

RIQUALIFICAZIONE AREA EX ACETIFICIO VENTURI

Inquadramento:

incrocio trivio composto da: via Piano Caricatore, via Fabio Taglioni, via Rivali San Bartolomeo

Catasto fabbricati: Foglio 111 - Mappali 20, 91

ANALISI SISMICHE AI SENSI DELLA DGR 2193/2015

LUGLIO 2018

REL.01.4A

Proprietà: IMMOBILIARE STUOIE S.p.A. Sede legale: LUGO (RA) PIAZZA BARACCA 24

Indirizzo PEC: IMMOBILIARESTUOIESPA@LEGALMAIL.IT Codice Fiscale E PARTITA IVA: 02511190395



COOPROGETTO

architettura ingegneria servizi
via Severoli, 18 - 48018 Faenza (RA)
tel. 0546-29237 - fax. 0546-29261
segreteria@cooprogetto.it
segreteria@pec.cooprogetto.it

Arch. Alessandro Bucci

collaboratori:

Arch. Silvia Ancarani
Arch. Enrico Ferraresi
Arch. Filippo Govoni
Arch. Luca Landi
Arch. Michele Vasumini

Progetto rete fognaria
ing. Paolo Ruggeri

Consulenti:

geologo: dott. Giancarlo Andreatta
dott. Samuel Sangiorgi
strutturista: ing. Marco Peroni
clima/impatto acustico: ing. Franca Conti
trasporti: ing. Michele Tarozzi
studio ambientale: ing. Lara dal Pozzo
ing. Franca Conti
prevenzione incendi: ing. Roberto d'Agostino
imp. meccanico: per. ind. Christian Fabbri
imp. elettrico: per. ind. Giuliano Rambelli

Pratiche precedenti

Firme dei tecnici ognuno per le proprie competenze

Presa visione



data	redatta da
29-03	SS

Via Valsellustra 32
40060 Dozza - BOLOGNA



Studio Samuel Sangiorgi
Geologia Applicata

Comune:

COMUNE DI LUGO (RA)

Oggetto:

Riqualificazione Area ex Acetifico Venturi
ANALISI SISMICHE AI SENSI DELLA DGR 2193/2015

Stesura:

luglio 2018

Elaborazione:

Dott. Geol. Samuel Sangiorgi



Proprietà:

IMMOBILIARE STUOIE S.p.a.

tel/fax 0542 640279

mail info@studiosamuelsangiorgi.eu

www.studiosamuelsangiorgi.eu



Indice generale

1	PREMESSA.....	2
2	INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE DI RIFERIMENTO.....	2
3	ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE.....	4
3.1	Pericolosità sismica di base: sismicità storica e sorgenti sismogeniche.....	4
3.2	Indirizzi di riferimento per la pianificazione territoriale: DAL 112/2007 e DGR 2193/2015.....	5
3.3	Lo studio sismico preliminare elaborato per il PSC.....	6
3.4	Gli ulteriori approfondimenti sismici nell'area "ex Acetificio Venturi" effettuati ai sensi della DGR 2193/2015.....	8
3.4.1	<i>Microzonazione sismica semplificata (fattori di amplificazione).....</i>	<i>8</i>
3.4.2	<i>Verifiche quantitative della liquefacibilità.....</i>	<i>10</i>
4	CONCLUSIONI.....	13

1 PREMESSA

Lo Studio scrivente è stato incaricato di redigere le analisi sismiche integrative per l'area di riqualificazione ex Acetificio Venturi di Lugo di Romagna (RA), ai sensi della DGR 2193/2015 e a integrazione della Relazione Geologica a firma del dr. Geol. G. Andreatta (maggio 2016).

Lo studio geologico già espletato per l'area di studio ha consentito di elaborare il modello geologico e geotecnico dell'area in questione, sulla base dei dati ricavati dalla campagna di indagini geognostiche e geofisiche in situ (prove CPTU; sondaggio a carotaggio). Lo studio geologico 2016 aveva inoltre determinato i parametri fondamentali per l'elaborazione delle verifiche sismiche di progetto, ai sensi delle Norme Tecniche vigenti per le Costruzioni (NTC 2008).

Questa ulteriore analisi sismica è stata richiesta come elaborato integrativo del citato studio geologico, applicazione della L.R. 30.10.2008 n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico", e della DGR 2193/2015 (Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n. 112).

La presente relazione riporta gli esiti della prova sismica eseguita nell'area di studio (registrazione HVSR) e gli esiti di pericolosità sismica locale. Essendo integrazione della Relazione Geologica già elaborata, si tralasciano gli aspetti di caratterizzazione geologica e geotecnica, già ampiamente descritti nella Relazione Geologica 2016 (alla quale si rimanda).

2 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE DI RIFERIMENTO

Per la caratterizzazione geologica e geotecnica dell'area "ex Acetificio Venturi" sono state realizzate n. 6 prove **penetrometriche con punta elettrica (CPTU)**, spinte fino ad una profondità variabile da 10 metri a 20 metri dall'attuale piano campagna.

La prova penetrometrica statica con punta elettrica CPTU permette di definire con maggior dettaglio le tessiture dei sedimenti attraversati, rispetto a più tradizionali punte meccaniche. La punta utilizzata presenta le dimensioni standard europee: apertura di 60°, diametro di 35,7 mm e area di 10 cmq per la misura della pressione di rottura (Q_c), manicotto di attrito per la misurazione delle resistenze di attrito laterale (f_s) con superficie di 150 cmq, velocità di penetrazione della punta-manicotto pari a 2 cm/sec.

La speciale attrezzatura utilizzata permette l'acquisizione dei dati ogni 2 cm di avanzamento attraverso sensori di pressione elettrici. Inoltre erano attivi anche due inclinometri posti a 90°, per il controllo della deviazione delle aste dalla verticale (essenziale per prove in profondità). L'acquisizione delle informazioni è avvenuta direttamente, durante la prova, con computer portatile.

Nell'area è stato eseguito un ulteriore **sondaggio a carotaggio continuo** con trivella MORI-M21 e punta a distruzione, spinto fino a -10 metri, con prelievo di un campione indisturbato mediante campionatore semplice. La testa rotante montata su cingolato, consente di raggiungere una coppia massima pari a 350 kgm. La stratigrafia viene riportata in allegato alla Relazione

Si è prelevato un campione indisturbato di terreno alla profondità di m. 1,10 nel sondaggio n° 1 (C1), eseguendo **prove di laboratorio** (densità, umidità, porosità, prova di taglio con scatola di Casagrande).

Nella Relazione Geologica 2016 viene considerata anche un'ulteriore terebrazione profonda (**pozzo per acqua**), desunta dalla Banca dati Geognostica della RER (sigla 222150P618): si tratta di un'indagine esplorativa che ha raggiunto la profondità di circa 142 metri, tuttavia con dati stratigrafici di incerta attendibilità.

Per questo studio integrativo, nell'area di studio è stata eseguita un'ulteriore **registrazione sismica dei microtremori sismici a stazione singola (HVSr)**. In calce alla Relazione si riporta il report di acquisizione/elaborazione.

La strumentazione utilizzata è costituita dal tomografo digitale "Tromino" in grado di acquisire il microtremore e più precisamente il rumore sismico ambientale a corto periodo. Il rumore sismico è infatti presente in qualsiasi punto della superficie terrestre e consiste nelle onde prodotte dall'interferenza costruttiva delle onde P e delle onde S negli strati superficiali.

Il metodo teorico utilizzato per l'analisi tomografica è riferibile a quello dei rapporti spettrali di Nakamura o metodo HVSr. Questo si basa sullo studio dei valori medi di ampiezza tra le componenti spettrali del rumore sismico misurate sul piano verticale. Particolare attenzione viene data alla funzione orizzontale/verticale H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970), poichè rappresenta i valori medi della frequenza di vibrazione e consente in media di eliminare il ruolo delle variazioni di intensità della sorgente nel corso della registrazione. L'elaborazione delle misure di microtremore è efficace per la stima delle frequenze fondamentali di risonanza f_r del sottosuolo:

$$f_r = V_s/4 \cdot H \quad \text{con } H = \text{spessore dello strato}$$

In questo modo, le misure tomografiche forniscono un utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo ed alla preliminare valutazione della pericolosità sismica, sulla base della stima delle frequenze amplificanti caratteristiche del terreno.

Si tratta dunque di un'indagine non invasiva e l'acquisizione avviene tramite l'utilizzo di un sensore costituito da tre accelerometri, orientati in modo da ottenere il rumore sismico lungo le componenti: Nord-Sud; Est-Ovest; Alto-basso. Lo strumento consente di effettuare misure secondo tre differenti frequenze di acquisizione (128 – 256 – 512 Hz) a seconda delle finalità d'indagine e delle caratteristiche sismiche del sottosuolo. La traccia acquisita viene elaborata tramite l'utilizzo del software proprietario GrillaR che consente di effettuare preliminarmente il necessario "smoothing" (lisciamento) del segnale, poi la rappresentazione grafica dell'amplificazione H/V-f (Hz) e delle tre componenti separate, infine il modello sinottico della distribuzione delle velocità delle onde di taglio (V_s) nel sottosuolo, verificata dalla "curva sintetica" H/V-f (Hz).

Tra il dicembre 2016 e il febbraio 2017 nell'area "ex Acetificio Venturi" sono state eseguite (sempre dallo Scrivente) ulteriori indagini: 8 sondaggi "GEOPROBE"; 2 carotaggi continui con prelievo di campioni di terreno). Queste indagini (non contemplate nella presente relazione) erano finalizzate caratterizzazione ambientale preliminare dell'area "ex Acetificio Venturi" (cfr. Rel. 01.05; Rel. 01.5 INTEGR), come richiesto dagli Enti competenti per l'approvazione del progetto di riqualificazione.

La figura 2.1 riporta la localizzazione delle indagini considerate per questo studio integrativo.

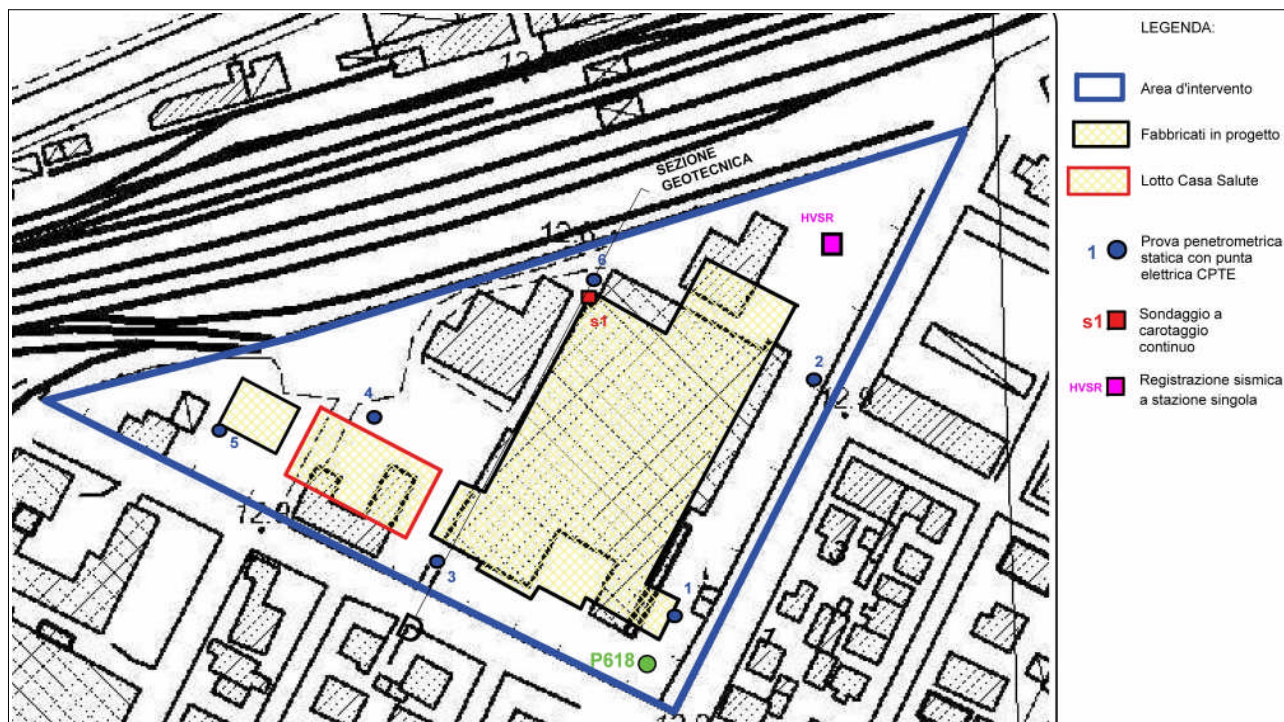


Figura 2.1 – Localizzazione delle indagini eseguite nell'area "Ex Acetificio Venturi" (fonte: Relazione Geologica a cura di G. Andreatta, maggio 2016). È riportata la localizzazione della registrazione HVSr integrativa eseguita dallo Scrivente

3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

3.1 Pericolosità sismica di base: sismicità storica e sorgenti sismogeniche

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente "attive". Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

Lo studio geologico 2016 aveva già evidenziato il contesto di pericolosità sismica in cui ricade il territorio lughese. Si intende solamente rammentare che l'area studiata ricade nella macro zona sismogenica 612, alla quale viene associata una magnitudo massima di riferimento $M_w = 6,14$ e sismicità dipendente dall'attività tettonica del fronte appenninico sepolto (dorsale ferrarese). La figura 3.1 localizza la sorgente sismogenica più prossima all'area di studio e inclusa nel Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0 (DISS Working Group, 2015 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti. Si tratta della sorgente ITCS109 "Fusignano-Villanova" alla quale è associata una $M_w = 6,0$ e legata ai terremoti del 725 (Classe-Ravenna, $M_w = 5,6$), del 1483 (Romagna Meridionale, $M_w = 5,7$), del 1570 (forlì, $M_w = 5,2$), del 1688 (Romagna, $M_w = 5,9$).

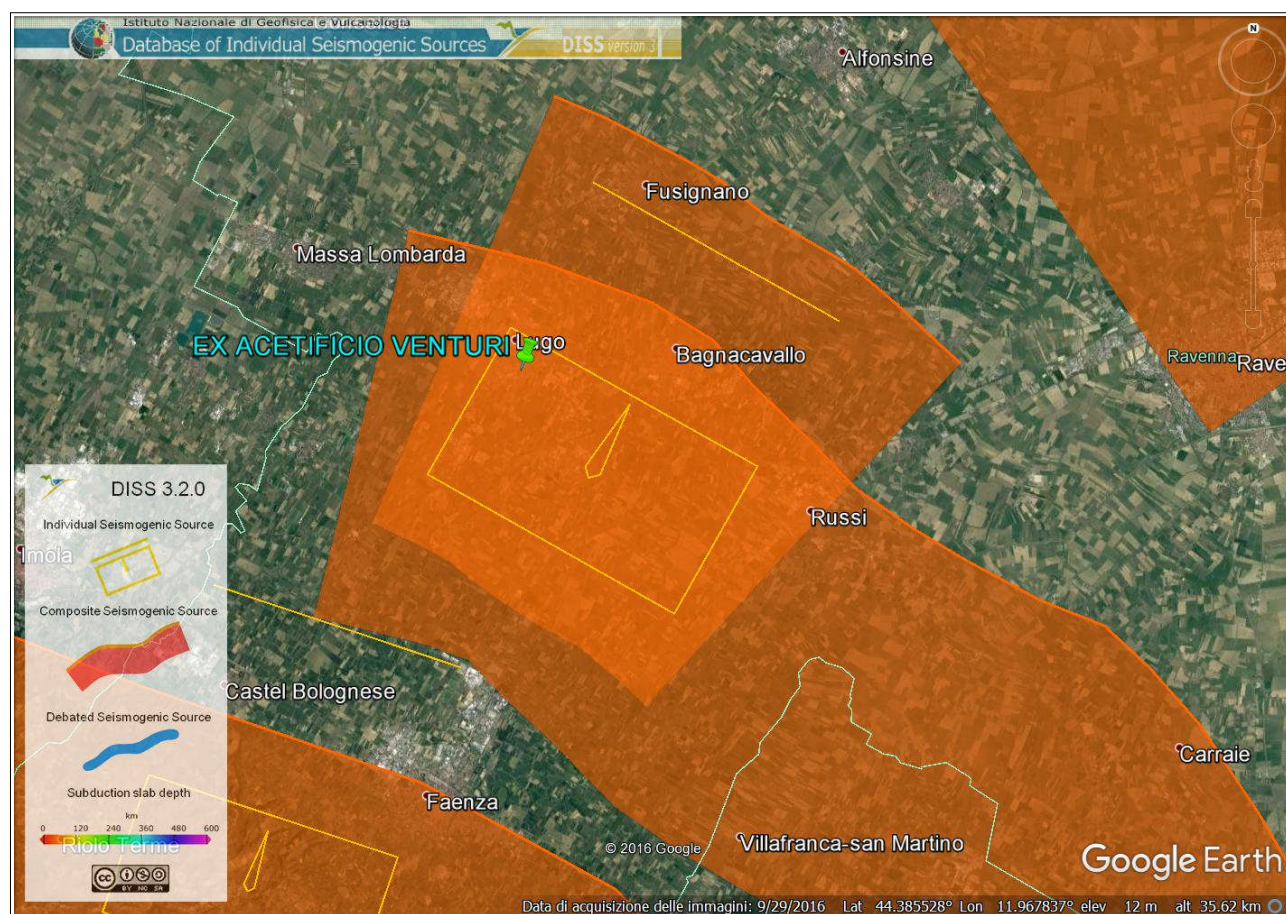


Figura 3.1 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2). Foto aerea: Google Earth

3.2 Indirizzi di riferimento per la pianificazione territoriale: DAL 112/2007 e DGR 2193/2015

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la "pericolosità di base" elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con la recente approvazione della DGR 2193/2015, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 114/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/1/2008), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine gli oltre otto anni di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 consistono:

- nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate ("livello 2");

- nella definizione di un ulteriore parametro di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner (per l'intervallo di periodo T compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- nella definizione dell'input sismico (ag al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a $0,05^\circ$, reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008. Per l'area studiata la ag al suolo rigido è da considerarsi pari $0,185g$.
- nell'obbligo di predisporre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del "primo livello" di approfondimento;
- nello stralcio dell'obbligo degli approfondimenti di "livello 3" per la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico (in quanto tali verifiche sismiche saranno espletate ai sensi delle NTC vigenti, con input di pericolosità sismica di base che dovranno tenere conto delle condizioni di progettazione "non ordinaria").

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica ai fini della pianificazione territoriale secondo i tre "livelli" di approfondimento, inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di "secondo livello").

3.3 Lo studio sismico preliminare elaborato per il PSC

Per la redazione del PSC in forma associata dell'"Unione Bassa Romagna", è stato eseguito uno studio di pericolosità sismica equivalente al primo livello di approfondimento indicato nella DAL 112/2007. Lo studio, si è basato su dati geognostici pregressi in gran parte archiviati nella Banca Dati delle indagini geognostiche della RER (penetrometrie; sondaggi; pozzi per acqua; sezioni geologiche; ecc.). È stata inoltre eseguita una campagna di registrazioni dei microtremiti sismici con tecnica HVSr per espletare analisi sull'amplificazione locale.

Lo studio di PSC ha compreso l'elaborazione di una cartografia delle "aree suscettibili di effetti locali" (scala 1:25.000) del territorio comunale, che riporta gli areali "stabili soggetti ad amplificazione" (in bianco) e le aree con criticità legate a potenziale liquefacibilità e/o cedimenti dei sedimenti in caso di sisma (in arancio). La figura 3.2 riporta uno stralcio di questa cartografia: si evince che l'area di studio ricade in zona sismica equivalente a stabile soggetta ad amplificazione: per queste zone sono richiesti ulteriori approfondimenti di livello 2 (microzonazione semplificata), ritenuti sufficienti ai fini della caratterizzazione sismica territoriale.

Occorre tuttavia precisare che è in corso un ulteriore approfondimento degli studi di microzonazione sismica dei territori urbanizzati/urbanizzabili dei Comuni dell'Unione della Bassa Romagna, che consentirà di elaborare una cartografia di livello 2 (fattori di amplificazione locali) con locali approfondimenti di livello 3 conforme ai contenuti della DGR 2193/2015. Questo ulteriore studio territoriale (comprese le nuove indagini effettuate nel territorio investigato) non risulta ancora validato dagli Enti competenti e pertanto non risulta ancora disponibile.

Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area dell'"ex Acetificio Venturi" consentono tuttavia di espletare gli approfondimenti richiesti dalla recente DGR 2193/2015, fornendo, di fatto un'analisi di microzonazione sismica più approfondita e aggiornata rispetto allo studio sismico preliminare del PSC associato.

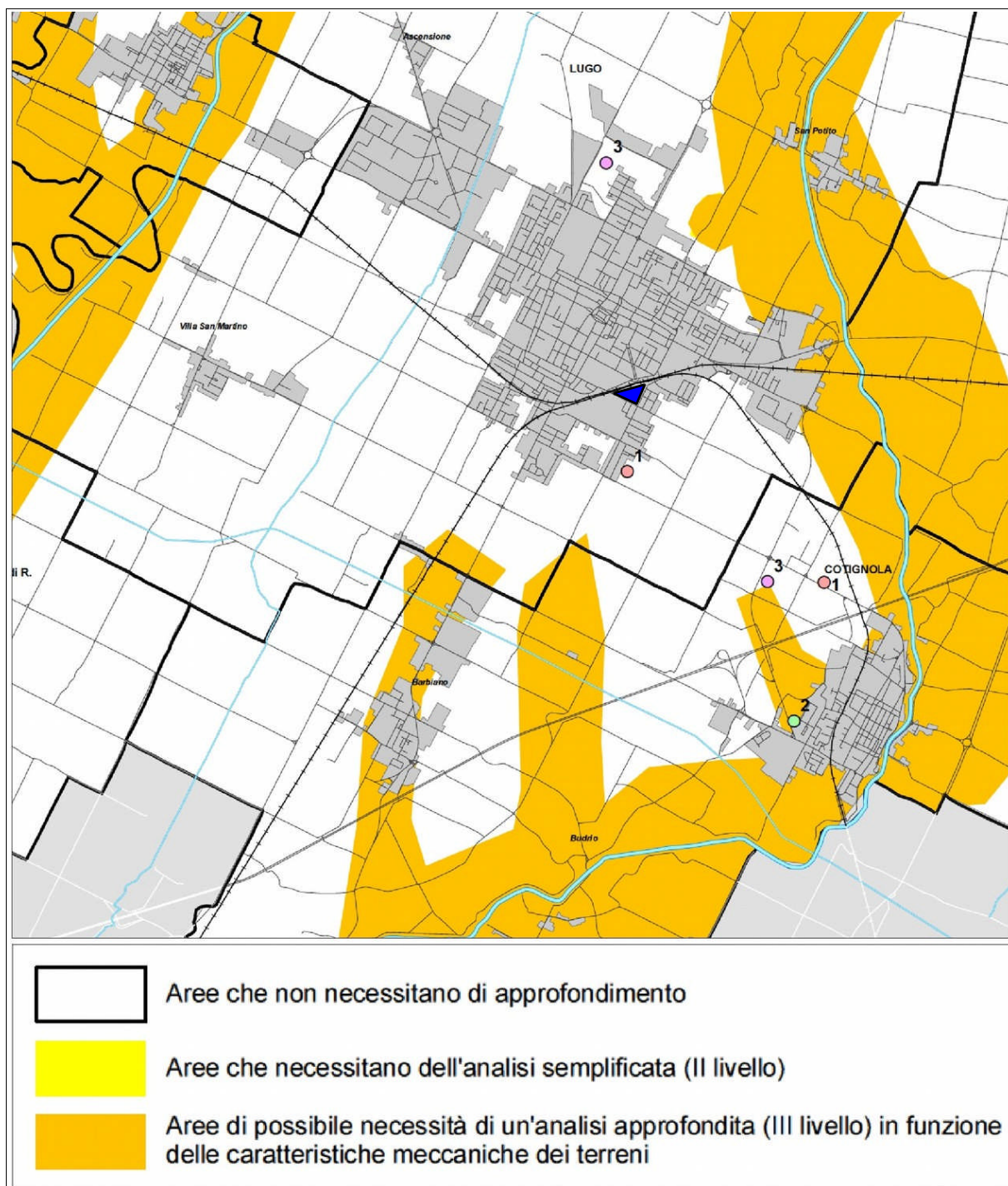


Figura 3.2 – Stralcio della "Carta delle Aree Suscettibili di Effetti Locali" (scala 1:25.000) elaborata per lo studio sismico del PSC dei Comuni dell'Unione della Bassa Romagna. l'area di studio è evidenziata con il poligono blu

3.4 Gli ulteriori approfondimenti sismici nell'area "ex Acetificio Venturi" effettuati ai sensi della DGR 2193/2015

Come già scritto, le indagini disponibili nell'area di studio (penetrometrie CPTe; sondaggi; registrazione HVSR; ecc.) consentono di elaborare gli ulteriori approfondimenti sismici richiesti ai sensi della DGR 2193/2015, relativamente alla risposta sismica locale (microzonazione sismica) e all'analisi della suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti in caso di sisma.

Si precisa che lo studio geologico 2016 aveva già espletato verifiche della liquefacibilità in coerenza con le NTC 2008, escludendone la possibilità di innesco. Tuttavia, i parametri di verifica considerati non risultano conformi con quanto richiesto dalla DGR 2193/2015: per questo motivo sono state rieseguite le elaborazioni di liquefacibilità sulla base degli esiti delle prove CPTe.

3.4.1 Microzonazione sismica semplificata (fattori di amplificazione)

La DGR 2193/2015 permette di quantificare la risposta sismica locale (amplificazione) mediante la classificazione del territorio regionale in macro contesti e la definizione di alcuni fondamentali parametri: la stima degli spessori delle coperture sedimentarie in grado di amplificare/modificare il moto sismico e il loro grado di rigidezza (in termini di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s). Ciò detto, il territorio di Lugo è facilmente ascrivibile al macrocontesto di "Pianura 2" (settore di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di un'importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto d'impedenza a circa 100 m dal p.c. dal tetto del substrato rigido a circa 150 m dal p.c.), come desunto dal modello geologico profondo (cfr. Relazione Geologica 2016).

In tal senso, la registrazione sismica eseguita nell'area di studio (NVSR1) ha evidenziato massime amplificazioni spettrali, seppur moderate ($H/V < 2$), a frequenze comprese tra 0,9 Hz e circa 1 Hz (figura 3.3), associabili a riflettori sismici collocati a profondità comprese tra 150 m e 100 m.

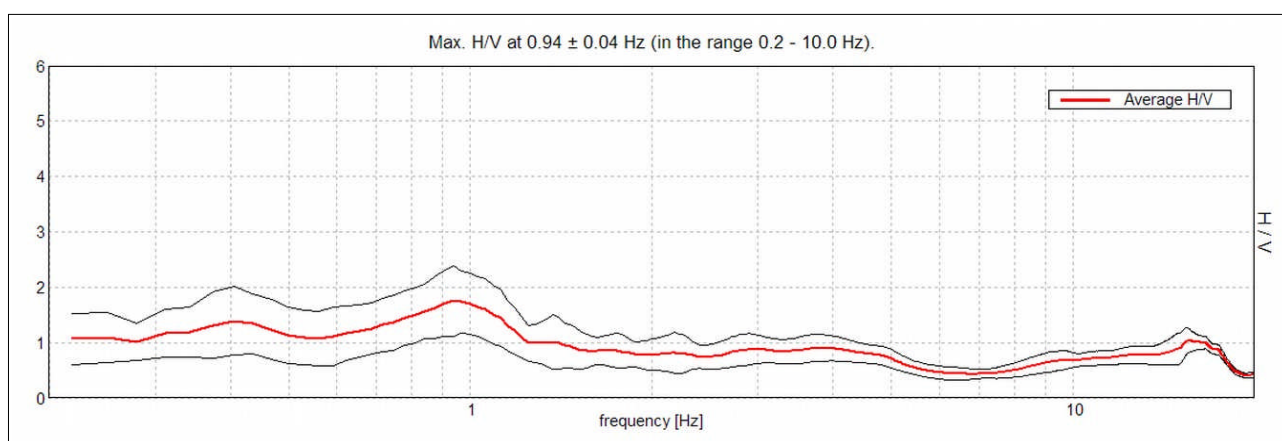


Figura 3.3 – Spettro H/V ricavato dalla registrazione sismica passiva con tromografo digitale

La prova HVSR ha inoltre consentito l'elaborazione di un modello sismostratigrafico del sottosuolo, basato sui dati geognostici disponibili. È così possibile stimare una V_s equivalente pari a 215 m/s (figura 3.4).

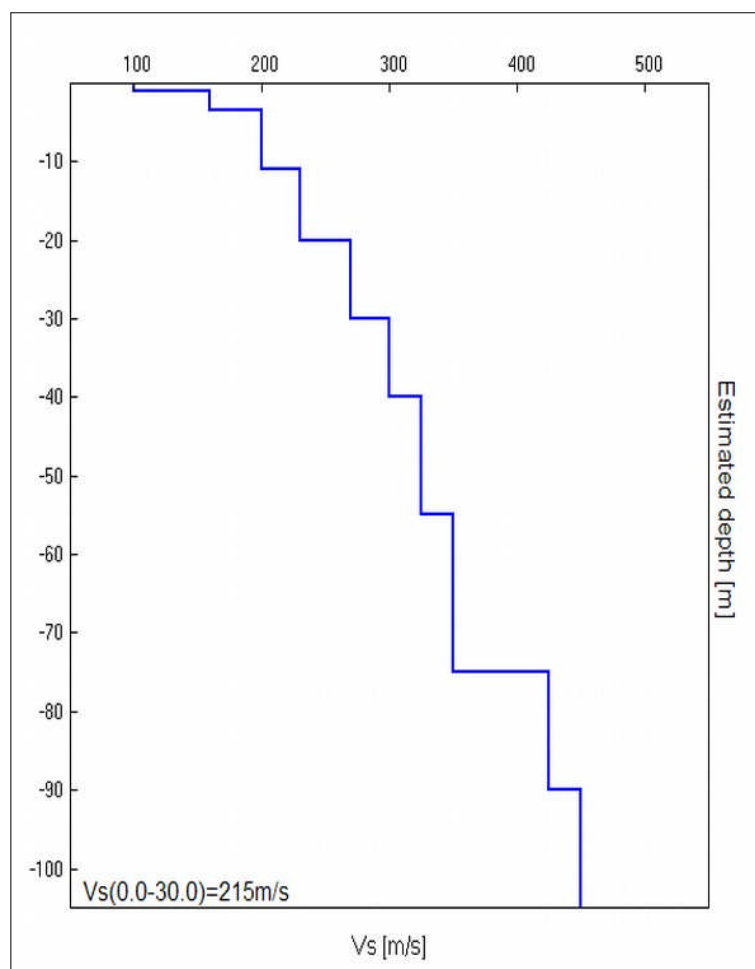


Figura 3.4 – Modello sismostratigrafico del sottosuolo meno profondo e distribuzione delle Vs ricavate con tromografo digitale

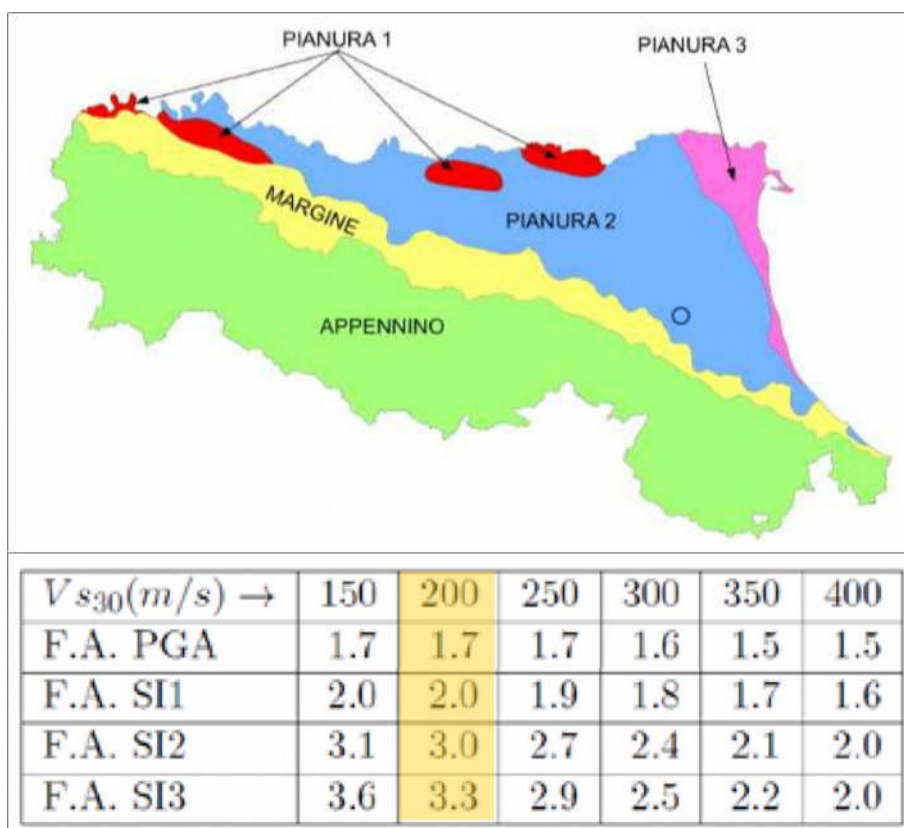


Figura 3.5 – In alto: scomposizione schematica del territorio regionale relativa ai macrocontesti geologico sismici di riferimento per gli studi di MZS di livello. In basso: abaco dei parametri di RSL semplificata (DGR 2193/2015, all. A2) riferito al macro contesto "Pianura 2"

La seguente figura riporta, infine, i parametri di RSL semplificata (livello 2) estrapolabili a tutto il Comparto studiato.

I fattori di amplificazione riportati nella DGR 2193/2015 sono i seguenti:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito (PGA/PGA_0). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SI - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si sono determinati i fattori di amplificazione per i tre intervalli di periodo: FA_{0,1-0,5s}, FA_{0,5-1,0s}, FA_{0,5-1,5s}.

3.4.2 Verifiche quantitative della liquefacibilità

Come già scritto, lo studio geologico elaborato per l'"ex Acetificio Venturi" (dr. geol. G. Andreatta) aveva verificato già le condizioni di suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti, escludendone di fatto la possibilità di innesco. Occorre tuttavia precisare che tali valutazioni si basano su elementi probabilistici assunti in riferimento alla pericolosità di sito e alle caratteristiche prestazionali del progetto.

Si è quindi proceduto a una ulteriore rielaborazione delle verifiche di liquefacibilità seguendo i criteri indicati nella DGR 2198/2015 e basandoci anche in questo caso agli esiti delle prove CPT. Il vantaggio dell'uso di tali prove, è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità rispetto ad altre indagini, nella relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità, con informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

Gli esiti delle prove CPT sono stati utilizzati per la stima del rischio di liquefazione, procedendo secondo le seguenti fasi:

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

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

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

con:

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

tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità);

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

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

K_σ = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor)

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

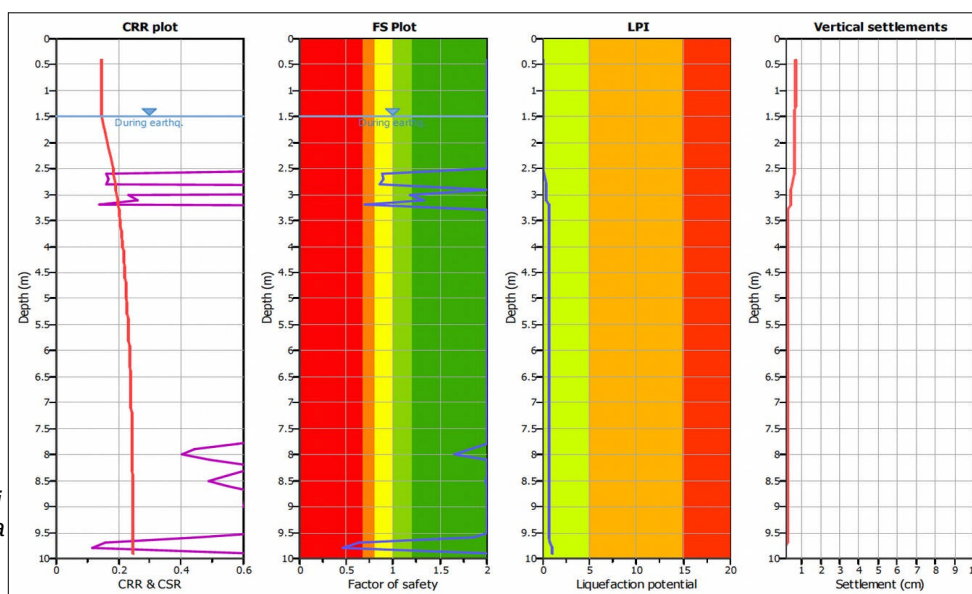
Il valore di FSL è stato calcolato con il noto software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL. Per questo lavoro, si è considerato il metodo di calcolo di P.K. Robertson (2009), ritenuto sufficientemente preciso rispetto ad altri metodi empirici. Per la descrizione dettagliata del metodo si rimanda alla letteratura scientifica originaria.

Ciò detto, nel calcolo di FSL si sono considerate le seguenti condizioni di input:

- si è utilizzata la a_{max} al suolo ottenuta dalla microzonazione sismica semplificata (cfr. paragrafo 3.4.1) e cioè $a_{max} = 0,185g \times 1,7 = 0,31g$;
- sulla base del contesto idrogeologico locale si è considerata una soggiacenza (cautelativa) della falda in condizioni di sisma pari a 1,5 metri;
- sulla base della pericolosità sismica di base, si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ come da zonizzazione macrosismica "ZS9" (vedi capitolo 5). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per il metodo di calcolo utilizzato.

Le simulazioni hanno evidenziato pochi livelli liquefacibili, confermando le valutazioni già riportate nello studio geologico del dr. Geol. Andreatta redatto nel dicembre 2016 (figura 3.6).

Figura 3.6 – Plottaggio degli
verifiche di liquefazione della
prova CPTE4



La simulazione consente anche la verifica dei cedimenti post sisma e in particolare nei sedimenti saturi a comportamento granulare, mediante il calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). i cedimenti cumulativi post sisma sono risultati trascurabili.

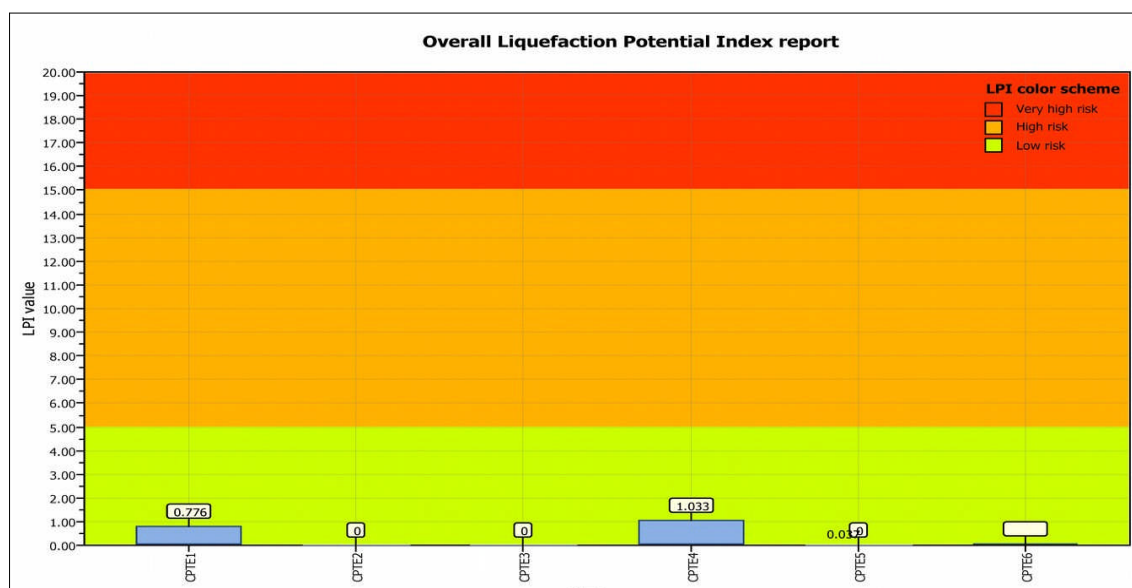
Il rischio di liquefazione è infine valutato mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982). L'Indice di Potenziale Liquefazione si calcola per una profondità "critica" fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

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

[con: $W(z)$ fattore di peso della profondità $=10^{-0.5z}$; F_1 variabile $=1-FSL$ (per $FSL < 1.2$) oppure $F_1 = 0$ per $FSL > 1.2$; z = profondità dello strato considerato]

Gli esiti ricavati sono dunque da scriversi alla classe di rischio "nullo" ($LPI < 2$) come evidenziato nella figura 3.7 riepilogativa. Si precisa che le prove hanno raggiunto profondità minori di 20 metri (tranne una), tuttavia è evidente che il maggiore contributo alla definizione del "rischio" è da attribuirsi ai sedimenti meno profondi e con possibilità di interazione delle fondazioni. Si evidenzia che dalla prova CPTE6, profonda 20 metri si ricava un LPI pari a "nullo" (0,04).

Figura 7.11
– Confronto
delle stime
di LPI
calcolate
sulla base
degli esiti di
RSL per
l'analisi
SLV (p_{ga}
 $=0,26g$; M
 $=6,14$)



4 CONCLUSIONI

Le analisi di pericolosità sismica espletate ai sensi della DGR 2193/2015 hanno consentito la stima dei fattori di amplificazione ritenuti rappresentativi per tutta l'area di interesse ("ex Acetificio Venturi"). Il calcolo si è basato sul metodo semplificato (uso degli abachi, alleg.A2) e i fattori di amplificazione sono risultati i seguenti:

FA Pga =1,7

FA SI1 =2,0

FA SI2 =3,0

FA SI3 =3,3

La massima accelerazione al suolo (PGA) di riferimento per la DGR 2193/2015 risulta pertanto pari a: $PGA = 0,185g \times 1,7 = 0,31g$

Lo studio sismico ha rielaborato le verifiche di liquefacibilità, considerando input piuttosto cautelativi ($PGA = 0,31g$; Magnitudo =6.14), ricavando in "rischio" di liquefazione "nullo" ($LPI < 2$).

Visti gli esiti di liquefazione nulli, non è stato necessario procedere con ulteriori modelli numerici di risposta sismica locale.

In calce alla relazione si riportano il report della registrazione sismica HVSR eseguita nell'area di studio e il report delle verifiche di liquefacibilità.

Elaborazione:

dr. geol. Samuel Sangiorgi



LUGO, AREA "EX ACETIFICIO VENTURI" HVSR1

Instrument: TRZ-0108/01-10

Start recording: 28/02/17 09:49:47 End recording: 28/02/17 10:09:48

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Trace length: 0h20'00". Analyzed 77% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

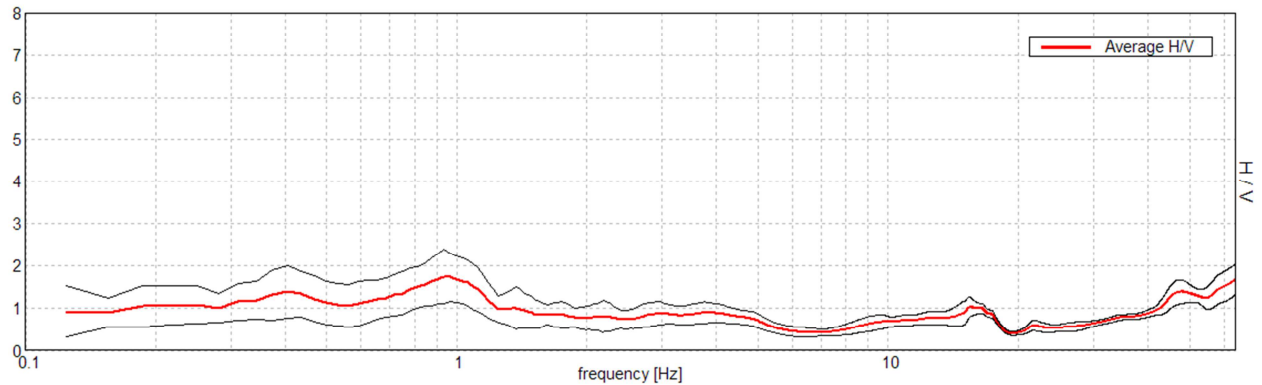
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

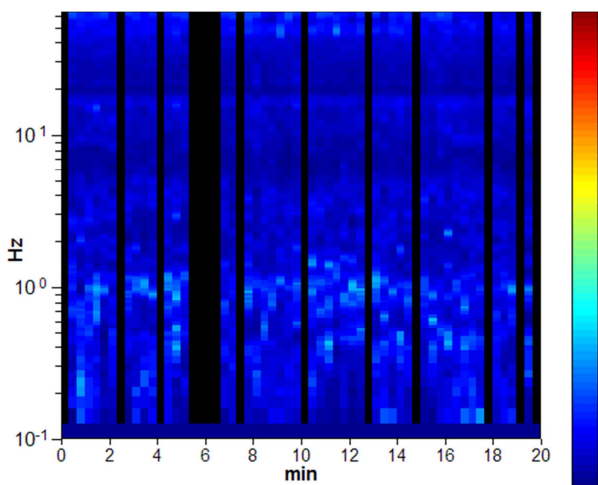
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

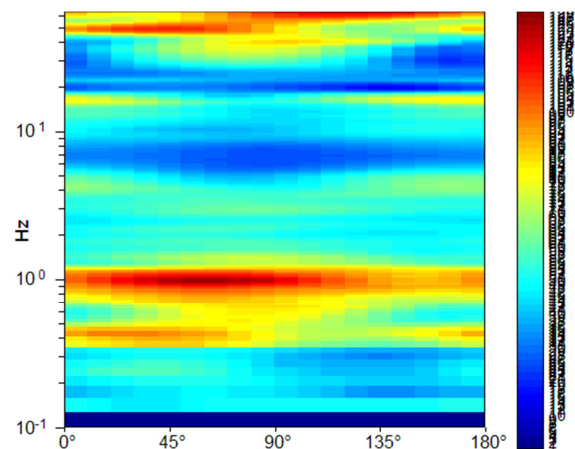
Max. H/V at 0.94 ± 0.04 Hz (in the range 0.2 - 10.0 Hz).



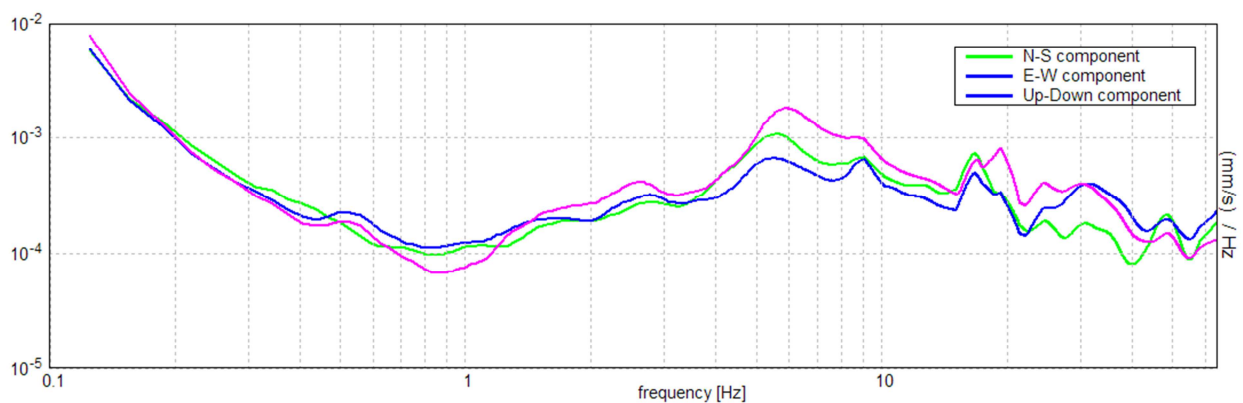
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V

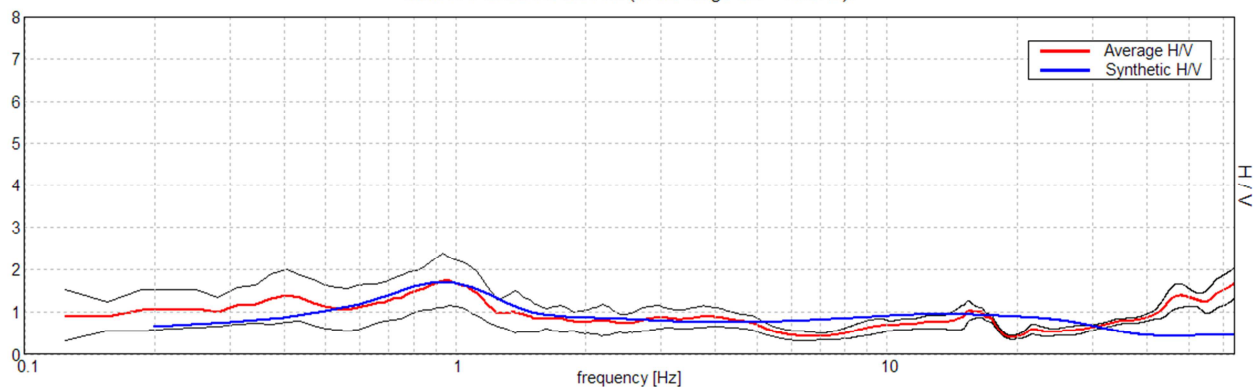


SINGLE COMPONENT SPECTRA



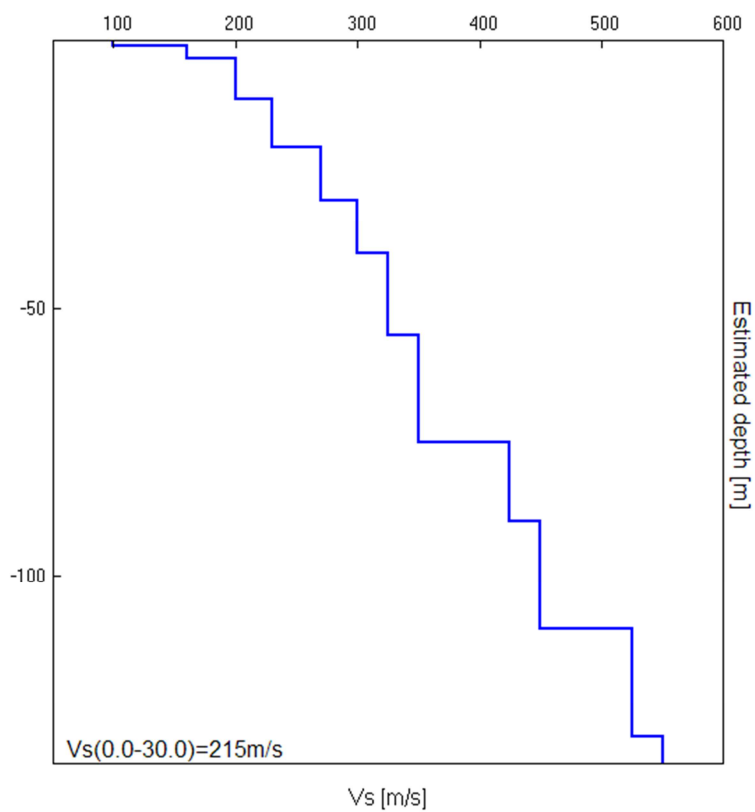
EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V

Max. H/V at 0.94 ± 0.04 Hz (in the range 0.2 - 10.0 Hz).



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
1.00	1.00	100	0.35
3.50	2.50	160	0.30
11.00	7.50	200	0.30
20.00	9.00	230	0.30
30.00	10.00	270	0.30
40.00	10.00	300	0.30
55.00	15.00	325	0.30
75.00	20.00	350	0.30
90.00	15.00	425	0.25
110.00	20.00	450	0.25
130.00	20.00	525	0.25
inf.	inf.	550	0.25

$V_s(0.0-30.0)=215\text{m/s}$



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

Max. H/V at 0.94 ± 0.04 Hz (in the range 0.2 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.94 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$862.5 > 200$	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 46 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.531 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$1.76 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01875 < 0.14063$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.312 < 2.0$	OK	

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

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

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

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

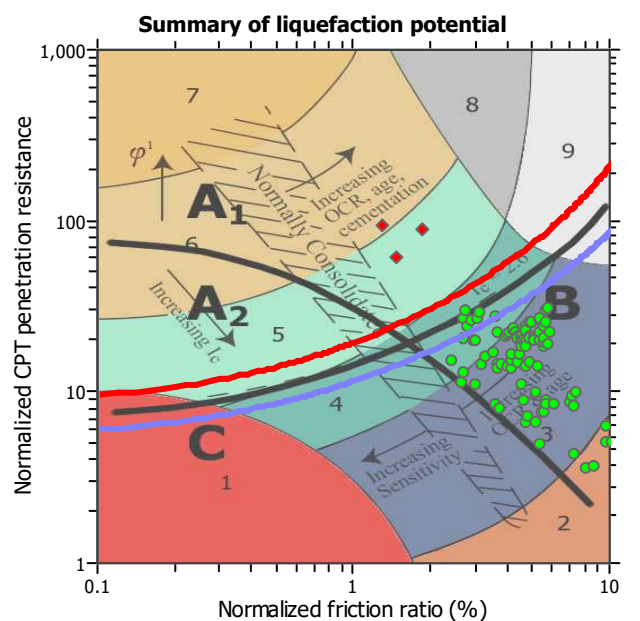
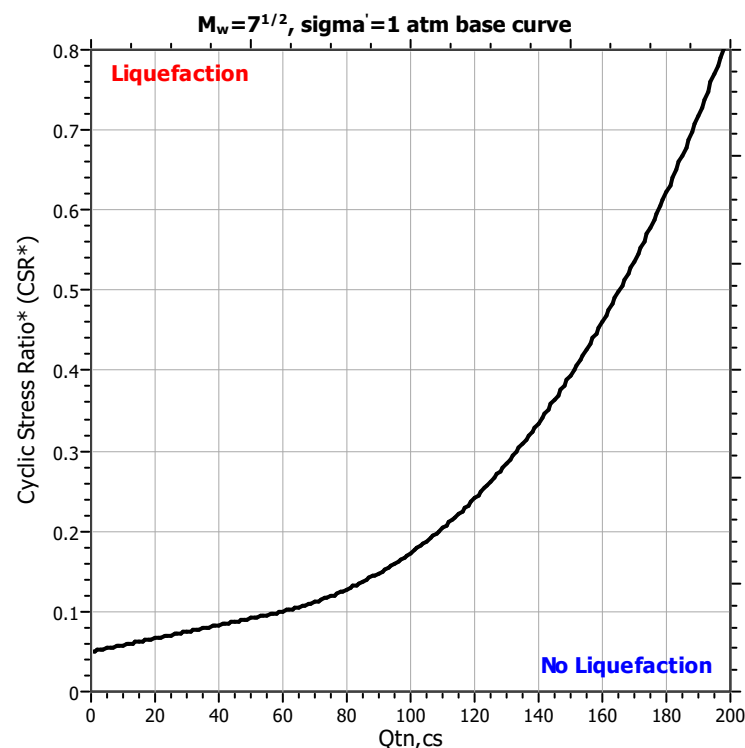
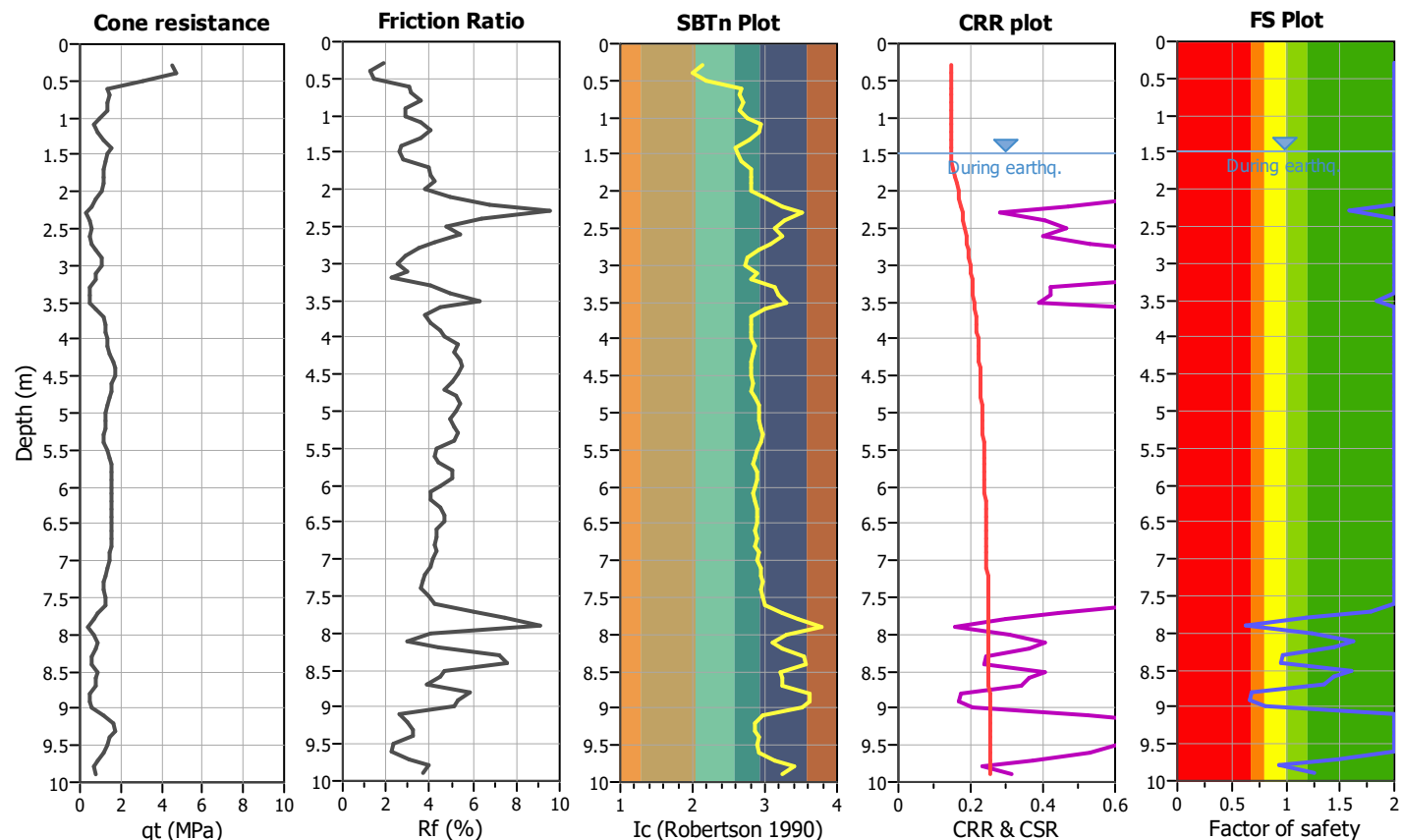
Project title :

Location :

CPT file : CPTE1

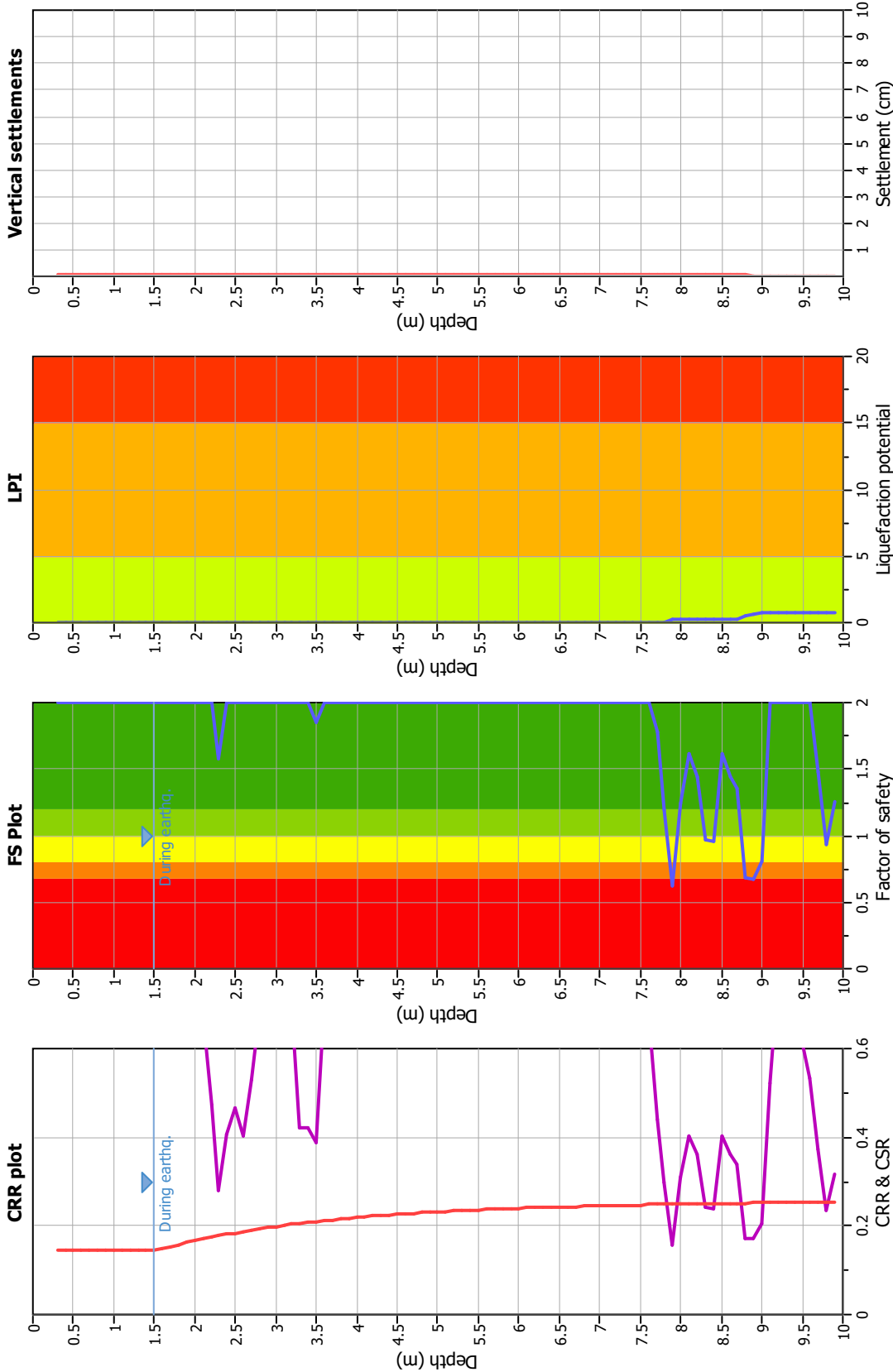
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on I_c value
Earthquake magnitude M_w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.31
Depth to water table (insitu):	2.00 m

Depth to water table (earthq.):	1.50 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_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

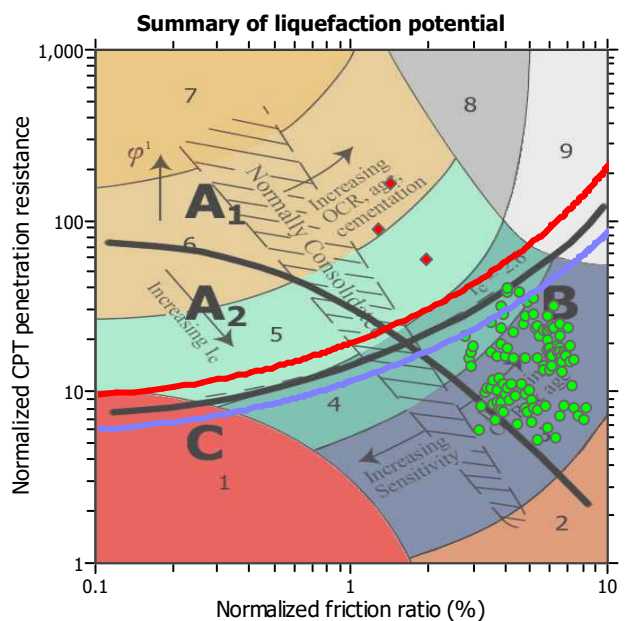
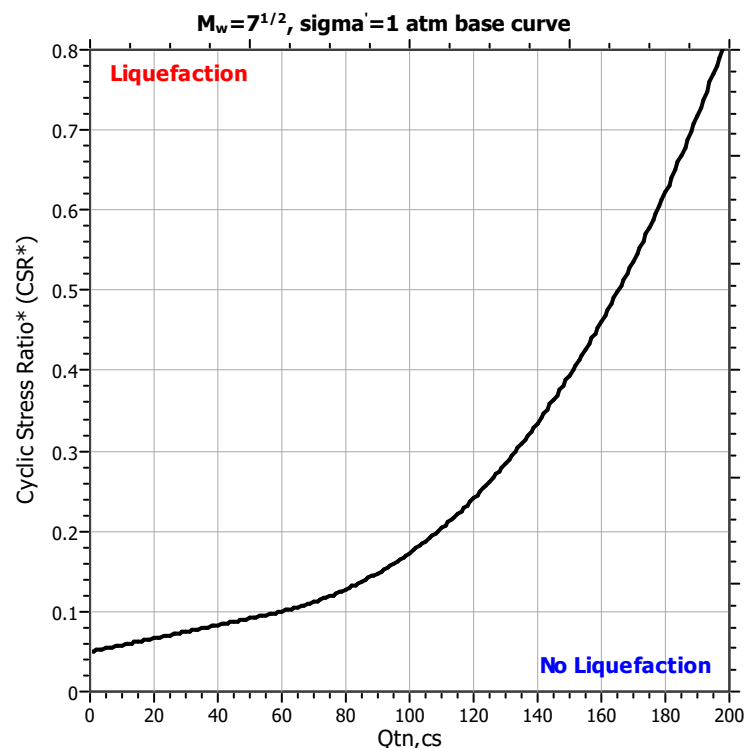
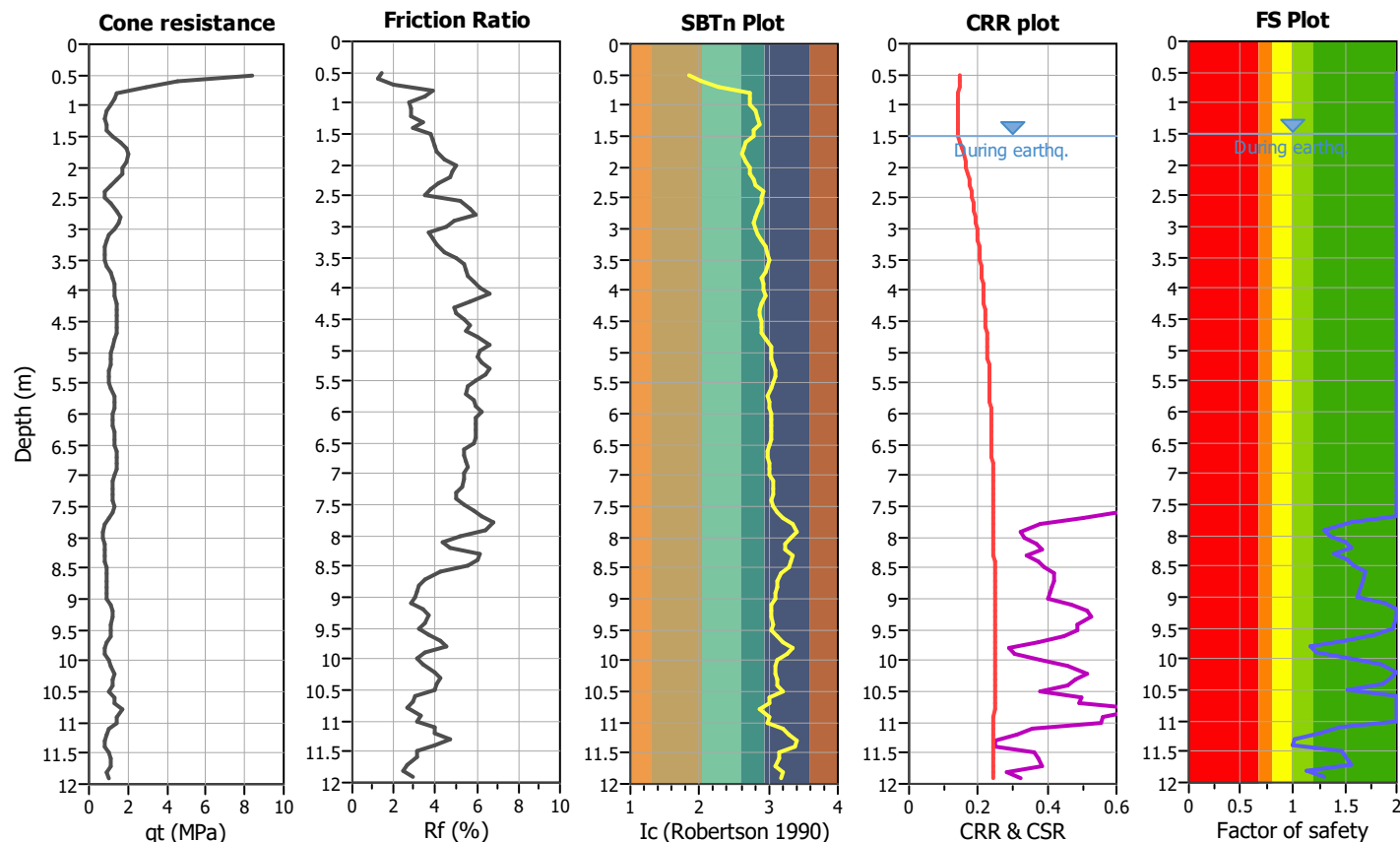
Project title :

Location :

CPT file : CPTE2

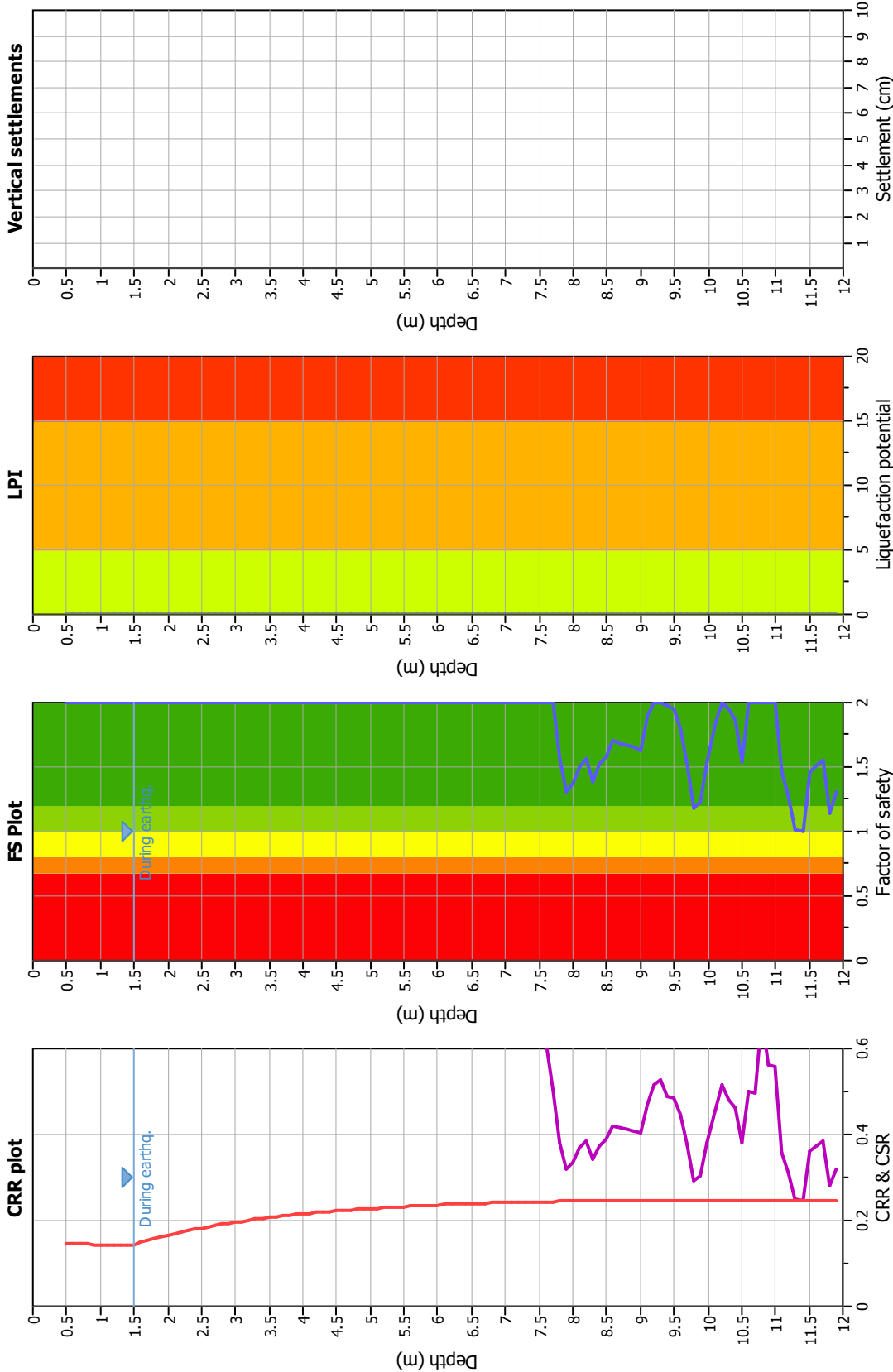
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on Ic value
Earthquake magnitude M_w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.31
Depth to water table (insitu):	2.00 m

Depth to water table (earthq.):	1.50 m
Average results interval:	3
Ic cut-off value:	2.60
Unit weight calculation:	Based on SBT
Use fill:	No
Fill height:	N/A

Fill weight:	N/A
Transition detect:	No
K_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

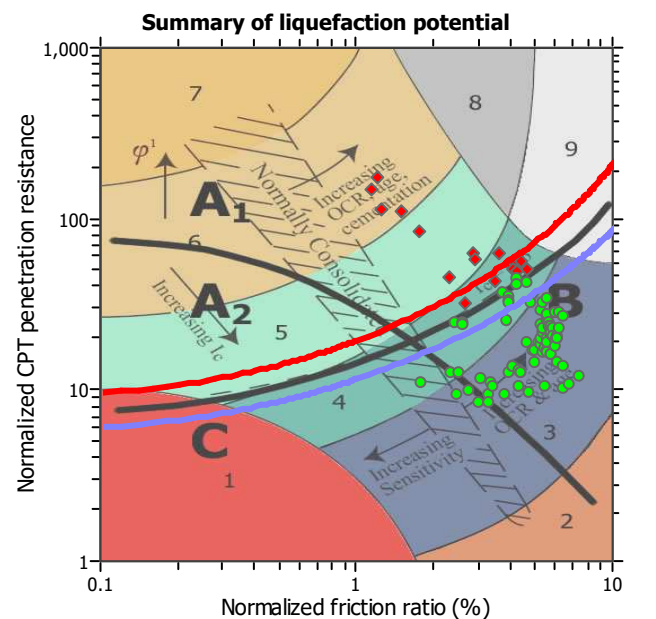
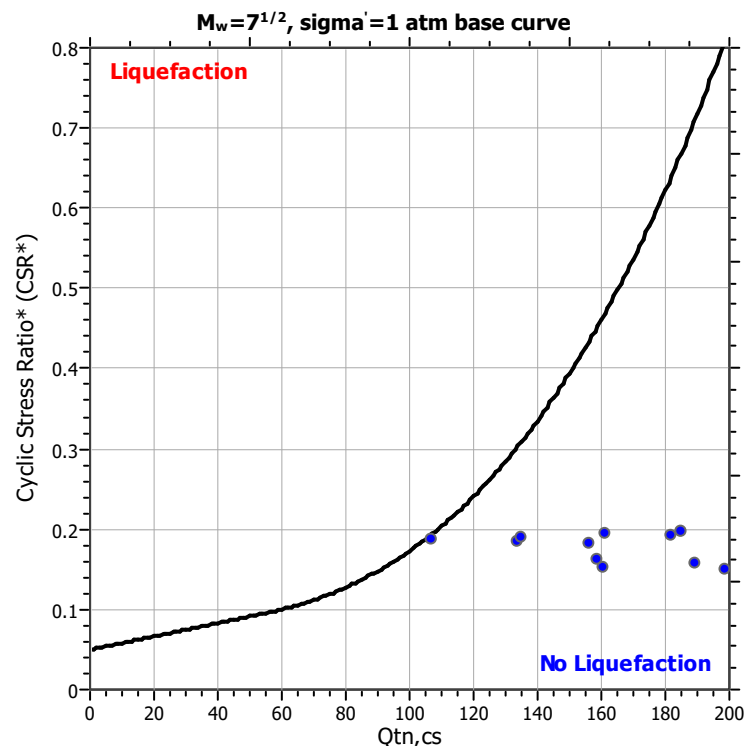
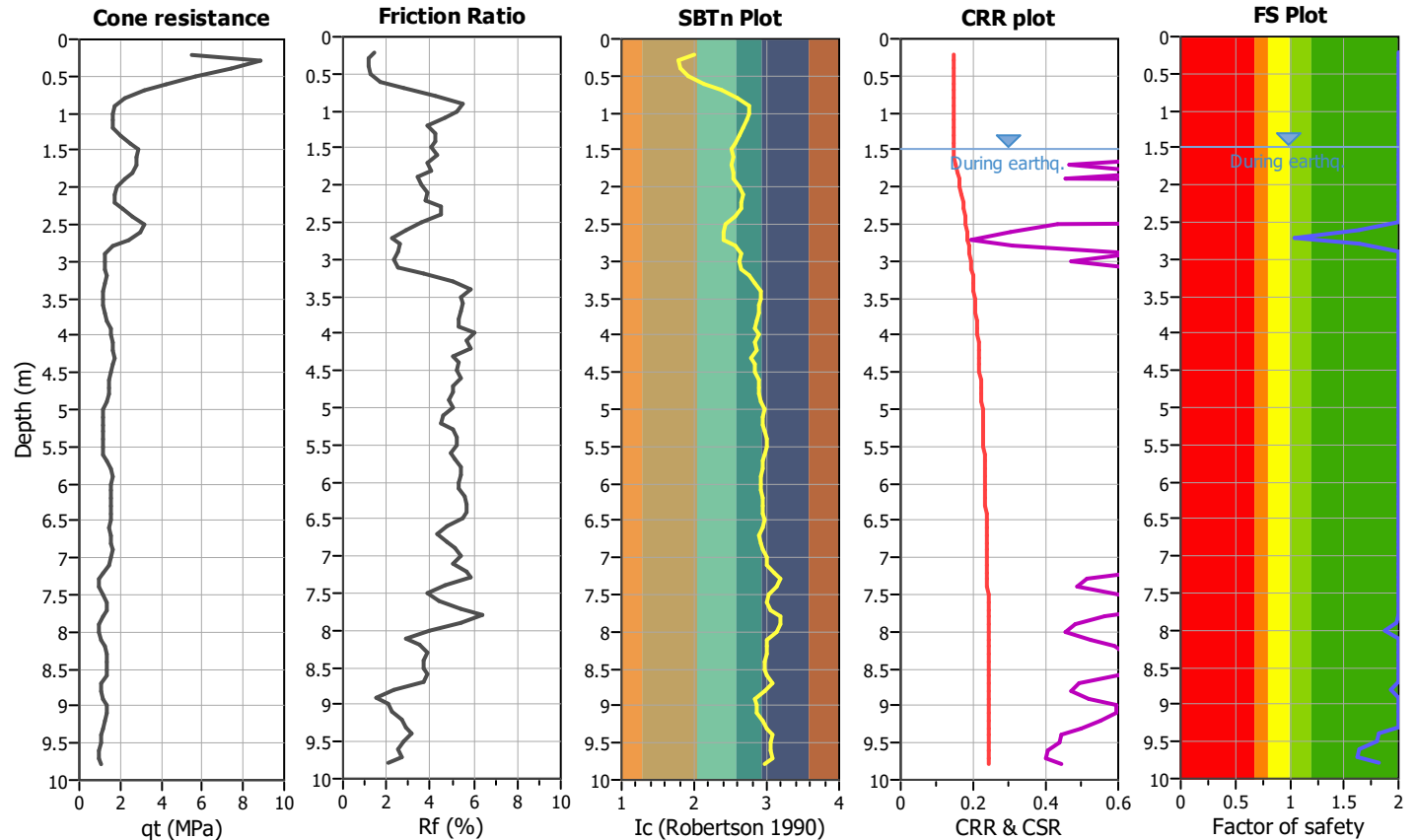
Project title :

Location :

CPT file : CPTe3

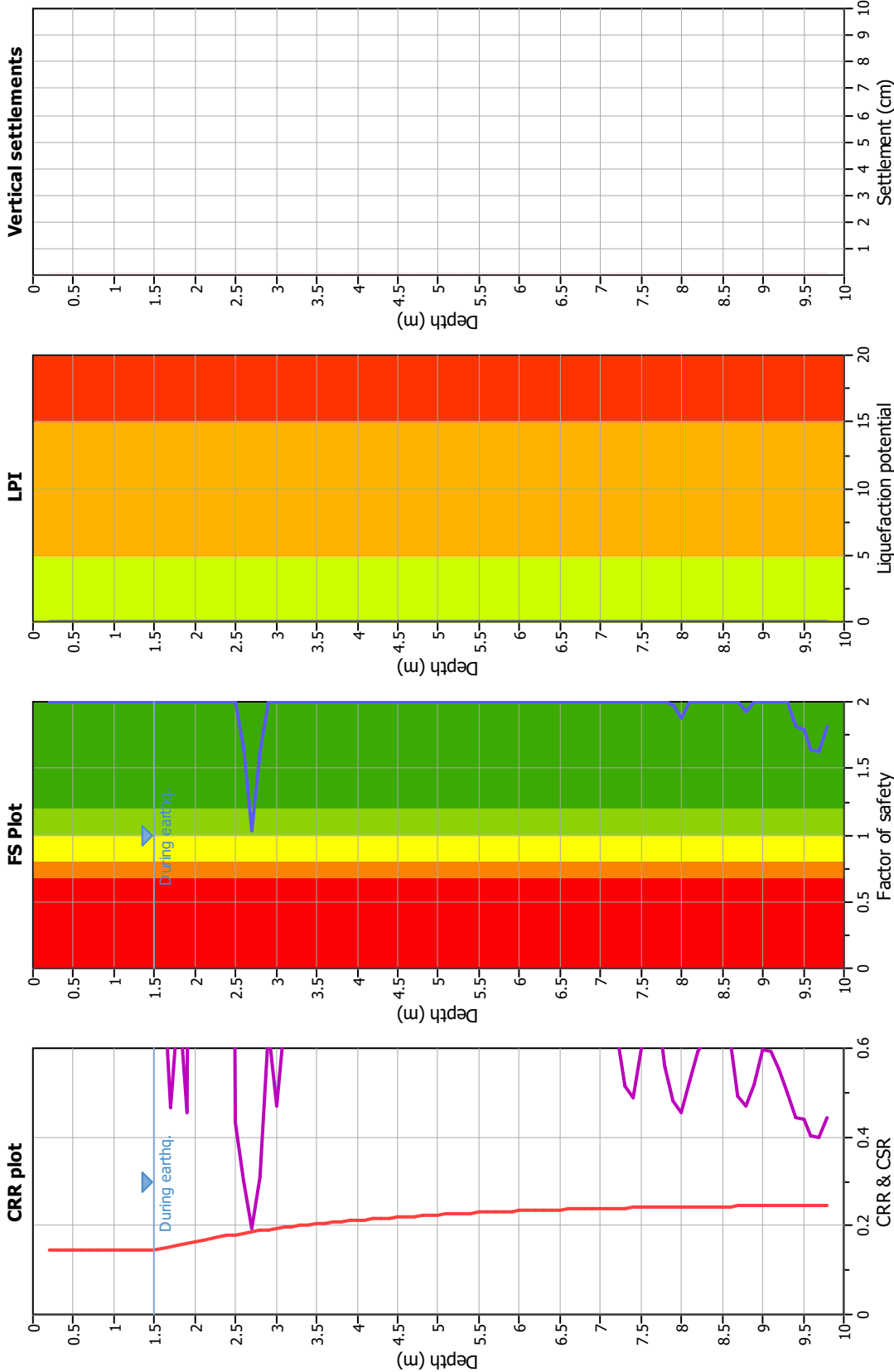
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on Ic value
Earthquake magnitude M_w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.31
Depth to water table (insitu):	2.00 m

Depth to water table (earthq.):	1.50 m
Average results interval:	3
Ic cut-off value:	2.60
Unit weight calculation:	Based on SBT
Use fill:	No
Fill height:	N/A

Fill weight:	N/A
Transition detect:	No
K_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

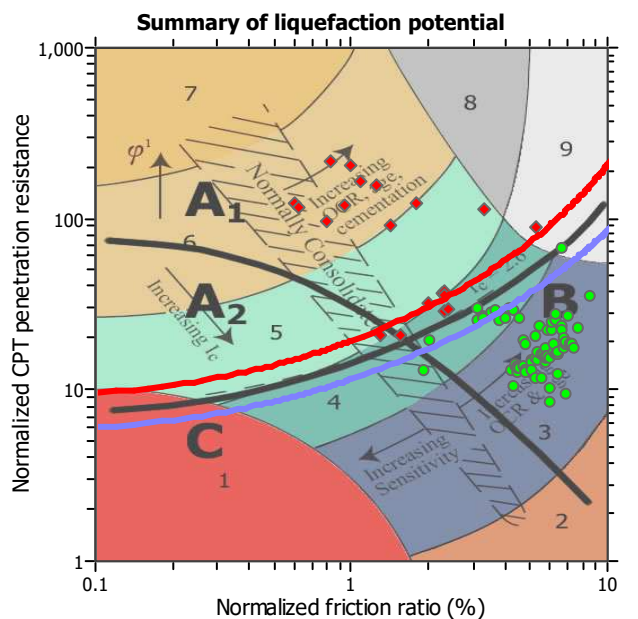
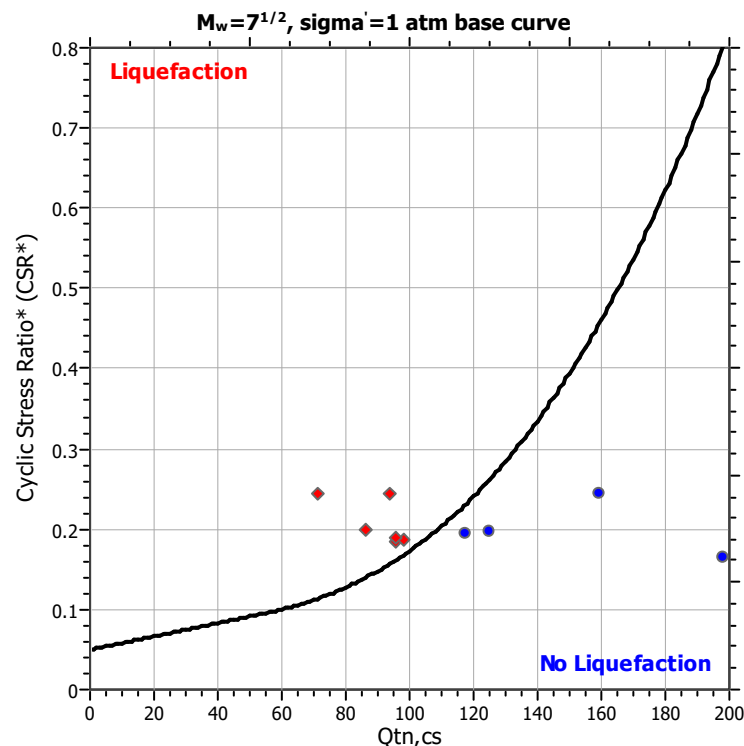
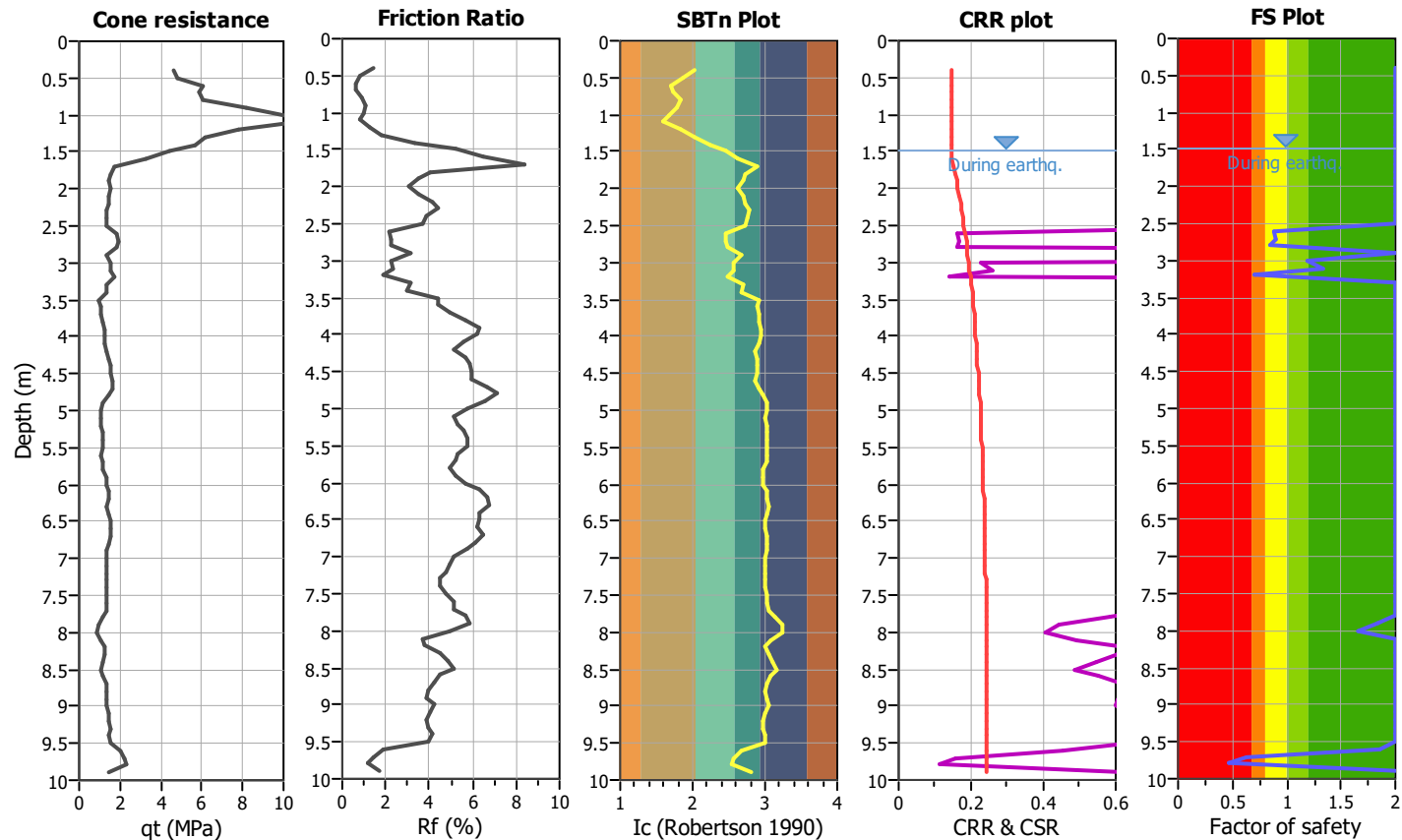
Project title :

Location :

CPT file : CPTE4

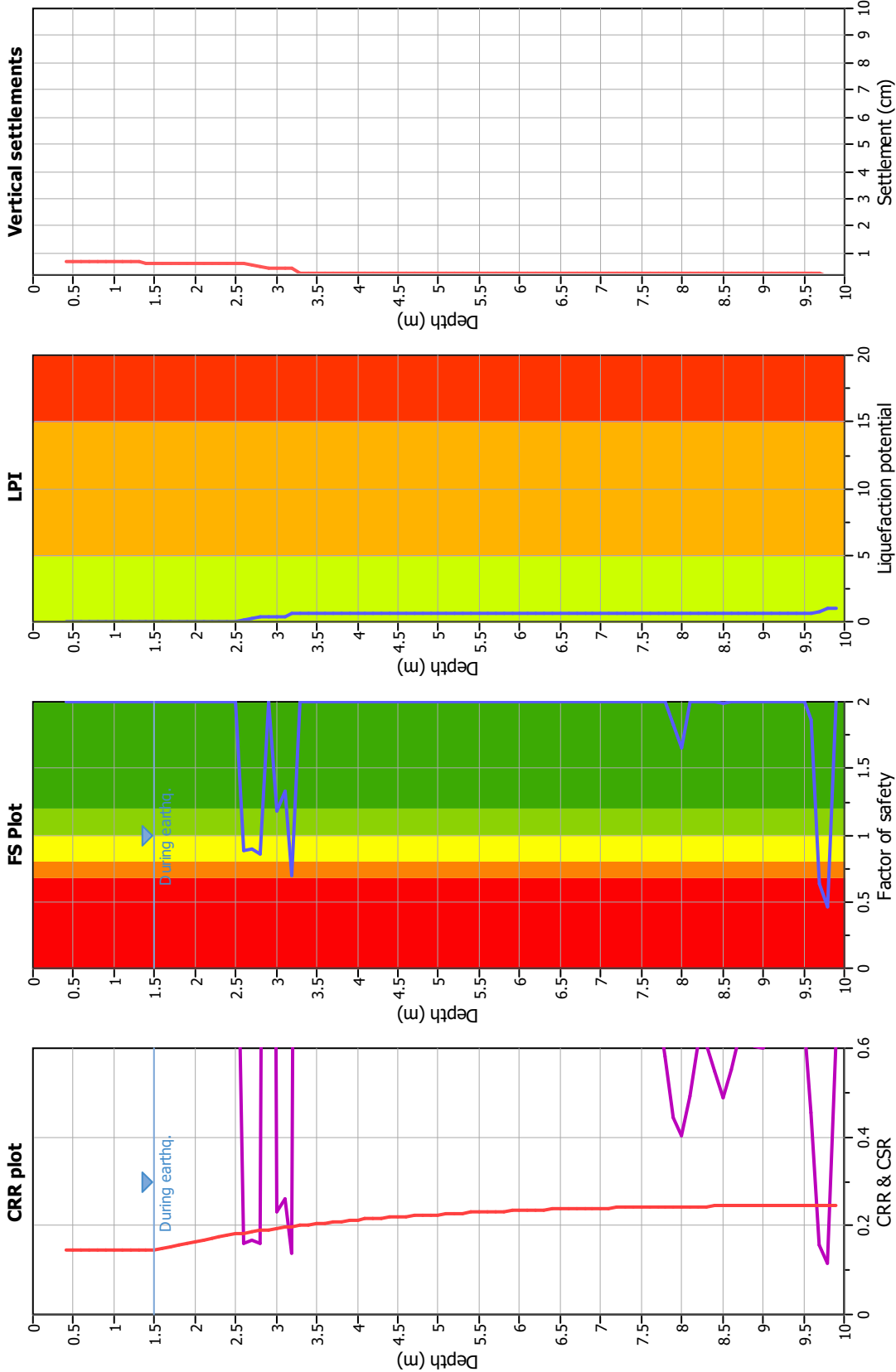
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on Ic value
Earthquake magnitude M_w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.31
Depth to water table (insitu):	2.00 m

Depth to water table (earthq.):	1.50 m
Average results interval:	3
Ic cut-off value:	2.60
Unit weight calculation:	Based on SBT
Use fill:	No
Fill height:	N/A

Fill weight:	N/A
Transition detect:	No
K_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

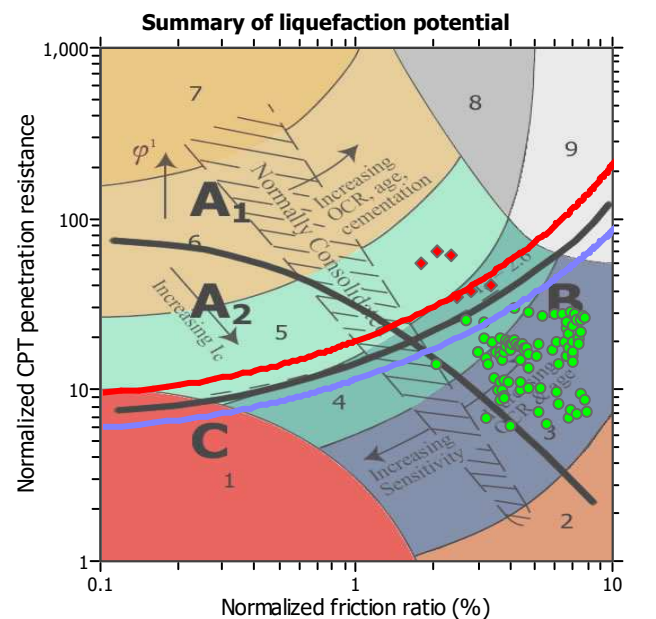
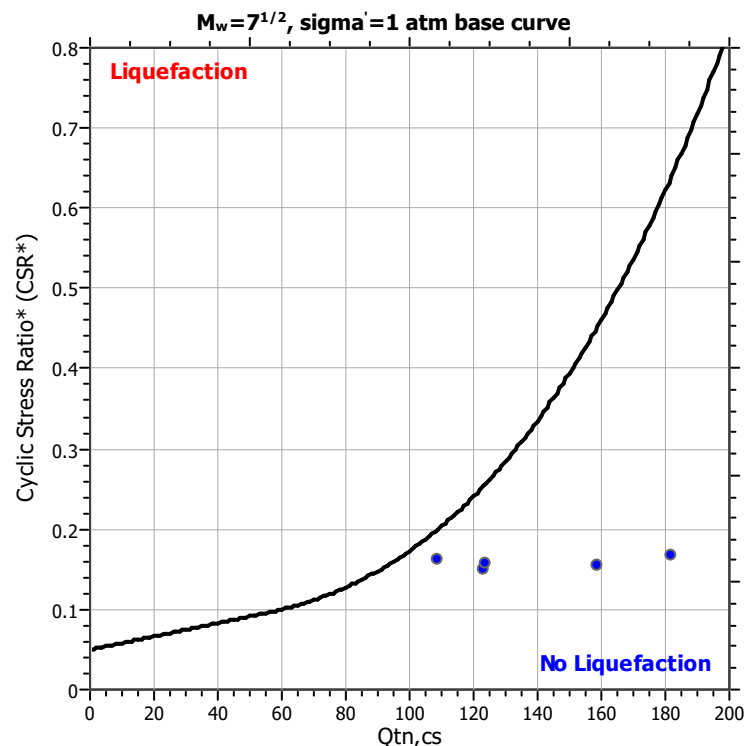
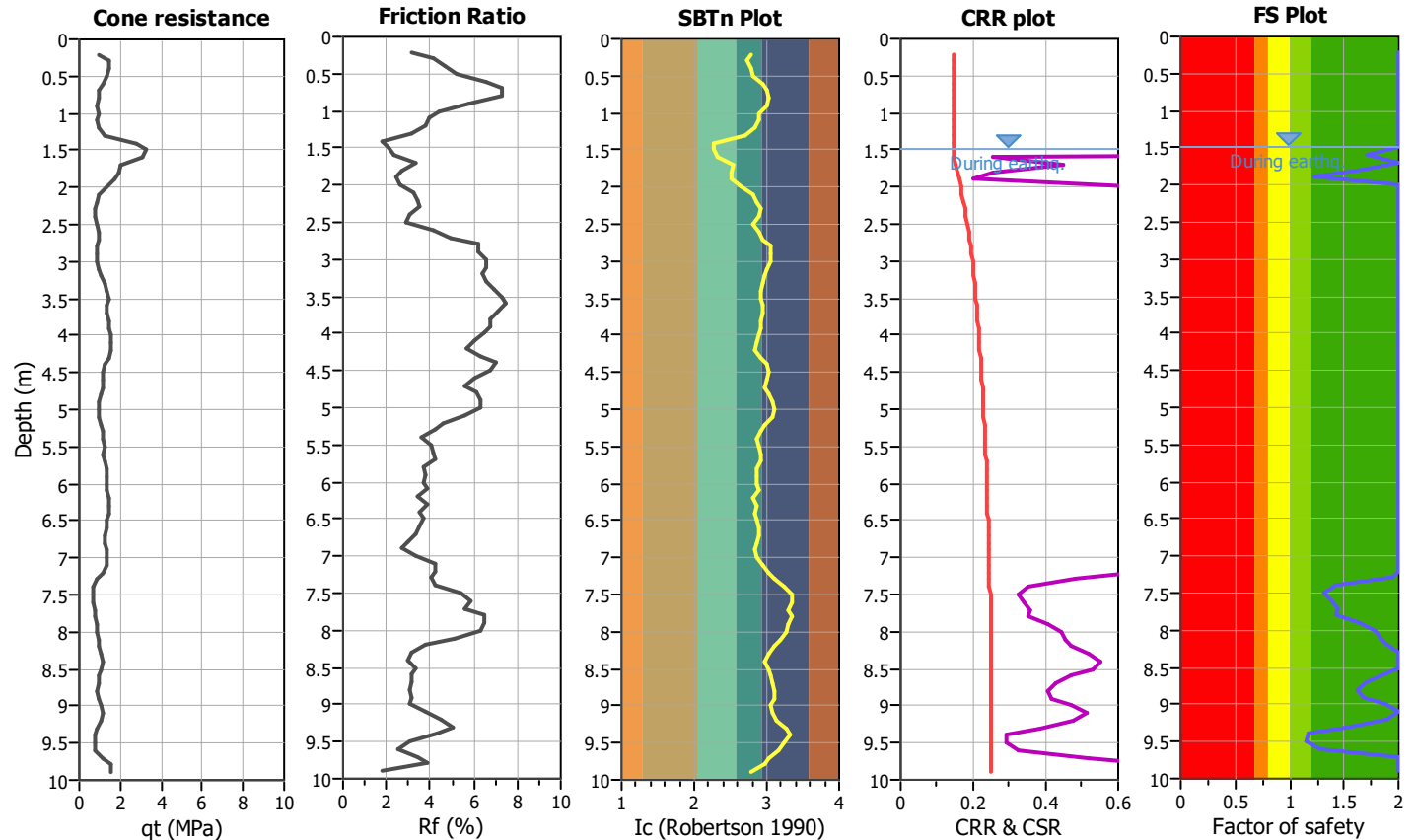
Project title :

Location :

CPT file : CPT E5

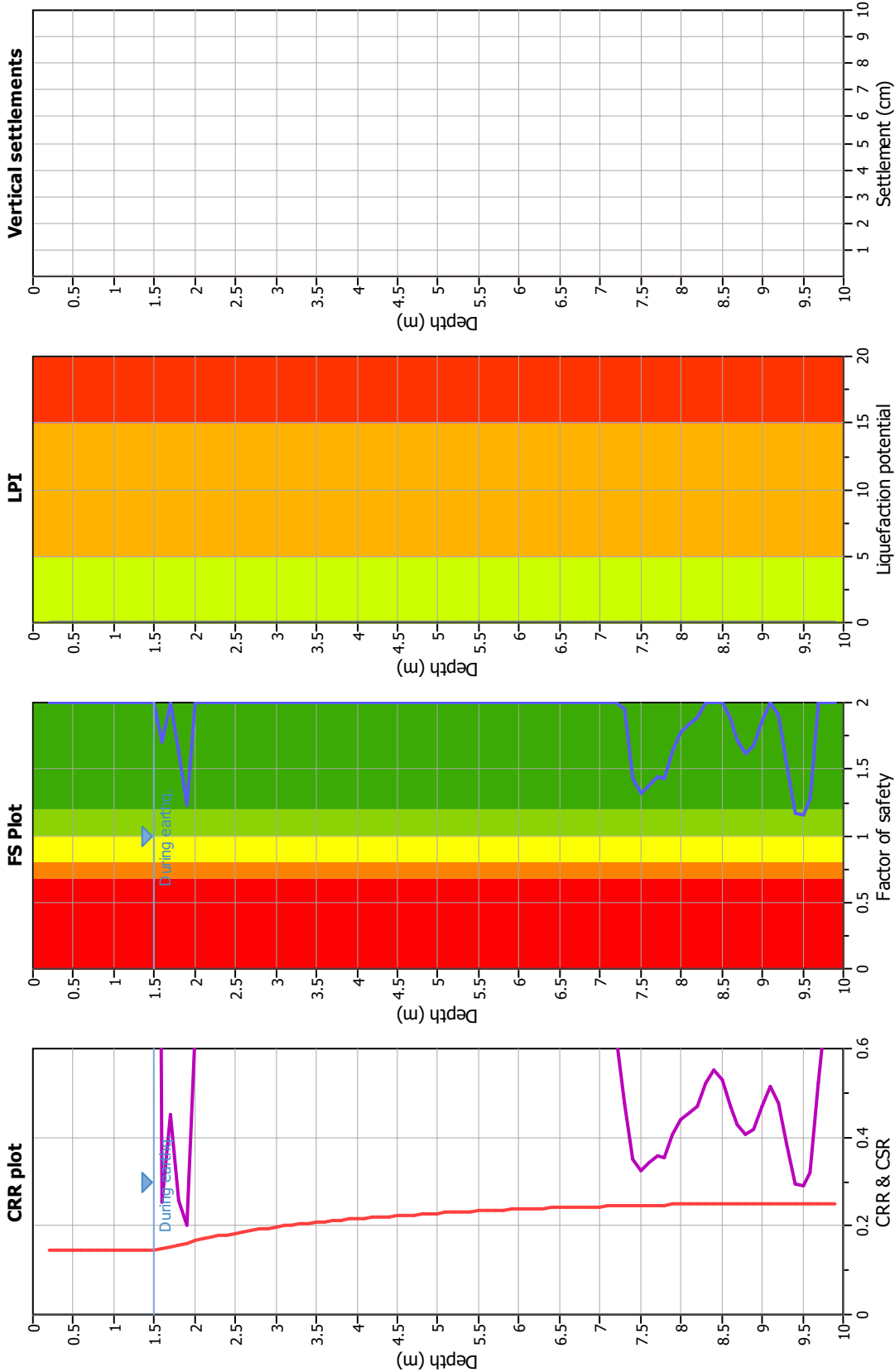
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on I_c value
Earthquake magnitude M_w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.31
Depth to water table (insitu):	2.00 m

Depth to water table (earthq.):	1.50 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:	No
K_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

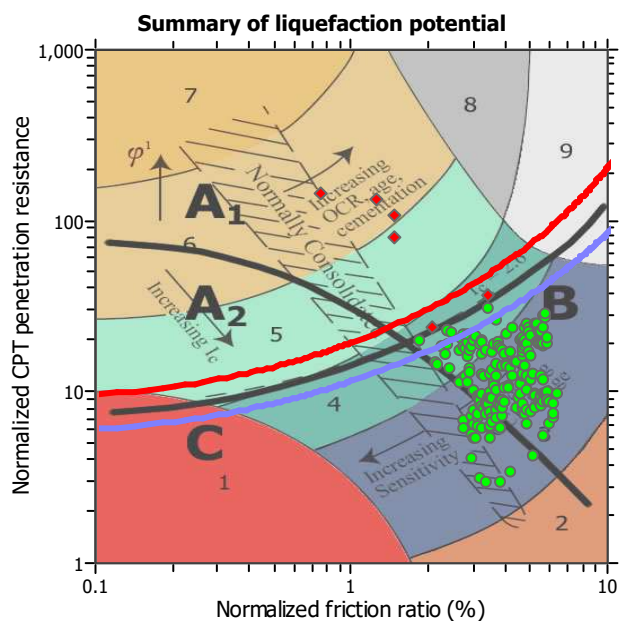
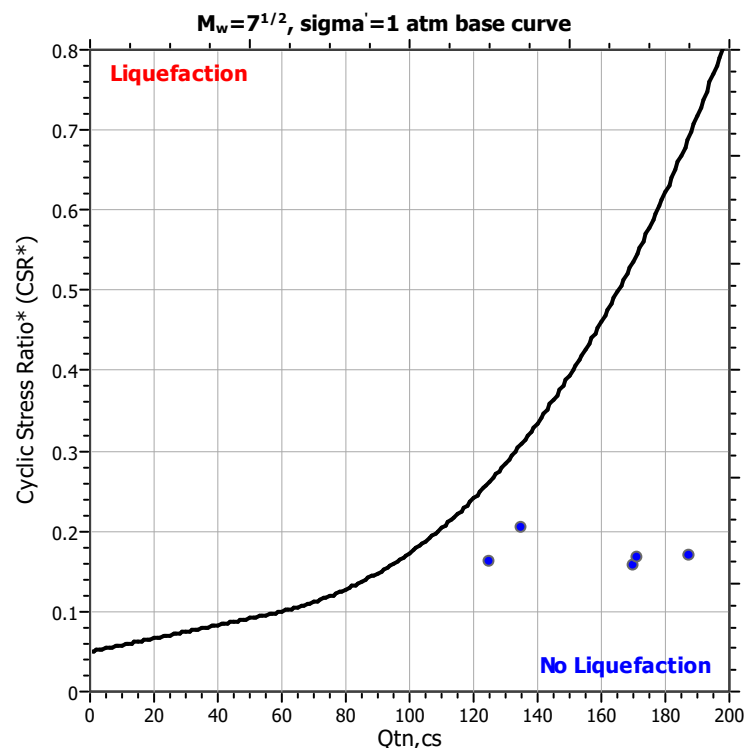
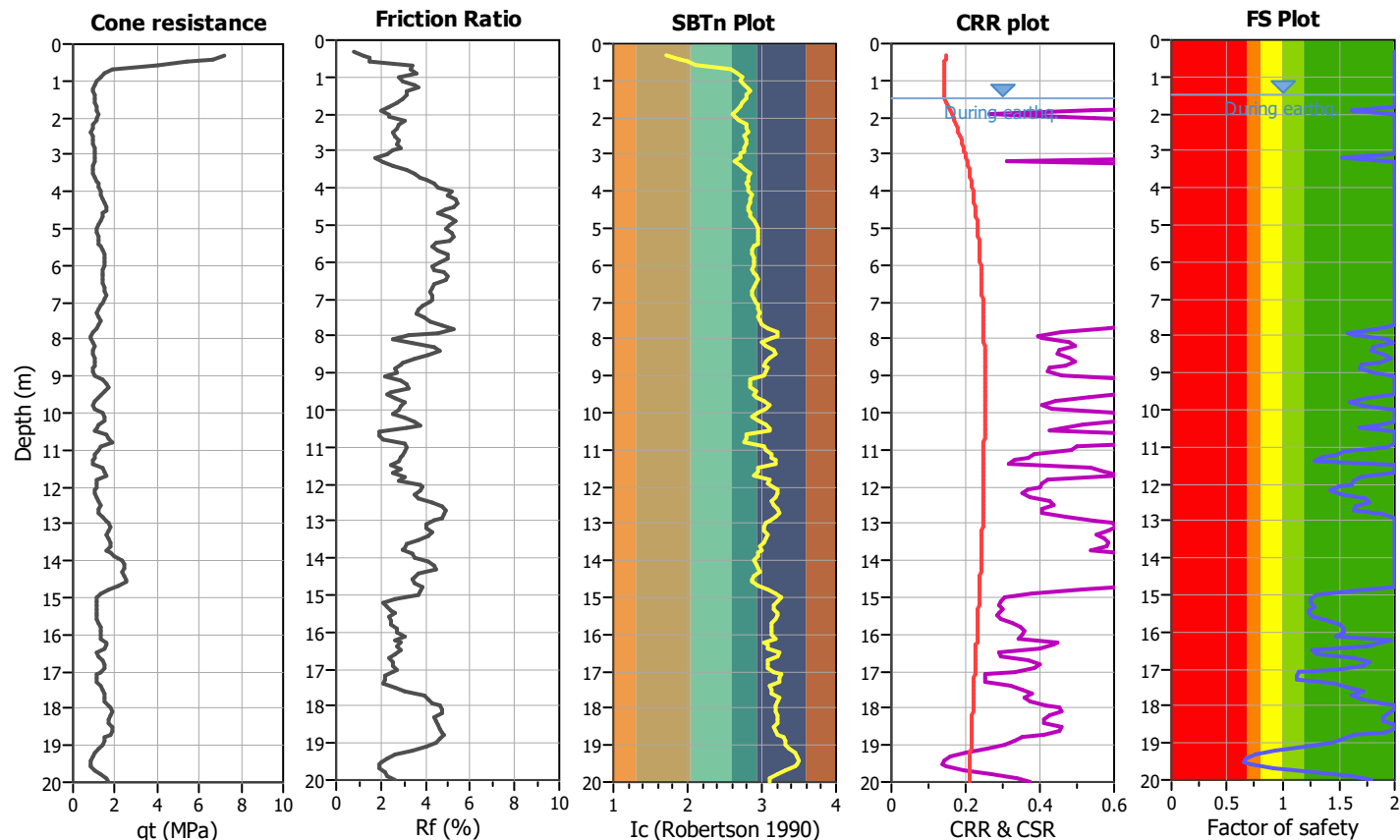
Project title :

Location :

CPT file : CPTE6

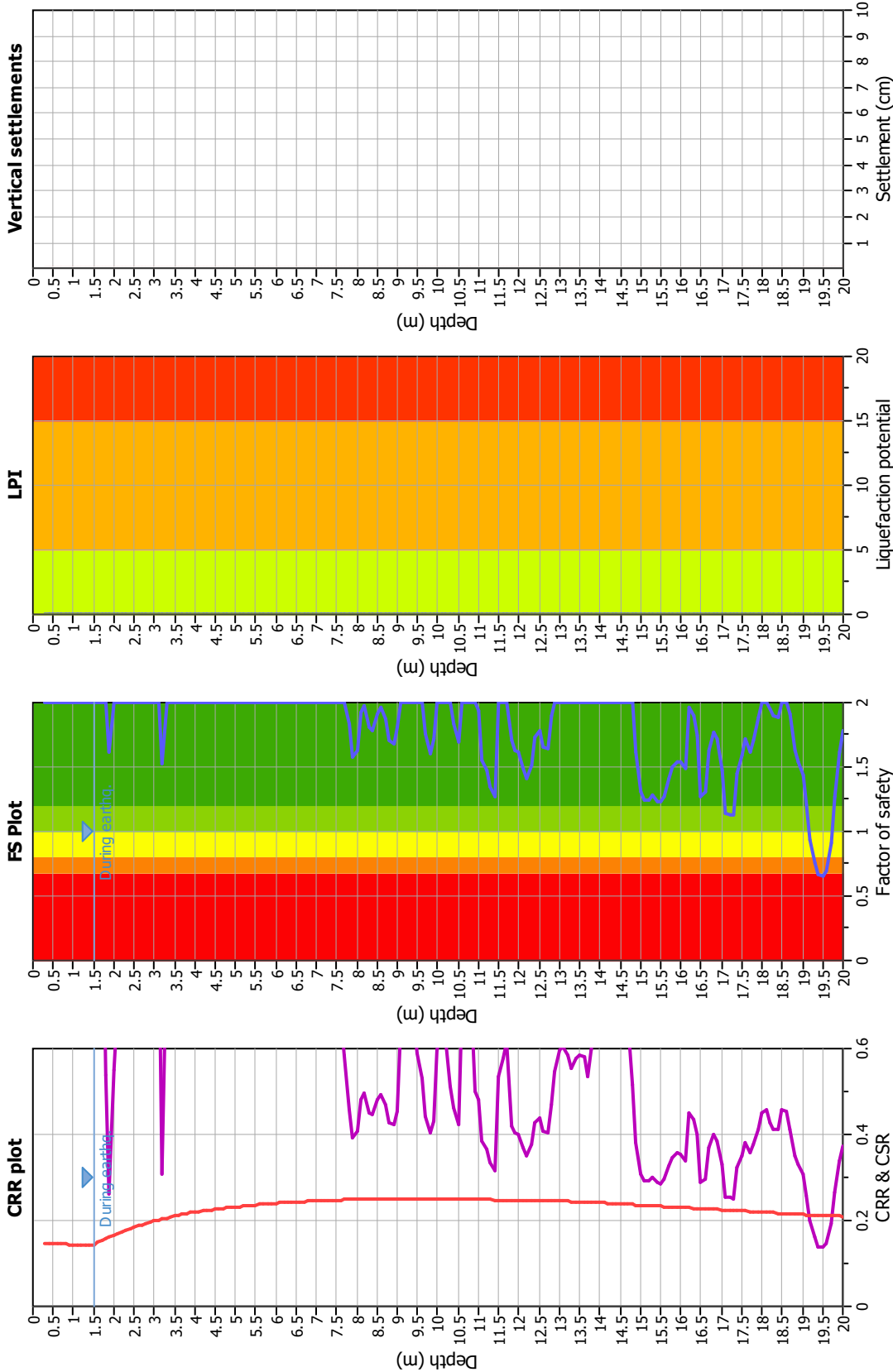
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_g applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.50 m
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.31	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A
		Fill weight:	N/A
		Transition detect: applied:	No
		K_0 applied:	Yes
		Clay like behavior applied:	All soils
		Limit depth applied:	Yes
		Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk	High risk	Low risk
----------------	-----------	----------