strumento nord-sud.

### 3.3 Indagine geofisica MASW

Il metodo geofisico utilizzato in questa sede per la caratterizzazione della categoria di sottosuolo in base al valore delle Vs è la sismica a rifrazione attiva elaborata mediante metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves): essa permette di modellizzare il sottosuolo mediante l'analisi delle onde di Rayleigh (Park et alii, 1999).

Il metodo consente di stimare la velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni a partire dalla velocità delle onde di superficie (Rayleigh nel caso del presente studio).

La velocità delle onde di taglio è legata al modulo di rigidezza a taglio del mezzo (terreno) mediante la relazione:

$$V_s = (G/\rho)^{1/2}$$

dove:

- $\rho$  = densità del mezzo;
- $G$  = modulo di rigidezza a taglio del mezzo.

Poiché la densità dei suoli varia relativamente poco con la profondità (almeno nelle prime decine di metri), dalla formula si evince che i valori di Vs sono i primi indicatori della rigidità di un terreno.

Le onde Rayleigh sono onde di superficie e sono generate dall'interazione tra onde di pressione (P) e le onde di taglio verticali (Sv) ogni qualvolta esiste una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo.

In presenza di un semispazio omogeneo la loro velocità non presenta dipendenza dalla frequenza (no dispersione). Alla superficie libera hanno moto ellittico retrogrado che si inverte ad una profondità di  $\lambda/2\pi$ . L'ampiezza dello spostamento decresce con legge esponenziale; per questo diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

La propagazione di queste onde non è influenzata dalle caratteristiche del mezzo al di sotto di una profondità pari a  $\lambda$ . Esse possono essere viste come la sovrapposizione di due componenti separate: una longitudinale e l'altra trasversale, che si propagano lungo la superficie con la stessa velocità ma con differente attenuazione con la profondità. Il vantaggio di utilizzare il metodo MASW sta nel fatto che non è limitato dalla presenza di inversioni di velocità in profondità; ha una buona risoluzione e poi perché la propagazione delle onde

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 7
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Rayleigh è funzione soprattutto delle Vs (parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito). Esso è particolarmente indicato per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

La dispersione è la deformazione di un treno d'onda dovuta ad una variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza.

Per la onde Rayleigh questa deformazione non si manifesta all'interno di un semispazio omogeneo ed isotropo ma solo quando questi presenta una stratificazione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda  $\lambda$  (quindi frequenza) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di circa  $\lambda/2$ . Tale velocità delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ) è pari a circa il 90% delle onde di taglio Vs.

Per le indagini è stato utilizzato un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione Engineering, combinato con un trigger wireless equipaggiato di puntale, con frequenza propria di 4,5 Hz.

Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, EW e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10  $\mu$ m), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz.

In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t, tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite un software dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi.

L'abbinamento tra Tromino Engy e il trigger wireless consente di effettuare stendimenti sismici senza limitazioni di estensione. La presenza di un unico geofono, detto starter in quanto registra i primi arrivi delle onde sismiche, impone il suo spostamento continuo secondo le posizioni dello schema prestabilito.

Lo stendimento aveva una lunghezza di 56 m con il primo geofono a distanza di 5,0 m dal Tromino mentre l'interdistanza tra le altre posizioni del geofono era di 2,0 metri; l'energizzazione, ottenuta tramite un salto effettuato dall'operatore, è avvenuta a 1,0 m di distanza dallo starter lungo l'asse geofono-Tromino.

Da tale stendimento viene elaborato un sismogramma definito "virtuale" in quanto non deriva dalla registrazione simultanea di più geofoni, ma i segnali di ogni energizzazione vengono composti in un unico sismogramma tramite software dedicati.

L'elaborazione del segnale registrato si compone dei seguenti passaggi:

1. picking dei primi arrivi sulla traccia di registrazione del geofono;
2. ricostruzione del sismogramma delle tracce registrate dal sismografo (Tromino) tramite software Grilla;
3. selezione per ogni traccia delle finestre temporali contenenti onde superficiali di Rayleigh;
4. calcolo della curva di dispersione sperimentale tramite software dedicato.

La curva di dispersione fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate).

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 8
--	---	---	--------

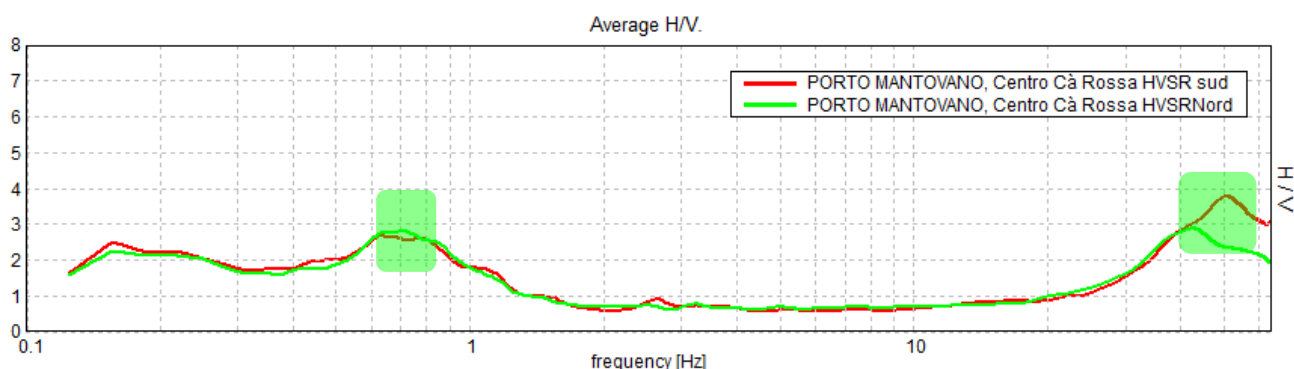


<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

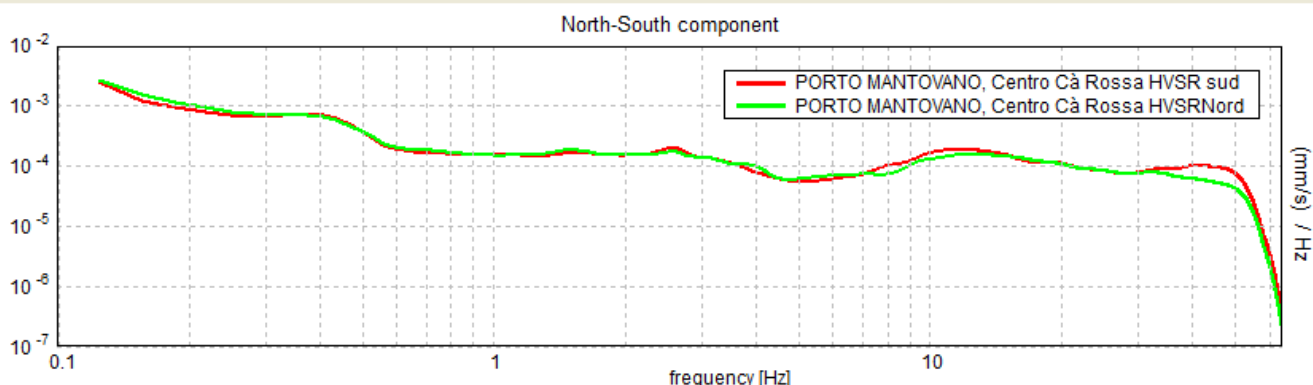
## 4 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE SISMICHE ESEGUITE

### Interpretazione indagini HVSR

L'interpretazione dei dati ottenuti dal rilievo del rumore sismico consente sia di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del substrato litoide inteso come bedrock sismico sia di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo. Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del moto fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si può ricavare il valore della frequenza caratteristica del sito. Sapendo che ad ogni picco di frequenza corrisponde una profondità (metri) dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza si è potuto estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo. L'ampio range di frequenze acquisite dallo strumento utilizzato (0.1 ÷ 128 Hz) non ha evidenziato contrasti di impedenza attribuibili alla presenza di rifrattori sismici, ad eccezione alle basse frequenze al di sotto di 0,70 Hz e alla presenza di livello rigido al di sotto della copertura pedogenizzata alla frequenza di 40-50 Hz.



Risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura H/V. In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. Sono anche indicati i valori delle frequenze corrispondenti ai massimi della funzione H/V.



Andamenti degli spettri di ampiezza del rumore sulla componente verticale (curva magenta) e sulle componenti orizzontali (curve verde e blu)

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 9
--	---	---	--------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

La perfetta sovrapposizione dei segnali dei due rilievi eseguiti, testimonia l'omogeneità della sismostratigrafia con la profondità.

Il fit delle curve H/V ha permesso di ricostruire in modo approssimato il profilo di Vs fino alla profondità massima di 190-200 metri, corrispondente all'ultimo riflettore individuato dal picco posto alla frequenza di 0,60 Hz.

Per frequenze inferiori a 0,60 Hz, il rapporto H/V non si mantiene piatto, ma mostra alcuni massimi locali, legati a strutture più profonde.

La frequenza caratteristica di risonanza di sito, generata dal contrasto sismico più elevato, è risultata compresa tra 0,60 e 0,70 Hz (periodo  $T = 1,43-1,66$  s), con valori del rapporto H/V compreso tra 2,50 e 3,00 (contrasto di impedenza bassa).

Si ritiene importante, vista l'ampiezza dei picchi spettrali registrati, considerare l'intervallo frequenziale di circa 0,60 – 0,70 Hz come range di possibili valori di vibrazione del terreno in caso di evento sismico di magnitudo rilevante poiché d'interesse ingegneristico – strutturale.

E' oramai consolidata, l'ipotesi che le costruzioni subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale dei terreni investiti da un'onda sismica e quella naturale della struttura.

La qualità del segnale acquisito in base al progetto SESAME (Linee Guida 2005) è stato giudicato affidabile in quanto per l'affidabilità della curva HVSR i primi tre parametri sono positivi mentre per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi.

### Interpretazione prove MASW

Al fine di determinare il profilo verticale delle onde di taglio e definire la categoria sismica del sottosuolo sulla base del valore  $VS_{30}$ , è stata eseguita una indagine geofisica mediante il metodo MASW attivo, consistite nello stendimento sismico. Sullo spettro di velocità viene eseguito un "picking" della curva di dispersione (soprassegno con pallini bianchi) individuando un insieme di punti che appartengono ad un certo modo (in questo caso al modo fondamentale) di propagazione dell'onda superficiale di Rayleigh e di Love.

La curva di dispersione ottenuta fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate). A questo punto è possibile procedere con l'interpretazione della misura.

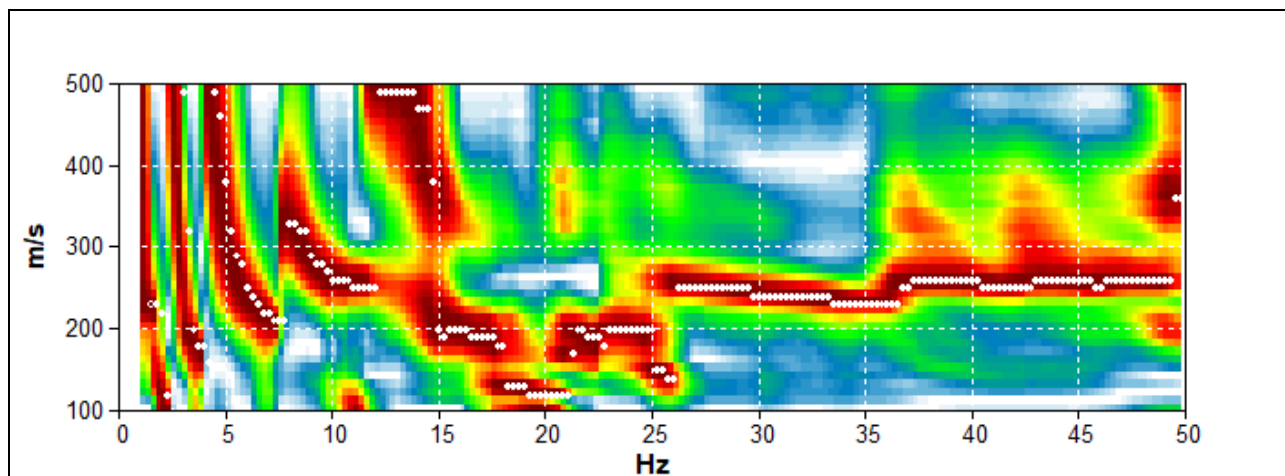
Il grafico risultante dalla misura consente lo studio e l'elaborazione dei dati relativi al primo modo di vibrare del terreno, individuato come la curva definita dai colori caldi con velocità e frequenza minore.

Nei grafici è possibile riconoscere gran parte della curva di dispersione fondamentale, con tratti ben visibili compresi tra 1 e 50 Hz, frequenza alla quale la curva tende a Vs infinite, indicando il limite strumentale della misura.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 10
--	---	---	---------

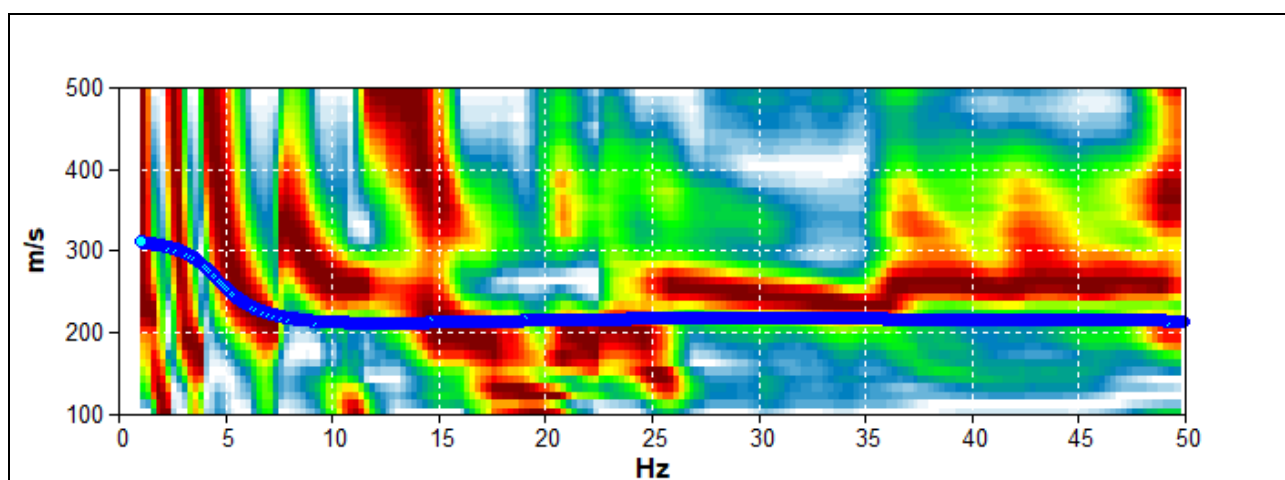


<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



Spettro di velocità di fase tratto dalla prova MASW e relativo picking

Dal grafico è possibile ricostruire la successione sismo-stratigrafica, individuando i cambi di pendenza della curva di dispersione del modo fondamentale, tra cui quello principale è posizionato intorno a 7-8 Hz e, pertanto, entro i 10/15 metri di profondità.



Curva di dispersione del sito e fit per la costruzione del modello sintetico

### Interpretazione delle misure sismiche

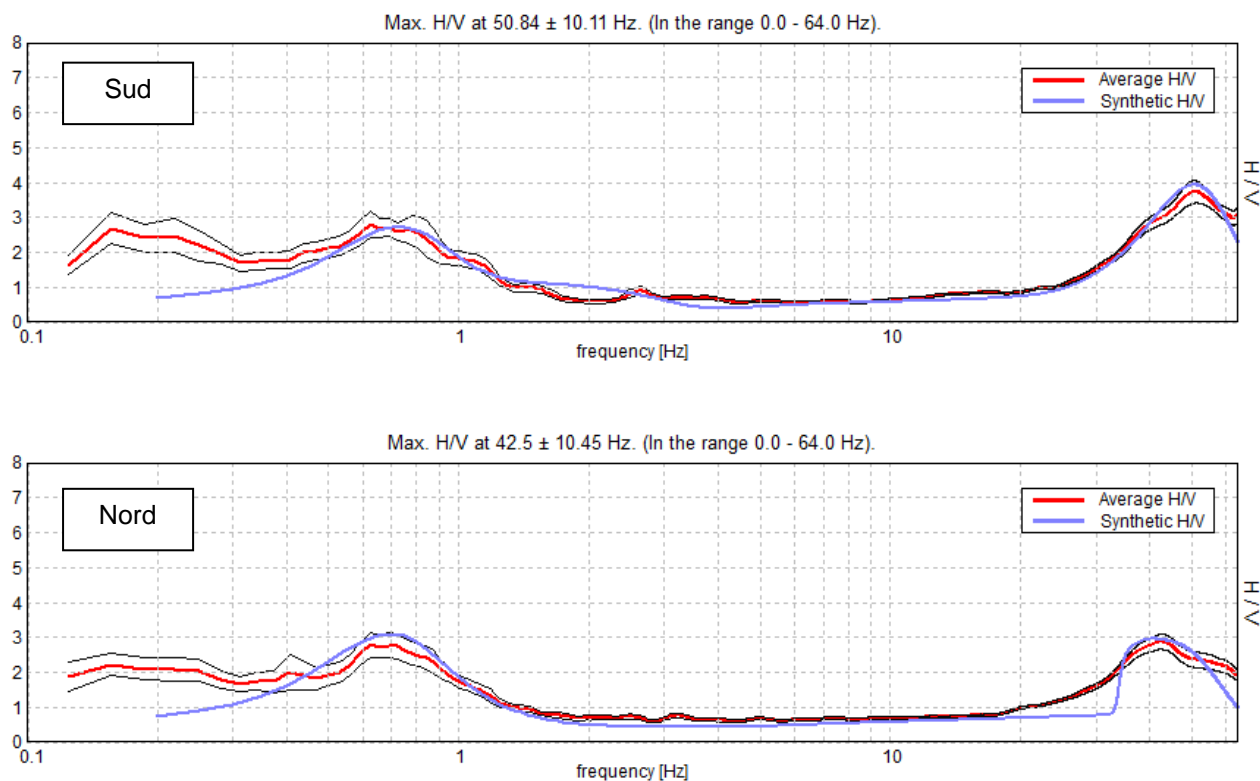
Per ovviare alla limitata profondità di indagine della prova MASW si è proceduto con l'interpretazione della misura tomografica effettuata nello stesso ambito, utilizzando come vincolo il modello creato a partire dallo stendimento.

L'elaborazione della misura, mediante ricostruzione delle curve sintetiche H/V, è riuscita a riprodurre con buona approssimazione la curva HVSR registrata, fornendo il profilo sismico del sito.

I modelli di inversione che se ne derivano sono proposti in tabella 1 e 2.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 11
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



La curva sperimentale rossa rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna mentre quella blu è la curva sintetica generata dal codice di calcolo.

### Interpretazione delle misure sismiche

Per ovviare alla limitata profondità di indagine della prova MASW si è proceduto con l'interpretazione della misura tomografica effettuata nello stesso ambito, utilizzando come vincolo il modello creato a partire dallo stendimento.

L'elaborazione della misura, mediante ricostruzione delle curve sintetiche H/V, è riuscita a riprodurre con buona approssimazione la curva HVSR registrata, fornendo il profilo sismico del sito.

Il modello di inversione che se ne deriva è proposto nella tabella successiva.

La ricostruzione del profilo sismo-stratigrafico mediante l'indagine HVSR ha evidenziato la presenza di materiali soffici nei primi 23 metri di profondità, caratterizzati da una velocità di propagazione delle onde S compresa tra 210 e 240 m/s, mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità del sottosuolo cresce gradualmente, con valori di Vs che passano da circa 280/350 m/s a oltre 510 m, alla profondità di oltre 190/200 metri.

Il bedrock sismico non è stato individuato fino a tale profondità; oltre i 190/200 metri di profondità, è stato individuato, un sismo-strato rigido definito come bedrock like con valori di propagazione delle onde S oltre i Vs > 600 m/s.

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

TABELLA 1 – MODELLO DI INVERSIONE DA PROVA HVSr SUD

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
0.55	0.55	110	Copertura soffice
5.85	5.30	230	Copertura soffice
23.85	18.00	220	Copertura soffice
67.85	44.00	350	Copertura mediamente rigida
110.85	43.00	430	Copertura rigida
188.85	78.00	510	Copertura rigida
>188.85	Inf.	640	Bedrock like

TABELLA 2 – MODELLO DI INVERSIONE DA PROVA HVSr NORD

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
0.65	0.65	120	Copertura soffice
5.60	4.95	240	Copertura soffice
21.60	16.00	210	Copertura soffice
58.60	37.00	280	Copertura mediamente rigida
117.60	59.00	400	Copertura rigida
200.65	83.00	490	Copertura rigida
>200.65	Inf.	600	Bedrock like

L'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti dall'indagine MASW, finalizzata alla determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore  $VS_{30}$ , ha evidenziato il seguente modello di inversione.

TABELLA 3 – MODELLO DI INVERSIONE DA PROVA MASW

Profondità (bottom layer) [m]	Spessore sismostrati [m]	Vs [m/s]	Interpretazione stratigrafica
1.85	1.85	260	Copertura mediamente rigida
4.05	2.20	245	Copertura mediamente rigida
7.65	3.60	205	Copertura soffice
16.15	8.50	215	Copertura soffice
22.05	5.90	265	Copertura mediamente rigida
27.65	5.60	309	Copertura mediamente rigida
>27.65	Inf.	335	Copertura mediamente rigida

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

La ricostruzione dei profili sismo-stratigrafici ha evidenziato la presenza di materiali mediamente rigida fino ad oltre la profondità di 30 metri, con velocità di propagazione delle onde S crescente con la profondità, compresa tra 245 m/s e 335 m/s; tra la profondità 4,00 e 16,00 metri circa, si intercala un sismostrato caratterizzato da una rigidità inferiore rispetto a materiali presenti al tetto ed al letto dello strato.

La velocità in tali depositi più soffici è compresa tra 205 e 215 m/s.

Per **velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio** si intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati nei primi metri di profondità **dal piano di posa della fondazione**, secondo la relazione:

E' stato quindi possibile stimare, tramite la relazione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h(strato)}{V_s(strato)}}$$

dove  $N$  è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore  $h(strato)$  e dalla velocità delle onde S  $V_s(strato)$ .

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

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  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Non avendo riscontrato il substrato sismico entro la profondità di 30 metri, la velocità equivalente delle onde S, è stata calcolata nei primi 30 metri al di sotto del piano di imposta della fondazione, come esplicitamente richiesto dalla normativa vigente; la velocità delle onde VS a 30 metri dal piano campagna ( $V_{s30}$ ) come esplicitamente richiesto dalla normativa vigente:

- Analisi HVSR Nord  $V_{s30} (1.00-31.00) = 233 \text{ m/s}$
- Analisi HVSR Sud  $V_{s30} (1.00-31.00) = 243 \text{ m/s}$
- Analisi MASW  $V_{s30} (1.00-31.00) = 251 \text{ m/s}$

## 5. RISPOSTA SISMICA LOCALE E STABILITA' DEL SITO

### Definizione delle $V_{s30}$ e della "categoria di sottosuolo"

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi. In assenza di tali 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 fondazione (D.M. 17 Gennaio 2018).

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 14
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Da normativa, le categorie di sottosuolo di fondazione specifiche risultano:

CATEGORIA	DESCRIZIONE
<b>A</b>	<b>Formazioni litoidi o terreni omogenei molto rigidi</b> , caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m;
<b>B</b>	<b>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti</b> , con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 e 800 m/s;
<b>C</b>	<b>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti</b> , con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s;
<b>D</b>	<b>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti</b> , con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 < 180 m/s;
<b>E</b>	<b>Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali</b> , con valori di Vs30 simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con Vs30 > 800m/s.

Dalla ricostruzione del quadro dei profili sismostratigrafici emersi dal seguente studio, si ritiene opportuno inserire il sito in oggetto di studio nella **Categoria C** “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s*”.

### Amplificazione topografica

Gli effetti di amplificazione topografica si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali più o meno articolate e da irregolarità topografiche in generale; tali condizioni favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta del rilievo a seguito di fenomeni di riflessione sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto.

Tale amplificazione è condizionata dalle caratteristiche geometriche del rilievo (quali il fattore di forma  $H/L$ ), che devono essere tali per cui la lunghezza d'onda incidente  $\lambda$  sia comparabile con la semilarghezza  $L/2$  della base dell'irregolarità; lungo i fianchi del rilievo l'interazione tra onde incidenti ed onde diffratte produce rapide variazioni in ampiezza e frequenza delle onde sismiche generando un complesso campo di spostamenti con alternanza di amplificazioni ed attenuazioni che possono dare luogo a marcati movimenti differenziali.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 15
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

**Tabella 3.2.IV – Categorie topografiche**

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

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del **coefficiente topografico**  $S_T$  riportati nella Tabella 3.2.VI (D.M.17 Gennaio 2018), in funzioni delle categorie topografiche definite in § 3.2.2 (D.M. 17 Gennaio 2018) e dell'ubicazione dell'opera.

Le sotto esposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore a 30 metri.

Sulla base della morfologia del sito indagato pressoché pianeggiante e pertanto, con inclinazioni inferiori al valore soglia di  $i = 15^\circ$ , gli **effetti topografici possono essere trascurati** in quanto la superficie topografica, poiché il sito è ubicato in una ampia area pianeggiante, può essere classificata come appartenente alla categoria T1: “Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ ”

**Tabella 3.2.VI – 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 del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Per tale categoria si assume quale valore del **coefficiente di amplificazione topografica**  $S_T = 1,0$ .

### Accelerazione attesa alla sommità del deposito

Tenuto conto dell'accelerazione al suolo di riferimento pari a 0,106716g, stabilito dalla Delibera Giunta Regionale 11 Luglio 2014 – n. X/2129 “Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia”, del coefficiente di amplificazione stratigrafico ( $S_S = 1,50$ ), corrispondente alla  $V_{s30}$  misurata direttamente

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

(Categoria sismica del suolo C), e del coefficiente topografico ( $S_T = 1,0$ ), l'**accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) risulta:

$$a_{MAX(g)} = A_{gmax} * S_S * S_T$$

$$a_{MAX(g)} = 0,106716 * 1,50 * 1,00 = 0,160074g$$

## 6. DEFINIZIONE DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE F.A.

### Analisi di secondo livello ai sensi D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011 – Allegato 5

Per la determinazione dei coefficienti di amplificazione sismica ci si è avvalsi delle risultanze emerse nello studio dell'adeguamento sismico a supporto del P.G.T. comunale, mediante l'analisi di secondo livello, così come previsto dalla D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011 – Allegato 5.

Lo scenario di pericolosità sismica locale Z4a tiene dunque conto della litologia prevalente nel sito, la quale ha orientato la scelta della scheda di valutazione più appropriata fra quelle proposte.

All'interno della scheda di valutazione degli effetti litologici ritenuta più idonea è stata poi selezionata la curva che, in ragione della profondità e della velocità  $V_s$  dello strato superficiale, meglio si adatta alle condizioni locali.

Si ricorre al criterio descritto a proposito dell'intervallo di periodo 0,1-0,5 s, per il quale gli abachi elaborati dal Politecnico di Milano forniscono tre diverse curve contraddistinte ognuna da una specifica funzione algebrica; per l'intervallo 0,5-1,5 s, viceversa, all'interno delle singole schede litologiche sussiste una sola curva con la relativa formula.

Le formule esprimono il valore del Fattore di Amplificazione  $F_a$  in rapporto al periodo proprio del sito  $T$ , che viene calcolato considerando la sezione sismica fino alla profondità in cui  $V_s$  diviene uguale o superiore a 800 m/s (bedrock sismico).

L'equazione per il calcolo di  $T$  è la seguente:

$$T = 4 \times \sum_{i=1,n} (h_i) / [\sum_{i=1,n} (V_{s,i} \times h_i) / \sum_{i=1,n} (h_i)],$$

con  $h_i$  e  $V_{s,i}$  rispettivamente uguali allo spessore ed alla velocità dello strato  $i$ -esimo del modello.

Lo sviluppo dei calcoli evidenzia un valore del periodo proprio del sito  $T$  pari a 2,16 (da indagine HVSR).

La scheda che meglio si avvicina alle caratteristiche geofisiche riscontrate nel sito è la Scheda Litologia Sabbiosa, riportata nella figura della pagina seguente.

La scelta delle curve di correlazione  $T/F_a$  all'interno della scheda di valutazione è avvenuta tramite l'individuazione dello spessore e della velocità  $V_s$  dello strato superficiale, che ha portato a selezionare la curva 2 (da MASW, primo sismo-strato con velocità di 250 m/s e spessore di 16 meri).

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 17
--	---	---	---------



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA SABBIOSA

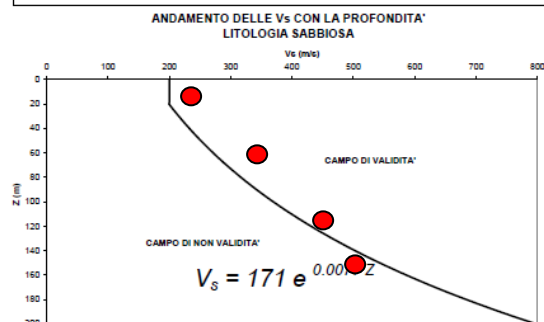
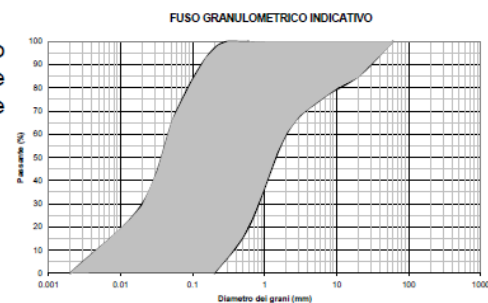
### PARAMETRI INDICATIVI

#### GRANULOMETRIA:

Da sabbia con ghiaia e ciottoli a limo e sabbia passando per sabbie ghiaiose, sabbie limose, sabbie con limo e ghiaia, sabbie limose debolmente ghiaiose, sabbie ghiaiose debolmente limose e sabbie

#### NOTE:

Comportamento granulare  
Struttura granulo-sostenuta  
Clasti con  $D_{max} > 20$  cm inferiori al 15%  
Frazione ghiaiosa inferiore al 25%  
Frazione limosa fino ad un massimo del 70%



Profondità primo strato (m)

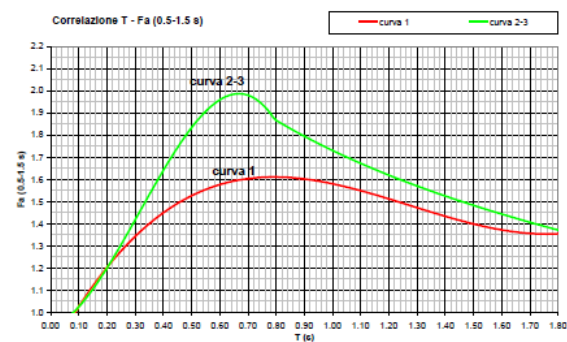
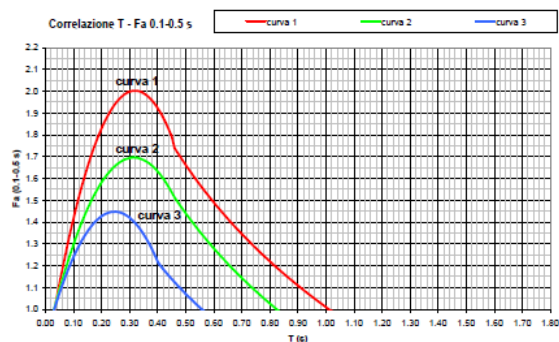
	1-3	4	5-12	13	14	15	16	17	18	20	25	30	40	50	60	70	90	110	130	140	160	180
200	2	1-2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA								
250	2	1-2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	NA	NA	NA							
300	2	1-2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	NA	NA	NA							
350	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	NA	NA	NA					
400	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA				
450	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA			
500	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA		
600	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA	
700	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA

ove  
la sigla NA indica  $Fa = 1$

il riquadro rosso indica la condizione stratigrafica per cui è necessario utilizzare le curve 1

**CONDIZIONE:** strato con spessore compreso tra 5 e 12 m e velocità media  $V_s$  minore o uguale a 300 m/s poggianti su strato con velocità maggiore di 500 m/s

$V_s < 300$ m/s	0
$V_s > 500$ m/s	5 - 12 m



Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico	Tratto rettilineo
1	$0.03 \leq T \leq 0.50$ $Fa_{0.1-0.5} = -12.21 T^2 + 7.79 T + 0.78$	$0.50 < T \leq 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.01 - 0.94 \ln T$	$T > 1.00$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.00$
2	$0.03 \leq T \leq 0.45$ $Fa_{0.1-0.5} = -8.65 T^2 + 5.44 T + 0.84$	$0.45 < T \leq 0.80$ $Fa_{0.1-0.5} = 0.83 - 0.88 \ln T$	$T > 0.80$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.00$
3	$0.03 \leq T \leq 0.40$ $Fa_{0.1-0.5} = -9.68 T^2 + 4.77 T + 0.86$	$0.50 < T \leq 0.55$ $Fa_{0.1-0.5} = 0.62 - 0.65 \ln T$	$T > 0.55$ $Fa_{0.1-0.5} = 1.00$

Curva	$0.08 \leq T \leq 1.80$
1	$Fa_{0.5-1.5} = 0.57 T^3 - 2.18 T^2 + 2.38 T + 0.81$
2	$0.08 \leq T < 0.80$
3	$0.80 \leq T \leq 1.80$ $Fa_{0.5-1.5} = -6.11 T^3 + 5.79 T^2 + 0.44 T + 0.93$



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Gli intervalli 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s nei quali viene calcolato il Fattore di Amplificazione sono rappresentativi del periodo proprio delle tipologie edilizie più frequenti in Regione Lombardia: l'intervallo 0,1-0,5 s, in particolare, si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide (indicativamente fino a 5 piani in elevazione), mentre l'intervallo 0,5-1,5 s è caratteristico di strutture più alte e flessibili (da 5 a 10 piani).

La metodologia utilizzata ha permesso di stimare i fattori di amplificazione  $F_a$  per il territorio di Porto Mantovano, i cui valori sono pari a 1,00 per periodi di vibrazione del sito compresi tra 0,1 e 0,5 s, e valori di  $F_a$  pari a 1,55 per periodi tra 0,5 e 1,5 s.

Per il territorio di Porto Mantovano per suoli di categoria C, i valori di soglia, oltre i quali lo spettro proposto dalla normativa vigente risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito, riportati nella banca dati in formato .xls (soglie\_lomb.xls), sono i seguenti:

Valori di soglia per il periodo compreso tra 0.1 - 0.5 s					
COMUNE	Classificazione sismica	Valori soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Porto Mantovano	ZONA 4	1,4	1,8	2,1	1,9

Valori di soglia per il periodo compreso tra 0.5 - 1.5 s					
COMUNE	Classificazione sismica	Valori soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Porto Mantovano	ZONA 4	1,7	2,4	4,0	3,0

I valori di  $F_a$  ottenuti (1,00 per il periodo 0,1-0,5 s e 1,55 per il periodo 0,5-1,5) per l'area indagata presso l'abitato di Bancole risultano minori al valore soglia assegnato dalla Regione Lombardia alla categoria di suolo corrispondente "C"; ne consegue che il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica.

## 7. VALUTAZIONE DEL POTENZIALE RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

Per liquefazione di un terreno si intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. Se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:

$$\tau = c + (\sigma_{v0} - u) \cdot \tan \phi$$

con:  $c$  = coesione del terreno;

$\sigma_{v0}$  = pressione litostatica totale agente alla profondità di indagine;

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 19
--	---	--	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

$u$  = pressione interstiziale dell'acqua;

$\phi$  = angolo di resistenza al taglio del terreno

è evidente che la grandezza  $\tau$  si può annullare solo nel caso in cui si siano verificate le condizioni:

1.  $c = 0$ ;
2.  $(\sigma_{v0} - u) = 0$ .

La condizione 1 vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreno coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica; la condizione 2 si verifica, quando la pressione interstiziale eguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità della colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie ( $\sigma_{v0} = u$ ).

In definitiva il fenomeno della liquefazione si può manifestare preferibilmente in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda, in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua. Dall'analisi dei fattori che predispongono un terreno alla liquefazione, tra i quali la granulometria, la profondità del livello potenzialmente liquefacibile, il grado di addensamento dei depositi, in linea generale si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti costituiti da sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile dallo 0 al 25%, si trovano sotto falda, sono da poco a mediamente addensati e si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori a 15 metri).

In dettaglio, le prove penetrometriche eseguite hanno evidenziato che l'area indagata è caratterizzata da terreni continentali prevalentemente sabbiosi, sabbioso-limosi e limoso-sabbiosi, appartenenti al sistema deposizionale del livello fondamentale di pianura, che costituiscono la transizione tra i depositi di alta energia dell'alta pianura ed i depositi di bassa energia della zona meridionale della pianura.

### Analisi rischio liquefazione

Per la presenza di depositi limoso-sabbiosi e sabbioso-limosi, saturi, a comportamento geotecnico di tipo attritivo/granulare, è necessario, alla luce della normativa vigente, si ritiene necessario eseguire la verifica a liquefazione.

Come indicato nella DAL n. 112/2007, tra i metodi semplificati sono raccomandati quelli basati su prove CPT e tra questi in particolare il metodo di Idriss & Boulanger (2014).

Per il presente studio sono state quindi realizzate le verifiche della propensione alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma sulle verticali delle prove penetrometriche statiche eseguite.

Per i calcoli è stato utilizzato il programma "Cliq 1.7" della Geologismiki Geotechnical Software, sviluppato in collaborazione con il Prof. Peter Robertson.

L'algoritmo di calcolo utilizzato si basa sul metodo di Idriss & Boulanger (2014). Le analisi eseguite seguono le procedure di riferimento dettate dall'NCEER. Lo stesso software esegue il calcolo dei cedimenti

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 20
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

attesi secondo il metodo proposto da Zhang ed al. (2002), calcolando per tutti i livelli che hanno un fattore di sicurezza inferiore a 2.

Il potenziale di liquefazione si ottiene eseguendo il calcolo del fattore di sicurezza  $FS_L$ , definito dal rapporto CRR su CSR.

Le metodologie utilizzate permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso il confronto tra le caratteristiche granulometriche e di addensamento del deposito, espresse dai valori della resistenza penetrometrica  $q_c$  normalizzati con lo sforzo tagliante indotto dal sisma (CRR e CSR), ottenuti mediante le seguenti relazioni:

$$CSR = 0,65 \cdot (a_{max}) / (g) \cdot (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) \cdot r_d \cdot 1 / (MSF \cdot K\sigma)$$

dove:  $a_{max}$  = accelerazione sismica di picco al piano campagna;

$g$  = accelerazione di gravità;

$\sigma_{vo}$  = pressione verticale totale alla profondità  $z$  dal p.c.;

$\sigma'_{vo}$  = pressione verticale efficace alla profondità  $z$  da p.c.;

$r_d$  = fattore di riduzione delle tensioni alla profondità interessata;

$MSF$  = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma;

$K\sigma$  = coefficiente correttivo funzione delle tensioni efficaci alla profondità interessata.

#### **Metodo di Idriss & Boulanger (2014)**

Il valore di  $MSF$  è calcolato sulla base della relazione (Idriss & Boulanger):

$$MSF = 6,9 \exp(-M/4) - 0,058$$

Dal valore di  $(q_{c1N})$  è possibile ottenere la resistenza alla liquefazione, per eventi sismici di magnitudo di momento pari a  $M=7.5$ , mediante la seguente espressione valida per sabbie pulite.

$$CRR = \exp \cdot [(q_{c1N}/540) + (q_{c1N}/67)^2 - (q_{c1N}/80)^3 + (q_{c1N}/114)^4 - 3]$$

dove:  $(q_{c1N})_{cs}$  = resistenza penetrometrica statica normalizzata e corretta per l'influenza del contenuto in fini.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione  $FS_L$  è definito dal rapporto CRR su CSR:

$$FS_L = CRR \cdot MSF / CSR$$

La liquefazione è in relazione al fattore di sicurezza nel seguente modo:

- $FS_L > 1,25$                       **liquefazione assente**
- $1,0 < FS_L < 1,25$            **liquefazione possibile**
- $FS_L < 1,00$                     **liquefazione molto probabile**

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 21
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

### Dati di input sismico:

I parametri di input sono stati scelti in maniera ragionata sulla base delle conoscenze acquisite, in modo da risultare i più cautelativi possibili:

- $M_w = 6,20$  ( $M_{w_{max}}$  stimata con grafico di disaggregazione in quanto l'area non è compresa in alcuna zona sismogenetica);
- $a_{max} = 0,16g$ ;
- quota piezometrica misurata: posta a 2,00 m da p.c. (da monitoraggio della falda freatica);
- quota piezometrica da sisma: posta a -2,00 m da p.c.;
- MSF (fattore di scala: metodologia Idriss & Boulanger pari a 1,44).

Per il dettaglio delle verifiche eseguite si rimanda negli allegati, in cui sono riportati i report del software per i quali sono indicati i parametri di input utilizzati e sono rappresentati in forma grafica gli andamenti con la profondità del fattore o sicurezza, del potenziale di liquefazione e dei cedimenti attesi.

I depositi con comportamento geotecnico di tipo granulare/incoerente, saturi d'acqua, costituiti prevalentemente da sabbie e limi sabbiosi, presentano sempre valori di  $FS_L > 1,25$  e pertanto indici di rischio di liquefazione assente o poco probabile, ad eccezione di alcuni livelletti con spessore compreso tra 20 e 40 cm, con valori di  $FS_L$  compresi tra 0,80 e 1,00 (liquefazione molto probabile).

Pertanto, si procede con la valutazione dell'indice del potenziale di liquefazione  $I_L$  (Iwasaki et al., 1982) che viene così definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

in cui  $z$  è la profondità dal piano campagna in metri e  $w(z) = 10 - 0.5z$ ; ad una data quota  $z$  il fattore  $F(z) = F$  vale:

$$F = 1 - F_L \text{ se } F_L \leq 1.0$$

$$F = 0 \text{ se } F_L > 1.0 \text{ dove } F_L \text{ è il fattore di sicurezza alla liquefazione alla quota considerata.}$$

Le categorie individuate dalla presente metodologia sono le seguenti:

$$I_L = 0 \rightarrow \text{Rischio di liquefazione "nullo"}$$

$$0 < I_L \leq 2 \rightarrow \text{Rischio di liquefazione "basso"}$$

$$2 < I_L \leq 5 \rightarrow \text{Rischio di liquefazione "moderato"}$$

$$5 < I_L \leq 15 \rightarrow \text{Rischio di liquefazione "elevato"}$$

$$I_L > 15 \rightarrow \text{Rischio di liquefazione "estremamente elevato"}$$

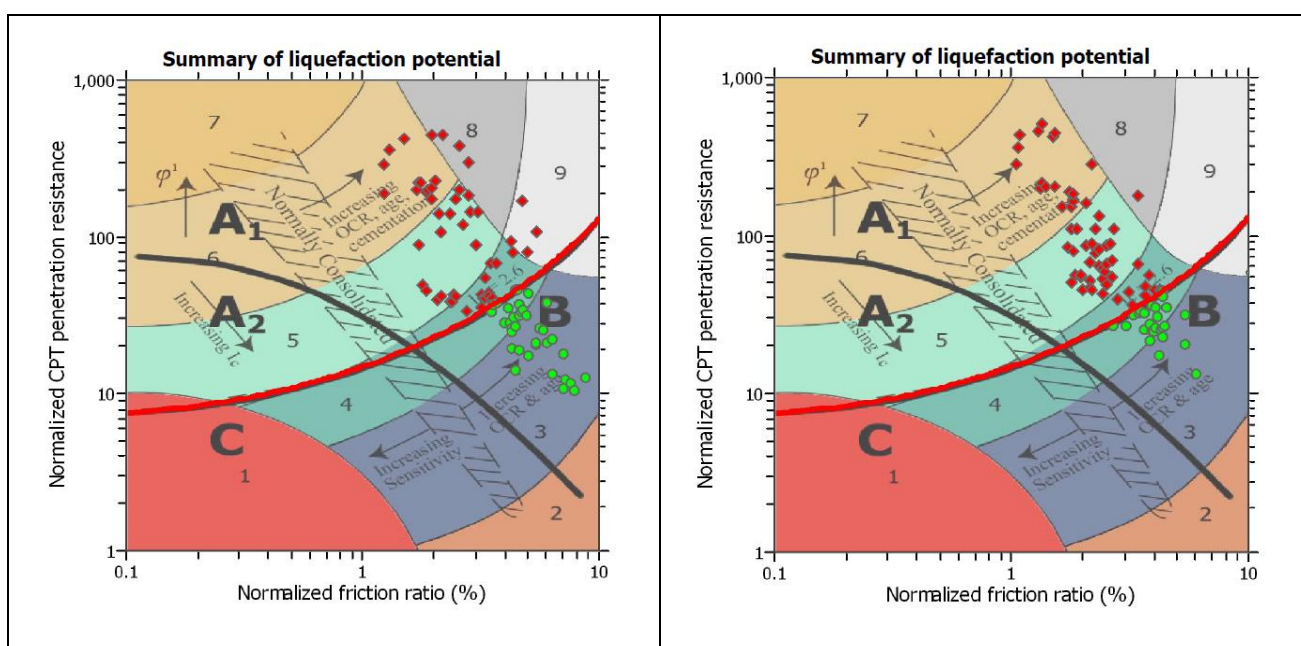
Nelle verticali esplorate e verificate il rischio di liquefazione è risultato compreso tra **0,25 e 0,56** ( $I_L < 2,00$ ) e, pertanto, risulta **basso**.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 22
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

### Cedimenti post sismici

In condizioni di sisma vi possono essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi e che possono coinvolgere sia i depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici), sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”), provocate da perdite di resistenza. Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004-2007). Per la stima dei cedimenti post sisma, si è proceduto alla verifica basata sulla classificazione di comportamento di tutti i terreni proposta da Robertson (1990; 2009). La figura propone il diagramma (Qtn-F) di classificazione nel quale si distinguono le zone di potenziale liquefazione e/o di “cyclic softening”.



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
Zone A<sub>2</sub>: 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

### RISULTANZE INDAGINI PENETROMETRICHE - CLASSIFICAZIONE DI P.K. ROBERTSON (2009)

Le zone A1 e A2 corrispondono ai sedimenti di bassa coesione attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma; le Zone B e C ( $I_c > 2,6$ ) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso ed entrambi sensibili a “cyclic softening”, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a perdite di resistenza post-sisma.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 23
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Limi non plastici saturi spesso cadono nella zona C, tuttavia, il loro CRR è fortemente controllato dalla coesione non drenata  $c_u$ .

Nella medesima figura è riportato, inoltre, il plottaggio dei risultati dell'indagine CPT: si evince che i sedimenti a comportamento granulare ( $I_c > 2,60$ ), si distribuiscono in parte nel campo A1 (sabbie pulite e sabbie limose) e in parte nel campo A2 (miscela di sabbie – da sabbie limose e limi sabbiosi). I depositi fini ricadono quasi esclusivamente nella zona B.

Considerando che la verifica ha tenuto conto di un livello piezometrico in caso di sisma pari a -1 m, l'analisi è stata impostata sia sulle tessiture granulari, sia su quelle fini, in condizioni sature.

### **Cedimenti post-sismici in terreni granulari**

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare, in particolare, si è proceduto alla stima automatica dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009).

L'approccio si basa sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e calcola i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se  $<1,25$ ) e sulla base degli esiti di densità relativa  $D_r$  desunti dalle resistenze di punta ( $q_{c1N}$ )<sub>cs</sub>, in accordo con le correlazioni per le stime dei cedimenti di post-liquefazione nelle sabbie sature da prove CPT proposte da Zhang et Al. (2007).

I risultati cumulativi dei cedimenti indotti da sisma sono anch'essi stati calcolati attraverso il software Cliq v. 1.7.5.27 della Geologismiki Geotechnical Software e riportati graficamente in allegato: in sintesi, si è ottenuto un valore del cedimento post sismico compreso tra **0,30 e 0,81 cm**, la cui compatibilità è da valutare con l'opera in progetto.

## **8. CONCLUSIONI**

Si riepiloga quanto esposto nella presente relazione riguardante le indagini geofisiche per la definizione del modello sismico del sottosuolo finalizzato alla pericolosità sismica locale e la caratterizzazione geotecnica ai fini sismici, a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa ubicata in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.

- Le indagini effettuate consistono in n. 03 prove penetrometriche statiche del tipo CPT spinte alla profondità massima di 18,00 metri dal p.c. e in una prova geofisica con rilievo dei microtrempi secondo il metodo di Nakamura (HVSr) associata ad un'indagine di tipo MASW;
- dal punto di vista della risposta sismica, tutti i rilievi dei microtrempi con il metodo di Nakamura eseguiti non mostrano picchi per contrasti d'impedenza rilevanti per l'intervallo di frequenza fondamentale 0,5-10 Hz, facendo intuire che il bedrock sismico risulta a profondità elevate.

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 24
--	---	---	---------



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

Altresì, poiché lo spettro sismico si stabilizza costantemente su di un rapporto spettrale  $H/V > 1$ , sono esclusi rilevanti fenomeni di inversione delle velocità.

Le indagini non hanno evidenziato frequenze caratteristiche di risonanza del terreno predisponenti ad amplificazione e doppia risonanza con le strutture in progetto, in quanto le frequenze caratteristiche dei siti indagati, generate dal contrasto sismico più elevato, comprese tra 0,60 e 0,70 Hz, hanno evidenziato valori del rapporto  $H/V$  generalmente compreso tra 2,50 e 3,00 (impedenza bassa).

Il report dell'indagine geofisica condotta mediante i rilievi dei microtrempi HVSR, allegati in calce alla presente relazione, evidenzia che per il sito indagato sono sempre stati rispettati i criteri di acquisizione per l'ottenimento di una curva  $H/V$  affidabile, secondo la check-list proposta dalla procedura SESAME.

In riferimento ai sei parametri successivi, relativi alla bontà della scelta della  $f_0$  come frequenza di risonanza del sito, si evidenzia il fatto che almeno due di essi siano negativi denota l'assenza di una discontinuità stratigrafica importante del sito (terreno non amplificativo);

- dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal seguente studio, si ritiene opportuno inserire il sito in oggetto di studio nella **Categoria C** *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180 e 360 m/s”*;
- gli effetti topografici possono essere trascurati in quanto la superficie topografica, poiché il sito è ubicato in una ampia area pianeggiante, può essere classificata come appartenente alla **categoria T1** - *superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$* ”; per tale categoria si assume quale valore del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T = 1,0$ ;
- facendo riferimento al valore di accelerazione al suolo pari a 0,106716g, stabilito dalla Delibera Giunta Regionale 11 Luglio 2014 – n. X/2129 “Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia”, del coefficiente di amplificazione stratigrafico ( $S_S = 1,50$ ), corrispondente alla  $V_{s30}$  misurata direttamente (Categoria sismica del suolo C), e del coefficiente topografico ( $S_T = 1,0$ ), **l'accelerazione alla sommità del deposito** (o accelerazione massima orizzontale al suolo) risulta:

$$a_{MAX(g)} = A_{gmax} * S_S * S_T$$

$$a_{MAX(g)} = 0,106716 * 1,50 * 1,00 = 0,160074g$$

- per la definizione dell'azione sismica, mediante il F.A., l'analisi di secondo livello, eseguita ai sensi D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/2011 – Allegato 5, ha evidenziato per l'area indagata, valori di F.A. minori rispetto al valore soglia assegnato dalla Regione Lombardia alla categoria di suolo corrispondente “C”; ne

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 25
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

consegue che il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica;

- la natura litologica dei depositi del sottosuolo unita alle caratteristiche meccaniche e la presenza di una falda alla profondità di oltre 5,00 metri da piano campagna, esclude la possibilità del verificarsi di fenomeni di liquefazione in presenza di eventi sismici.

Le analisi per la definizione del grado di rischio, condotte con procedure definite come “metodi semplificati” ed in particolare con la metodologia di Idriss & Boulanger (2014), hanno evidenziato che il litosoma sabbioso e sabbioso-limoso saturo, presenta valori del fattore di sicurezza  $FS_L$  generalmente maggiore di 1,25 (liquefazione assente).

La definizione dell'**Indice del potenziale di liquefazione  $I_L$**  risulta basso, con valori compresi 0,25 e 0,56.

GEOLOGO

DANIELE DE TOGNI



GEOLOGO

FRANCESCO GABRIELLI





<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.</i>	<i>Novembre 2019</i>

---

## APPENDICE DOCUMENTALE

---

### RISULTATI E CERTIFICATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

TAV. 1 - Planimetria generale – stato di progetto: ubicazione indagini in sito

Report Indagine Microtremori HVSr

Report Indagine Geofisica MASW

Report Verifica alla Liquefazione

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



- PROVA PENETROMETRICA CPT
- ★ INDAGINE GEOFISICA PASSIVA HVSR
- ↔ INDAGINE GEOFISICA MASW

TAVOLA N. 1

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 28
--	---	---	---------

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.</i>	<i>Novembre 2019</i>

## REPORT ANALISI MICROTREMORI

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 29
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## PORTO MANTOVANO, CENTRO SPORTIVO CA' ROSSA HVSR NORD

Instrument: TE3-0085/01-14

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 20/09/19 11:08:44 End recording: 20/09/19 11:28:44

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; wless trig.

Trace length: 0h20'00". Analyzed 82% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

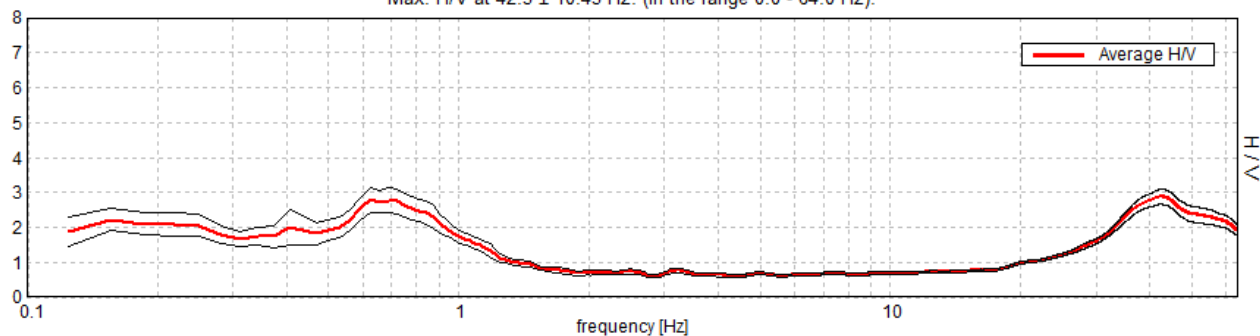
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

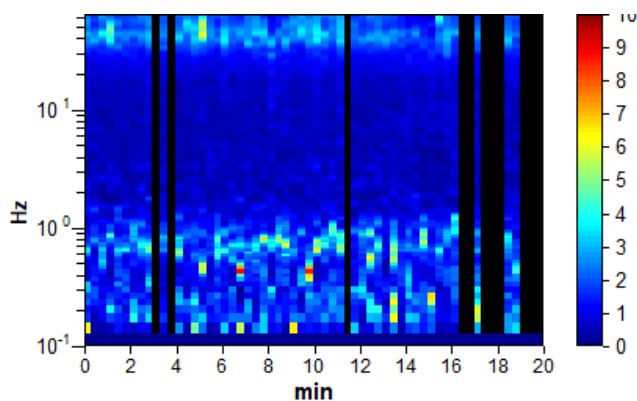
Smoothing: 10%

### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

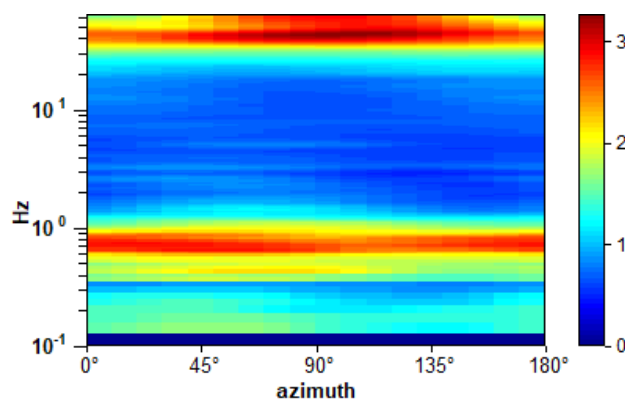
Max. H/V at  $42.5 \pm 10.45$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



### H/V TIME HISTORY



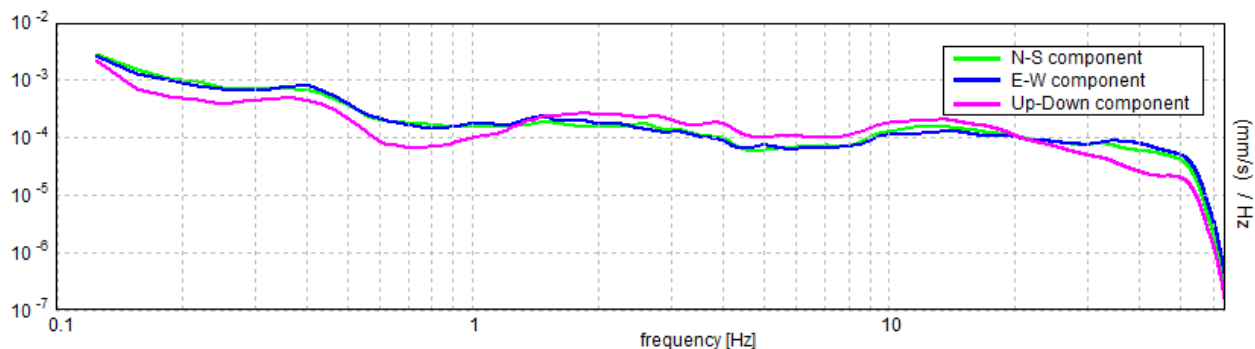
### DIRECTIONAL H/V



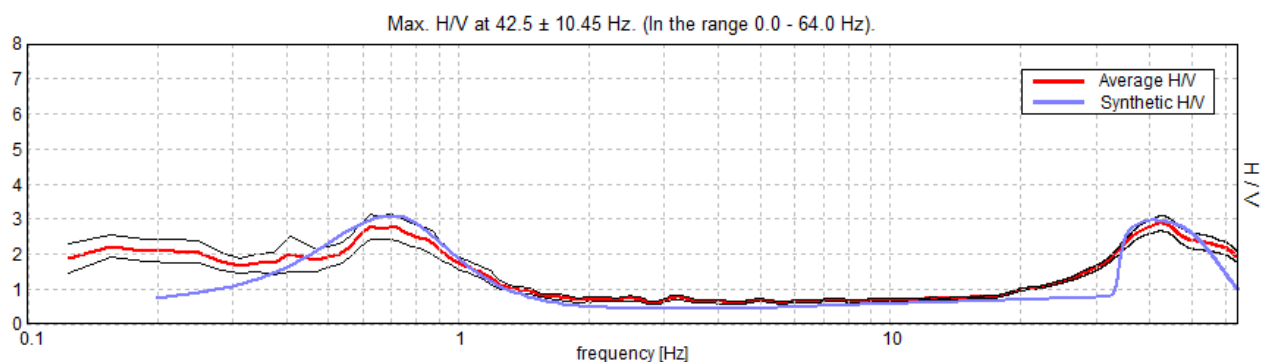
In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei valori H/V (colori) in funzione della frequenza (ordinata): il grafico ha lo scopo di valutare la stabilità nel tempo della curva H/V. In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione H/V (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa): il grafico serve a valutare la direzionalità del segnale registrato

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

### SINGLE COMPONENT SPECTRA



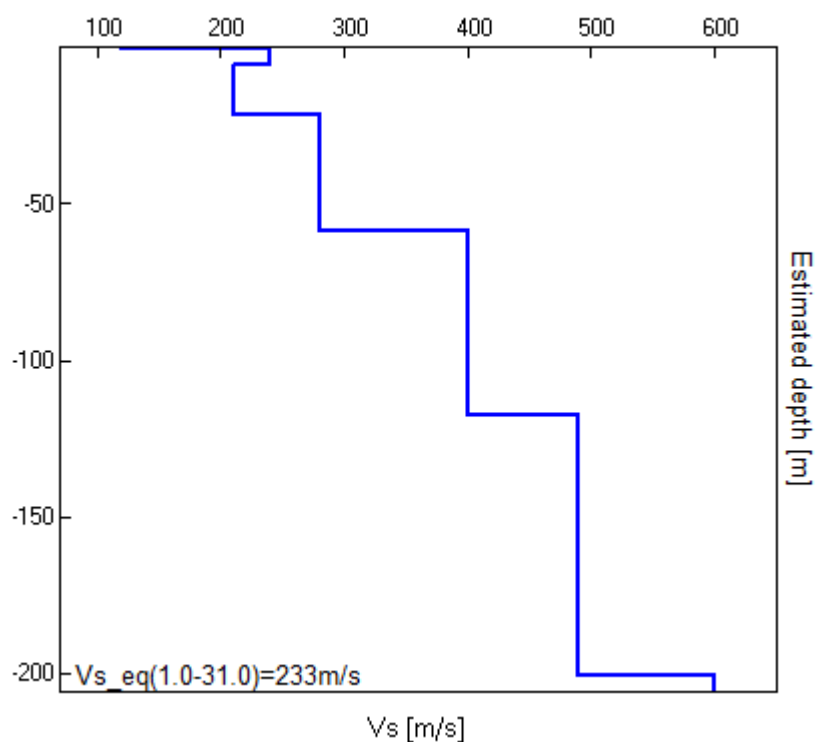
### EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.65	0.65	120	0.42
5.60	4.95	240	0.42
21.60	16.00	210	0.49
58.60	37.00	280	0.48
117.60	59.00	400	0.47
200.60	83.00	490	0.44
inf.	inf.	600	0.41

$$V_{s\_eq}(1.0-32.0)=233\text{m/s}$$

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

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

**Max. H/V at 42.5 ± 10.45 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	42.50 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	41650.0 > 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 1369 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	27.875 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	2.87 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.2458  < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$10.44654 < 2.125$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2192 < 1.58$	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
$\sigma_f$	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 $\sigma_f$ 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



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## PORTO MANTOVANO, CENTRO SPORTIVO CA' ROSSA HVSR SUD

Instrument: TE3-0085/01-14

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 20/09/19 10:45:47 End recording: 20/09/19 11:05:47

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; wless trig.

Trace length: 0h20'00". Analyzed 83% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

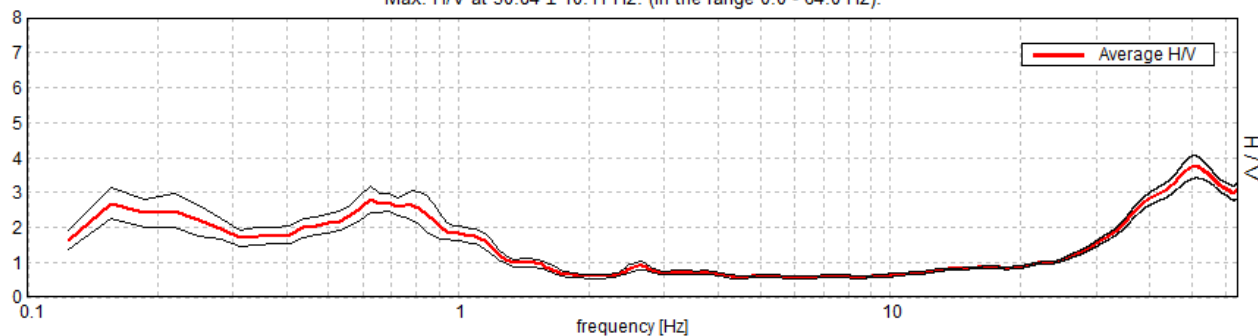
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

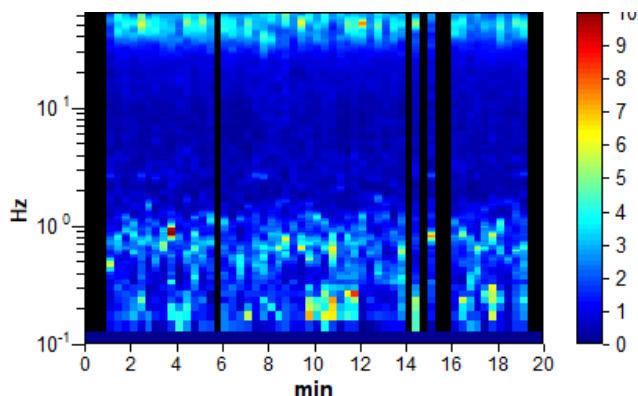
Smoothing: 10%

### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

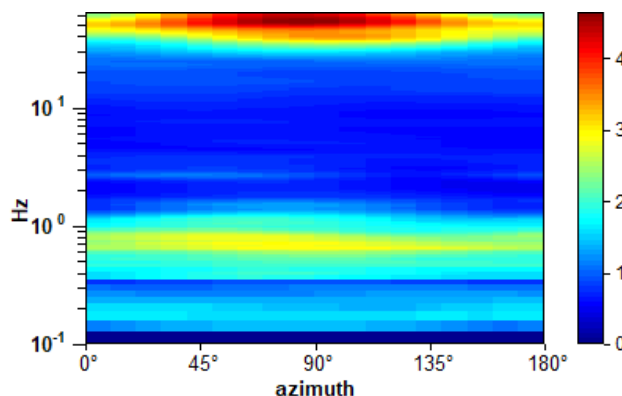
Max. H/V at  $50.84 \pm 10.11$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



### H/V TIME HISTORY



### DIRECTIONAL H/V



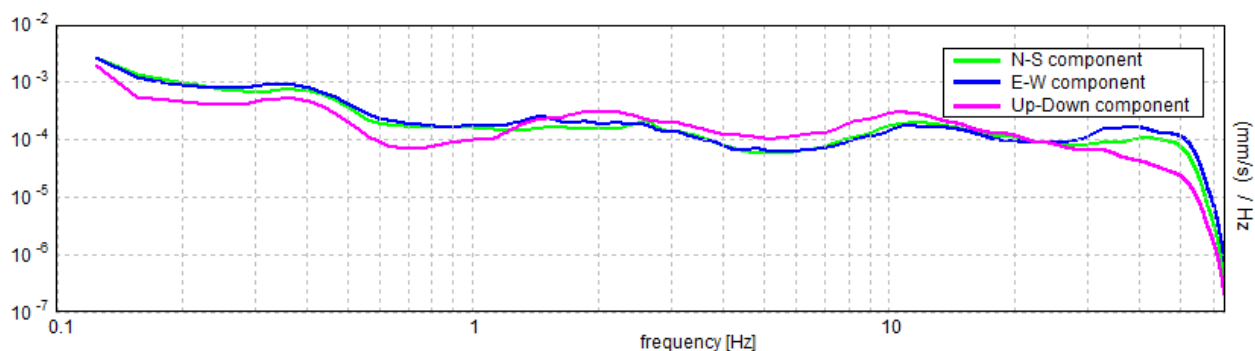
In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei valori H/V (colori) in funzione della frequenza (ordinata): il grafico ha lo scopo di valutare la stabilità nel tempo della curva H/V. In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione H/V (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa): il grafico serve a valutare la direzionalità del segnale registrato

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 34
--	---	---	---------

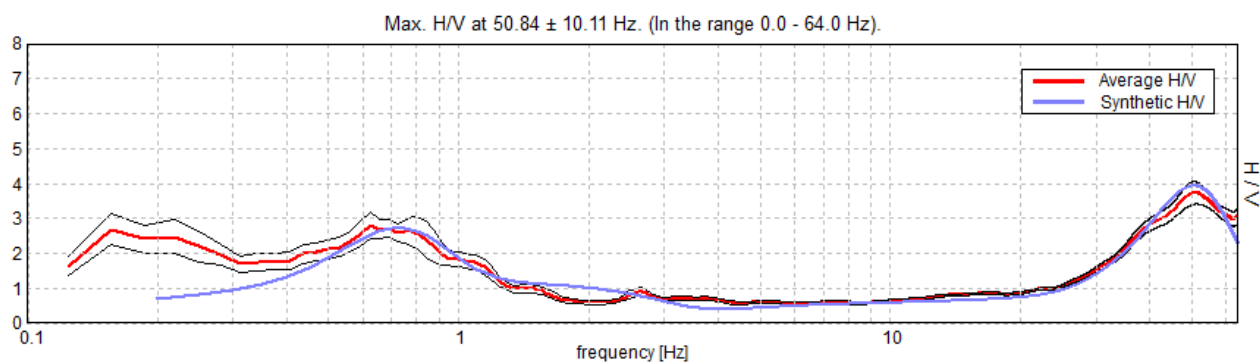


<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

### SINGLE COMPONENT SPECTRA



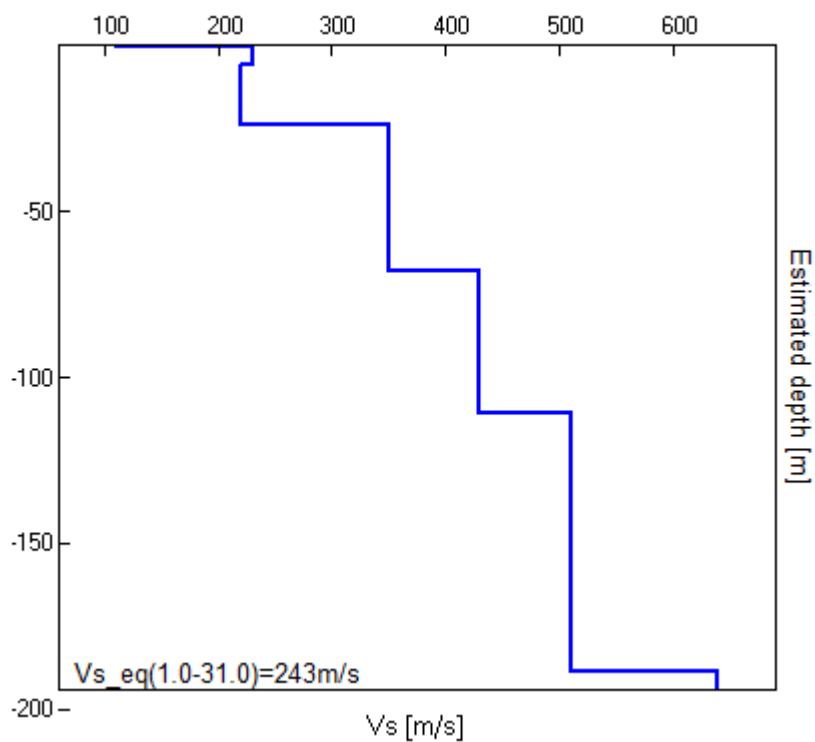
### EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.55	0.55	110	0.45
5.85	5.30	230	0.45
23.85	18.00	220	0.49
67.85	44.00	350	0.46
110.85	43.00	430	0.44
188.85	78.00	510	0.42
inf.	inf.	640	0.40

$$Vs_{eq}(1.00-31.0) = 243 \text{ m/s}$$

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

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

**Max. H/V at 50.84 ± 10.11 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

<b>Criteria for a reliable H/V curve</b> [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	50.84 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	50843.8 > 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 1236 times	OK	
<b>Criteria for a clear H/V peak</b> [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	33.188 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	3.73 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.1989  < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	10.11267 < 2.54219		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.3201 < 1.58	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
$\sigma_f$	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 $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Threshold values for $\sigma_f$ 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

<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.</i>	<i>Novembre 2019</i>

## REPORT INDAGINE GEOFISICA MASW

STUDIO G.D.S. di De Togni D. e Gabrielli F. Studio Associato di GEOLOGIA e DIFESA del SUOLO Via La Marchesa, 3 – 41037 MIRANDOLA (MO) Tel.: 339.407.3066 – 335.577.1941 E-mail: <a href="mailto:info@studiogds.com">info@studiogds.com</a>		COMUNE di PORTO MANTOVANO Strada Cisa n. 112 46047 – PORTO MANTOVANO	Pag. 38
--	---	---	---------

<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

## PORTO MANTOVANO, CENTRO SPORTIVO CA' ROSSA, [Z] MASW

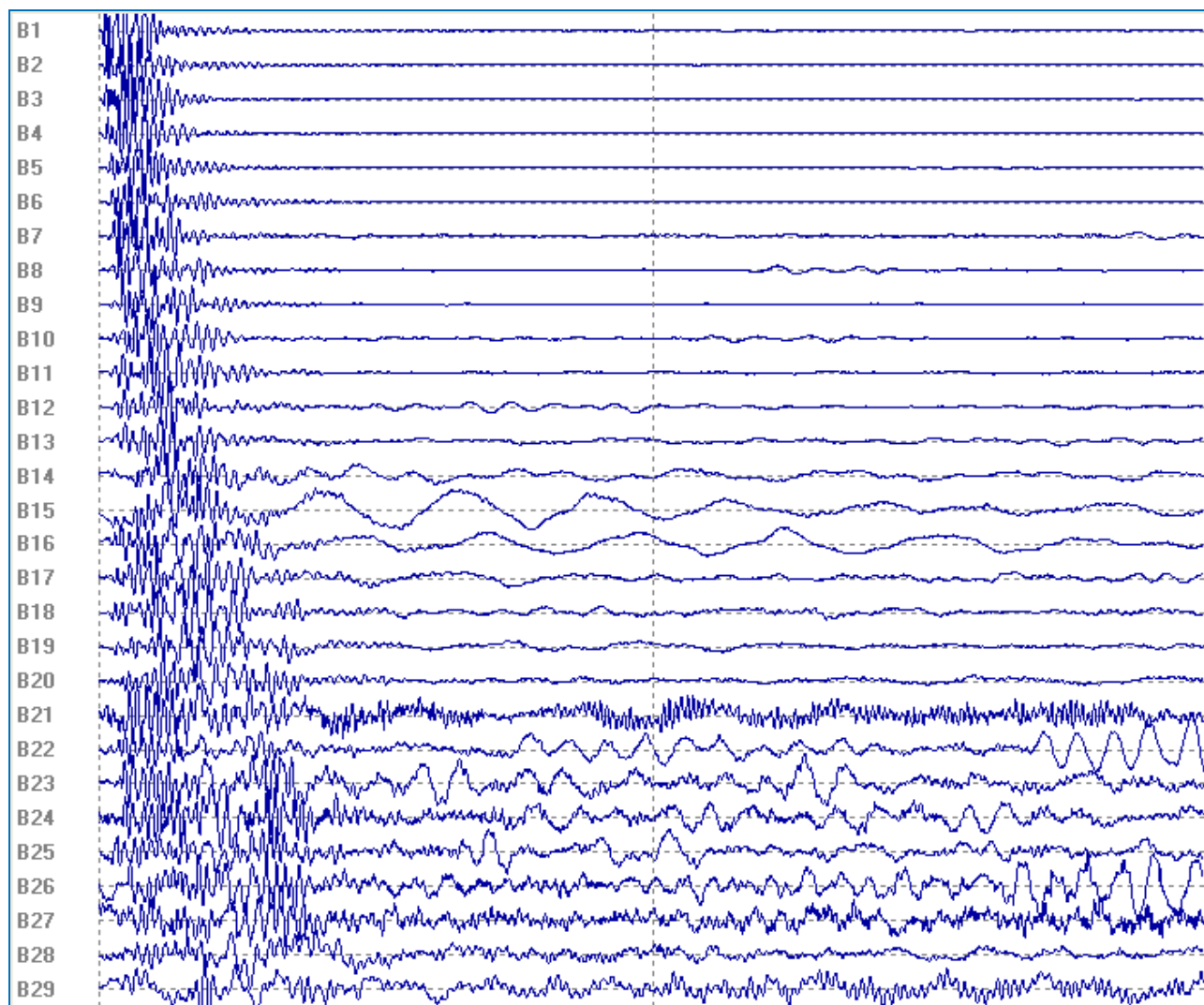
Start recording: 20/09/19 10:24:15      End recording: 20/09/19 10:42:20

Trace length: 0h00'02".

Sampling rate: 1024 Hz

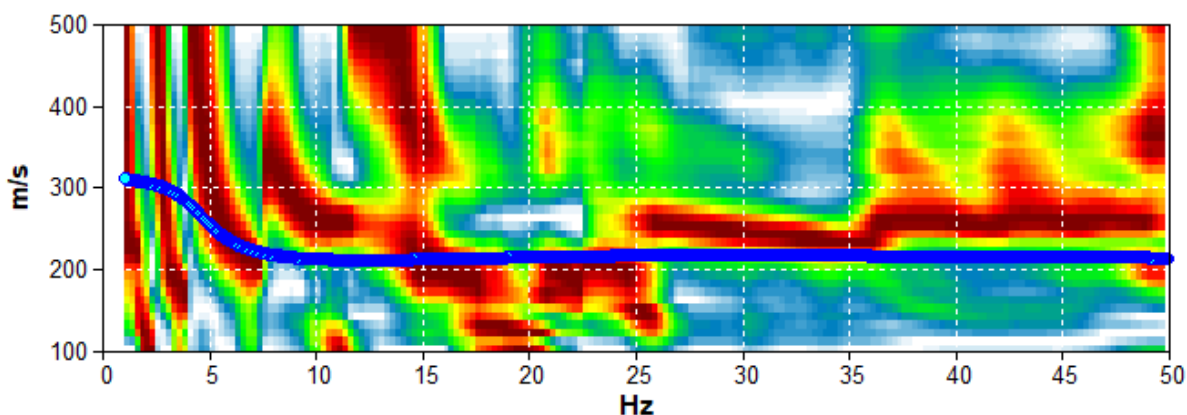
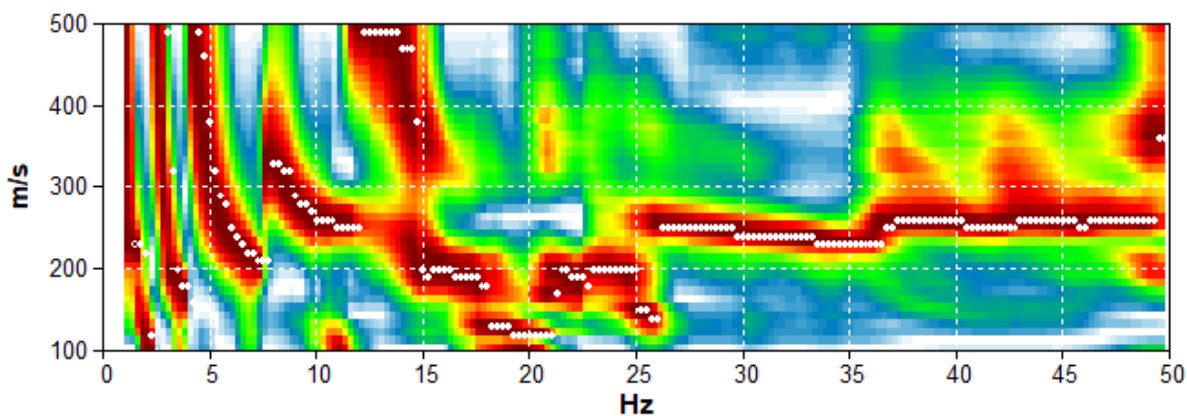
Channel labels: B1 ; B2 ; B3 ; B4 ; B5 ; B6 ; B7 ; B8 ; B9  
; B10 ; B11 ; B12 ; B13 ; B14 ; B15 ; B16 ; B17 ; B18 ;  
B19 ; B20 ; B21 ; B22 ; B23 ; B24 ; B25 ; B26 ; B27 ; B28  
; B29

Array geometry (x): 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0  
38.0 40.0 42.0 44.0 46.0 48.0 50.0 52.0 54.0 56.0 m.



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019

### MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE

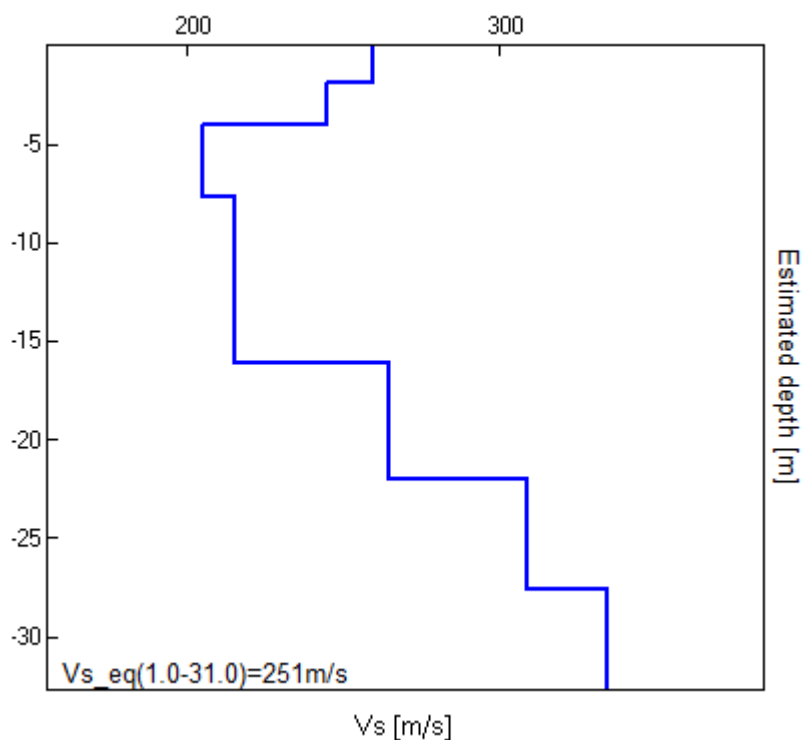


Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
1.85	1.85	260	0.42
4.05	2.20	245	0.42
7.65	3.60	205	0.49
16.15	8.50	215	0.49
22.05	5.90	265	0.48
27.65	5.60	309	0.48
inf.	inf.	335	0.47

$$V_{s\_eq}(1.0-31.0)=251\text{m/s}$$



<b>Titolo:</b>	<b>Data:</b>
Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.	Novembre 2019



<i>Titolo:</i>	<i>Data:</i>
<i>Relazione sulla modellazione sismica sulla caratterizzazione geotecnica ai fini sismici a supporto del progetto per l'ampliamento delle strutture sportive alla Cà Rossa in località Bancole nel territorio comunale di Porto Mantovano.</i>	<i>Novembre 2019</i>

## VERIFICA A LIQUEFAZIONE



## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

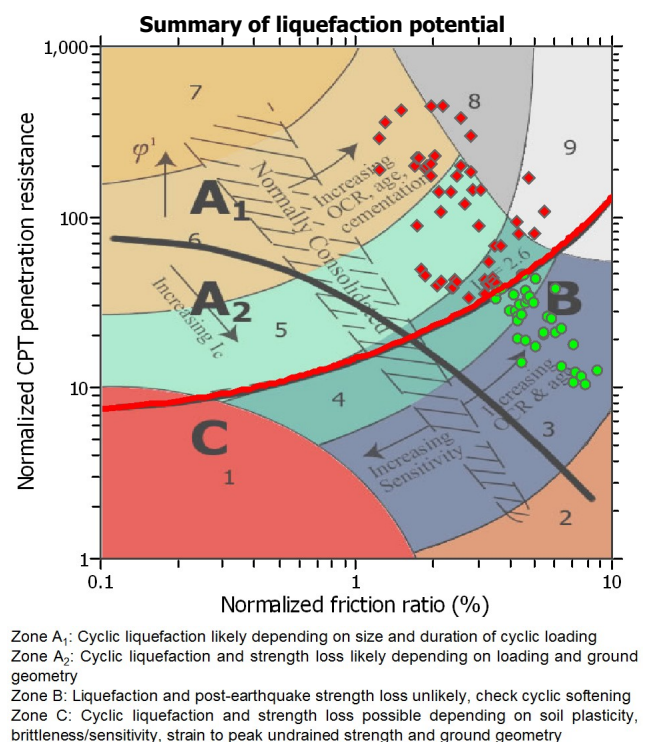
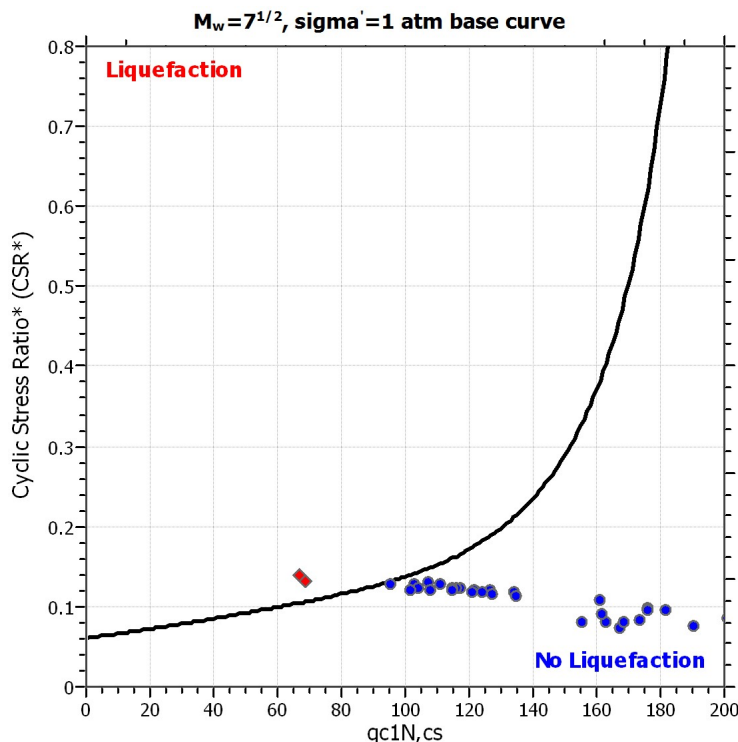
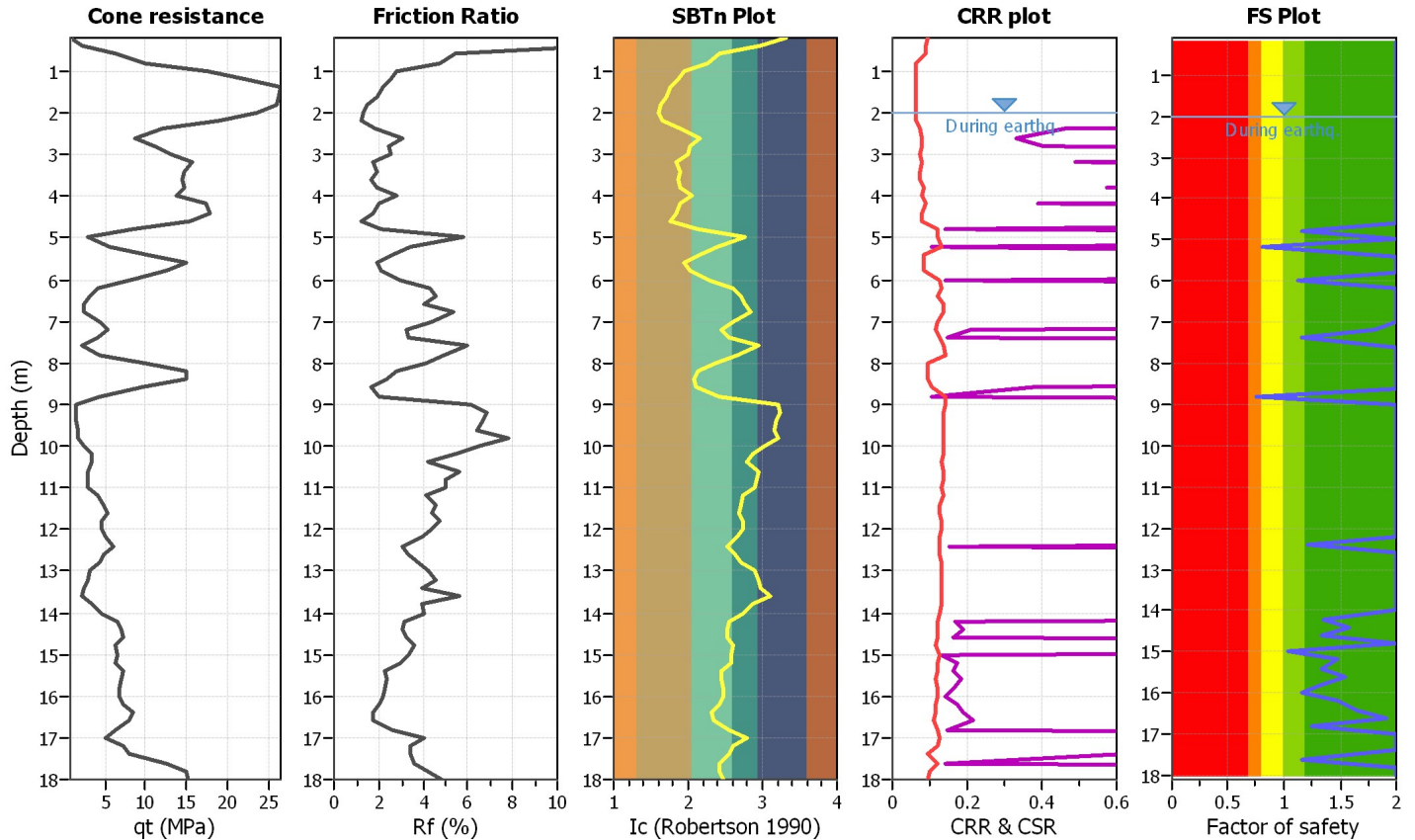
Project title : COMUNE DI PORTO MANTOVANO

Location : Complesso Sportivo Cà Rossa

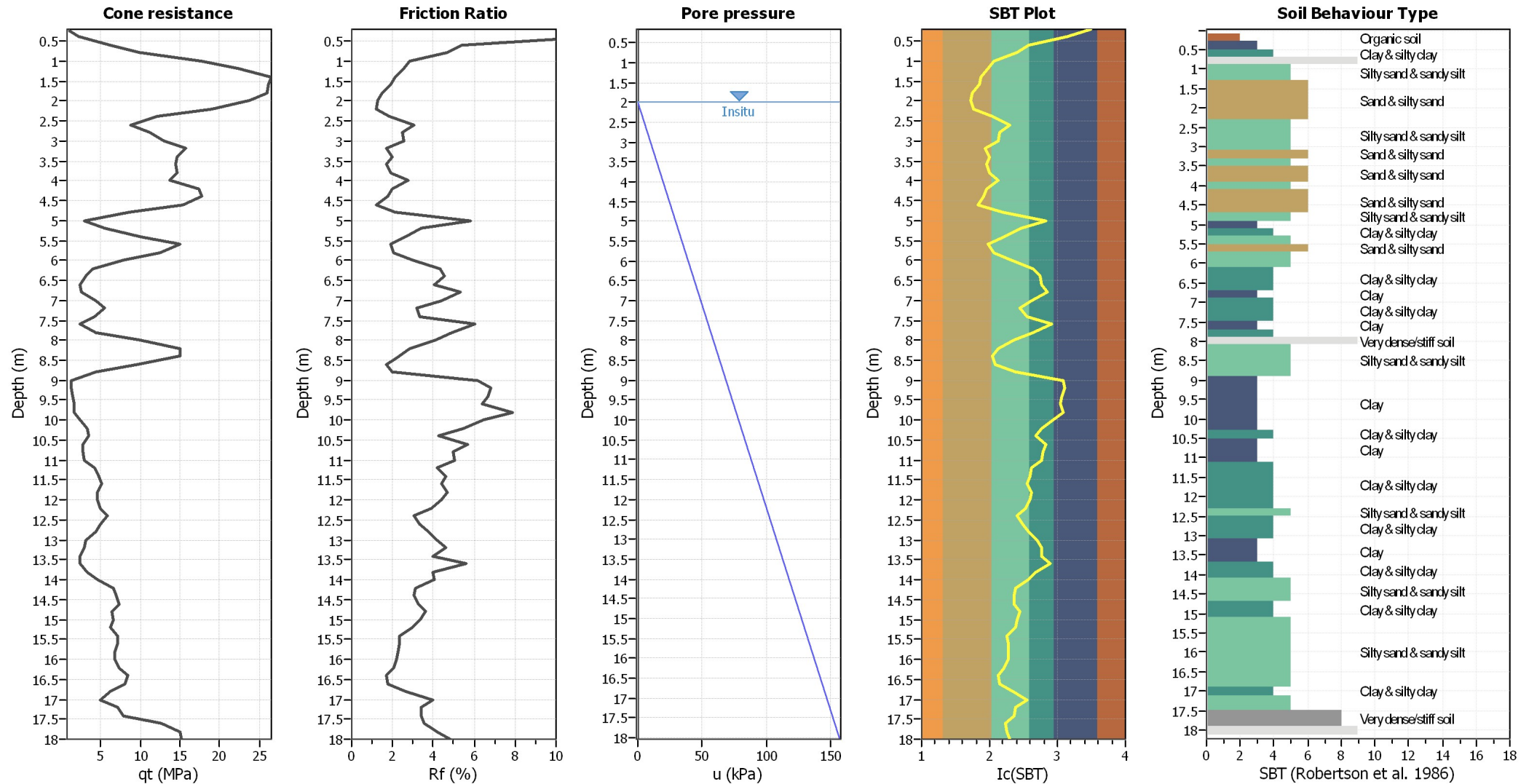
CPT file : cpt1

### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.17	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes	MSF method:	Method based












## CPT basic interpretation plots



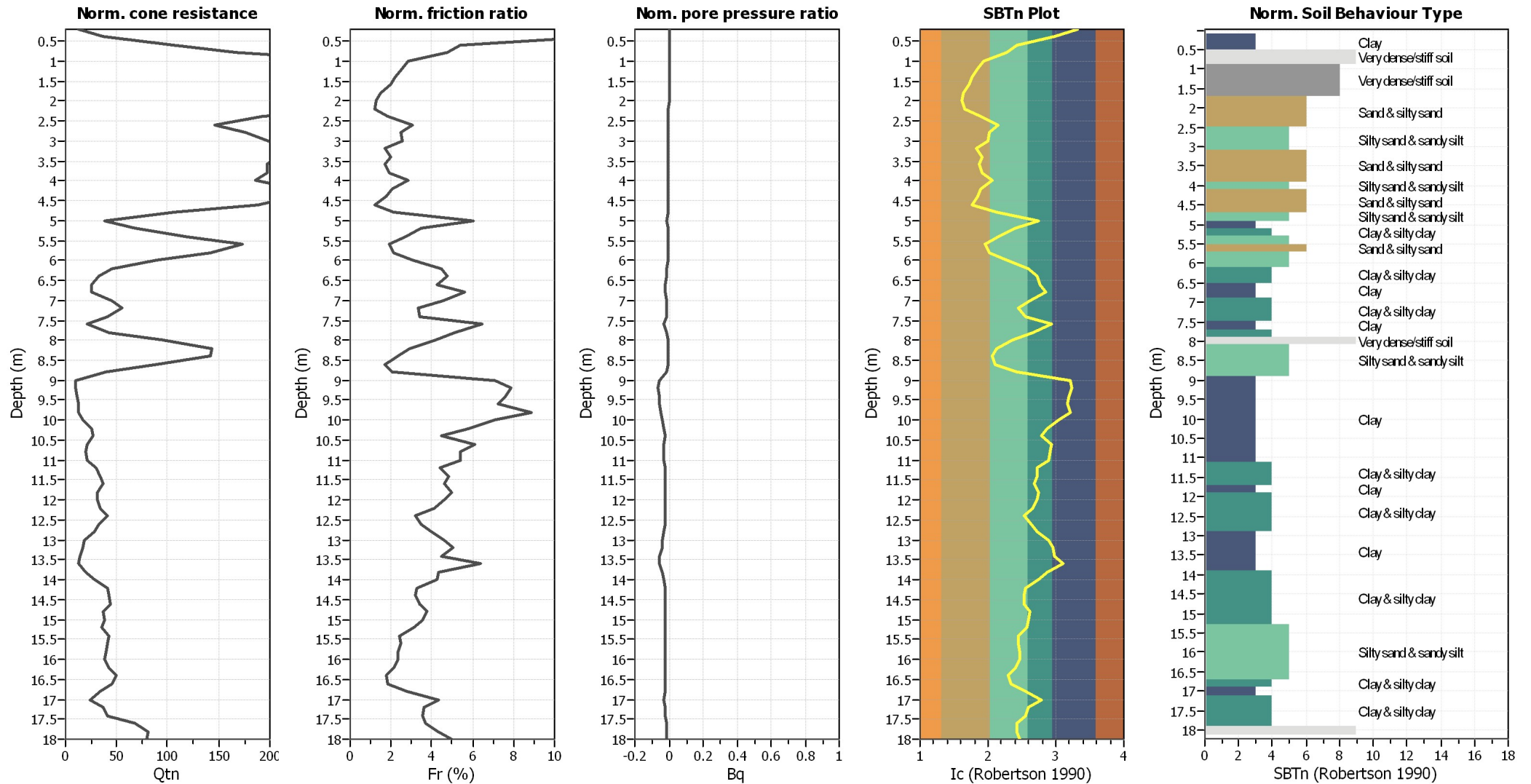
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

### SBT legend

	1. Sensitive fine grained		4. Clayey silt to silty		7. Gravely sand to sand
	2. Organic material		5. Silty sand to sandy silt		8. Very stiff sand to
	3. Clay to silty clay		6. Clean sand to silty sand		9. Very stiff fine grained

### CPT basic interpretation plots (normalized)

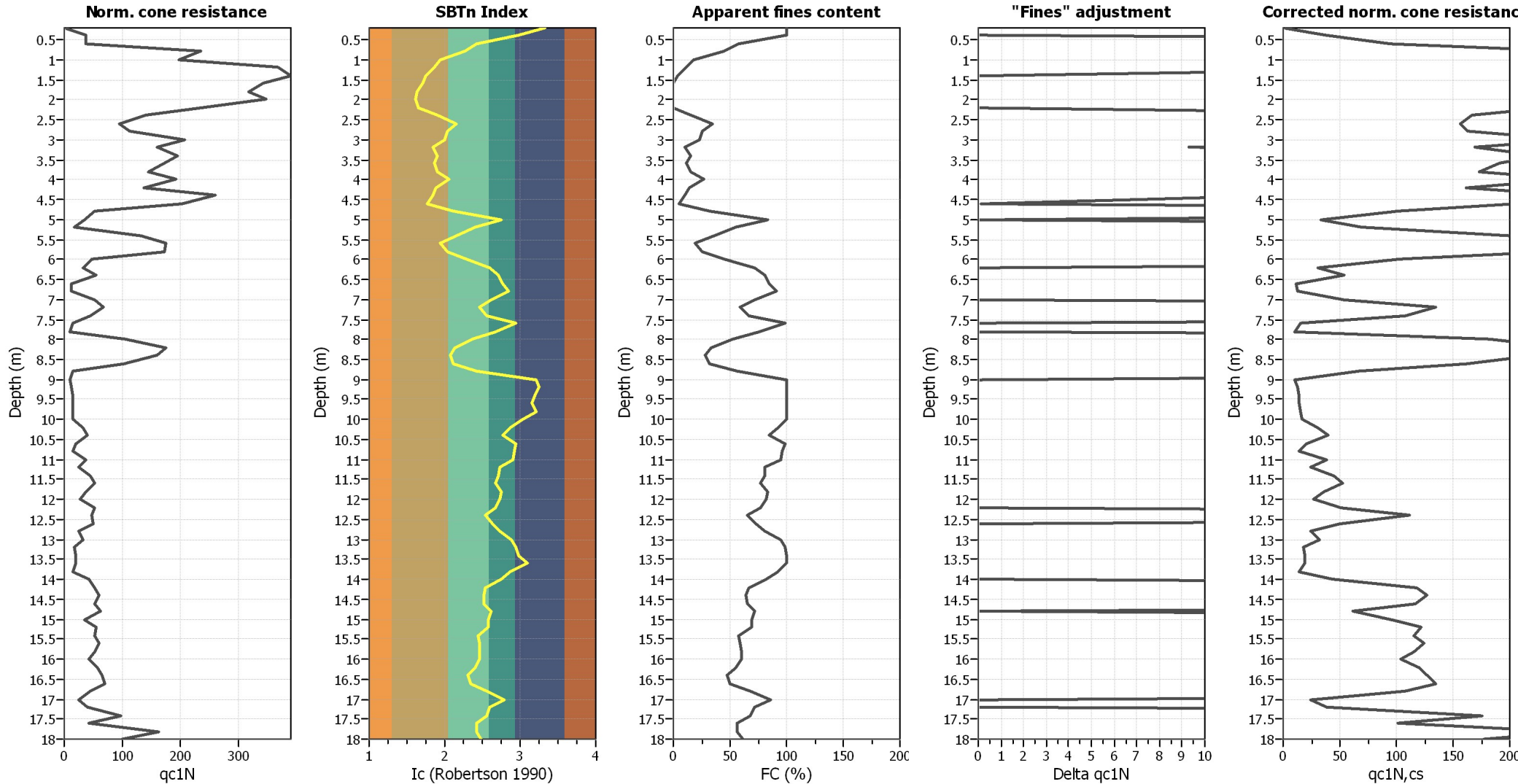


#### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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	$K_G$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A



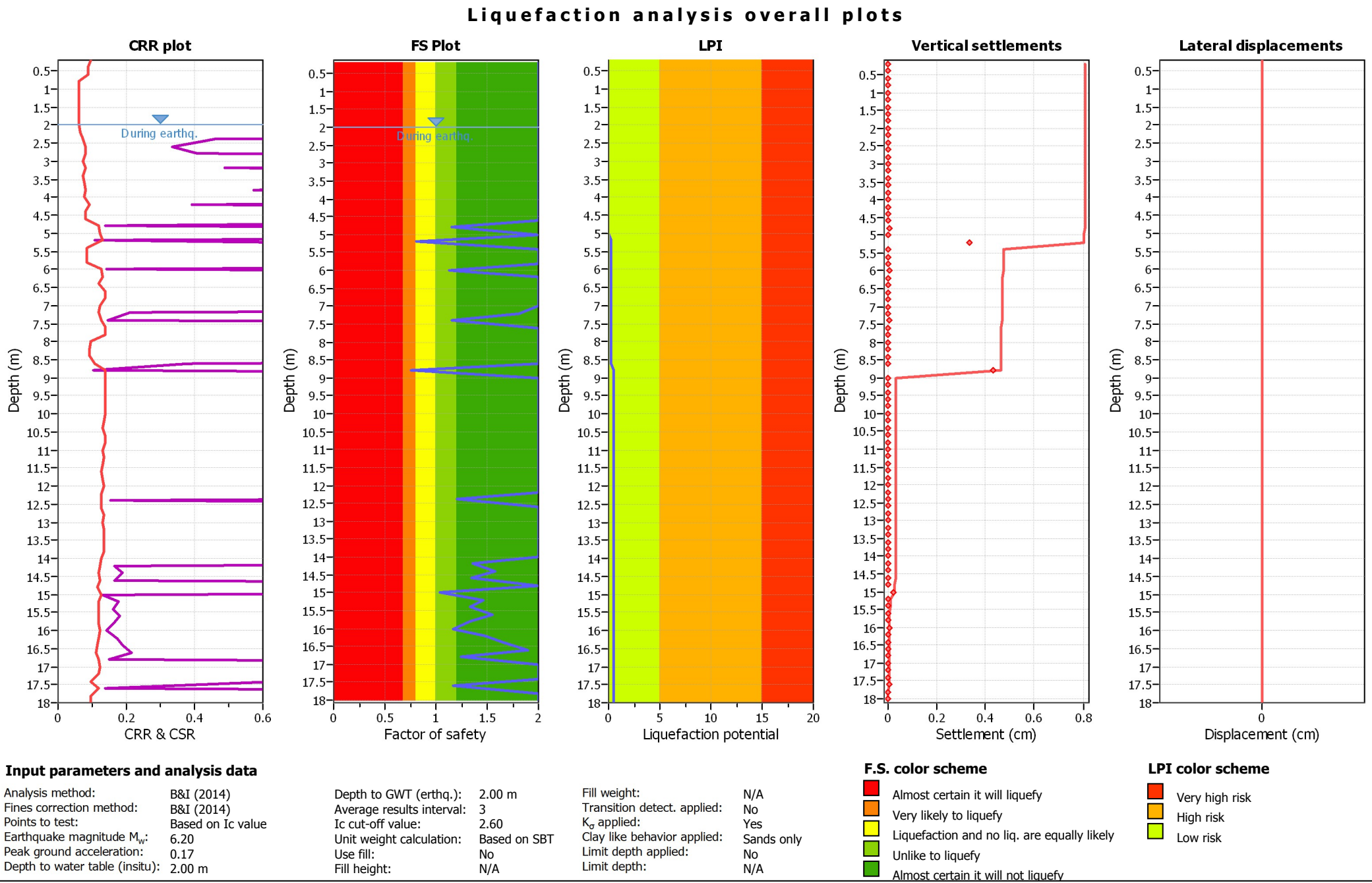
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



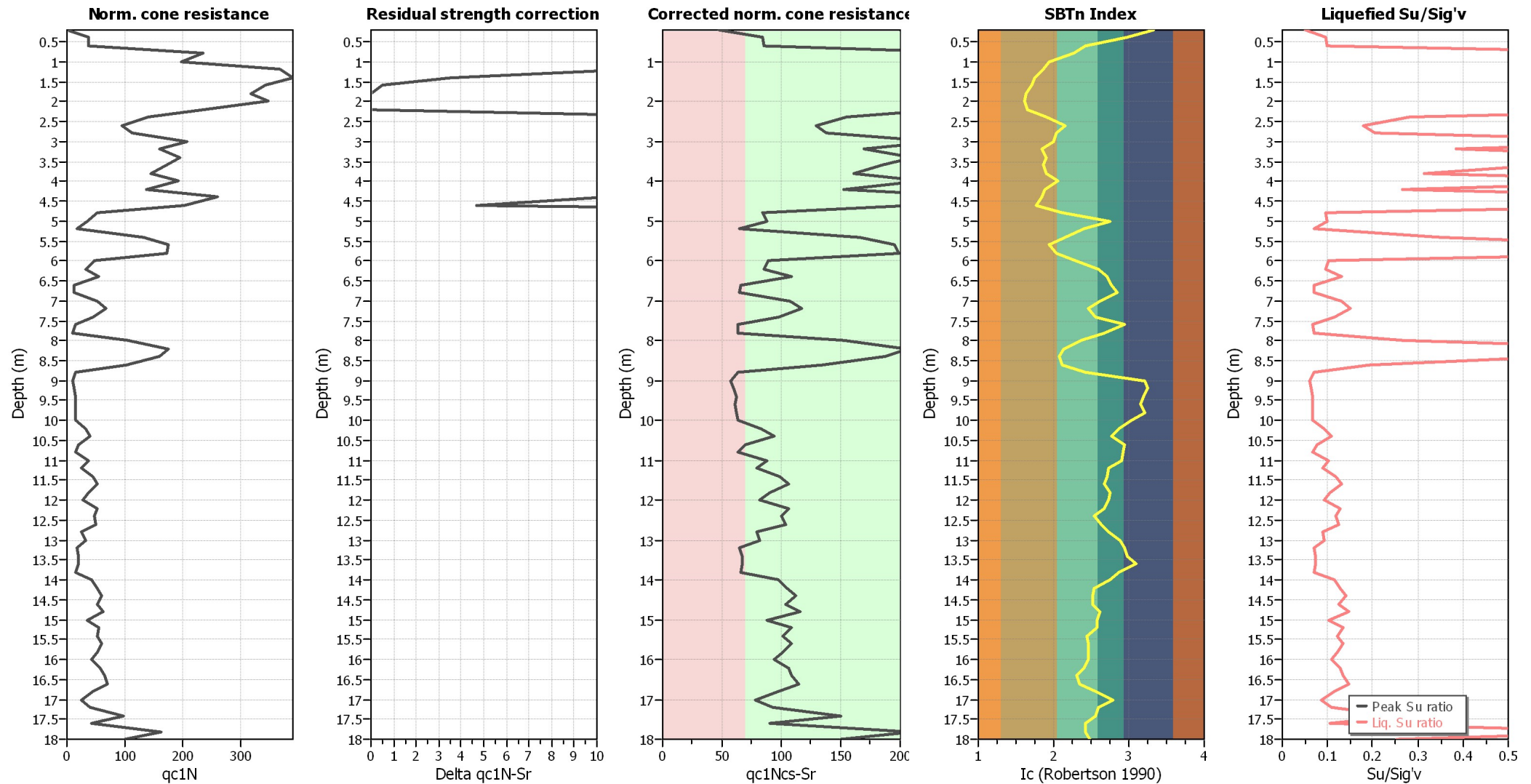
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A





## Check for strength loss plots (Idriss & Boulanger (2008))



### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

**:: Liquefaction Potential Index calculation data ::**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
0.20	2.00	0.00	9.90	0.20	0.00	0.40	2.00	0.00	9.80	0.20	0.00
0.60	2.00	0.00	9.70	0.20	0.00	0.80	2.00	0.00	9.60	0.20	0.00
1.00	2.00	0.00	9.50	0.20	0.00	1.20	2.00	0.00	9.40	0.20	0.00
1.40	2.00	0.00	9.30	0.20	0.00	1.60	2.00	0.00	9.20	0.20	0.00
1.80	2.00	0.00	9.10	0.20	0.00	2.00	2.00	0.00	9.00	0.20	0.00
2.20	2.00	0.00	8.90	0.20	0.00	2.40	2.00	0.00	8.80	0.20	0.00
2.60	2.00	0.00	8.70	0.20	0.00	2.80	2.00	0.00	8.60	0.20	0.00
3.00	2.00	0.00	8.50	0.20	0.00	3.20	2.00	0.00	8.40	0.20	0.00
3.40	2.00	0.00	8.30	0.20	0.00	3.60	2.00	0.00	8.20	0.20	0.00
3.80	2.00	0.00	8.10	0.20	0.00	4.00	2.00	0.00	8.00	0.20	0.00
4.20	2.00	0.00	7.90	0.20	0.00	4.40	2.00	0.00	7.80	0.20	0.00
4.60	2.00	0.00	7.70	0.20	0.00	4.80	1.16	0.00	7.60	0.20	0.00
5.00	2.00	0.00	7.50	0.20	0.00	5.20	0.81	0.19	7.40	0.20	0.28
5.40	2.00	0.00	7.30	0.20	0.00	5.60	2.00	0.00	7.20	0.20	0.00
5.80	2.00	0.00	7.10	0.20	0.00	6.00	1.12	0.00	7.00	0.20	0.00
6.20	2.00	0.00	6.90	0.20	0.00	6.40	2.00	0.00	6.80	0.20	0.00
6.60	2.00	0.00	6.70	0.20	0.00	6.80	2.00	0.00	6.60	0.20	0.00
7.00	2.00	0.00	6.50	0.20	0.00	7.20	1.81	0.00	6.40	0.20	0.00
7.40	1.15	0.00	6.30	0.20	0.00	7.60	2.00	0.00	6.20	0.20	0.00
7.80	2.00	0.00	6.10	0.20	0.00	8.00	2.00	0.00	6.00	0.20	0.00
8.20	2.00	0.00	5.90	0.20	0.00	8.40	2.00	0.00	5.80	0.20	0.00
8.60	2.00	0.00	5.70	0.20	0.00	8.80	0.75	0.25	5.60	0.20	0.28
9.00	2.00	0.00	5.50	0.20	0.00	9.20	2.00	0.00	5.40	0.20	0.00
9.40	2.00	0.00	5.30	0.20	0.00	9.60	2.00	0.00	5.20	0.20	0.00
9.80	2.00	0.00	5.10	0.20	0.00	10.00	2.00	0.00	5.00	0.20	0.00
10.20	2.00	0.00	4.90	0.20	0.00	10.40	2.00	0.00	4.80	0.20	0.00
10.60	2.00	0.00	4.70	0.20	0.00	10.80	2.00	0.00	4.60	0.20	0.00
11.00	2.00	0.00	4.50	0.20	0.00	11.20	2.00	0.00	4.40	0.20	0.00
11.40	2.00	0.00	4.30	0.20	0.00	11.60	2.00	0.00	4.20	0.20	0.00
11.80	2.00	0.00	4.10	0.20	0.00	12.00	2.00	0.00	4.00	0.20	0.00
12.20	2.00	0.00	3.90	0.20	0.00	12.40	1.21	0.00	3.80	0.20	0.00
12.60	2.00	0.00	3.70	0.20	0.00	12.80	2.00	0.00	3.60	0.20	0.00
13.00	2.00	0.00	3.50	0.20	0.00	13.20	2.00	0.00	3.40	0.20	0.00
13.40	2.00	0.00	3.30	0.20	0.00	13.60	2.00	0.00	3.20	0.20	0.00
13.80	2.00	0.00	3.10	0.20	0.00	14.00	2.00	0.00	3.00	0.20	0.00
14.20	1.36	0.00	2.90	0.20	0.00	14.40	1.58	0.00	2.80	0.20	0.00
14.60	1.34	0.00	2.70	0.20	0.00	14.80	2.00	0.00	2.60	0.20	0.00
15.00	1.04	0.00	2.50	0.20	0.00	15.20	1.47	0.00	2.40	0.20	0.00
15.40	1.33	0.00	2.30	0.20	0.00	15.60	1.55	0.00	2.20	0.20	0.00
15.80	1.34	0.00	2.10	0.20	0.00	16.00	1.17	0.00	2.00	0.20	0.00
16.20	1.48	0.00	1.90	0.20	0.00	16.40	1.65	0.00	1.80	0.20	0.00
16.60	1.90	0.00	1.70	0.20	0.00	16.80	1.24	0.00	1.60	0.20	0.00
17.00	2.00	0.00	1.50	0.20	0.00	17.20	2.00	0.00	1.40	0.20	0.00
17.40	2.00	0.00	1.30	0.20	0.00	17.60	1.17	0.00	1.20	0.20	0.00
17.80	2.00	0.00	1.10	0.20	0.00	18.00	2.00	0.00	1.00	0.20	0.00

**:: Liquefaction Potential Index calculation data :: (continued)**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----	--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----

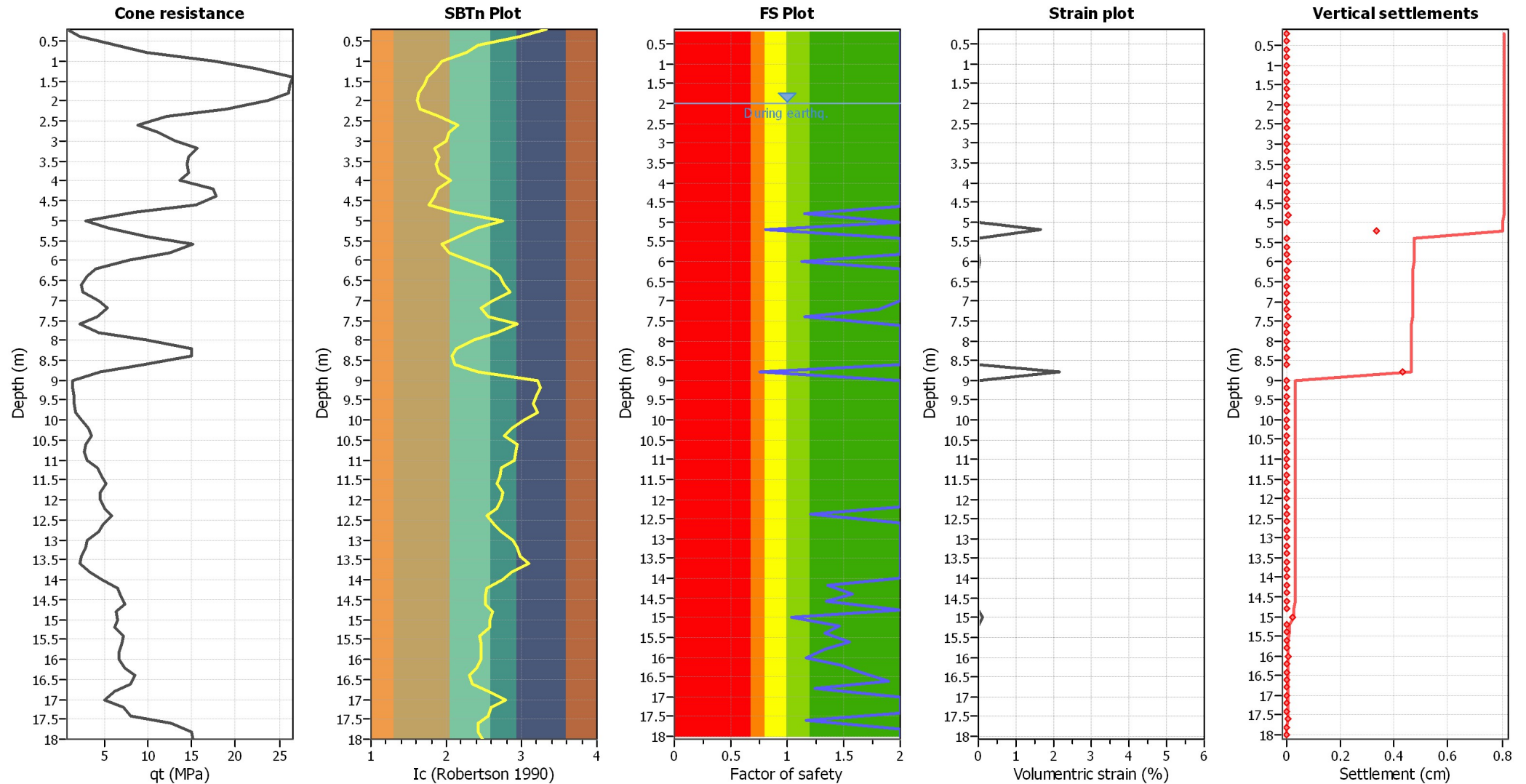
**Overall liquefaction potential: 0.56**

LPI = 0.00 - Liquefaction risk very low  
LPI between 0.00 and 5.00 - Liquefaction risk low  
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high  
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

**Abbreviations**

FS: Calculated factor of safety for test point  
F<sub>L</sub>: 1 - FS  
w<sub>z</sub>: Function value of the extend of soil liquefaction according to depth  
d<sub>z</sub>: Layer thickness (m)  
LPI: Liquefaction potential index value for test point

## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_c$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

**:: Post-earthquake settlement due to soil liquefaction ::**

Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)	Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)
2.00	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00	2.20	233.77	2.00	0.00	1.00	0.00
2.40	167.25	2.00	0.00	1.00	0.00	2.60	155.87	2.00	0.00	1.00	0.00
2.80	163.14	2.00	0.00	1.00	0.00	3.00	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00
3.20	169.02	2.00	0.00	1.00	0.00	3.40	227.43	2.00	0.00	1.00	0.00
3.60	190.59	2.00	0.00	1.00	0.00	3.80	173.64	2.00	0.00	1.00	0.00
4.00	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00	4.20	161.85	2.00	0.00	1.00	0.00
4.40	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00	4.60	203.55	2.00	0.00	1.00	0.00
4.80	101.61	1.16	0.02	1.00	0.00	5.00	33.81	2.00	0.00	1.00	0.00
5.20	68.60	0.81	1.66	1.00	0.33	5.40	200.95	2.00	0.00	1.00	0.00
5.60	219.05	2.00	0.00	1.00	0.00	5.80	235.05	2.00	0.00	1.00	0.00
6.00	103.03	1.12	0.03	1.00	0.01	6.20	31.30	2.00	0.00	1.00	0.00
6.40	53.90	2.00	0.00	1.00	0.00	6.60	11.71	2.00	0.00	1.00	0.00
6.80	12.62	2.00	0.00	1.00	0.00	7.00	53.46	2.00	0.00	1.00	0.00
7.20	134.35	1.81	0.00	1.00	0.00	7.40	107.44	1.15	0.02	1.00	0.00
7.60	15.06	2.00	0.00	1.00	0.00	7.80	9.93	2.00	0.00	1.00	0.00
8.00	181.66	2.00	0.00	1.00	0.00	8.20	250.22	2.00	0.00	1.00	0.00
8.40	224.23	2.00	0.00	1.00	0.00	8.60	161.00	2.00	0.00	1.00	0.00
8.80	67.12	0.75	2.16	1.00	0.43	9.00	10.22	2.00	0.00	1.00	0.00
9.20	12.91	2.00	0.00	1.00	0.00	9.40	14.64	2.00	0.00	1.00	0.00
9.60	14.52	2.00	0.00	1.00	0.00	9.80	15.30	2.00	0.00	1.00	0.00
10.00	16.07	2.00	0.00	1.00	0.00	10.20	31.27	2.00	0.00	1.00	0.00
10.40	40.09	2.00	0.00	1.00	0.00	10.60	20.96	2.00	0.00	1.00	0.00
10.80	13.78	2.00	0.00	1.00	0.00	11.00	38.34	2.00	0.00	1.00	0.00
11.20	24.79	2.00	0.00	1.00	0.00	11.40	44.84	2.00	0.00	1.00	0.00
11.60	52.53	2.00	0.00	1.00	0.00	11.80	36.30	2.00	0.00	1.00	0.00
12.00	27.42	2.00	0.00	1.00	0.00	12.20	51.46	2.00	0.00	1.00	0.00
12.40	111.09	1.21	0.01	1.00	0.00	12.60	49.90	2.00	0.00	1.00	0.00
12.80	24.96	2.00	0.00	1.00	0.00	13.00	31.50	2.00	0.00	1.00	0.00
13.20	17.34	2.00	0.00	1.00	0.00	13.40	19.64	2.00	0.00	1.00	0.00
13.60	19.51	2.00	0.00	1.00	0.00	13.80	14.61	2.00	0.00	1.00	0.00
14.00	43.71	2.00	0.00	1.00	0.00	14.20	117.71	1.36	0.00	1.00	0.00
14.40	126.68	1.58	0.00	1.00	0.00	14.60	116.50	1.34	0.00	1.00	0.00
14.80	61.82	2.00	0.00	1.00	0.00	15.00	95.74	1.04	0.11	1.00	0.02
15.20	121.65	1.47	0.00	1.00	0.00	15.40	115.03	1.33	0.00	1.00	0.00
15.60	124.58	1.55	0.00	1.00	0.00	15.80	114.94	1.34	0.00	1.00	0.00
16.00	104.19	1.17	0.02	1.00	0.00	16.20	121.05	1.48	0.00	1.00	0.00
16.40	127.50	1.65	0.00	1.00	0.00	16.60	134.94	1.90	0.00	1.00	0.00
16.80	108.06	1.24	0.01	1.00	0.00	17.00	24.77	2.00	0.00	1.00	0.00
17.20	38.91	2.00	0.00	1.00	0.00	17.40	176.16	2.00	0.00	1.00	0.00
17.60	101.57	1.17	0.02	1.00	0.00	17.80	253.80	2.00	0.00	1.00	0.00
18.00	176.51	2.00	0.00	1.00	0.00						

**Total estimated settlement: 0.81****Abbreviations**

$Q_{tn,cs}$ :	Equivalent clean sand normalized cone resistance
FS:	Factor of safety against liquefaction
$e_v$ (%):	Post-liquefaction volumetric strain
DF:	$e_v$ depth weighting factor
Settlement:	Calculated settlement



## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

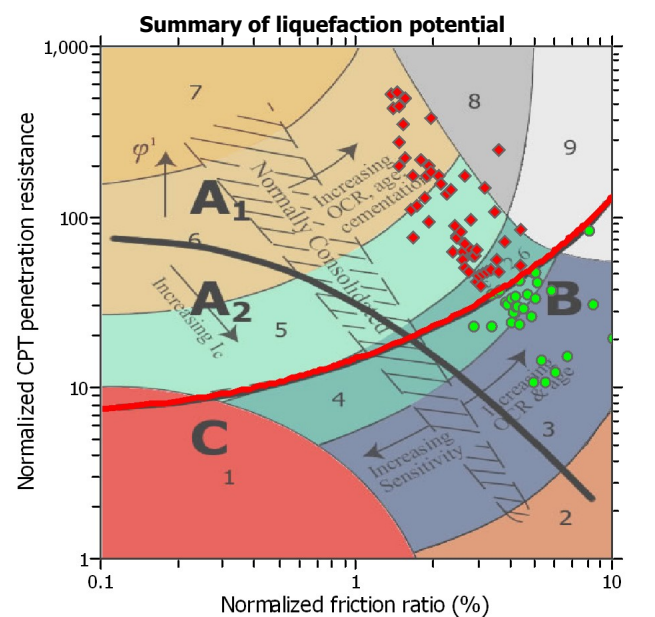
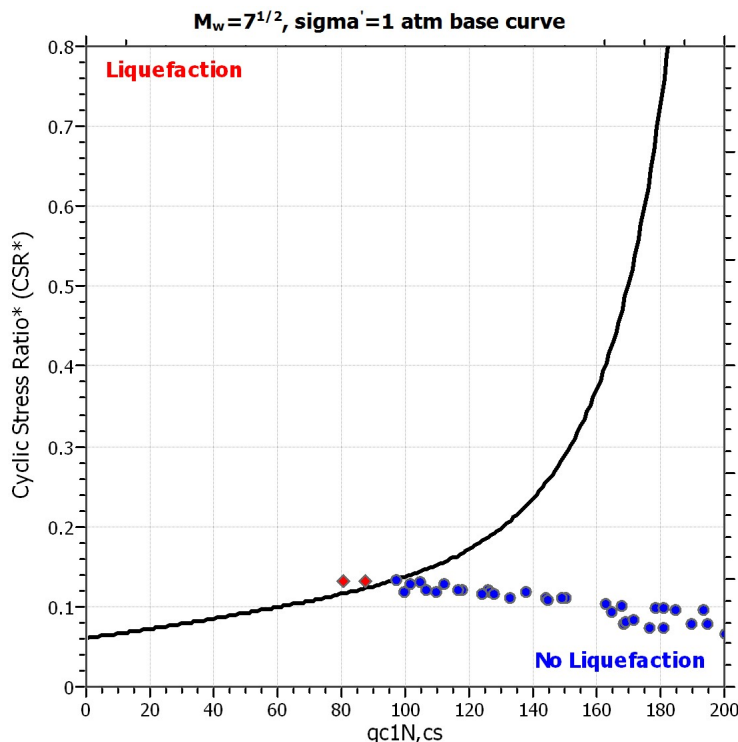
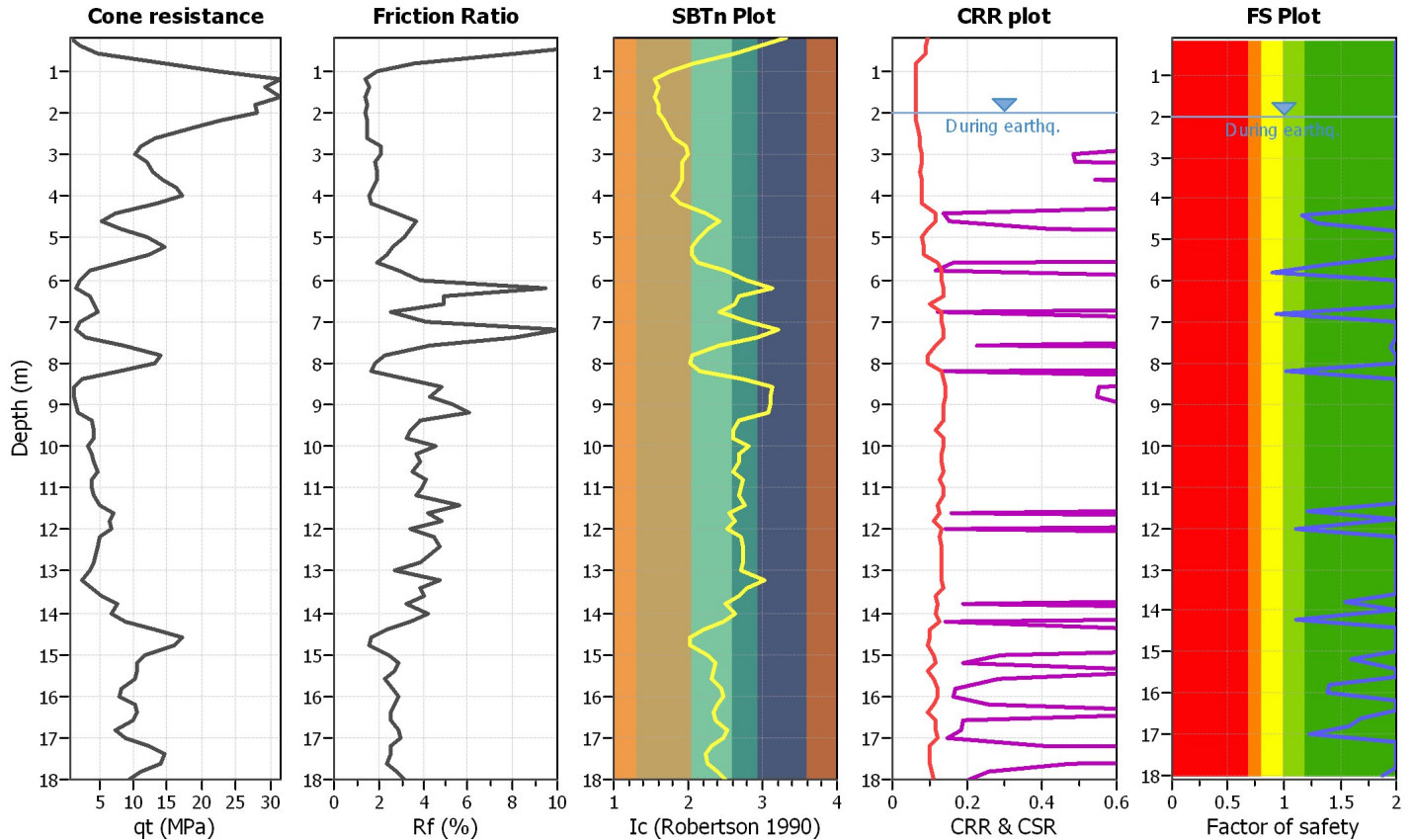
Project title : COMUNE DI PORTO MANTOVANO

Location : Complesso Sportivo Cà Rossa

CPT file : cpt2

### Input parameters and analysis data

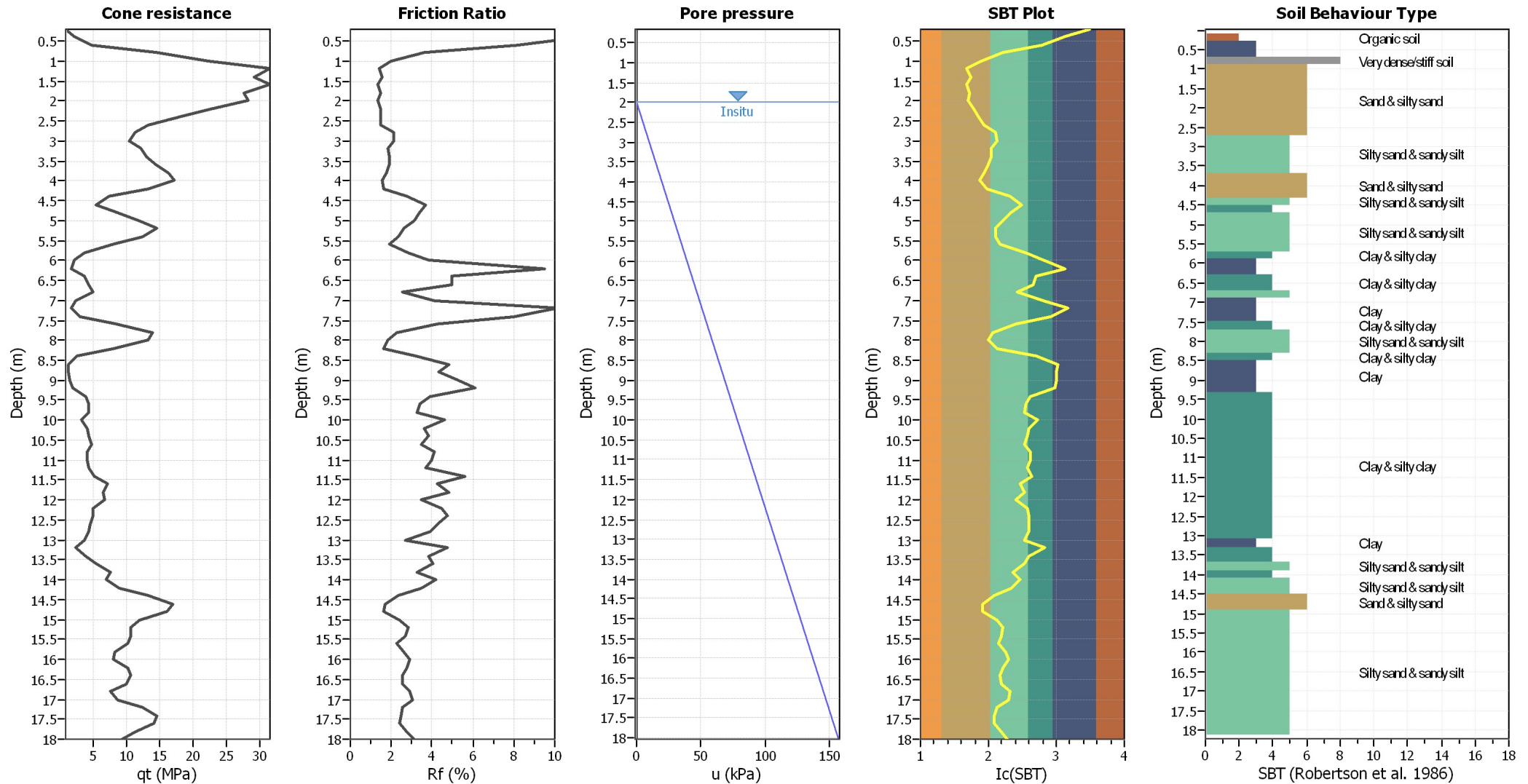
Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sand & Clay
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.17	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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



## CPT basic interpretation plots



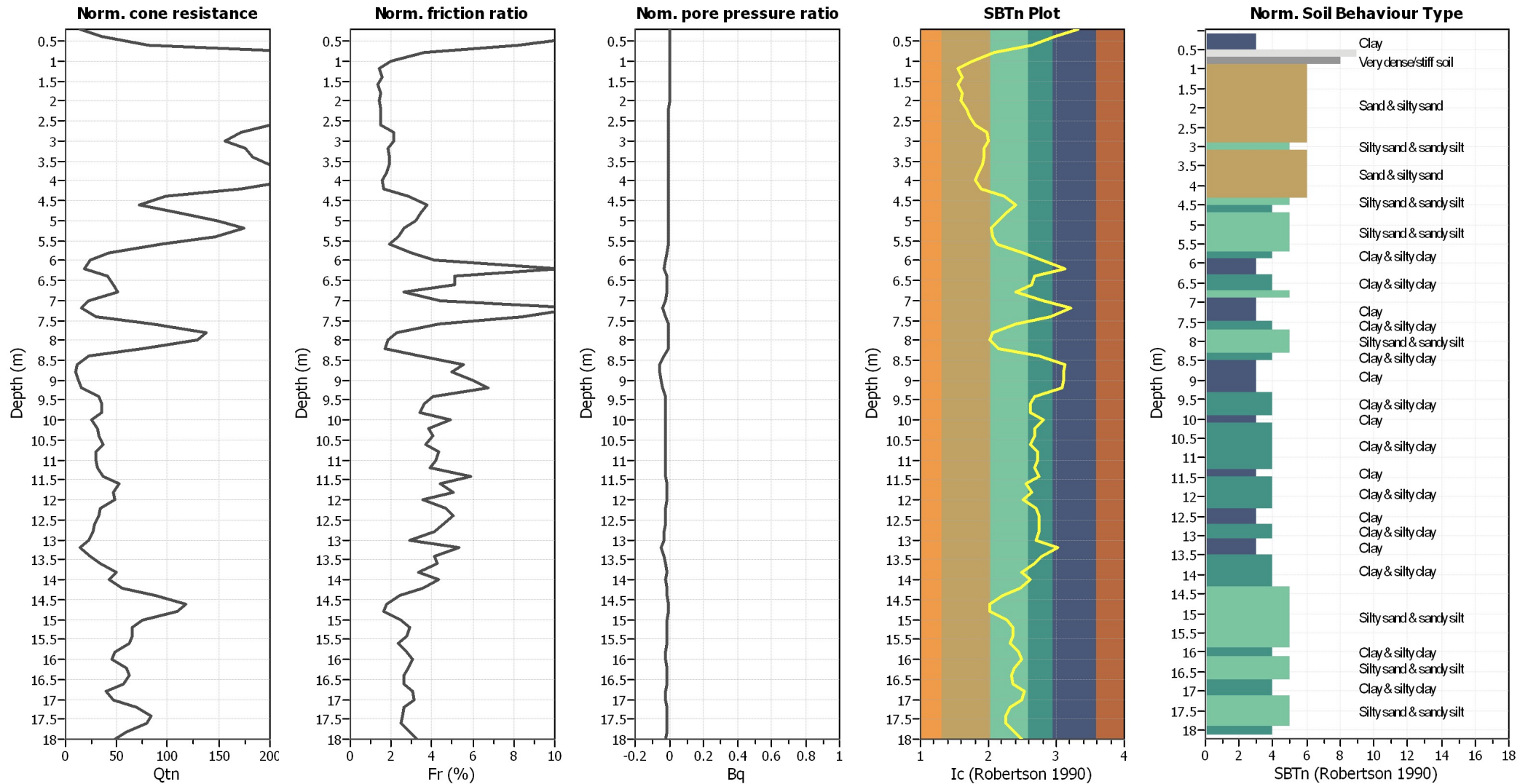
## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on $I_c$ value	$I_c$ cut-off value:	2.60	$K_g$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

## SBT legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

## CPT basic interpretation plots (normalized)



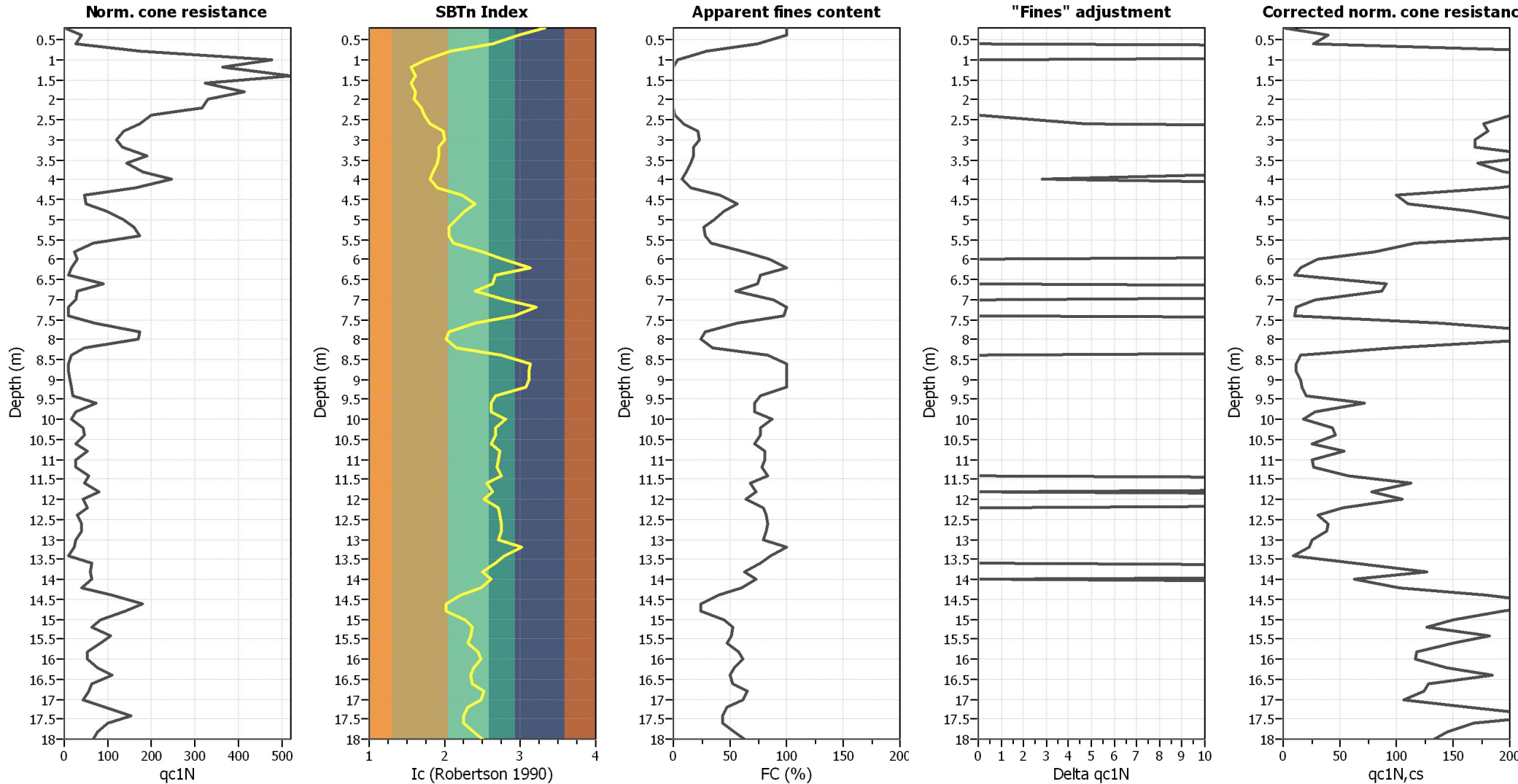
## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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	$K_G$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

## SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

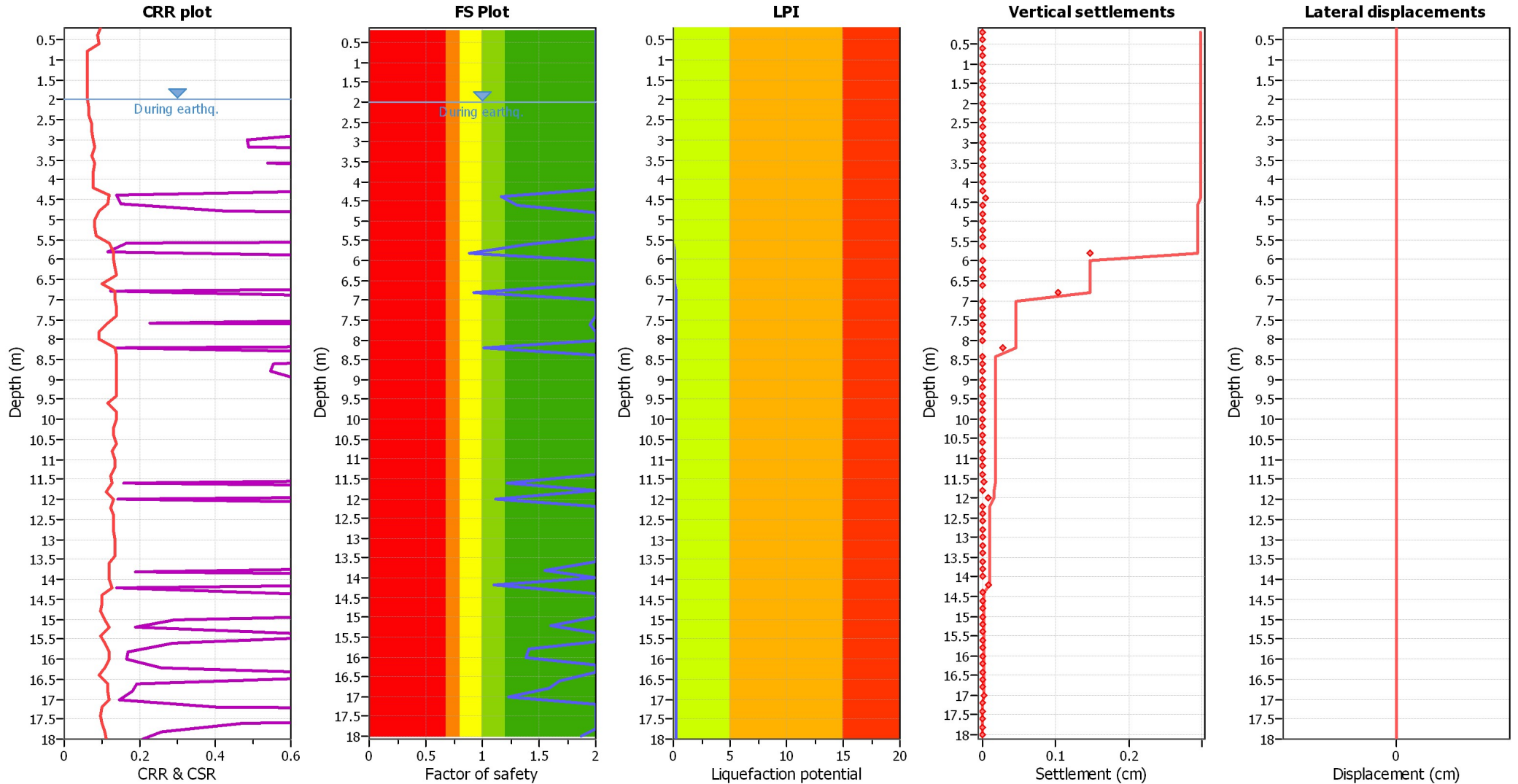
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

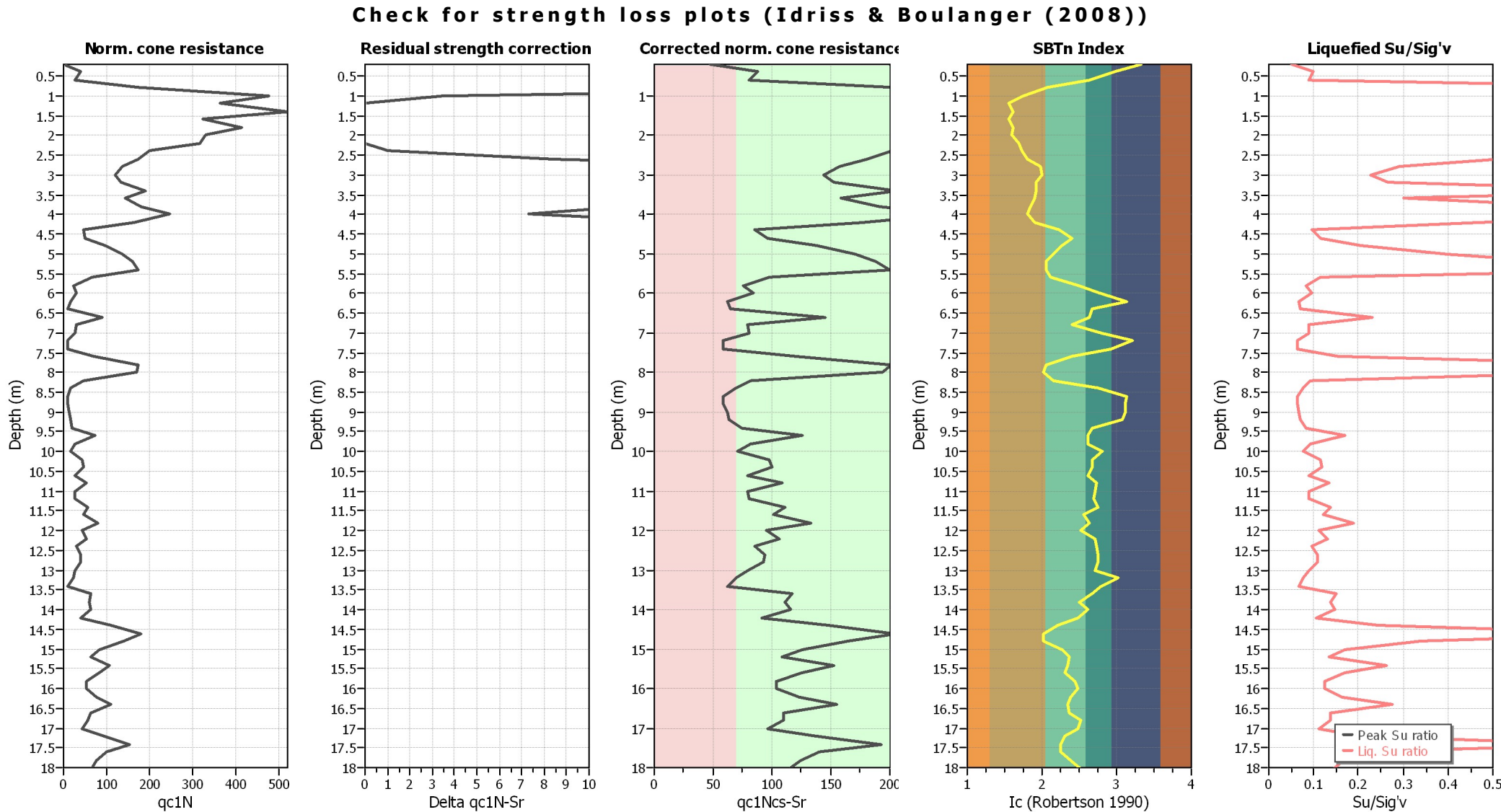
F.S. color scheme

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





Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

**:: Liquefaction Potential Index calculation data ::**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
0.20	2.00	0.00	9.90	0.20	0.00	0.40	2.00	0.00	9.80	0.20	0.00
0.60	2.00	0.00	9.70	0.20	0.00	0.80	2.00	0.00	9.60	0.20	0.00
1.00	2.00	0.00	9.50	0.20	0.00	1.20	2.00	0.00	9.40	0.20	0.00
1.40	2.00	0.00	9.30	0.20	0.00	1.60	2.00	0.00	9.20	0.20	0.00
1.80	2.00	0.00	9.10	0.20	0.00	2.00	2.00	0.00	9.00	0.20	0.00
2.20	2.00	0.00	8.90	0.20	0.00	2.40	2.00	0.00	8.80	0.20	0.00
2.60	2.00	0.00	8.70	0.20	0.00	2.80	2.00	0.00	8.60	0.20	0.00
3.00	2.00	0.00	8.50	0.20	0.00	3.20	2.00	0.00	8.40	0.20	0.00
3.40	2.00	0.00	8.30	0.20	0.00	3.60	2.00	0.00	8.20	0.20	0.00
3.80	2.00	0.00	8.10	0.20	0.00	4.00	2.00	0.00	8.00	0.20	0.00
4.20	2.00	0.00	7.90	0.20	0.00	4.40	1.17	0.00	7.80	0.20	0.00
4.60	1.30	0.00	7.70	0.20	0.00	4.80	2.00	0.00	7.60	0.20	0.00
5.00	2.00	0.00	7.50	0.20	0.00	5.20	2.00	0.00	7.40	0.20	0.00
5.40	2.00	0.00	7.30	0.20	0.00	5.60	1.38	0.00	7.20	0.20	0.00
5.80	0.89	0.11	7.10	0.20	0.16	6.00	2.00	0.00	7.00	0.20	0.00
6.20	2.00	0.00	6.90	0.20	0.00	6.40	2.00	0.00	6.80	0.20	0.00
6.60	2.00	0.00	6.70	0.20	0.00	6.80	0.93	0.07	6.60	0.20	0.10
7.00	2.00	0.00	6.50	0.20	0.00	7.20	2.00	0.00	6.40	0.20	0.00
7.40	2.00	0.00	6.30	0.20	0.00	7.60	1.95	0.00	6.20	0.20	0.00
7.80	2.00	0.00	6.10	0.20	0.00	8.00	2.00	0.00	6.00	0.20	0.00
8.20	1.01	0.00	5.90	0.20	0.00	8.40	2.00	0.00	5.80	0.20	0.00
8.60	2.00	0.00	5.70	0.20	0.00	8.80	2.00	0.00	5.60	0.20	0.00
9.00	2.00	0.00	5.50	0.20	0.00	9.20	2.00	0.00	5.40	0.20	0.00
9.40	2.00	0.00	5.30	0.20	0.00	9.60	2.00	0.00	5.20	0.20	0.00
9.80	2.00	0.00	5.10	0.20	0.00	10.00	2.00	0.00	5.00	0.20	0.00
10.20	2.00	0.00	4.90	0.20	0.00	10.40	2.00	0.00	4.80	0.20	0.00
10.60	2.00	0.00	4.70	0.20	0.00	10.80	2.00	0.00	4.60	0.20	0.00
11.00	2.00	0.00	4.50	0.20	0.00	11.20	2.00	0.00	4.40	0.20	0.00
11.40	2.00	0.00	4.30	0.20	0.00	11.60	1.22	0.00	4.20	0.20	0.00
11.80	2.00	0.00	4.10	0.20	0.00	12.00	1.11	0.00	4.00	0.20	0.00
12.20	2.00	0.00	3.90	0.20	0.00	12.40	2.00	0.00	3.80	0.20	0.00
12.60	2.00	0.00	3.70	0.20	0.00	12.80	2.00	0.00	3.60	0.20	0.00
13.00	2.00	0.00	3.50	0.20	0.00	13.20	2.00	0.00	3.40	0.20	0.00
13.40	2.00	0.00	3.30	0.20	0.00	13.60	2.00	0.00	3.20	0.20	0.00
13.80	1.55	0.00	3.10	0.20	0.00	14.00	2.00	0.00	3.00	0.20	0.00
14.20	1.10	0.00	2.90	0.20	0.00	14.40	2.00	0.00	2.80	0.20	0.00
14.60	2.00	0.00	2.70	0.20	0.00	14.80	2.00	0.00	2.60	0.20	0.00
15.00	2.00	0.00	2.50	0.20	0.00	15.20	1.60	0.00	2.40	0.20	0.00
15.40	2.00	0.00	2.30	0.20	0.00	15.60	2.00	0.00	2.20	0.20	0.00
15.80	1.41	0.00	2.10	0.20	0.00	16.00	1.38	0.00	2.00	0.20	0.00
16.20	2.00	0.00	1.90	0.20	0.00	16.40	2.00	0.00	1.80	0.20	0.00
16.60	1.68	0.00	1.70	0.20	0.00	16.80	1.59	0.00	1.60	0.20	0.00
17.00	1.23	0.00	1.50	0.20	0.00	17.20	2.00	0.00	1.40	0.20	0.00
17.40	2.00	0.00	1.30	0.20	0.00	17.60	2.00	0.00	1.20	0.20	0.00
17.80	2.00	0.00	1.10	0.20	0.00	18.00	1.88	0.00	1.00	0.20	0.00

**:: Liquefaction Potential Index calculation data :: (continued)**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----	--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----

**Overall liquefaction potential: 0.25**

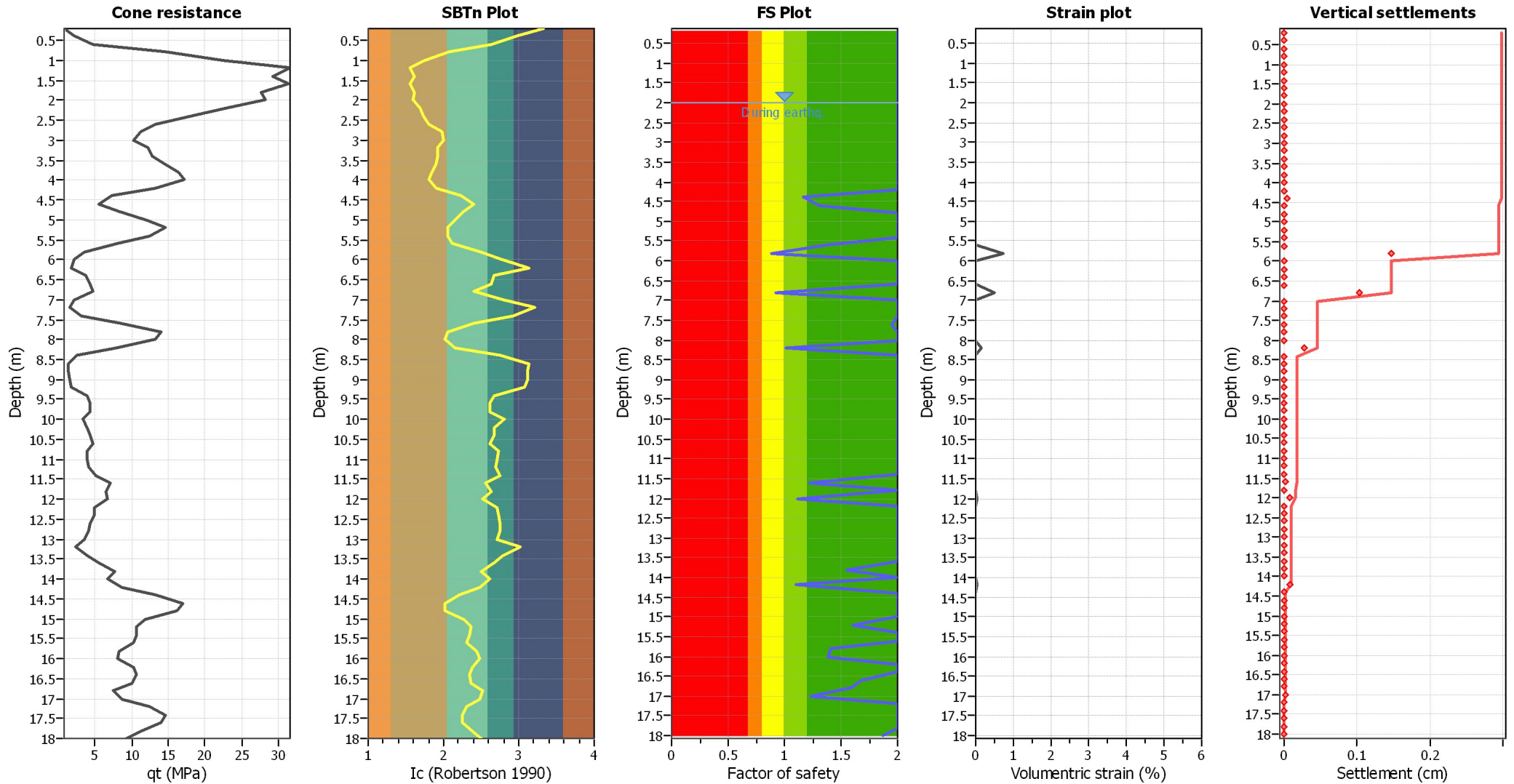
LPI = 0.00 - Liquefaction risk very low  
LPI between 0.00 and 5.00 - Liquefaction risk low  
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high  
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

**Abbreviations**

FS: Calculated factor of safety for test point  
F<sub>L</sub>: 1 - FS  
w<sub>z</sub>: Function value of the extend of soil liquefaction according to depth  
d<sub>z</sub>: Layer thickness (m)  
LPI: Liquefaction potential index value for test point



Estimation of post-earthquake settlements



Abbreviations

- $q_c$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)
- $I_c$ : Soil Behaviour Type Index
- FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction
- Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

**:: Post-earthquake settlement due to soil liquefaction ::**

Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)	Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)
2.00	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00	2.20	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00
2.40	200.83	2.00	0.00	1.00	0.00	2.60	176.80	2.00	0.00	1.00	0.00
2.80	181.05	2.00	0.00	1.00	0.00	3.00	168.76	2.00	0.00	1.00	0.00
3.20	169.11	2.00	0.00	1.00	0.00	3.40	229.30	2.00	0.00	1.00	0.00
3.60	172.04	2.00	0.00	1.00	0.00	3.80	194.97	2.00	0.00	1.00	0.00
4.00	250.00	2.00	0.00	1.00	0.00	4.20	189.93	2.00	0.00	1.00	0.00
4.40	100.27	1.17	0.02	1.00	0.00	4.60	109.84	1.30	0.00	1.00	0.00
4.80	164.77	2.00	0.00	1.00	0.00	5.00	207.37	2.00	0.00	1.00	0.00
5.20	223.43	2.00	0.00	1.00	0.00	5.40	238.92	2.00	0.00	1.00	0.00
5.60	116.77	1.38	0.00	1.00	0.00	5.80	80.93	0.89	0.73	1.00	0.15
6.00	30.68	2.00	0.00	1.00	0.00	6.20	15.29	2.00	0.00	1.00	0.00
6.40	10.83	2.00	0.00	1.00	0.00	6.60	91.34	2.00	0.00	1.00	0.00
6.80	87.77	0.93	0.51	1.00	0.10	7.00	28.01	2.00	0.00	1.00	0.00
7.20	11.34	2.00	0.00	1.00	0.00	7.40	10.19	2.00	0.00	1.00	0.00
7.60	138.34	1.95	0.00	1.00	0.00	7.80	240.20	2.00	0.00	1.00	0.00
8.00	227.01	2.00	0.00	1.00	0.00	8.20	97.41	1.01	0.14	1.00	0.03
8.40	15.39	2.00	0.00	1.00	0.00	8.60	11.44	2.00	0.00	1.00	0.00
8.80	11.34	2.00	0.00	1.00	0.00	9.00	15.01	2.00	0.00	1.00	0.00
9.20	16.75	2.00	0.00	1.00	0.00	9.40	20.29	2.00	0.00	1.00	0.00
9.60	71.75	2.00	0.00	1.00	0.00	9.80	28.19	2.00	0.00	1.00	0.00
10.00	17.95	2.00	0.00	1.00	0.00	10.20	43.31	2.00	0.00	1.00	0.00
10.40	45.73	2.00	0.00	1.00	0.00	10.60	25.47	2.00	0.00	1.00	0.00
10.80	54.20	2.00	0.00	1.00	0.00	11.00	25.08	2.00	0.00	1.00	0.00
11.20	26.63	2.00	0.00	1.00	0.00	11.40	57.61	2.00	0.00	1.00	0.00
11.60	112.26	1.22	0.01	1.00	0.00	11.80	78.54	2.00	0.00	1.00	0.00
12.00	104.86	1.11	0.03	1.00	0.01	12.20	52.46	2.00	0.00	1.00	0.00
12.40	31.31	2.00	0.00	1.00	0.00	12.60	39.62	2.00	0.00	1.00	0.00
12.80	38.50	2.00	0.00	1.00	0.00	13.00	25.66	2.00	0.00	1.00	0.00
13.20	23.08	2.00	0.00	1.00	0.00	13.40	9.28	2.00	0.00	1.00	0.00
13.60	63.20	2.00	0.00	1.00	0.00	13.80	126.28	1.55	0.00	1.00	0.00
14.00	62.38	2.00	0.00	1.00	0.00	14.20	102.09	1.10	0.04	1.00	0.01
14.40	179.01	2.00	0.00	1.00	0.00	14.60	242.14	2.00	0.00	1.00	0.00
14.80	193.91	2.00	0.00	1.00	0.00	15.00	150.33	2.00	0.00	1.00	0.00
15.20	126.78	1.60	0.00	1.00	0.00	15.40	181.44	2.00	0.00	1.00	0.00
15.60	149.66	2.00	0.00	1.00	0.00	15.80	118.29	1.41	0.00	1.00	0.00
16.00	116.89	1.38	0.00	1.00	0.00	16.20	144.48	2.00	0.00	1.00	0.00
16.40	184.79	2.00	0.00	1.00	0.00	16.60	128.12	1.68	0.00	1.00	0.00
16.80	124.66	1.59	0.00	1.00	0.00	17.00	106.91	1.23	0.01	1.00	0.00
17.20	162.88	2.00	0.00	1.00	0.00	17.40	234.33	2.00	0.00	1.00	0.00
17.60	168.28	2.00	0.00	1.00	0.00	17.80	144.85	2.00	0.00	1.00	0.00
18.00	132.83	1.88	0.00	1.00	0.00						

**Total estimated settlement: 0.30****Abbreviations**

$Q_{tn,cs}$ :	Equivalent clean sand normalized cone resistance
FS:	Factor of safety against liquefaction
$e_v$ (%):	Post-liquefaction volumetric strain
DF:	$e_v$ depth weighting factor
Settlement:	Calculated settlement

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

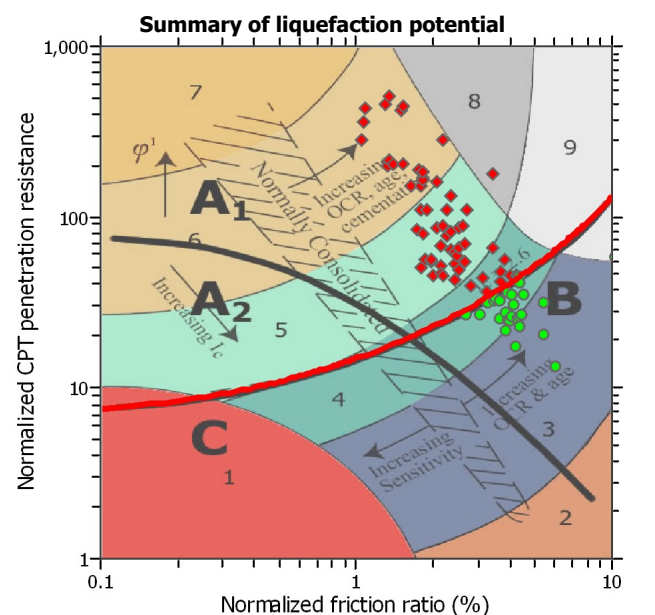
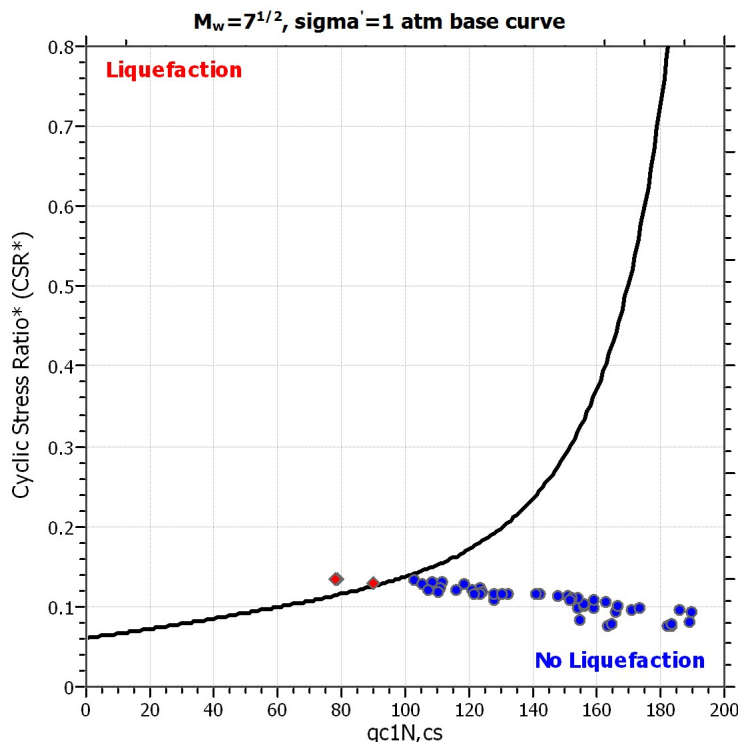
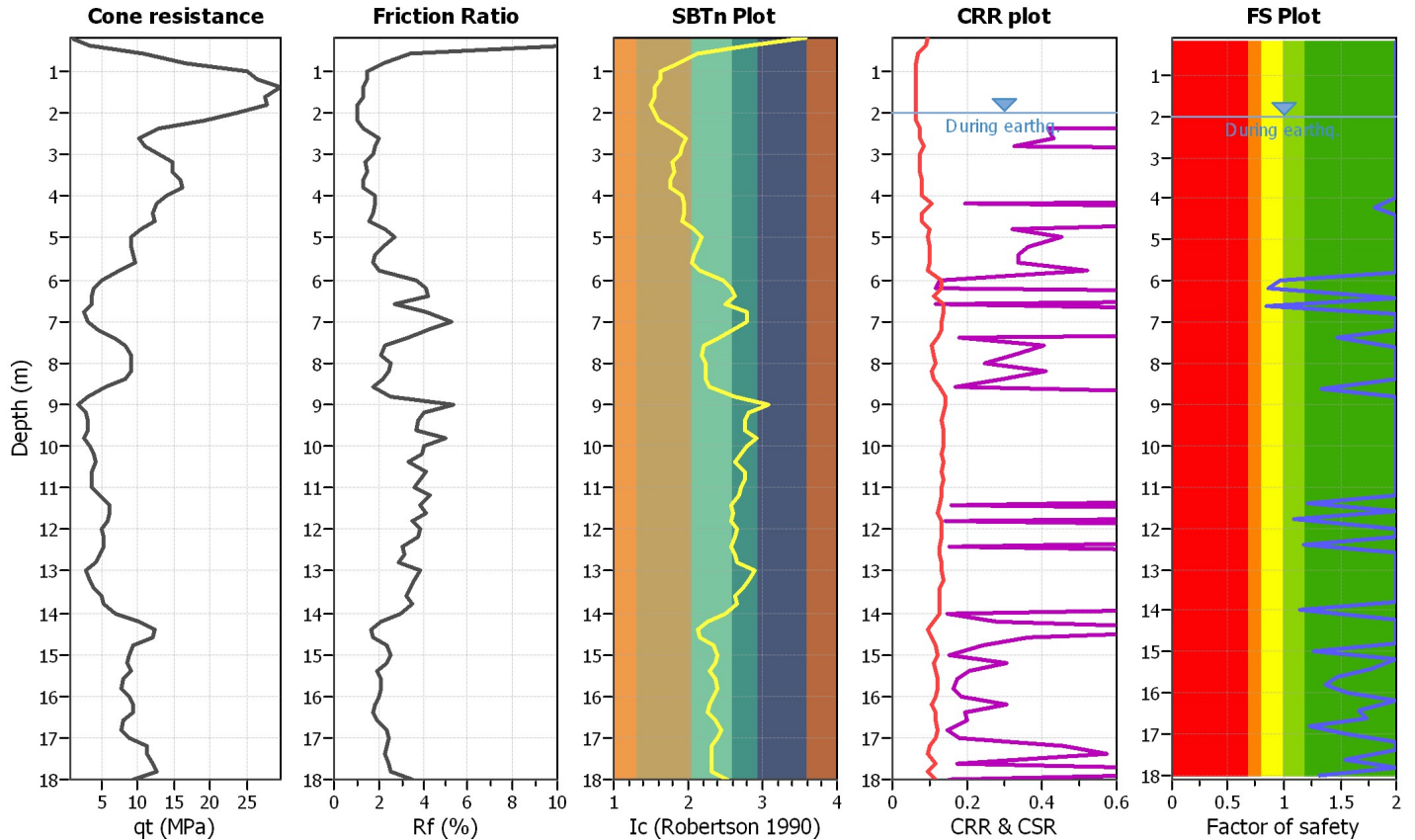
**Project title : COMUNE DI PORTO MANTOVANO**

**Location : Complesso Sportivo Cà Rossa**

**CPT file : cpt3**

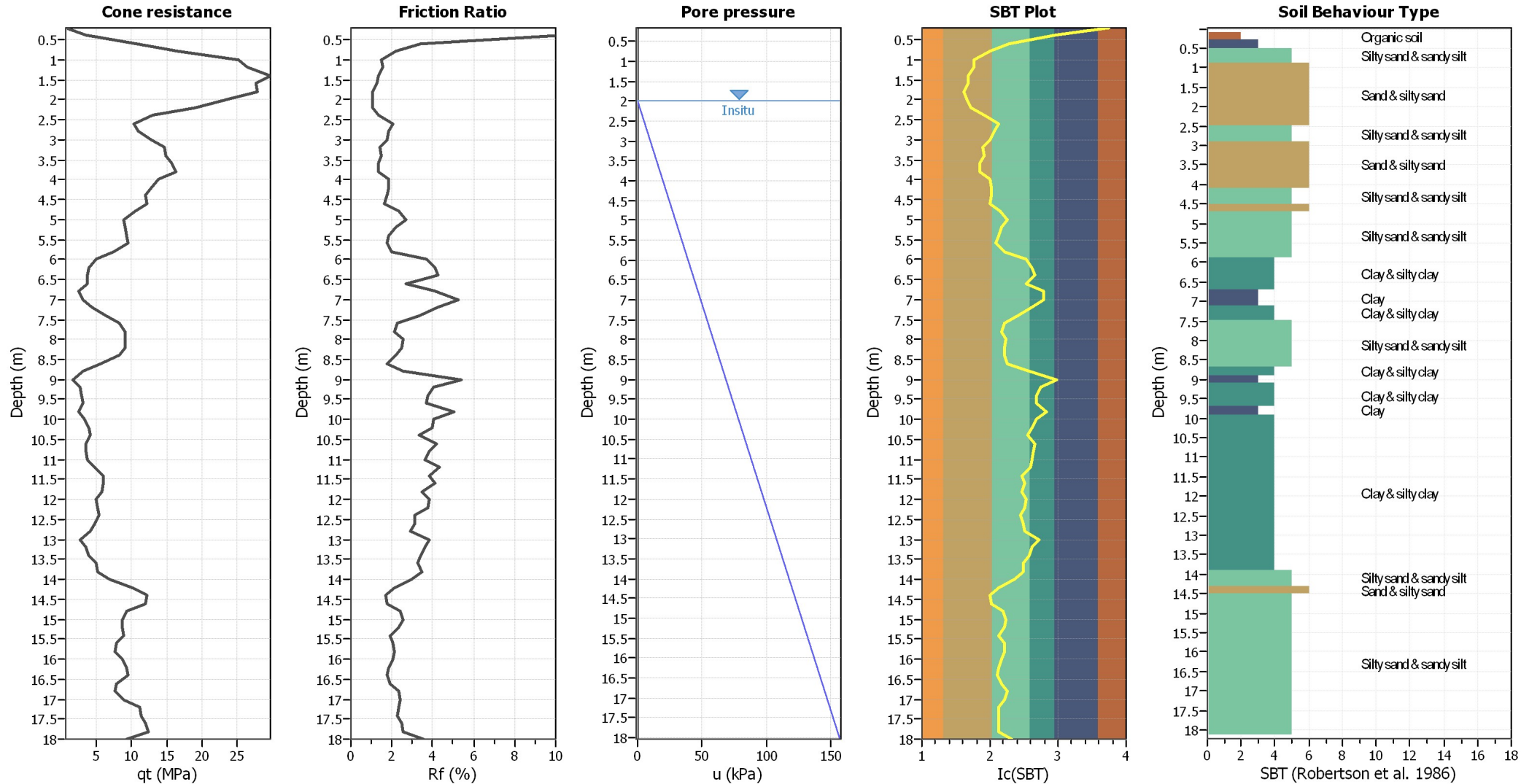
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sand & Clay
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.20	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.17	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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

CPT basic interpretation plots



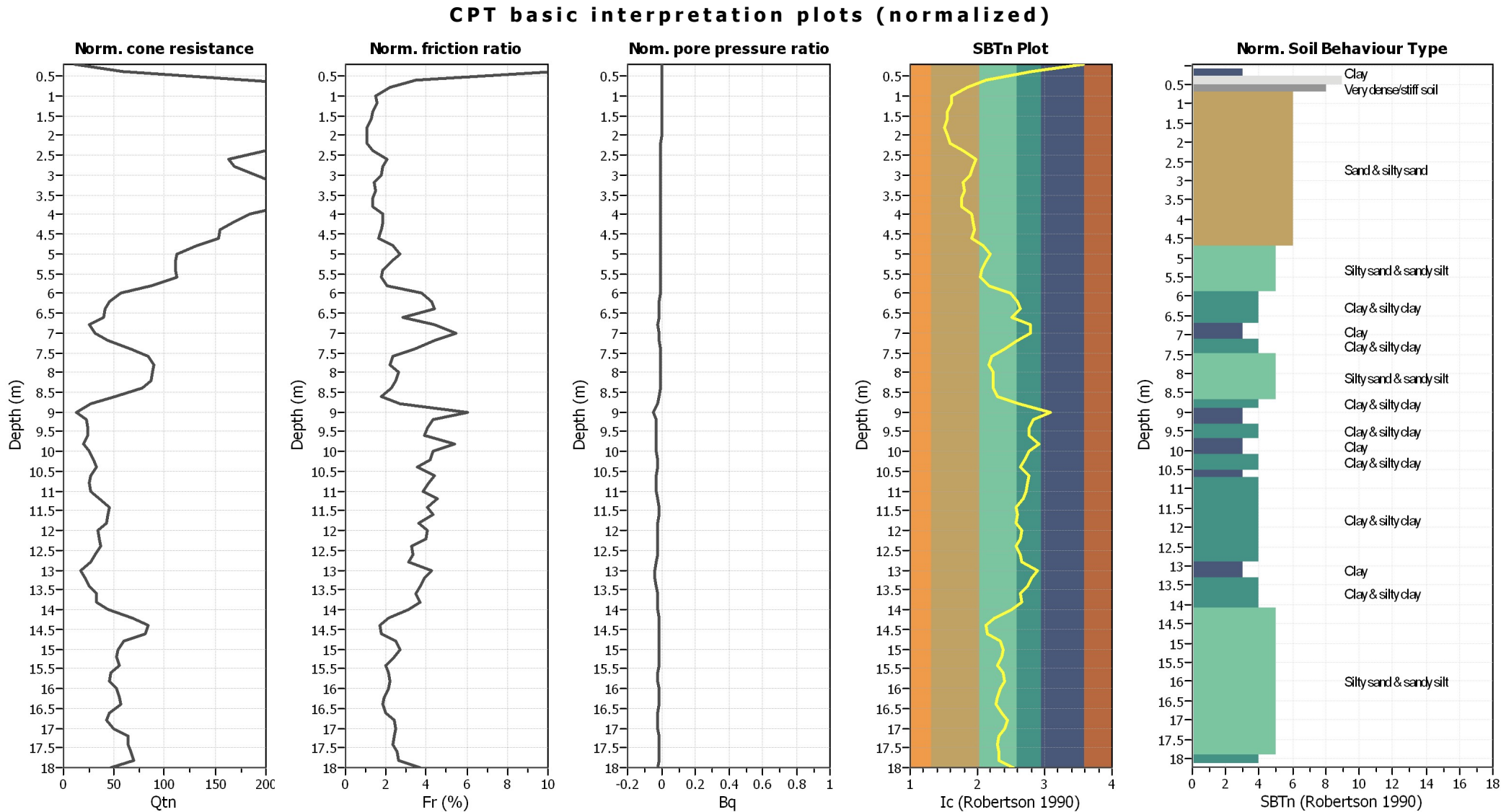
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBT legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained





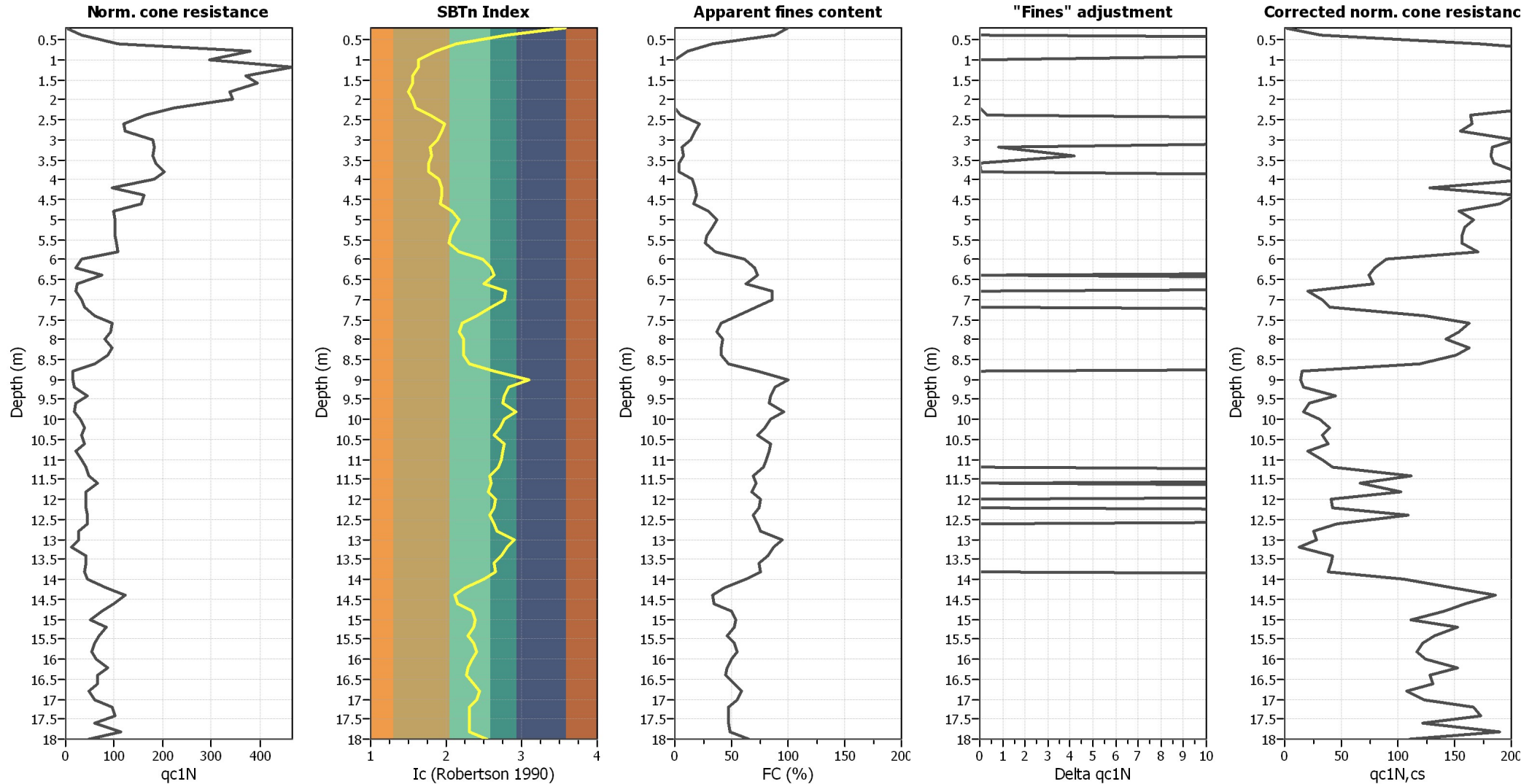
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

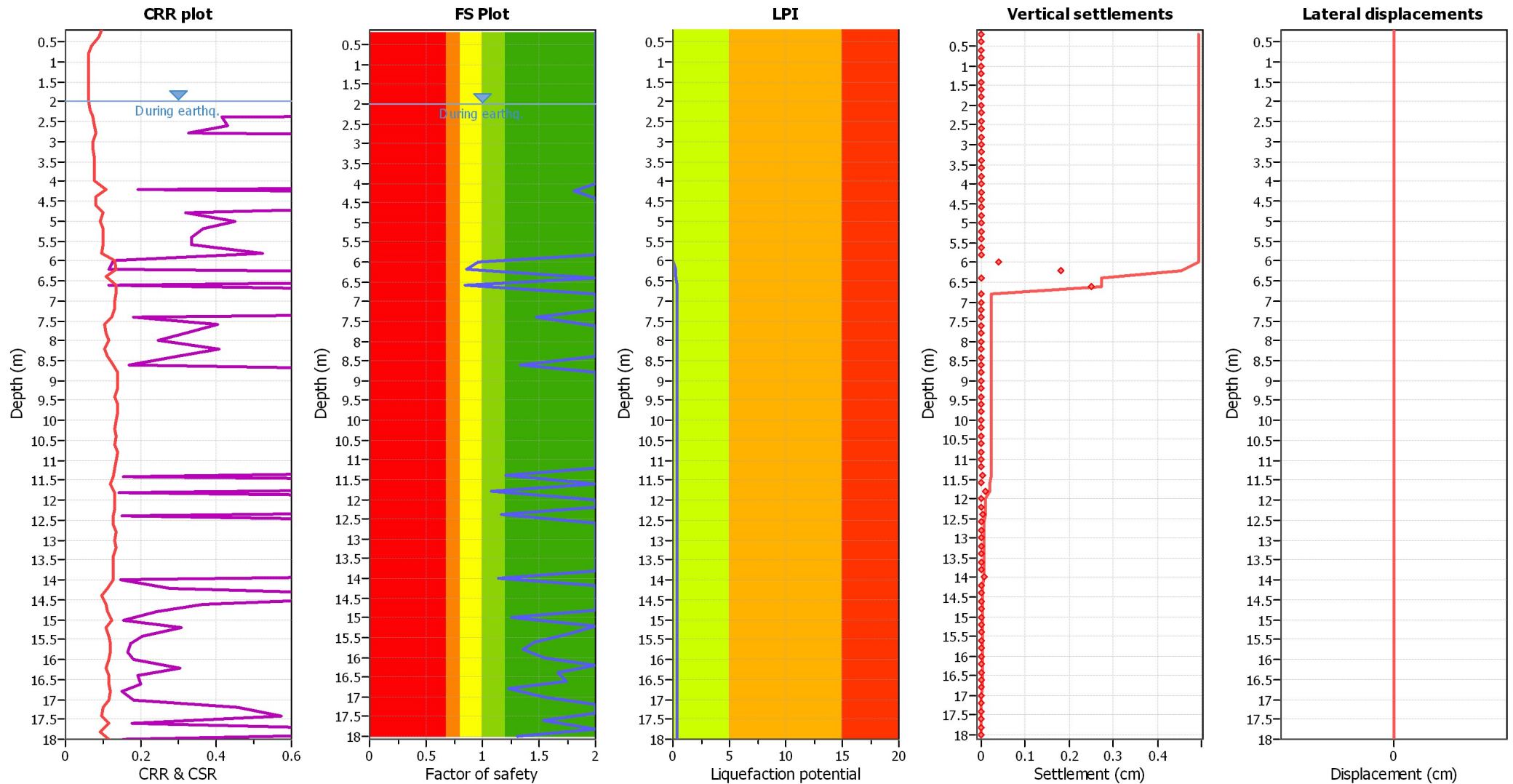
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

## 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  $M_w$ : 6.20  
 Peak ground acceleration: 0.17  
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (erthq.): 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  
 $K_g$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: No  
 Limit depth: N/A

### F.S. color scheme

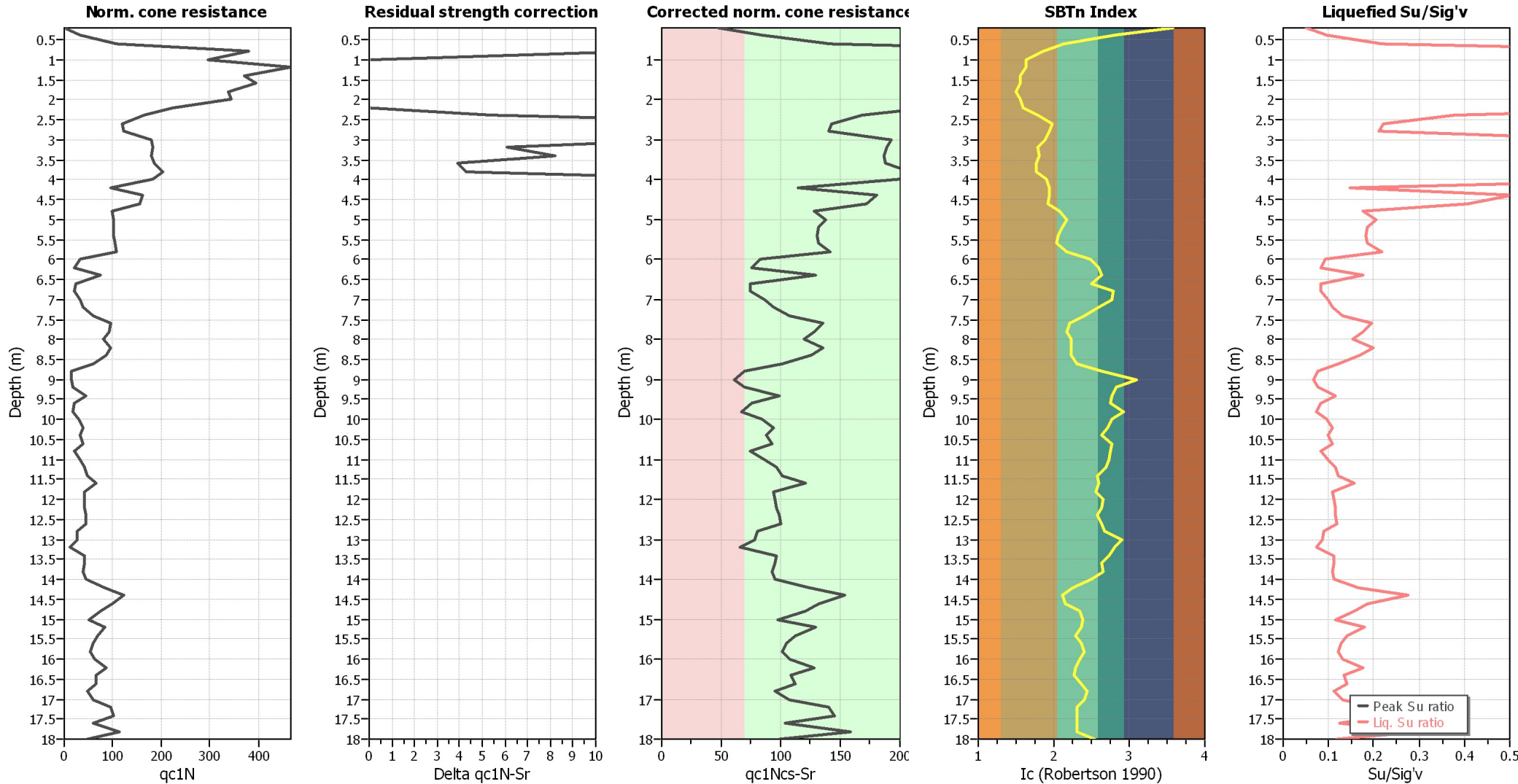
■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlike to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



Check for strength loss plots (Idriss & Boulanger (2008))



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.00 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 <sub>G</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Peak ground acceleration:	0.17	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

**:: Liquefaction Potential Index calculation data ::**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
0.20	2.00	0.00	9.90	0.20	0.00	0.40	2.00	0.00	9.80	0.20	0.00
0.60	2.00	0.00	9.70	0.20	0.00	0.80	2.00	0.00	9.60	0.20	0.00
1.00	2.00	0.00	9.50	0.20	0.00	1.20	2.00	0.00	9.40	0.20	0.00
1.40	2.00	0.00	9.30	0.20	0.00	1.60	2.00	0.00	9.20	0.20	0.00
1.80	2.00	0.00	9.10	0.20	0.00	2.00	2.00	0.00	9.00	0.20	0.00
2.20	2.00	0.00	8.90	0.20	0.00	2.40	2.00	0.00	8.80	0.20	0.00
2.60	2.00	0.00	8.70	0.20	0.00	2.80	2.00	0.00	8.60	0.20	0.00
3.00	2.00	0.00	8.50	0.20	0.00	3.20	2.00	0.00	8.40	0.20	0.00
3.40	2.00	0.00	8.30	0.20	0.00	3.60	2.00	0.00	8.20	0.20	0.00
3.80	2.00	0.00	8.10	0.20	0.00	4.00	2.00	0.00	8.00	0.20	0.00
4.20	1.81	0.00	7.90	0.20	0.00	4.40	2.00	0.00	7.80	0.20	0.00
4.60	2.00	0.00	7.70	0.20	0.00	4.80	2.00	0.00	7.60	0.20	0.00
5.00	2.00	0.00	7.50	0.20	0.00	5.20	2.00	0.00	7.40	0.20	0.00
5.40	2.00	0.00	7.30	0.20	0.00	5.60	2.00	0.00	7.20	0.20	0.00
5.80	2.00	0.00	7.10	0.20	0.00	6.00	0.97	0.03	7.00	0.20	0.05
6.20	0.86	0.14	6.90	0.20	0.19	6.40	2.00	0.00	6.80	0.20	0.00
6.60	0.85	0.15	6.70	0.20	0.21	6.80	2.00	0.00	6.60	0.20	0.00
7.00	2.00	0.00	6.50	0.20	0.00	7.20	2.00	0.00	6.40	0.20	0.00
7.40	1.47	0.00	6.30	0.20	0.00	7.60	2.00	0.00	6.20	0.20	0.00
7.80	2.00	0.00	6.10	0.20	0.00	8.00	2.00	0.00	6.00	0.20	0.00
8.20	2.00	0.00	5.90	0.20	0.00	8.40	2.00	0.00	5.80	0.20	0.00
8.60	1.33	0.00	5.70	0.20	0.00	8.80	2.00	0.00	5.60	0.20	0.00
9.00	2.00	0.00	5.50	0.20	0.00	9.20	2.00	0.00	5.40	0.20	0.00
9.40	2.00	0.00	5.30	0.20	0.00	9.60	2.00	0.00	5.20	0.20	0.00
9.80	2.00	0.00	5.10	0.20	0.00	10.00	2.00	0.00	5.00	0.20	0.00
10.20	2.00	0.00	4.90	0.20	0.00	10.40	2.00	0.00	4.80	0.20	0.00
10.60	2.00	0.00	4.70	0.20	0.00	10.80	2.00	0.00	4.60	0.20	0.00
11.00	2.00	0.00	4.50	0.20	0.00	11.20	2.00	0.00	4.40	0.20	0.00
11.40	1.21	0.00	4.30	0.20	0.00	11.60	2.00	0.00	4.20	0.20	0.00
11.80	1.08	0.00	4.10	0.20	0.00	12.00	2.00	0.00	4.00	0.20	0.00
12.20	2.00	0.00	3.90	0.20	0.00	12.40	1.17	0.00	3.80	0.20	0.00
12.60	2.00	0.00	3.70	0.20	0.00	12.80	2.00	0.00	3.60	0.20	0.00
13.00	2.00	0.00	3.50	0.20	0.00	13.20	2.00	0.00	3.40	0.20	0.00
13.40	2.00	0.00	3.30	0.20	0.00	13.60	2.00	0.00	3.20	0.20	0.00
13.80	2.00	0.00	3.10	0.20	0.00	14.00	1.14	0.00	3.00	0.20	0.00
14.20	2.00	0.00	2.90	0.20	0.00	14.40	2.00	0.00	2.80	0.20	0.00
14.60	2.00	0.00	2.70	0.20	0.00	14.80	2.00	0.00	2.60	0.20	0.00
15.00	1.25	0.00	2.50	0.20	0.00	15.20	2.00	0.00	2.40	0.20	0.00
15.40	1.78	0.00	2.30	0.20	0.00	15.60	1.47	0.00	2.20	0.20	0.00
15.80	1.36	0.00	2.10	0.20	0.00	16.00	1.56	0.00	2.00	0.20	0.00
16.20	2.00	0.00	1.90	0.20	0.00	16.40	1.67	0.00	1.80	0.20	0.00
16.60	1.74	0.00	1.70	0.20	0.00	16.80	1.23	0.00	1.60	0.20	0.00
17.00	1.56	0.00	1.50	0.20	0.00	17.20	2.00	0.00	1.40	0.20	0.00
17.40	2.00	0.00	1.30	0.20	0.00	17.60	1.54	0.00	1.20	0.20	0.00
17.80	2.00	0.00	1.10	0.20	0.00	18.00	1.31	0.00	1.00	0.20	0.00

**:: Liquefaction Potential Index calculation data :: (continued)**

Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI	Depth (m)	FS	F <sub>L</sub>	w <sub>z</sub>	d <sub>z</sub>	LPI
--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----	--------------	----	----------------	----------------	----------------	-----

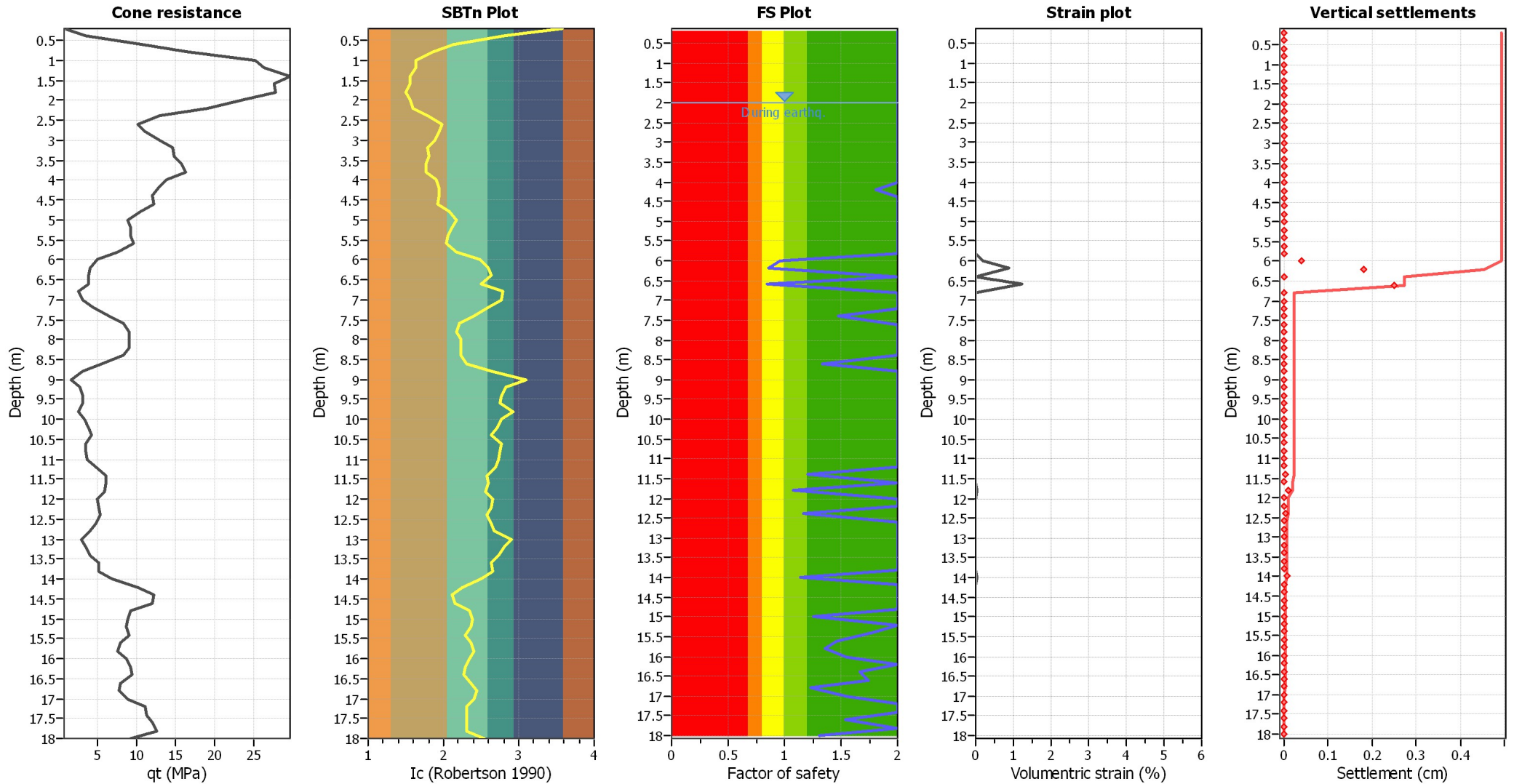
**Overall liquefaction potential: 0.45**

LPI = 0.00 - Liquefaction risk very low  
LPI between 0.00 and 5.00 - Liquefaction risk low  
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high  
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

**Abbreviations**

FS: Calculated factor of safety for test point  
F<sub>L</sub>: 1 - FS  
w<sub>z</sub>: Function value of the extend of soil liquefaction according to depth  
d<sub>z</sub>: Layer thickness (m)  
LPI: Liquefaction potential index value for test point

Estimation of post-earthquake settlements



Abbreviations

- qt: Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)
- Ic: Soil Behaviour Type Index
- FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction
- Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

**:: Post-earthquake settlement due to soil liquefaction ::**

Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)	Depth (m)	$q_{c1N,cs}$	FS	$e_v$ (%)	DF	Settlement (cm)
2.00	254.00	2.00	0.00	1.00	0.00	2.20	224.03	2.00	0.00	1.00	0.00
2.40	163.79	2.00	0.00	1.00	0.00	2.60	165.02	2.00	0.00	1.00	0.00
2.80	155.30	2.00	0.00	1.00	0.00	3.00	204.33	2.00	0.00	1.00	0.00
3.20	183.55	2.00	0.00	1.00	0.00	3.40	182.26	2.00	0.00	1.00	0.00
3.60	183.99	2.00	0.00	1.00	0.00	3.80	204.79	2.00	0.00	1.00	0.00
4.00	217.44	2.00	0.00	1.00	0.00	4.20	128.43	1.81	0.00	1.00	0.00
4.40	203.34	2.00	0.00	1.00	0.00	4.60	189.30	2.00	0.00	1.00	0.00
4.80	154.37	2.00	0.00	1.00	0.00	5.00	166.52	2.00	0.00	1.00	0.00
5.20	159.25	2.00	0.00	1.00	0.00	5.40	156.25	2.00	0.00	1.00	0.00
5.60	156.21	2.00	0.00	1.00	0.00	5.80	171.03	2.00	0.00	1.00	0.00
6.00	90.06	0.97	0.20	1.00	0.04	6.20	78.91	0.86	0.90	1.00	0.18
6.40	74.91	2.00	0.00	1.00	0.00	6.60	78.24	0.85	1.25	1.00	0.25
6.80	21.12	2.00	0.00	1.00	0.00	7.00	33.27	2.00	0.00	1.00	0.00
7.20	40.07	2.00	0.00	1.00	0.00	7.40	123.94	1.47	0.00	1.00	0.00
7.60	163.05	2.00	0.00	1.00	0.00	7.80	154.39	2.00	0.00	1.00	0.00
8.00	142.43	2.00	0.00	1.00	0.00	8.20	163.35	2.00	0.00	1.00	0.00
8.40	151.19	2.00	0.00	1.00	0.00	8.60	118.72	1.33	0.00	1.00	0.00
8.80	15.14	2.00	0.00	1.00	0.00	9.00	14.08	2.00	0.00	1.00	0.00
9.20	16.75	2.00	0.00	1.00	0.00	9.40	44.73	2.00	0.00	1.00	0.00
9.60	21.99	2.00	0.00	1.00	0.00	9.80	17.23	2.00	0.00	1.00	0.00
10.00	30.78	2.00	0.00	1.00	0.00	10.20	39.69	2.00	0.00	1.00	0.00
10.40	33.89	2.00	0.00	1.00	0.00	10.60	39.10	2.00	0.00	1.00	0.00
10.80	20.02	2.00	0.00	1.00	0.00	11.00	33.14	2.00	0.00	1.00	0.00
11.20	42.69	2.00	0.00	1.00	0.00	11.40	111.99	1.21	0.01	1.00	0.00
11.60	67.23	2.00	0.00	1.00	0.00	11.80	102.97	1.08	0.05	1.00	0.01
12.00	41.43	2.00	0.00	1.00	0.00	12.20	42.88	2.00	0.00	1.00	0.00
12.40	108.72	1.17	0.01	1.00	0.00	12.60	45.76	2.00	0.00	1.00	0.00
12.80	25.91	2.00	0.00	1.00	0.00	13.00	28.30	2.00	0.00	1.00	0.00
13.20	13.38	2.00	0.00	1.00	0.00	13.40	42.14	2.00	0.00	1.00	0.00
13.60	40.98	2.00	0.00	1.00	0.00	13.80	39.04	2.00	0.00	1.00	0.00
14.00	105.58	1.14	0.03	1.00	0.01	14.20	148.18	2.00	0.00	1.00	0.00
14.40	186.32	2.00	0.00	1.00	0.00	14.60	159.24	2.00	0.00	1.00	0.00
14.80	141.49	2.00	0.00	1.00	0.00	15.00	111.40	1.25	0.00	1.00	0.00
15.20	152.63	2.00	0.00	1.00	0.00	15.40	132.53	1.78	0.00	1.00	0.00
15.60	121.32	1.47	0.00	1.00	0.00	15.80	116.37	1.36	0.00	1.00	0.00
16.00	124.60	1.56	0.00	1.00	0.00	16.20	152.13	2.00	0.00	1.00	0.00
16.40	128.16	1.67	0.00	1.00	0.00	16.60	130.49	1.74	0.00	1.00	0.00
16.80	107.64	1.23	0.01	1.00	0.00	17.00	123.58	1.56	0.00	1.00	0.00
17.20	166.97	2.00	0.00	1.00	0.00	17.40	173.71	2.00	0.00	1.00	0.00
17.60	122.06	1.54	0.00	1.00	0.00	17.80	190.05	2.00	0.00	1.00	0.00
18.00	110.64	1.31	0.00	1.00	0.00						

**Total estimated settlement: 0.49****Abbreviations**

$Q_{tn,cs}$ :	Equivalent clean sand normalized cone resistance
FS:	Factor of safety against liquefaction
$e_v$ (%):	Post-liquefaction volumetric strain
DF:	$e_v$ depth weighting factor
Settlement:	Calculated settlement