



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna  
Comune di Sant'Agata Bolognese



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA		
Comune		
SANT'AGATA BOLOGNESE	STUDIO SAMUEL SANGIORGI Via Valsellustra 32 40060 Dozza (BO)	30/06/2016
		

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	5
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	6
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	8
2.1	Riferimenti bibliografici.....	8
2.2	Sismicità storica e gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	9
2.3	Sorgenti sismogeniche.....	11
2.4	Ulteriori elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	14
2.4.1	<i>Gli studi sismotettonici del SGSS della Regione Emilia-Romagna.....</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015)</i> <i>.....</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC e per il PTCP di Bologna.....</i>	<i>17</i>
2.4.4	<i>La microzonazione sismica comunale di "livello 2".....</i>	<i>19</i>
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	22
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	29
4.1	Dati pregressi.....	29
4.2	Le indagini effettuate per la microzonazione sismica.....	30
4.2.1	<i>Il Piano delle indagini.....</i>	<i>30</i>
4.2.2	<i>Le indagini geognostiche e geofisiche.....</i>	<i>33</i>
4.2.3	<i>Le indagini di laboratorio.....</i>	<i>38</i>
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	41
5.1	Litologie sub-affioranti prevalenti.....	41
5.2	Sottosuolo profondo.....	44
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	53
6.1	La modellazione della risposta sismica locale.....	53
6.2	Liquefacibilità e altri effetti cosismici.....	55
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	62
7.1	Cenni introduttivi.....	62
7.2	I fattori di amplificazione considerati per lo studio MS.....	63
7.3	Gli approfondimenti sulla risposta sismica locale (amplificazioni).....	63
7.3.1	<i>Metodi di calcolo semplificati (abachi) e simulazioni numeriche.....</i>	<i>63</i>
7.3.1	<i>Areale frazione Crocetta.....</i>	<i>64</i>
7.3.2	<i>Areali Capoluogo , ZI Capoluogo e frazione Maggi.....</i>	<i>64</i>
	<i>A) ACCELERAZIONI DI PICCO AL SUOLO E VALORI DI FA PGA.....</i>	<i>69</i>
	<i>B) RAPPORTI SPETTRALI DI AMPLIFICAZIONE.....</i>	<i>70</i>
	<i>C) INTENSITA' SPETTRALE DI HOUSNER.....</i>	<i>70</i>



7.4 Zone suscettibili di instabilità (liquefazioni e cedimenti post sisma): approfondimenti di “livello 3”.....	71
8 ELABORATI CARTOGRAFICI.....	83
8.1 Carta delle Indagini (Tavola 1).....	83
8.2 Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2).....	83
8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	84
8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4).....	84
8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	86
8.6 Carta di microzonazione sismica livello 3 (Tavole 6, 7, 8, 9).....	86
9 BIBLIOGRAFIA.....	88

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Contenuti dello studio

La *microzonazione sismica (MS)*, cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base alla risposta sismica locale, <<è uno degli strumenti più efficaci per la riduzione del rischio sismico in quanto permette, fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica, di valutare la pericolosità sismica nelle aree urbane e urbanizzabili, indirizzare i nuovi interventi verso zone a minore pericolosità e programmare interventi di mitigazione del rischio nelle zone in cui sono presenti particolari criticità<sup>1</sup>>>.

La L.R. 20/2000 “Disciplina generale sulla tutela e uso del territorio” e la L.R. 19/2008 “Norme per la riduzione del rischio sismico” richiedono l’esecuzione di studi di microzonazione sismica per la redazione e l’approvazione dei piani urbanistici comunali e che le scelte urbanistiche e gli interventi sul territorio siano compatibili con la pericolosità sismica locale

Ciò detto, l’Amministrazione comunale di Sant’Agata Bolognese è risultata destinataria di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi di MS e di analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009. In tal senso, il Comune di Sant’Agata Bolognese già dispone di un recente studio di microzonazione sismica comunale (elaborato fino all’approfondimento di “livello 2) e dell’analisi della CLE, in conformità con l’OCDPC 52/2013 e con la DGR 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna.

Il Comune di Sant’Agata Bolognese ha infine affidato allo Studio scrivente l’elaborazione di ulteriori e locali approfondimenti di “livello 3” della microzonazione sismica comunale, ai sensi dell’Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014 (OCDPC 171/2014), recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1227/2015 (DGR 1227/2015). Questi ulteriori approfondimenti sono stati eseguiti nei settori di territorio comunale urbanizzato/urbanizzabile interessati da particolari criticità geologiche in caso di terremoto, individuati nella precedente analisi di MS (aree caratterizzate da suscettibilità alla liquefazione e da potenziali cedimenti post sisma). Sono state dunque espletate le seguenti ulteriori attività:

- l’esecuzione di nuove indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio “terre”;
- un ulteriore aggiornamento dello studio e delle relative cartografie di MS comunale (già elaborata fino all’approfondimento di “livello 2”);
- locali approfondimenti di “livello 3” (modellazioni numeriche di Risposta Sismica Locale; verifiche della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma dei sedimenti);
- un ulteriore aggiornamento della Banca Dati informatica a corredo dello studio di MS.

---

<sup>1</sup> Da: DGR Regione Emilia-Romagna n. 2193 del 21/12/2015 (pubblicata nel BUR del 8/01/2016 – parte seconda – n.4)

La figura 1.1 propone un inquadramento del limite comunale di Sant'Agata Bolognese: si tratta di un territorio amministrativo situato in contesto completamente di pianura e di estensione areale complessiva pari a circa 3.477 ettari.

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio le aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le due frazioni Maggi e Crocetta) ove si sono concentrate la maggior parte delle indagini d'approfondimento): rappresentano gli areali interessati dallo studio di microzonazione sismica.

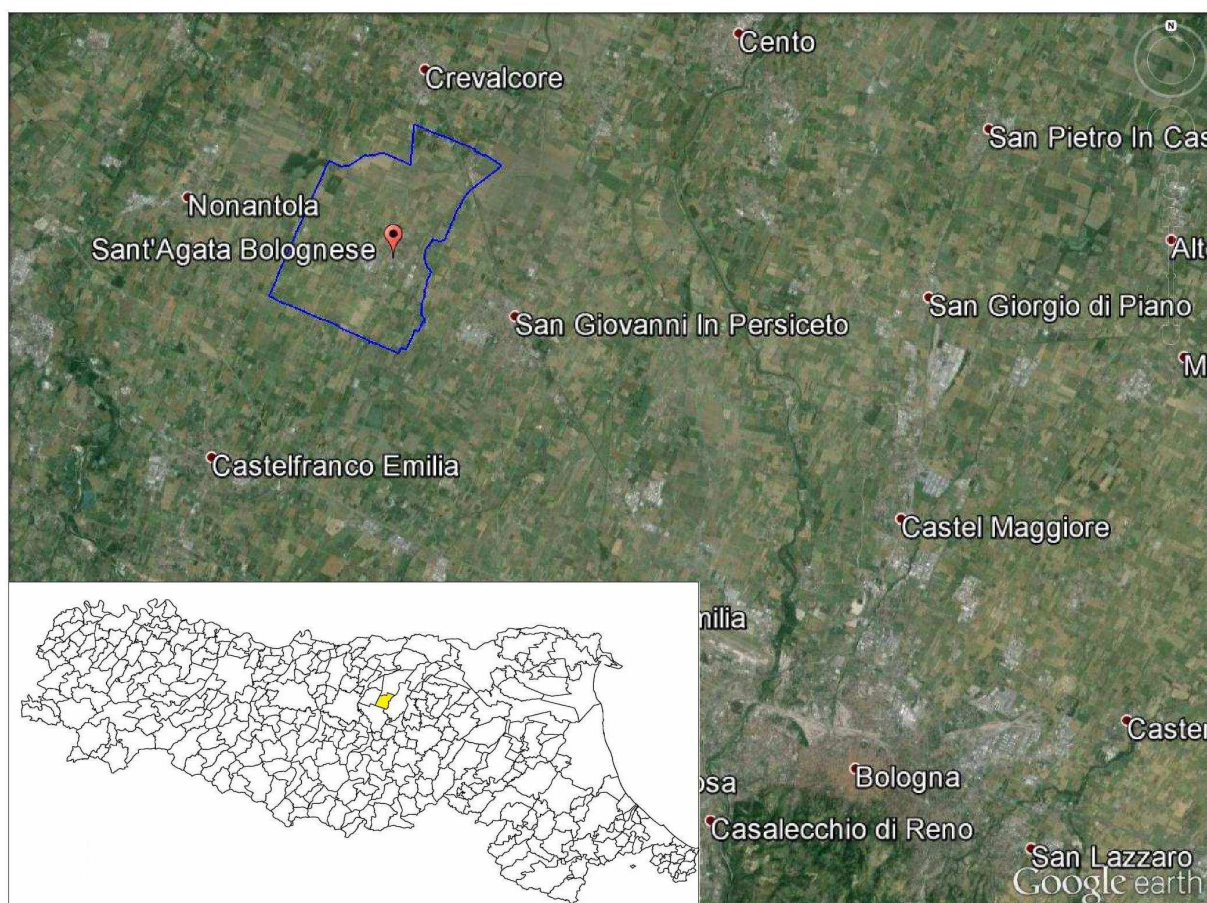
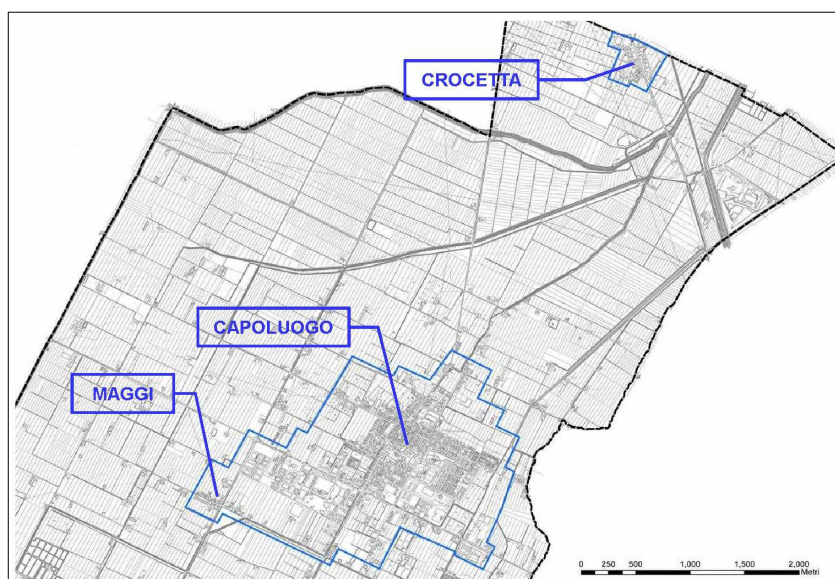


Figura 1.1 - Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di Sant'Agata Bolognese (da: "Google Earth")

Figura 1.2 - Delimitazione delle aree oggetto di indagine (su base topografica alla scala 1:25.000 della Regione Emilia-Romagna)



## 1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 171/2014 a favore degli Enti locali". Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ "Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, ottobre 2015), da qui in avanti "Standard MS 4.0b";
- ✓ "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- ✓ Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 2193/2015 "Art. 16 della LR 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;
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- ✓ DM del 14/01/2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".

Si rammenta che la recente DGR 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna ha apportato alcuni aggiornamenti agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica già definiti nella DAL 112/2007. Gli indirizzi regionali per gli studi di MS risultano in tal senso più congrui alle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/2008); gli aggiornamenti sono inoltre derivati dalle ulteriori esperienze (oltre otto anni) di applicazione della DAL 112/2007 e dalle ulteriori conoscenze scientifiche maturate a seguito degli ultimi importanti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009 e Pianura emiliana 2012).

Come precedentemente scritto, l'Amministrazione di Sant'Agata Bolognese già dispone di uno studio di MS di "livello 2" elaborato dallo Studio Scrivente<sup>2</sup>, conforme alla DAL 112/2007, agli indirizzi nazionali di microzonazione sismica (ICMS 2008) e agli standard di rappresentazione e archiviazione informativa indicati dalla CTMS 2013 (standard v.3.0).

---

<sup>2</sup> Microzonazione sismica di "livello 2" e analisi delle CLE del Comune di Sant'Agata Bolognese (OPCM n.53/2013; DGR n. 1919/2013), già certificato dalla Commissione Tecnica Nazionale.



### 1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Sant'Agata Bolognese sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato \*.pdf) oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le nove tavole cartografiche (riprodotte in formato \*.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 9;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile);
- le due sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (riprodotti in formato \*.pdf), contenuti nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2	1:5.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4	1:5.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FA_{PGA}$	Tavola 6	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,1-0,5}$	Tavola 7	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,5-1,0}$	Tavola 8	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,5-1,5}$	Tavola 9	1:5.000

*Tabella 1.1 – Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese*

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, negli allegati C e D della DGR 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni,

ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Si è tuttavia prodotta un'ulteriore carta di microzonazione sismica di “livello 3” relativa al parametro  $FH_{0,5-1,5}$  (tavola 9) per coerenza con quanto richiesto nella successiva DGR 2193/2015.

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento lo strato vettoriale aggiornato al 2015 fornito dal Comune, basato sul raster topografico della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000). Per questo lavoro, la base topografica vettoriale è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate “WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N”, per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015).

## 2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti bibliografici

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.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015* (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d'interesse nella finestra temporale 1000–2014;
- il *DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il *CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismoindotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mapa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo ( $a_g$ ) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *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, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- il *Catalogo della Sismicità Italiana* (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;

- il *Database ISIDe* (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

## 2.2 Sismicità storica e gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) indica, per il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese, effetti di danno a partire dall'anno 1909, con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado VI della scala MCS (Sieberg, 1930) in occasione del recente terremoto emiliano del 2012. La figura 2.1 riporta il grafico della distribuzione temporale dei terremoti più significativi che hanno coinvolto il territorio studiato e le relative intensità macrosismiche stimate sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione: sulla base degli archivi INGV, non risultano pertanto eventi storici particolarmente significativi, con intensità massima stimata fino al quinto grado.

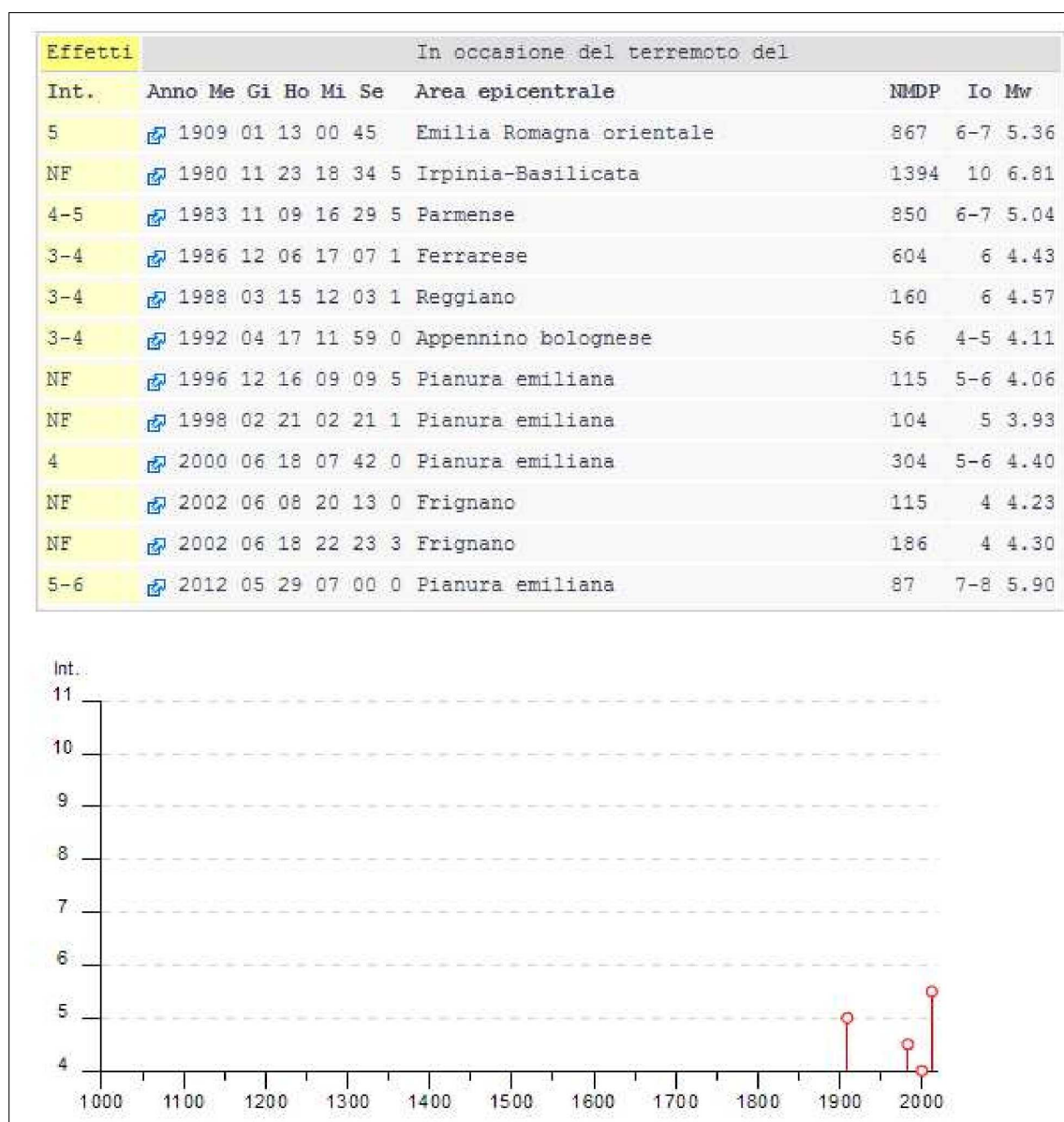


Figura 2.1- Distribuzione dei terremoti significativi per il Comune di Sant'Agata Bolognese e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)



Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana<sup>3</sup> è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale ML=5.9), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di ML =4,8 e la seconda di ML =5,1, con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse (ML >5), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa (ML =5.8) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO). La figura 2.2 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

Gli effetti locali riscontrati nelle aree interessate sono principalmente riconducibili ad amplificazione e a liquefazioni, queste ultime diffuse soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno; Panaro; Secchia) e, subordinatamente, del Po<sup>4</sup>. Sono state registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g. Nel territorio di Sant'Agata Bolognese, le massime Pga stimate<sup>5</sup> per tali eventi sismici sono risultate comprese tra 0,05g e 0,1g.

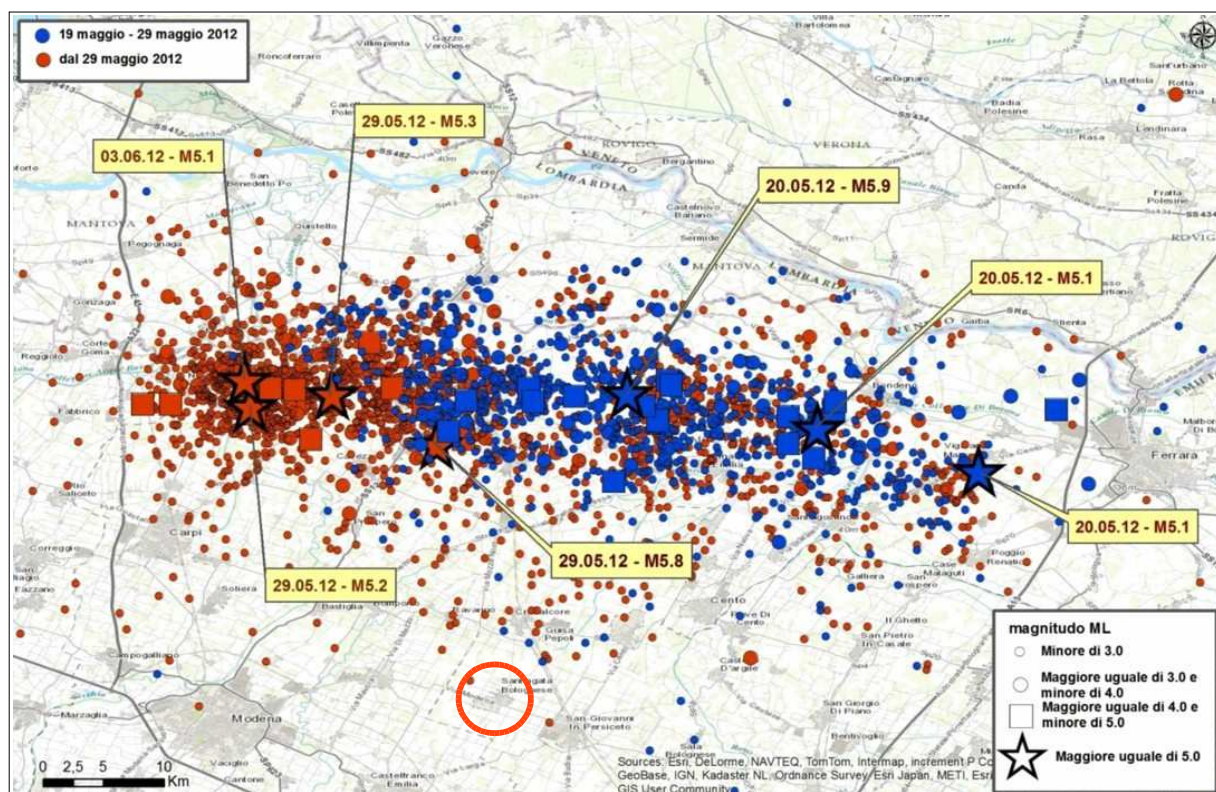


Figura 2.2 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>). In cerchio arancio l'area di studio

<sup>3</sup> Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

<sup>4</sup> Fonte: "Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012" – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e "Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale" a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

<sup>5</sup> Fonte: INGV (consultabile on line da <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/archive/>).

La figura 2.3 propone una sintesi degli effetti macrosismici osservati a seguito dei terremoti 2012, in relazione all'entità dei danni ai manufatti: al Comune di Sant'Agata Bolognese è stata attribuita una macrosismicità massima compresa tra 5 e 6 gradi della scala MCS. Il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese è stato solamente lambito dagli effetti più gravosi causati dalle scosse del maggio e giugno 2012, con pochi edifici effettivamente lesionati e localizzati nella porzione più settentrionale, cioè più vicini alle zone epicentrali. Complessivamente, nell'intero Comune, le verifiche di agibilità AEDES effettuate a seguito del sisma hanno contato otto edifici abitativi significativamente lesionati, di cui due classificati "E" (inagibili) e altri sei classificati "B" oppure "C" (temporaneamente inagibili o parzialmente inagibili).

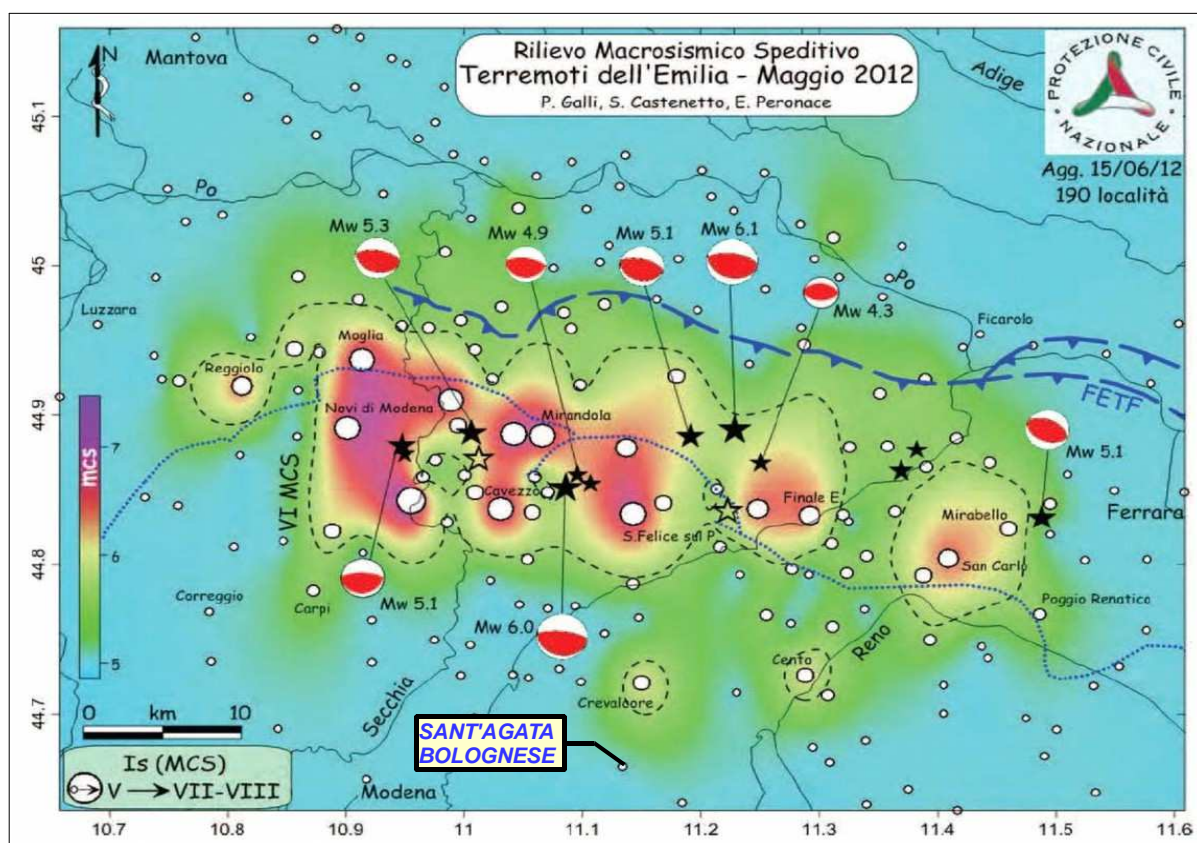


Figura 2.3- Schema delle intensità macrosismiche osservate (Galli et al., 2012)

## 2.3 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade nella Zona 912, caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6.14.

La zona sismogenica 912 rappresenta la porzione più avanzata e sepolta della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale che si spinge fino al Po ed è caratterizzata prevalentemente da meccanismi di fagliazione inversa (Meletti & Valensise, 2004).

La figura 2.5 riporta una sovrapposizione del Comune di Sant'Agata Bolognese con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS v. 3.2. Questo fondamentale database indica la



presenza delle seguenti sorgenti sismogeniche composite, che tuttavia ricadono esternamente al territorio studiato:

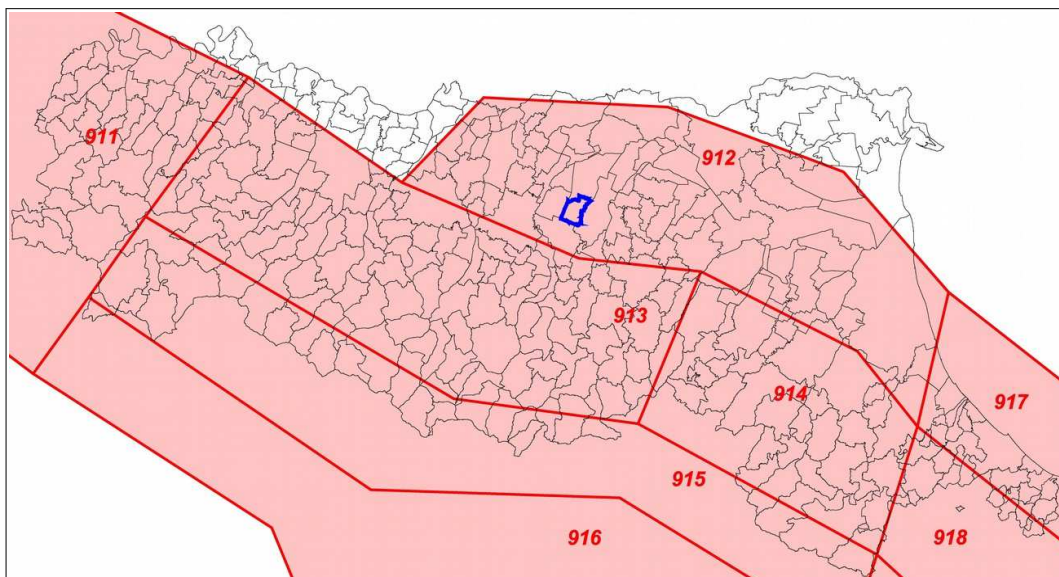


Figura 2.4 – Limiti amministrativi del Comune di Sant'Agata Bolognese e zonazione sismogenetica ZS9

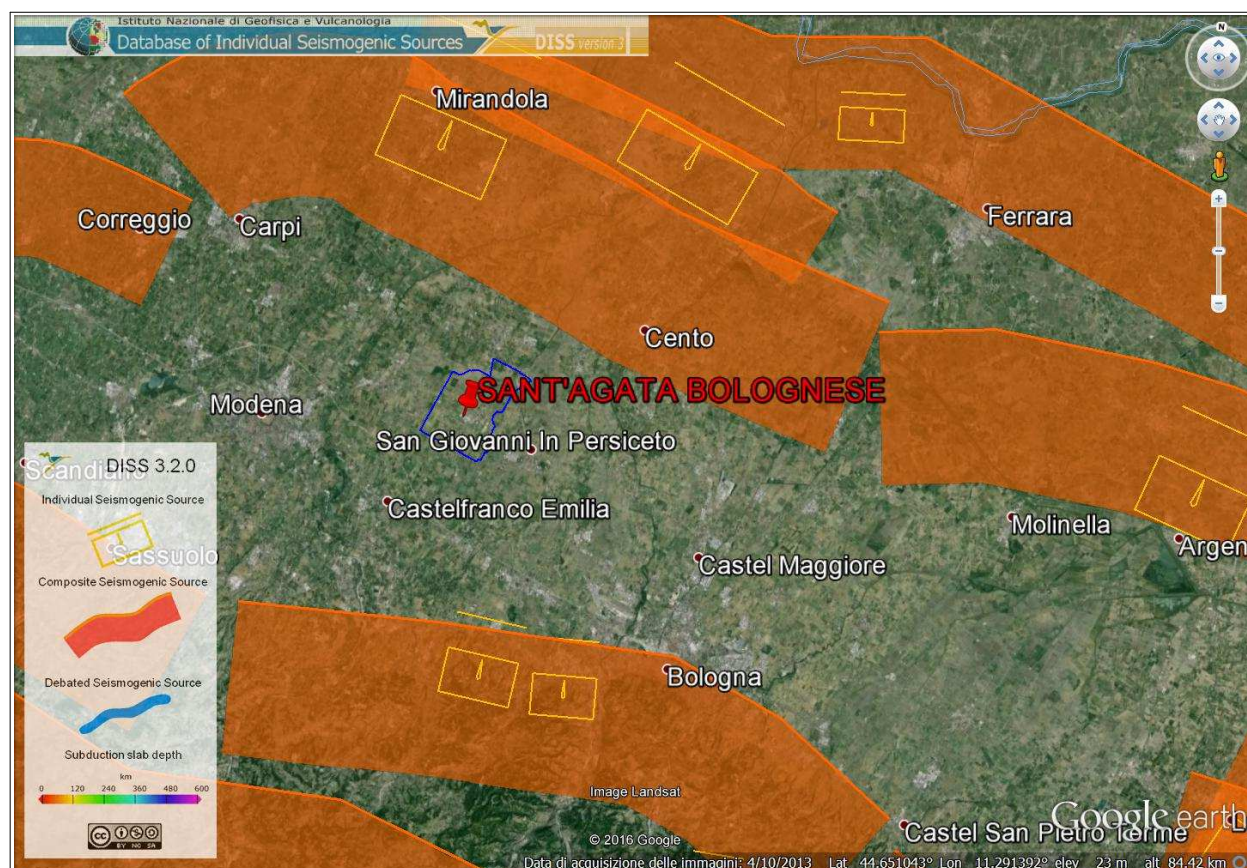


Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogeniche contenute nel database DISS (v.3.2). Foto aerea: Google Earth. Nel database DISS le sigle ITCS corrispondono alle sorgenti composite, mentre le sigle ITIS corrispondono alle "sorgenti" sismogeniche singole

1. la <<ITCS051 – Carpi–Poggio Renatico>> situata a nord, questa fascia sismogenetica attraversa parte del territorio di pianura bolognese e modenese ed è caratterizzata da una Magnitudo  $Mw_{max}$  pari a 6,0. In sintesi, la sismicità locale è data prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle “Pieghe Ferraresi” (Pieri & Groppi, 1981): questo sistema di pieghe-faglie ha dato origine alle due principali dorsali sepolte (“interne” ed “esterne”) che descrivono un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spinge fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990). Queste dorsali sepolte, sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud; di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (Martelli, 2014).

La più vicina sorgente sismogenica individuale nota (fino al 2012) e compresa in questa fascia è denominata “ITIS107 – Mirandola”: ad essa è stata attribuita una  $Mw_{max} = 6,0$  basata su considerazioni prevalentemente geologiche, in quanto non risultavano ben noti episodi sismici di rilevanza associati a tale zona prima del sisma del 29 maggio 2012. Questa sorgente è coincidente con il “trust” che forma la struttura anticlinale sepolta dell’“Alto di Mirandola” (figura 2.6) e ad essa sono associate le faglie attive “Mirandola” (F78), “Canalazzo di Finale Emilia” (F79) e “Concordia” (F80), tuttavia i tempi di ritorno attribuibili ad eventi significativi) non sono ancora chiaramente valutabili;

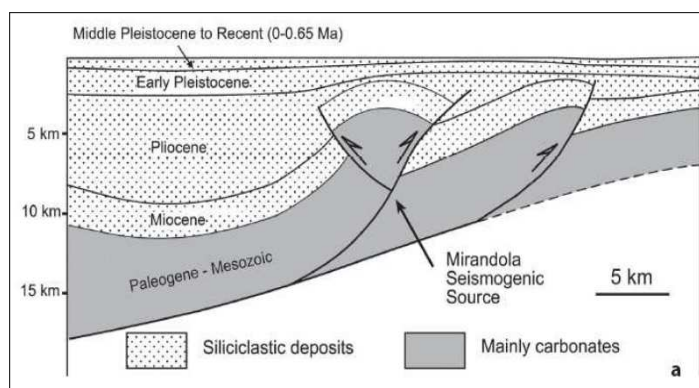


Figura 2.6 – Schema geologico e fagliazione della zona mirandolese (Pieri & Groppi, 1981)

2. la <<ITCS047 – Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme>> che interessa i territori appenninici e pedeappenninici situati più a sud, con una magnitudo stimata di  $Mw = 6,0$  e derivata dalle magnitudo dei terremoti più significativi bolognesi (1505 e 1929) e modenesi (1399).

La più vicina sorgente sismogenica individuale nota è denominata “ITIS103 – Crespellano”, alla quale è attribuita una magnitudo  $Mw = 5,6$  associata al terremoto del 20 aprile 1929 (fonte: CPTI, 2004): a seguito di tale evento sismico sono documentati danni ad edifici ed infrastrutture con intensità pari al grado VII della scala Mercalli (Zecchi, 1982) ed anche effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali, emissioni di gas (Boschi et al., 2000). È inoltre individuata la sorgente “ITIS091 – Casalecchio di Reno” a cui è attribuita una  $Mw = 5,5$  associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004); la zona epicentrale è stata stimata tra Zola Predosa e Bologna e sono documentati danni più consistenti a Zola Predosa, Bologna e S. Lorenzo in Collina (grado IX della scala Mercalli, cfr. Zecchi, 1882) ed i seguenti effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000), effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestinanzi e Romeo, 2000).



Si tratta di aree sismogeniche che, in entrambi i casi, distano dal Capoluogo comunale poco meno di 20 km.

## 2.4 Ulteriori elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale

### 2.4.1 Gli studi sismotettonici del SGSS della Regione Emilia-Romagna

Il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, a conclusione di un lungo lavoro iniziato alla fine degli anni '70 del secolo scorso, ha pubblicato nel 2004 la <<Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna>>. Questa cartografia, editata alla scala 1:250.000, riporta i fondamentali elementi di caratterizzazione sismotettonica della regione, gli epicentri dei terremoti noti con Magnitudo  $M > 4$  (figura 2.7), le strutture attive e quelle potenzialmente sismogenetiche (della catena appenninica, del suo margine e quelle correlate alle strutture del sottosuolo padano-adriatico) ed i relativi meccanismi focali tettonici. La localizzazione degli epicentri è basata sulla catalogazione nazionale dei terremoti CPTI (aggiornata al 1999)<sup>6</sup>.

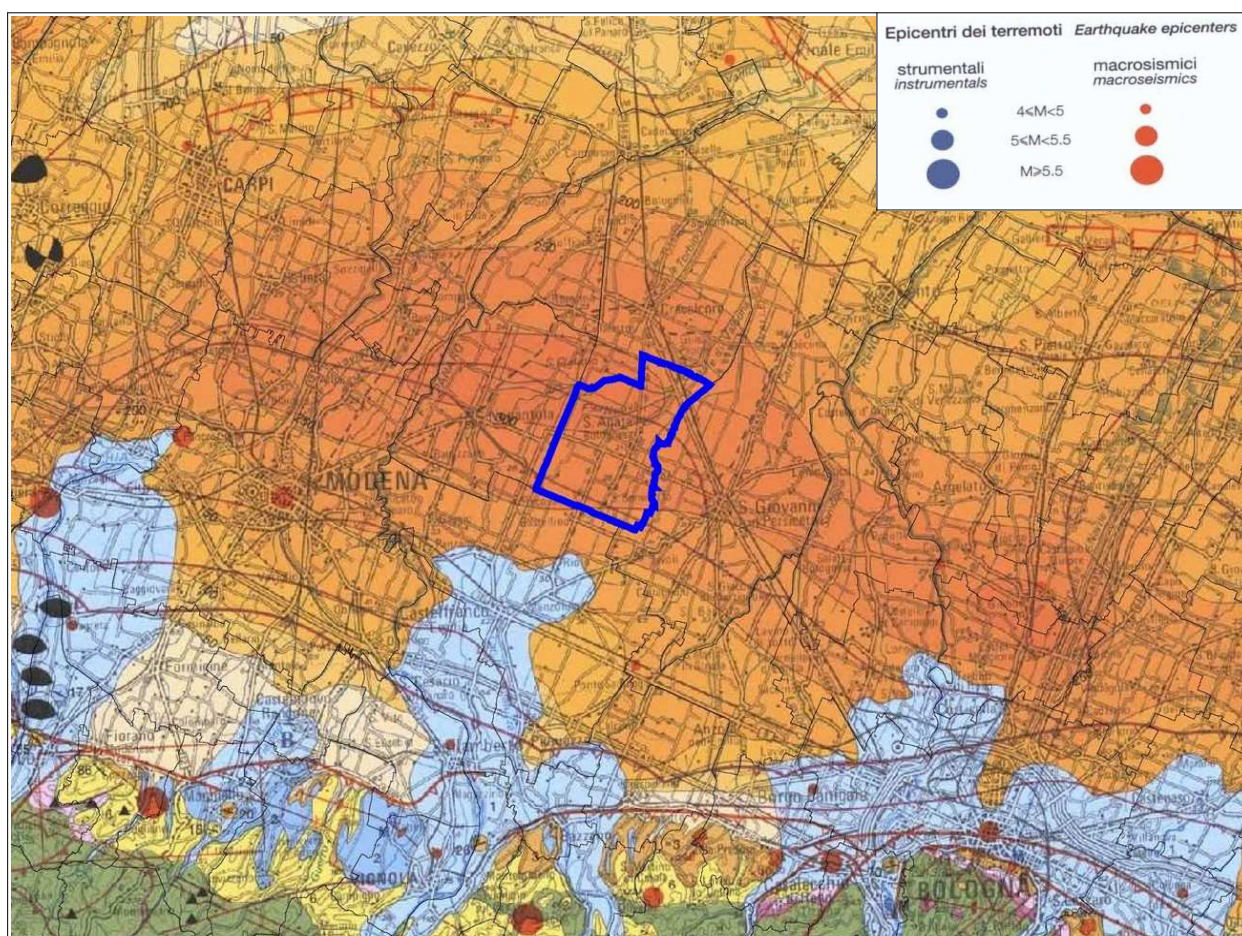


Figura 2.7- Sovrapposizione del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese con la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004). Si riporta uno stralcio della legenda relativamente alla classificazione degli ipocentri dei terremoti strumentali di  $M_w > 4$  e l'epicentro dei più significativi effetti macroseismici

<sup>6</sup> Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002).

### *2.4.2 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (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.

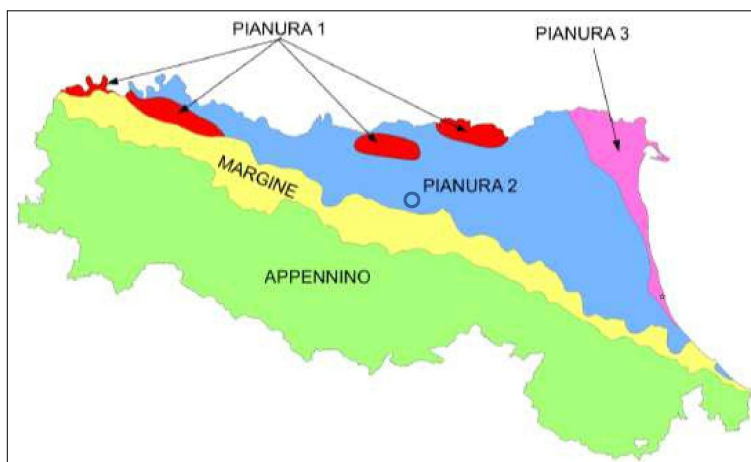
Con la recente approvazione della DGR 2193/2015, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 114/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/1/2008), le ulteriori esperienze scientifiche 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° (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008);
- ✓ 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 secondo i tre "livelli" di approfondimento, inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di "livello 2").

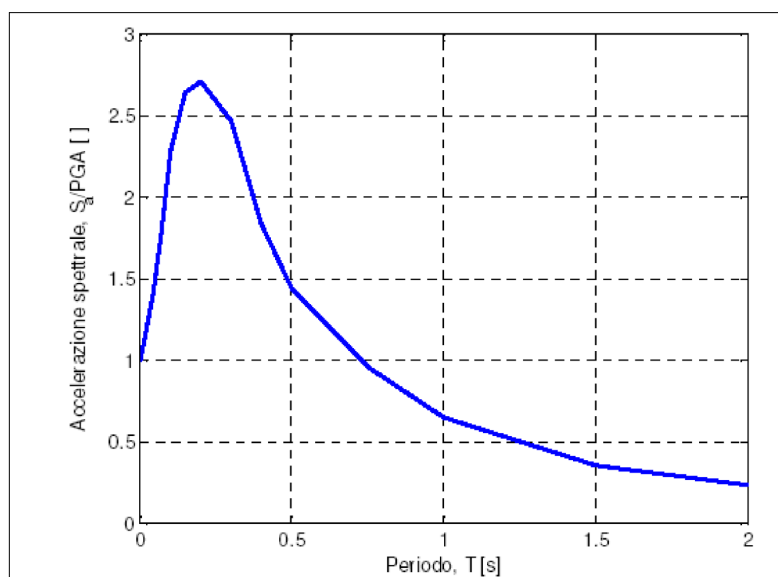
Sulla base dei precedenti studi di MS di "livello 2" già espletati e basandoci su quanto indicato nella DGR 2193/2015 (allegato A2), il territorio amministrativo di Sant'Agata Bolognese risulta approssimabile al macro contesto geologico sismico di "Pianura 2" (figura 2.8), ovvero a un <<setto di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. dal tetto del substrato rigido a circa 150 m da p.c.>>.

*Fig. 2.8 – Scomposizione schematica del territorio regionale relativa ai macrocontesti geologico sismici di riferimento per gli studi di MZS di livello 2 (DGR 2193/2015). Nel cerchiato blu è localizzabile Sant'Agata Bolognese*



Gli indirizzi forniscono anche i dati fondamentali per le valutazioni più accurate della risposta sismica di terzo livello: lo spettro di risposta normalizzato di riferimento per l'Emilia-Romagna (per  $T_r = 475$  anni cioè con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni), riportato in figura 2.9, e i valori di  $P_{ga}$  anch'essi normalizzati (riferiti al suolo rigido) per ogni sito nella Regione Emilia-Romagna (basato sul reticolo INGV). Tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti (NTC 2008).

*Figura 2.9 – Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica ISESD dei segnali di riferimento regionale*



Gli indirizzi regionali di MS indicano anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale: sono input selezionati dalla Banca dati ISESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei singoli segnali.

È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.9 con la  $a_{refg}$  attribuita al sito di studio. In tal senso, la figura 2.10 riporta per due siti del Capoluogo i valori di  $a_{refg}$  (e degli altri parametri di “pericolosità sismica di base” di riferimento per le NTC 2008) estrapolabili dai punti del reticolo INGV.



Si evince che per il Capoluogo i valori di  $a_{refg}$  (per terremoti con  $TR = 475$  anni) sono compresi tra 0,159g e 0,161g. Come già indicato, i valori di  $a_{refg}$  regionali si riferiscono al reticolo INGV (mappa MPS04) che attribuisce la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni: i valori sono attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km). La mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

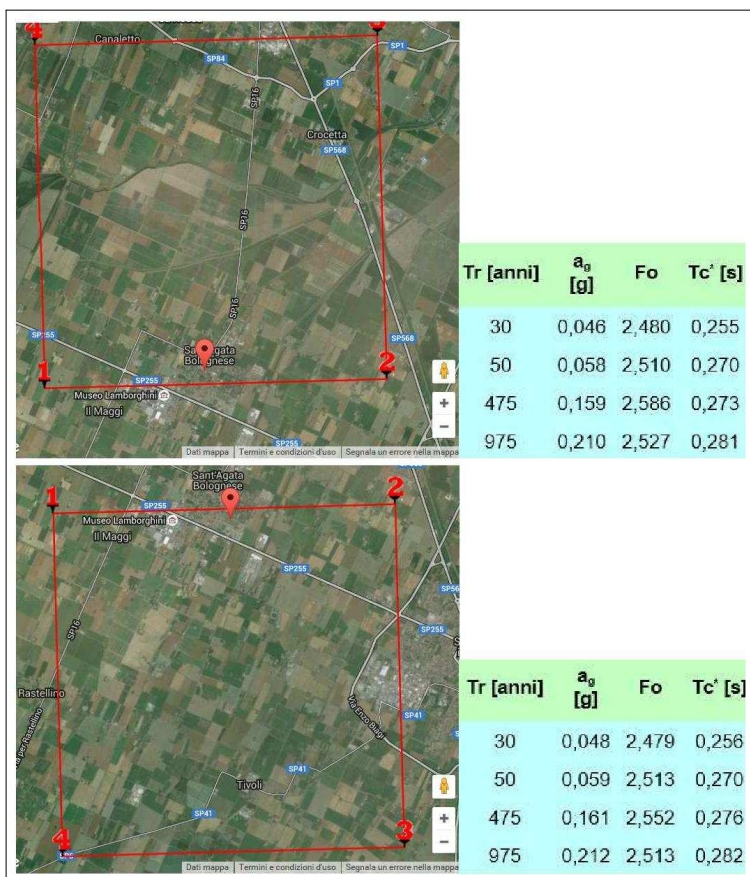


Fig. 2.10 - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia limitrofi al Capoluogo

### 2.4.3 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC e per il PTCP di Bologna

L'Amministrazione comunale di Sant'Agata Bolognese già disponeva di uno studio di pericolosità sismica preliminare, in parte equiparabile a un approfondimento di "livello 1" ed elaborato per il Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale (PSC) dell'Associazione di Comuni "Terre d'Acqua"<sup>7</sup>. Si tratta di uno studio elaborato negli anni 2006/2007, pertanto precedente sia agli indirizzi regionali (DAL 112/2007), sia agli indirizzi nazionali (ICMS 2008). Lo studio si basa sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca e ha permesso di elaborare una prima cartografia degli "effetti di sito", redatta alla scala 1:25.000 dell'area Capoluogo (figura 2.11). La cartografia ha delimitato zone con differente propensione alla

<sup>7</sup> Associazione costituita dai Comuni di Anzola dell'Emilia, Calderara di Reno, Crevalcore, San Giovanni in Persiceto e Sant'Agata Bolognese. I documenti del Quadro Conoscitivo sono stati adottati dall'Amministrazione di Sant'Agata Bolognese con delibera di G.M n.64 del 29/05/2008



liquefazione, in funzione del fattore di sicurezza FS ricavato da esiti di prove penetrometriche. Tuttavia, si tratta di un'elaborazione a grande scala e ancora carente di informazioni utili per un'effettiva quantificazione della liquefacibilità.

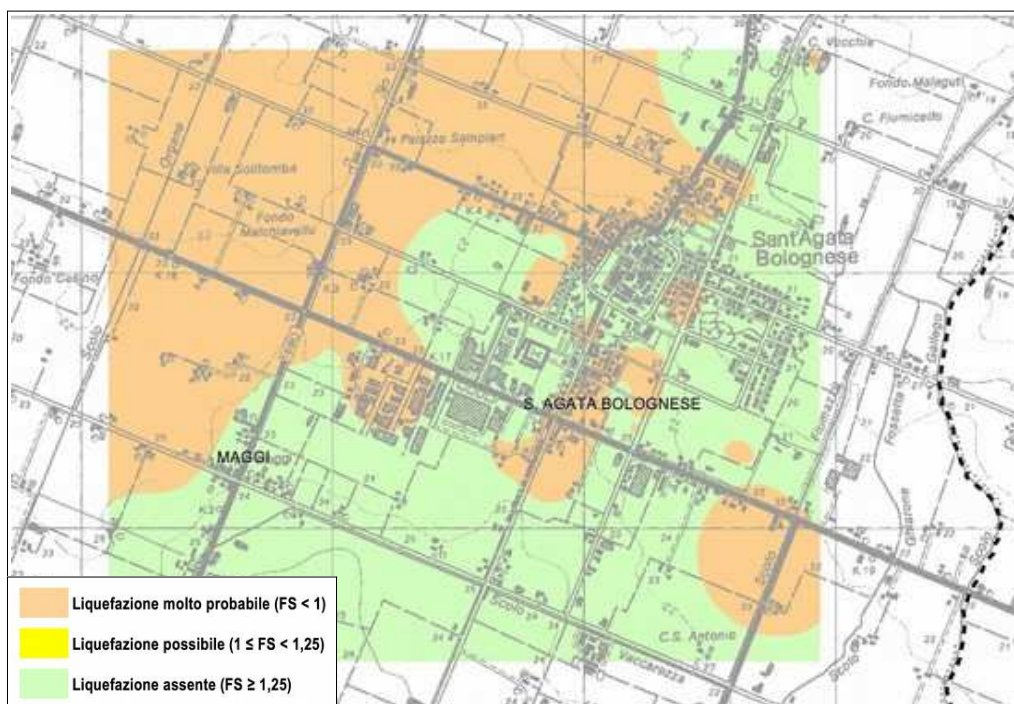


Figura 2.11 – Stralcio della Tavola QC.6/t7b – Pericolosità Sismica Locale – Effetti di Sito alla scala 1.25.000 (da Quadro Conoscitivo del PSC Associato Terre d'Acqua)

Occorre anche rammentare che la Provincia di Bologna (ora Città Metropolitana di Bologna) ha successivamente proceduto all'elaborazione degli studi di pericolosità sismica preliminare di tutto il territorio amministrativo competente. Gli esiti di tali studi sono contenuti nella <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>><sup>8</sup>. In sintesi, la Provincia di Bologna ha elaborato la nuova Tavola di Piano, denominata “TAV. 2.C – Rischio sismico – Carta degli effetti Locali Attesi”, alla scala 1:25.000 per quanto riguarda i Comuni della collina e montagna e alla scala 1:65.000 per i Comuni di pianura. Tale tavola costituisce il primo livello di approfondimento sismico richiesto dalla DAL 112/2007, identificando gli scenari di pericolosità sismica locale dell'intero territorio provinciale. La Tavola 2.C fornisce anche le prime indicazioni sui limiti di programmazione e/o sulle condizioni richieste per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti a pericolosità sismica.

La figura 2.12 mostra uno stralcio della TAV. 2.C del PTCP, con sovrapposti i limiti comunali di Sant'Agata Bolognese e i limiti delle aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le due frazioni Maggi e Crocetta): il territorio comunale ricade nelle macrozone omogenee definite come “A”, “C” e “L1” (vedi legenda).

<sup>8</sup> La variante è stata approvata con delibera del C.P. n.57 del 28/10/2013.

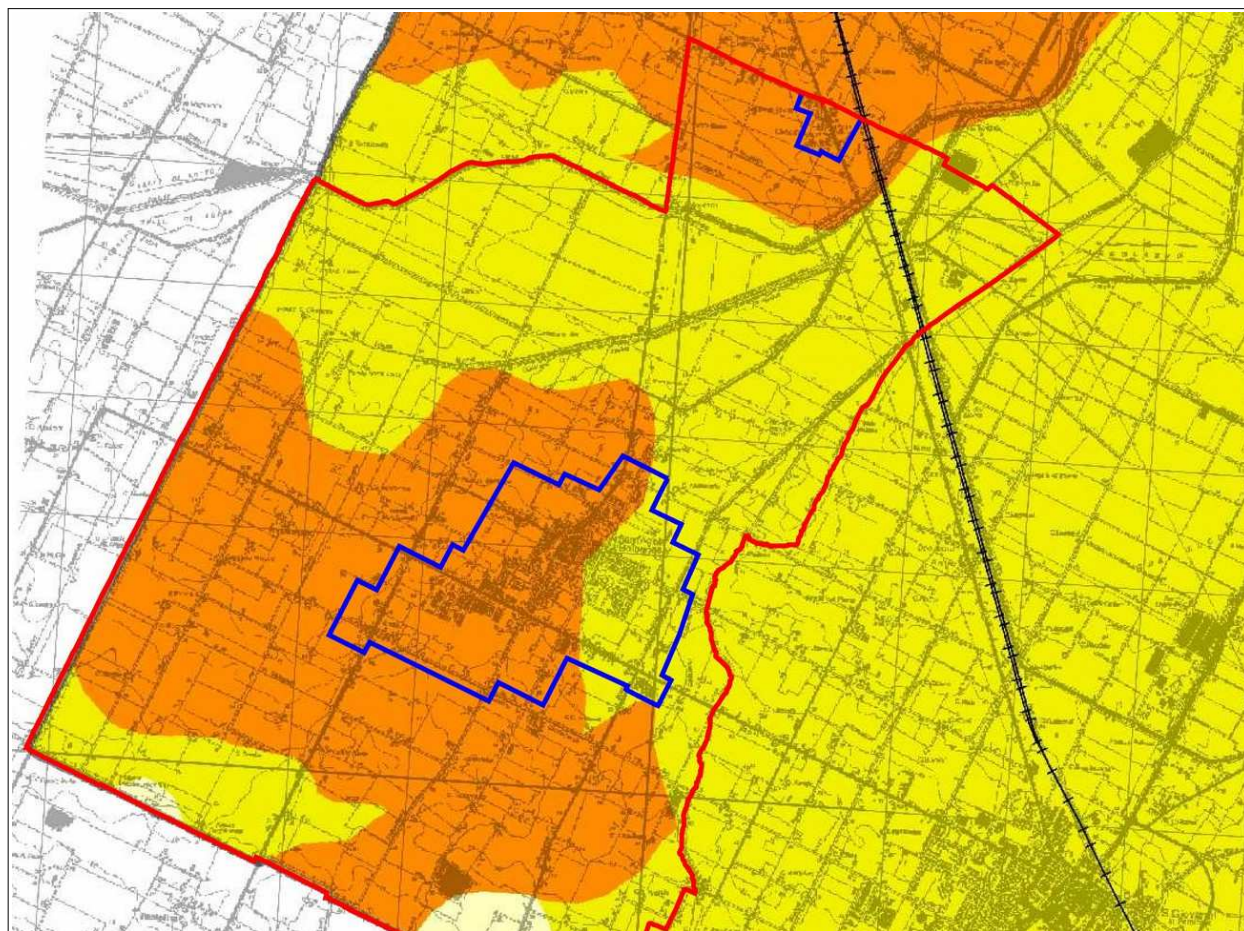


Figura 2.12 – Stralcio della Tavola 2C “Rischio Sismico: carta delle aree suscettibili di effetti locali” (elaborato del PTCP di Bologna, scala 1:65.000)

#### 2.4.4 La microzonazione sismica comunale di “livello 2”

L'Amministrazione comunale di Sant'Agata Bolognese dispone di un più recente e aggiornato studio di Microzonazione sismica di “livello 2” e delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE). Tali studi sono stati cofinanziati attraverso l'OCDPC 52/2013 ed elaborati in coerenza con i contenuti tecnici riportati negli allegati della DGR 1919/2013 della Regione Emilia-Romagna e con gli <<Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica>> approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (di seguito indicate come “ICMS 2008”). In particolare, lo studio di microzonazione sismica ha prodotto:

- ✓ gli elaborati cartografici di “livello 1” (Carta delle Indagini 1:10.000; Carta Geologico Tecnica 1:5.000; Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni 1:10.000; Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica 1:5.000);
- ✓ gli elaborati cartografici di “livello 2” (Carta delle Velocità delle Onde di taglio S 1:10.000; Carte di Microzonazione Sismica Livello 2 1:5.000);
- ✓ la Relazione Descrittiva che illustra gli elementi conoscitivi (geologici, geomorfologici, idrogeologici, geotecnici e geofisici) considerati per l'elaborazione del modello di sottosuolo

e per l'analisi di pericolosità sismica locale;

- ✓ la Banca Dati Informatica delle indagini e dei tematismi cartografici, in conformità con gli Standard della Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (CTMS, 2013)

Tra gli elaborati cartografici di “livello 1”, la “*Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica*” (MOPS) redatta alla scala 1:5.000 è il documento fondamentale di questo livello di approfondimento, in quanto ha suddiviso il territorio studiato in zone caratterizzate da differenti elementi geologici e sismici in grado di modificare la risposta sismica locale. In particolare, la cartografia MOPS elaborata per il Comune di Sant'Agata Bolognese (figura 2.13) ha distinto:

- “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali” → per le quali si ritiene sufficiente un secondo livello di approfondimento;
- “zone di attenzione per instabilità” per liquefazione e per liquefazione con possibilità di cedimenti post sisma (sovrapposizione di condizioni di instabilità differenti) → per le quali sono richiesti ulteriori indagini e approfondimenti fino al “livello 3”.

Le “zone di attenzione per instabilità” sono state oggetto degli approfondimenti di “livello 3” espletati in questa ulteriore fase di studio.

Per la quantificazione semplificata dell'amplificazione sismica locale riportata nelle “Carte di Microzonazione Sismica di Livello 2” si è fatto riferimento agli Abachi (Alleg. A2) della DAL 112/2007 regionale. I parametri di amplificazione indicati negli indirizzi di MS regionali sono riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico:

- $FA_{PGA}$  → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ( $a_{max,r}$ ) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ( $a_{max,s}$ ) alla frequenza  $f$ . 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. Vengono quantificati i fattori di amplificazione per due intervalli di frequenze, rispettivamente da  $0.1 < T_0 < 0.5$  s e da  $0.5 < T_0 < 1$  s ( $FA_{0,1-0,5s}$  e  $FA_{0,1-0,5s}$ ).

Dal punto di vista cartografico, sono state prodotte tre differenti carte: ognuna di esse riporta, per una migliore comprensione, un solo fattore di amplificazione e cioè  $FA_{PGA}$ ,  $FA_{SI}$  per l'intervallo  $0.1s < T_0 < 0.5s$  e  $FA_{SI}$  per l'intervallo  $0.5s < T_0 < 1s$ .



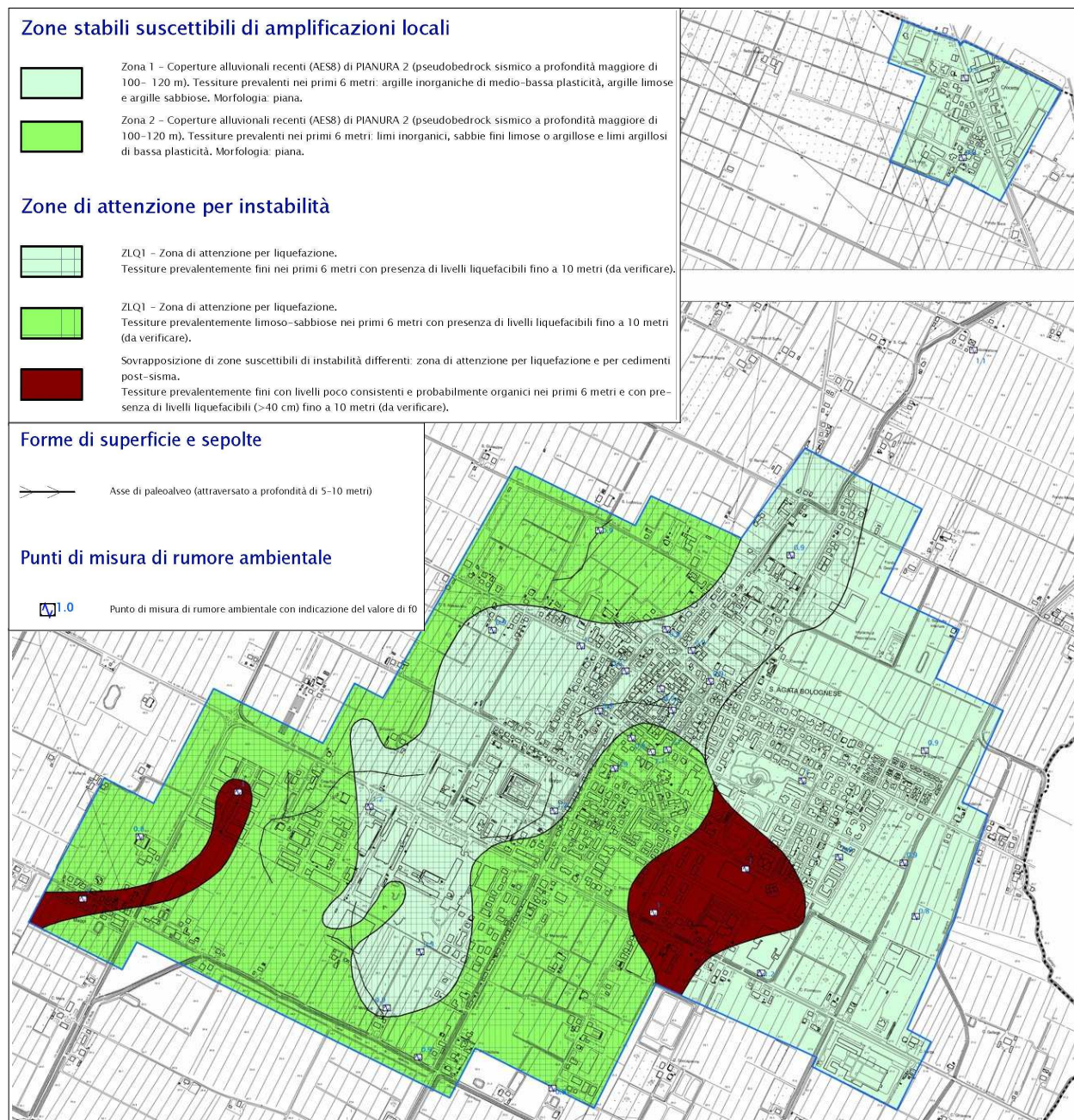


Figura 2.13 – Stralcio della “Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (scala 1:5.000) elaborata per lo studio di microzonazione sismica di “livello 1 e 2” del Comune di Sant’Agata Bolognese (Sangiorgi, 2014)

### 3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Dal punto di vista tettonico (figura 3.1), il territorio di Sant'Agata Bolognese si colloca nella Pianura Padana ovvero nella zona di “fronte” appenninico sepolto (AGIP 1977, 1981, 1982; Boccaletti *et al.*, 1985, 1987; Bally *et al.*, 1986; Castellarin & Vai, 1986; Castellarin *et al.*, 1992; Pieri, 1992; ecc..), che costituisce la propaggine più settentrionale della catena appenninica che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano veneta (Boccaletti *et al.*, 2004).

Questa struttura mostra un andamento NW–SE parallelo all’adiacente catena ed è costituita al suo interno da archi strutturali piuttosto simmetrici e simili tra loro, costituiti (nell'area di interesse e in tutta la parte orientale della Pianura Padana) da un insieme di pieghe e faglie inverse NE–vergenti e ad alto angolo.

La strutturazione dell’Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica ( Miocene superiore–Pliocene inferiore), mentre la principale attività tettonica del suo fronte deformato e sepolto è prevalentemente attribuita al Pliocene medio–superiore e Quaternario.

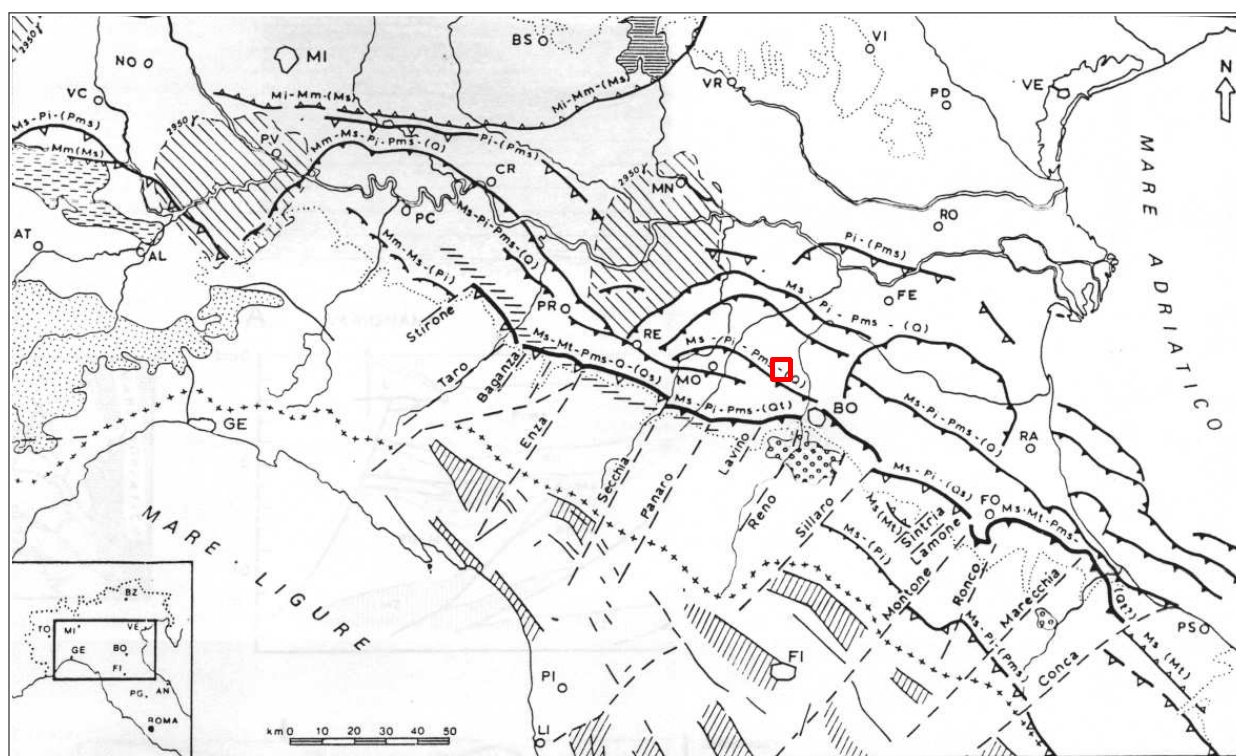


Figura 3.1 – Schema strutturale del fronte compressivo dell’Appennino settentrionale e ricostruzione temporale delle fasi tettoniche principali (da Castellarin *et al.*, 1985). L’area di studio è localizzata nel quadrato rosso

Sant'Agata Bolognese ricade nell'ampia sinclinale “Bologna–Bomporto–Reggio Emilia”, situata tra due grandi archi di pieghe, le “Pieghe Pedeappenniniche” (a sud e più prossimali alla catena appenninica) e dalla “Dorsale Ferrarese Interna” (a nord), un’ampia struttura anticlinale nord-vergente estesa tra Reggio–Emilia e la costa adriatica, caratterizzata da un massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, noto come Alto di Mirandola”.



Le dorsali del fronte appenninico sepolto sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e con piano di scorrimento immergente verso sud. Sono riscontrabili anche strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust), di attivazione più recente e che interessano soprattutto gli orizzonti meno profondi.

La figura 3.2 propone un ulteriore e più recente schema delle strutture tettoniche sepolte nella pianura padana, mentre la figura 3.3 propone una sezione geologica profonda semplificata, elaborata in seguito agli eventi sismici del maggio 2012.

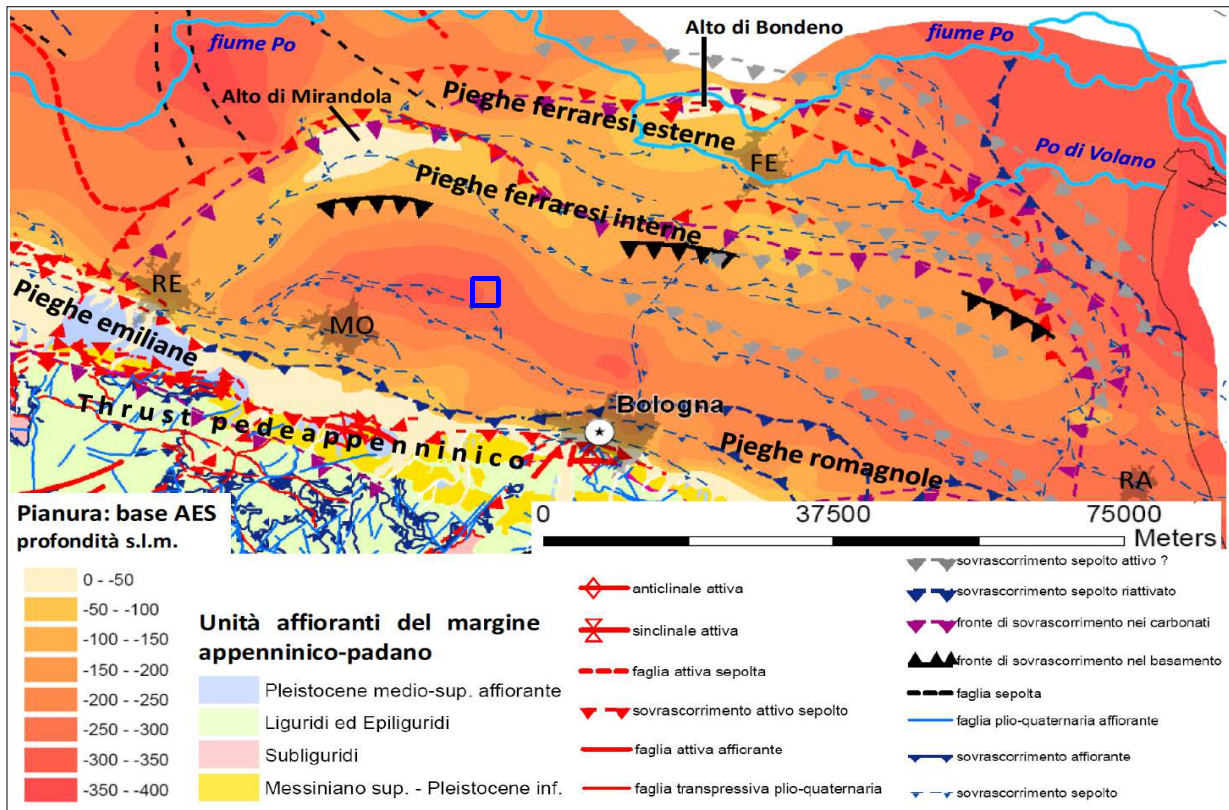


Figura 3.2 - Schema tettonico della pianura emiliana (L.Martelli, 2011). L'area di studio è localizzata nel quadrato blu

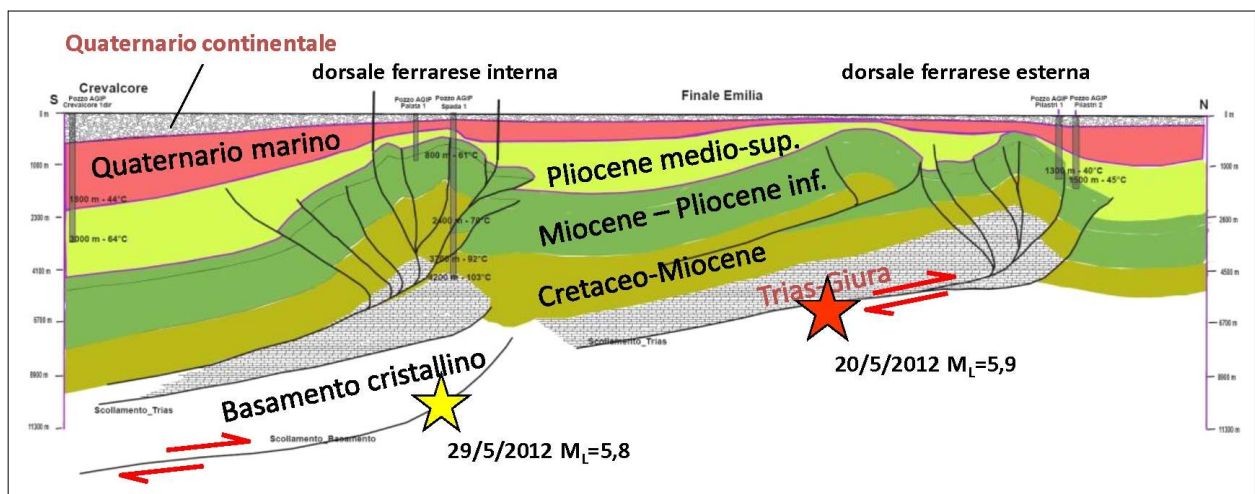


Figura 3.3 - Sezione geologica profonda di sintesi, da Crevalcore al Po, con proiezione degli ipocentri delle scosse principali (da L. Martelli & M. Romani, 2014)

Nell'area di studio, le strutture tettoniche del fronte appenninico sono sature da depositi di età più recente (coltre alluvionale del Quaternario), sovrapposti ai depositi marini plio-pleistocenici.

La coltre alluvionale è caratterizzata da alternanze di sabbie, limi e argille (in funzione dell'evoluzione delle facies deposizionali dominanti), di età Pleistocene medio-Olocene e localmente attribuibili ai fiumi Po, Panaro e Samoggia. Questi depositi alluvionali sono inoltre riferibili a due principali e successivi cicli deposizionali:

- il "Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore" (AEI), che costituisce lo spessore di alluvioni più profonde e sovrapposte ai depositi marini plio-pleistocenici (di età compresa da circa 0,7 Ma a circa 0,45/0,4 Ma);
- il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), di età compresa da 0,45/0,4 Ma all'attuale (RER & ENI-Agip, 1998).

Nella pianura padana, lo spessore complessivo dei depositi alluvionali è fortemente variabile, in funzione della morfologia delle strutture tettonizzate sepolte: studi RER & ENI-Agip (1998) hanno evidenziato come, nelle aree di sinclinale, la coltre alluvionale superi i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale si hanno potenze decisamente inferiori ai 100 metri. Come già anticipato, il territorio studiato è situato sulla sinclinale denominata "Bologna-Bomporto-Reggio Emilia" e in prossimità della sua maggiore depressione, individuabile tra Sant'Agata Bolognese e Crevalcore ed estesa fino a NO di Nonantola. Nell'area studiata, la base del Sintema AES viene stimata a circa -300 metri slm (cfr. "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna", RER & CNR, 2004).

In generale, le indagini effettuate, compresi i più recenti studi di microzonazione sismica, espletati dal SGSS regionale nei Comuni emiliani che hanno sofferto i maggiori danneggiamenti a seguito degli eventi sismici del maggio e giugno 2012<sup>9</sup>, mostrano come, dal punto di vista geofisico, il sottosuolo della pianura presenti differenze laterali generalmente minime, almeno fino alla profondità di 50-60 metri, mentre nelle zone di alto strutturale, le alluvioni più profonde e antiche (il sintema AEI) sono interessate da lacune stratigrafiche e da spessori ridotti, confermando, sostanzialmente, il quadro conoscitivo già sintetizzato nella cartografia sismotettonica regionale<sup>10</sup>.

Per quanto riguarda il sottosuolo meno profondo, il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese ricade in un contesto deposizionale sub-affiorante riconducibile a "depositi di argine, canale e rotta fluviale" attribuibili all'apparato distributore del Fiume Panaro, prevalenti nella porzione sud orientale del Comune, mentre la porzione nord occidentale è attribuibile a depositi fini di "piana inondabile" ("interbacino"), come schematizzato nella figura 3.4.

Il territorio di Sant'Agata Bolognese ricade nel Foglio 202 della Carta Geologica in scala 1:50.000 della Regione Emilia-Romagna (Progetto CARG) e secondo tale cartografia (figura 3.5),

---

<sup>9</sup> Studi di microzonazione sismica elaborati in ossequio all'Ordinanza del Commissario delegato - Presidente della Regione Emilia - Romagna n. 70/2012.

<sup>10</sup> "Carta Sismotettonica della regione Emilia-Romagna" (scala 1:250.000), a cura del SGSS regionale e CNR, 2004.



i sedimenti sub-affioranti sono riconducibili alle unità AES8 (“Subsistema di Ravenna”) e alla sua unità più recente AES8<sub>a</sub> (“Unità di Modena”) di età deposizionale da attuale a Pleistocene-Olocene (<14.000 anni). Si tratta di depositi costituiti da sabbie, limi e argille, mentre i corpi ghiaiosi sono praticamente assenti nell'area di studio (affiorano più a SO, in prossimità del Fiume Panaro).

Figura 3.4 – Geologia di sintesi (fonte: cartografia interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale)



<b>Linee geomorf./antrop.</b>	
—	argine artificiale certo
—	traccia di alveo fluviale abbandonato certa
—	traccia di alveo fluviale abbandonato incerta
—	ventaglio di esondazione certo
<b>Limiti di unità geologiche</b>	
—	contatto stratigrafico o litologico certo
<b>Ambienti deposiz. e litologie</b>	
—	argilla limosa di piana alluvionale
—	sabbia limosa di piana alluvionale
—	sabbia limoso-argillosa di piana alluvionale
<b>Unità geologiche</b>	
■	AES8 - Sistema emiliano-romagnolo superiore - Subsistema di Ravenna
■	AES8a - Sistema emiliano-romagnolo superiore - Subsistema di Ravenna - unità di Modena

Figura 3.5 – Cartografia geologica alla scala 1:50.000 (fonte: cartografia interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale)



Lo spessore medio del subsistema alluvionale AES8 è di circa 20÷22 metri e di geometria relativamente tabulare nell'area di studio. La cartografia geologica alla scala 1:50.000 riporta tracce di paleoalvei sabbiosi del Panaro, riscontrati soprattutto nella porzione meridionale del territorio e a ovest, al confine con Nonantola.

Nella porzione del territorio comunale più occidentale, i sedimenti superficiali sono ascrivibili all'Unità più recente AES8<sub>a</sub> la cui deposizione è riconducibile ai sovralluvionamenti che dal IV÷V secolo d.C. hanno interessato gran parte della Pianura Padana; nell'area di studio, la deposizione è principalmente riconducibile all'attività trattiva del F. Panaro, con spessori che possono raggiungere localmente i 5÷6 metri e tessiture anch'esse variabili da sabbie, limi ad argille.

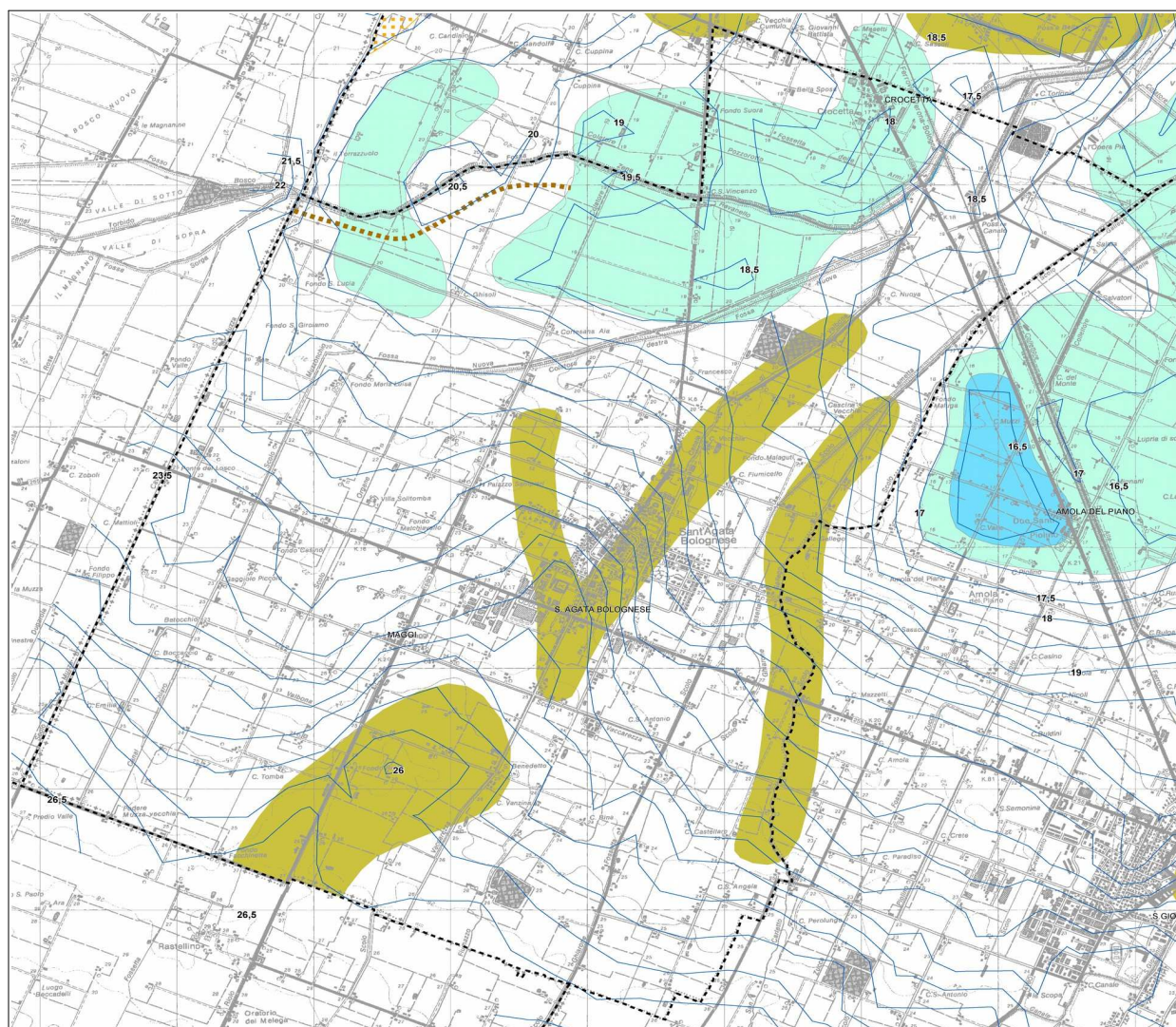


Figura 3.6 - Stralcio della Tavola "QC.6/t2b - Geomorfologia" (elaborato del PSC dell'Associazione Terre d'Acqua, scala 1:25.000)

Per quanto riguarda gli aspetti più propriamente geomorfologici, l'area di studio risulta morfologicamente sub-pianeggiante, con un lieve declivio verso NNE da quote massime di circa 27 m slmm a circa 19 m slmm. Non si riscontrano rilievi morfologici degni di nota, ad esclusione di rilevati stradali e argini dei corsi d'acqua, elevati fino a 6÷8 metri.



L'elaborazione del microrilievo, effettuata per il Quadro Conoscitivo del PSC<sup>11</sup>, sulla base delle analisi delle curve di livello (interpolazione automatica dei punti quotati), evidenzia la presenza di alcuni "alti morfologici" di forma allungata e riconducibili a recenti dossi di origine fluviale e anch'essi riconducibili, con probabilità, al F. Panaro (figura 3.6). In particolare, si riscontra una forma morfologica decisamente riconducibile a un dosso che percorre da sud a NNE (a sud di Crocetta) la porzione centrale del territorio comunale e sul quale si insedia il centro storico del Capoluogo. La Tavola Geomorfologica del PSC riporta un ulteriore paleoalveo, al limite con il confine comunale di San Giovanni in Persiceto, tuttavia la sua delimitazione cartografica non è chiaramente riscontrabile sulla base della morfologia di superficie.

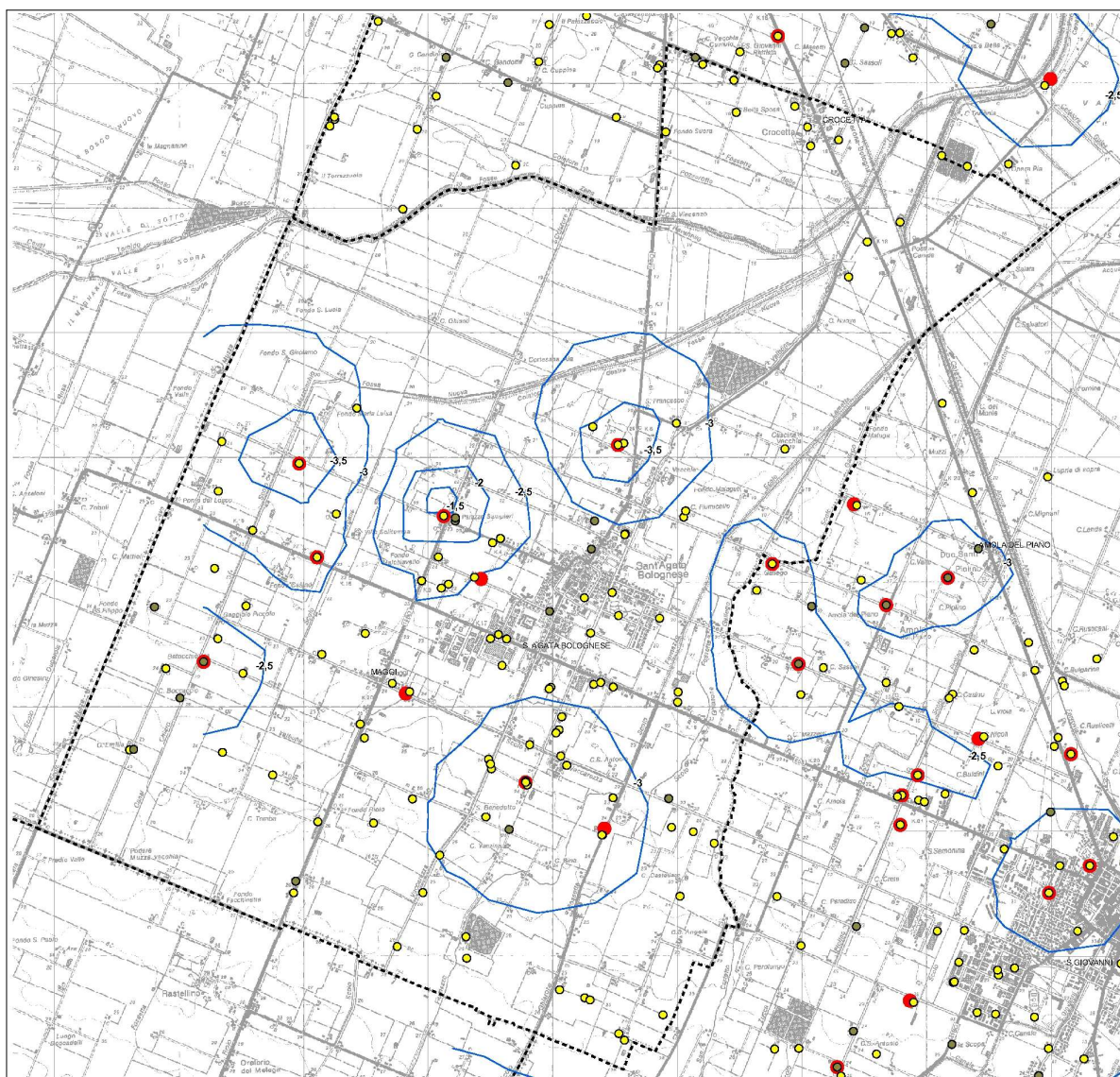


Figura 3.7 - Stralcio della Tavola "QC.6/t9b - Soggiacenza della falda acquifera superficiale" (elaborato del PSC dell'Associazione Terre d'Acqua, scala 1:25.000)

Anche per gli aspetti idrogeologici generali, si rimanda alle analisi riportate nello studio geologico elaborato per il QC del PSC. In sintesi, lo studio ha ricostruito (seppur con metodi automatici) il campo di moto della prima falda sulla base dei rilievi delle quote d'acqua misurate

<sup>11</sup> Tavola QC.6/t2b - Geomorfologia (scala 1.25.000).

in pozzi privati, ove si evince il complessivo deflusso sotterraneo verso NE. Lo studio di PSC ha consentito l'elaborazione di una cartografia idrogeologica, che evidenzia una soggiacenza (profondità media della prima falda rispetto alla superficie) variabile da circa 2,5 metri a circa 3,5 metri (figura 3.7). La geometria della falda meno profonda è governato dal reticolo idrografico, che la alimenta per infiltrazione da subalveo e laterale. La falda più superficiale risente, inoltre, dell'assetto morfologico locale e tuttavia appare di scarso significato idrogeologico per quanto riguarda le caratteristiche di permeabilità e trasmissività.

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

### 4.1 Dati pregressi

La fase iniziale di lavoro ha previsto la raccolta, selezione e riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di Sant'Agata Bolognese. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna e dal Comune e in particolare:

- ✓ sezioni geologiche e prove disponibili nella Banca Dati Geognostica della Regione Emilia-Romagna, pubblicate e consultabili anche nel sito internet del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale;
- ✓ prove geognostiche e geofisiche di repertorio fornite dall'Amministrazione comunale, relative a indagini geologiche archiviate presso l'Ufficio Tecnico e svolte nel territorio comunale per gli interventi più significativi di progettazione esecutiva (permessi di costruire) o per interventi di pianificazione (es: Variante Generale al Piano Regolatore e Varianti specifiche; Piani Particolareggiati; ecc.).

I dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e di alcuni pozzi per acqua, delle penetrometrie (CPT/CPTU) spinte fino a profondità maggiori di 6 metri e indagini geofisiche (stendimenti ReMi e MASW; registrazioni HVSR). Il totale delle prove pregresse, considerate per lo studio di microzonazione e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, risulta pari a 125 prove, così distinte per tipologia:

- n. 7 carotaggi continui (S) di cui 3 hanno permesso il recupero di campioni, con analisi geotecniche effettuate in laboratorio “terre”;
- n. 67 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- n. 36 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU)
- n. 1 prova sismica con “Cono Sismico” (SCPT)
- n. 13 misure di microtrempi a stazione singola (HVSR)
- n. 1 stendimento sismico in array ESAC
- n. 2 stendimenti sismici passivi ReMi;
- n. 7 stendimenti sismici attivi MASW;

Tra le prove di repertorio, è risultato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTU eseguite dalla RER nell'ambito del Progetto Carta Geologica d'Italia. Si tratta di prove eseguite in tutto il territorio di pianura della regione, secondo una distribuzione a “maglia” piuttosto regolare e consentono di avere dati di sottosuolo fino a profondità di oltre -30 metri anche esternamente ai centri abitati.

Presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico comunale è stato inoltre possibile recuperare gli esiti di una prova penetrometrica con “Cono Sismico” spinta fino a -31 m di profondità eseguita in prossimità del centro storico: questa prova consente la misura diretta della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nei sedimenti attraversati, rappresentando un riferimento anche per le elaborazioni delle indagini geofisiche indirette (MASW e ReMi). Si è potuto disporre degli esiti di uno stendimento in array tipo ESAC e seguito nella zona degli stabilimenti Lamborghini.

Presso l'archivio dell'UT comunale, si sono inoltre ottenuti esiti di sondaggi a carotaggio continuo, anche con recupero di campioni indisturbati. Si è così potuto disporre di dati geotecnici ricavati da prove di laboratorio (edometrie; prove di taglio diretto “non drenato”; Limiti di Atterberg e analisi tessiturali) di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale di e per le valutazioni di liquefacibilità dei sedimenti meno profondi (approfondimenti di “livello 3”).

Le figure 4.1 e 4.2 riportano la distribuzione delle prove di repertorio nell'intero territorio comunale, con un ulteriore dettaglio per quanto riguarda l'area del Capoluogo.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato \*.pdf nella cartella Indagini\documenti contenuti nel DVD.

## **4.2 Le indagini effettuate per la microzonazione sismica**

### *4.2.1 Il Piano delle indagini*

Per l'elaborazione della MS di “livello 2” e dei successivi approfondimenti di “livello 3”, si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Si è cercato di concentrare le indagini soprattutto nell'insediato storico del Capoluogo e nelle porzioni di territorio urbanizzato/urbanizzabile maggiormente carenti di informazioni di sottosuolo.

Per quanto riguarda l'insediato storico, in tale zona non si avevano disponibilità di dati sufficienti (come spesso accade per i nuclei abitativi più antichi), inoltre si è ritenuto necessario approfondire le conoscenze sia della propensione alla liquefazione dei sedimenti sottoposti a impulso sismico, sia delle caratteristiche di risposta sismica locale (RSL) dell'area abitata certamente più “vulnerabile” dal punto di vista costruttivo. Per questo motivo, nel centro storico sono state eseguite prove CPTU, registrazioni del rumore sismico passivo HVSR e uno stendimento sismico in “array” bidimensionale (ESAC). In particolare sono state eseguite nove registrazioni HVSR (e con disponibile un'ulteriore prova di repertorio), in quanto tali indagini sono apparse molto utili, come vedremo, a fornire dati sulla RSL nel centro storico; gli esiti delle prove HVSR sono stati comunque confrontati e “tarati” con i dati geofisici e geognostici di disponibili. La prova ESAC, eseguita in un parco pubblico adiacente il centro storico ha inoltre permesso la stima della distribuzione delle velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$  nel sottosuolo fino ad una profondità di circa 60 m. Nel Capoluogo sono state eseguite anche quattro registrazioni HVSR con tempi di acquisizione prolungati fino a 50/60 minuti.



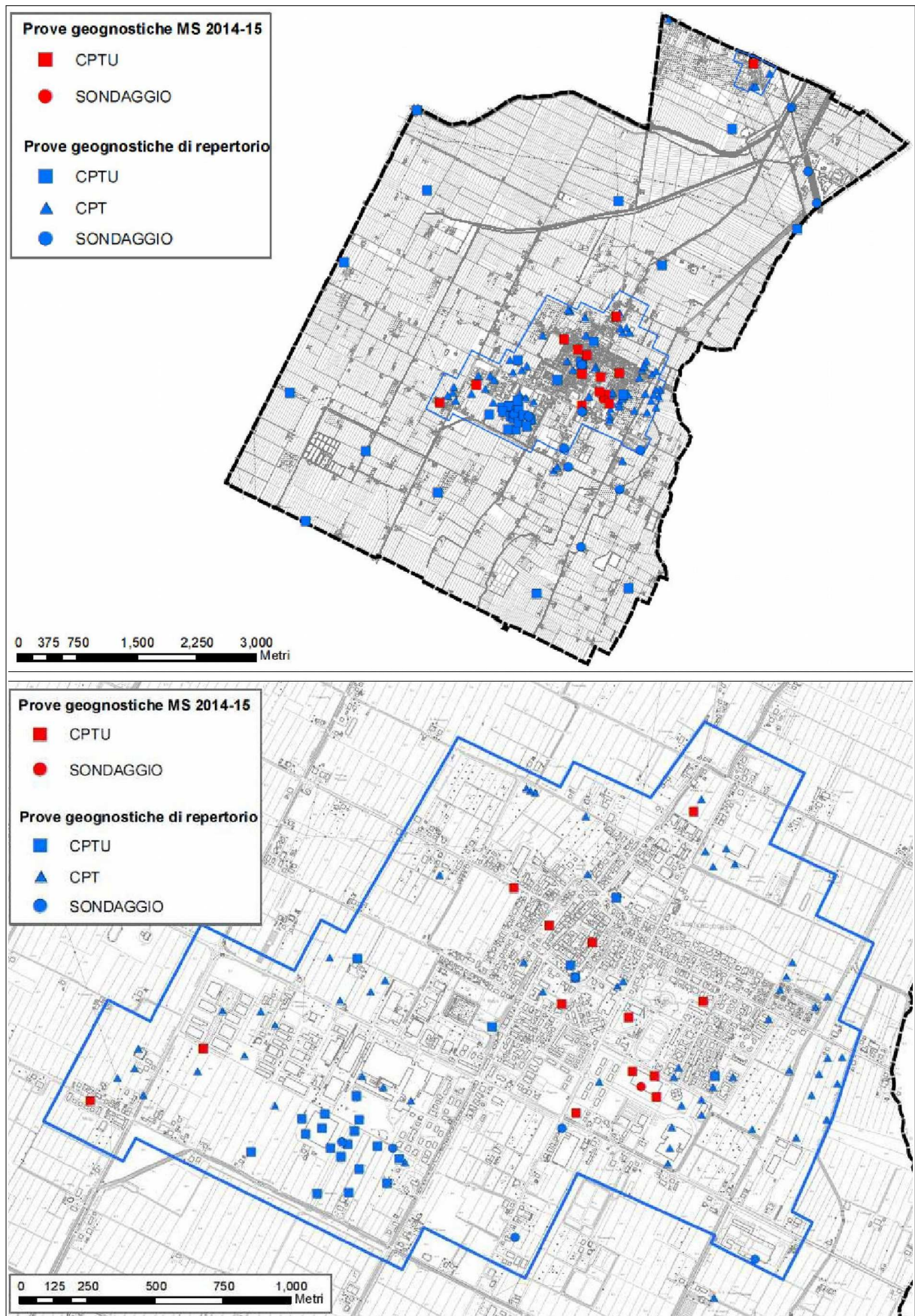


Figura 4.1 - Localizzazione delle indagini geognostiche di repertorio e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'intero territorio comunale (con dettaglio del Capoluogo)



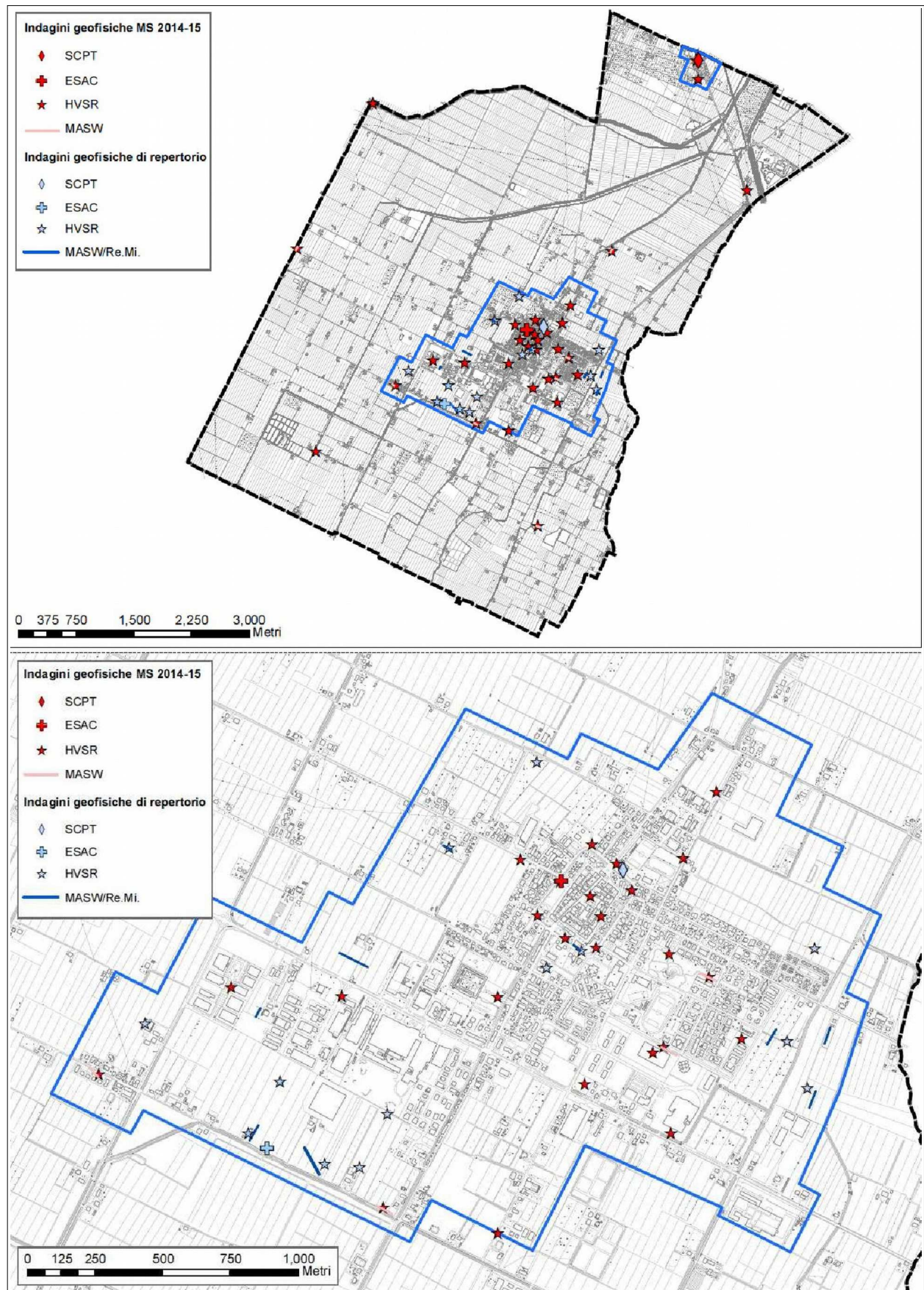


Figura 4.2 - Localizzazione delle indagini geofisiche di repertorio e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'intero territorio comunale (con dettaglio del Capoluogo)

Nell'areale pubblico compreso tra Viale Della Repubblica e Via De Gasperi, limitrofo a strutture scolastiche comunali, è stato inoltre eseguito un sondaggio a carotaggio continuo spinto fino alla profondità di -35 metri. La terebrazione ha consentito il prelievo di campioni disturbati e indisturbati per l'esecuzione di prove di laboratorio di caratterizzazione geotecnica e dinamiche ("colonna risonante"), di fondamentale supporto per le analisi numeriche di RSL espletate per il Capoluogo.

Nella più distante frazione di Crocetta, si è inoltre deciso di eseguire una prova penetrometrica statica con "Cono Sismico" (SCPTU) in quanto l'abitato risultava carente di dati: si è così potuto disporre di informazioni relative alla distribuzione delle Vs nel sottosuolo e, nello stesso tempo, verificare la propensione alla liquefazione dei sedimenti indagati.

Una parte delle indagini geofisiche (nove registrazioni HVSR e tre stendimenti sismici MASW) sono state eseguite anche all'esterno delle aree urbanizzate/urbanizzabili, soprattutto in prossimità di punti di controllo diretti già noti (es. sondaggi e/o penetrometrie CPTU eseguite dalla RER), per consentire un'analisi della pericolosità sismica estrapolabile a tutto il territorio comunale, almeno per quanto riguarda la risposta sismica locale semplificata.

Nei seguenti paragrafi si illustreranno più in dettaglio le indagini eseguite per l'elaborazione della microzonazione sismica di "livello 2" e dei seguenti approfondimenti di "livello 3".

#### *4.2.2 Le indagini geognostiche e geofisiche*

✓ *n. 1 sondaggio a carotaggio continuo* → spinto fino a 35 metri di profondità, è stato eseguito nel Capoluogo, nell'areale di proprietà Comunale situato tra il viale Della Repubblica e via De Gasperi. Si è utilizzata una sonda autocarrata. La terebrazione è proceduta con l'utilizzo di carotieri di diametro pari a 101 mm di tipo semplice T1 e a corona normale, e hanno consentito il campionamento in continuo per la conseguente ricostruzione stratigrafica del terreno. Sono state effettuate manovre di carotaggio di lunghezza <1,5 m per consentire il miglior recupero dei sedimenti in termini di quantità e di minor disturbo. Il carotaggio estratto è stato sistemato in cassette catalogatrici in PVC per la successiva conservazione in luogo riparato.

Durante l'esecuzione del sondaggio sono stati prelevati n. 4 campioni indisturbati mediante appositi campionatori a pareti sottili tipo "Osterberg", spinti a pressione nei sedimenti da terebrare, limitando il disturbo per compressione sul campione (sia fine che sia granulare). Tutti i campioni indisturbati sono stati sigillati su entrambe le estremità della fustella con paraffinatura a caldo e chiusura con tappo. I campioni indisturbati hanno consentito di espletare specifiche prove di laboratorio (prova edometrica; prova triassiale; prove di colonna risonante).

✓ *n. 14 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate dallo Studio scrivente con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su semovente cingolato "Pagani", quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le penetrometrie sono state spinte fino a -20 metri di profondità per definire le



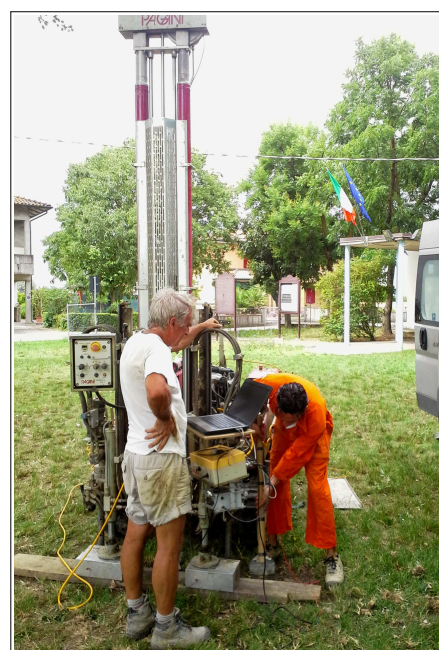
caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma. Le prove elettriche consentono una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).

Foto 4.1 - Una delle prove CPTU eseguite nel Capoluogo (zona "centro storico")



- ✓ n. 1 prova penetrometrica elettrica con piezocono e "Cono Sismico" → realizzata anch'essa con penetrometrico montato su semovente cingolato "Pagani" (foto 4.2). La prova è stata spinta fino a -31 metri di profondità. La punta è dotata di tre accelerometri, che consentono di misurare direttamente la velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ). Le modalità esecutive della prova si basano sull'arresto dell'infissione del piezocono a step regolari (nel nostro caso, la misura è stata eseguita ogni 50 cm nei primi 15 metri di approfondimento e, successivamente, ogni 100 cm), per effettuare l'acquisizione dei dati sismici tramite sensori e sismografo. Il sistema di energizzazione del terreno (sorgente delle onde di taglio) è costituito da due masse metalliche compatte poggianti su traversina in legno, caricata con gli stabilizzatori a pistone del penetrometro ad una distanza di 50 cm dalla verticale di prova. Una delle piastre metalliche viene colpita con una mazza da 10 kg di peso, ad ogni metro di profondità, con le aste svincolate dal penetrometro stesso (figura 4.3).

Foto 4.2 - Prova SCPTU eseguita nella frazione Crocetta.



Tramite i sensori sismici presenti nella punta è possibile rilevare e registrare tali segnali sismici e di conseguenza determinare i tempi necessari alle onde sismiche per percorrere il

tratto da piano campagna fino alla profondità dei sensori (tempi di arrivo). Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è quindi possibile determinare direttamente e con grande precisione le velocità delle onde sismiche S.

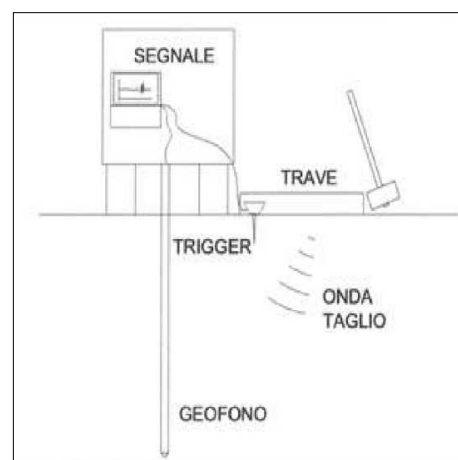


Figura 4.3 – Schema di funzionamento del sismocono

- ✓ *n. 7 prove sismiche in array lineare MASW/ReMi* → Le prove MASW/ReMi hanno consentito la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ) nel sottosuolo fino a circa  $-35 \div 40$  metri di profondità. La prova si basa sulla misura delle onde superficiali (Rayleigh) in corrispondenza di geofoni disposti in linea (foto 4.3). Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni. La spaziatura tra geofoni è stata sempre mantenuta pari a 3 metri, per uno sviluppo complessivo di 69 metri ad esclusione dello stendimento effettuato nella frazione Maggi (circa 35 metri, per limiti di spazio).

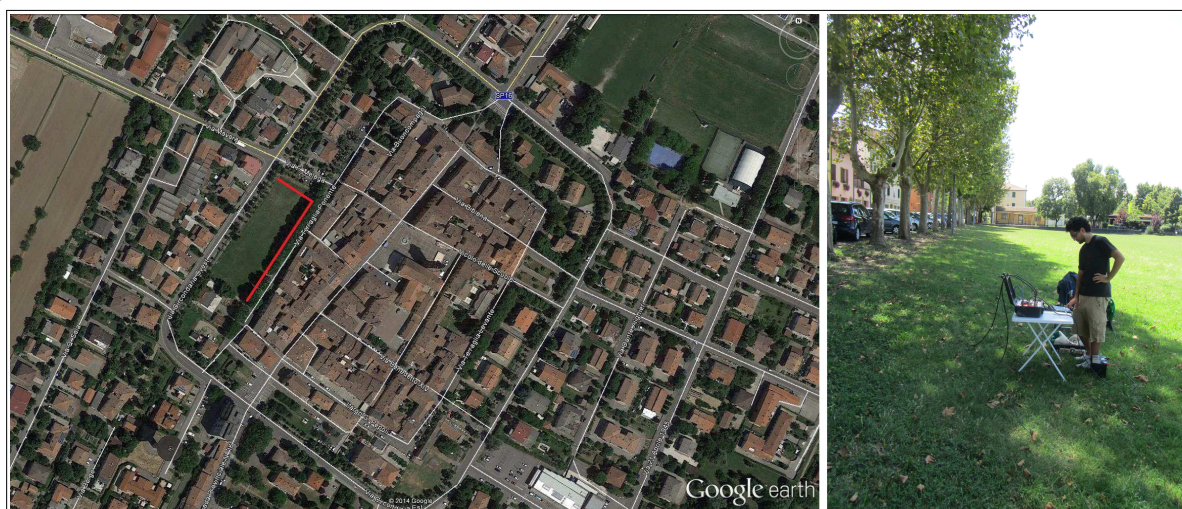


Foto 4.3 – Prova MASW/ReMi eseguita a sud del Capoluogo

L'elaborazione degli esiti (eseguita con software "Geogiga Surface") consiste, sinteticamente, nell'estrazione dei modi dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh e analisi dell'inversione delle curve di dispersione per ottenere profili

verticali delle Vs. La metodologia ReMi (Refractor Microtremor), come la MASW, studia le proprietà dispersive delle onde superficiali (Rayleigh) in modalità di acquisizione passiva, ovvero registrando i microtremori del sottosuolo. Anche in questo caso, si tratta di una prova non invasiva, con array lineare, utilizzando la medesima strumentazione della prova MASW. Lo studio scrivente ha proposto per questo lavoro la combinazione delle due acquisizioni MASW e ReMi, in quanto tale soluzione offre i seguenti vantaggi:

- entrambi i metodi si basano sulle onde Rayleigh e sulla loro dispersione;
  - consente la stima della Vs del sottosuolo a maggiori profondità;
  - si usano sia il rumore ambientale (ReMi) sia una sorgente puntuale artificiale (MASW attiva);
  - la curva di dispersione sperimentale “combinata” può essere definita tra 0 e 60 Hz, quindi sia a basse sia ad alte frequenze.
- ✓ *n. 1 prova sismica in array bidimensionale ESAC (foto 4.4) → il metodo ESAC (Auto Correlazione Spaziale Migliorato) è un'estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957 ed è utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10–15Hz), la velocità di fase apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. L'utilizzo delle tecniche passive sull'analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione Vs può essere ricavata indirettamente dall'analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere i profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio “S” più profonde. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D (figura 4.4), impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz).*

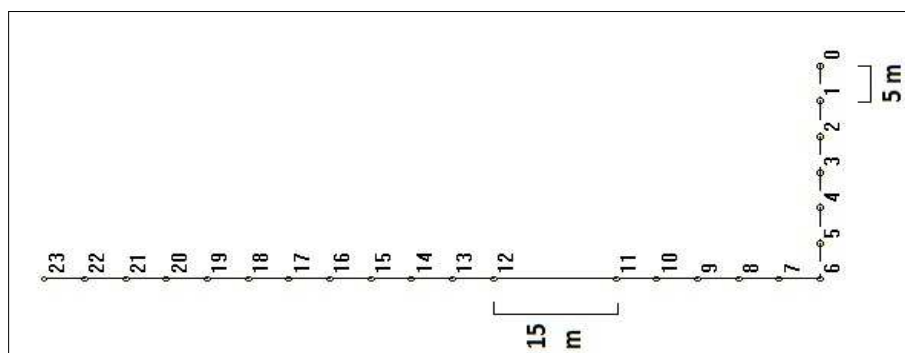


*Foto 4.4 – Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nella zona “centro storico”. La foto riprende il lato più lungo dell'array bidimensionale disposto a “L”*



L'attrezzatura utilizzata per l'acquisizione è la medesima delle prove MASW e ReMi. La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuato secondo un array bidimensionale, disposti a "L" secondo lo schema riportato in figura 4.7) e con una spaziatura di 5 metri (ad esclusione dei due geofoni centrali); ciò che ha consentito di estendere lo stendimento in tutta la superficie disponibile del parco pubblico. La prova ha permesso un'elaborazione di buona qualità fino a una bassa frequenza di circa 2 Hz.

Figura 4.7 - Schema geometrico dello stendimento in array bidimensionale ESAC



- ✓ *n. 33 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola* → Si tratta di una prova non invasiva e l'elaborazione del microtremore misurato fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970). La tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) trova la sua massima applicazione negli studi di risposta sismica locale poiché consente la stima delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo ( $f_r = V_s/4 \cdot H$  con  $H$  = spessore dello strato).

Figura 4.8 - Principali caratteristiche strumentali del tromografo TROMINO

Code	Description
<b>TROMINO® ZERO</b>	<p>All-in-one digital recorder</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10 x 7 x 13 cm, ~ 1 kg</li> <li>1 Gb storage capacity</li> <li>battery powered (AA, 2 x 1.5 V)</li> <li>2 set of spikes for sensor-soil coupling</li> <li>frequency band 0.1-200 Hz</li> <li>• 3 velocimetric channels for seismic ambient microtremor (<math>\pm 1.2</math> mm/s in band)</li> <li>• sampling rates 128, 256, 512 Hz on all channels</li> <li>• rigid transport case</li> <li>• USB cable for data transfer to PC</li> </ul>



Foto 4.5 - Prova HVSR eseguita nel Capoluogo (in prossimità del cinematografo multisala). La freccia rossa indica lo strumento in fase di registrazione.



In questo modo, le misure tromografiche 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, oltre alla possibilità di individuare il bedrock sismico di riferimento. Lo strumento utilizzato (figura 4.5) dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. Si sono eseguite registrazioni di 20 minuti (foto 4.5), oltre a un'acquisizione di 50 minuti, eseguita in adiacenza la prova combinata MASW/ReMi+ESAC, sempre con frequenze di campionamento impostate a 128 Hz.

#### 4.2.3 Le indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel Capoluogo (areale pubblico tra Viale della Repubblica e Via De Gasperi), ha consentito di prelevare campioni disturbati per la classificazione geotecnica dei sedimenti. Sono stati prelevati anche campioni indisturbati sui quali sono state eseguite prove geotecniche in condizioni dinamiche. In sintesi, si sono eseguite:

- ✓ *n. 3 prove di colonna risonante (RC)* → Eseguita su campioni rappresentativi dei sedimenti fini riscontrabili nell'area del Capoluogo. La prova di colonna risonante consente di determinare il modulo di taglio  $G$  e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a 10-5%) fino a circa 10-2%. Viene largamente impiegata in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche (sisma), per le analisi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Sono prove particolarmente utili per le analisi numeriche di risposta sismica locale. Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X-Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza (figura 4.6). I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.

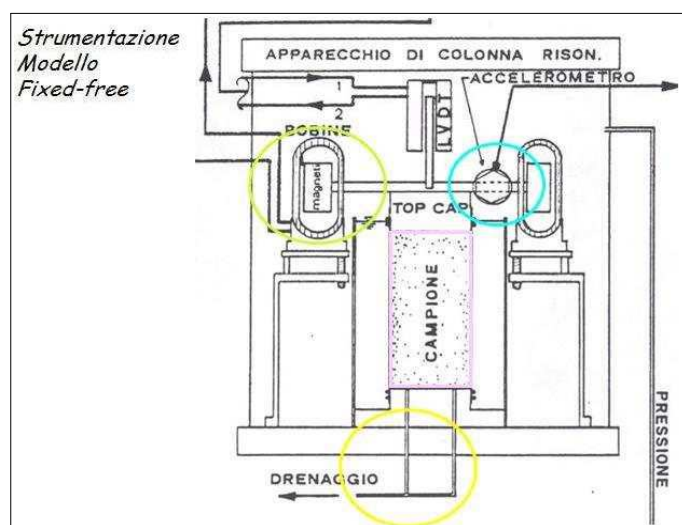


Figura 4.6 - Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO)

- ✓ *n. 1 prova edometrica (EDO IL)* → è stata eseguita una prova edometrica a carico controllato di un provino rappresentativo di sedimenti fini risultati significativamente

compressibili dalle prove CPTU e campionati tra -3,5 m e -4,0 m. La prova è eseguita su campione indisturbato e consiste nel misurare nella direzione verticale l'andamento dei cedimenti nel tempo sotto l'applicazione di carichi progressivamente crescenti e controllati. Il campione è confinato lateralmente da un anello in acciaio ( $\varnothing$  50 mm; h 20 mm) e il drenaggio avviene attraverso pietre porose poste alla base e al tetto del provino. La prova, eseguita dal laboratorio ISMGEO di Seriate (BG) con strumentazione proprietaria, ha previsto un aumento del carico è in progressione geometrica, con una permanenza di ciascun carico sul campione di 24 ore poiché è stato constatato che questo intervallo risulta sufficiente per consentire la consolidazione e definire il ramo secondario della curva cedimenti-tempo. Raggiunto il carico massimo di prova si è iniziata la fase di scarico riducendo gli sforzi sul campione (nel rapporto 4:1) e mantenendo la durata applicazione del carico a 24 ore. Nel corso dei gradini di carico si è provveduto alla misura dei cedimenti in funzione del tempo. Quest'ultima procedura è stata adottata anche per i gradini di scarico. I dati di prova registrati permettono di elaborare le curve cedimento-logaritmo del tempo, di definire il  $t_{100}$  (tempo necessario per l'esaurimento della consolidazione primaria), di determinare i valori dei coefficienti di consolidazione verticale, di permeabilità ed il modulo edometrico (riferito a  $t_{100}$ ). La pendenza del ramo secondario della curva permette la definizione del coefficiente di compressione secondaria.

- ✓ *n. 1 prova triassiale non consolidata non drenata (TX UU) e n. 1 prova triassiale consolidata isotropicamente non drenata (TX CIU)* → eseguite anch'esse in provini rappresentativi di sedimenti fini compressibili, campionati tra -4,0 m e -4,5 m. La prova triassiale consente la determinazione diretta della resistenza al taglio dei sedimenti analizzati. Il provino viene collocato in una cella stagna in grado di riprodurre lo stato tensionale agente in sito mediante pressione idrostatica, nelle tre direzioni ortogonali. Con questa prova è dunque possibile riprodurre ogni situazione di carico e/o disturbo, modificando la tensione verticale e/o la pressione di confinamento. Il test triassiale è costituito da tre distinte prove, su altrettanti provini ricavati dal medesimo campione. Le prove sono state eseguite dal laboratorio ISMGEO di Seriate (BG) con strumentazione proprietaria e consiste nel condurre a rottura i provini, per determinare le resistenze del terreno mediante interpretazione dei diagrammi sforzi-deformazioni e sforzo normale-sforzo di taglio relativi a ciascun provino ( $\tau = c + \sigma \tan\phi$ ).

Nel caso della prova TX UU, la rottura è avvenuta in compressione per carico alla velocità di deformazione prefissata pari a 1 mm/min, registrando il percorso delle sollecitazioni in termini di pressioni totali e la curva sforzi/deformazioni.

Per la prova TX CIU, la rottura in compressione per carico viene condotta a velocità di deformazione controllata per evitare disomogeneità nella distribuzione delle pressioni interstiziali. Per la scelta della velocità di deformazione è stato utilizzato il tempo di consolidazione rilevato per l'ultimo incremento di carico (Bishop et al., 1957). Durante la rottura sono stati registrati il carico deviatorico applicato, la deformazione verticale e



la pressione dei pori mediante trasduttori. La misura delle pressioni interstiziali sviluppate nel corso dell'applicazione dei carichi ha consentito l'interpretazione dei risultati delle prove in termini di tensioni efficaci.

- ✓ *n. 9 prove di classificazione* → sono state effettuate nove prove di classificazione dei sedimenti, prelevati dai campioni indisturbati e dai campioni disturbati del sondaggio. Le prove di classificazione sono state eseguite secondo gli usuali standard di procedura per campioni di terreni: AGI (Associazione Geotecnica Italiana), UNI e ASTM (Volume 04.08 Soil and Rock). Le prove hanno stimato contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo.

## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

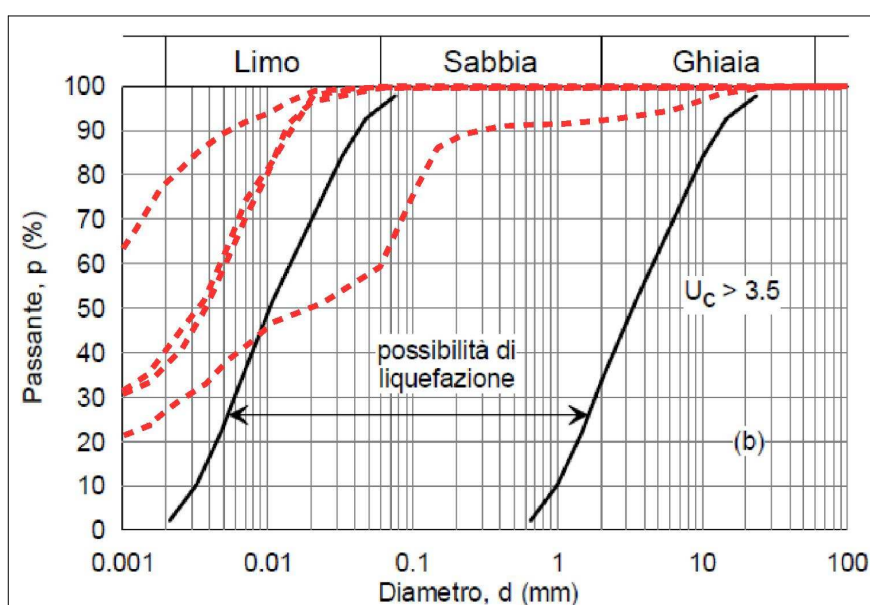
Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

Le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio vengono sintetizzate nella Carta Geologica Tecnica (tavola 2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri) e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4 e paragrafo 8.4), che presenta la suddivisione del territorio dei comuni sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

### 5.1 Litologie sub-affioranti prevalenti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e, in particolare, sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione dei campioni prelevati. Occorre tuttavia precisare che si è potuto disporre di campioni prelevati entro i primi 8 metri grazie al sondaggio eseguito nel Capoluogo e solo su altri tre sondaggi di repertorio (su sette complessivi). Le analisi di laboratorio (tessiture e limiti di Atterberg) eseguite per questo studio su campioni meno profondi prelevati nel sondaggio Capoluogo ( $-1,35 \div 1,45\text{m}$ ;  $-3,88 \div 4,00\text{m}$ ;  $-4,26 \div 4,50\text{m}$ ), sono riconducibili a sedimenti prevalentemente fini con limiti di liquidità sempre  $< 50\%$ : Gli esiti sono tali da includere tutti gli intervalli campionati nella classe USCS/AGI "CL". Tale esito è riscontrato anche nelle analisi di laboratorio di repertorio disponibili: ove disponibili, le caratterizzazioni geotecniche degli strati campionati sono relativi ad alcuni intervalli limoso sabbiosi (di modesto spessore, non rappresentativi della tessitura prevalente) e in altri casi riferibili agli intervalli prevalentemente fini (prevalenti). In sintesi, le colonne di sedimenti superficiali riferite ai soli sondaggi che possiedono esiti di classificazione geotecnica derivata da prove di laboratorio, sono tutte attribuite alle classi USCS/AGI denominate "CL" e "ML".

*Figura 5.1 - Esiti granulometrici ricavati dai campioni del sondaggio eseguito nel Capoluogo (tra Viale della Repubblica e via De Gasperi). La figura riporta le fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione (da AGI, 2005)*



La figura 5.1 riporta il confronto delle analisi tessiturali eseguite nei campioni più superficiali (tra -1,35 m a -7,60 m) prelevati con il nuovo sondaggio eseguito nel Capoluogo.

I dati diretti risultano tuttavia rarefatti e per questo motivo si è deciso di considerare anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche. In particolare, le prove CPTU regionali e le prove CPTU eseguite per questo lavoro permettono di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

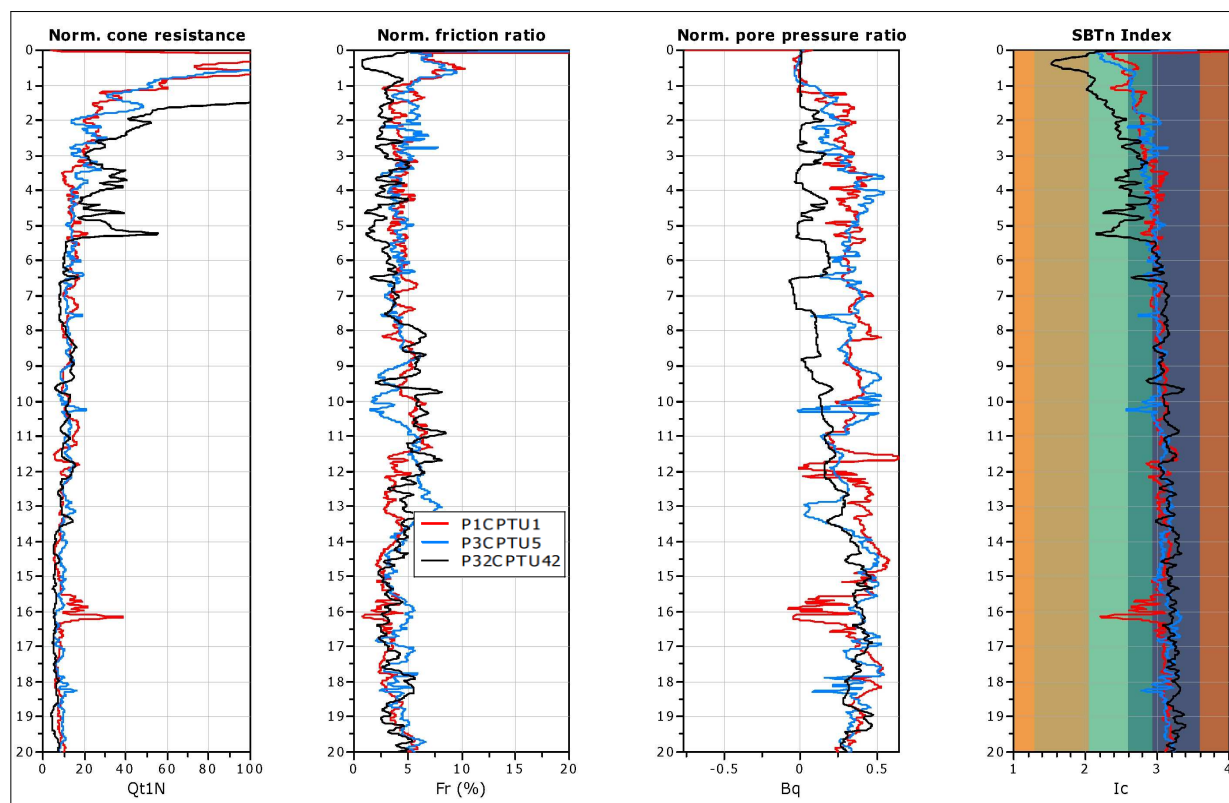


Figura 5.2 – Esiti tessiturali ricavati da prove CPTU: la prova CPTU42 (B/D RER) è stata classificata “ML” mentre le prove CPTU1 e CPTU5 sono state classificate “CL”

La figura 5.2 riporta alcuni esiti tessiturali ricavati da prove CPTU della zona Capoluogo, con dati numerici disponibili.

Si sono tuttavia considerate anche le indagini penetrometriche di repertorio delle quali abbiamo potuto disporre dei soli grafici di resistenze. Tutte queste informazioni, hanno permesso una classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.0) e sulla prevalenza tessutturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a circa -6 metri dal piano campagna. La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo” caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio. Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate. Inoltre, la profondità considerata (-6 metri) rispetto a colonne più profonde consente una migliore enfaticizzazione dei livelli limoso sabbiosi più superficiali (colonne stratigrafiche classificate come “ML”). La figura 5.3 riporta una sintesi della classificazione geotecnica del sottosuolo



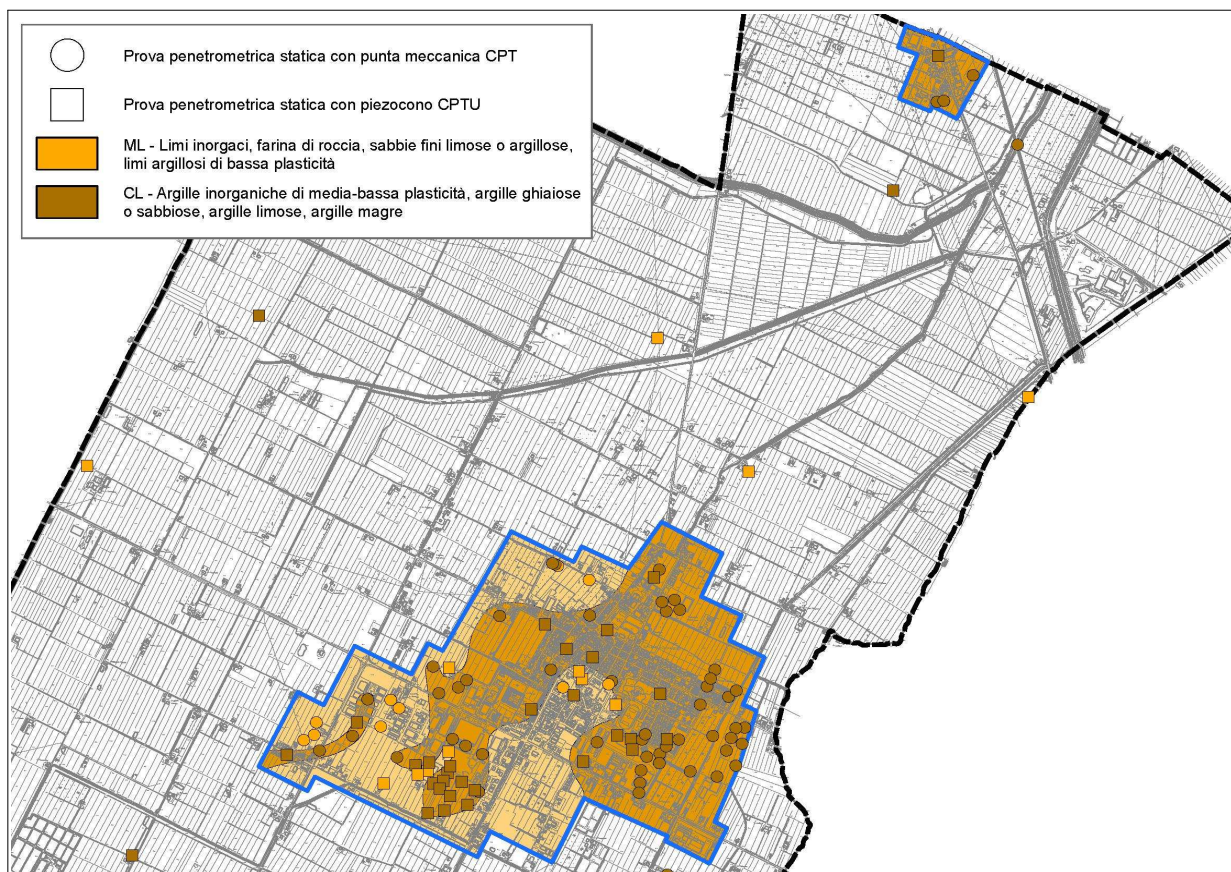


Figura 5.3 – Classificazione secondo il sistema USCS/AGI delle colonne di sedimenti fino a -6 metri, estrapolate dalle prove geognostiche (sondaggi e penetrometrie CPT /CPTU)

Lo studio di MS di “livello 2” aveva inoltre riscontrato la presenza (nei primi 6 metri di sottosuolo) di sedimenti caratterizzati da basse resistenze di punta e coesione, interpretabili come livelli torbosi. In particolare, l'intervallo di sedimenti di più scarsa consistenza è diffusamente localizzato ad una profondità di circa 4÷5 metri (figura 5.4).

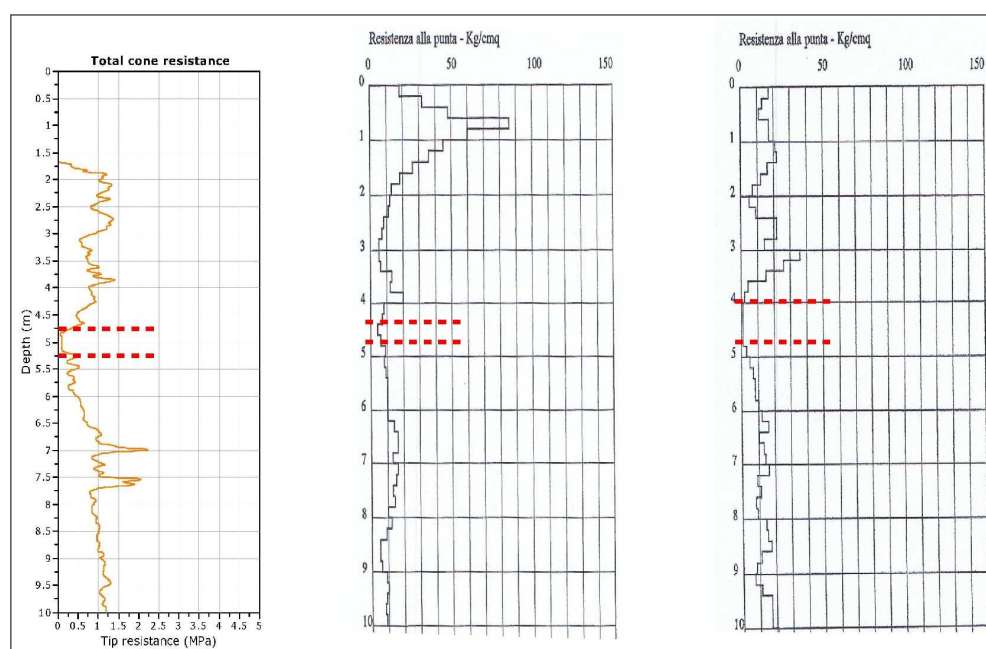


Figura 5.4 – Confronto tra prove penetrometriche che evidenziano un intervallo di bassa consistenza nei primi 6 metri di sottosuolo

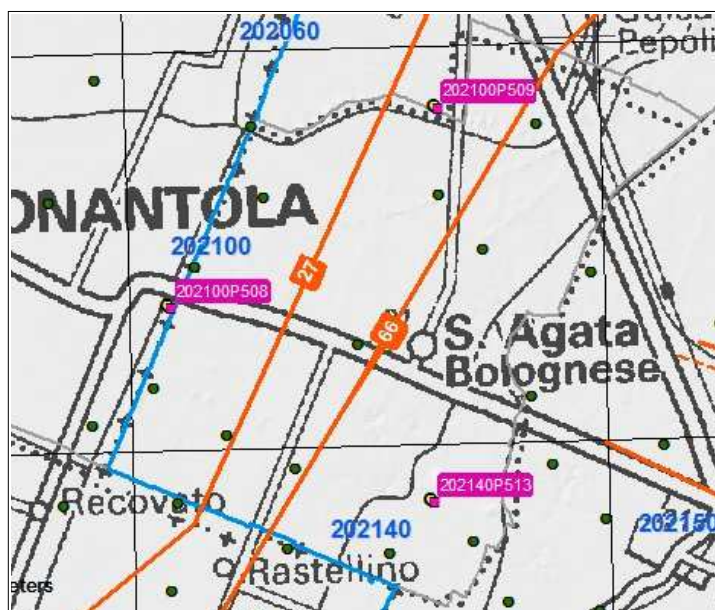
In tal senso, lo studio di MS di “livello 2” aveva delimitato due “zone di attenzione” nell'area urbana/urbanizzabile del Capoluogo, con sovrapposizione di instabilità differenti (liquefacibilità e cedimenti post sisma), rimandando ad ulteriori approfondimenti, espletati con questa ulteriore fase di studio (vedi Capitolo 7).

In conclusione, i dati di sottosuolo ricavati dalle indagini geognostiche disponibili hanno permesso la zonizzazione geotecnica delle aree urbane/urbanizzabili, i cui esiti sono riassunti nella Tavola 2 di microzonazione sismica: la zonizzazione si basa sulle tessiture prevalenti della colonna di sedimenti fino ad una profondità di -6 metri. Tale intervallo è da ritenersi maggiormente confrontabile con il “volume significativo” di sedimenti relativo alla maggior parte degli edifici esistenti e/o da progettare (edifici di normale impegno costruttivo, dotati di fondazioni dirette).

## 5.2 Sottosuolo profondo

I dati di riferimento sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale.

In tal senso, sono disponibili sondaggi a carotaggio continuo del SGSS, spinti fino a circa -47 m dal p.c. (figure 5.5 e 5.6) e più profondi “pozzi per acqua”, le cui stratigrafie (di scarso dettaglio) sono state incluse nella B/D geognostica regionale.



*Figura 5.5 - Tracce delle sezioni geologiche che attraversano il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese (sezioni pubblicate nel sito del SGSS regionale)*

Le terebrazioni citate hanno contribuito all'elaborazione di due sezioni geologiche profonde della pianura (anch'esse pubblicate nel sito del SGSS regionale) che interessano anche Sant'Agata Bolognese: le tracce delle sezioni n. 27 e n. 66 attraversano il territorio comunale da SSO s NNE. In particolare, la sezione n.66 (denominata per questo lavoro 2-2'), riprodotta in figura 5.7, attraversa le aree urbane/urbanizzate del Capoluogo e delle frazioni di Maggi e Crocetta, evidenziando il complessivo approfondimento, verso Crevalcore, delle sequenze alluvionali profonde.

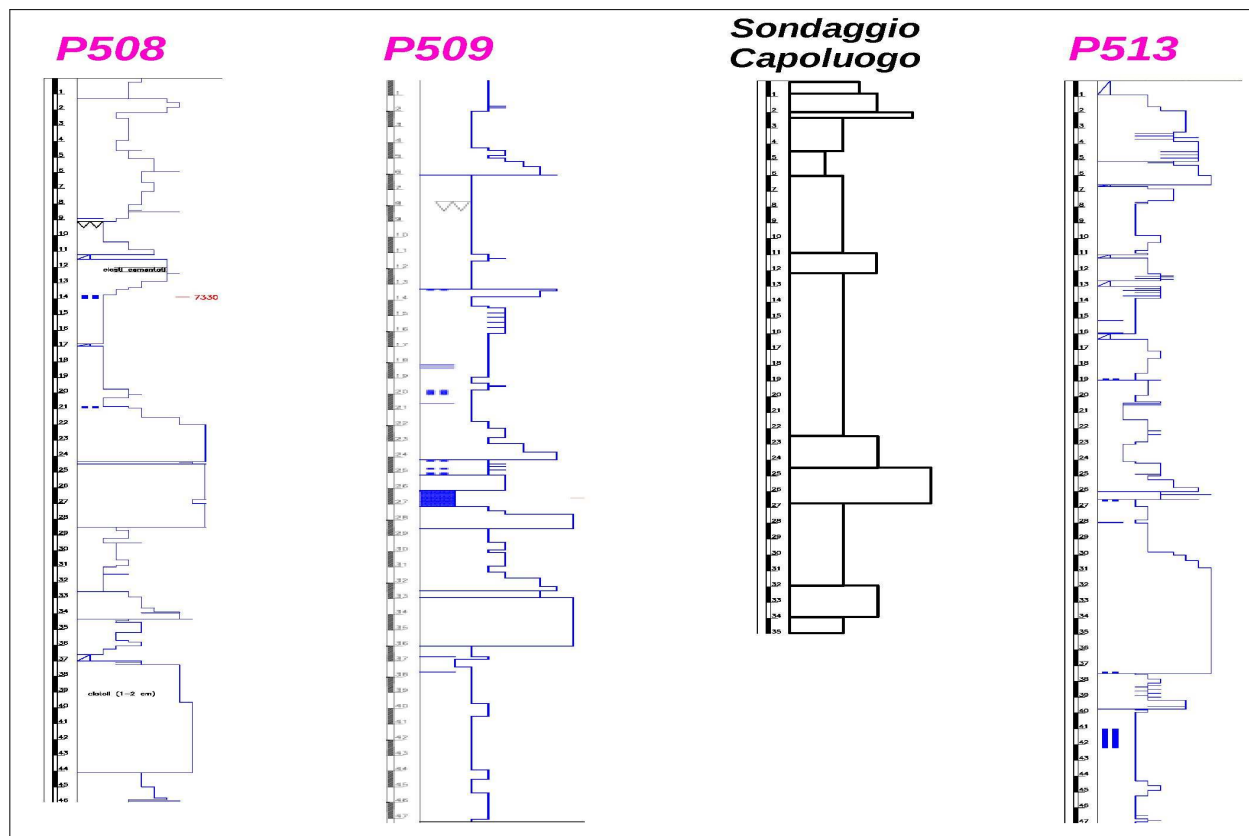


Figura 5.6 – Stratigrafie schematiche dei sondaggi a carotaggio pubblicati nella B/D geognostica RER e del sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo per lo studio di MS

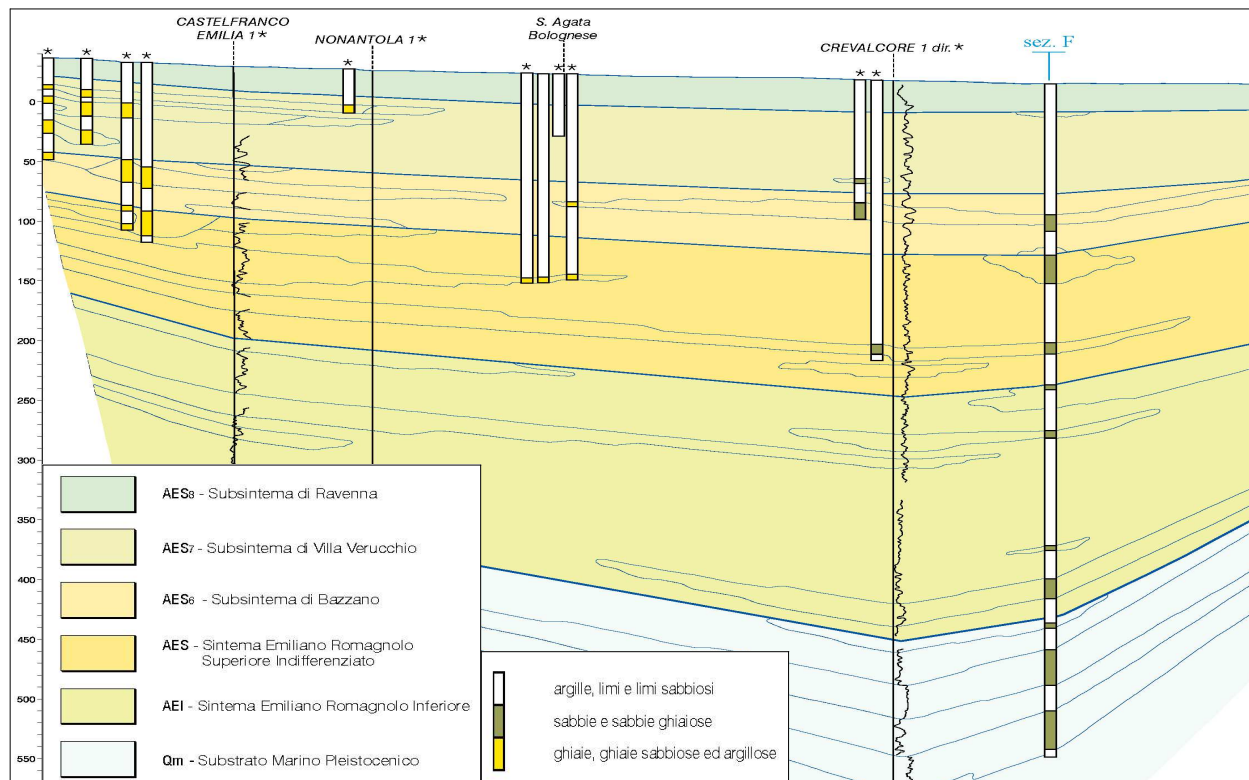
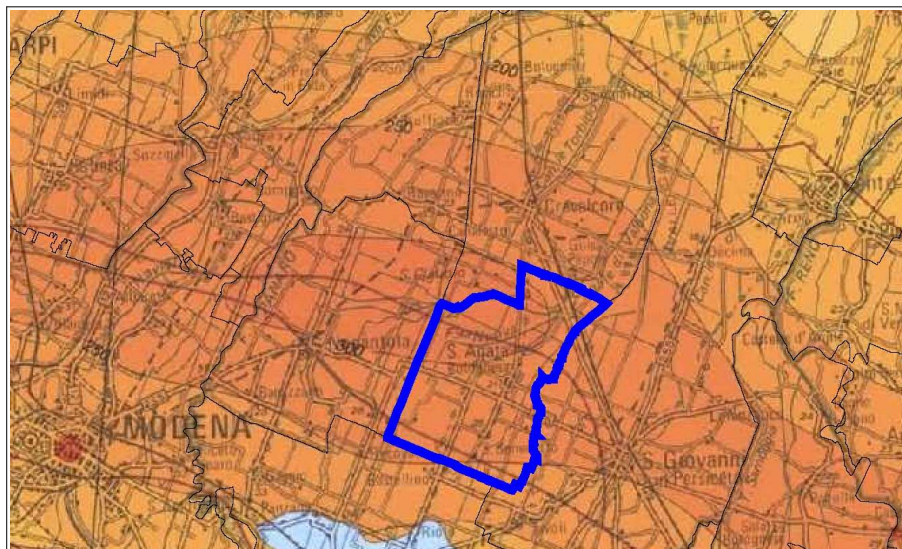


Figura 5.7 – Stralcio della Sezione geologica n.66 (pubblicata nel sito del SGSS regionale)



*Figura 5.8- Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS e CNR, 2004) e territorio comunale di Sant'Agata Bolognese. Le aree in arancio discriminano differenti profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore AES (le quote delle isobate si riferiscono al livello medio del mare)*



Come già descritto nel Capitolo 3, Sant'Agata Bolognese ricade nell'ampia sinclinale “Bologna-Bomporto-Reggio Emilia”, con spessori delle coperture alluvionali più importanti. In particolare, la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000) colloca il territorio in questione parzialmente situato sulla zona di maggiore depressione della sinclinale (individuabile tra Sant'Agata Bolognese e Crevalcore e fino a NO di Nonantola): la base del Sintema AES viene stimata a circa  $-250/300$  m slmm (figura 5.8).

Ulteriori e fondamentali informazioni di caratterizzazione sismostratigrafica sono inoltre ricavate dai recenti studi di microzonazione sismica delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio 2012 (studi elaborati dal SGSS della RER – Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012). Tra i territori interessati da tali studi vi è, ad esempio, il limitrofo Comune di Crevalcore (BO).

Le indagini eseguite per gli studi di MS ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012 hanno evidenziato come, dal punto di vista geofisico, il sottosuolo della pianura studiata presenti differenze laterali minime, almeno fino alla profondità di 50–60 metri, e che i valori equivalenti delle velocità di taglio delle onde sismiche nei primi 30 metri di sottosuolo ( $V_{s30}$ ) sono sempre inferiori a 220 m/s (confermato da prove DH e CH in sondaggi e sia da prove SCPTU). Ad esempio, la prova in foro “Down-Hole” eseguita a Crevalcore (spinta fino a 51 m di profondità) ha misurato una  $V_{s30}$  pari a circa 197 m/s. Le indagini sismiche più profonde (prove “Cross-Hole”), eseguite nei sondaggi di Medolla e di Mirandola, hanno fornito valori di  $V_s$  di tutta la successione alluvionale in media dell'ordine di 300–350 m/s e valori maggiori di 700 m/s per il substrato marino, raggiunto rispettivamente a profondità di 96 metri e 113 m dal p.c. (aree di “anticlinale”).

Gli studi regionali hanno inoltre consentito di estrapolare la base del subsistema AES6 nei territori comunali danneggiati dal sisma 2012, in relazione alle amplificazioni spettrali ricavate dalle numerose registrazioni HVSR: a Sant'Agata Bolognese (situata al margine dell'elaborazione regionale) la base EAS6 risulterebbe profonda oltre 100 metri rispetto al piano campagna (figura 5.9), con frequenze fondamentali  $f_0 < 1$  Hz.

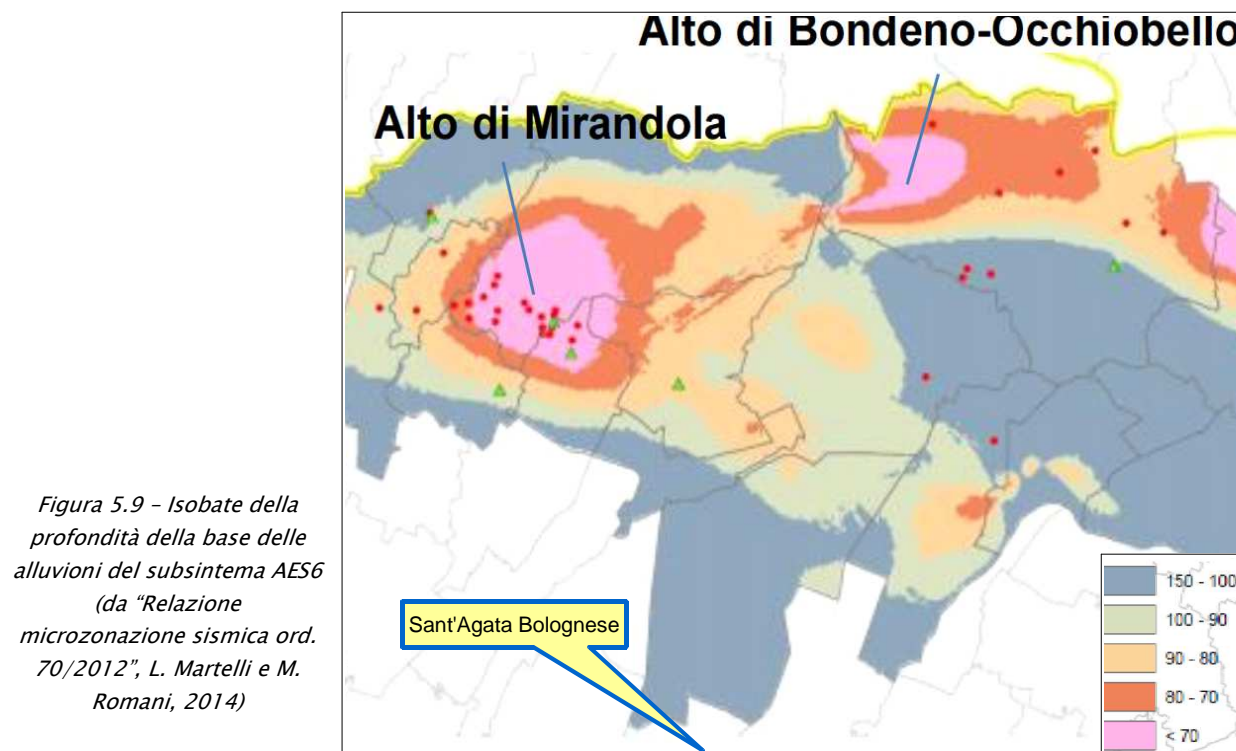


Figura 5.9 – Isobate della profondità della base delle alluvioni del subsistema AES6 (da “Relazione microzonazione sismica ord. 70/2012”, L. Martelli e M. Romani, 2014)

Le indagini HVSR eseguite nel territorio comunale di Sant'Agata Bolognese per lo studio di MS, forniscono ulteriori elementi relativamente alla profondità del bedrock sismico (inteso come superficie sepolta caratterizzata da forte contrasto di impedenza), sulla base della relazione tra frequenza fondamentale ( $F_0$ ) e velocità delle onde di taglio  $V_s$ . In tal senso, le registrazioni tromografiche hanno evidenziato picchi massimi nello spettro H/V tra 0,8 Hz e 1,2 Hz. Tuttavia, questa “variabilità”, è presumibilmente da ricondurre ad anomalie del segnale sismico registrato piuttosto che a difformità sismostratigrafiche.

Le registrazioni HVSR hanno riscontrato amplificazioni spettrali anche a più basse frequenze, fino a circa 0,6 Hz. Per questo motivo, nel Capoluogo sono state eseguite prove HVSR con tempi di registrazione prolungati fino a 40' e 60' per tentare di ricavare spettri H/V più definiti alle basse frequenze e ottenere ulteriori elementi utili per definire il bedrock sismico. Queste ultime registrazioni hanno confermato le frequenze fondamentali a circa 1 Hz e hanno inoltre consentito di distinguere in modo più marcato i picchi spettrali rilevati a più basse frequenze (circa 0,6 Hz).

La figura figura 5.10 propone un confronto degli spettri di amplificazione H/V ricavati dalle prove HVSR eseguite nel territorio urbanizzato/urbanizzabile di Sant'Agata Bolognese e nella più lontana frazione Crocetta. Per quanto riguarda il Capoluogo, le prove eseguite nel settore sud-ovest (grafico in basso di figura 5.10) includono due registrazioni di repertorio, eseguite con strumentazione HVSR differente da quella utilizzata per le registrazioni della MS: le tracce spettrali risultano, tuttavia, assolutamente coerenti, individuando anch'esse i massimi picchi rispettivamente a circa 1,0 Hz e 0,6 Hz.

Ulteriori elaborazioni e commenti relativi alle registrazioni sismiche HVSR eseguite nel Comune di Sant'Agata Bolognese sono riportati nei capitoli a seguire.

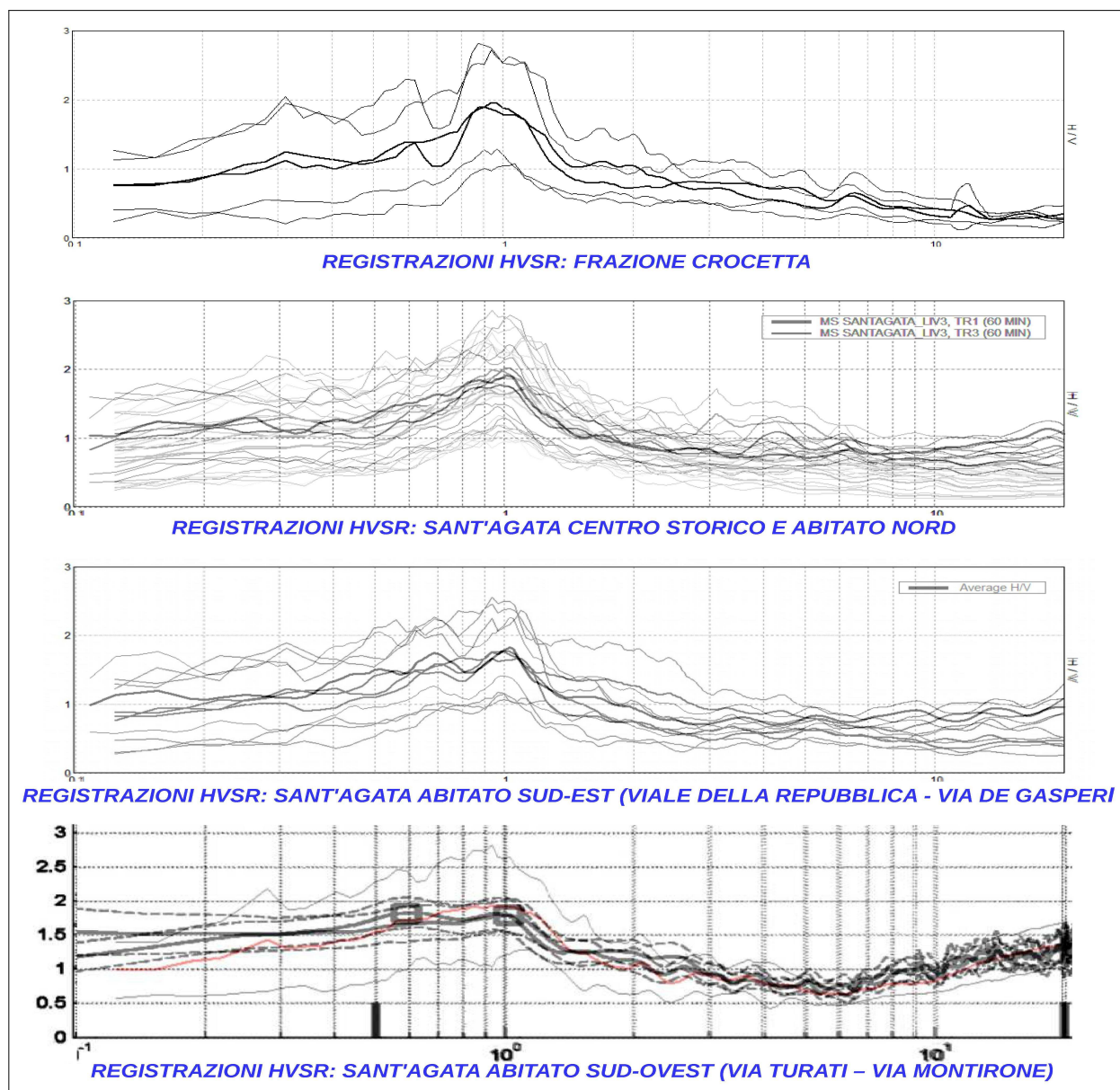


Figura 5.10– Spettri di amplificazione H/V ricavati dalle registrazioni tromografiche effettuate nell'areale urbanizzato/urbanizzabile del Capoluogo per lo studio di MS. Le registrazioni sono suddivise per tre principali settori: centro storico e abitato nord; abitato sud-est; abitato ovest). Per il settore sud-ovest sono state considerate una prova HVSR eseguita per la MS (con "Tromino", evidenziata in rosso) e due prove di repertorio eseguite con differente strumentazione digitale (sismometro SARA Electronics, mod. SR04HS, riportate in nero)

Le terebrazioni e le indagini geofisiche eseguite per lo studio di MS del Comune di Sant'Agata Bolognese (Sondaggi; CPTU; MASW/ReMi; ESAC e "Coni Sismici"), hanno consentito un ulteriore dettaglio delle caratteristiche sismostratigrafiche dei sedimenti e in particolare della stima delle velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$  (figura 5.11).

Le indagini geofisiche hanno ricavato esiti di  $V_{s30}$  compresi tra 181 m/s e 225 m/s (figura 5.12), in coerenza con quanto atteso (ad esclusione di una sola prova MASW di repertorio, che fornisce una  $V_{s30}$  probabilmente sovrastimata e pari a circa 228 m/s). La prova ESAC eseguita nel Capoluogo (zona "centro storico") ha inoltre permesso la stima della distribuzione delle  $V_s$  fino ad una profondità pari a circa -60 metri, come riportato nel grafico di figura 5.13.



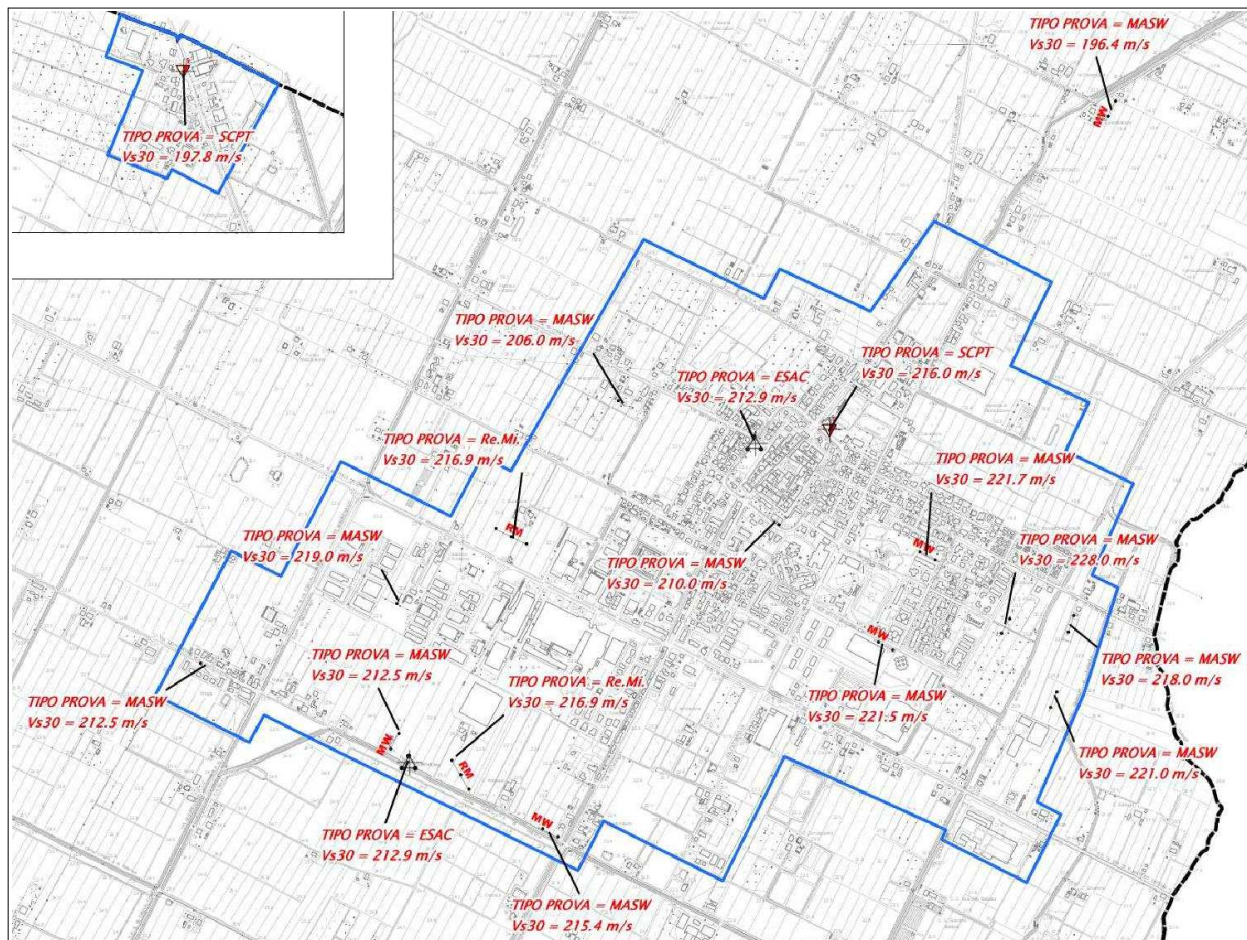


Figura 5.11 – Localizzazione delle indagini geofisiche nel Capoluogo ed esiti di Vs30 ricavati dalle prove (di repertorio ed eseguite per lo studio di MS)

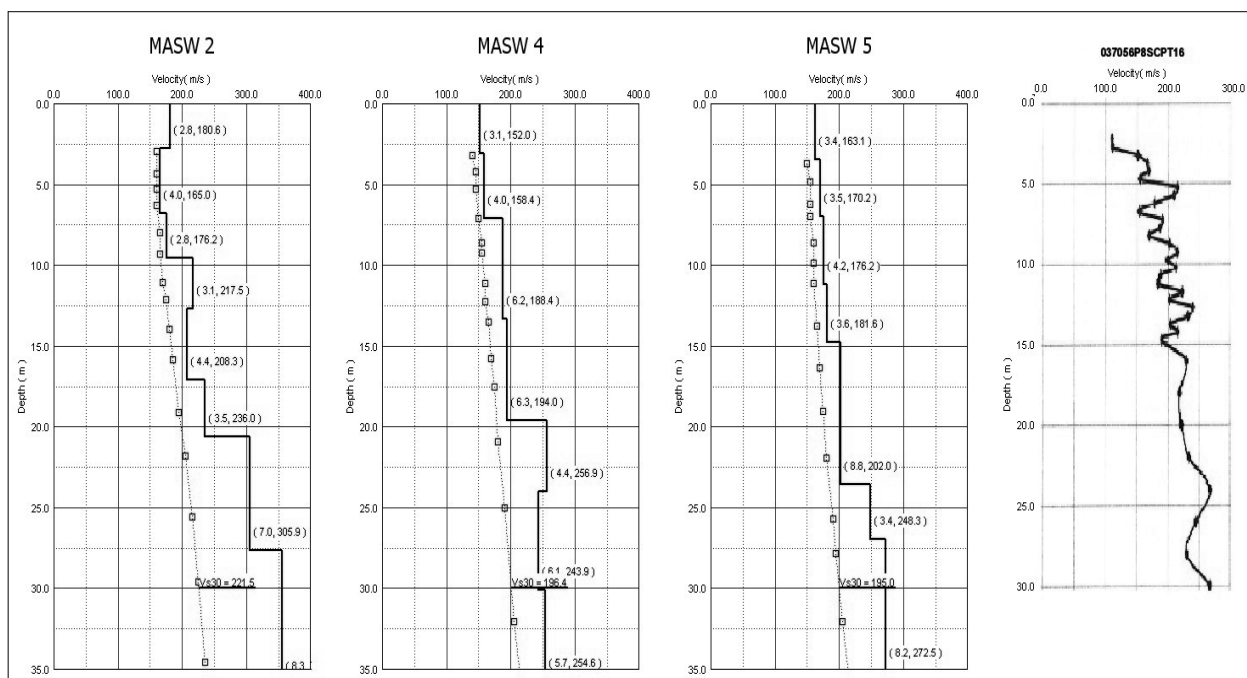


Figura 5.12 – Distribuzione delle Vs ricavate dal “Cono Sismico” (eseguito nella frazione Crocetta) e da prove combinate MASW/ReMi eseguite nel territorio comunale per lo studio di MS

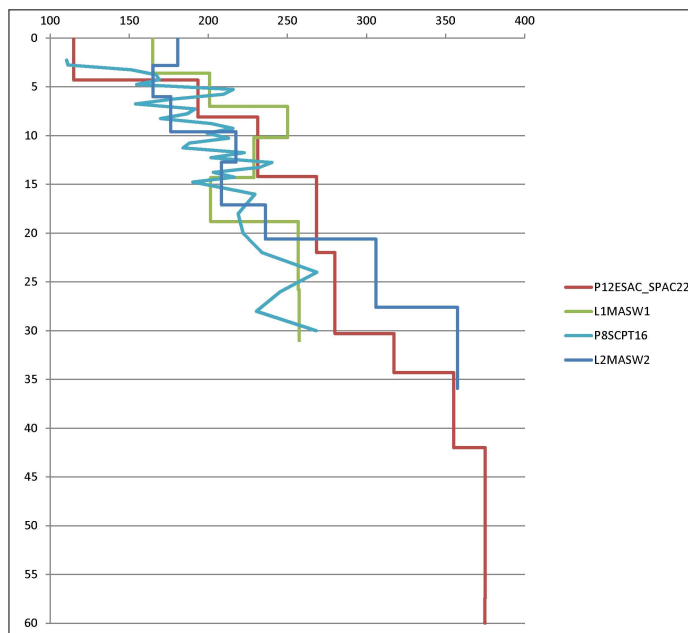


Figura 5.13 – Distribuzione delle Vs nel sottosuolo (zona “centro storico” del Capoluogo): il grafico riporta il confronto tra le indagini disponibili (“Cono Sismico”; MASW/ReMi; ESAC)

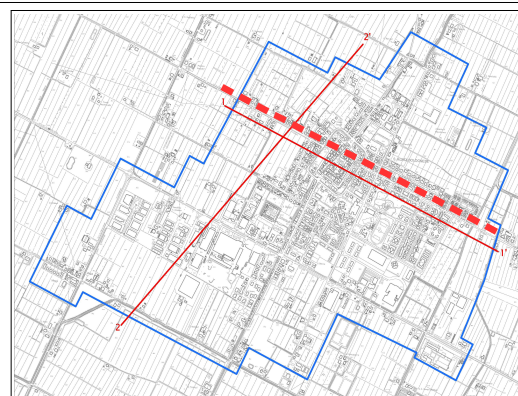
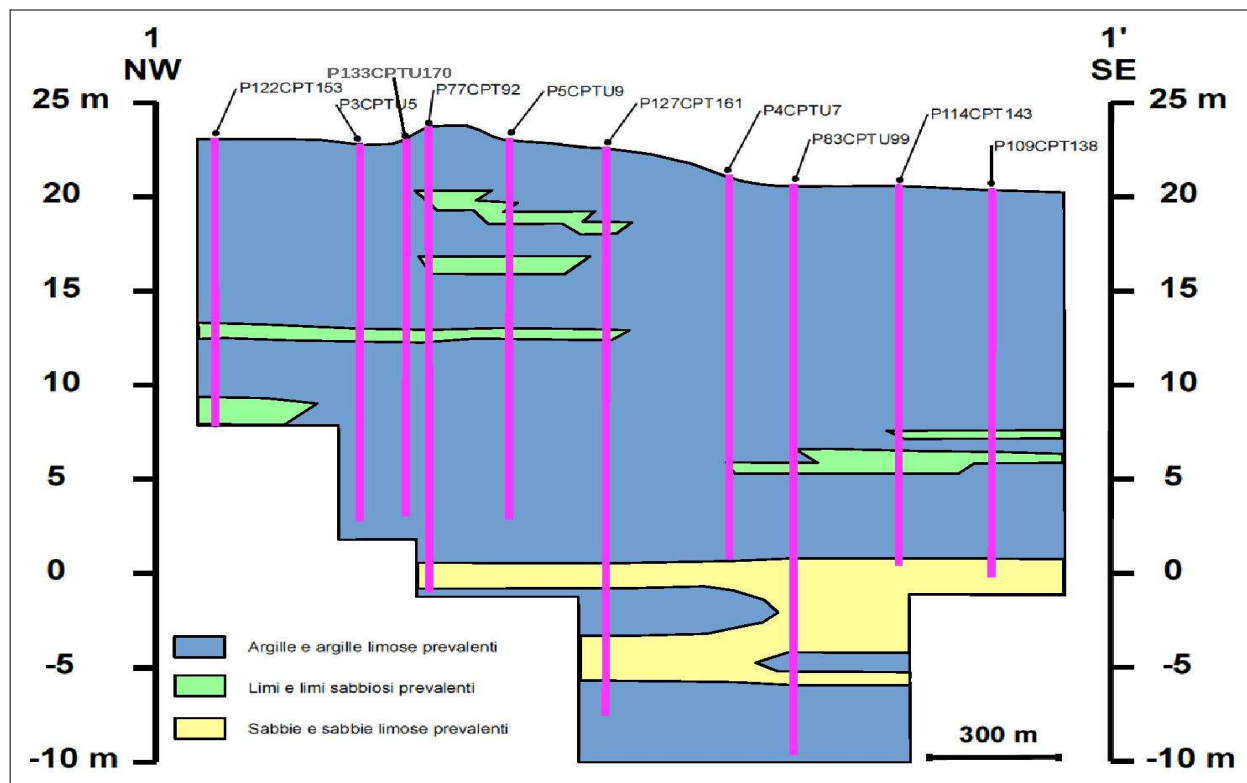


Figura 5.14– Sezione geologica 1-1' elaborata per il Capoluogo. A dx la localizzazione delle sezioni che intersecano Sant'Agata Bolognese (in tratteggiato rosso la sez. 1-1')

Le terebrazioni geognostiche disponibili nella zona Capoluogo hanno permesso l'elaborazione un'ulteriore sezione geologica (denominata 1-1'), in questo caso sviluppata da ovest a est e che risulterà di fondamentale utilità anche per le elaborazione numeriche della RSL. Si tratta di uno schema litologico meno profondo, cioè elaborato fino alla profondità massima di circa 30 metri, ma più dettagliato dal punto di vista della caratterizzazione tessiturale. La sezione, riportata in figura 5.14, consente di evidenziare:

- una zona morfologicamente rilevata nella porzione centro-ovest della traccia, attribuibile a un paleodosso fluviale sul quale si insedia il nucleo storico di Sant'Agata Bolognese (si anche rimanda al capitolo 3);
- la presenza di sedimenti prevalentemente fini (argille e argille limose) nei primi 20÷25 metri di sottosuolo, con intercalati rari livelli granulari (per lo più limoso sabbiosi), più frequenti soprattutto nella porzione centro-ovest della traccia e quindi del Capoluogo;
- la presenza di uno spessore di sabbie e sabbie limose più potente, probabilmente continuo almeno nell'area Capoluogo, il cui tetto è collocato ad una profondità di circa 20÷25 metri. Questo intervallo sedimentario è attribuibile all'attività deposizionale del Fiume Panaro (lobi distali della sua conoide alluvionale) e sede della prima importante falda freatica della zona.

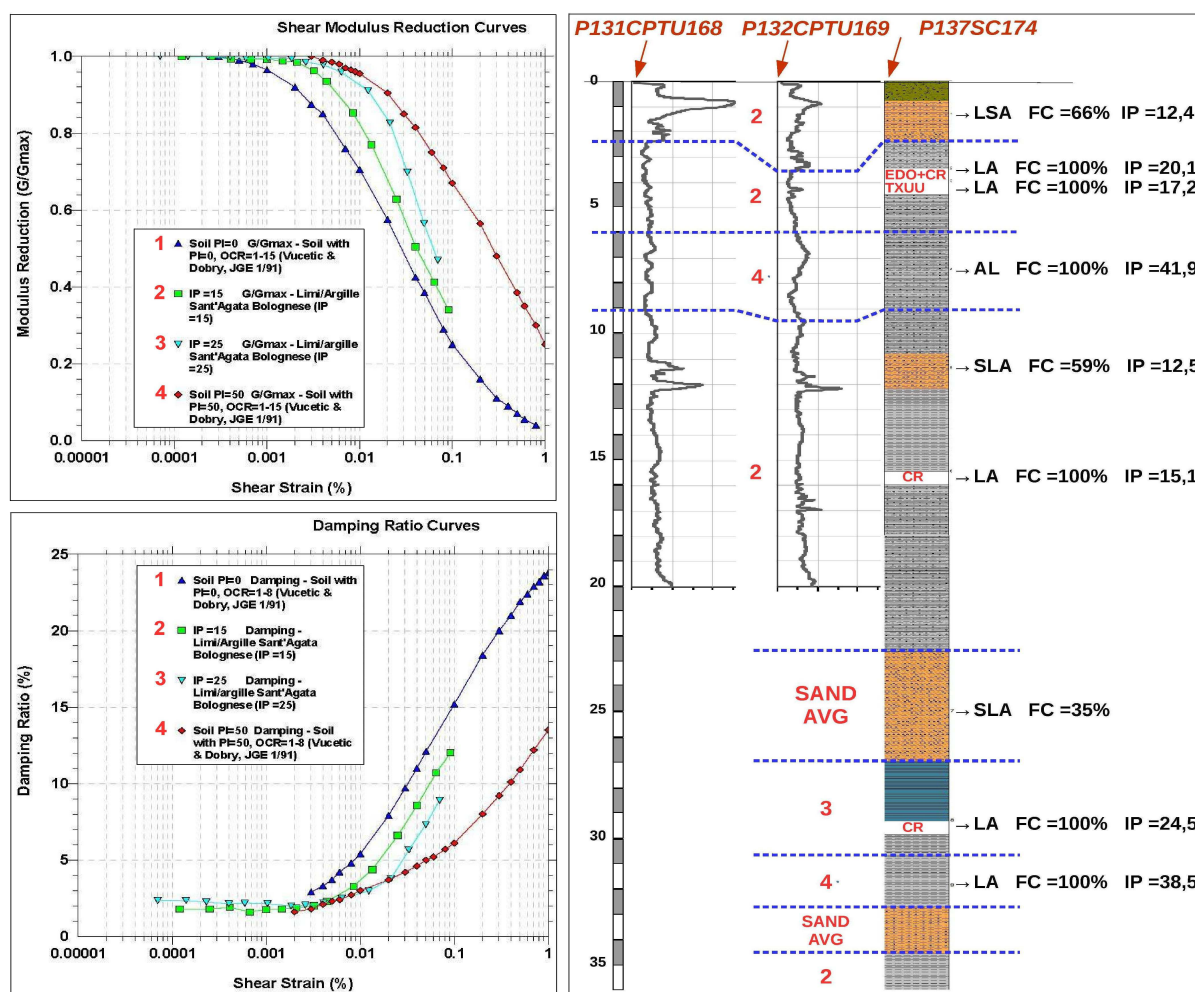


Figura 5.15- Modellazione sismostratigrafica dei sedimenti investigati dal sondaggio e dalle prove CPTU limitrofe (Capoluogo, tra via Della Repubblica e via De Gasperi). La figura riporta le curve di decadimento dei sedimenti argillosi/limosi di riferimento per le modellazioni numeriche della RSL di Sant'Agata Bolognese: bibliografiche per  $IP=0$  e  $IP=50$  (Vucetic & Dobry, 1991) e sito specifiche per  $IP=15$  e  $IP=25$  (ricavate dalle prove di "colonna risonante")



Ulteriori elementi conoscitivi del sottosuolo sono ricavati dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo per lo studio di MS. Questa terebrazione, spinta fino a  $-35$  m slm, ha consentito sia una migliore caratterizzazione tessiturale fino alla massima profondità investigata, sia la possibilità di ottenere campioni disturbati e indisturbati sui quali sono state effettuate prove di laboratorio di caratterizzazione geotecnica (es. tessiture e limiti di Atterberg) e le prove di “colonna risonante” (RC), di fondamentale importanza, come vedremo (cfr. Capitolo 6), per l'elaborazione dei modelli numerici di risposta sismica locale del Capoluogo. Gli esiti di plasticità ottenuti dai campioni argillosi/limosi e gli esiti di CR hanno infatti permesso di ricavare una casistica sito specifica delle proprietà dinamiche dei sedimenti fini utilizzati per la modellazione numerica di RSL del Capoluogo (figura 5.15). Le proprietà dinamiche dei granulari sono invece ricavate da fonti bibliografiche (figura 5.16)

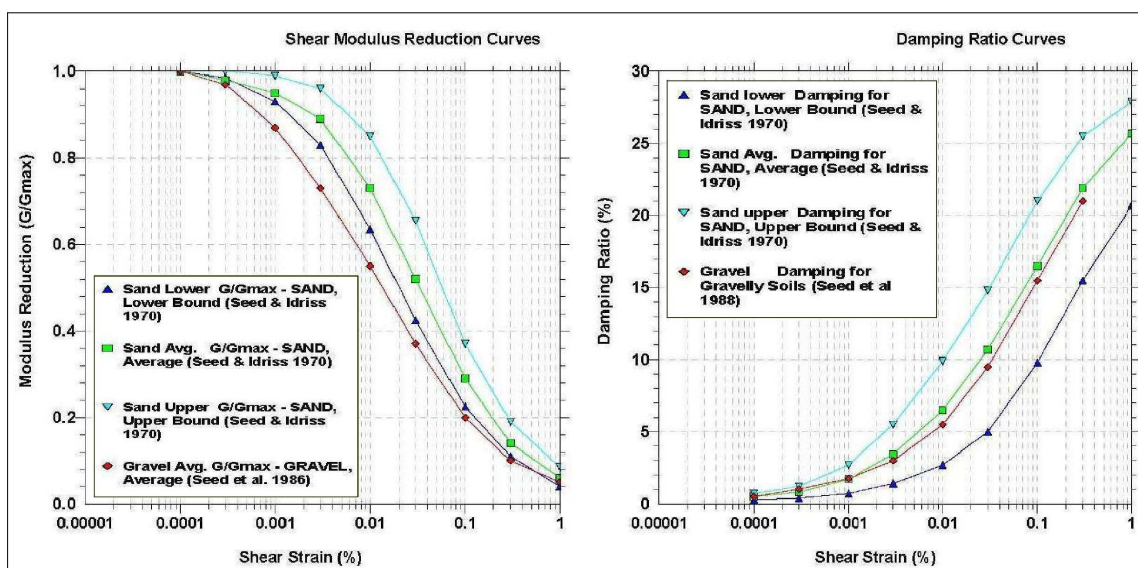


Figura 5.16- Curve di decadimento da fonti bibliografiche dei sedimenti granulari, di riferimento per le modellazioni numeriche della RSL di Sant'Agata Bolognese

## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo si introducono le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando di valutare anche le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili in questo livello di approfondimento.

Si rammenta che lo studio di microzonazione sismica di “livello 2” (Sangiorgi, 2014) ha integrato i dati geognostici/geofisici di repertorio e disponibili con specifiche prove “in situ” (penetrometrie CPTU; “Cono Sismico”; array MASW/ReMi; array ESAC; registrazioni HVSR) per consentire una migliore “copertura” conoscitiva del territorio comunale. Lo studio di MS di “livello 2” ha consentito di definire le zone MOPS e in particolare di individuare “zone di attenzione” localizzate nell'areale urbanizzato/urbanizzabile del Capoluogo e relative a potenziale liquefacibilità e a potenziali cedimenti post sisma.

Le “zone di attenzione” sono state pertanto ulteriormente investigate da prove e interessate da approfondimenti sismici di “livello 3” (analisi numeriche della risposta sismica locale; verifiche di liquefacibilità; stima dei cedimenti post sisma).

### 6.1 La modellazione della risposta sismica locale

Tra gli obiettivi degli approfondimenti espletati, vi è stato, innanzitutto, quello di definire con maggior dettaglio il bedrock sismico di riferimento per le modellazioni numeriche di RSL.

In questo senso, le indagini eseguite per gli studi di microzonazione sismica nei Comuni maggiormente danneggiati dal sisma emiliano del 2012 (ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012) hanno offerto un importante contributo conoscitivo. Gli studi regionali hanno riscontrato come il primo forte contrasto di impedenza sia collocabile nei depositi alluvionali, in genere tra la base del subsistema AES6 (datata 230.000–250.000 anni) e la più profonda base del Sistema Emiliano–Romagnolo Superiore (AES, datata 400.000–450.000 anni).

Una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino. Tuttavia, le numerose registrazioni HVSR eseguite nella Pianura Padana indicano che gli effetti di amplificazione legati a quest'ultimo riflettore sismico possono risultare molto variabili in funzione sia della sua profondità, sia delle caratteristiche litologiche/sismostratigrafiche dello spessore alluvionale e del substrato marino. In tal senso, un'ampia bibliografia scientifica (es. Seed et al., 1975) evidenzia che, per elevati spessori (in genere maggiori di 100 metri) di depositi “soffici” alluvionali, possono esserci importanti effetti di smorzamento.

Per quanto riguarda il territorio di Sant'Agata Bolognese, le informazioni di sottosuolo profonde disponibili (sezioni geologiche 1–1' e 2–2'; pozzi per acqua; dati ricavati da MASW/REMI e ESAC) sono stati confrontati con gli esiti delle registrazioni HVSR, per interpretare un modello sismostratigrafico del sottosuolo del Capoluogo. Sulla base delle conoscenze stratigrafiche e

geofisiche del sottosuolo già descritte, è possibile associare le amplificazioni spettrali H/V ottenute nel Comune di Sant'Agata Bolognese a riflettori sismici collocati a profondità certamente superiori a 100 metri, così come già evidenziato dagli studi regionali nei Comuni limitrofi (es. Crevalcore). Più in dettaglio, vincolando il modello di sottosuolo meno profondo ai dati geognostici/geofisici disponibili ("Cono Sismico"; MASW/REMI; ESAC), i principali alti spettrali H/V riscontrati dalle registrazioni HVSR (circa 1,0 Hz e 0,6 Hz, come già descritto nel Capitolo 5) sono stati rispettivamente associati a riflettori sismici situati a profondità comprese tra la quota di base dell'unità alluvionale AES<sub>6</sub> e il tetto di spessori sabbioso/ghiaiosi a circa -170 m dal p.c., parzialmente attraversati dalle terebrazioni (pozzi per acqua), a sud-est del Capoluogo. Secondo la nomenclatura scientifica in materia, si tratterebbe, peraltro, di un "pseudobedrock", in quanto caratterizzato da Vs inferiori a 800 m/s, come generalmente emerge dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni danneggiati dal sisma del maggio-giugno 2012, e come confermerebbero anche i risultati di moderata amplificazione spettrale ottenuti dalle registrazioni HVSR nel territorio studiato.

La figura 6.1 riporta lo schema sismostratigrafico del sottosuolo profondo, fino al "pseudobedrock" (cfr. capitolo 5), che è stato implementato nei modelli numerici di RSL elaborati per gli areali del Capoluogo (cfr. Capitolo 7).

In considerazione delle ancora ineludibili approssimazioni interpretative degli strati profondi, i modelli sismostratigrafici implementati nel software di calcolo per elaborare le analisi numeriche della RSL di Sant'Agata Bolognese hanno tuttavia considerato anche una limitata variabilità di alcuni parametri (spessori; rigidezza/Vs degli strati; profondità del bedrock).

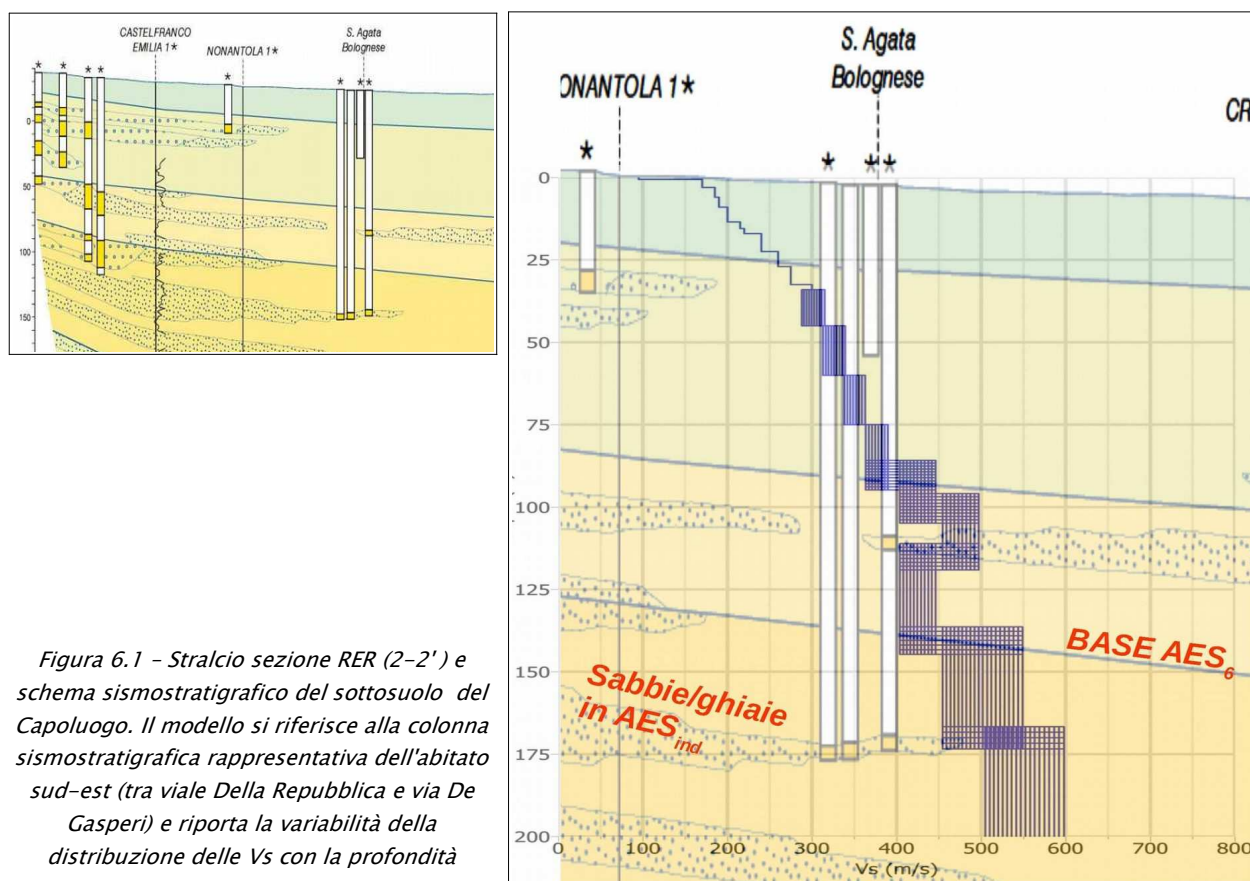


Figura 6.1 – Stralcio sezione RER (2-2') e schema sismostratigrafico del sottosuolo del Capoluogo. Il modello si riferisce alla colonna sismostratigrafica rappresentativa dell'abitato sud-est (tra viale Della Repubblica e via De Gasperi) e riporta la variabilità della distribuzione delle Vs con la profondità



## 6.2 Liquefacibilità e altri effetti cosismici

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

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

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

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

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

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati durante gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>12</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di MS elaborato nel 2014 ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti

---

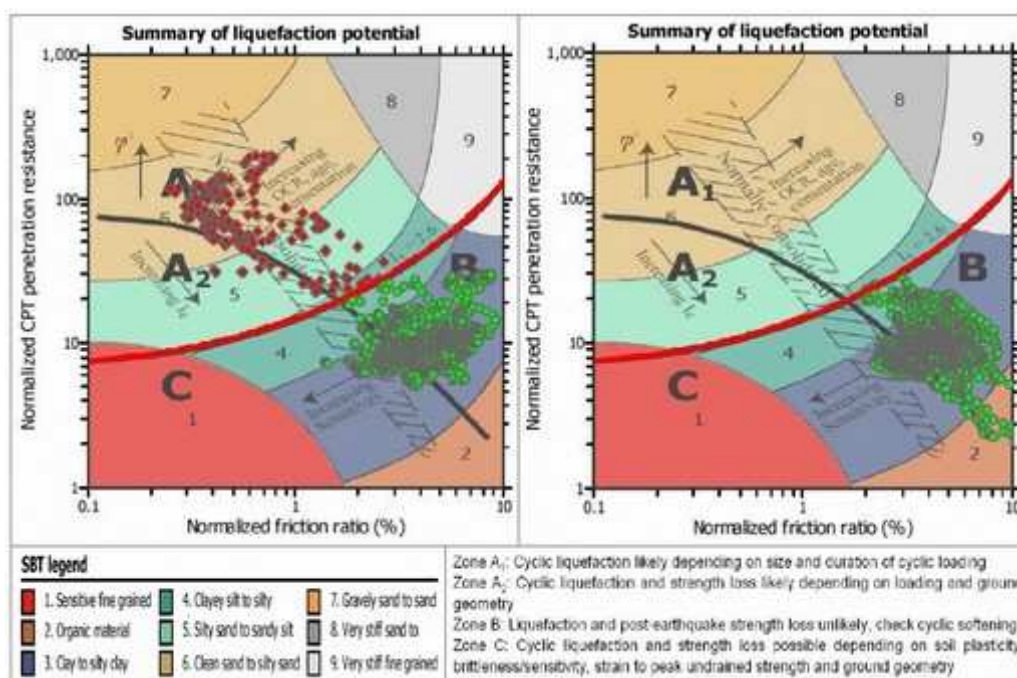
<sup>12</sup> Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove penetrometriche). Occorre anche rammentare che i dati idrogeologici locali (vedi capitolo 3) indicano una soggiacenza media della falda che nel territorio comunale è compresa tra 2,5 metri e 3,5 metri. La soggiacenza piuttosto modesta che caratterizza tutta l'area di studio, è chiaramente riconosciuta come una delle fondamentali condizioni predisponenti la liquefacibilità.

Gli accertamenti tessiturali sono risultati più accurati soprattutto nelle zone urbane dove, per ovvi motivi, si concentrano le indagini geognostiche. Occorre precisare che si è potuto disporre di pochi dati direttamente ricavati da sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti di Atterberg; prove di taglio; ecc.) e in tal senso è risultato molto utile eseguire un nuovo sondaggio con prelievo di campioni sottoposti a prove di laboratorio. Tuttavia, ci si è soprattutto basati sull'interpretazione delle penetrometrie: dati numerici e/o grafici resistenze.

I dati numerici disponibili (30 prove CPTU, comprese le prove eseguite per gli approfondimenti di “livello 3”) permettono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. I dati numerici, infatti, consentono un'analisi della suscettibilità basata anche sulla classificazione di comportamento dei sedimenti proposta da P.K. Robertson (1990; 2009): in questo senso, la figura 6.2 mostra gli esiti di due prove CPTU rappresentative della zona Capoluogo<sup>13</sup>.

Figura 6.2 -  
Plottaggio degli  
esiti penetrometrici  
sulla Carta della  
classificazione di  
P.K. Robertson  
(1990; 2009)



Le zone A1 e A2 evidenziate nel diagramma, 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” (Boulanger & Idriss, 2004); in

<sup>13</sup> Identificabili nell'archivio delle indagini geognostiche con le sigle P23CPTU100 e P7CPTU13

particolare, anche i sedimenti fini che ricadono nella zona C possono risultare suscettibili a liquefazione ciclica e a perdite significative delle caratteristiche di resistenza in funzione della plasticità, sensibilità e resistenza di taglio intrinseca.

Come si evince dalla figura 6.2, le prove rappresentano due casi differenti riscontrabili nel territorio studiato e cioè:

- sedimenti granulari e/o poco coesivi attribuibili alle zone A2 e A1 (questi ultimi prevalenti nei primi 6/10 metri);
- sedimenti fini attribuibili prevalentemente alla zona B e in minor misura alla zona C; si riscontrano livelli classificati come depositi organici (con basse resistenze di punta).

Sono stati tuttavia interpretati anche i dati delle prove penetrometriche delle quali si è potuto disporre dei soli grafici in formato cartaceo. In conclusione, per il territorio comunale si è potuto disporre di 123 punti di controllo che raggiungono almeno 10 metri di profondità<sup>14</sup>.

Per analizzare la potenziale suscettibilità alla liquefazione si è poi deciso di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, in quanto tale intervallo è generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con conseguenze più gravi in termini di possibilità manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di possibile interazione con eventuali fondazioni dirette (le più diffuse) di manufatti.

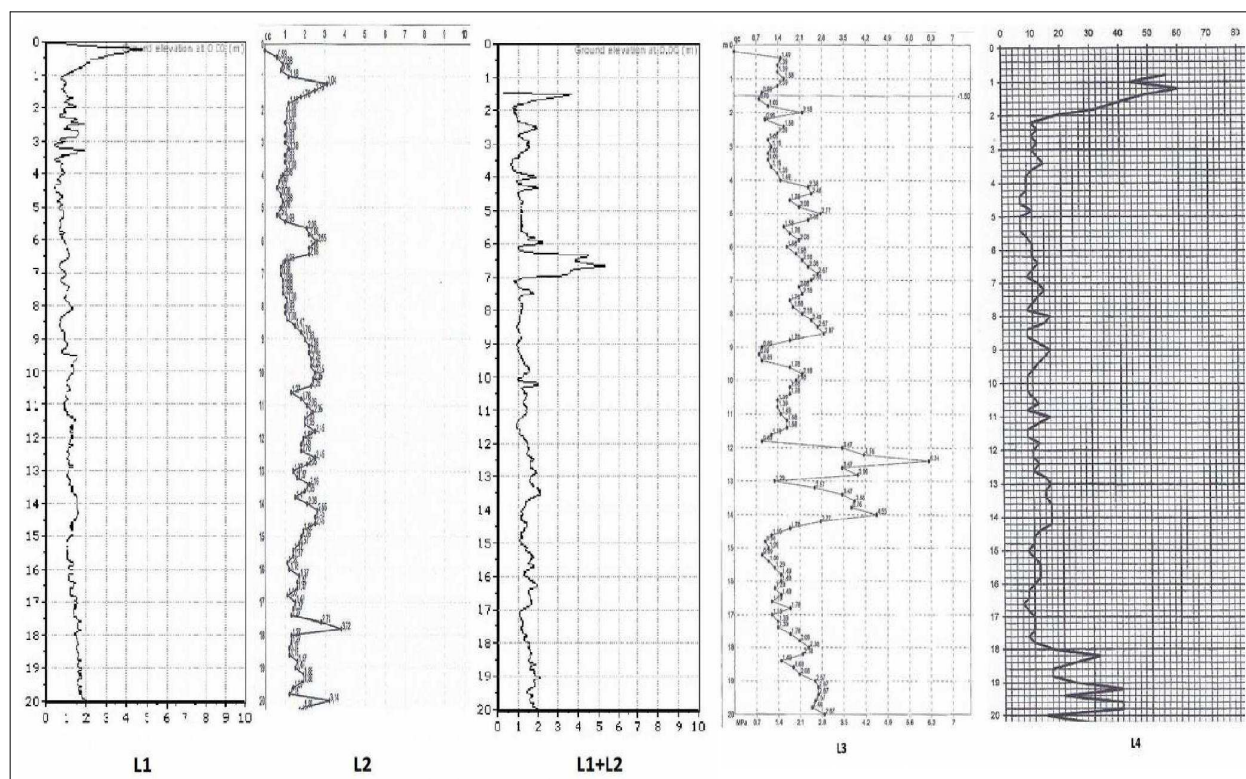


Figura 6.3 – Esempi di interpretazione di prove CPT e CPTU per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione. A sx: intervallo 0–10 m; a dx: intervallo 10–20 m

<sup>14</sup> Solo due prove si riferiscono a profondità poco oltre –9 metri.



Le prove geognostiche (figura 6.3), sono state classificate basandosi sulla metodologia già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica<sup>15</sup> nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio e giugno 2012.

Il controllo delle indagini ha dunque permesso di distinguere le seguenti classi tessiturali:

<i>PROFONDITA'</i>	<i>CLASSI SUSCETTIBILITA'</i>
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
	L1 + L2
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri

Si evidenzia che 90 prove hanno raggiunto la profondità di -15 metri e di queste 73 prove hanno raggiunto o superato i -20 metri di profondità. È dunque evidente come le interpretazioni relative all'intervallo più profondo risultino inficiate da maggiori incertezze.

Le figure 6.4 e 6.5 riportano una sintesi della classificazione dei punti di controllo dell'intero territorio comunale, con un dettaglio dell'area Capoluogo. In sintesi, si può così riassumere:

- per quanto riguarda l'intervallo di sottosuolo fino alla profondità di -10 metri, le indagini raccolte e gli esiti delle prove CPTU eseguite per questo studio rilevano una modesta presenza di livelli granulari (limi sabbiosi e sabbie per lo più fini) nei primi 5/6 metri. Entro tale profondità, i livelli sabbiosi si riscontrano soprattutto nel settore SO del Capoluogo. Risultano invece più frequenti ed anche di maggior spessore tra -5 e -10 metri: si tratta di paleoalvei abbandonati forse riconducibili a "rotte" del Fiume Panaro. Si è delimitata un'area di probabile involuppo di paleoalvei sabbiosi, riportata nella figura 6.6;
- la porzione est del Capoluogo, risulta complessivamente caratterizzata da sedimenti fini ritenuti non liquefacibili. Le indagini, inoltre, hanno localmente riscontrato alcuni significativi intervalli di sedimenti caratterizzati da mediocri esiti di resistenze alla punta, interpretabili come livelli torbosi e/o argille scarsamente consistenti. Anche questi intervalli sono stati oggetto di ulteriori approfondimenti (si rimanda al Capitolo 7);
- per quanto riguarda l'intervallo tra -10 e -20 metri, le indagini rilevano intervalli ritenuti liquefacibili generalmente di spessore poco significativo in tutto il territorio, ad esclusione di alcuni profondi livelli granulari di spessore metrico attraversati da alcune prove nella porzione est del Capoluogo (cfr. Sezione 1-1').

Il controllo tessiturale ha consentito di delimitare un'ampia "zona di attenzione" (ZA) per liquefazioni, riportata nella cartografia MOPS e che comprende gran parte dell'areale Capoluogo e la frazione Maggi.

<sup>15</sup> Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell'Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).

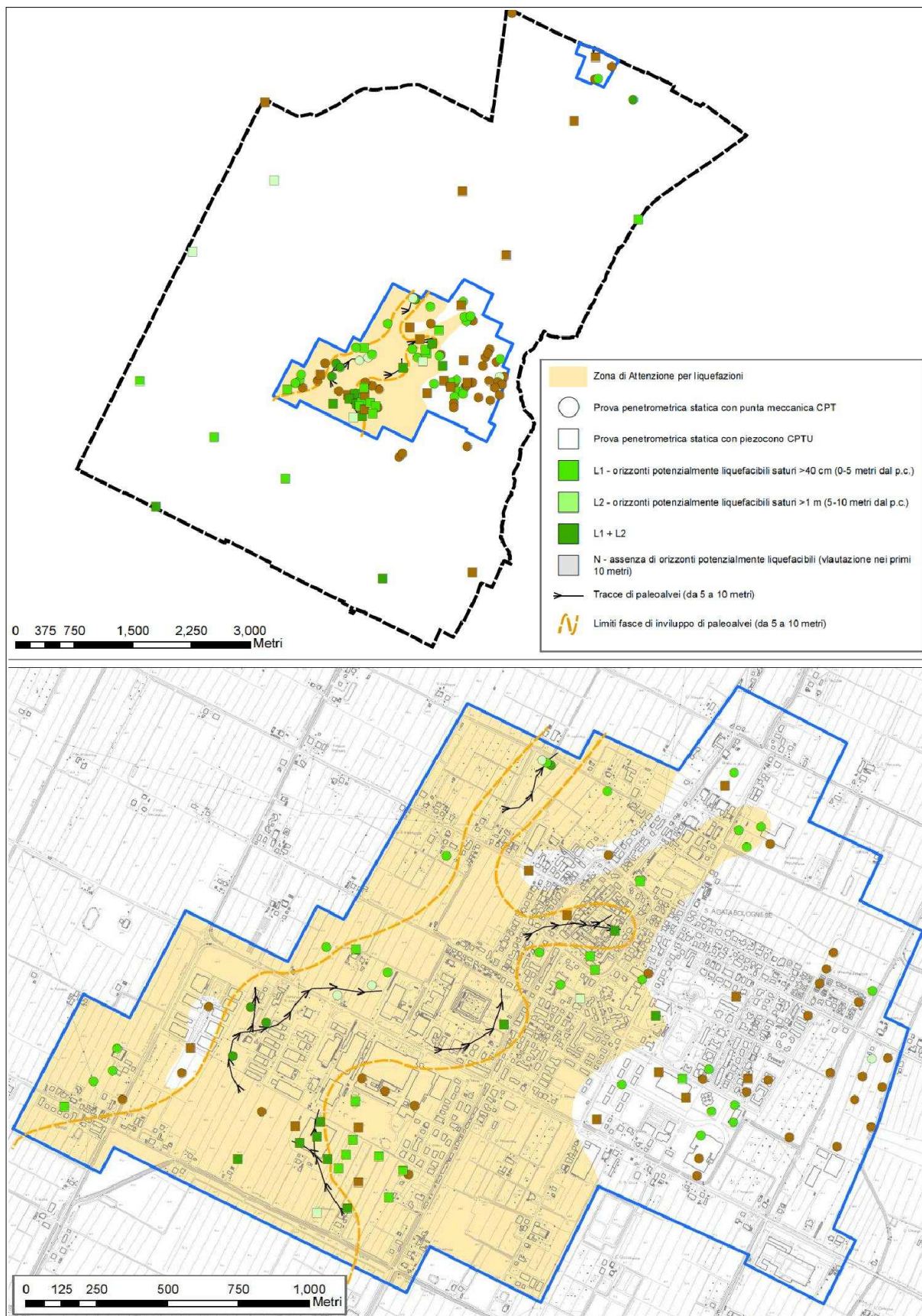


Figura 6.4 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità in base alla presenza di strati granulari in falda (sottosuolo fino -10 metri di profondità), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo



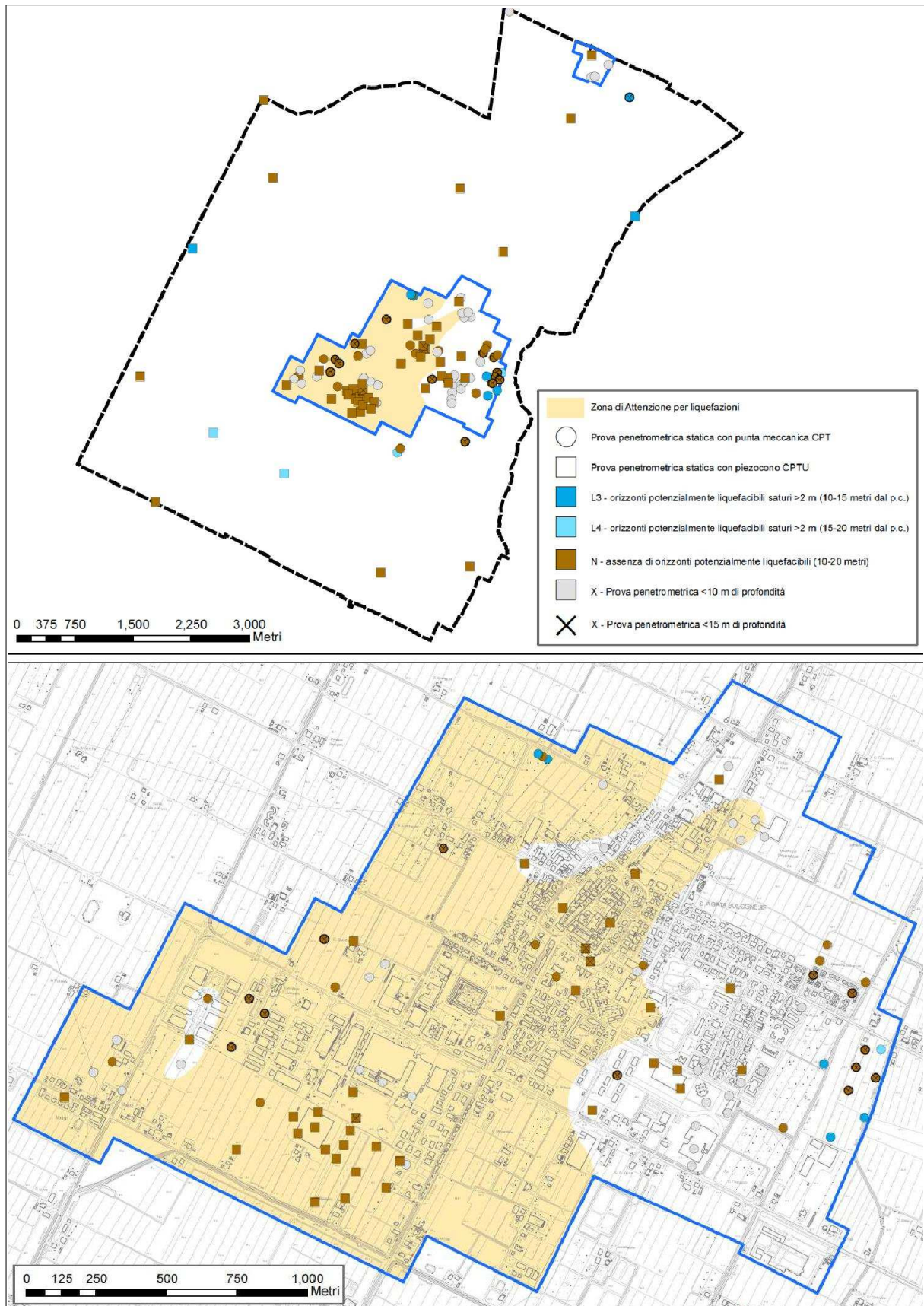


Figura 6.5 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità in base alla presenza di strati granulari in falda (sottosuolo da -10 metri a -20 metri di profondità), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo



La ZA per liquefazioni riportata nella cartografia MOPS è in buona parte correlabile (seppure con differenze locali) con la zonizzazione preliminare della liquefacibilità potenziale elaborata per il Piano Territoriale Provinciale di Bologna (cfr. capitolo 3) alla scala provinciale, che già si basava sulle informazioni di sottosuolo relative ai primi metri di profondità. Lo studio del PTCP, infatti, indicava per la parte orientale del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese la potenziale liquefacibilità dei sedimenti.

Per quanto riguarda la più lontana frazione Crocetta, lo studio di MS consente di escludere la possibilità di liquefazione (almeno nei primi 10 metri), per l'assenza di livelli granulari. A supporto di questa valutazione, si segnala che anche lo studio di microzonazione sismica del limitrofo Comune di Crevalcore (espletato come già scritto dal SGSS regionale), ha classificato la porzione di territorio amministrativo al confine con Crocetta come zona in cui sono presenti orizzonti liquefacibili significativi solamente tra -10 m e -20 m, con Indice di Potenziale Liquefazione “basso” ( $IL < 2$ ). L'indagine SCPTU eseguita per questo lavoro a Crocetta non ha tuttavia attraversato livelli sabbiosi fino a 20 metri di profondità.

Occorre evidenziare che per la delimitazione della “zona di attenzione” per liquefazioni (carta MOPS) si è maggiormente ponderato la presenza di intervalli granulari riscontrati nei primi 10 metri di profondità, in quanto tale intervallo è da ritenersi il più critico per la possibilità di interazione con le fondazioni dirette. E tuttavia, gli strati interpretabili come granulari sono risultati, il più delle volte, di scarso spessore e poco frequenti. Anche per questo motivo, si è inoltre riscontrata una generale difficoltà interpretativa delle prove CPT.

Il conclusione, un ampio settore del Capoluogo risulta incluso nella “zona di attenzione” per liquefazioni, riportata nella cartografia delle MOPS. Questa prima zonizzazione è tuttavia frutto di un'analisi interpretativa, presumibilmente cautelativa, e che tuttavia ha giustificato la necessità degli ulteriori approfondimenti espletati con il presente studio, fino a definire le “zone di suscettibilità” riportate cartograficamente nella cartografia di microzonazione sismica di “livello 3” (cfr. Capitolo 7). E in tal senso, gli approfondimenti di “livello 3” hanno permesso di rivedere parzialmente i limiti già individuati nello studio di MS 2014. La revisione della “zona di attenzione” per liquefazioni riportata sulla cartografia delle MOPS è risultata infatti ineludibile anche a seguito delle verifiche quantitative e in coerenza con i nuovi Standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v.4.0) che ora indicano lo stralcio degli areali con pericolosità di liquefazione “bassa” ( $IL \leq 2$ ) dalle “zone di suscettibilità” riportate nelle cartografie di MS di “livello 3”.

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

### 7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 3” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi numeriche di RSL
- zone “instabili” → a loro volta suddivise in “zone suscettibili di instabilità” con stima della pericolosità in termini quantitativi

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.0), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. La cartografia di MS può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”.

Per il Comune di Sant'Agata Bolognese, lo studio sismico di “Livello 3” ha permesso un fondamentale aggiornamento della microzonazione sismica già elaborata nel 2014. Lo studio di MS 2014 aveva infatti consentito l'elaborazione della cartografia delle MOPS, individuando “zone stabili suscettibili di amplificazione” e “zone instabili” (area Capoluogo e frazione Maggi) sulla base di approfondimenti di tipo qualitativo (“zone di attenzione” per liquefazione e cedimenti post sisma). Non sono state invece individuate “zone stabili”. Lo studio espletato nel 2014 ha inoltre consentito l'elaborazione della cartografia di MS di “livello 2”, con una quantificazione semplificata della risposta sismica locale attraverso l'utilizzo degli abachi regionali (cfr. DAL RER 112/2012, alleg. A2).

Gli approfondimenti di “livello 3” sono stati espletati negli areali urbanizzati/urbanizzabili interessati da “zone di attenzione” per instabilità (liquefazioni e cedimenti post sisma) riportati nella cartografia MOPS: areali Capoluogo e frazione Maggi.

Gli ulteriori approfondimenti di “livello 3” hanno permesso di modificare parzialmente la cartografia MOPS (come prevedono anche gli Standard di MS, v.4.0) e di elaborare le cartografie di microzonazione sismica attribuendo alle zone i Fattori di amplificazione locali rappresentativi indicati dalla Regione Emilia-Romagna (cfr. DGR 1227/2015), calcolati sulla base di modellazioni numeriche di RSL (Capoluogo e frazione Maggi). Per la frazione Crocetta si è invece ritenuto sufficiente l'approfondimento di “livello 2”, ricalcolando i fattori di amplificazione locali con metodologia semplificata (abachi RER riportati nella DGR 1227/2015).

Le carte di MS di “livello 3” del Comune di Sant'Agata Bolognese sintetizzano, infine, gli esiti delle ulteriori verifiche di liquefacibilità (espletate nelle aree classificate potenzialmente

liquefacibili, definite nella cartografia MOPS), riportando le “zone di suscettibilità” con indicata la pericolosità di liquefazione attribuita a tale zona (Indice del potenziale di liquefazione).

I successivi paragrafi illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione rappresentativi del territorio studiato e le metodologie utilizzate per determinare quantitativamente la pericolosità delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni individuate nel territorio studiato di Sant'Agata Bolognese

## 7.2 I fattori di amplificazione considerati per lo studio MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo e terzo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. Per lo studio di MS di Sant'Agata Bolognese i fattori di amplificazione scelti sono quelli indicati nella DAL regionale n. 112/2007 (aggiornati con la recente DGR regionale n. 2193/2015).

In sintesi, i fattori di amplificazione di riferimento 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, è 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:  $FA_{0,1-0,5s}$   $FA_{0,5-1,0s}$   $FA_{0,5-1,5s}$

## 7.3 Gli approfondimenti sulla risposta sismica locale (amplificazioni)

### 7.3.1 Metodi di calcolo semplificati (abachi) e simulazioni numeriche

Come già scritto, lo studio di MS 2016 ha elaborato cartografie dei fattori amplificazione delle aree urbane/urbanizzabili, questi ultimi calcolati in parte sulla base di esiti di modellazione numerica della RSL e in parte attraverso l'utilizzo degli abachi regionali (cfr. DGR 1227/2015).

La seguente tabella 7.1 elenca, per una migliore comprensione, gli areali studiati, indicando per ognuno di essi le metodologie di elaborazione della RSL adottate.

Tabella 7.1 – Areali urbani/urbanizzati interessati dalla microzonazione sismica

<b>AREALI</b>	<b>METODOLOGIE DI ELABORAZIONE DELLA RSL</b>
Frazione Crocetta	Abachi RER (DGR 1227/2015)
Capoluogo, ZI Capoluogo e frazione Maggi	Analisi numeriche (SHAKE 2000)



### 7.3.1 Areale frazione Crocetta

Per la frazione Crocetta, i fattori di amplificazione, sono desunti dagli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 2193/2015 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico. Si rammenta che la DGR 2193/2015 ha determinato l'aggiornamento degli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007).

Sulla base di quanto indicato nella DGR 2193/2015 (allegato A2), dei dati geognostici/geofisici disponibili e dunque sulla base della caratterizzazione sismostratigrafica locale (cfr. capitolo 5), l'areale di studio della frazione Crocetta è ascrivibile al macrocontesto “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 di impedenza a circa 100 m da p.c. e dal tetto del sustrato rigido a circa 150 m da p.c.>>). Ciò detto, considerando che la  $V_{s30}$  attribuibile all'areale (ricavata da “Cono Sismico”) è riconducibile a circa 200 m/s, la seguente tabella consente di determinare i parametri di amplificazione (per moto sismico con Periodo di Ritorno =475 anni e  $\xi =5\%$ ):

$V_{s30}(m/s) \rightarrow$	150	200	250	300	350	400
F.A. PGA	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5
F.A. SI1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6
F.A. SI2	3.1	3.0	2.7	2.4	2.1	2.0
F.A. SI3	3.6	3.3	2.9	2.5	2.2	2.0

[abaco di valutazione dei parametri di RSL semplificata (DGR 2193/2015, all. A2) riferito al macrocontesto “Pianura 2”]

### 7.3.2 Areali Capoluogo , ZI Capoluogo e frazione Maggi

Le informazioni di sottosuolo pregresse e di nuova acquisizione hanno consentito di espletare ulteriori approfondimenti sulla risposta sismica locale (RSL), finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti dal sisma mediante analisi di modellazione numerica. Come già descritto nel Capitolo 6, le nuove indagini eseguite per gli approfondimenti di “livello 3” (sondaggio fino a -35 m; penetrometrie CPTU; prove di laboratorio su campioni indisturbati/disturbati) sono state volutamente concentrate nel Capoluogo in quanto è interessato da “zone di attenzione” per instabilità (liquefazioni e cedimenti post sisma). Nell'areale Capoluogo sono disponibili dati del sottosuolo di repertorio utili per lo studio di RSL (pozzi profondi per acqua; “Cono Sismico”; array ESAC e MASW/REMI; registrazioni HVSR; ecc.).

Ciò detto, si sono elaborati tre principali modellazioni numeriche, basate su altrettanti modelli sismostratigrafici (figura 7.1). La scelta e la rappresentatività dei modelli è risultata condizionata dalla necessità di ulteriori approfondimenti sismici nelle “Zone di Attenzione” individuate nella cartografia MOPS dello studio di MS 2014 (figura 7.2).

I modelli risultano stratigraficamente differenziati in funzione delle indagini geognostiche/geofisiche eseguite nel Capoluogo. In particolare, ciò ha consentito un ulteriore controllo della della risposta sismica locale in relazione della variabilità degli strati investigati

meno profondi, coerentemente con la zonizzazione tessuturale riportata nella carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica.

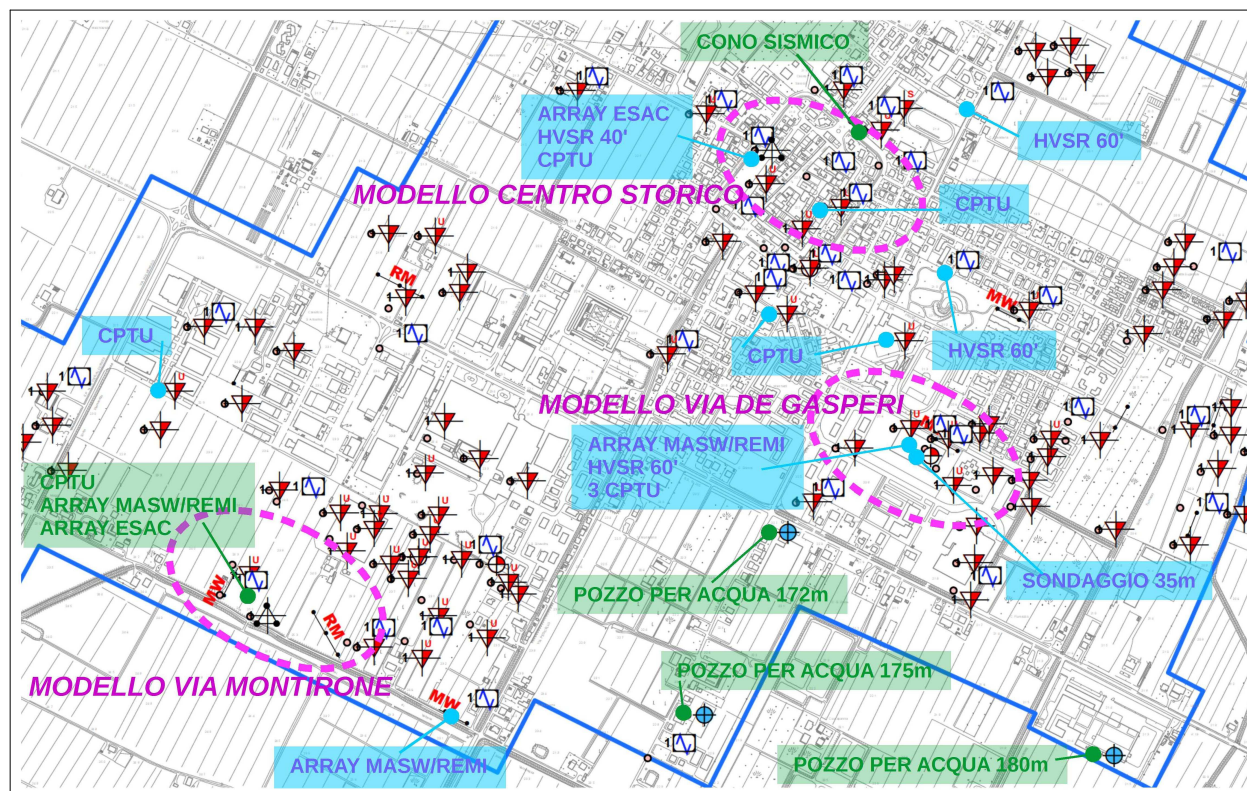


Figura 7.1 – Stralcio della “Carta delle Indagini” e localizzazione dei tre principali modelli sismostratigrafici rappresentativi del Capoluogo . La figura evidenzia le principali indagini geognostiche e geofisiche di riferimento per ciascun modello. In azzurro: le prove eseguite per gli studi di MS; in verde: prove di repertorio (principali)



Figura 7.2 – Stralcio della cartografia MOPS non aggiornata del Comune di Sant'Agata (MS 2014) e localizzazione dei tre principali modelli sismostratigrafici rappresentativi del Capoluogo

Più in dettaglio, i modelli sismostratigrafici elaborati per il Capoluogo risultano rappresentativi delle seguenti contesti e dei seguenti settori:

- ✓ del settore “centro storico” → caratterizzato da tessiture superficiali prevalentemente fini con presenza di livelli granulari liquefacibili. A seguito degli ulteriori approfondimenti geognostici, tale settore risulta ora compreso nella zona MOPS 30502002;
- ✓ della “zona di attenzione” individuata nel settore sud-est (tra Viale della Repubblica e via De Gasperi) → le ulteriori indagini geognostiche hanno riscontrato, sedimenti superficiali prevalentemente fini senza livelli liquefacibili significativi. Nei primi 6 metri, sono riscontrati sedimenti fini poco consistenti. In questo settore è stato eseguito il sondaggio a carotaggio continuo, con prelievo dei campioni indisturbati/disturbati per le prove di laboratorio geotecniche e dinamiche e con l'esecuzione di ulteriori prove penetrometriche con piezocono. Tale settore risulta ora compreso nella zona MOPS 2001;
- ✓ del settore sud-ovest (tra via Turati e via Montirone) → caratterizzato da sedimenti superficiali prevalentemente fini con intervalli limoso sabbiosi più frequenti e di maggior spessore, anche metrico, attraversati da -5 metri a -10 m (depositi di “crevasse” limoso sabbiosi). Tale settore risulta ora compreso nella zona MOPS 30502003.

Le analisi numeriche di RSL sono state elaborate secondo l'approccio analitico lineare equivalente, utilizzando il noto software SHAKE 2000 (v. 3.2.0). SHAKE 2000 è un programma di calcolo realizzato per verifiche monodimensionali e sviluppato da P.B. Schnabel; J. Lysmer e H.B. Seed dell'Università di Berkeley (USA). Il software è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato (figura 7.3):

- scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento in funzione della pericolosità sismica di base indicata per questo studio di microzonazione sismica;
- definizione del modello sismostratigrafico locale;
- elaborazione degli accelerogrammi di output e degli spettri di risposta richiesti.

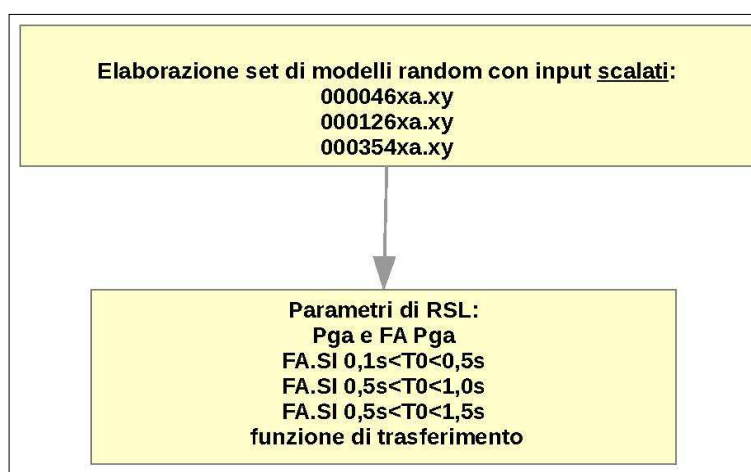


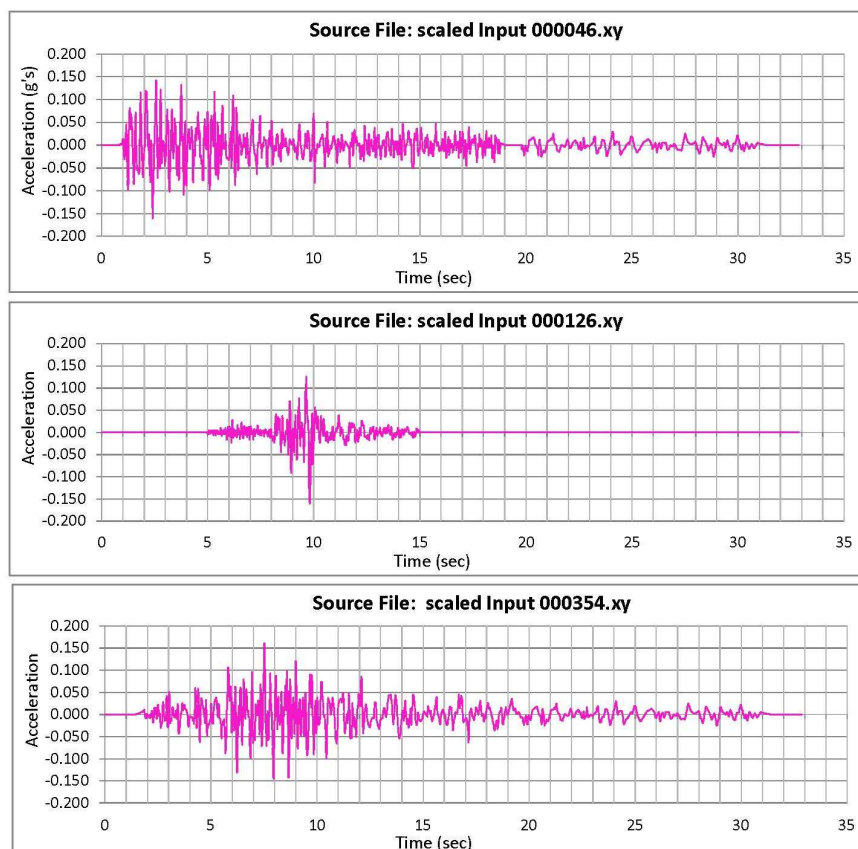
Figura 7.3 - Diagramma di flusso delle analisi numeriche di RSL

Le elaborazioni numeriche hanno implementato i tre accelerogrammi di riferimento per la Regione Emilia-Romagna: si tratta di input selezionati dalla Banca Dati accelerometrica IESD compatibili con la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali,



rappresentativi di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.4):

- 1) impulsivo
- 2) con ampio contenuto in frequenze
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.



*Figura 7.4 - Accelerogrammi scalati di riferimento per il Capoluogo, utilizzati per la modellazione numerica di RSL ( $a_{refg} = 0,161 g$ )*

Gli accelerogrammi sono stati scalati in base ai valori di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale sui punti della griglia (passo  $0.05^\circ$ ), ovvero rappresentativa di scuotimenti attesi con un periodo di riferimento  $TR = 475$  anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), sul suolo di riferimento atteso relativo alla “categoria di sottosuolo A” (cfr. tab. 3,2, Il NTC 2008). Ciò detto, per Sant'Agata Bolognese, la  $a_{refg}$  ricavabile dal reticolo INGV e considerata per la modellazione numerica di RSL risulta pari a  $0,161 g$ .

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo SHAKE 2000 richiede l'inserimento dei modelli sismostratigrafici rappresentativi dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

- ✓ numero e spessore degli strati di sottosuolo, profondità del bedrock sismico
- ✓ proprietà elastiche per ogni strato ( $V_s$  o modulo di taglio massimo  $G_0$ )
- ✓ leggi di variazione normalizzata di  $G$  e rapporti di smorzamento minimo  $D_0$  per ogni strato

Il successivo passo è dunque quello di definire la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Come già scritto, il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori

indagini di repertorio. Si rimanda al Capitolo 5 per gli approfondimenti. Per quanto riguarda il “bedrock sismico” considerato nei modelli numerici, si rimanda inoltre alle interpretazioni di sintesi descritte nel Capitolo 6.

Occorre precisare che la caratterizzazione dei sismostrati meno profondi è basata su valutazioni dirette (ricavate dalle prove di laboratorio su campioni di sedimenti effettuate per questo lavoro, cioè granulometria, limiti di Atterberg e colonna risonante) e indirette (basate su esiti penetrometrici; sondaggi; ecc.).

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione implementato in SHAKE 2000, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento  $D$  e dal modulo di rigidezza a taglio  $G$ . Mentre i valori di rigidezza iniziale  $G_0$  sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle  $V_s$ ), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti delle prove di “colonna risonante” (cfr Capitolo 5, figura 5.15), effettuate su campioni di sedimenti fini prelevati nel sondaggio eseguito in via Turati (rappresentativi degli intervalli plastici riscontrabili nel sottosuolo del Capoluogo). Per le altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati dal programma SHAKE 2000. In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di de sedimenti argillosi rispettivamente e ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (cfr. Capitolo 5, figure 5.15 e 5.16).

Le simulazioni numeriche della RSL sono state elaborate secondo un approccio per iterazione, in conseguenza della variabilità del modello di sottosuolo, fino a raggiungere una convergenza degli esiti di amplificazione ritenuti il più possibile compatibili con le reali caratteristiche sismostratigrafiche del sito studiato.

È comunque da rimarcare l'ineludibile incertezza che risiede nella definizione e nella esemplificazione dei principali parametri sismostratigrafici del modello di riferimento, rispetto all'effettiva situazione reale, soprattutto per la caratterizzazione degli strati più profondi. In tal senso, il programma SHAKE 2000 permette di generare casualmente un set di simulazioni numeriche considerando la variabilità del modello sismostratigrafico di riferimento (limite base, limite superiore e spessore degli strati; moduli di taglio; damping; accelerazione di picco; velocità onde sismiche di taglio; ecc.). L'approccio di calcolo utilizzato per questo lavoro ha previsto l'utilizzo della funzione “Stratified/Random Field” implementata nel software. Questo metodo consente di scegliere il numero di modelli random da generare, impostando per ogni intervallo della colonna sismostratigrafica di riferimento i limiti di variabilità dei parametri selezionati. È inoltre possibile vincolare la generazione dei modelli ad una profondità compresa tra i valori minimi e massimi della colonna sismostratigrafica così definita. Ciò detto, l'approccio di calcolo random è impostato prevedendo 100 modelli sismostratigrafici differenti, con limiti della profondità del pseudobedrock e con velocità delle onde sismiche di taglio  $V_s$  (dunque di rigidezza) ragionevolmente variabili.

In sintesi, i modelli sismostratigrafici random del Capoluogo hanno considerato come

pseudobedrock i sedimenti alluvionali compresi tra la base dell'unità alluvionale AES6 e il tetto degli spessori sabbioso/ghiaiosi (questi ultimi a circa -170 m dal p.c.), intercettati dalle terebrazioni profonde (pozzi per acqua) del Capoluogo. A queste profondità, sono associati gli alti spettrali H/V riscontrati dalle registrazioni HVSr (circa 1,0 Hz e 0,6 Hz), come descritto nei Capitoli 5 e 6 e schematizzato nella figura 7.5).

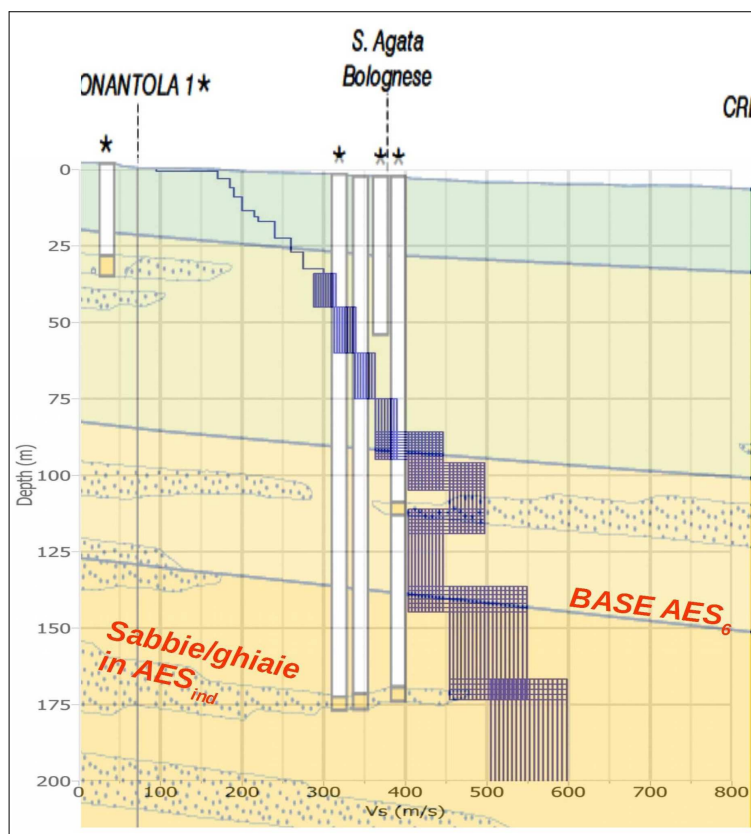


Figura 7.5 - Stralcio sezione RER (2-2') e schema sismostratigrafico del sottosuolo del Capoluogo. Il modello si riferisce alla colonna sismostratigrafica rappresentativa dell'abitato sud-est (tra via Della Repubblica e via De Gasperi) e riporta la variabilità della distribuzione delle Vs con la profondità

Per quanto riguarda gli esiti di output ricavati dalle modellazioni numeriche, il software SHAKE 2000 consente di valutare i parametri di risposta sismica indicati dalle deliberazioni regionali di riferimento (DGR 1227/2015 e DGR 2193/2015). In particolare si sono calcolati:

- A) le accelerazioni di picco al suolo e i valori di Fa Pga
- B) i rapporti spettrali di amplificazione
- C) l'intensità spettrale di Housner e i valori di FA  $SI_{(0,1-0,5s)}$  FA  $SI_{(0,5-1,0s)}$  e FA  $SI_{(0,5-1,5s)}$

#### A) ACCELERAZIONI DI PICCO AL SUOLO E VALORI DI FA PGA

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale FA Pga intesa come rapporto dell'accelerazione massima calcolata nello strato più superficiale o di interesse (in questo caso calcolata al suolo) rispetto all'accelerazione di riferimento al bedrock "rigido". Il software SHAKE 2000 consente di calcolare la variabilità dell'accelerazione attraverso le colonne sismostratigrafiche random. In questo senso, le schede di sintesi dei modelli numerici random allegate in calce alla Relazione riportano graficamente l'andamento delle accelerazioni orizzontali (media e mediana) per i tre input sismici di riferimento e la tabella con i valori



rappresentativi di Pga e di FA Pga. Il valori di Pga e FA Pga al suolo assunti come rappresentativi per la RSL sono infine ricavati come valore medio ricavato dai tre input sismici.

## B) RAPPORTI SPETTRALI DI AMPLIFICAZIONE

La risposta sismica locale deve essere valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento  $D$  e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione  $A(f)$  della colonna sismostratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione  $f_0$  denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo.

Le schede di sintesi delle modellazioni di RSL riportano gli spettri di amplificazione generati dalle simulazioni random (set di valori e valore medio per gli input sismici considerati). Si evince come i massimi picchi spettrali sono ottenuti a frequenze comprese tra 0,6 Hz 0,7 Hz, dunque coerenti con gli esiti delle registrazioni sismiche HVSR effettuate a Sant'Agata Bolognese, come risulta dal confronto riportato nelle schede di sintesi.

Occorre tuttavia ricordare che la funzione di amplificazione locale non è una proprietà univoca del sito ma è anche dipendente dalle caratteristiche del moto di input (es. ampiezza e contenuto in frequenza, energia, effetti del comportamento non lineare del terreno, ecc.). La funzione di trasferimento ricavata dalle simulazioni di RSL, così come gli spettri H/V delle registrazioni tromografiche, rappresentano un ulteriore e utile strumento analitico riguardo la vulnerabilità dei manufatti esistenti o di previsione rispetto agli effetti di amplificazione locale del moto sismico. È infatti noto come le strutture siano caratterizzate da differenti modi di vibrazione, in funzione di molti parametri tra cui l'elevazione, la tipologia, il materiale costruttivo, etc. La vibrazione di un edificio è governata soprattutto dalla sua altezza e la coincidenza fra frequenze di risonanza naturale del terreno e frequenze di vibrazione delle strutture può dunque causare pericolose amplificazioni nel caso di impulsi ciclici dovuti ad un evento sismico (effetto di "doppia risonanza"). Ciò detto, gli esiti della RSL confermano la possibilità di risonanza per edifici elevati e/o caratterizzati da periodi di vibrazione maggiori di circa 0,8 s.

Si precisa che la modellazione numerica è stata limitata fino ad un massimo di 20 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture.

## C) INTENSITA' SPETTRALE DI HOUSNER

Gli spettri di risposta riflettono solo in maniera indiretta le caratteristiche del moto sismico, essendo queste ultime filtrate attraverso la risposta delle strutture di progetto. Gli spettri di risposta risultano di più significativa utilità ai fini ingegneristici in quanto consentono di rappresentare nella maniera più efficace e utile per l'ingegnere gli effetti delle caratteristiche del moto del terreno sul comportamento delle strutture.

In questo senso, la DGR 1227/2015 richiede la determinazione del fattore di amplificazione FA SI (rapporto di intensità spettrale di Housner) quale ulteriore indicatore della pericolosità sismica. L'intensità di Housner è definita come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità. Nello specifico, la Deliberazione regionale richiede di quantificare i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da  $0.1 < T_0 < 0.5$  s (FA SI<sub>0,1-0,5s</sub>) e da  $0.5 < T_0 < 1$  s (FA SI<sub>0,5-1,0s</sub>). Si è inoltre calcolato il FA SI relativo all'intervallo da  $0.5 < T_0 < 1,5$  s (FA SI<sub>0,5-1,5s</sub>) come richiesto dalla successiva DGR regionale 2193/2016.

Le schede di sintesi delle modellazioni di RSL riportano gli esiti spettrali di PSV (SI) per i tre input sismici di riferimento. Sono riportati graficamente tutti gli esiti dei set di colonne sismostratigrafiche random create dal software SHAKE 2000, il valore di media è assunto come esito di riferimento per ognuno dei tre input sismici). È riportato anche il confronto tra gli spettri PSV al pseudobedrock dei tre input sismici (SI<sub>0</sub>) e i rispettivi spettri PSV al suolo (valori di medi) e gli esiti numerici di FA SI riferiti al suolo.

In calce alla Relazione, si riportano le schede di sintesi dei tre modelli numerici random. Le schede riportano, nel dettaglio, anche i dati di input considerati per la generazione dei modelli sismostratigrafici random.

La sottostante tabella riporta, in sintesi, gli esiti delle simulazioni numeriche random di RSL eseguite per il Capoluogo:

<i>MODELLO SHAKE</i>	<i>PGA</i>	<i>FA PGA</i>	<i>FA SI 0,1_0,5</i>	<i>FA SI 0,5_1,0</i>	<i>FA SI 0,5_1,5</i>
Modello "centro storico"	0,253g	1,6	1,9	3,1	3,0
Modello "via De Gasperi"	0,248g	1,5	1,8	3,1	3,0
Modello "via Montirone"	0,264g	1,6	1,9	3,1	3,1

In conclusione, la modellazione numerica espletata per l'abitato di Sant'Agata ha confermato la sostanziale omogeneità della RSL nel Capoluogo. Ciò detto, i parametri di amplificazione assunti come riferimento per tutto l'areale Capoluogo risultano pari ai valori medi dei tre modelli e cioè:

$$Pga = 0,255g$$

$$FA SI_{0,1-0,5} = 1,9$$

$$FA SI_{0,5-1,0} = 3,1$$

$$FA SI_{0,5-1,5} = 3,0$$

#### **7.4 Zone suscettibili di instabilità (liquefazioni e cedimenti post sisma): approfondimenti di "livello 3"**

La possibilità di disporre di un buon numero di dati numerici di penetrometrie CPTU profonde almeno 20 metri ha permesso di calcolare, per tali prove, il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro IL definito anche come LPI (Liquefaction

Potential Index). La stima di IL offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale, per comprovare le analisi di pericolosità precedentemente descritte e, infine, per motivare gli ulteriori approfondimenti sismici che, ineludibilmente, si dovranno effettuare per gli studi legati alla pianificazione territoriale e/o alla progettazione.

Si è pertanto proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente 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; ecc.);

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  $M = 7,5$ :

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

$K_{\sigma}$  = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

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

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software “Cliq”, sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL.

Per questo lavoro, si sono confrontati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

#### 1. procedura NCEER<sup>16</sup> (1996; 1998; 2001)

(Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. – *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*

(G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman – *Estimating Liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*)

#### 2. procedura di Idriss & Boulanger (2008)

<sup>16</sup> National Center for Earthquake Engineering Research (USA)



(I. M. Idriss and R.W. Boulanger – *Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland*)

### 3. procedura di P. K. Robertson (2009)

(P.K. Robertson – *Performance based earthquake design using the CPT – Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, 2009*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda ai diagrammi di flusso allegati in calce alla relazione e alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF,  $CRR_{7,5}$ ,  $K\sigma$  e  $r_d$  e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Idriss & Boulanger (2008) sono validi per tutti i tipi di sedimenti e considerano anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata. Per questo lavoro, il valore di FC viene stimato sulla base dei metodi di riferimento e in funzione dell'indice di comportamento  $I_c$  ricavato dalla classificazione dei terreni di P.K. Robertson (1990).

Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si è utilizzata la  $a_{max}$  al suolo attribuita alla microzona sulla base degli approfondimenti sismici di “livello 3” (analisi numeriche di RSL) e cioè  $a_{max} = 0,26g$ ;
- sulla base del contesto idrogeologico locale (vedi capitolo 3), si è considerata una soggiacenza (molto cautelativa) della falda in condizioni di sisma pari a 1 metro;
- riferendoci alla pericolosità sismica di base, si è considerata una magnitudo di input pari a  $M_w = 6,14$  come da zonizzazione macrosismica “ZS9” (vedi capitolo 2). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

L'Indice di Potenziale Liquefazione IL o LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato 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  $FSL \geq 1.2$

$z$  = profondità dello strato considerato

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

Il confronto degli esiti di LPI ricavati dai tre differenti approcci considerati, evidenzia come il metodo di Idriss e Boulanger 2008 risulti il più cautelativo per il calcolo di FSL e per la stima di IL (figura 7.6).

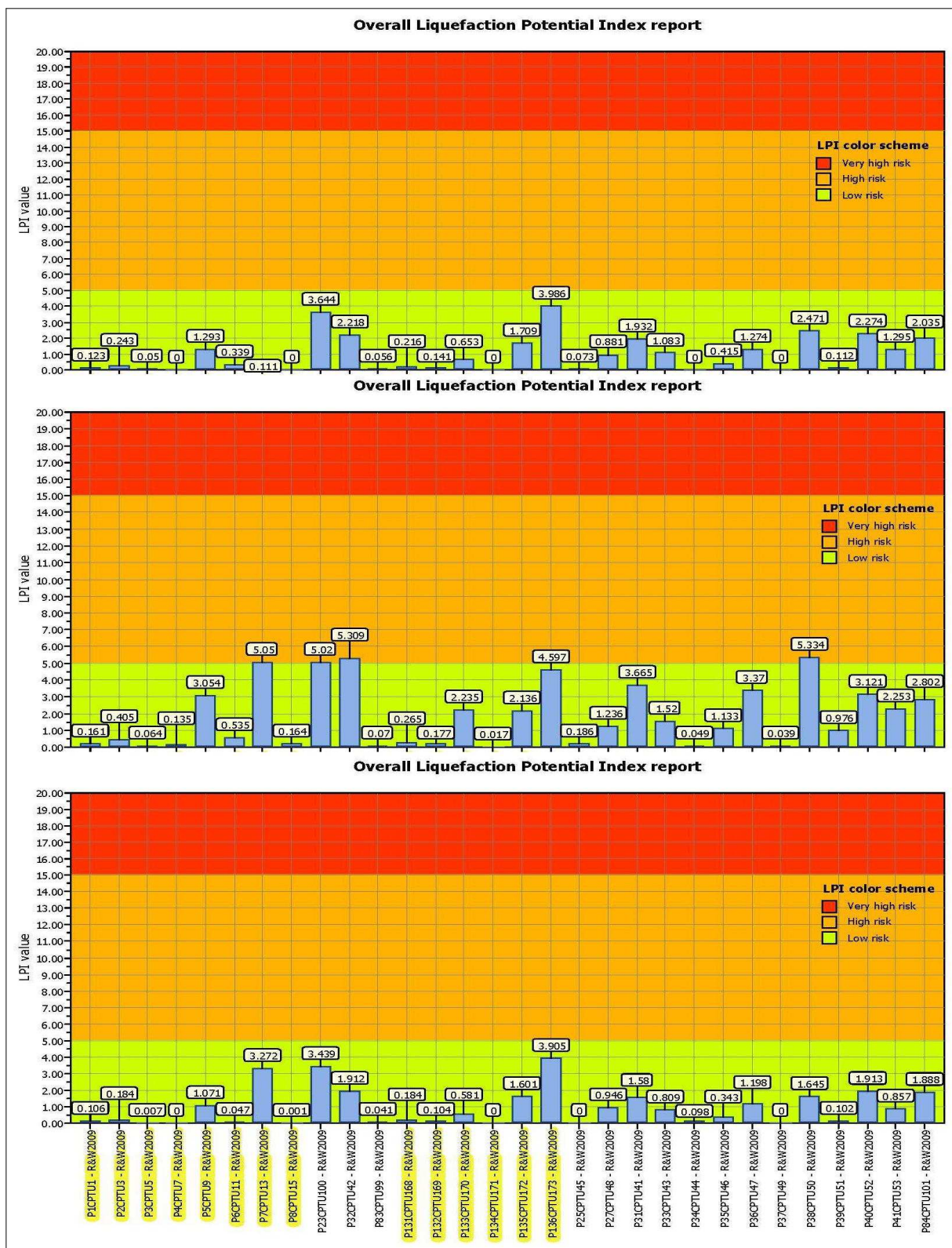


Figura 7.6 – Confronto dei valori di LPI ricavati con le tre differenti procedure di calcolo dell'FS (dall'alto verso il basso: NCEER 2001; Idriss & Boulanger 2008; Robertson 2009). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per gli studi di MS (2014 e 2016)

Per la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta ( $q_{c1N}$ )<sub>cs</sub> e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.7).

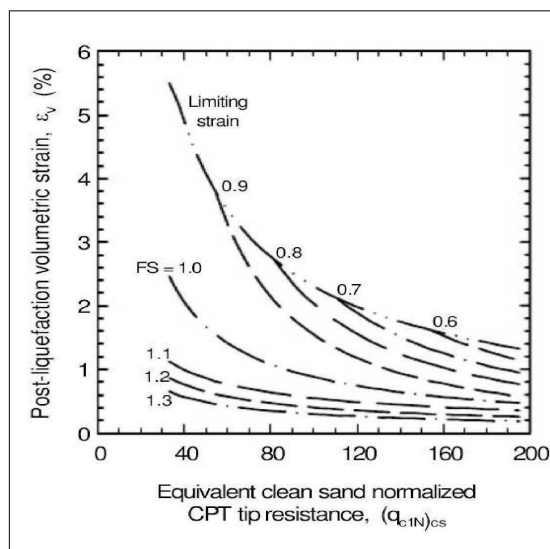


Figura 7.7 - Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002)

Per i sedimenti a comportamento fine (zone B e C della Carta di classificazione di P.K. Robertson), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione, conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulangier and Idriss, 2007). Secondo quanto riportato nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza  $FS_{\gamma=3\%} = CRRM / CSR_{M} = CRR_{7,5} / CSR_{7,5}$  (Boulangier & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come  $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CSR_{6,14}$ . Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), considerando gli esiti di FSL più cautelativi (Idriss e Boulangier 2008) e utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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

Come già riportato, le simulazioni sono state eseguite utilizzando prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili) e le prove CPTU eseguite per questo studio, per un numero complessivo di 30 punti di controllo. La figura 7.8 riporta la sintesi complessiva dei cedimenti totali calcolati con dati penetrometriche da prove CPTU (secondo l'approccio di calcolo di FSL di Idriss & Boulangier 2008).



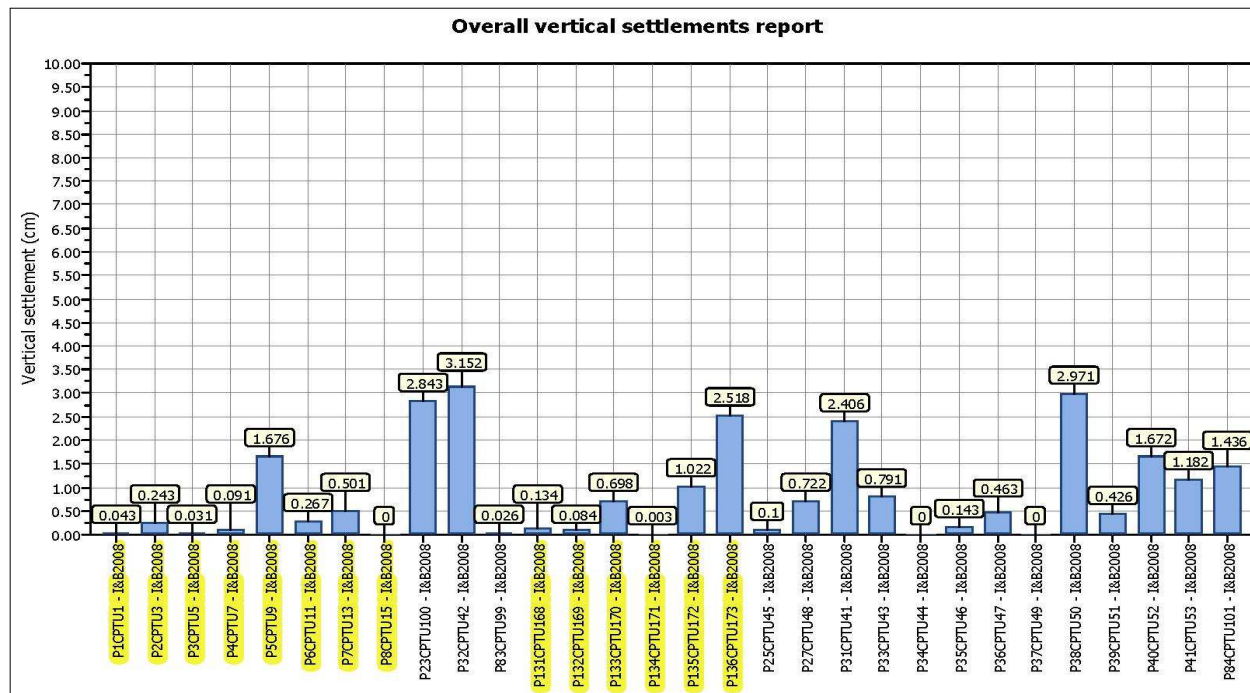


Figura 7.8 – Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi stimati sulla base del calcolo di FS di Idriss & Boulanger 2008. In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per gli studi di MS (2014 e 2016)

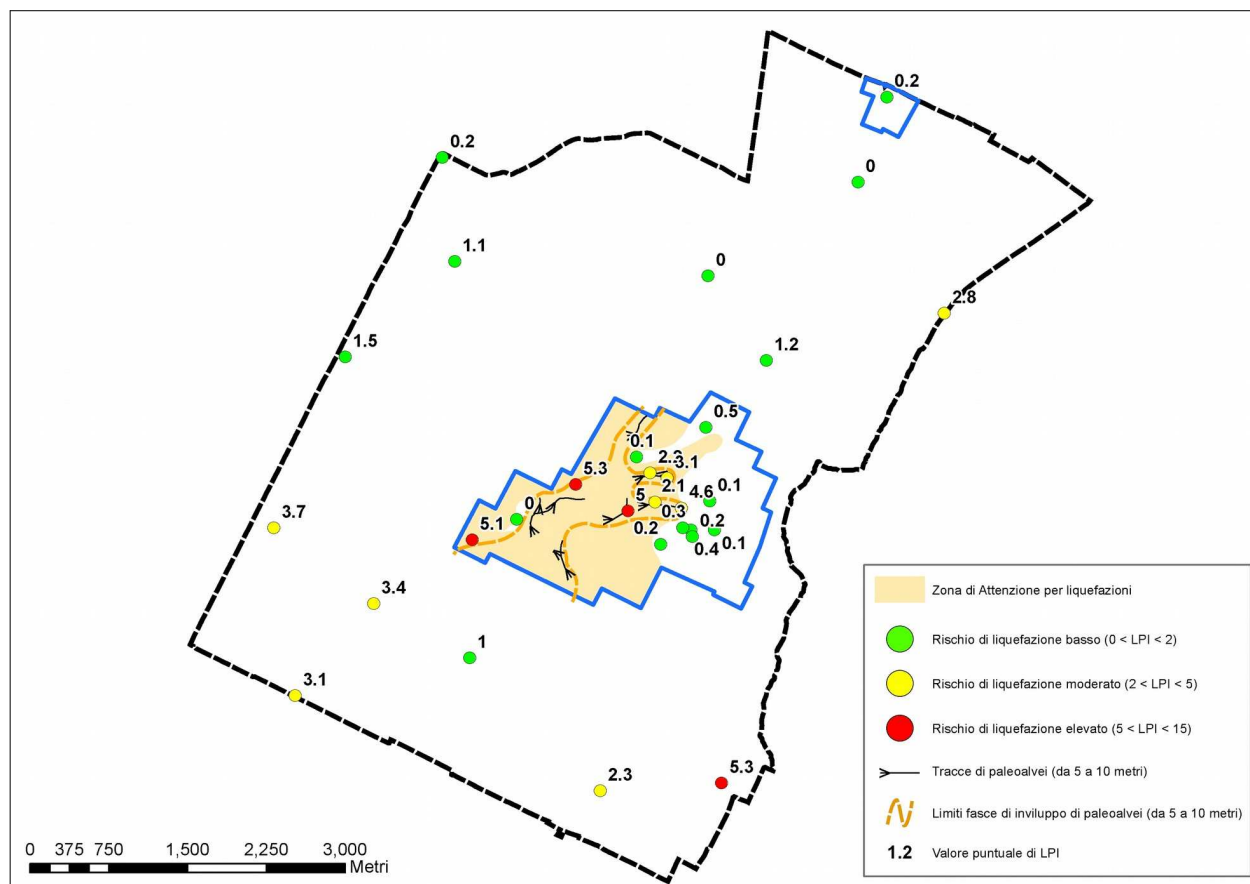


Figura 7.9 – Punti di controllo dell'Indice LPI (prove CPTU) . La figura riporta l'esito più cautelativo ricavato dalla stima di FSL secondo il metodo di Idriss & Boulanger 2008 (per:  $M = 6.14$ ;  $a_{max} = 0.26g$ ;  $falda = -1 m$ )



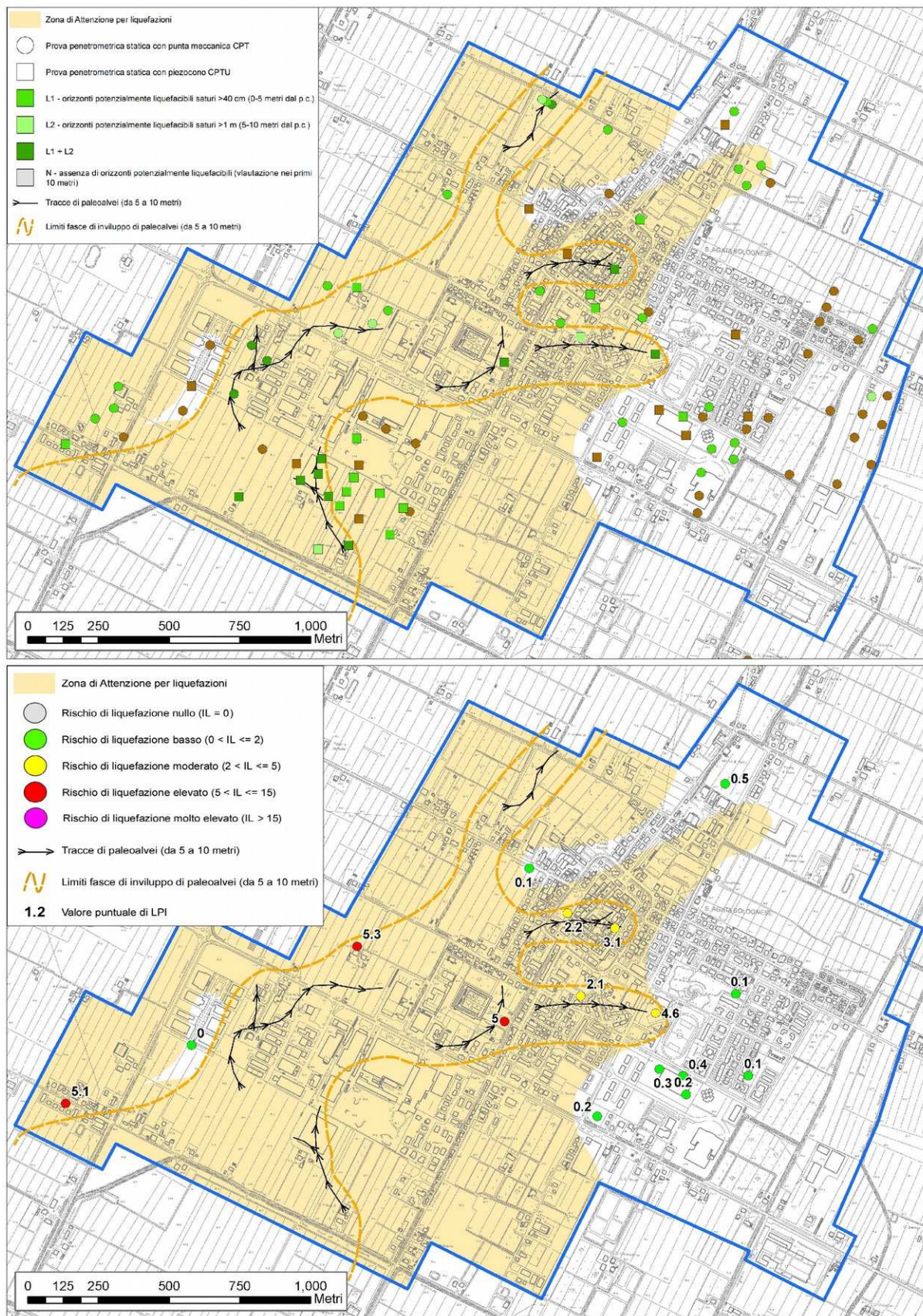


Figura 7.10 – Punti di controllo dell'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (prove CPTU): dettaglio dell'area Capoluogo. In alto, la classificazione tessiturale delle indagini geognostiche relative all'elaborazione qualitativa della "zona di attenzione" per liquefazioni



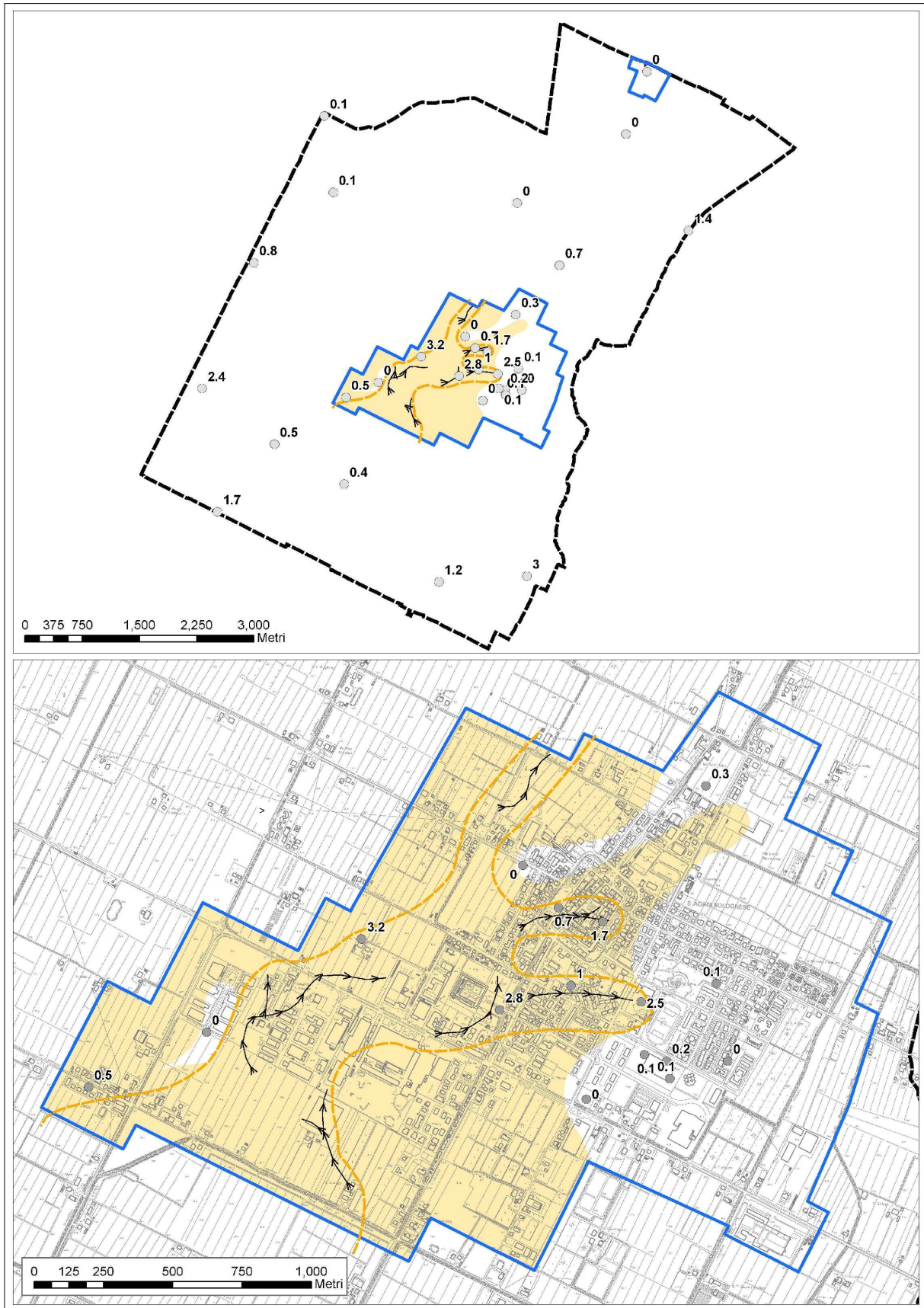


Figura 7.11 – Punti di controllo dei cedimenti post sisma (prove CPTU), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo. La figura riporta l'esito più cautelativo ricavato dalla stima di FSL secondo il metodo di Idriss & Boulanger 2008 (per:  $M = 6.14$ ;  $a_{max} = 0,26g$ ;  $falda = -1 m$ )



Le figure 7.9 e 7.10 riportano in una planimetria di sintesi gli esiti di verifica della liquefacibilità nel territorio di Sant'Agata Bolognese. La figura 7.10 riproduce con maggior dettaglio l'areale Capoluogo e riporta anche il confronto con la classificazione tessiturale del sottosuolo (fino a -10 m) servita per l'elaborazione della “zona di attenzione” per liquefazioni.

Gli esiti di LPI/IL più cautelativi, ricavati dal metodo di Boulanger & Idriss (2008) vengono dunque considerati di riferimento per lo studio di MS, in particolare per la delimitazione delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni riportata nella cartografia di livello 3 (Tavole 6-7-8-9). Infatti, la cartografia di microzonazione sismica di “livello 3” prevede la delimitazione di eventuali “zone di suscettibilità” per le liquefazioni, basata sulle classi di pericolosità di Sonmez (2003) :

IL = 0	“Nullo/Non liquefacibile” (FSL $\geq 1,2$ )
0 < IL $\leq 2$	Potenziale “basso”
2 < IL $\leq 5$	Potenziale “moderato”
5 < IL $\leq 15$	Potenziale “elevato”
IL > 15	Potenziale “molto elevato”

Le verifiche espletate, dimostrano esiti di potenziale liquefazione complessivamente contenuti, con molte prove risultanti a pericolosità potenziale da “bassa” a “moderato”. Solo tre punti di controllo nel territorio urbanizzato risultano classificabili come “rischio elevato” (5 < IL  $\leq 15$ ), tuttavia con esiti prossimi al limite basso della classe. Gli esiti più severi di IL sono ricavati nel settore di territorio sud-ovest ove è possibile delimitare un più ampio involucro di depositi di “crevasse” e/o di modesti paleoalvei a tessiture limoso sabbiose (come delimitato anche nella figure 7.9 e 7.10). Il maggior contributo alla quantificazione di IL è determinato dagli intervalli granulari, di modesto spessore, riscontrati soprattutto a profondità superiori a 5 metri (figura 7.12).

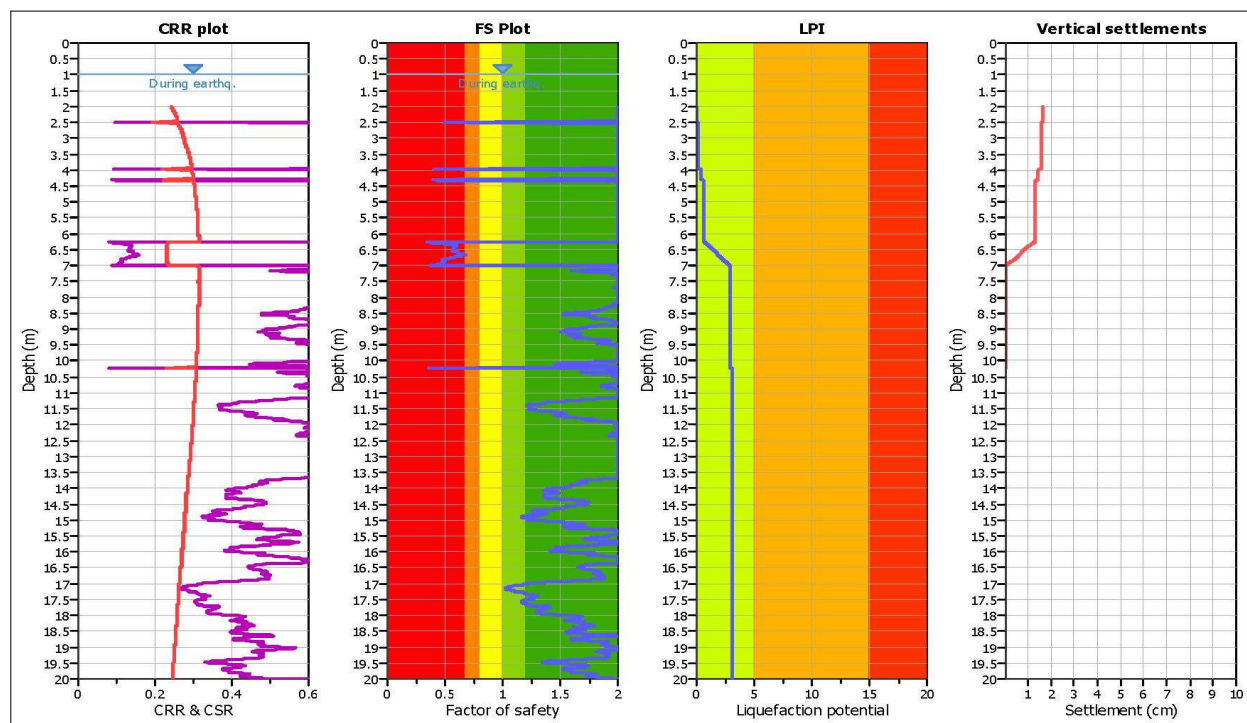


Figura 7.12 – Grafici delle verifiche di FSL secondo l'approccio di Idriss & Boulanger (2008) per la prova CPTU eseguita nel centro storico di Sant'Agata Bolognese “P5CPTU9” (per:  $M = 6.14$ ;  $a_{max} = 0,24g$ ; falda = -1 m)

La figura 7.11 riporta la cartografia di sintesi con gli esiti delle verifiche quantitative dei cedimenti post sisma nell'areale Capoluogo, anch'essi stimati secondo l'approccio di calcolo di FSL di Idriss & Boulanger (2008).

È necessario evidenziare che, per la prova CPTU13, il maggior contributo al potenziale di liquefazione è correlato all'intervallo fine scarsamente coesivo e scarsamente consistente individuato alla profondità tra -4,5 m e circa -6 m (figura 7.12bis). Questo intervallo di sedimenti, caratterizzato da scarsa qualità geotecnica (resistenze  $q_c \ll 0,5$  Mpa), è riscontrabile in altre prove penetrometriche del Capoluogo e, per tale motivo, lo studio di MS di livello 2 del 2014 aveva discriminato nella cartografia MOPS (cfr figura 2.13) due “zone di attenzione” che comprendevano areali soggetti a sovrapposizione di instabilità differenti: potenziale suscettibilità per liquefazione e possibilità di cedimenti post sisma (anche nei sedimenti fini).

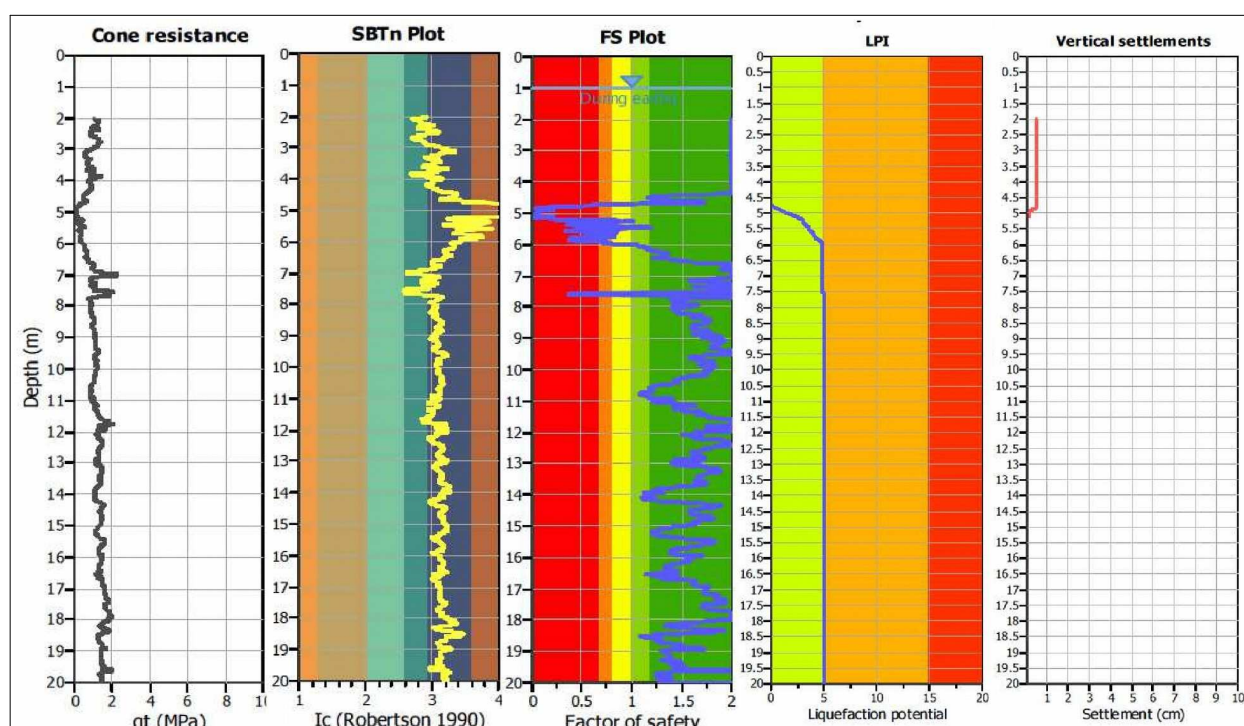


Figura 7.12bis- Grafici delle verifiche di FSL (approccio di Idriss & Boulanger (2008) per la prova “P7CPTU13” eseguita nella frazione Maggi Bolognese (per:  $M = 6.14$ ;  $a_{max} = 0,24g$ ; falda  $= -1$  m). Si riportano gli esiti di LPI e cedimenti post sisma.

Tuttavia, gli approfondimenti di livello 3 espletati nelle due citate “zone di attenzione”, con l'esecuzione di numerose prove CPTU e il sondaggio a carotaggio continuo, hanno dimostrato la pressoché assenza di strati granulari significativi in termini di liquefacibilità. Inoltre, le verifiche dei cedimenti post sisma calcolati anche negli intervalli fini sono risultati molto contenuti (solo in tre punti superano il “pollice”). Nella citata prova CPTU13, eseguita a Maggi, i cedimenti calcolati nell'intervallo di sedimenti scarsamente consistenti (vedi figura 7.12bis) sono risultati complessivamente trascurabili (pari a 0,5 cm).

Si rammenta che i cedimenti post sisma calcolati nelle prove e rappresentati nei precedenti grafici, sono da intendersi cumulativi e che un'effettiva analisi del cedimento, in particolare della sua ammissibilità, è tuttavia legata alle caratteristiche dei manufatti e all'effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.

Per questo studio sono state eseguite simulazioni di liquefacibilità considerando anche input di Pga più severi rispetto agli esiti ricavati dall'analisi numerica di RSL. Si è dunque espletata un'ulteriore simulazione “aperta” delle verifiche da prove CPTU per stimare la variabilità dell'indice LPI e dei cedimenti post-sisma rispetto all'incremento delle Pga riscontrabili al suolo, mantenendo costanti gli altri parametri di input (magnitudo e falda). Questa simulazione si è anch'essa basata sull'approccio di stima del fattore di sicurezza alla liquefazione proposto da Idriss & Boulanger 2008.

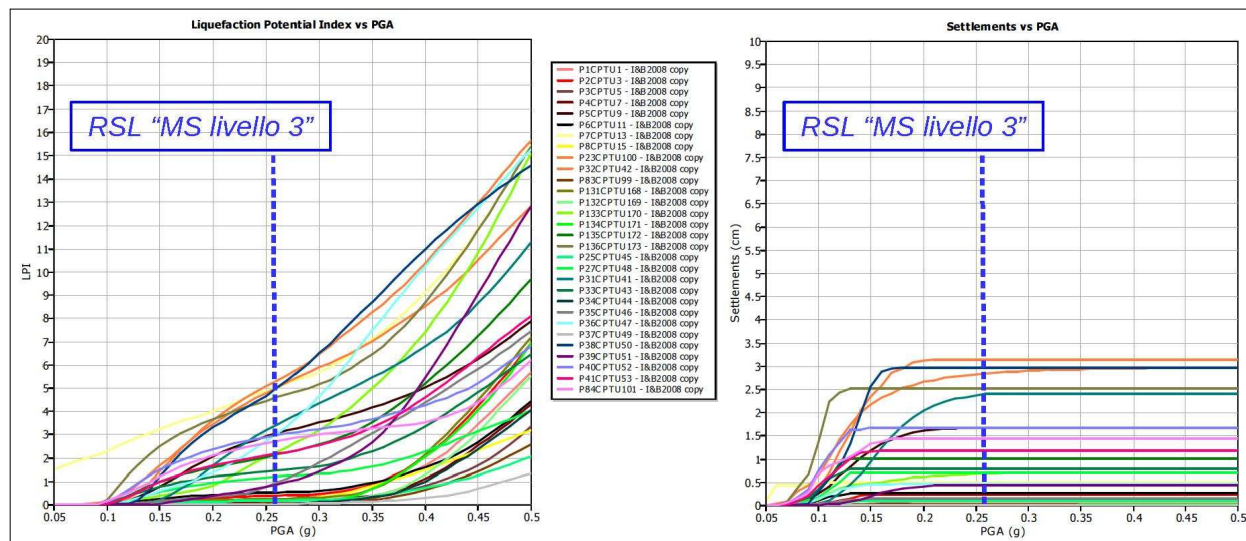


Figura 7.13 – Variabilità dei cedimenti post-sisma e di LPI in funzione della massima ag attesa al suolo (Pga) e con magnitudo di riferimento ( $M=6,14$ )

Gli esiti delle simulazioni aperte, riassunti graficamente nella figura 7.13, evidenziano il prevedibile incremento di LPI/IL all'aumentare dell'input Pga. Tuttavia l'incremento di IL non risulta particolarmente elevato: ad esempio, per Pga = 0,31g (equiparabile alle accelerazioni misurate nelle zone epicentrali durante il terremoto emiliano 2012) le simulazioni indicano valori di IL ancora prevalentemente da “bassi” a “moderati” (ad esclusione di quattro punti con IL fino a circa 7). Dalla simulazione aperta risulta, inoltre, che i valori di cedimento post sisma stimati con Pga ricavata dalla modellazione numerica di RSL, sono da considerarsi i massimi attesi.

In conclusione, gli approfondimenti effettuati per questo studio hanno permesso alcuni locali aggiornamenti della cartografia MOPS (tavola 4), consentendo di delimitare le tre differenti “zone di attenzione” per liquefazioni:

- 30502002 → sedimenti superficiali con tessiture prevalentemente fini e con locali intervalli limoso-sabbiosi di spessore decimetrico;
- 30502003 → sedimenti superficiali con tessiture prevalentemente fini e con locali intervalli limoso-sabbiosi, che risultano più frequenti rispetto alla precedente zona (in particolare da -5 a -10 metri). Corrisponde a un circoscritto settore di territorio a sud ovest del Capoluogo, ove viene delimitato un più ampio involucro di depositi di “crevasse” e/o di modesti paleoalvei a tessiture limoso sabbiose.
- 30502004 → sedimenti superficiali con tessiture prevalentemente fini e con locali intervalli limoso-sabbiosi. Questa zona è individuata nella frazione Maggi ed è caratterizzata da spessori più significativi di argille limose poco coesive e scarsamente consistenti (più frequenti nei primi 6 metri).



Le indagini eseguite e gli esiti numerici di liquefacibilità e di cedimento post sisma hanno inoltre permesso di stralciare dalle zone di attenzione per liquefazioni un'ulteriore porzione sud orientale di territorio del Capoluogo, per l'assenza di livelli sabbiosi significativi.

Come già scritto, nelle cartografie di microzonazione sismica di “livello 3” (Tavole 6-7-8-9), gli esiti numerici del potenziale di liquefazione IL hanno consentito di attribuire le già descritte “zone di attenzione” a “zone di suscettibilità”, basate sulle classi di pericolosità di liquefazione di Sonmez (2003): nel caso di Sant'Agata Bolognese vengono individuate le classi “moderato” ( $2 < IL \leq 5$ ) ed “elevato” ( $5 < IL \leq 15$ ), quest'ultima riferita al settore sud ovest del capoluogo ove le indagini hanno riscontrato livelli sabbiosi più significativi (involuppo di depositi di “crevasse”).

La figura 7.14 riporta una sintesi planimetrica delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni attribuite al territorio di Sant'Agata bolognese.

In conclusione, gli esiti conducono alla necessità di ulteriori verifiche della liquefacibilità, tuttavia da prevedere in fase di progettazione e quindi alla scala locale. In tal senso, gli ulteriori approfondimenti, dovranno ineludibilmente considerare le caratteristiche prestazionali dei manufatti di progetto e le relative condizioni di ammissibilità rispetto alle condizioni di liquefacibilità riscontrabili.

Per il contesto litostratigrafico che caratterizza il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese, si ritiene che, nelle “zone di attenzione” per liquefazioni perimetrare nella cartografia MOPS (Tavola 4), siano consigliabili indagini geotecniche che prevedano prove penetrometriche di tipo elettrico (possibilmente con piezocono) rispetto a penetrometrie con punta meccanica: le prove CPTe/CPTU sono infatti in grado di fornire una migliore definizione tessiturale e meccanica degli intervalli che potrebbero risultare critici per la stabilità anche in condizioni sismiche, con relativi costi d'indagine ancora piuttosto contenuti.

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 8.1 Carta delle Indagini (Tavola 1)

Lo studio di microzonazione ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative realizzate per questo lavoro.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Sant'Agata Bolognese, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio. Si tratta, complessivamente, di 196 indagini nuove e di repertorio (escludendo le prove di laboratorio). per una descrizione dettagliata sulla tipologia delle indagini disponibili si rimanda al Capitolo 4.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.0), distinguendo le prove di repertorio e nuove prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

### 8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2)

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:5.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (analisi tessiturali; classificazione dei campioni prelevati) e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici. L'elaborazione di questa cartografia è basata sui seguenti criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.0);
- si è considerata la prevalenza tessitoriale nella “colonna” di sedimenti rispettivamente profonda fino a –6 metri (intervallo di sottosuolo che meglio rappresenta il “volume significativo” per la maggior parte dei manufatti riscontrabili nell'area di studio);
- nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è volutamente escluso lo spessore di sedimenti superficiali insaturi (sovracconsolidati per essiccamento e con dati tessiturali mal interpretabili).

Il territorio di studio è compreso nelle due classi USCS/AGI denominate “CL” e “ML” (cfr. Capitolo 5). La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ le tracce sepolte riconducibili a depositi di paleovalvei distali (attribuibili a “rotte” del Fiume Panaro, per lo più attraversati a profondità comprese tra –5 e –10 metri);

- ✓ le tracce delle sezioni geologiche che sono risultate di riferimento per questo lavoro (due sezioni denominate 1-1' a 2-2');
- ✓ la localizzazione dei sondaggi o pozzi. Per Sant'Agata le terebrazioni non hanno raggiunto il bedrock sismico in senso stretto ( $V_s \geq 800$  m/s), e per questo così classificati. Tuttavia, come descritto nei capitoli 6 e 7, tre sondaggi a sud del Capoluogo hanno consentito di individuare un importante riflettore sismico che è stato considerato come tetto del pseudobdrock di riferimento per le modellazioni numeriche di RSL;
- ✓ la localizzazione dei pozzi freatici, con indicata la relativa soggiacenza (in metri) della falda.

### 8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura dei microtremori sismici registrati a stazione singola (con tecnica HVSR). Ad ogni punto, nella cartografia viene indicato il valore stimato di  $F_0$  (valore del "picco" più significativo), corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale).

I punti di misura sono stati classificati per classi di frequenza fondamentale, secondo quanto indicato nell'Allegato C della DGR regionale n.1227/2015. In tal senso, per Sant'Agata Bolognese si sono discriminate le seguenti due classi:

$$F_0 \leq 1 \text{ hz}$$

$$1 < F_0 \leq 2 \text{ hz}$$

I punti di misura sono stati inoltre classificati (con opportuna simbologia) in base all'entità dei contrasti d'impedenza nelle seguenti due classi:

$$1,5 \leq H/V < 2 \text{ (bassi)}$$

$$2 \leq H/V < 3 \text{ (moderati)}$$

Tuttavia, per la relativa disomogeneità degli esiti HVSR non è stato possibile realizzare una affidabile e significativa suddivisione del territorio dei comuni in aree per classi di frequenza omogenee.

Le frequenze fondamentali rilevate nel territorio di Sant'Agata Bolognese risultano comprese tra 0,8 Hz e 1,2 Hz. Questa "variabilità", è tuttavia presumibilmente da ricondurre ad anomalie del segnale sismico registrato. Occorre infine rammentare che i dati acquisiti attraverso la campagna di misure di microtremore hanno riscontrato amplificazioni spettrali a più basse frequenze, fino a circa 0,6 Hz, come meglio descritto nel Capitolo 5. Le amplificazioni a più basse frequenze hanno consentito di individuare la profondità del principale contrasto di impedenza che è stato considerato anche nelle modellazioni numeriche di RSL.

### 8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4)

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:5.000, rappresenta la suddivisione del territorio comunale studiato in "Zone suscettibili di amplificazione" e in "Zone di attenzione per instabilità". Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.



Per quanto riguarda le “Zone suscettibili di amplificazioni”, gli esiti dello studio di MS consentono di includere tutto il territorio comunale studiato in un'unica zona (codice 2001), così descritta nella legenda:

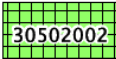
<b>2001</b>	Zona 1 – Coperture alluvionali recenti (AES8) sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente fini (alternanze di limi, argille e sabbie). Profondità del principale riflettore sismico > 150 m (“Pianura 2” – DGR 2193/2015). Tessiture superficiali (primi 30 metri) prevalentemente fini.
-------------	---

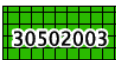
Le indagini sismiche HVSR rilevano frequenze fondamentali tra 0,8 Hz e 1,2 Hz (correlabili con riflettori sismici profondi circa -100 metri), con ulteriori amplificazioni a più basse frequenze, fino a circa 0,6 Hz (riflettori sismici collocabili a profondità comprese tra -100 metri e -200 metri), come descritto nel Capitolo 5. Ciò porta a includere (con una migliore approssimazione) il territorio studiato al macro contesto sismostratigrafico “Pianura 2”, come definito nella DGR 2193/2015. Gli esiti delle modellazioni numeriche di RSL, congrui con i parametri di “Pianura 2” hanno ulteriormente confermato questa attribuzione.

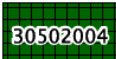
Come descritto nei Capitoli 5 e 6, i principali alti spettrali H/V sono stati associati a riflettori sismici situati a profondità comprese tra la quota di base dell'unità alluvionale AES6 e il tetto di spessori sabbioso/ghiaiosi a circa -170 m dal p.c., parzialmente attraversati dalle terebrazioni (pozzi per acqua), a sud-est del Capoluogo.

Le indagini geofisiche disponibili (tromografie; prove MASW/ReMi; “Coni Sismici”; ESAC), consentono di stimare per tale zona una  $V_{s30}$  inferiore a 225 m/s. La morfologia è complessivamente piana.

La presenza di strati limoso sabbiosi e di strati argillosi scarsamente coesivi e poco consistenti ha imposto di delimitare tre differenti “Zone di attenzione per liquefazione” (codici: “30502002”, “30502003”, “30502004”), individuate nel settore ovest del Capoluogo e comprendente anche la frazione Maggi. Tali zone vengono così descritte in legenda:

 <b>30502002</b>	ZA_LQ – Zona di attenzione per liquefazioni. Zona 2 – Coperture alluvionali recenti (AES8) sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente fini (alternanze di limi, argille e sabbie). Profondità del principale riflettore sismico > 150 m (“Pianura 2” – DGR 2193/2015). Tessiture superficiali (primi 30 metri) prevalentemente fini con locali intervalli limoso-sabbiosi.
--	---

 <b>30502003</b>	ZA_LQ – Zona di attenzione per liquefazioni. Zona 3 – Coperture alluvionali recenti (AES8) sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente fini (alternanze di limi, argille e sabbie). Profondità del principale riflettore sismico > 150 m (“Pianura 2” – DGR 2193/2015). Tessiture superficiali (primi 30 metri) prevalentemente fini con locali intervalli limoso-sabbiosi (più frequenti e fino a 1 metro di spessore, da 5 a 10 metri).
--	---

 <b>30502004</b>	ZA_LQ – Zona di attenzione per liquefazioni. Zona 4 – Coperture alluvionali recenti (AES8) sovrastanti altri depositi alluvionali prevalentemente fini (alternanze di limi, argille e sabbie). Profondità del principale riflettore sismico > 150 m (“Pianura 2” – DGR 2193/2015). Tessiture superficiali (primi 30 metri) prevalentemente fini con locali intervalli limoso-sabbiosi, con argille limose poco coesive e scarsamente consistenti (più frequenti nei primi 6 metri).
--	--

La cartografia MOPS riporta, inoltre, le stesse “forme di superficie e sepolte” già presenti nella carta geologico tecnica (tavola 2) e i punti di misura di rumore ambientale.

### 8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5)

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di  $V_s$ , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ( $V_{s_{30}}$ ). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia semplificata (DGR 1227/2015; DGR 2193/2015; criteri nazionali ICMS 2007).

Nel caso di Sant'Agata Bolognese, le  $V_s$  sono ricavate in modo diretto da prove penetrometriche con “Cono Sismico”, inoltre da prove ReMi, MASW e da array bidimensionale (ESAC eseguita nel Capoluogo). La cartografia riporta per ognuna di esse (nell'etichetta creata per ogni singola prova di riferimento) la tipologia della prova e la stima della relativa  $V_{s_{30}}$ .

Si evidenzia che gli esiti di  $V_{s_{30}}$  ricavati dalle prove geofisiche sono risultati discretamente e tali da attribuire a tutti gli areali di studio una  $V_{s_{30}}$  inferiore a 225 m/s.

Ulteriori informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle  $V_s$  misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei capitoli 4 e 5, a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

### 8.6 Carta di microzonazione sismica livello 3 (Tavole 6, 7, 8, 9)

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 2>> sono elaborate alla scala 1:5.000 e riportano le “zone stabili suscettibili di amplificazione” e le “zone suscettibili di instabilità” per le liquefazioni riscontrate nel territorio studiato di Sant'Agata Bolognese. Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Si tenga presente che le zone suscettibili derivano dalla cartografia MOPS (Tavola 4) e tuttavia:

- alle “zone stabili suscettibili di amplificazione” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SI) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.0). Si rammenta che per gli areali Capoluogo e frazione Maggi i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base di modellazioni numeriche della RSL (approfondimenti di “livello 3”), mentre per l'areale corrispondente alla frazione Crocetta i fattori di amplificazione sono desunti dagli abachi regionali (cfr. DGR 2193/2015, allegato A2), come meglio specificato nel Capitolo 7.
- le “zone suscettibili di instabilità” per le liquefazioni rappresentano la sintesi degli ulteriori approfondimenti di “livello 3” effettuati nelle “zone di attenzione” riportate nella cartografia MOPS. Attraverso la quantificazione dell'Indice di liquefazione (IL), sono state perimetrate zone di suscettibilità per le liquefazioni, discriminate secondo classi di pericolosità, come previsto dagli Indirizzi della CTMS, come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.0) e come meglio specificato nel Capitolo 7.

La grafica standard (colore pieno e retinatura) consente di attribuire alle zone di suscettibilità i rispettivi parametri di amplificazione (ricavati dalle modellazioni numeriche di

RSL).

In sintesi, sono state elaborate le seguenti quattro cartografie di microzonazione sismica:

- ✓ Tavola 6 → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- ✓ Tavola 7 → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,1 e 0,5secondi);
- ✓ Tavola 8 → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Tavola 9 → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,5 e 1,5secondi).

Occorre precisare che il fattore di amplificazione FA SI relativo a periodi compresi tra 0,5 e 1,5secondi (Tavola 9) non viene incluso negli Standard di rappresentazione della MS (v. 4.0), ma tuttavia richiesto dagli indirizzi regionali (cfr. DGR 2193/2015). Per questo motivo, negli shape file poligonali “stab” e “istab” è stato creato il nuovo campo <<FH0515>> ove riportare numericamente il valore di quest'ultimo fattore di amplificazione.



## 9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Basili R., G. Valensise P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008) – The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) – Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) – CSI Catalogo della sismicità italiana 1981–2002 versione 1.1. INGV-CNT, Roma, [Online], Available: <http://csi.rm.ingv.it/>
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2015) – Microzonazione sismica –

Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0. Disponibile all'indirizzo web: [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS\\_4.0\\_open.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_4.0_open.pdf) .

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2015) – Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, ©INGV2015 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT- DISS3.2.0.

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. *Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali*, Bologna.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: “*La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della regione Emilia-Romagna*”. Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) – *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) – *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all'indirizzo: [http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir\\_pk=395&cms\\_pk=15833](http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833) .

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G., INGV-SGA (2007) – CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.–1997) and Mediterranean Area (760 B.C.–1500). <http://storing.ingv.it/cfti4med/> .

ISIDe Working Group (2010) – Italian Seismological Instrumental and parametric database. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Foglio 202 San Giovanni in persiceto*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius

Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2011. *DBMI11, la versione 2011 del Database*

*Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V. Con Il Contributo Di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) – Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012). Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

Meletti, Valensise (2004) – *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Ministero delle Infrastrutture (2008) – D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni, Roma.

Pieri M. e Groppi G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Provincia di Bologna – *Variante al PTCP in materia di riduzione del rischio sismico. Adeguamento alla L.R. 19/2008*. 2013

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse (2004) – *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna – scala 1:250.000*. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – *Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna – cartografia interattiva consultabile on line: [https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss)*

Regione Emilia Romagna – *Legge Regionale n.20/2000 – “Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio”*.

Regione Emilia Romagna – *Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”*.

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.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 ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112”*.

Robertson P.K. (2009). *Performance based earthquake design using the CPT*. Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009.

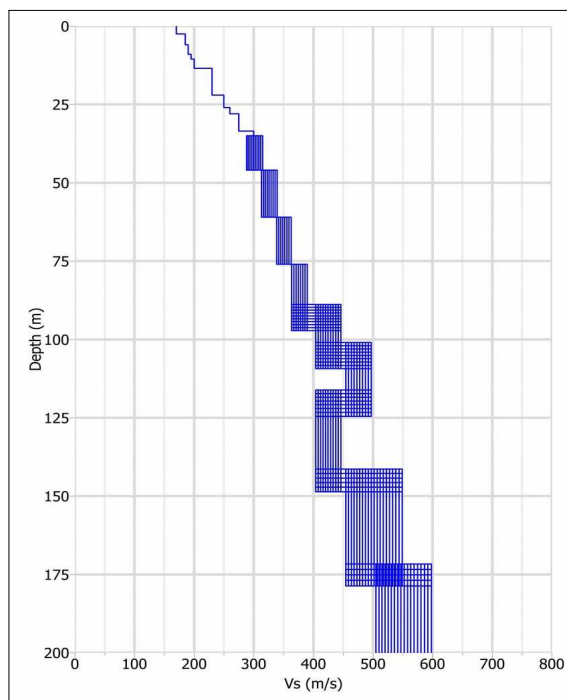


- Robertson P.K., Lisheng S. (2010). Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT. *FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, SAN diego, CA.*
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.*
- Robertson P.K. (2009). Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach., *Canadian Geotechnical Journal* 46(11): 1337–1355.
- Robertson P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136, 842 (2010).
- Robertson P.K. and, Wride CE . (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test". *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, Vol. 35, No. 3 : pp. 442–459.
- Youd, T.L., and Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4), 297–313.
- Zhang, Robertson, Brachman (2002). *Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(5) : 1168–1180, 10.1139/t02-047.

**ALLEGATI**

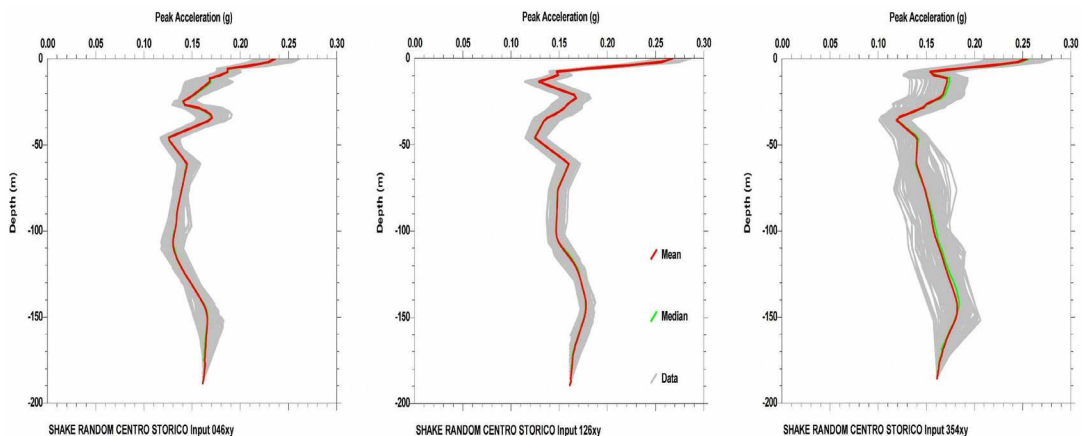
# MODELLO SHAKE RANDOM: SANT'AGATA BOLOGNESE – CENTRO STORICO

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:



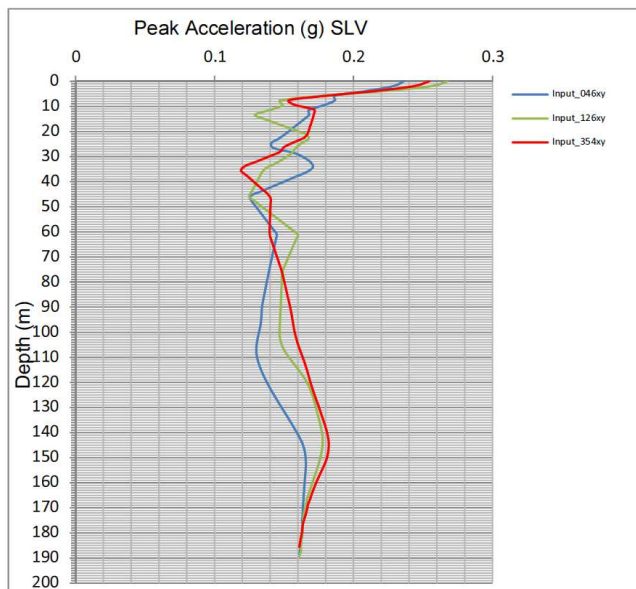
Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	6	2,5		2,5	17,5	0,05	170		Soil PI=15
2	6	3,5		6,0	17,0	0,05	185		Soil PI=15
3	1	1,0		7,0	17,5	0,05	190		Sand lower
4	8	2,0		9,0	17,5	0,05	190		Soil PI=50
5	4	1,5		10,5	17,5	0,05	195		Sand/Soil PI=0
6	6	3,0		13,5	17,5	0,05	200		Soil PI=15
7	6	8,5		22,0	17,5	0,05	230		Soil PI=15
8	6	4,0		26,0	18,0	0,05	250		Soil PI=15
9	2	2,0		28,0	18,5	0,05	260		Sand avg
10	7	3,5		31,5	18,0	0,05	275		Soil PI=25
11	8	2,0		33,5	18,0	0,05	275		Soil PI=50
12	2	1,5		35,0	19,0	0,05	300		Sand avg
13	6	11,0		46,0	18,5	0,05	300	±15	Soil PI=15
14	6	15,0		61,0	19,0	0,05	325	±15	Soil PI=15
15	7	15,0		76,0	19,0	0,05	350	±15	Soil PI=25
16	7	17,0	±5	93,0	19,0	0,05	375	±15	Soil PI=25
17	6	12,0	±5	105,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15
18	5	15,0	±5	120,0	21,0	0,05	475	±25	SAND/GRAVEL
19	6	25,0	±5	145,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15
20	6	30,0	±5	180,0	21,0	0,05	500	±50	Soil PI=15
Profondità vincolata pseudobedrock: -165±190							550	±50	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO (VALORI RANDOM, MEDIA E MEDIANA):



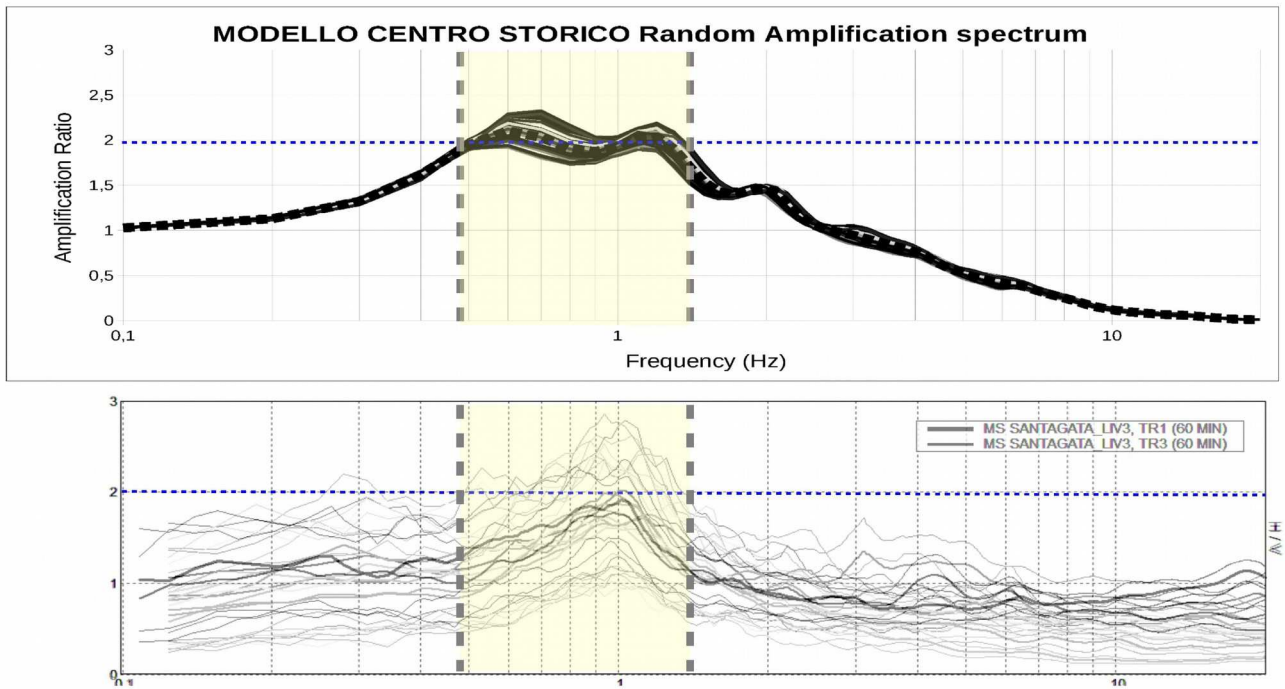
SHAKE RANDOM CENTRO ST.		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.236	0.268	0.254	0.253
2193/2015	FA Pga	1.468	1.663	1.581	1.6

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO, VALORI MEDI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO (IN ARANCIONE: VALORI MEDI COMPLESSIVI DEL MODELLO)

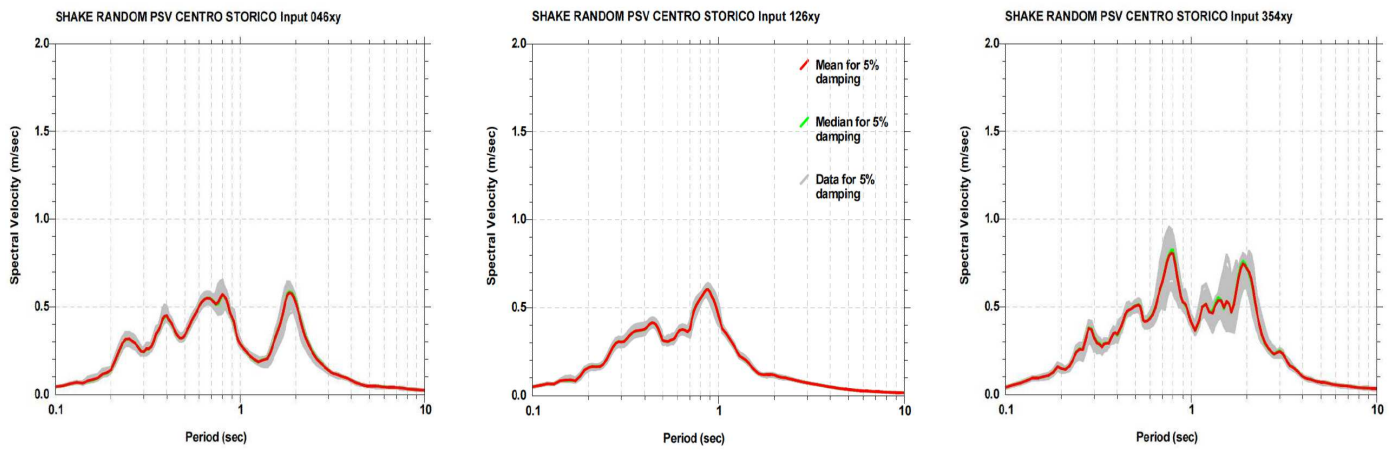




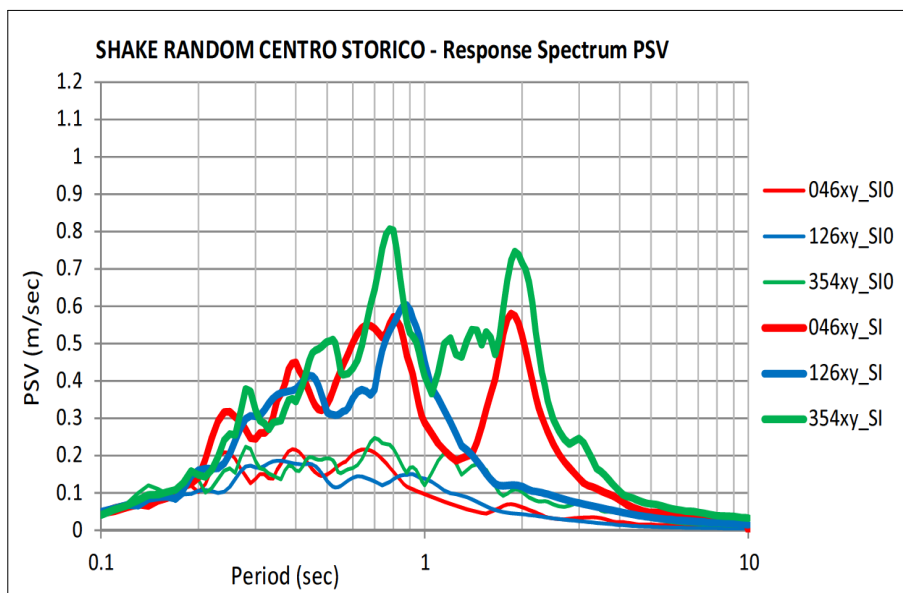
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DA REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO (HVSJR):



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUDBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):

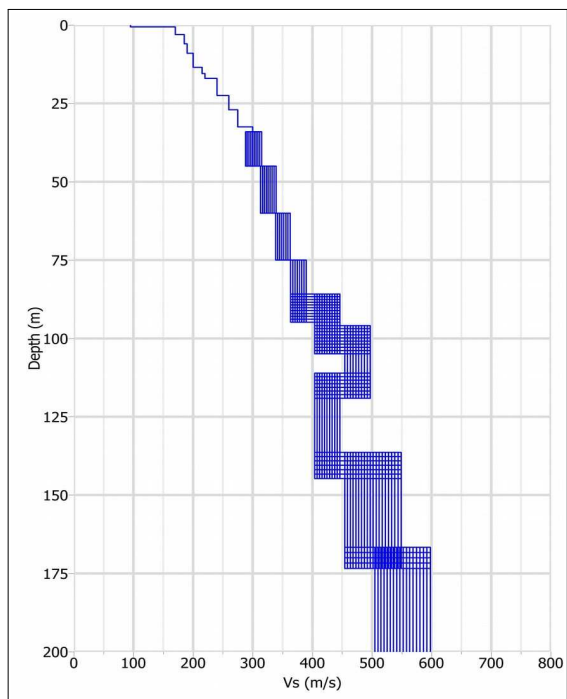


VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI DEL MODELLO:

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.8	2.9	3.1
Input_000046xy	1.9	3.3	3.1
Input_000354xy	1.9	3.0	2.9
<b>MEAN</b>	<b>1.9</b>	<b>3.1</b>	<b>3.0</b>

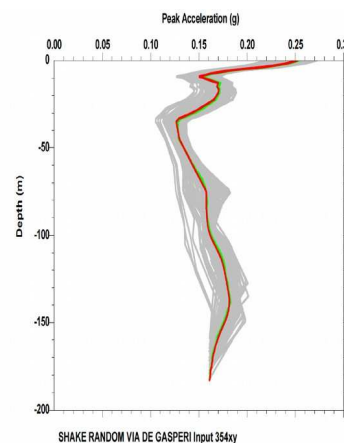
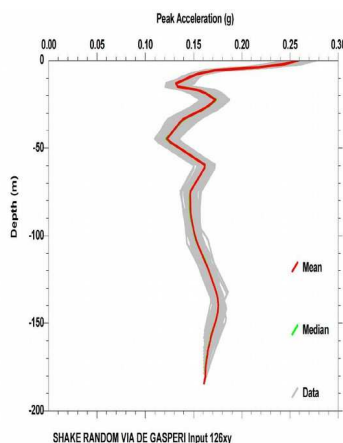
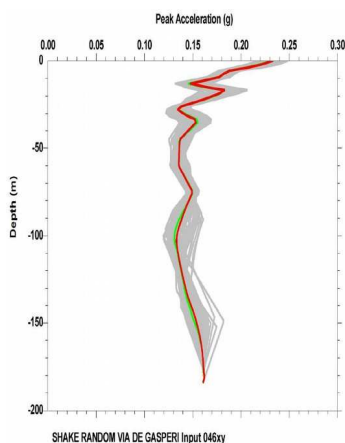
# MODELLO SHAKE RANDOM: SANT'AGATA BOLOGNESE – VIA DE GASPERI

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

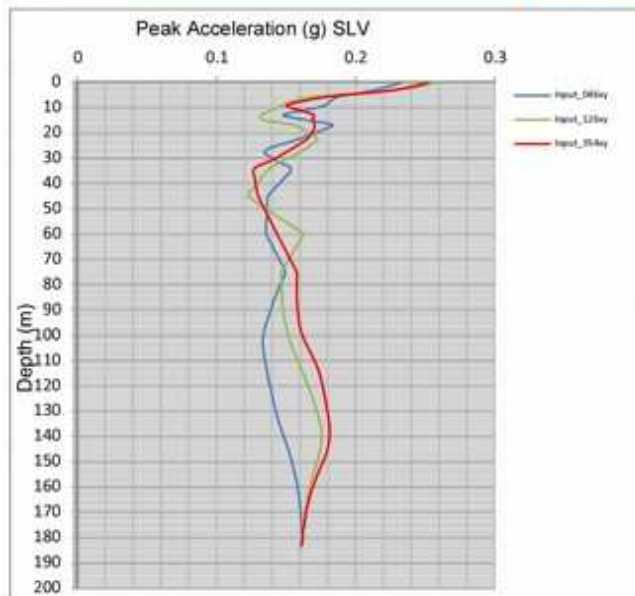


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	6	3,0		3,0	17,5	0,05	170		Soil PI=15
2	6	3,0		6,0	17,0	0,05	185		Soil PI=15
3	8	3,0		9,0	17,5	0,05	190		Soil PI=50
4	6	4,5		13,5	17,5	0,05	200		Soil PI=15
5	6	2,0		15,5	17,5	0,05	215		Soil PI=15
6	6	1,5		17,0	17,5	0,05	220		Soil PI=15
7	6	5,5		22,5	18,0	0,05	240		Soil PI=15
8	2	4,5		27,0	18,5	0,05	260		Sand avg
9	7	3,5		30,5	18,0	0,05	275		Soil PI=25
10	8	2,0		32,5	18,0	0,05	275		Soil PI=50
11	2	1,5		34,0	19,0	0,05	300		Sand avg
12	6	11,0		45,0	18,5	0,05	300		Soil PI=15
13	6	15,0		60,0	19,0	0,05	325	±15	Soil PI=15
14	7	15,0		75,0	19,0	0,05	350	±15	Soil PI=25
15	7	15,0		90,0	19,0	0,05	375	±15	Soil PI=25
16	6	10,0	±5	100,0	20,0	0,05	425	±15	Soil PI=15
17	5	15,0	±5	115,0	21,0	0,05	475	±25	SAND/GRAVEL
18	6	25,0	±5	140,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15
19	6	30,0	±5	170,0	21,0	0,05	500	±25	Soil PI=15
Profondità vincolata pseudobedrock: -160÷185							550	±50	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO (VALORI RANDOM, MEDIA E MEDIANA):

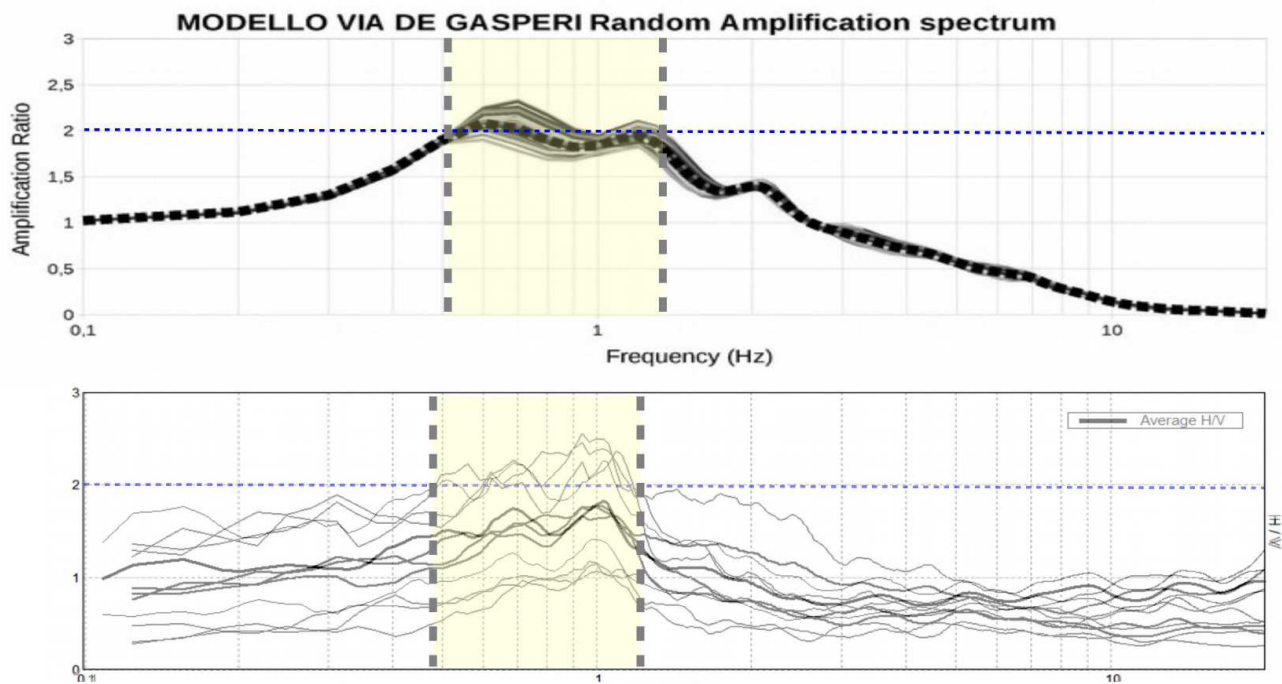


SHAKE RANDOM V. DE GASPERI		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DAL 112/2007	Max ag (g)	0.233	0.258	0.252	0.248
	FA Pga	1.447	1.606	1.567	1.5

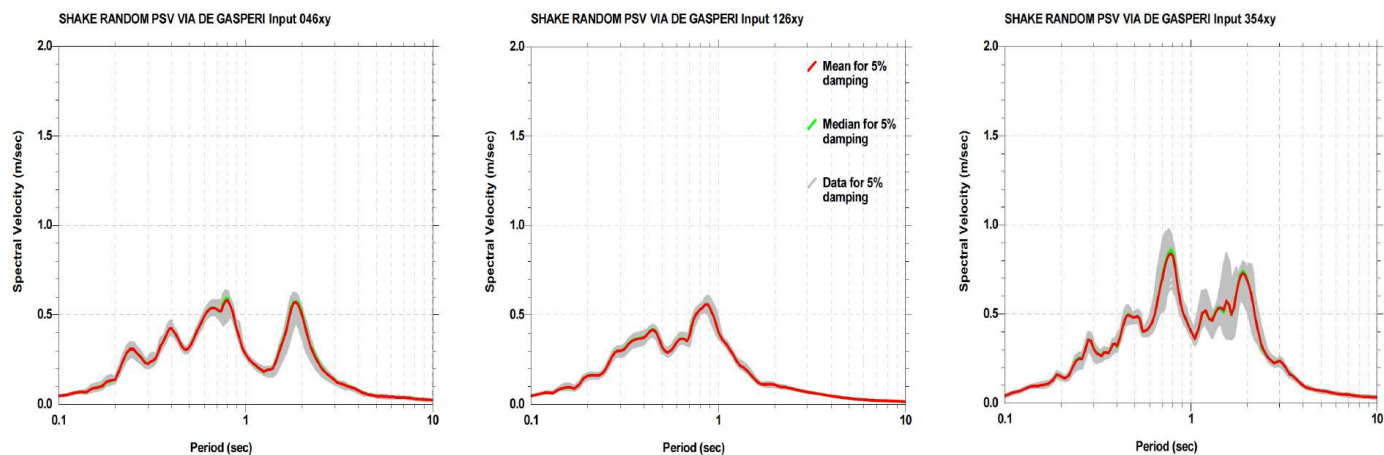


ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO, VALORI MEDI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO (IN ARANCIONE: VALORI MEDI COMPLESSIVI DEL MODELLO)

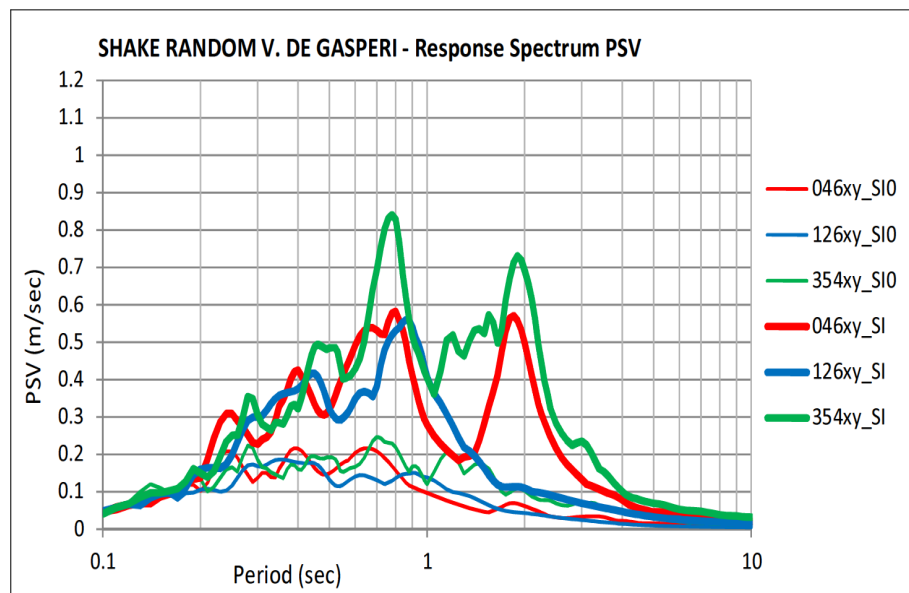
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DA REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO (HVSR):



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUDBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):



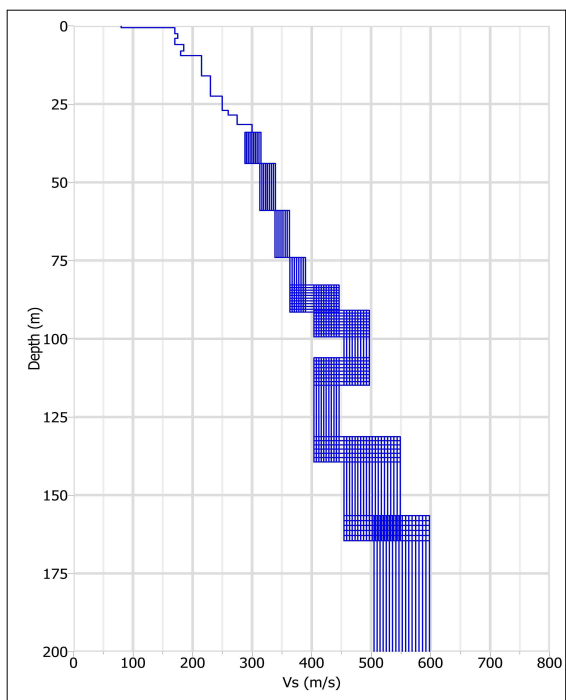
VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI DEL MODELLO:

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.7	2.9	3.0
Input_000046xy	1.9	3.2	2.9
Input_000354xy	1.8	3.1	2.9
<b>MEAN</b>	<b>1.8</b>	<b>3.1</b>	<b>3.0</b>



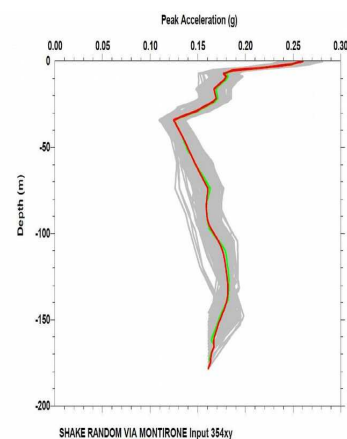
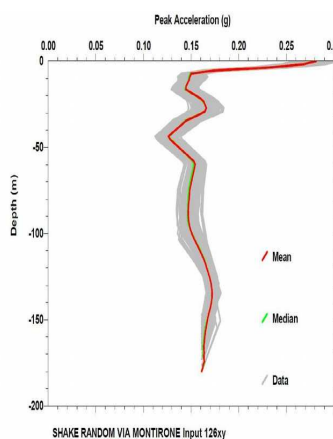
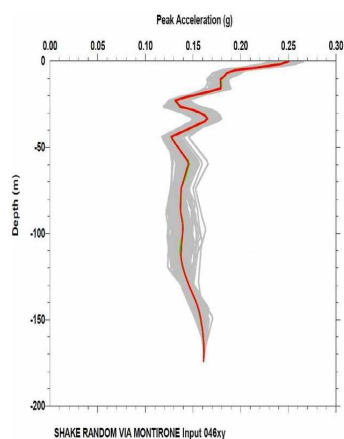
# MODELLO SHAKE RANDOM: SANT'AGATA BOLOGNESE – VIA MONTIRONE

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:



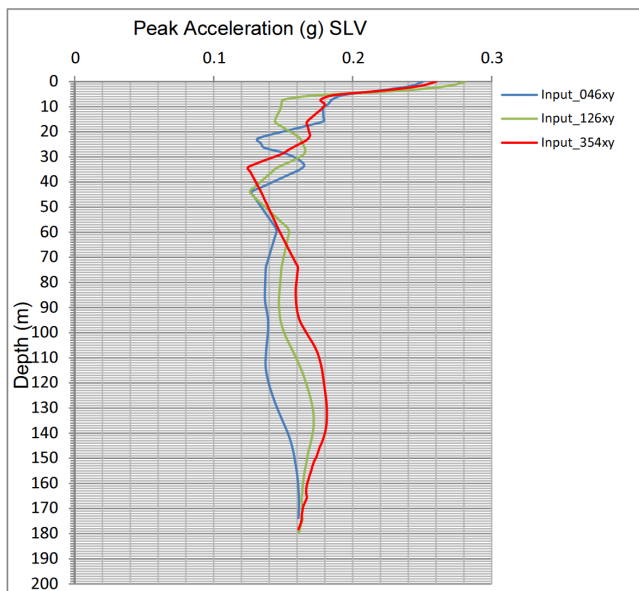
Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	4	2,5		2,5	17,5	0,05	170		Sand/Soil PI=0
2	4	1,5		4,0	17,5	0,05	175		Sand/Soil PI=0
3	6	2,0		6,0	17,0	0,05	170		Soil PI=15
4	4	2,0		8,0	18,0	0,05	185		Sand/Soil PI=0
5	8	1,5		9,5	17,5	0,05	180		Soil PI=50
6	6	6,5		16,0	17,5	0,05	215		Soil PI=15
7	6	6,5		22,5	17,5	0,05	230		Soil PI=15
8	6	4,5		27,0	18,0	0,05	250		Soil PI=15
9	2	1,5		28,5	18,5	0,05	260		Sand avg
10	7	3,0		31,5	18,0	0,05	275		Soil PI=25
11	2	2,5		34,0	19,0	0,05	300		Sand avg
12	6	10,0		44,0	18,5	0,05	300	±15	Soil PI=15
13	6	15,0		59,0	19,0	0,05	325	±15	Soil PI=15
14	7	15,0		74,0	19,0	0,05	350	±15	Soil PI=25
15	7	13,0	±5	87,0	19,0	0,05	375	±15	Soil PI=25
16	6	8,0	±5	95,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15
17	5	15,0	±5	110,0	21,0	0,05	475	±25	SAND/GRAVEL
18	6	25,0	±5	135,0	20,0	0,05	425	±25	Soil PI=15
19	6	25,0	±5	160,0	21,0	0,05	500	±50	Soil PI=15
Profondità vincolata pseudobedrock: -145÷180 m							550	±50	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO (VALORI RANDOM, MEDIA E MEDIANA):

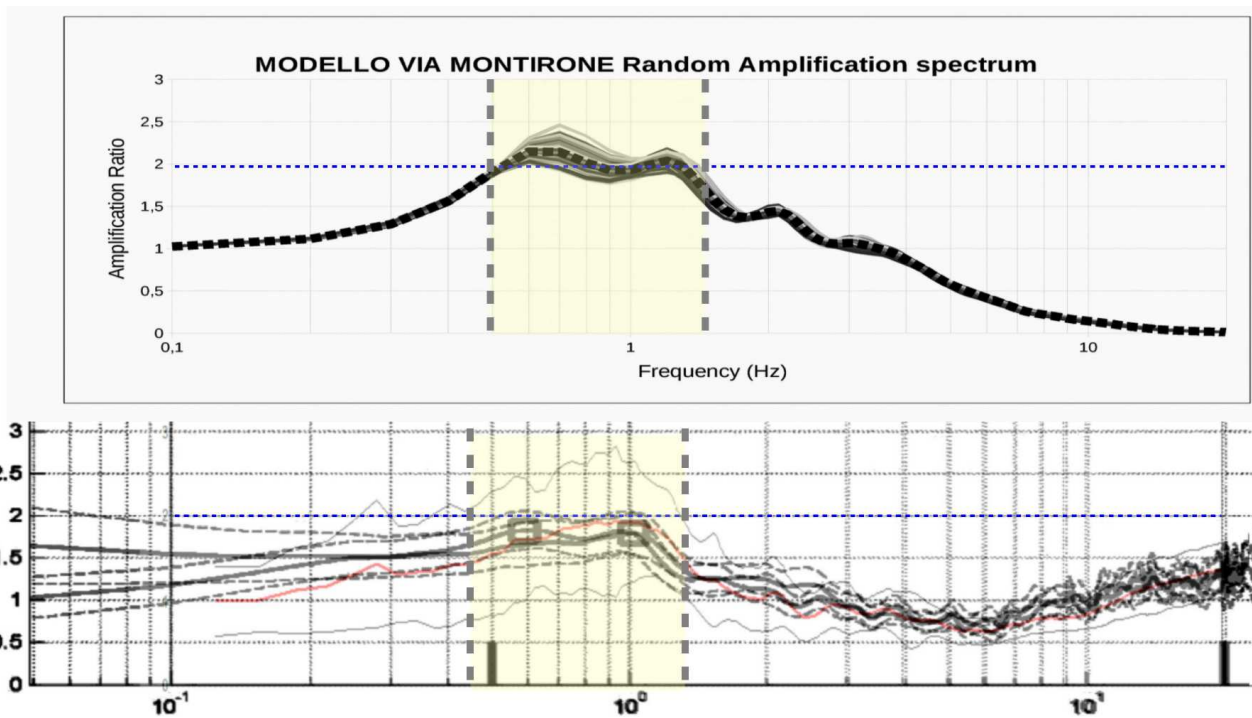


SHAKE RANDOM V. MONTIRONE		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.251	0.281	0.260	0.264
2193/2015	FA Pga	1.556	1.748	1.616	1.6

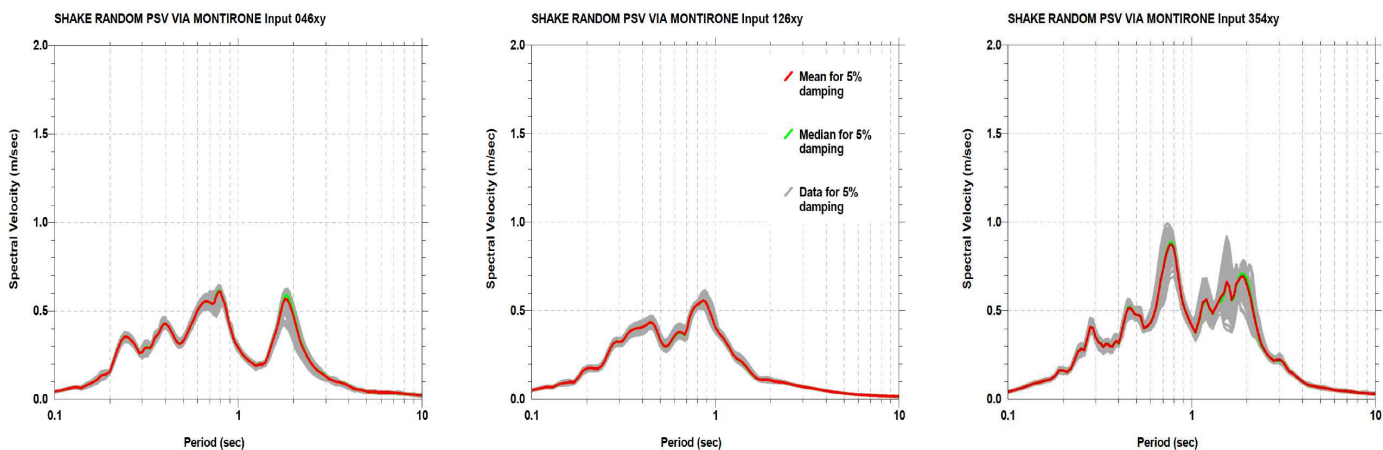
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO, VALORI MEDI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO (IN ARANCIONE: VALORI MEDI COMPLESSIVI DEL MODELLO)



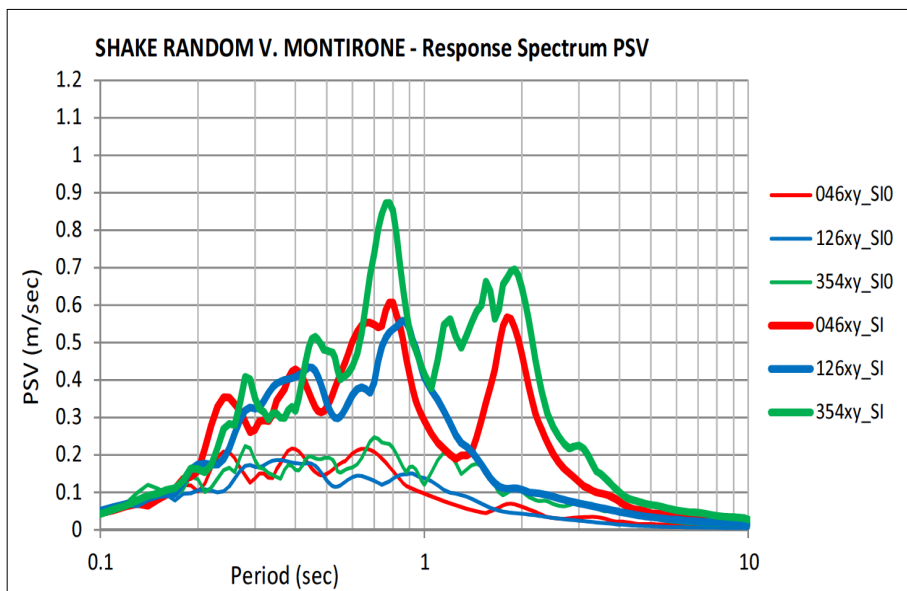
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DA REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO (HVSR):



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUDBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI<sub>0</sub>):



VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI DEL MODELLO:

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.8	2.9	3.1
Input_000046xy	2.0	3.2	3.0
Input_000354xy	1.9	3.2	3.1
<b>MEAN</b>	<b>1.9</b>	<b>3.1</b>	<b>3.1</b>

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

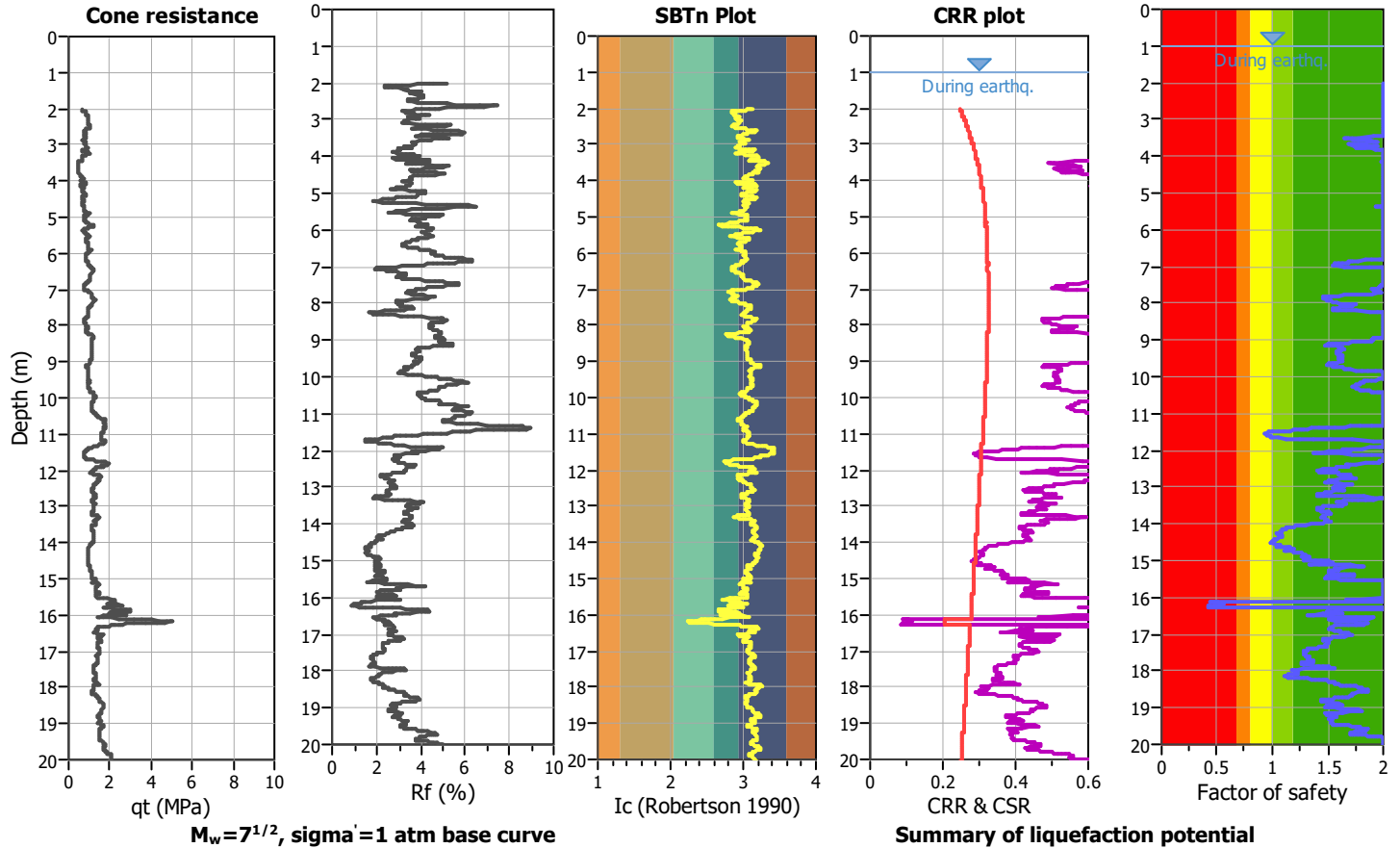
**Project title :**

**Location :**

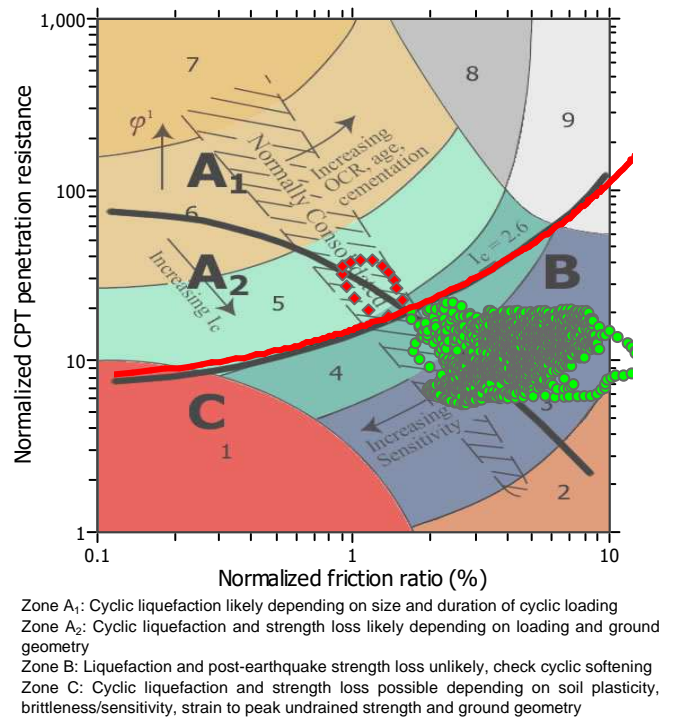
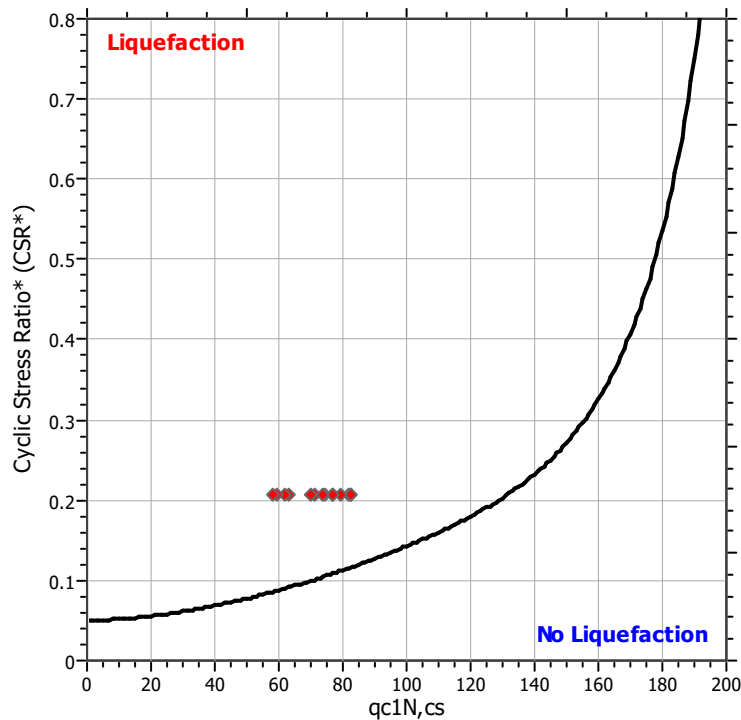
**CPT file : P1CPTU1 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.35 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	$\sigma_n$ :	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		

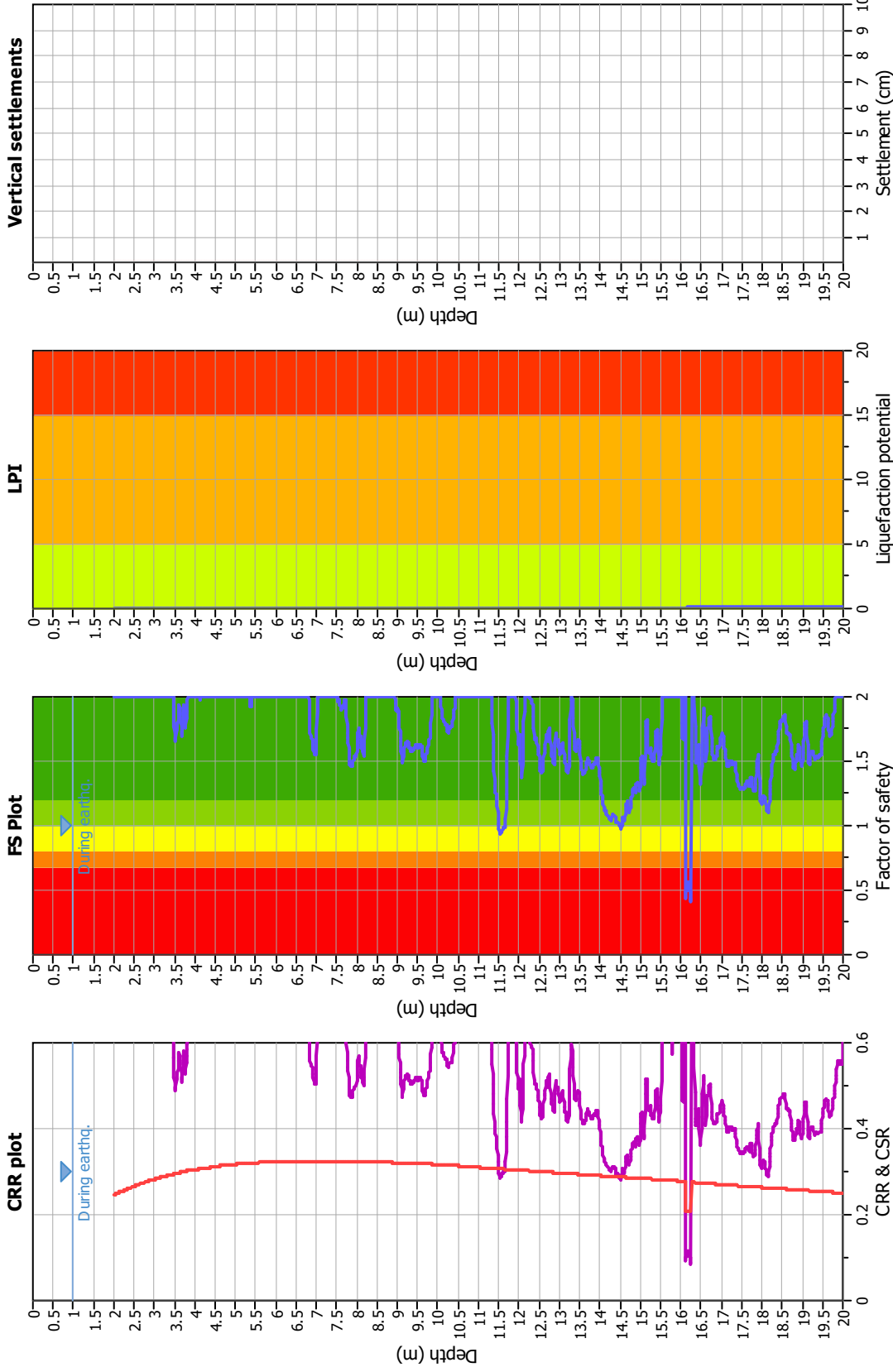


$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v = 1$  atm base curve





### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.35 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

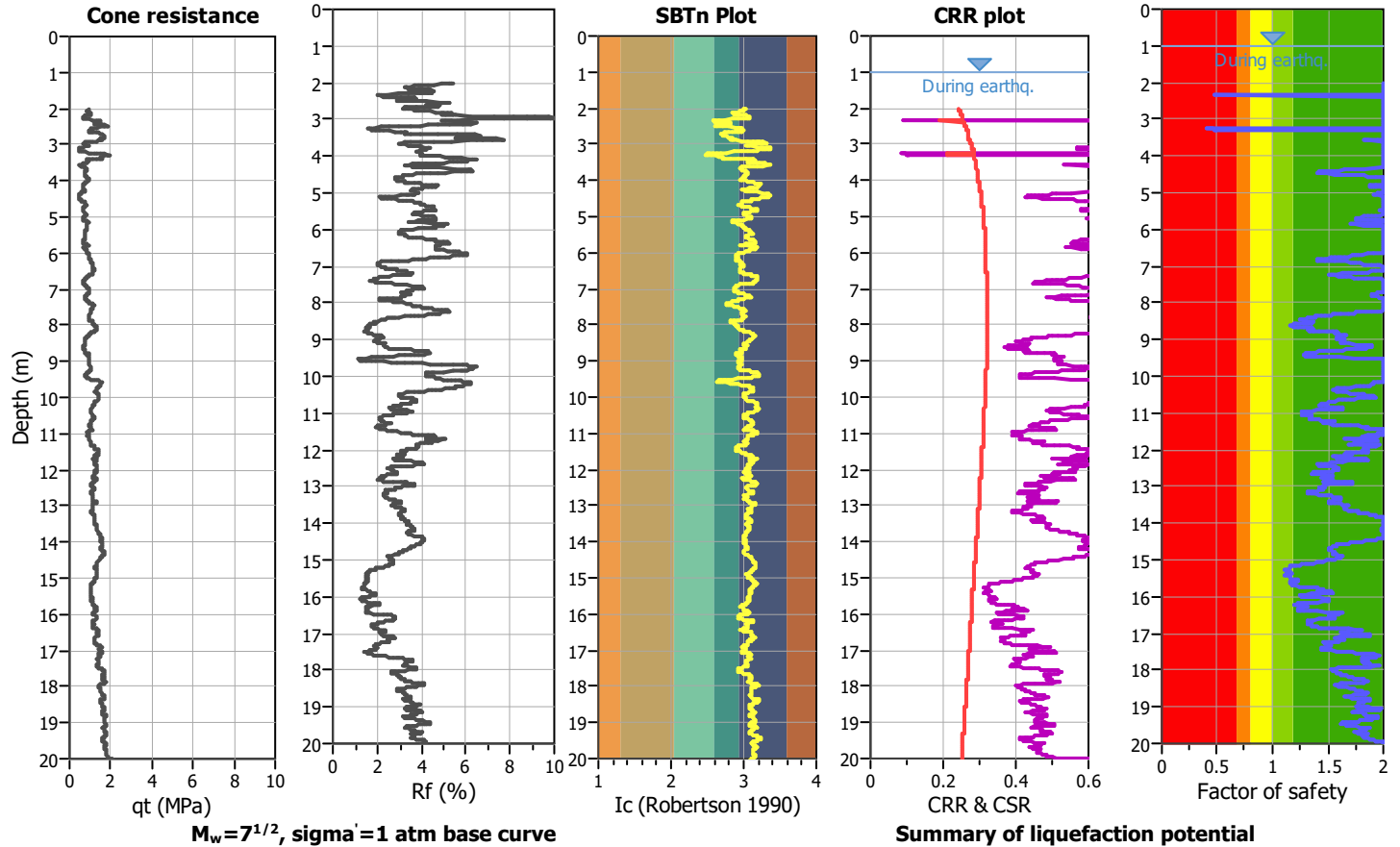
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P2CPTU3 - I&B2008**

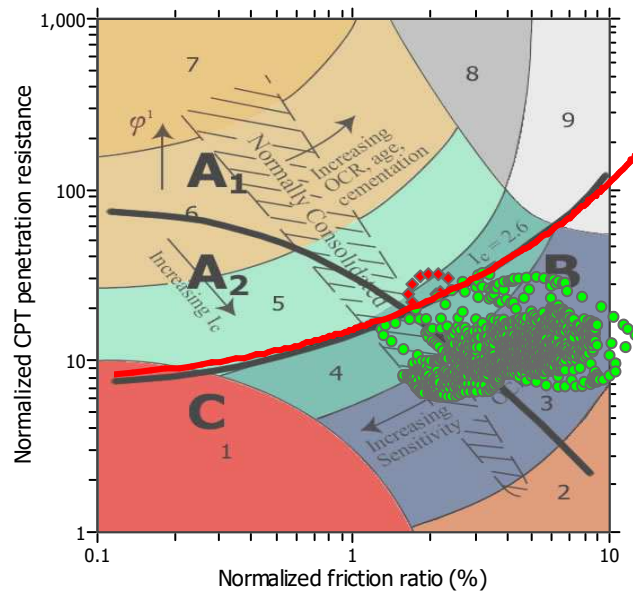
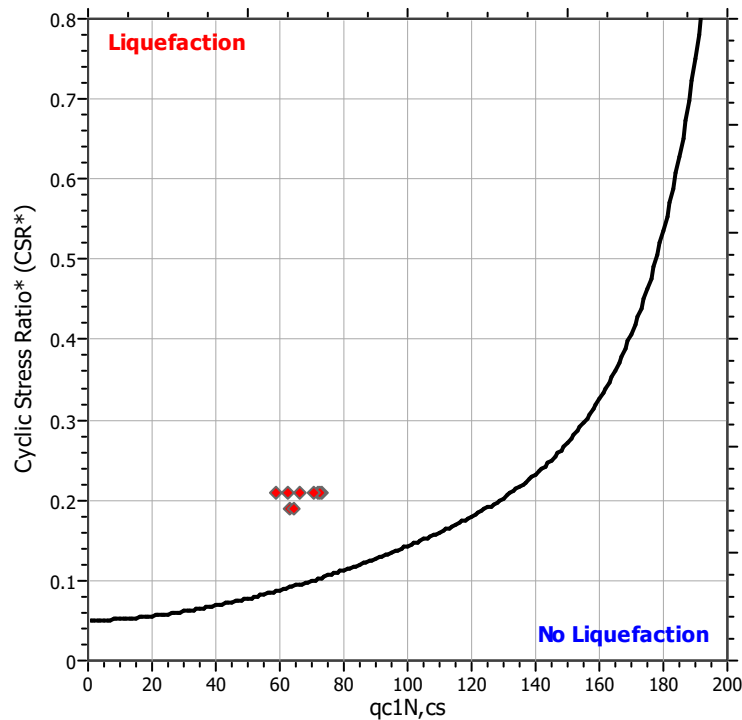
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



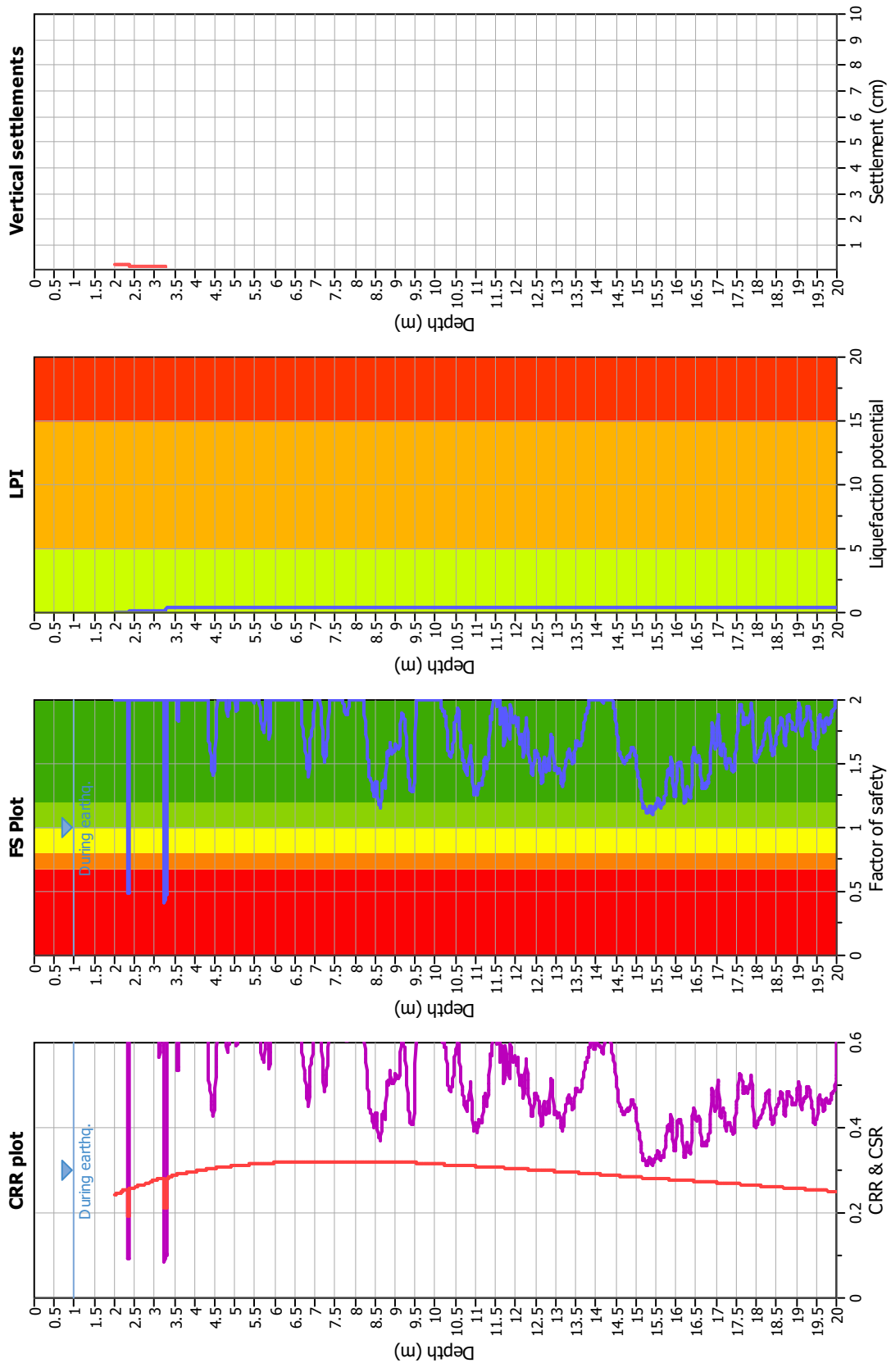
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.20 m

### F. S. color scheme

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

### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

### Fill weight:

Transition detect: applied: N/A  
 K<sub>s</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### Depth to GWT (earthq.):

1.00 m

### Average results interval:

3

### Ic cut-off value:

2.60

### Unit weight calculation:

Based on SBT

### Use fill:

No

### Fill height:

N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

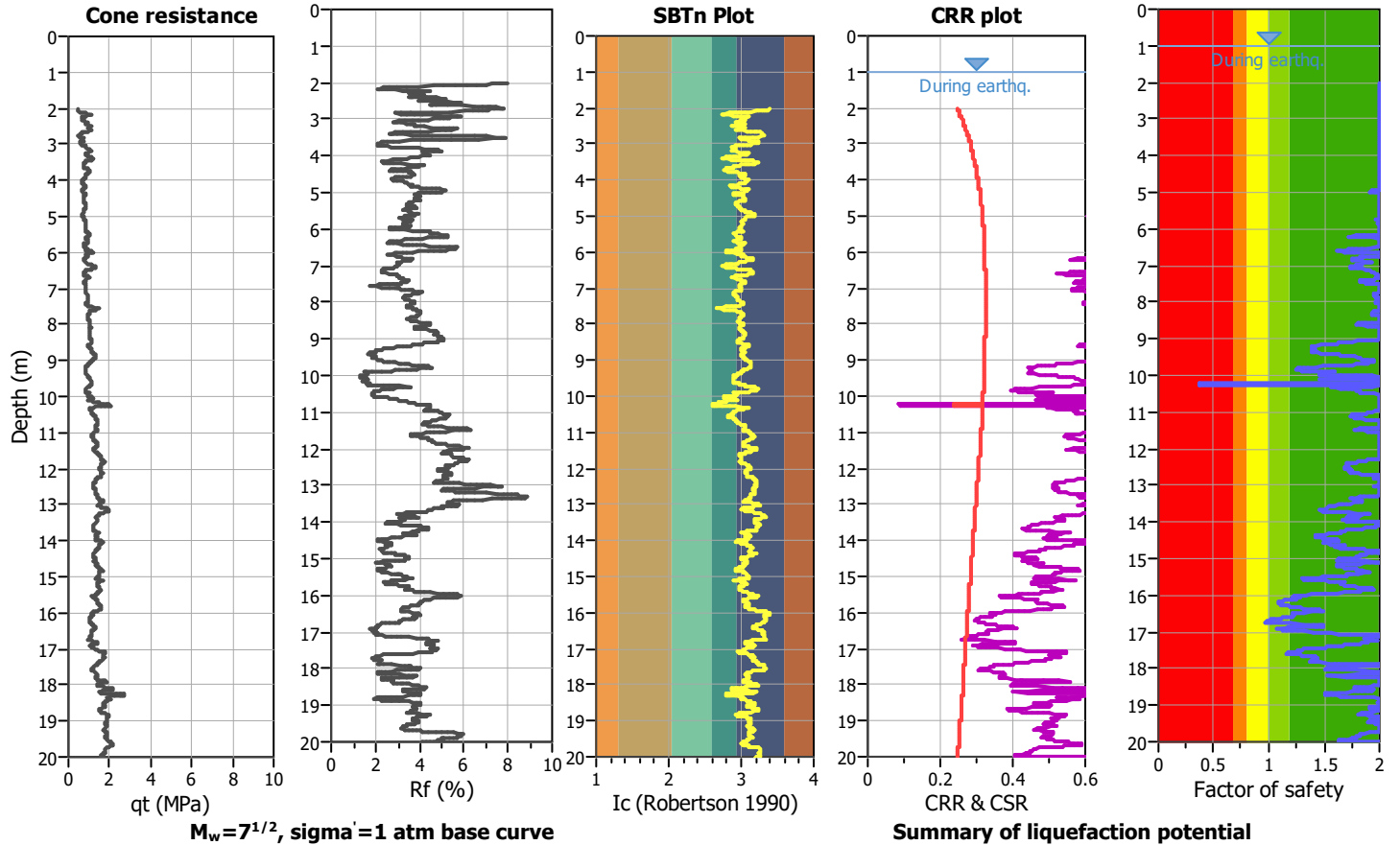
**Project title :**

**Location :**

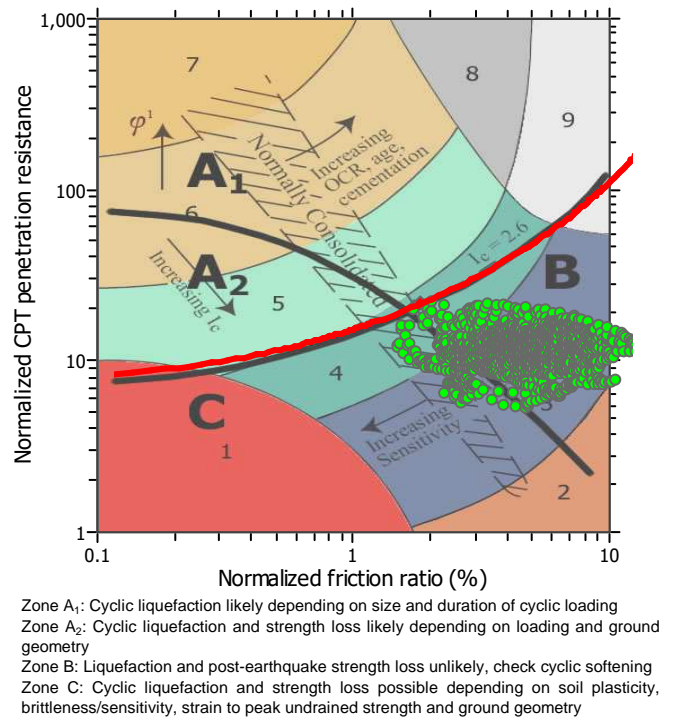
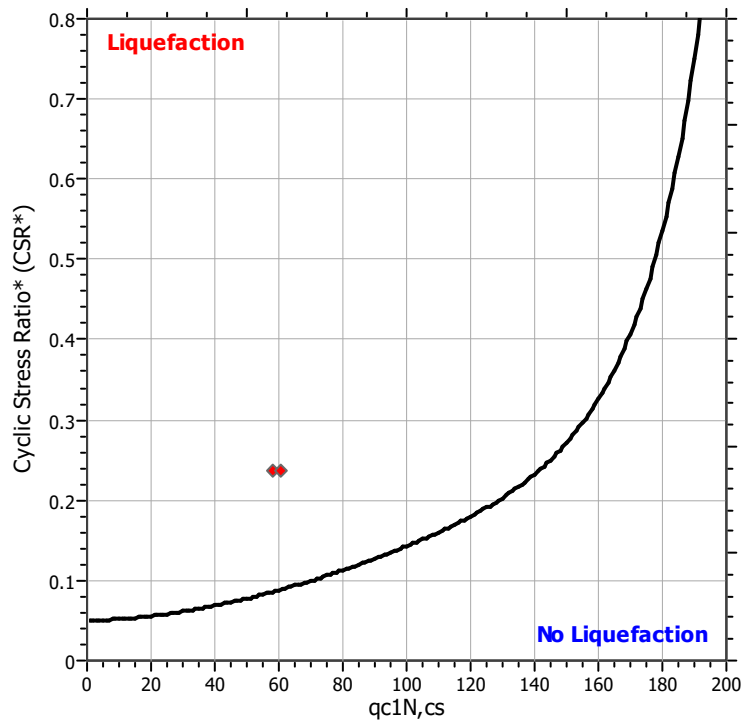
**CPT file : P3CPTU5 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

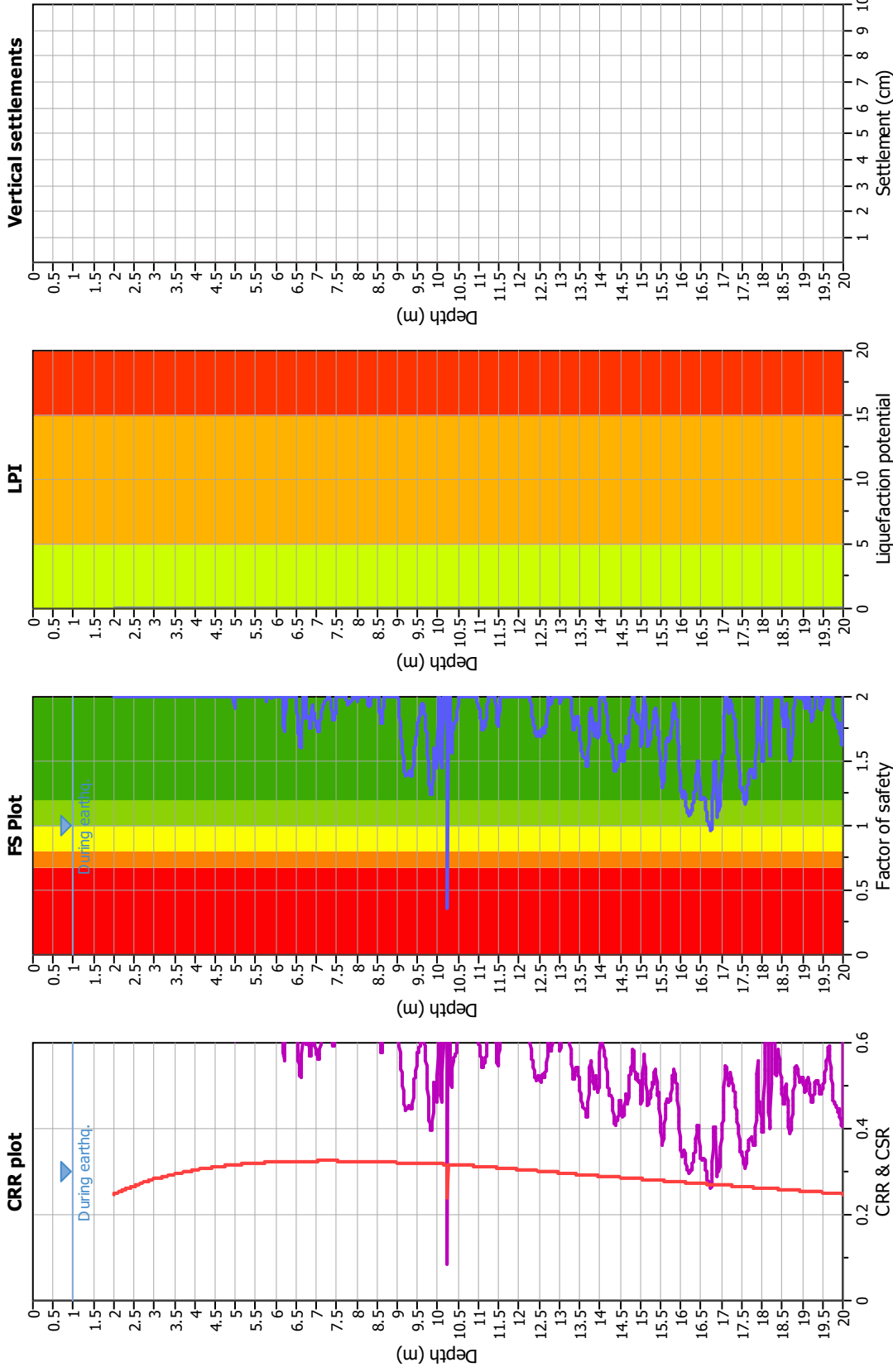
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



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



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.30 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

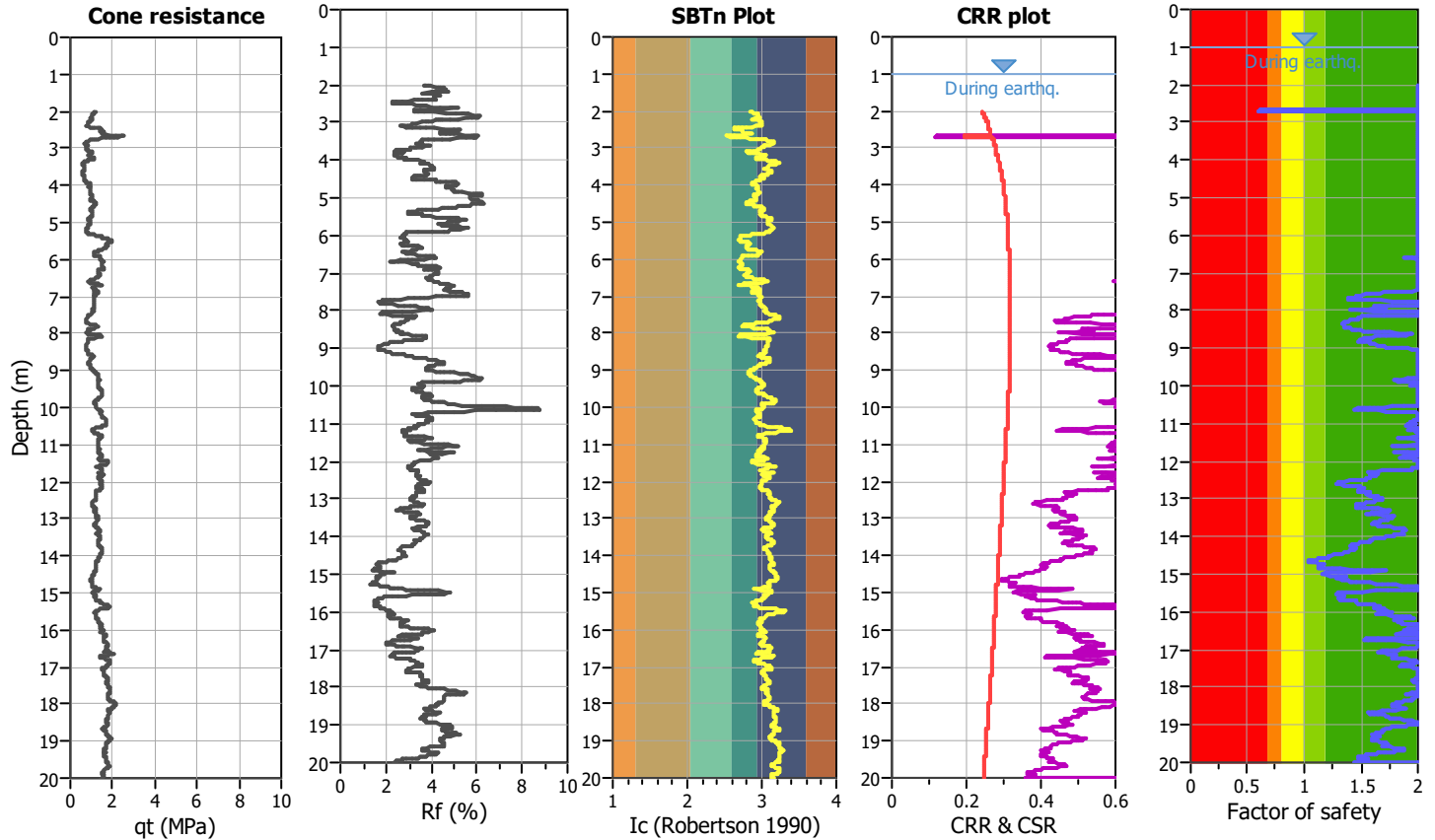
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P4CPTU7 - I&B2008**

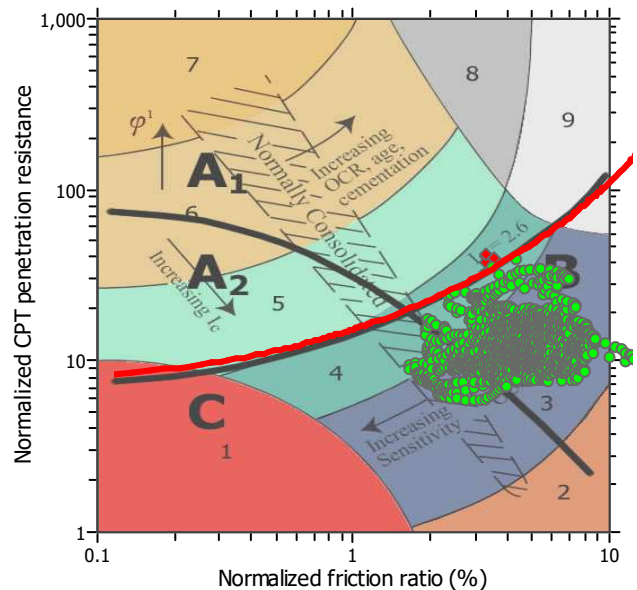
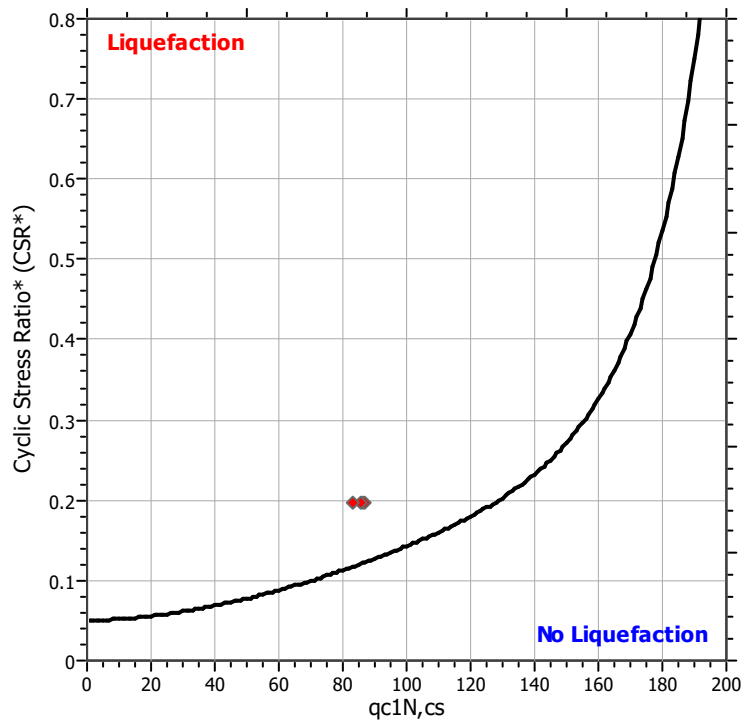
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.45 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



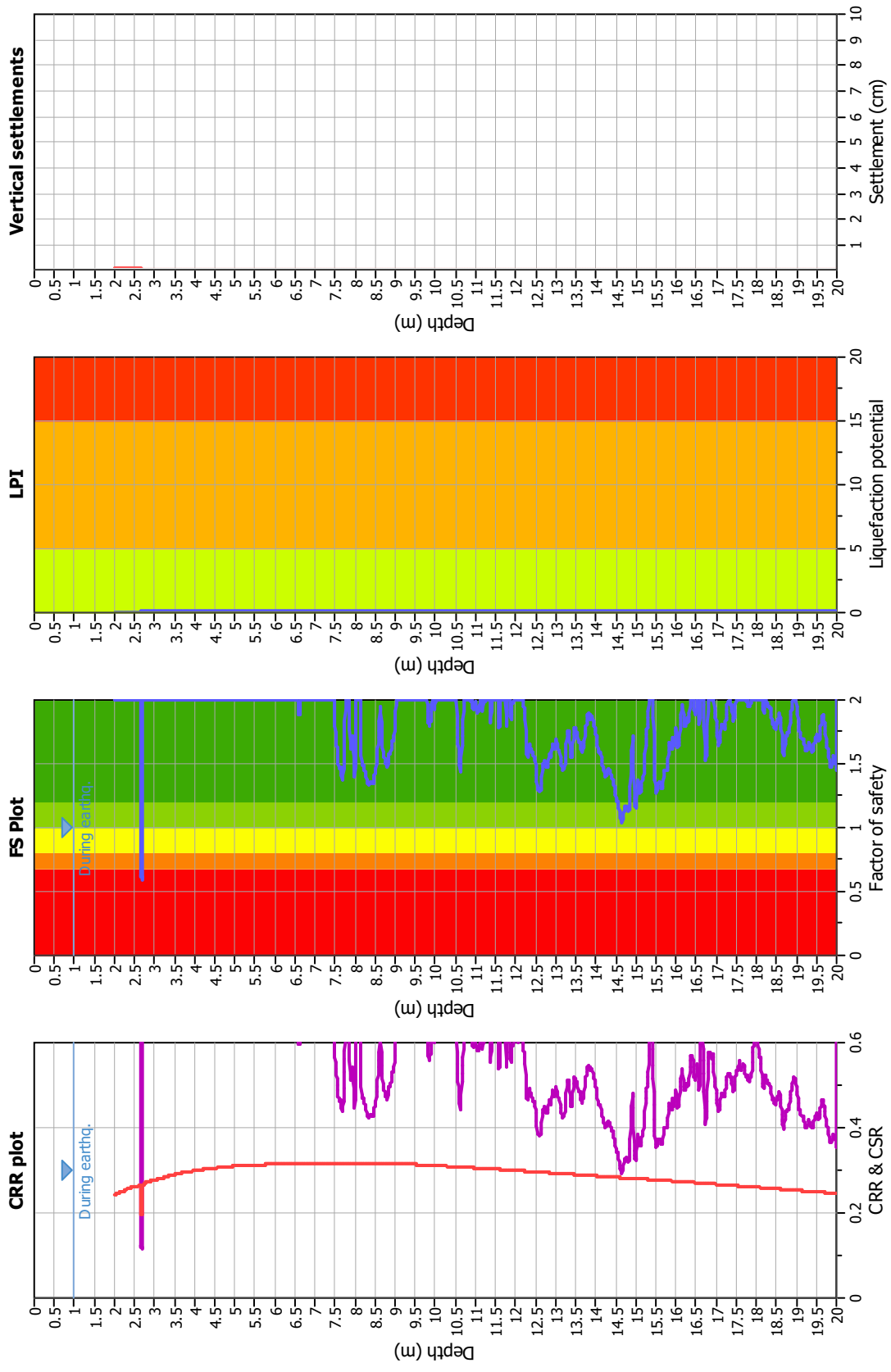
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.45 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior: applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### LPI color scheme

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



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

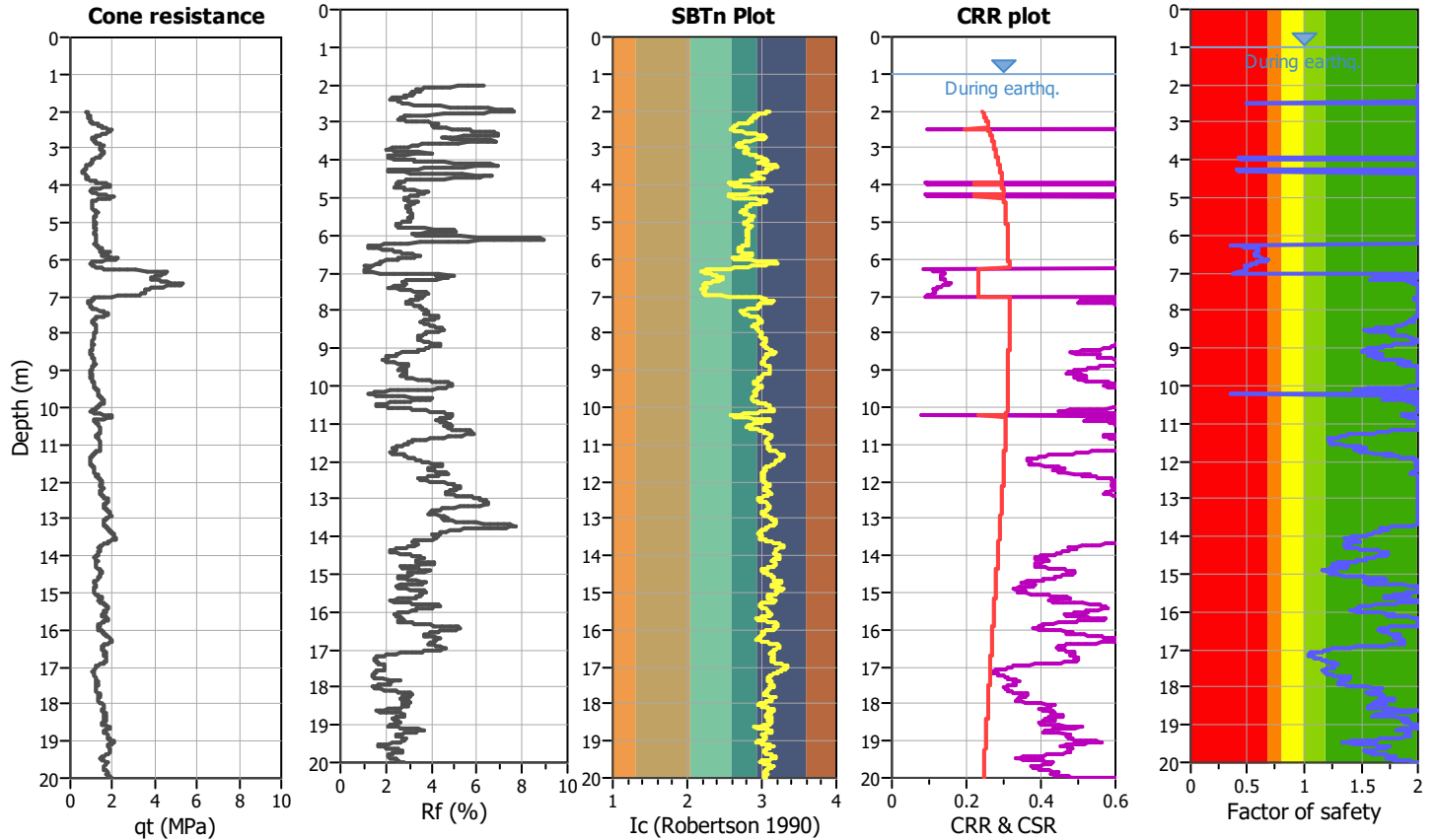
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P5CPTU9 - I&B2008**

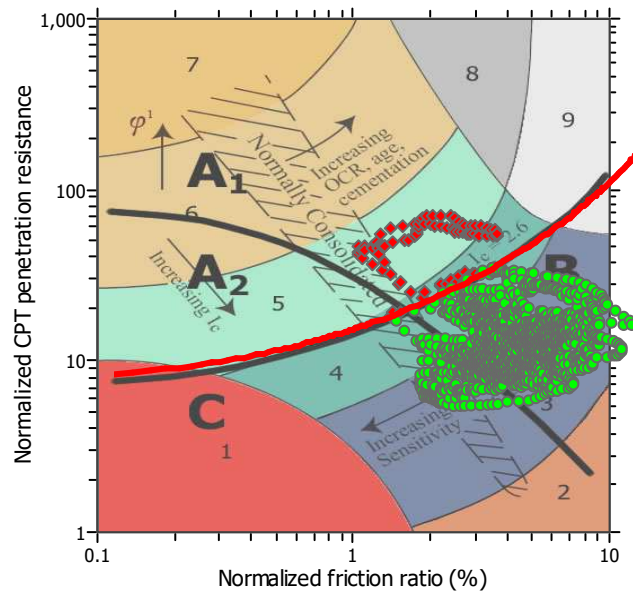
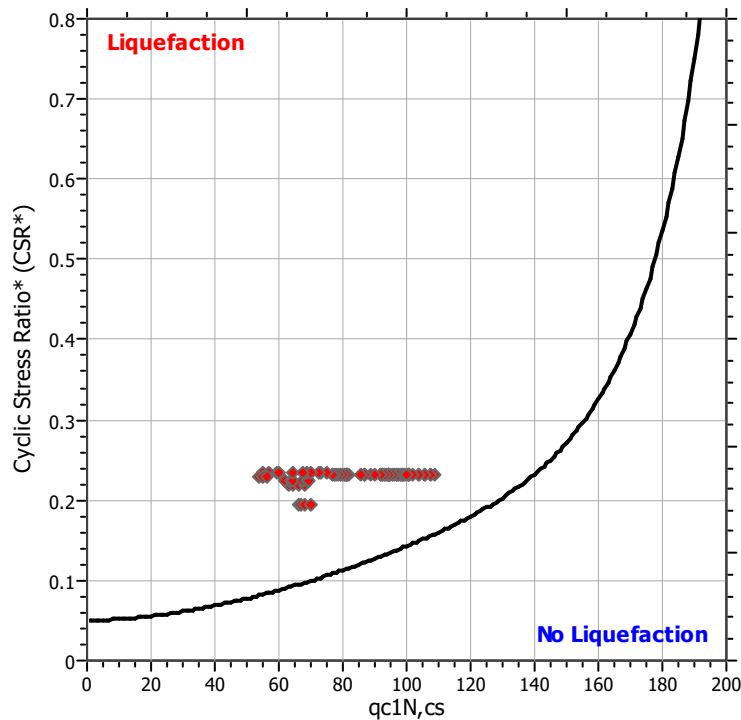
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



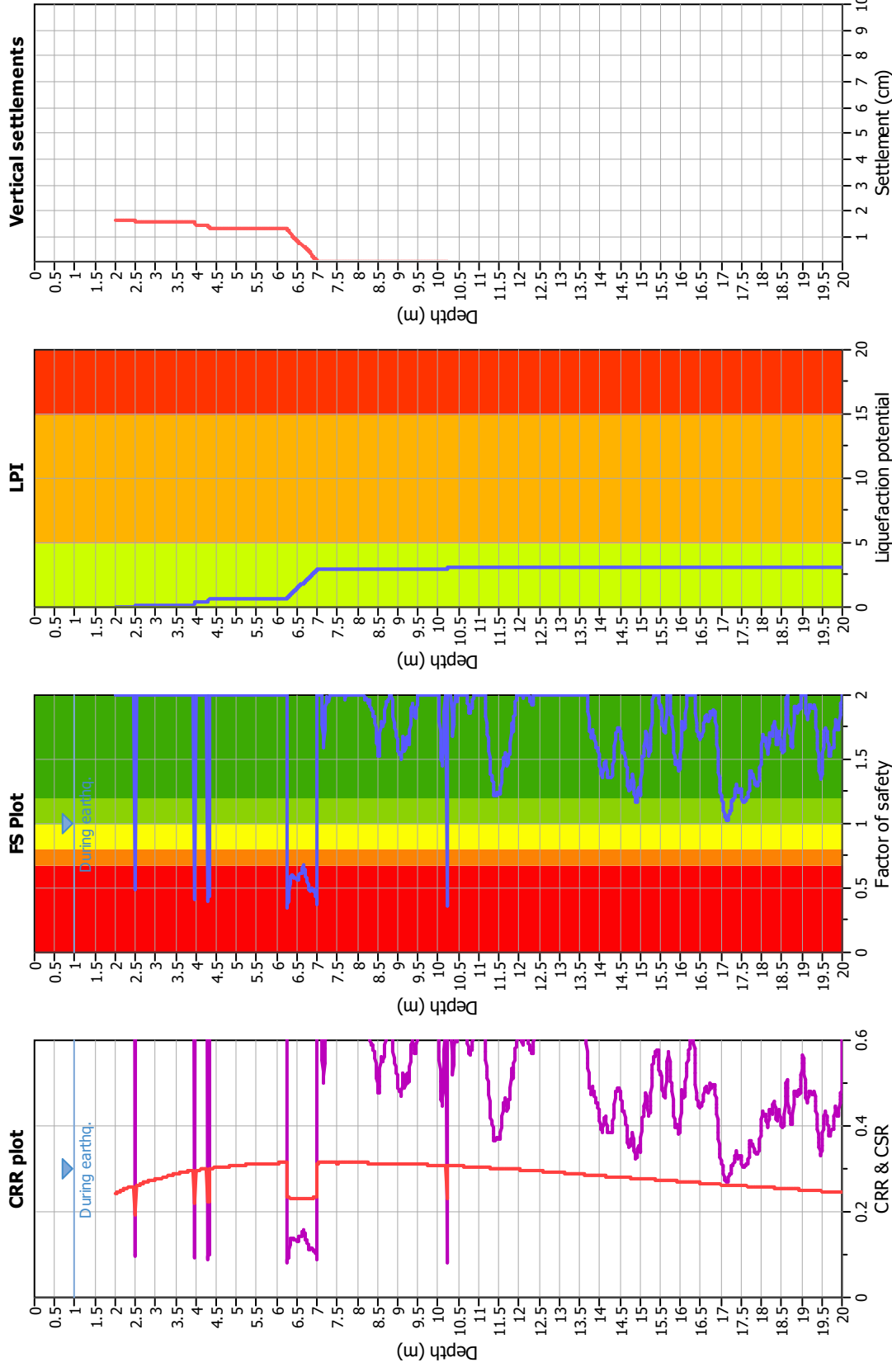
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v = 1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 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  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

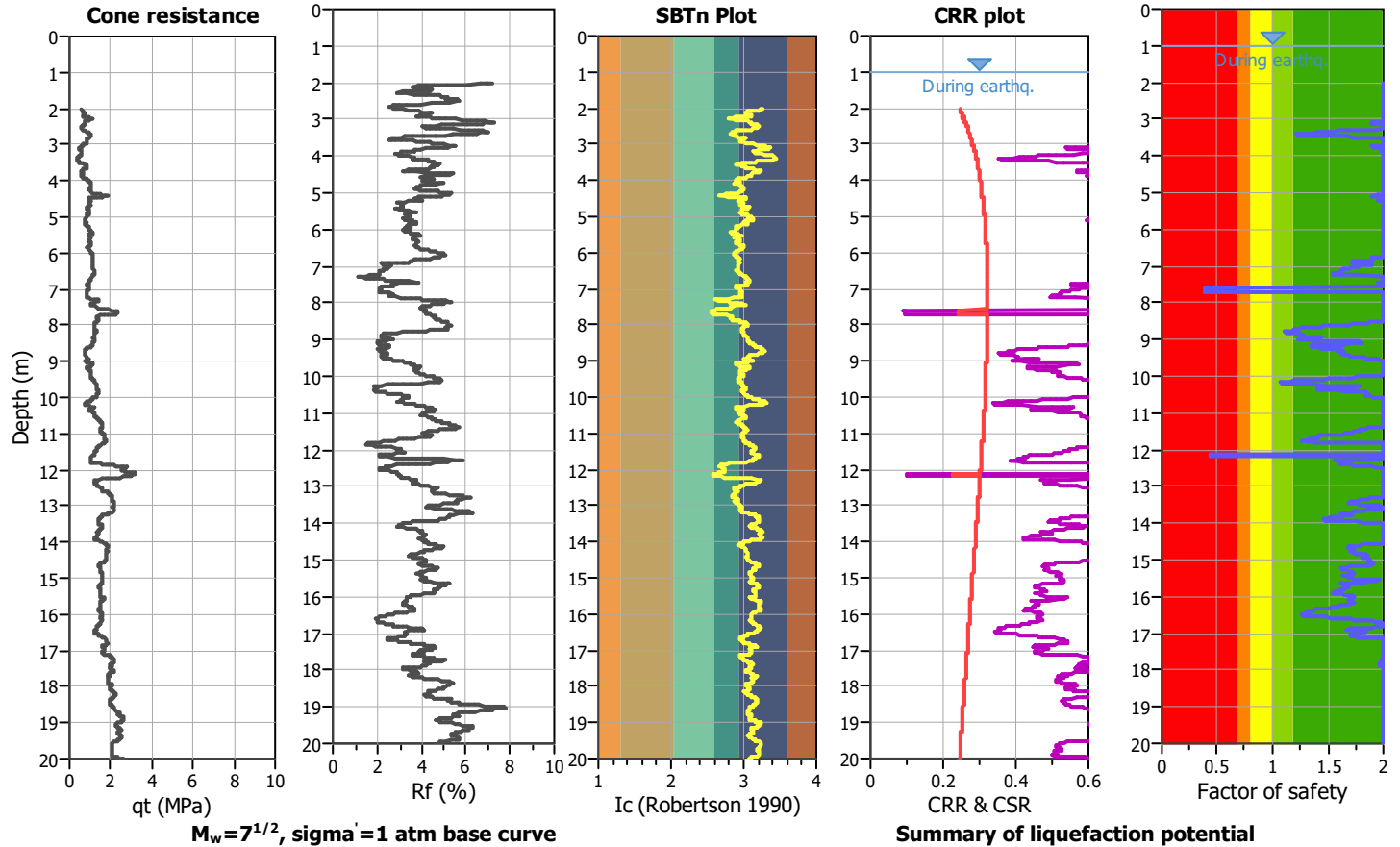
**Project title :**

**Location :**

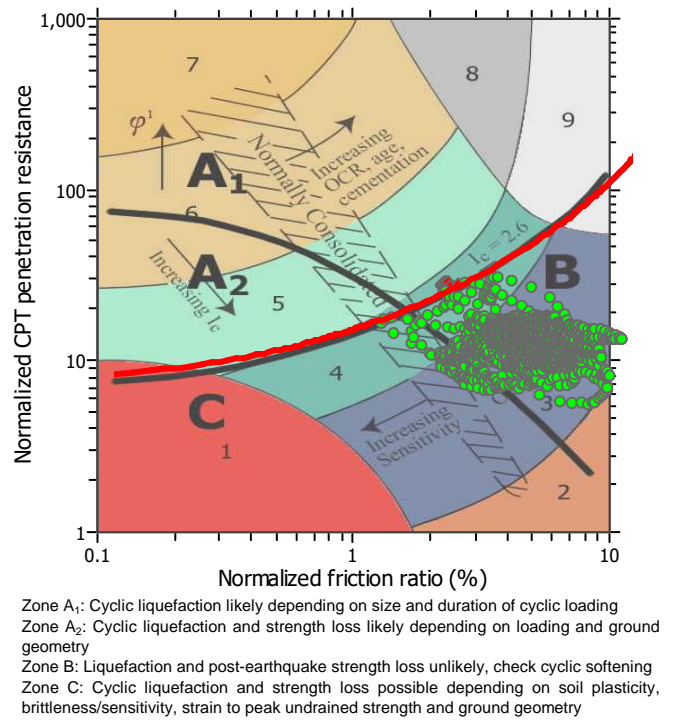
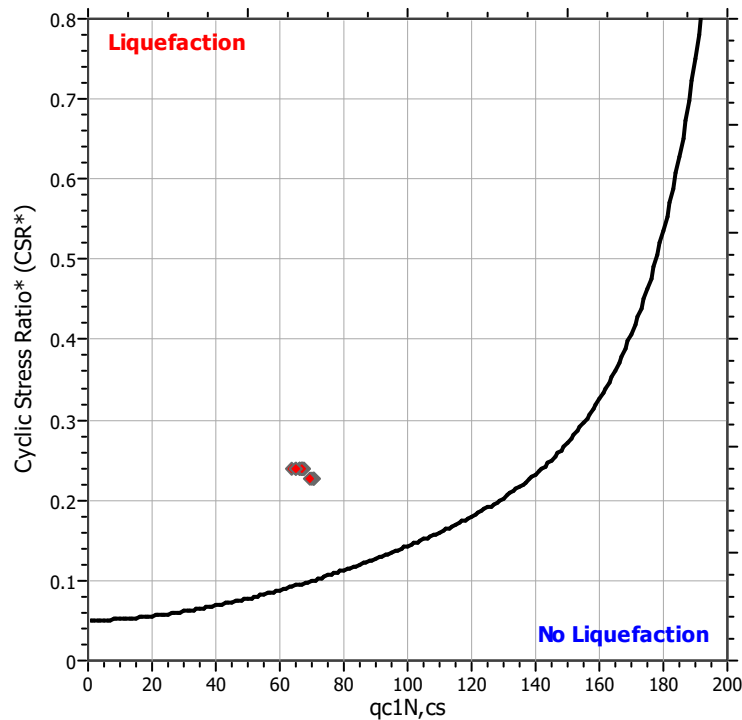
**CPT file : P6CPTU11 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

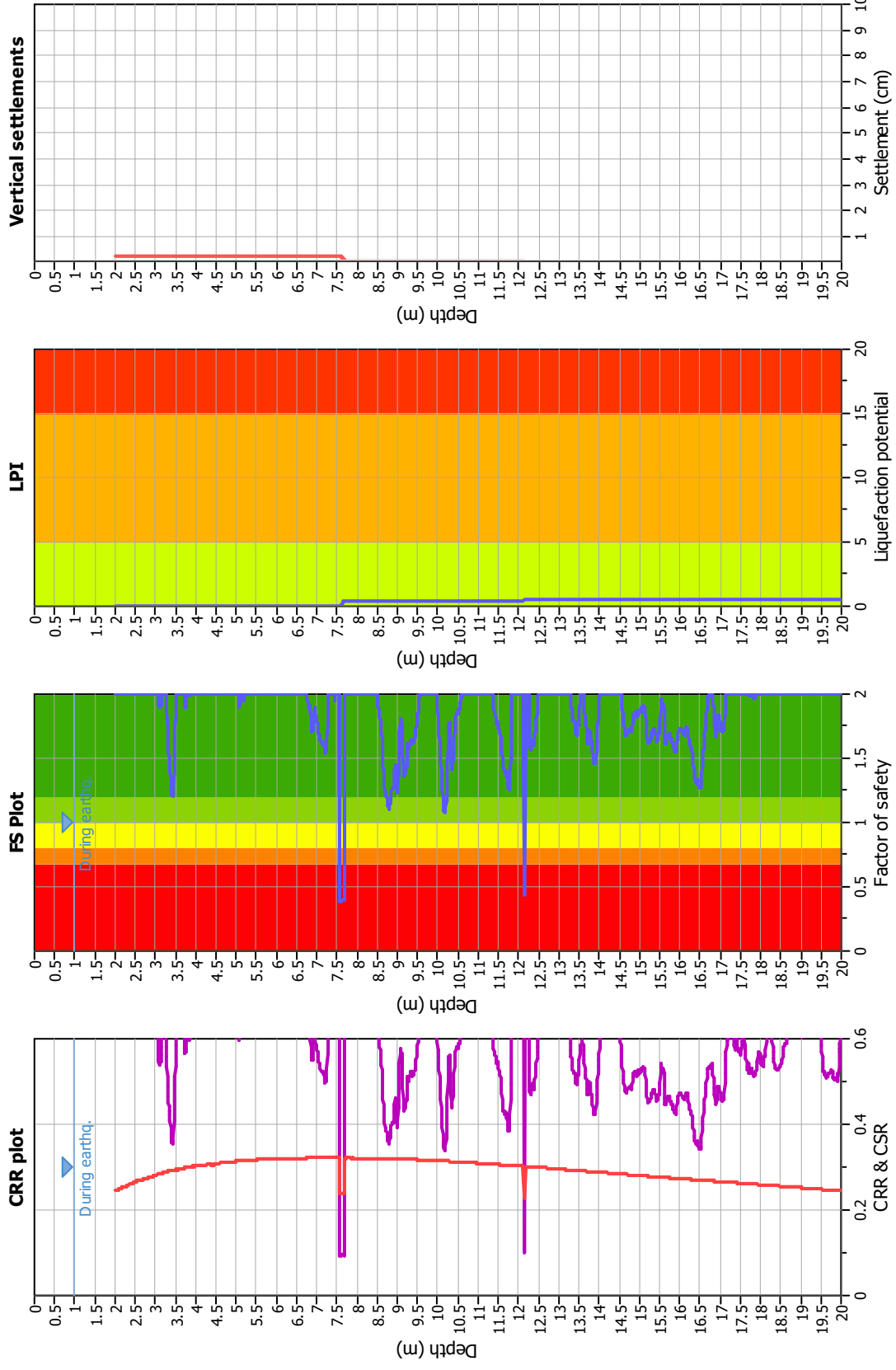
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



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



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>0</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**F. S. color scheme**

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

**LPI color scheme**

- Very high risk
- High risk
- Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

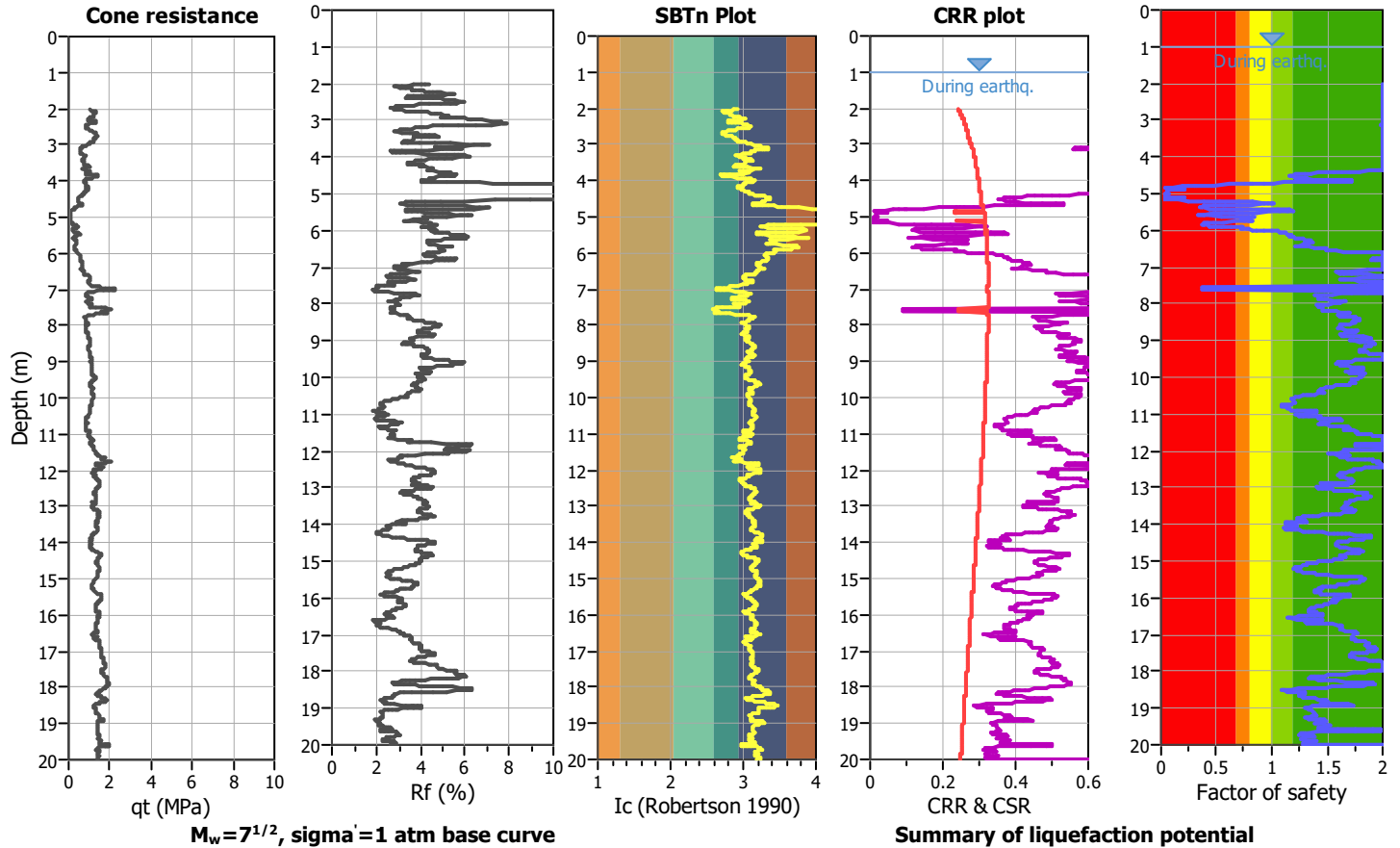
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P7CPTU13 - I&B2008**

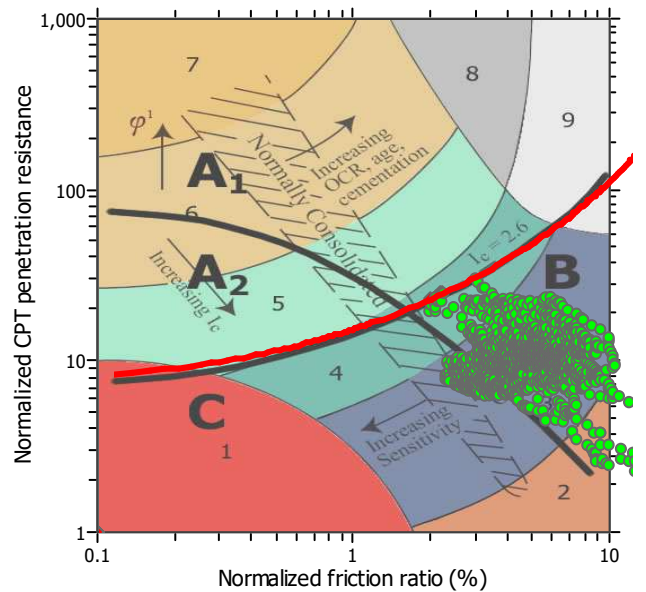
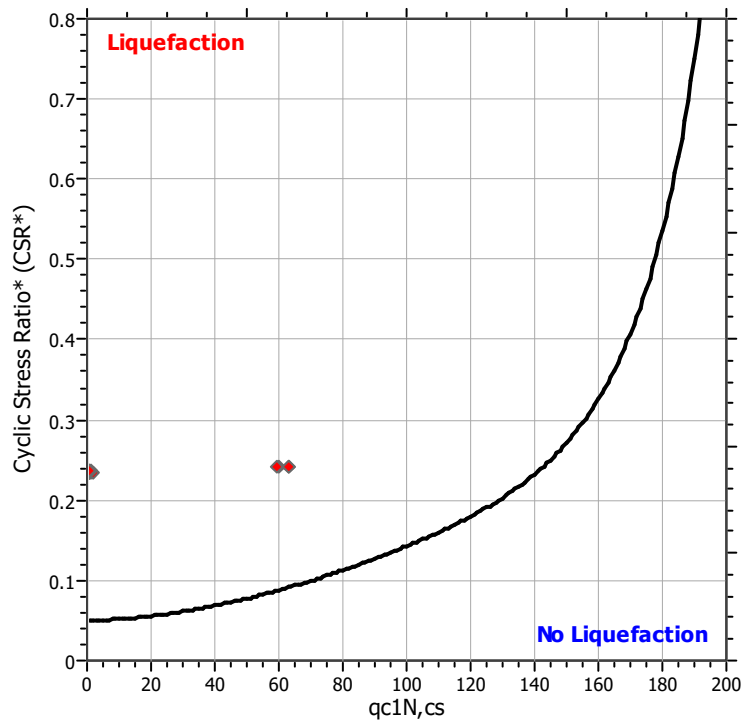
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



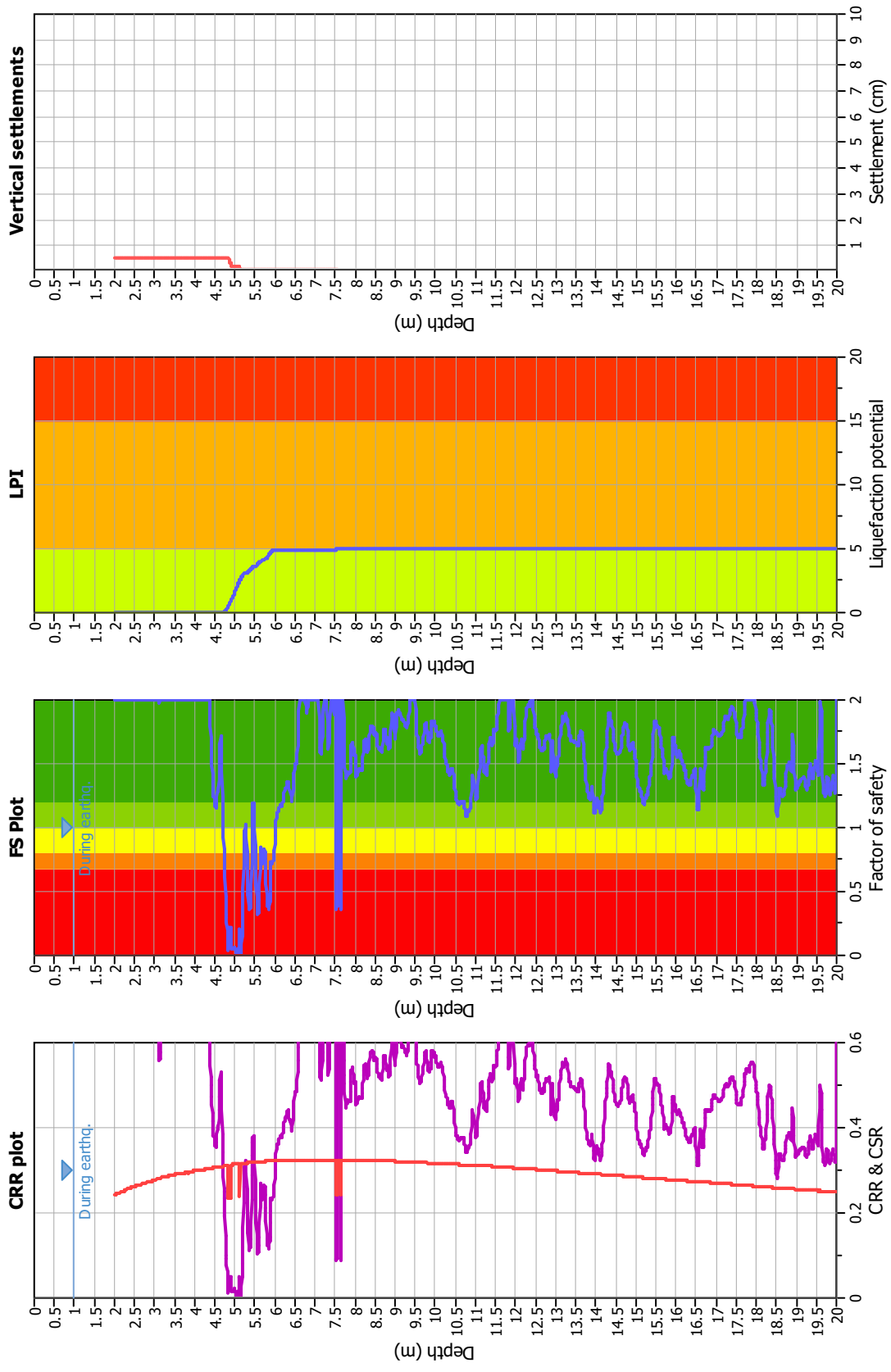
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

#### Fill weight:

Transition detect: applied: N/A  
 K<sub>σ</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### Depth to GWT (earthq.):

1.00 m

#### Average results interval:

3

#### Ic cut-off value:

2.60

#### Unit weight calculation:

Based on SBT

#### Use fill:

No

#### Fill height:

N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

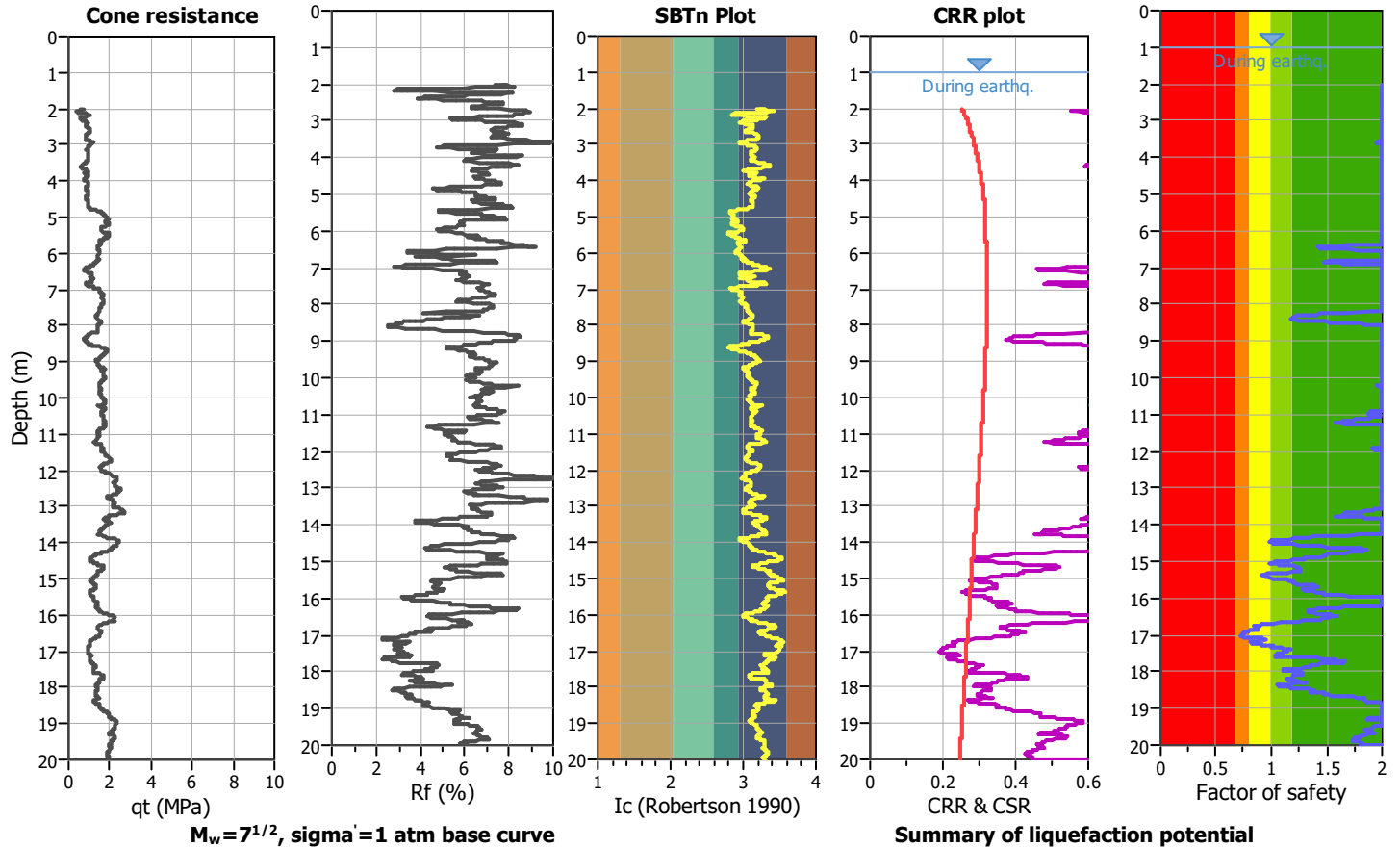
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P8CPTU15 - I&B2008**

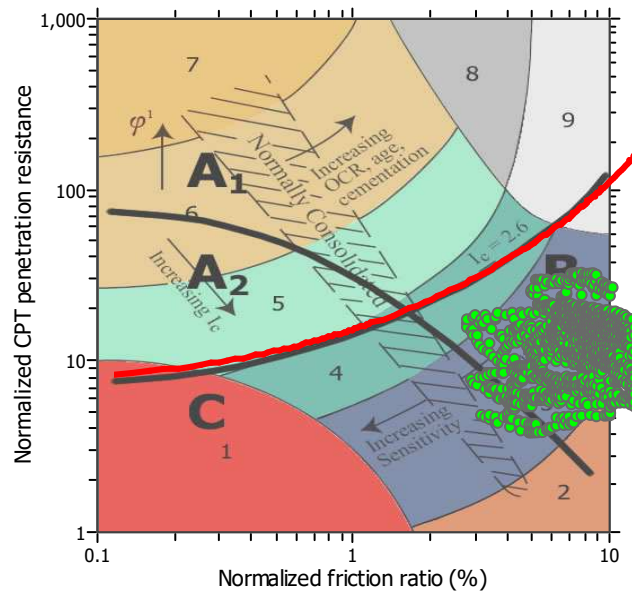
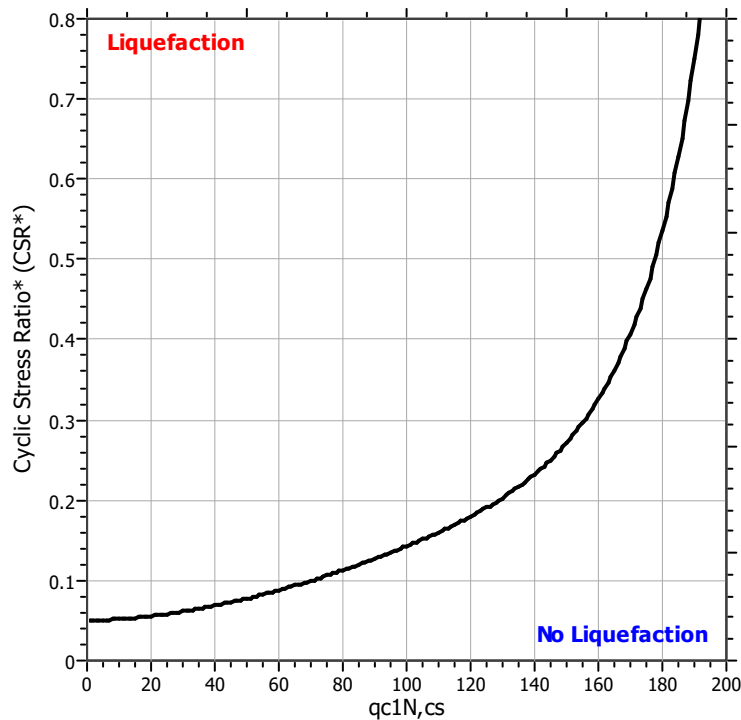
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.27	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



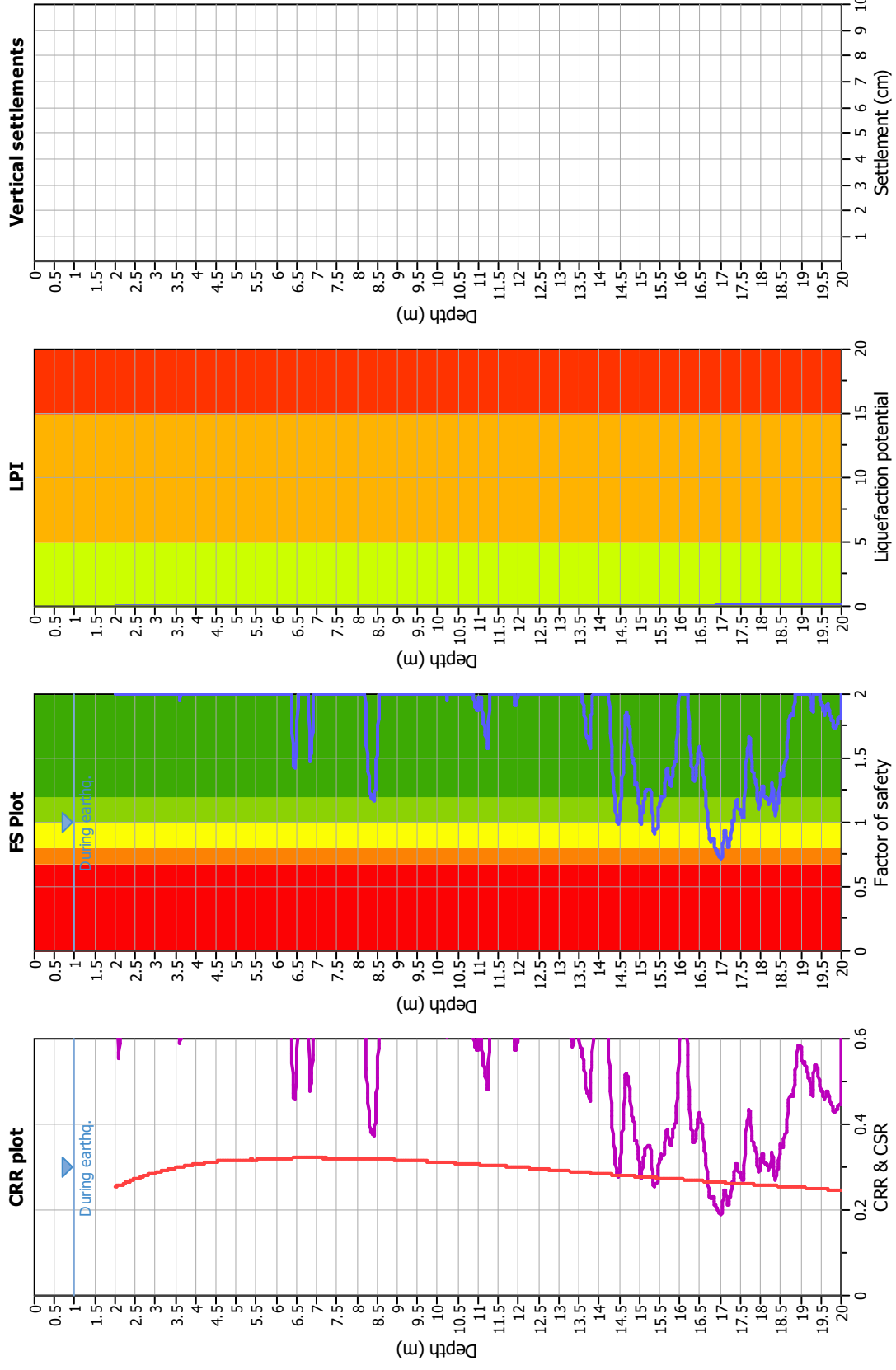
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_a=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

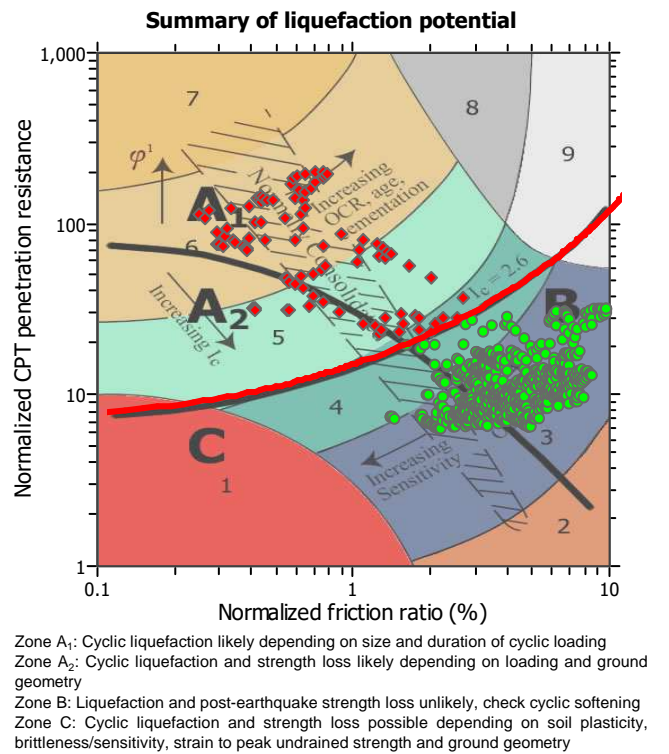
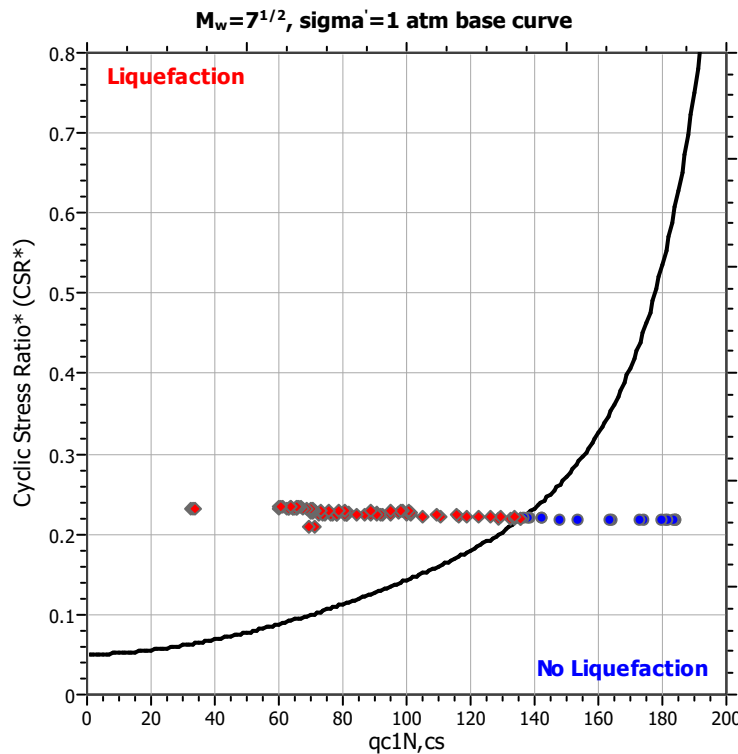
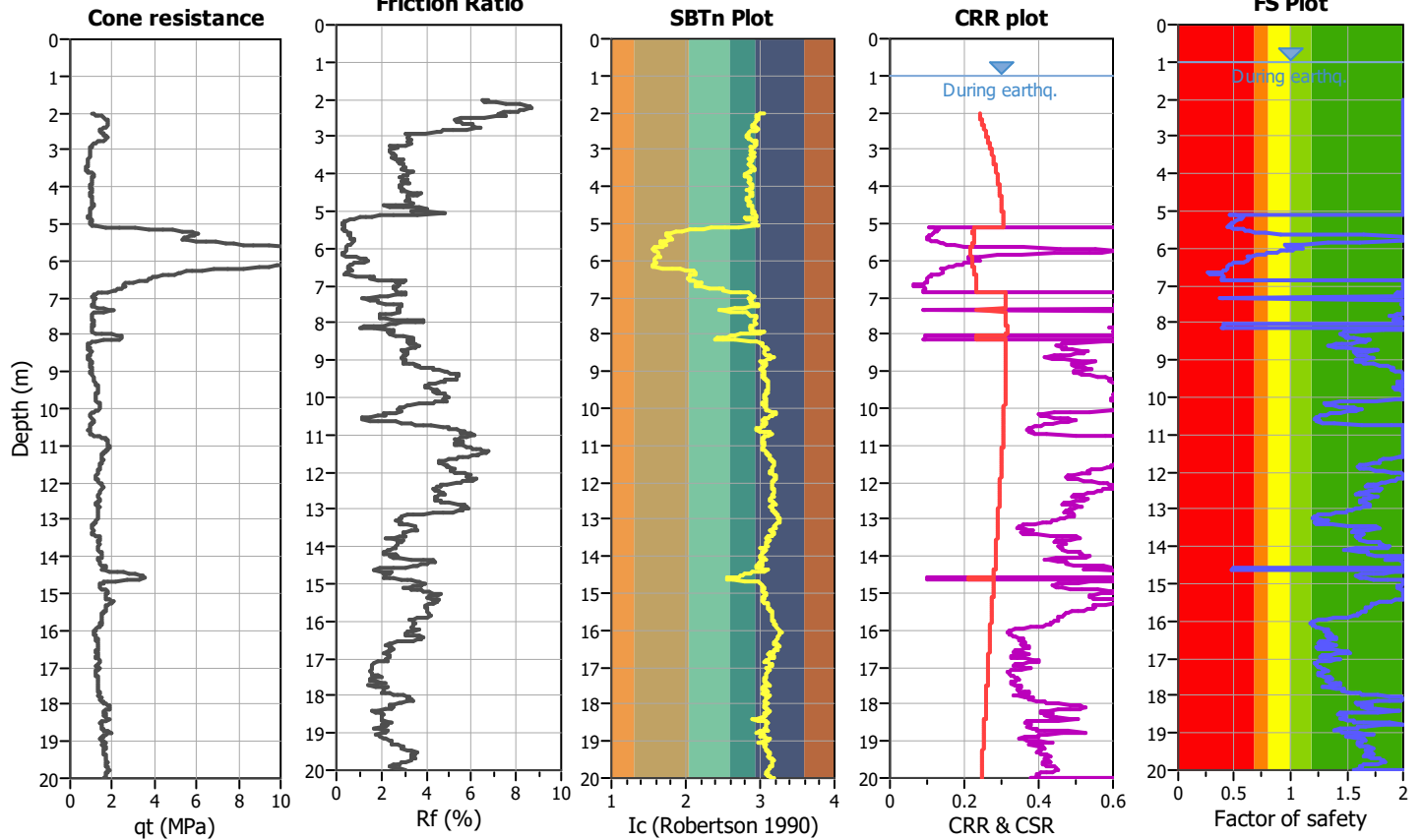
**Project title :**

**Location :**

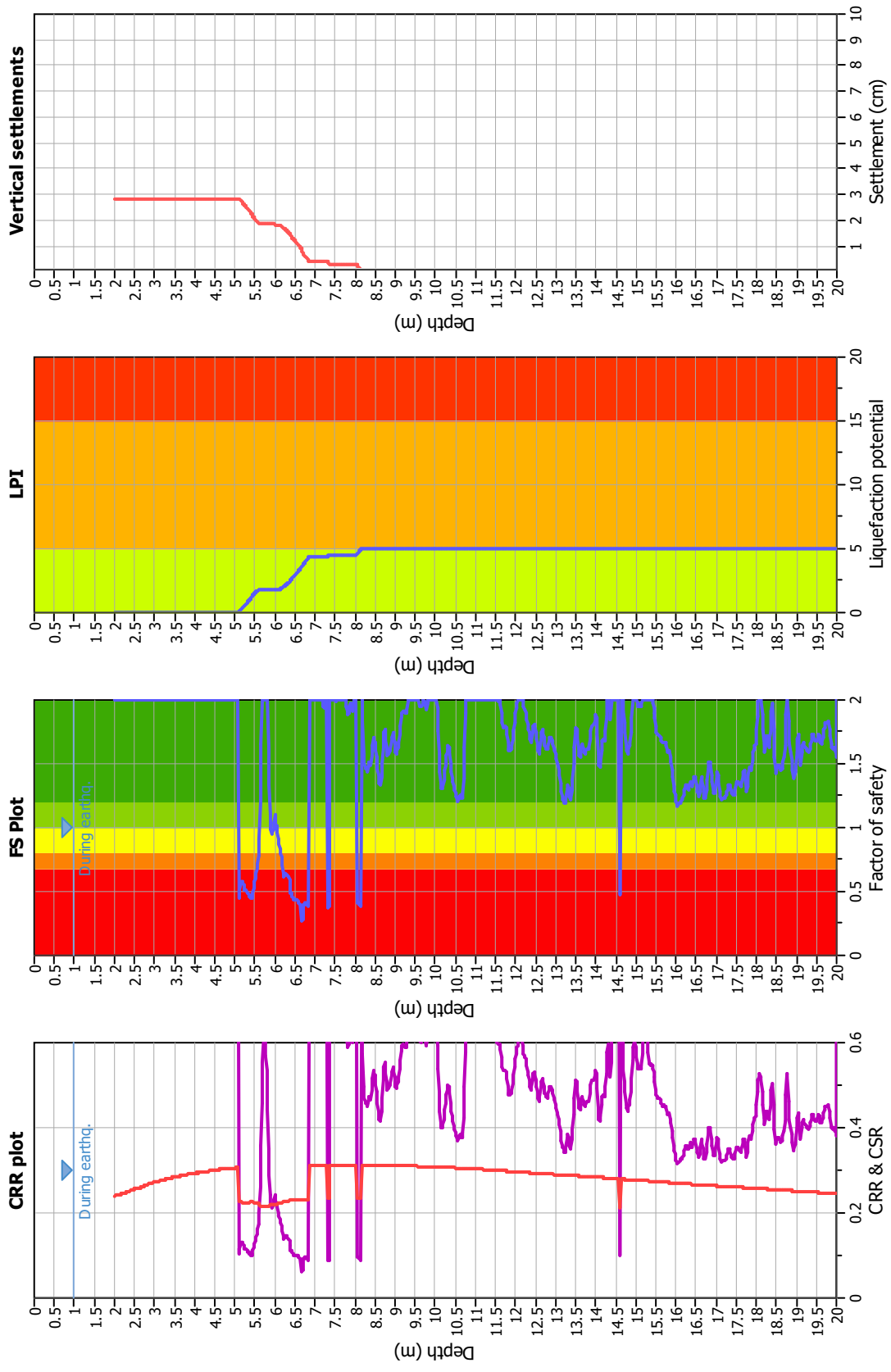
**CPT file : P23CPTU100 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.26	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.70 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### LPI color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

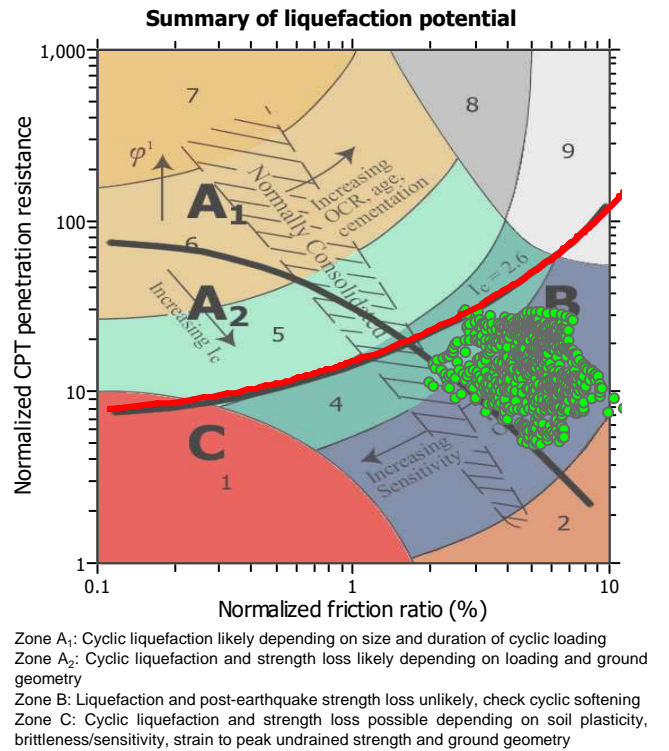
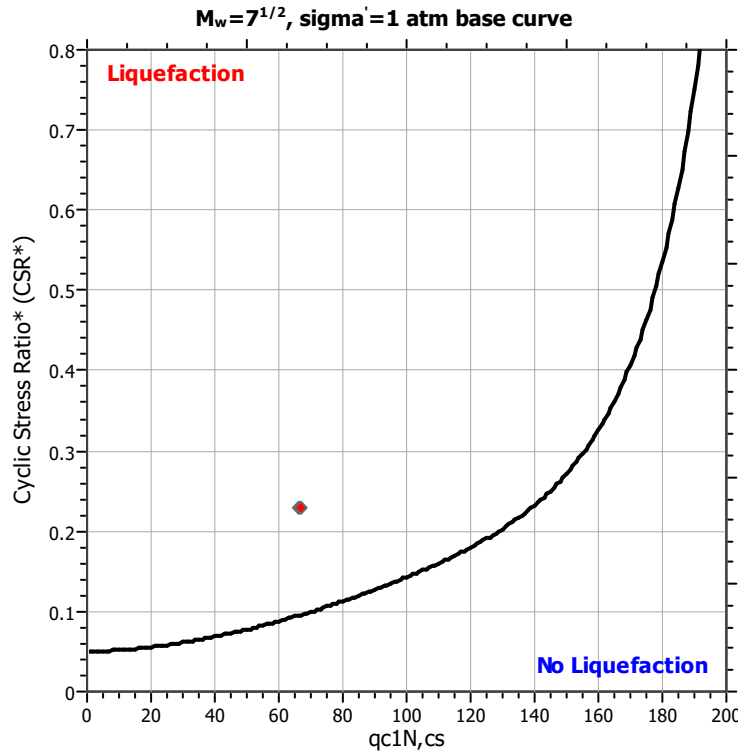
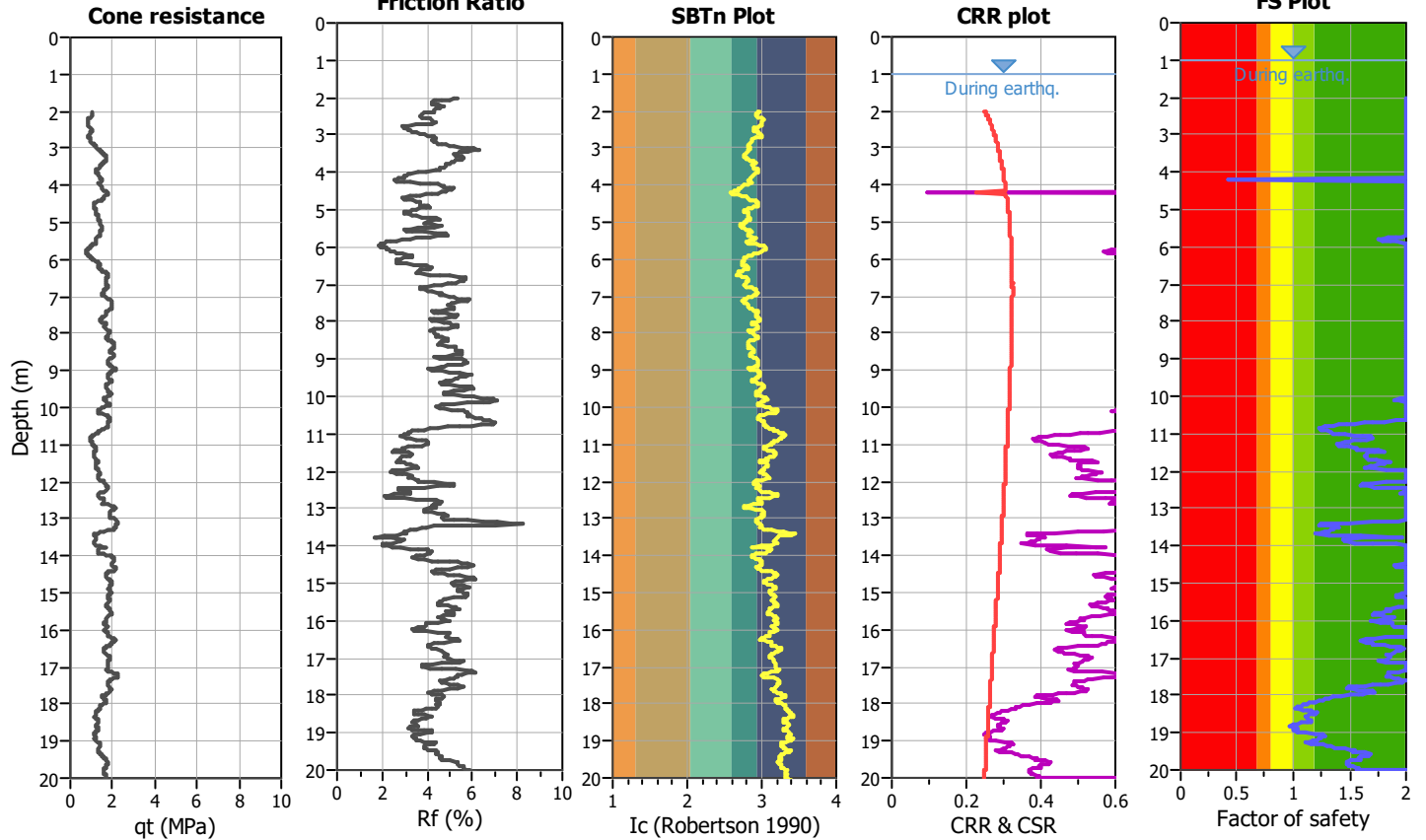
**Project title :**

**Location :**

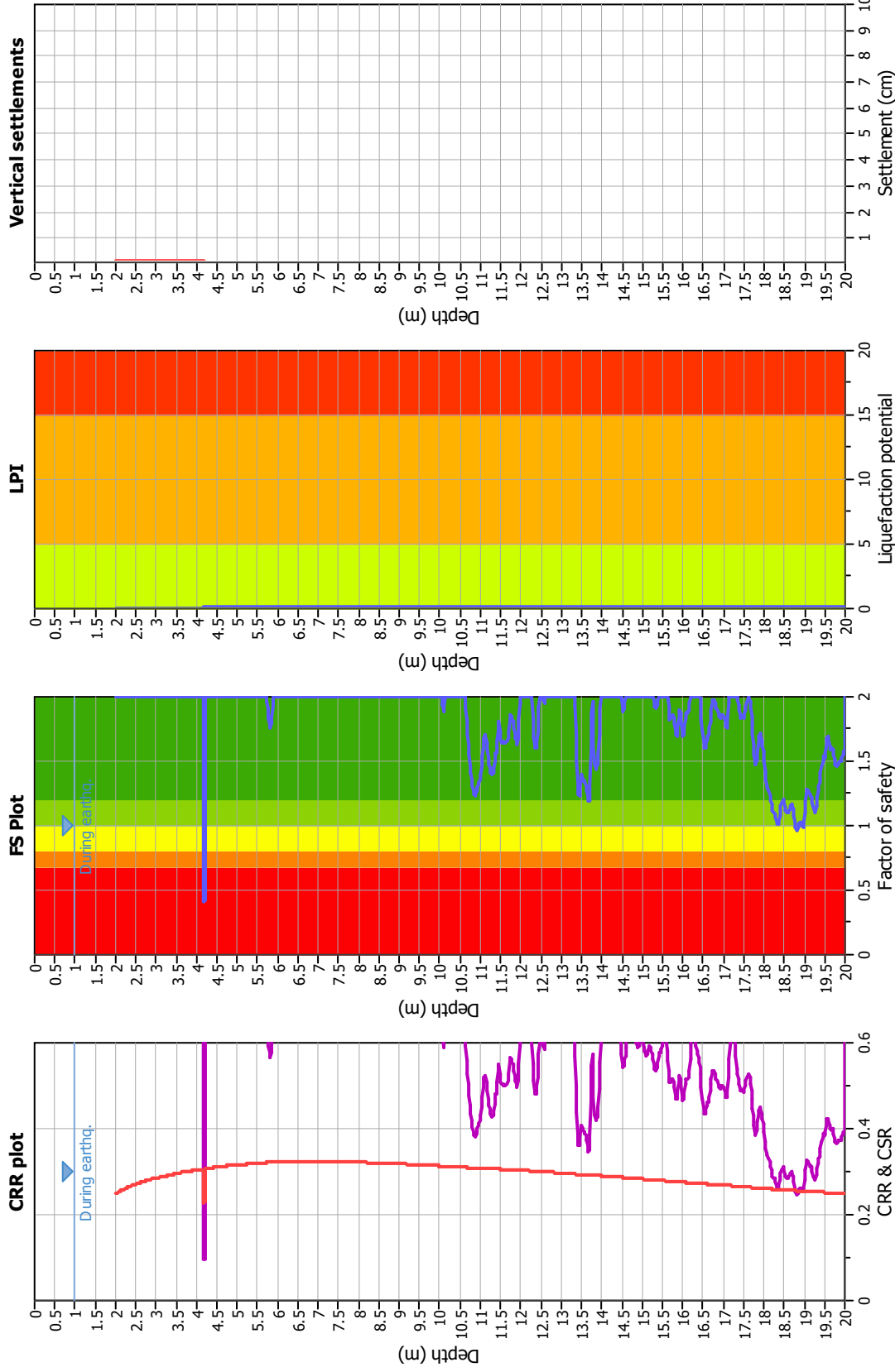
**CPT file : P25CPTU45 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

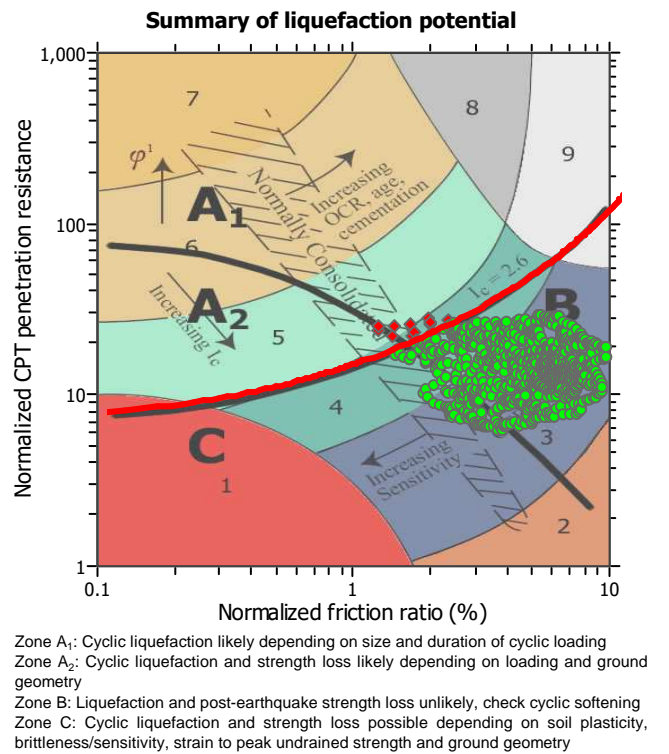
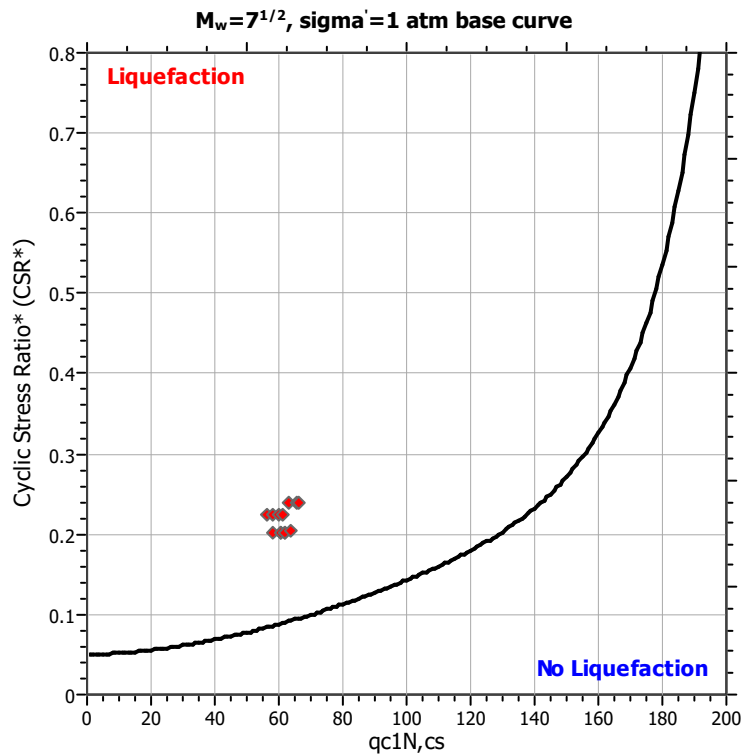
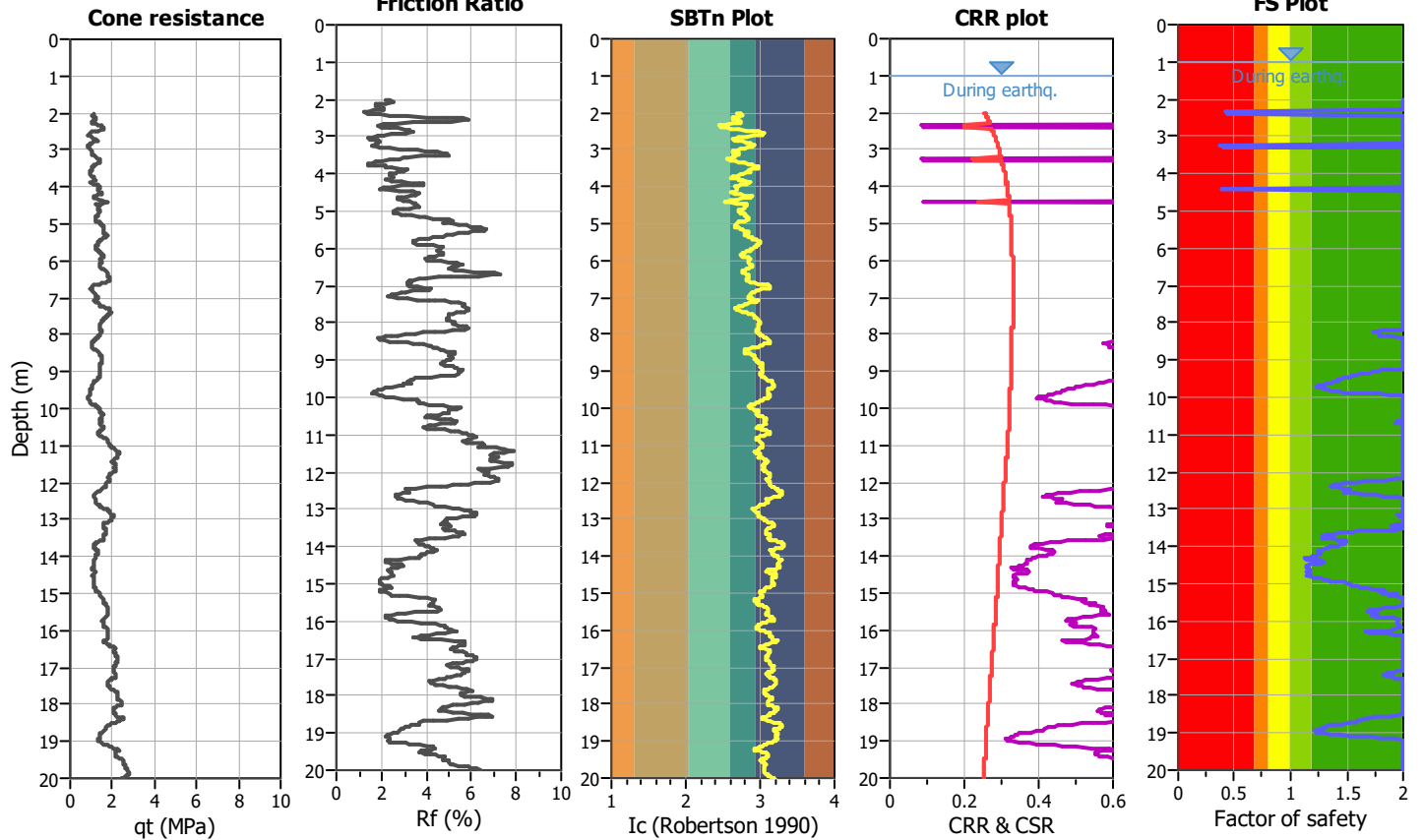
**Project title :**

**Location :**

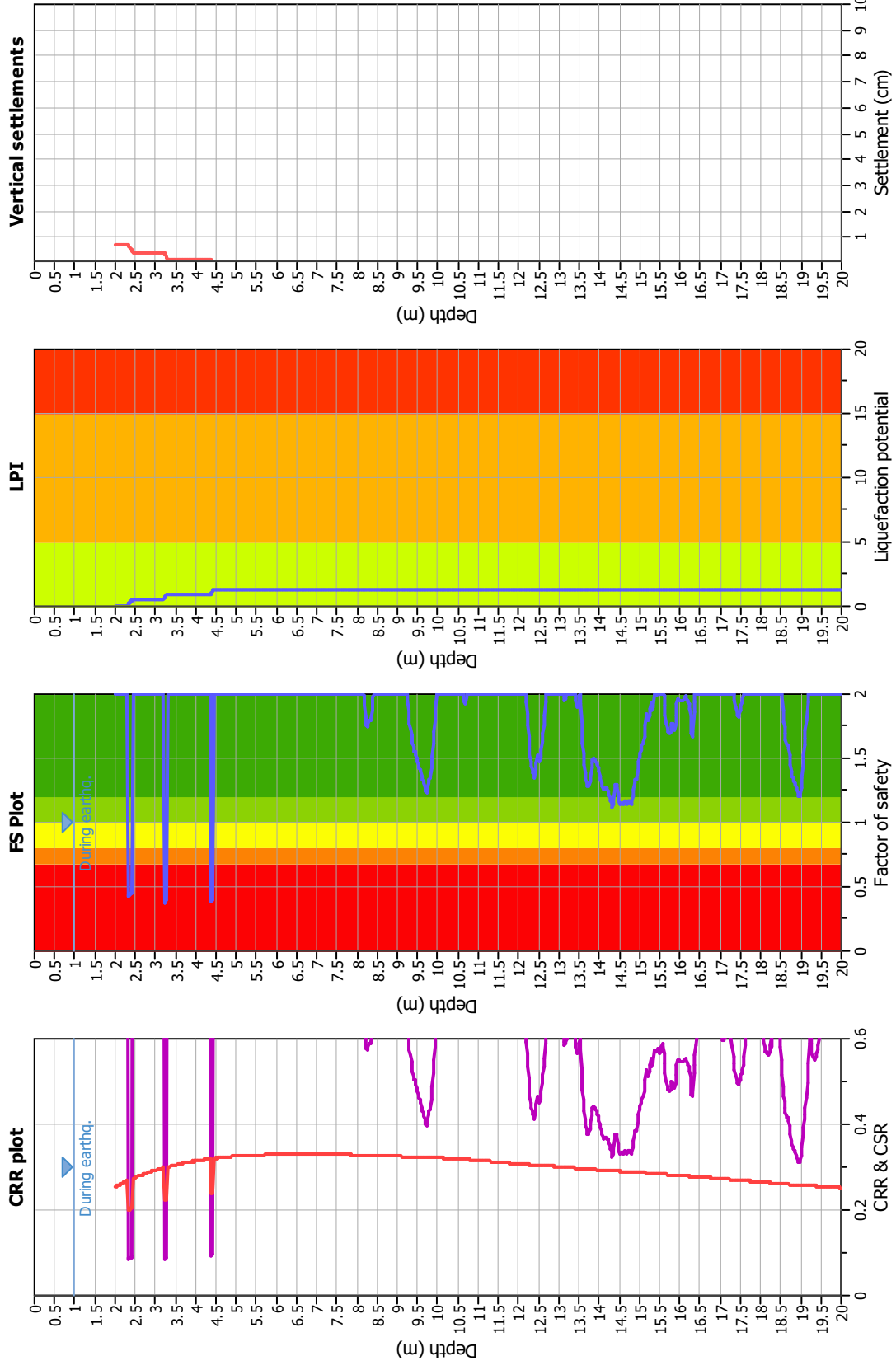
**CPT file : P27CPTU48 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

#### Fill weight:

Transition detect: applied: N/A  
 K<sub>σ</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### Depth to GWT (earthq.):

1.00 m

#### Average results interval:

3

#### Ic cut-off value:

2.60

#### Unit weight calculation:

Based on SBT

#### Use fill:

No

#### Fill height:

N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

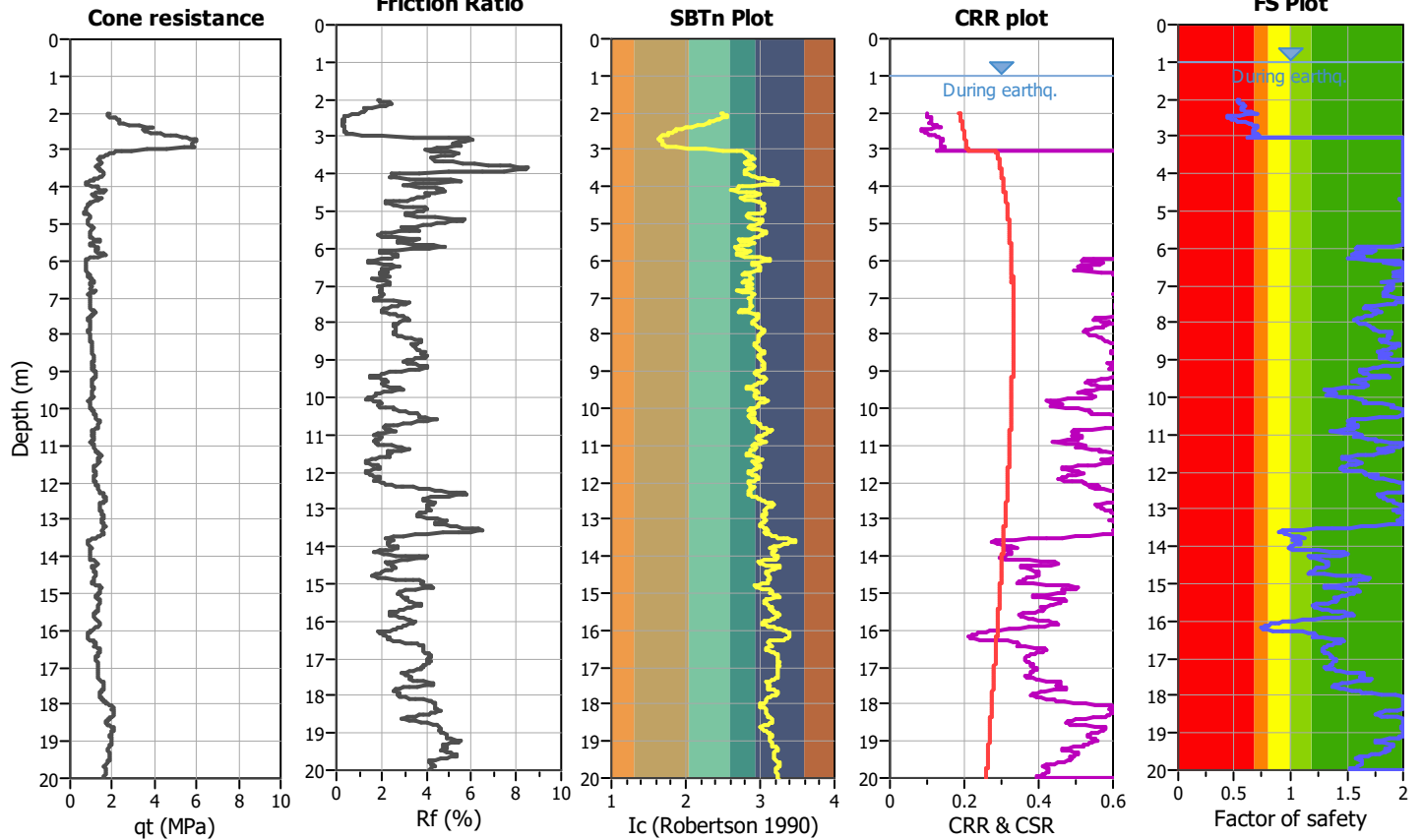
**Project title :**

**Location :**

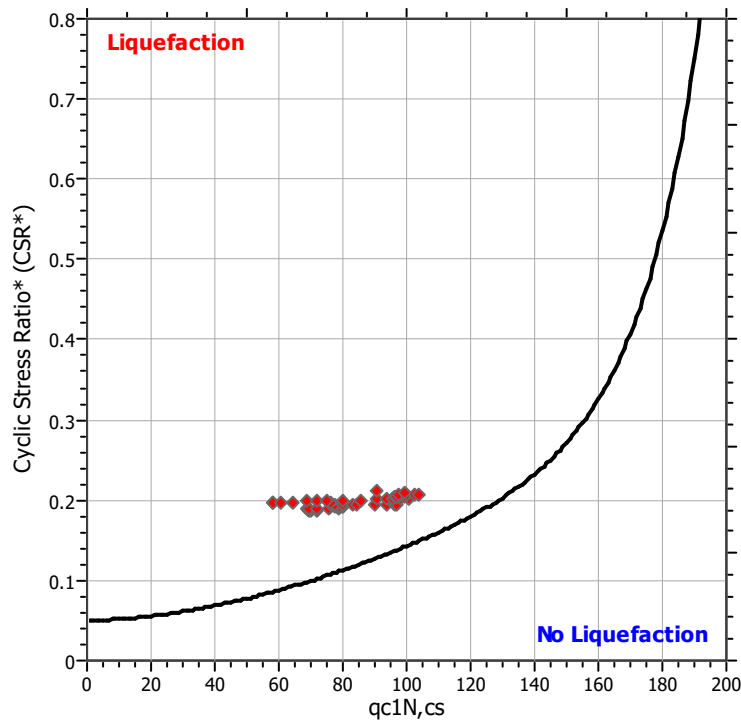
**CPT file : P31CPTU41 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

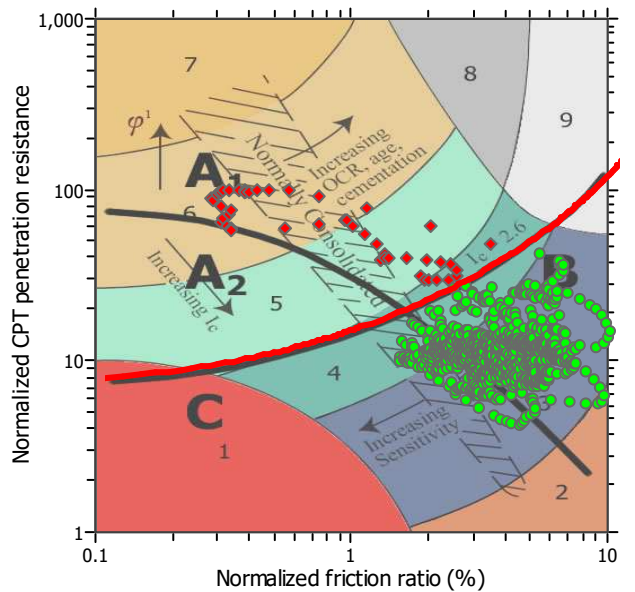
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



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

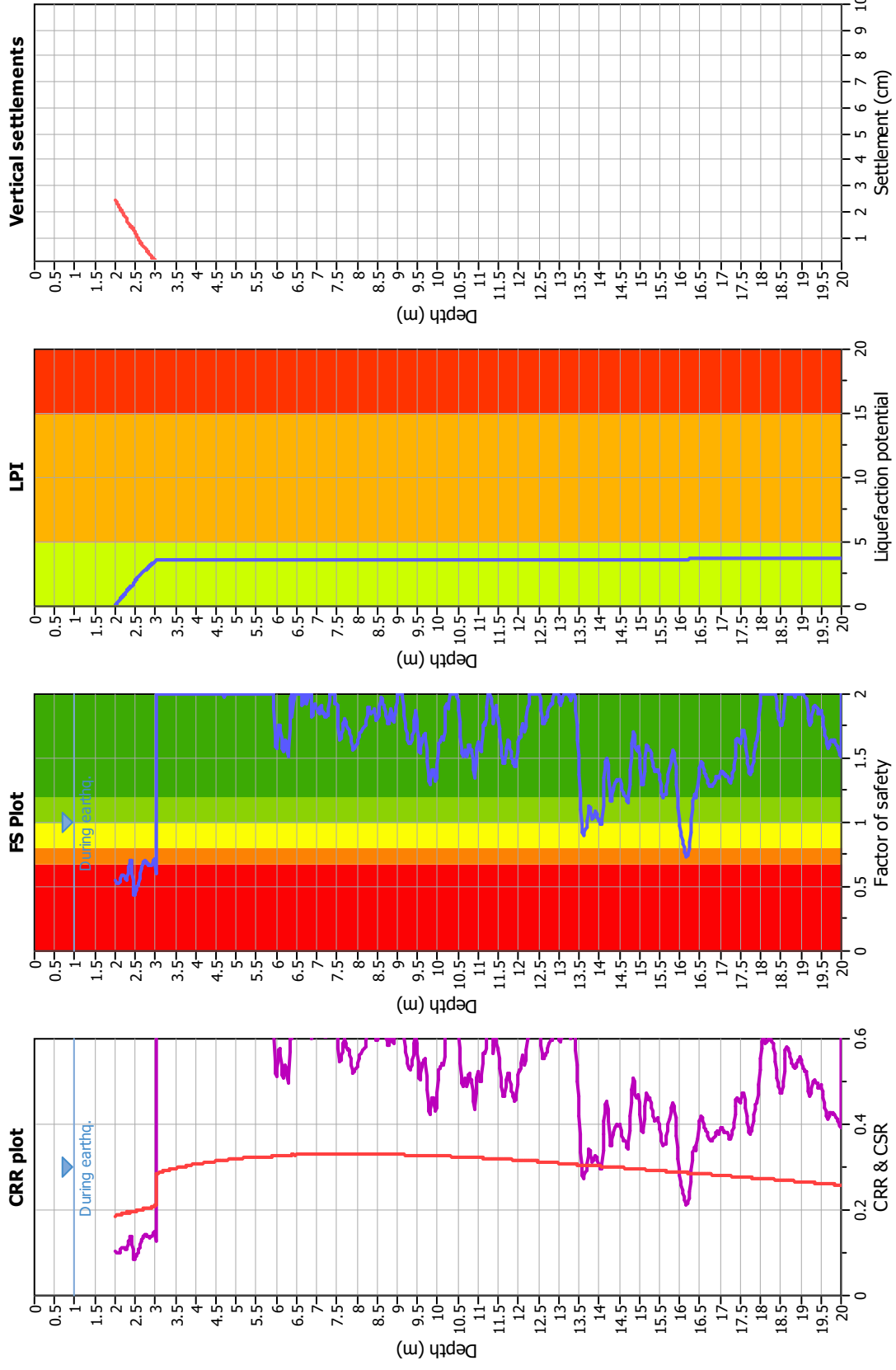


**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**F. S. color scheme**

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

**LPI color scheme**

- Very high risk
- High risk
- Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

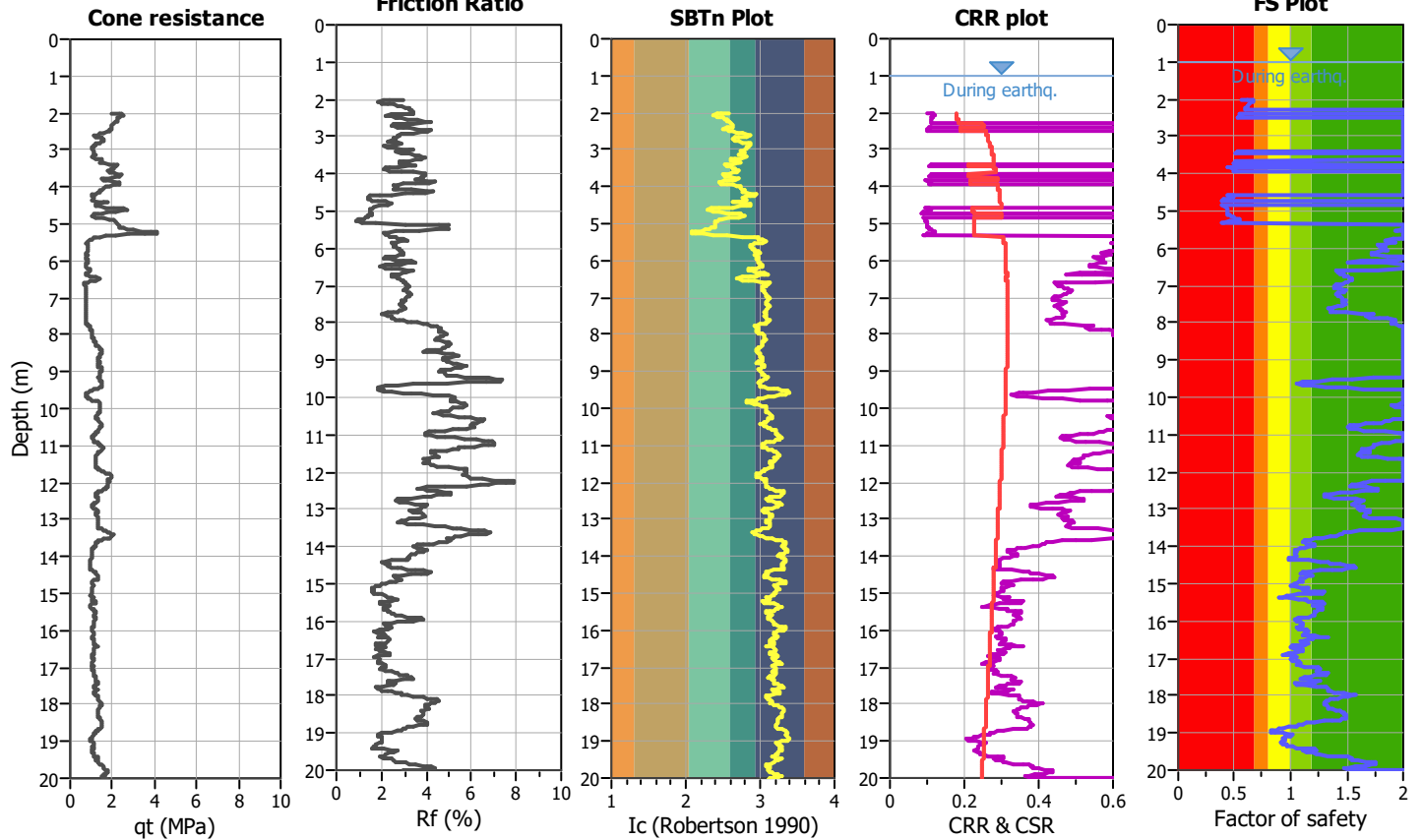
**Project title :**

**Location :**

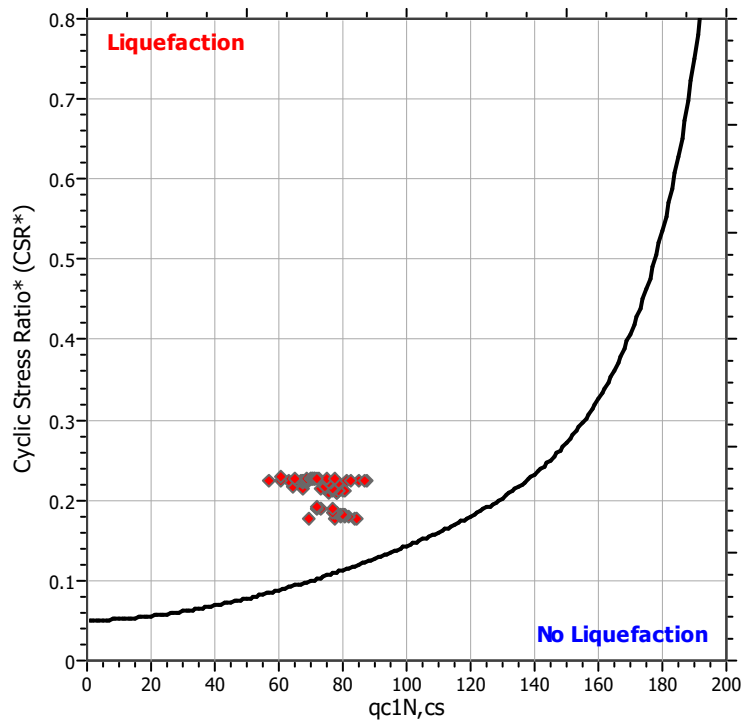
**CPT file : P32CPTU42 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

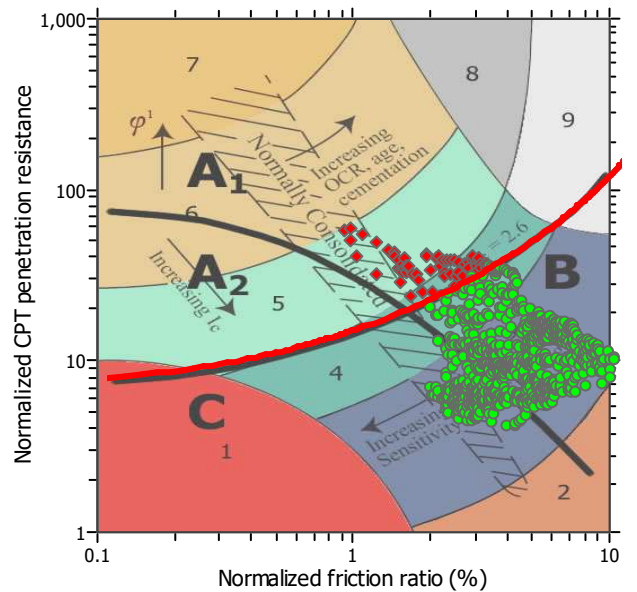
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sand & Clay
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.26	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



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

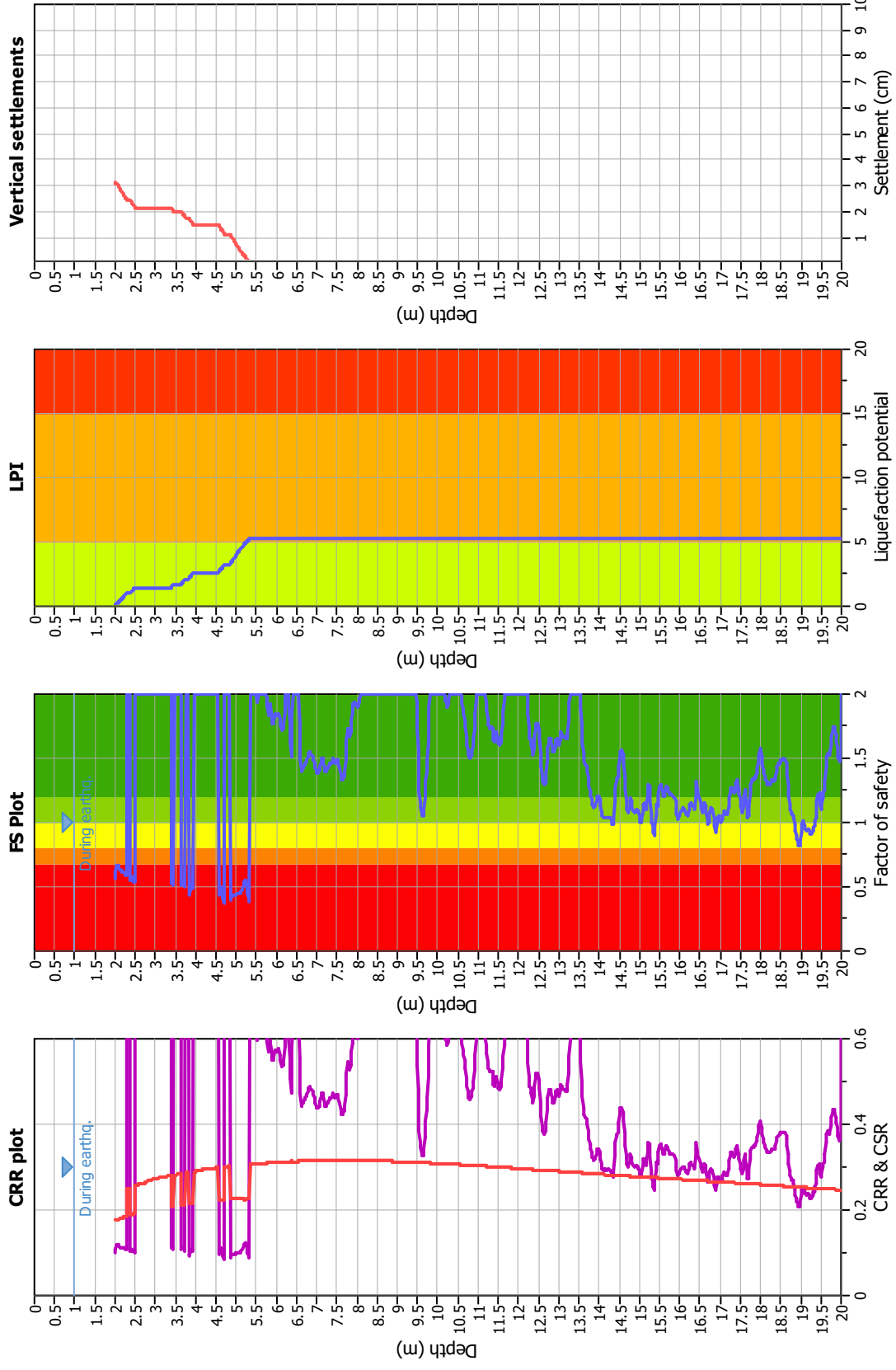


**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.60 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 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. applied: No  
 $K_0$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**F. S. color scheme**

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

**LPI color scheme**

- Very high risk
- High risk
- Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

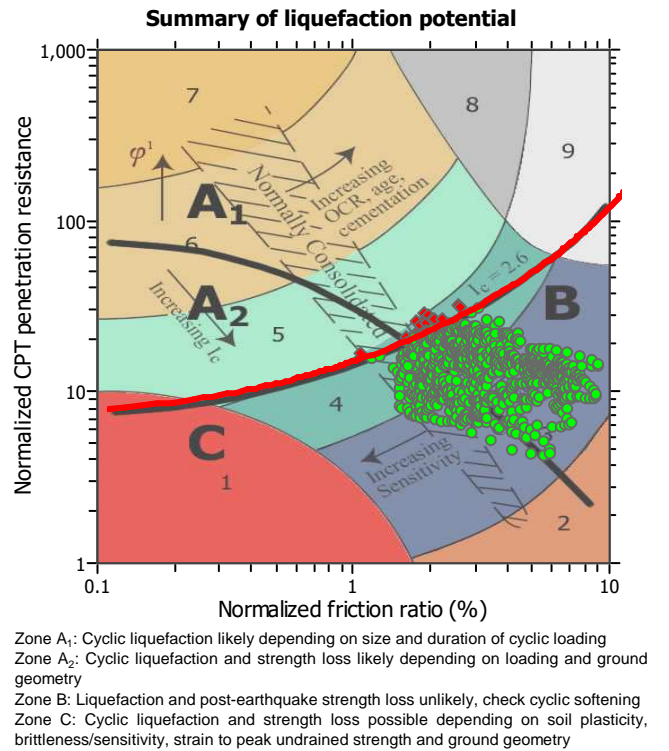
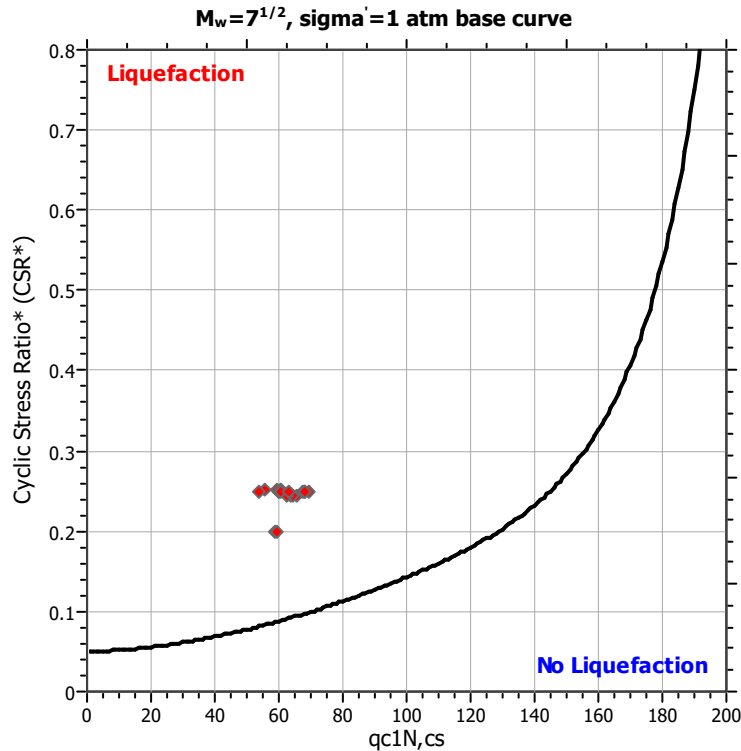
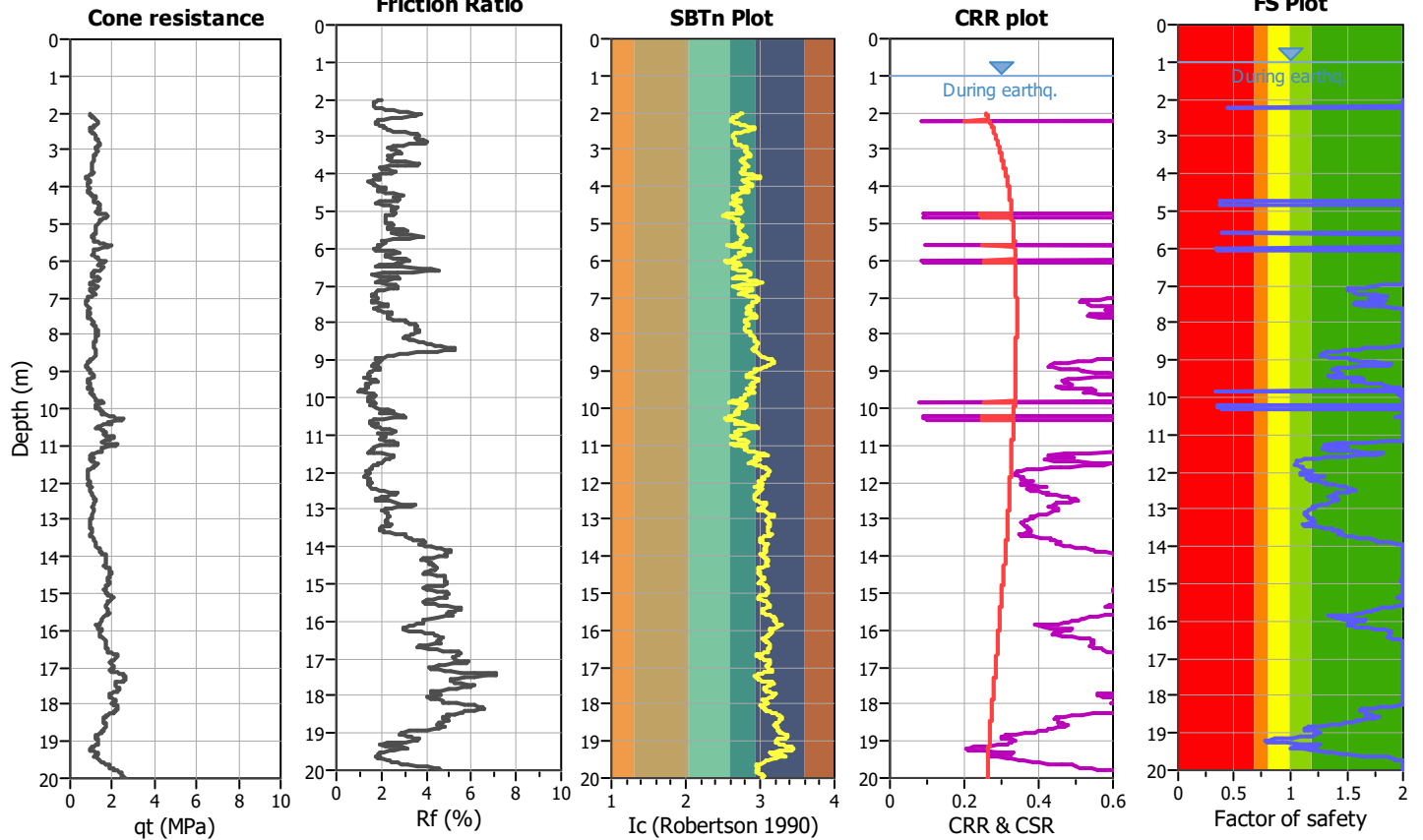
**Project title :**

**Location :**

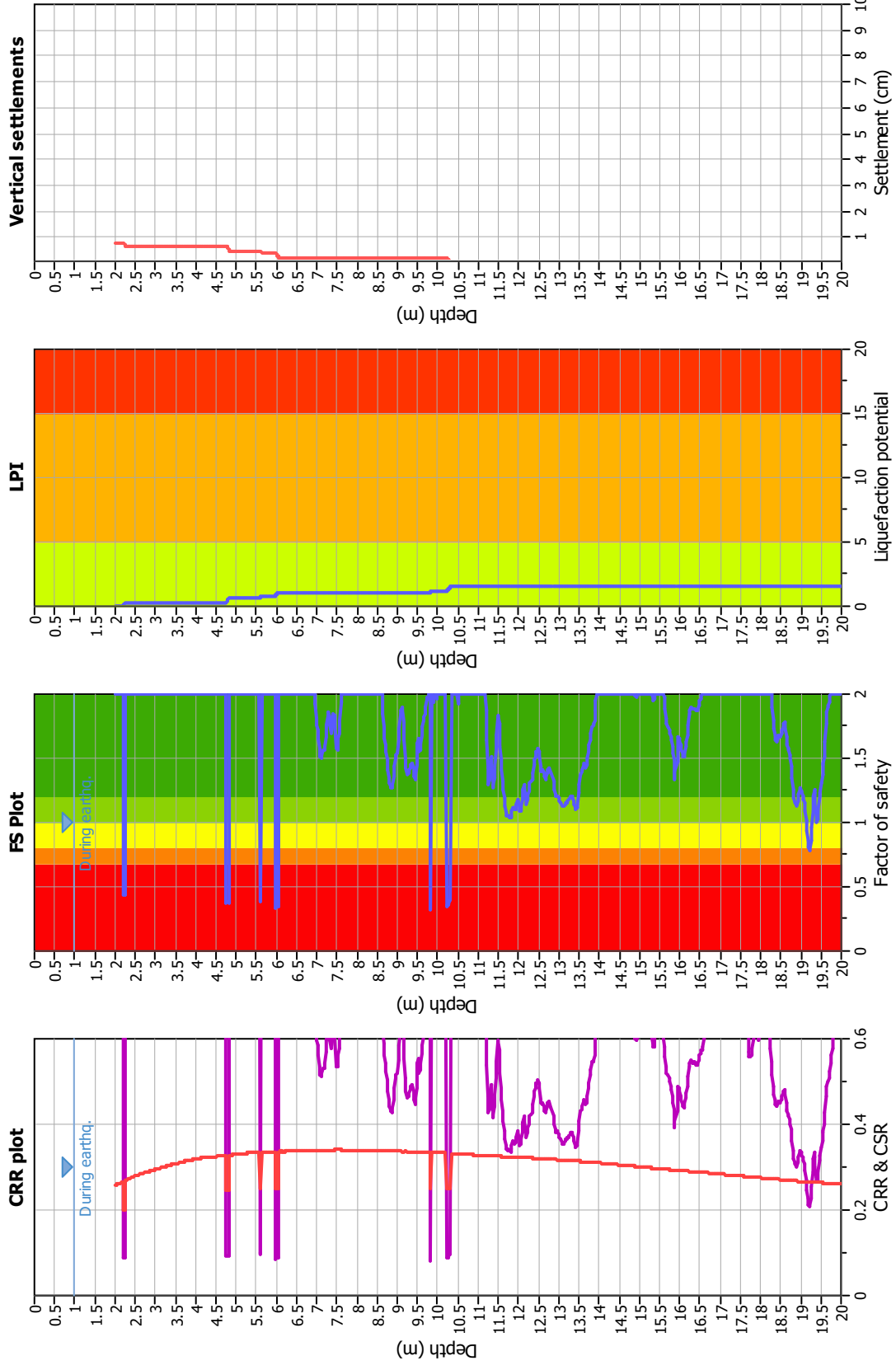
**CPT file : P33CPTU43 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**F. S. color scheme**

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

**LPI color scheme**

- Very high risk
- High risk
- Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

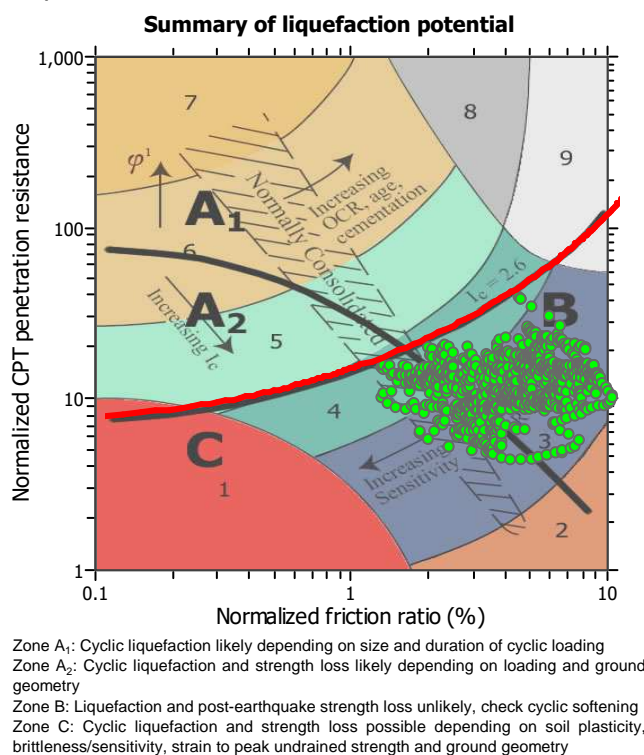
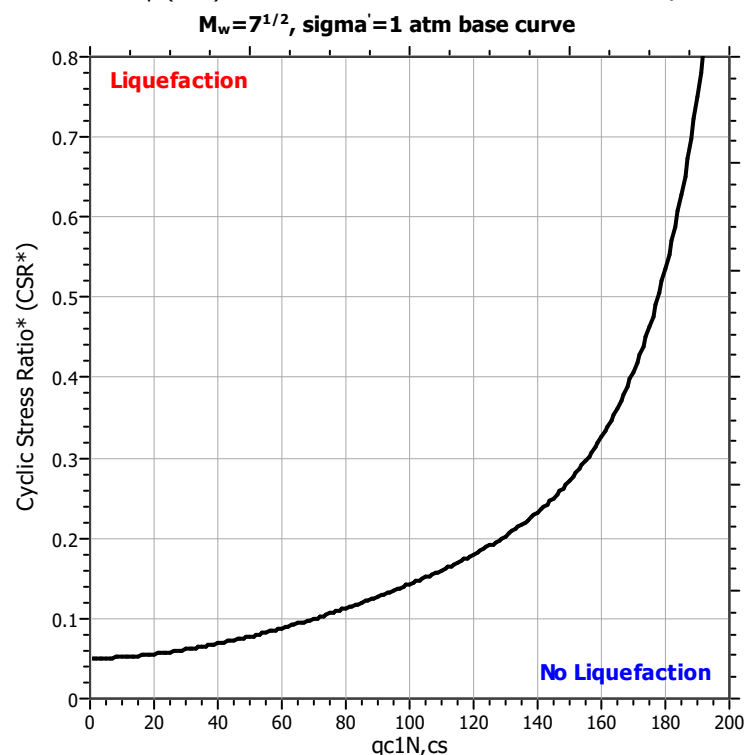
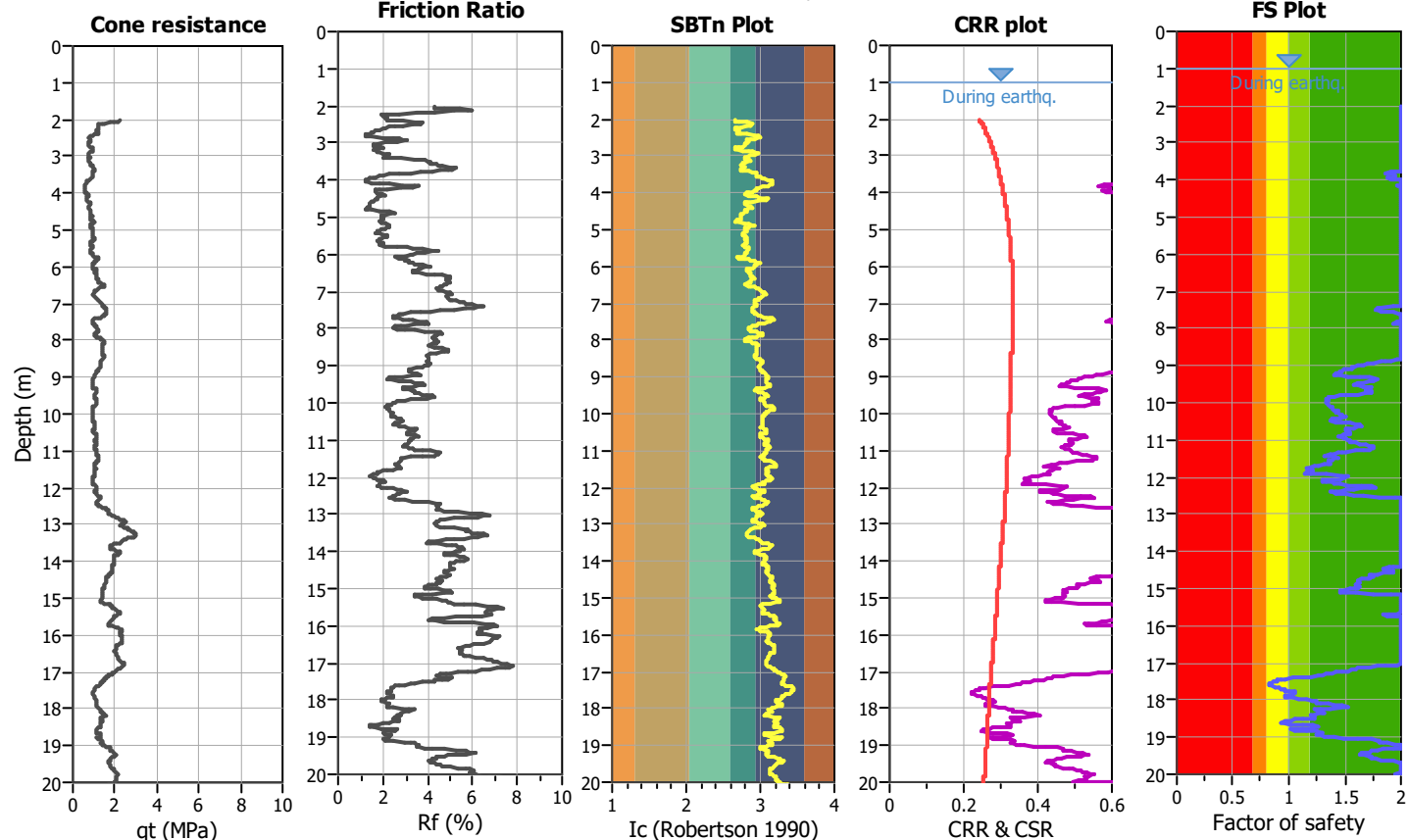
**Project title :**

**Location :**

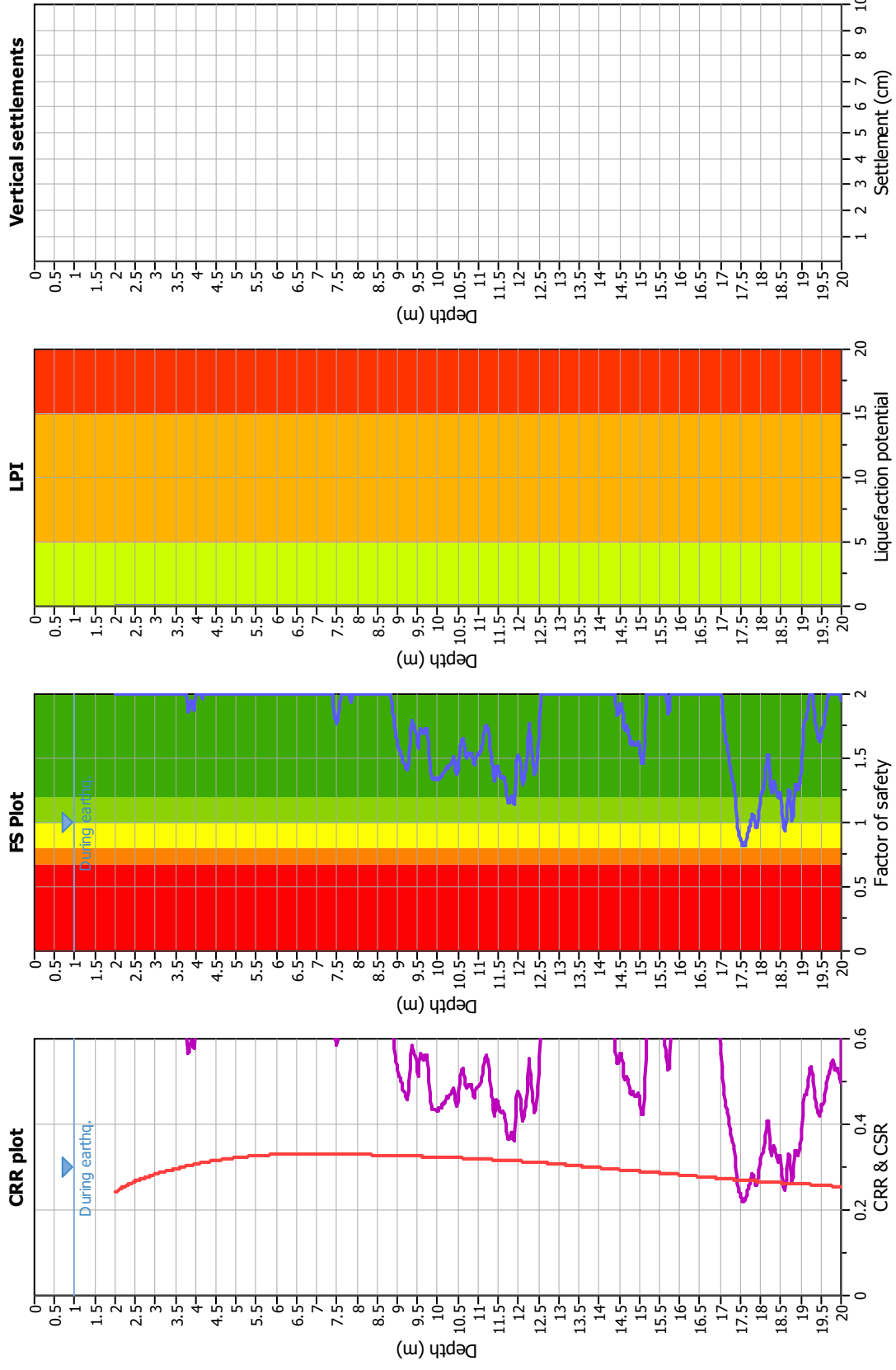
**CPT file : P34CPTU44 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

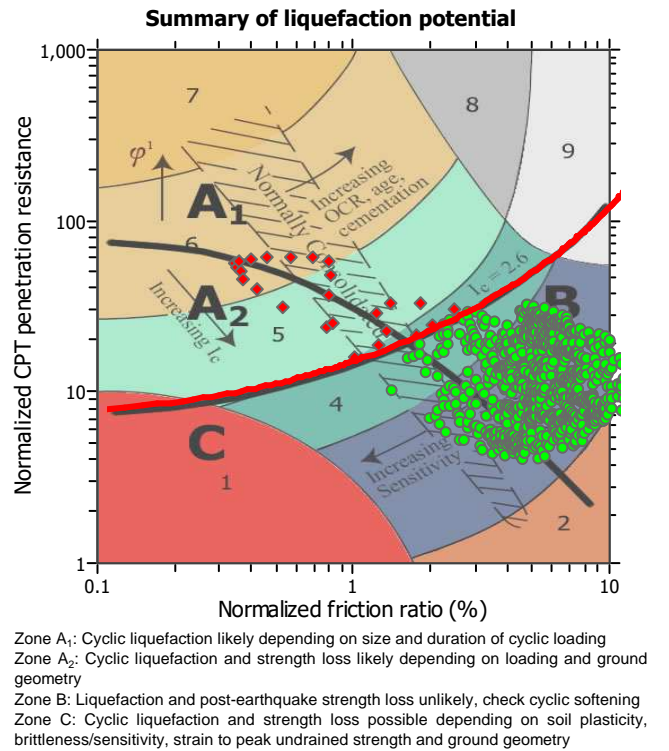
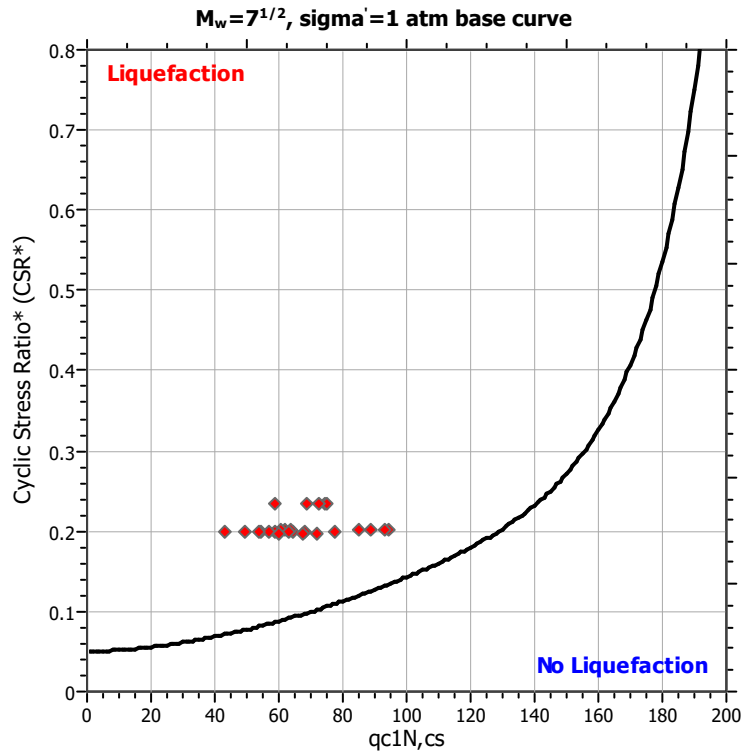
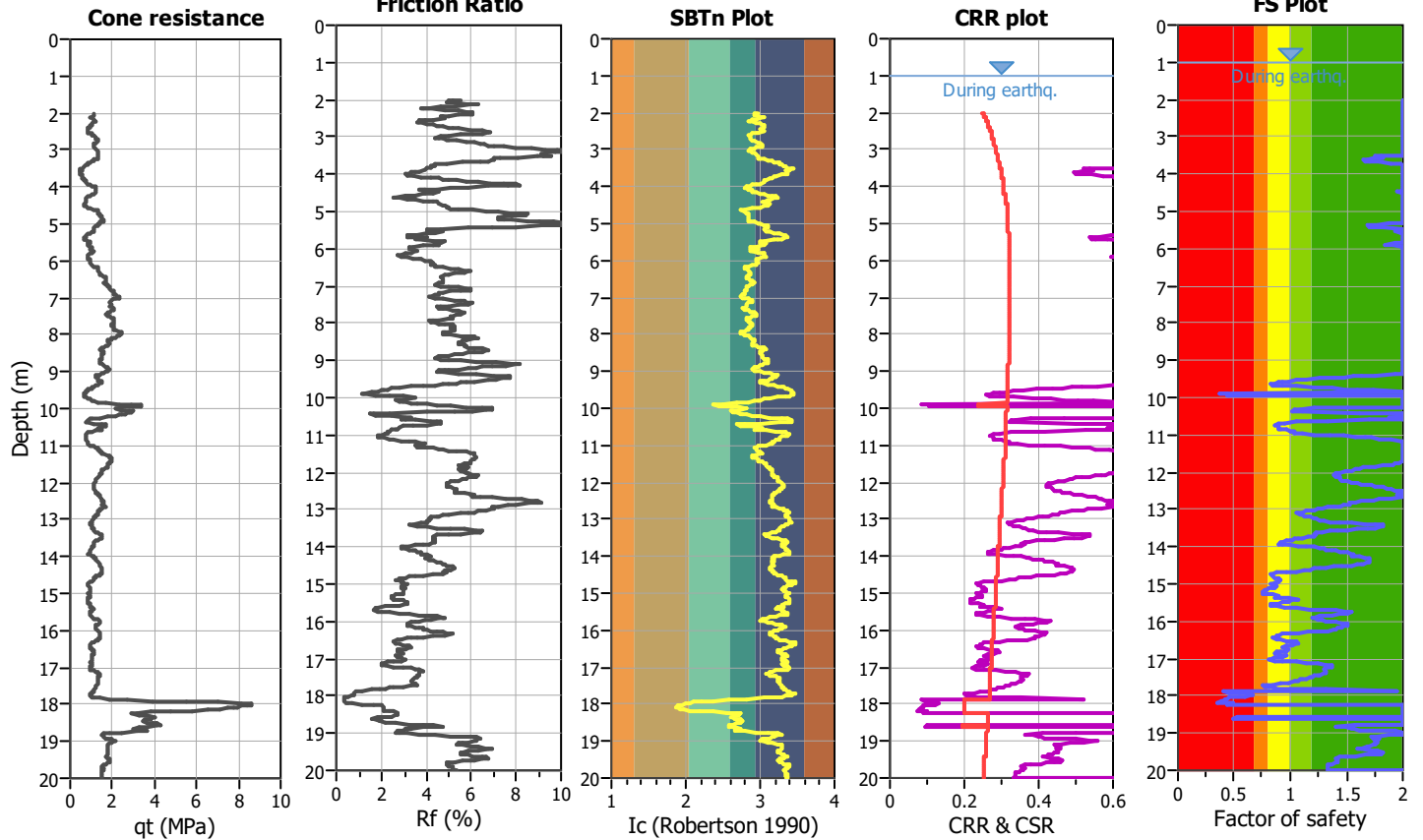
**Project title :**

**Location :**

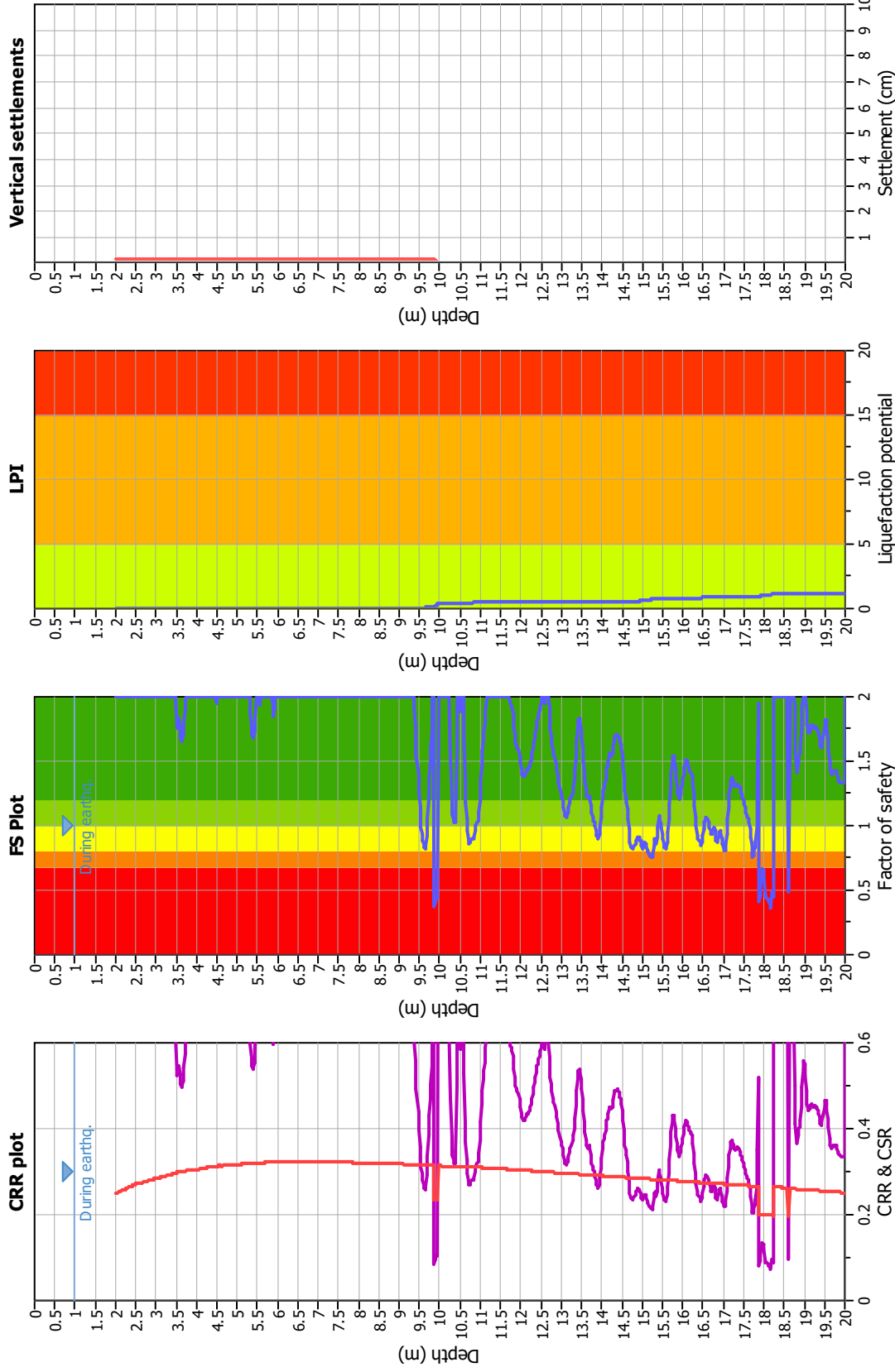
**CPT file : P35CPTU46 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 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
- Unlikely to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

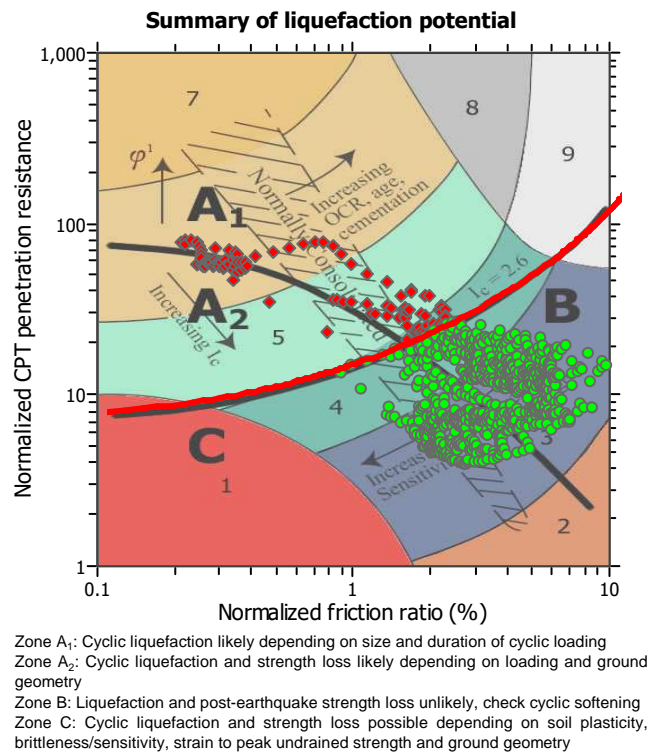
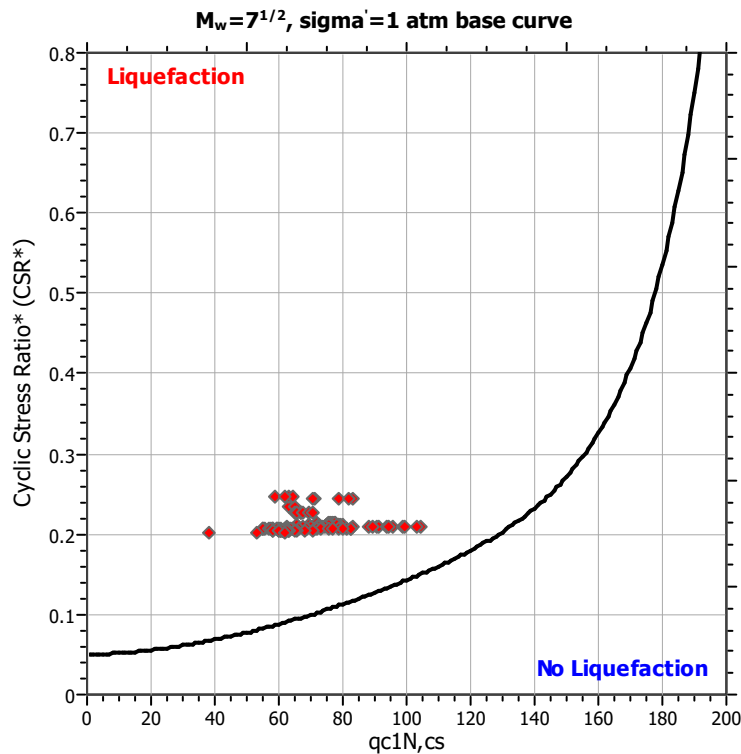
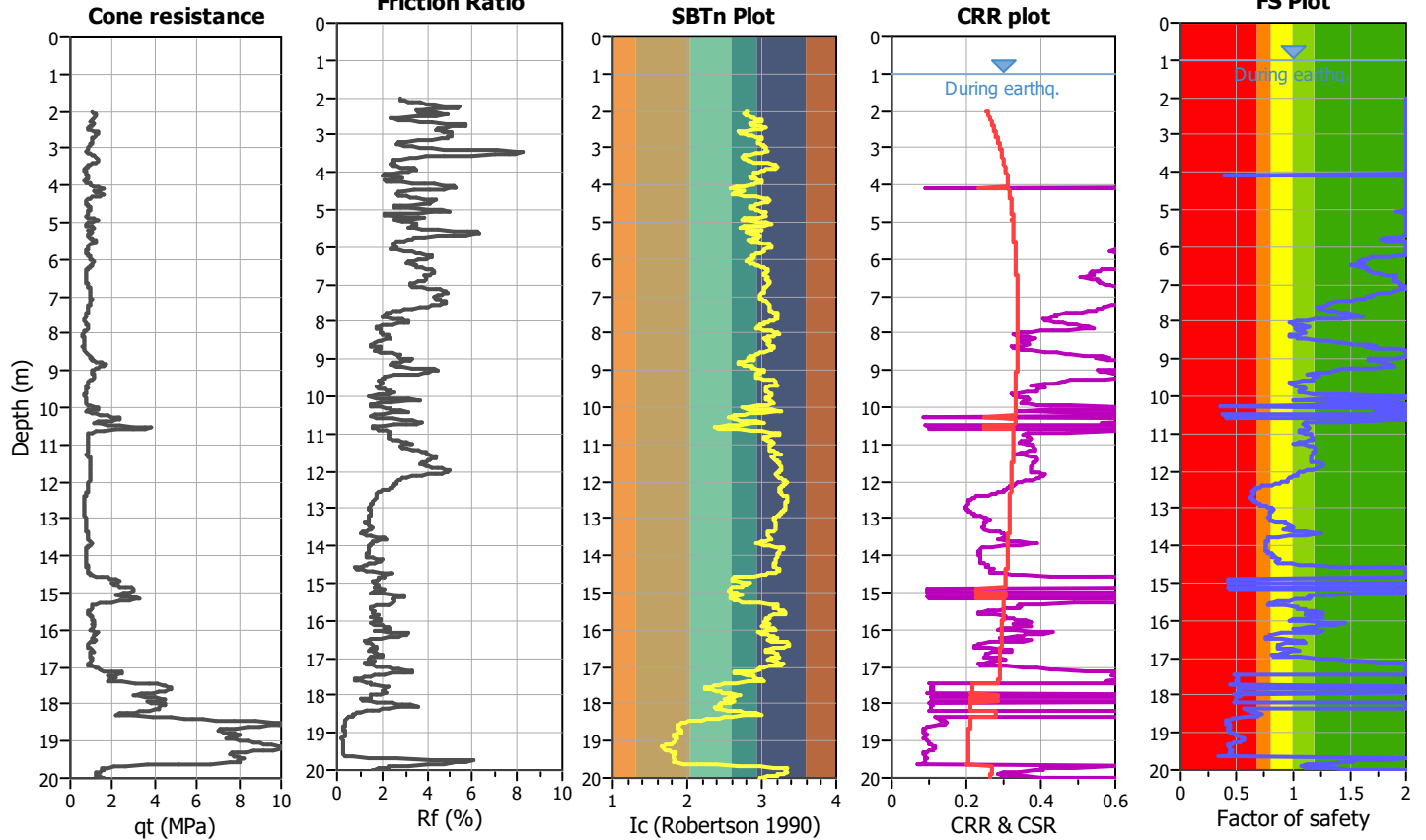
**Project title :**

**Location :**

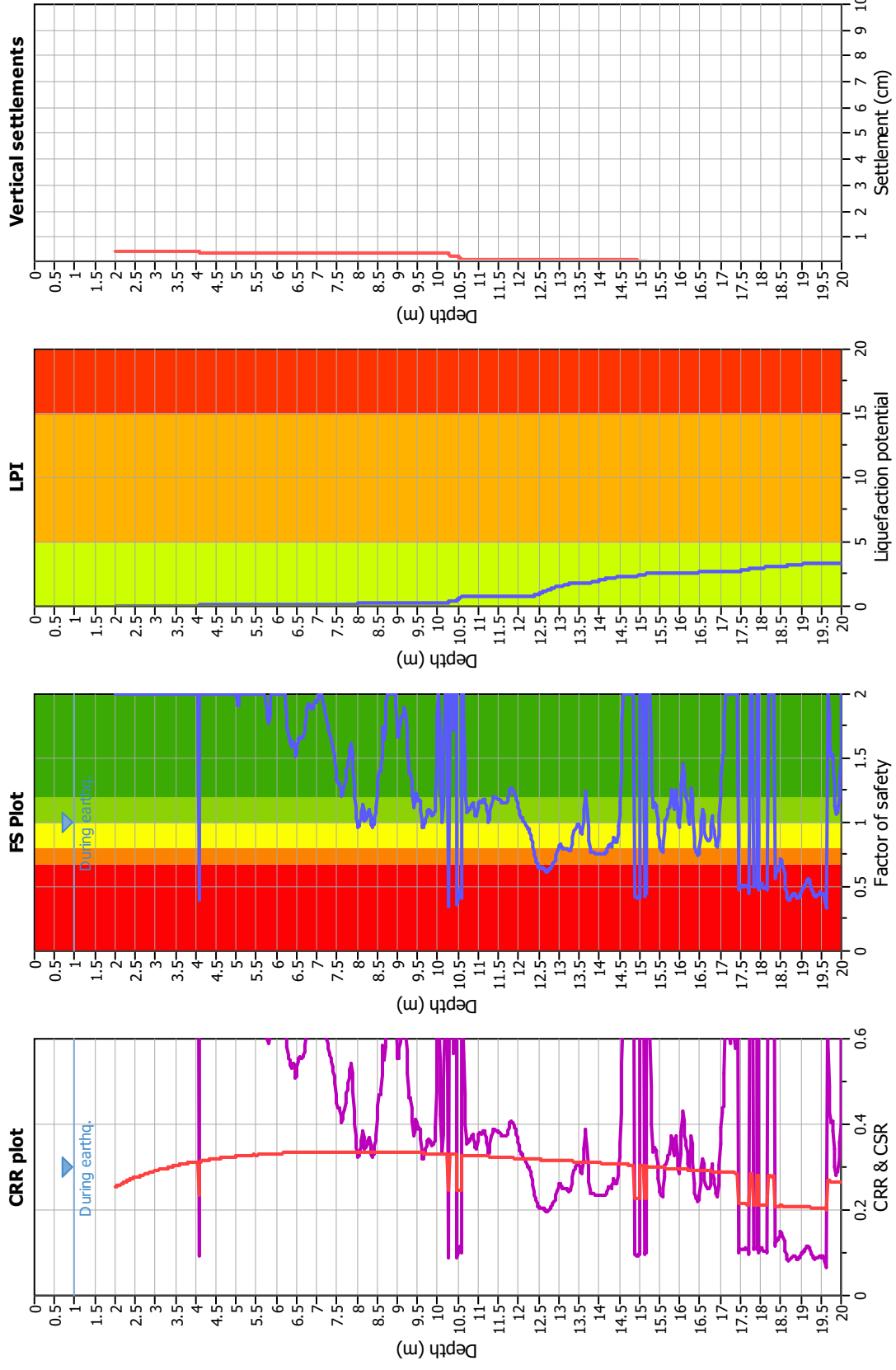
**CPT file : P36CPTU47 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

#### Fill weight:

Transition detect: applied: N/A  
 K<sub>σ</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### Depth to GWT (earthq.):

1.00 m

#### Average results interval:

3

#### I<sub>c</sub> cut-off value:

2.60

#### Unit weight calculation:

Based on SBT

#### Use fill:

No

#### Fill height:

N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

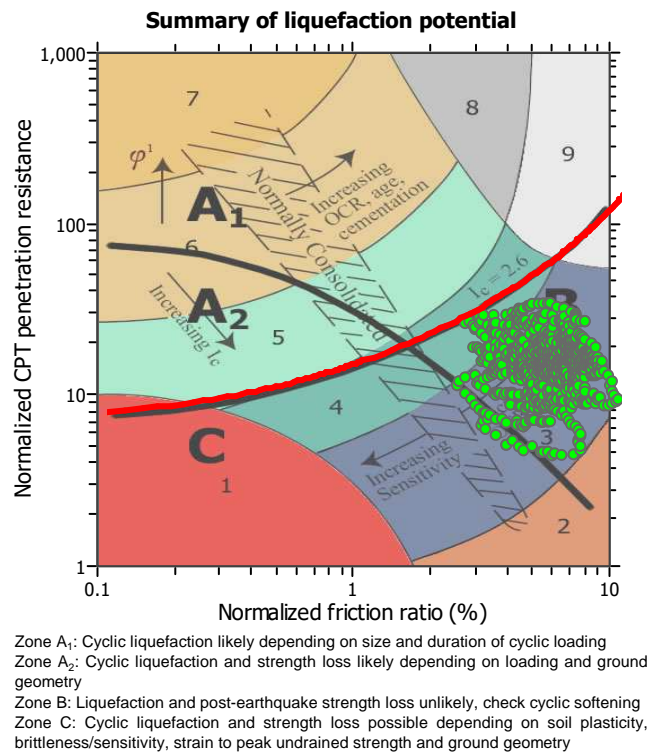
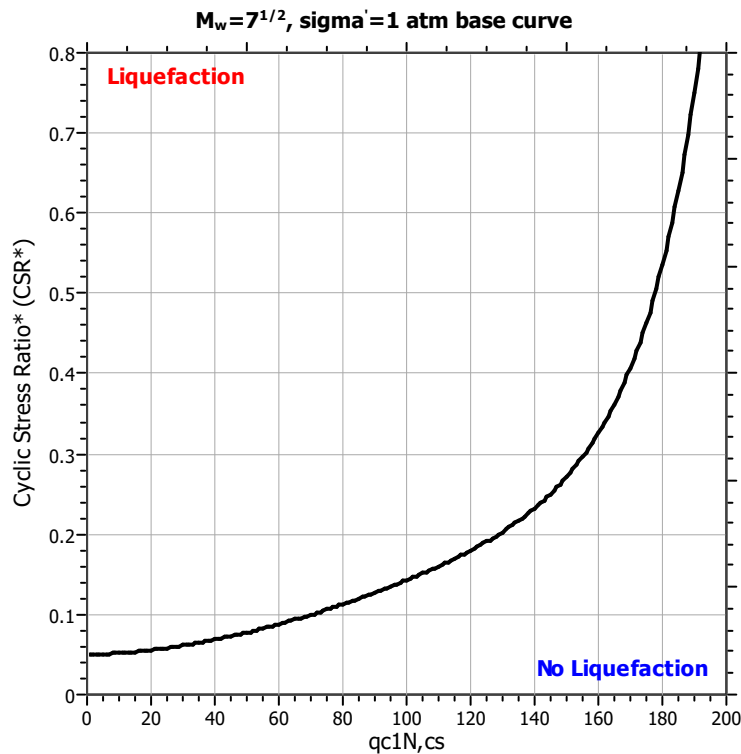
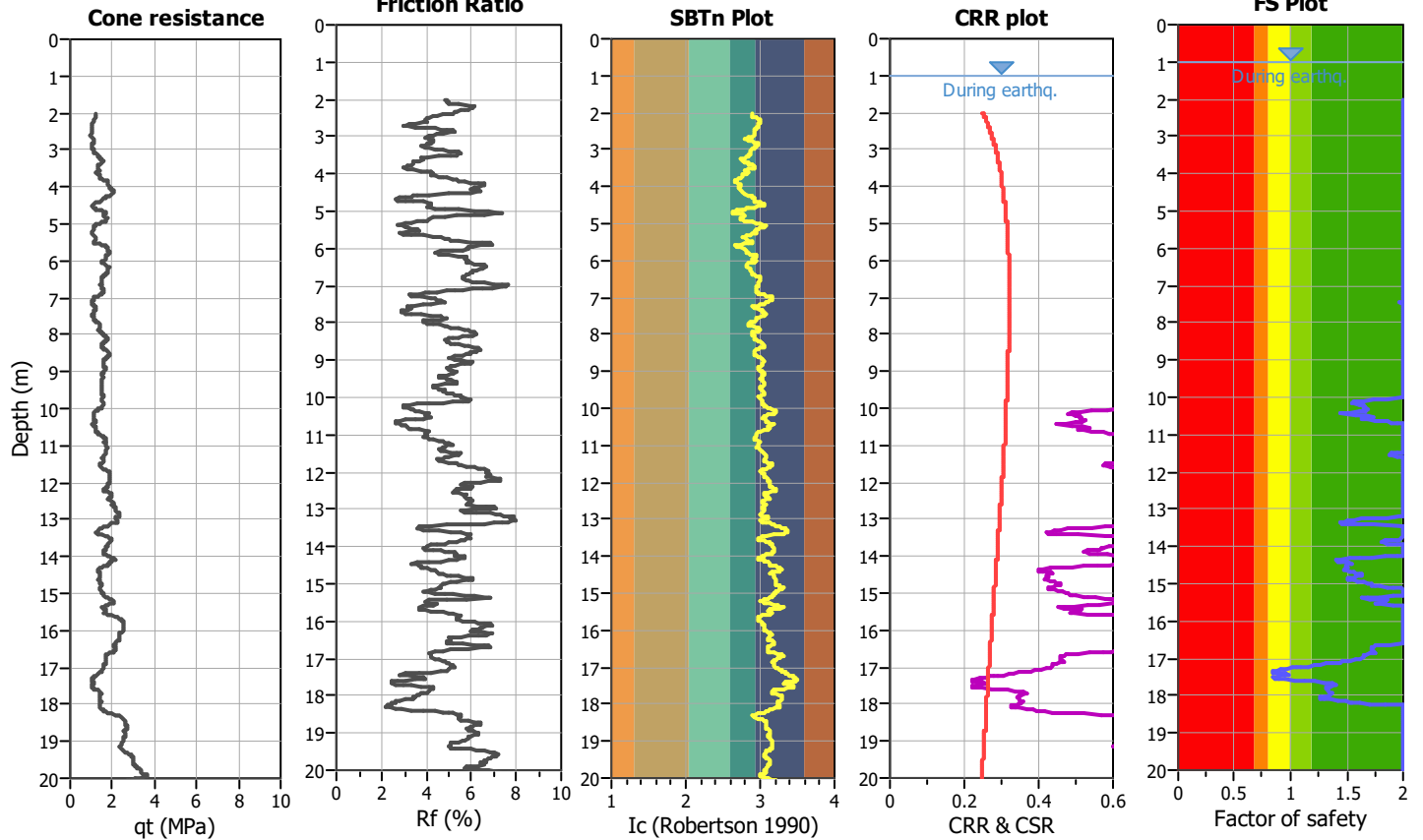
**Project title :**

**Location :**

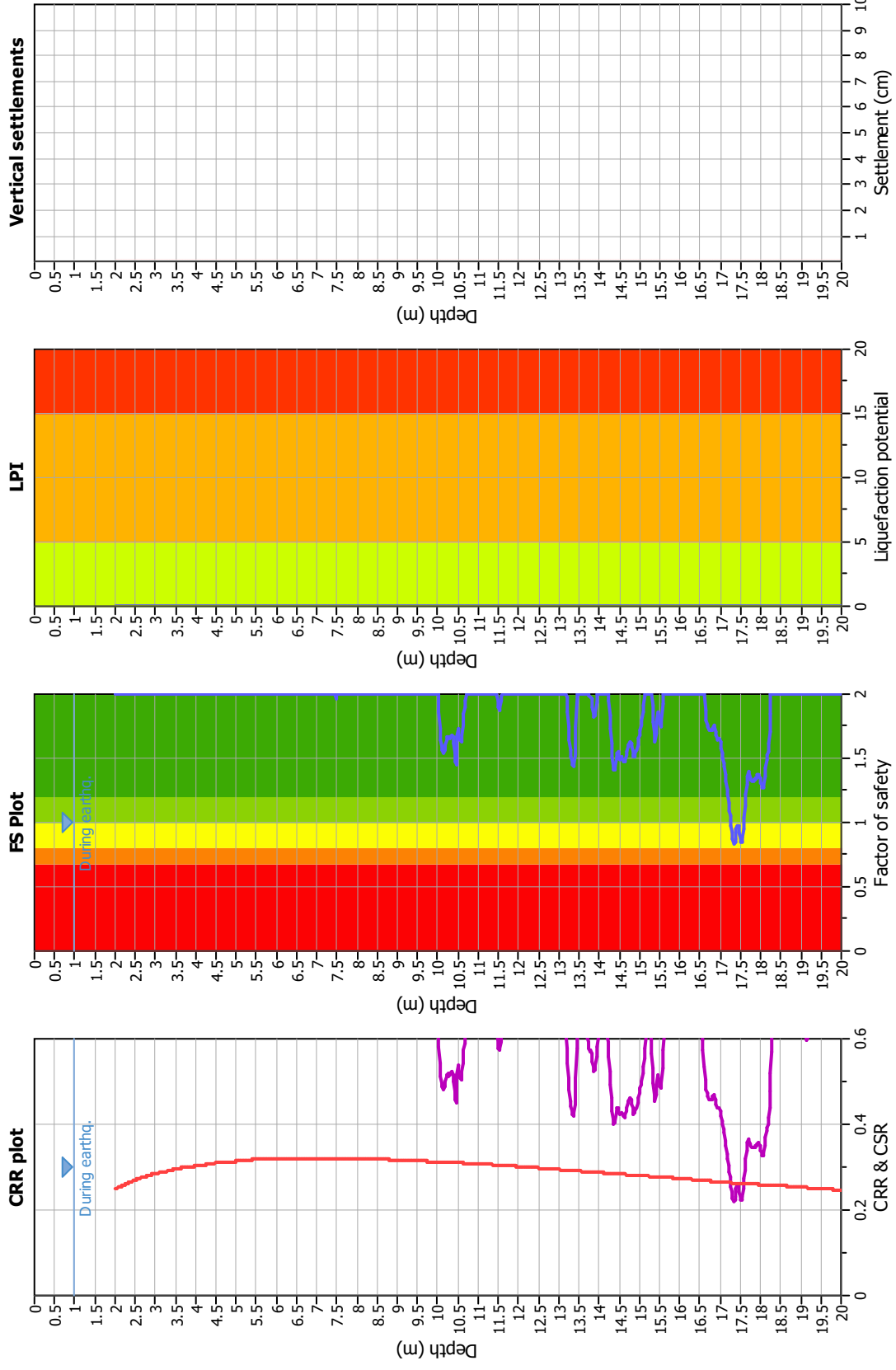
**CPT file : P37CPTU49 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect: applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

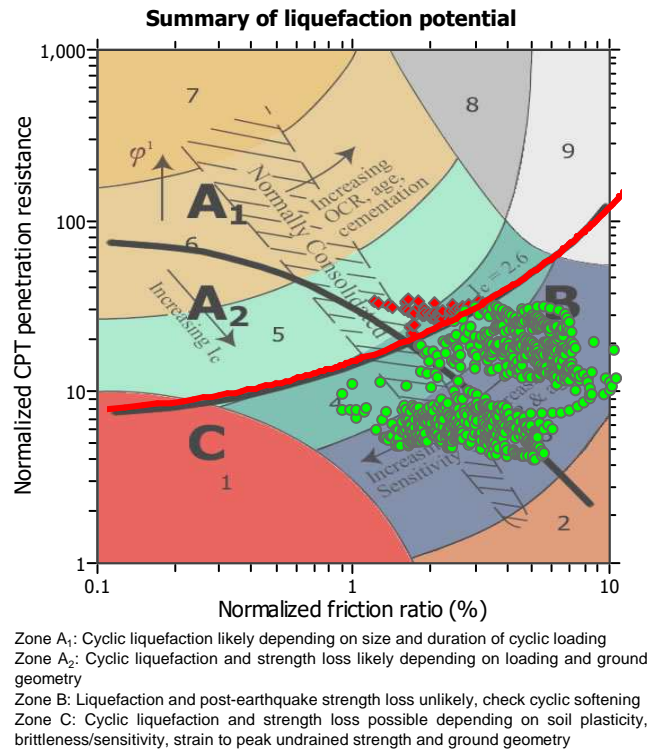
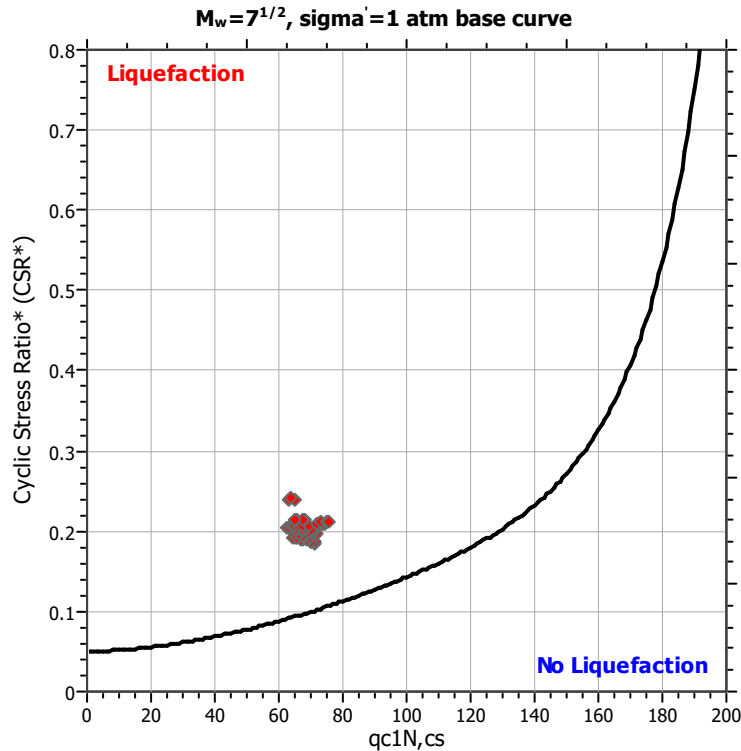
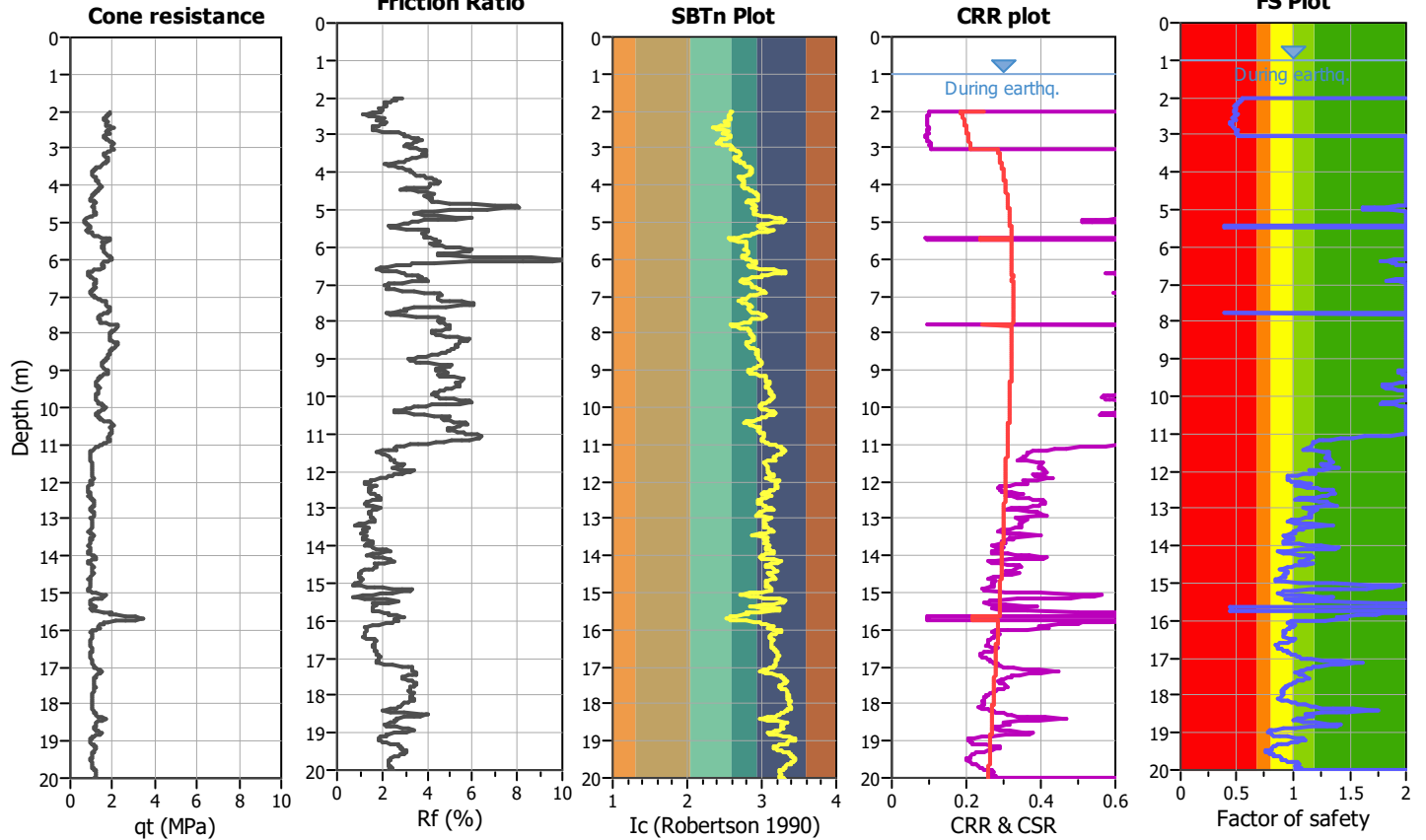
**Project title :**

**Location :**

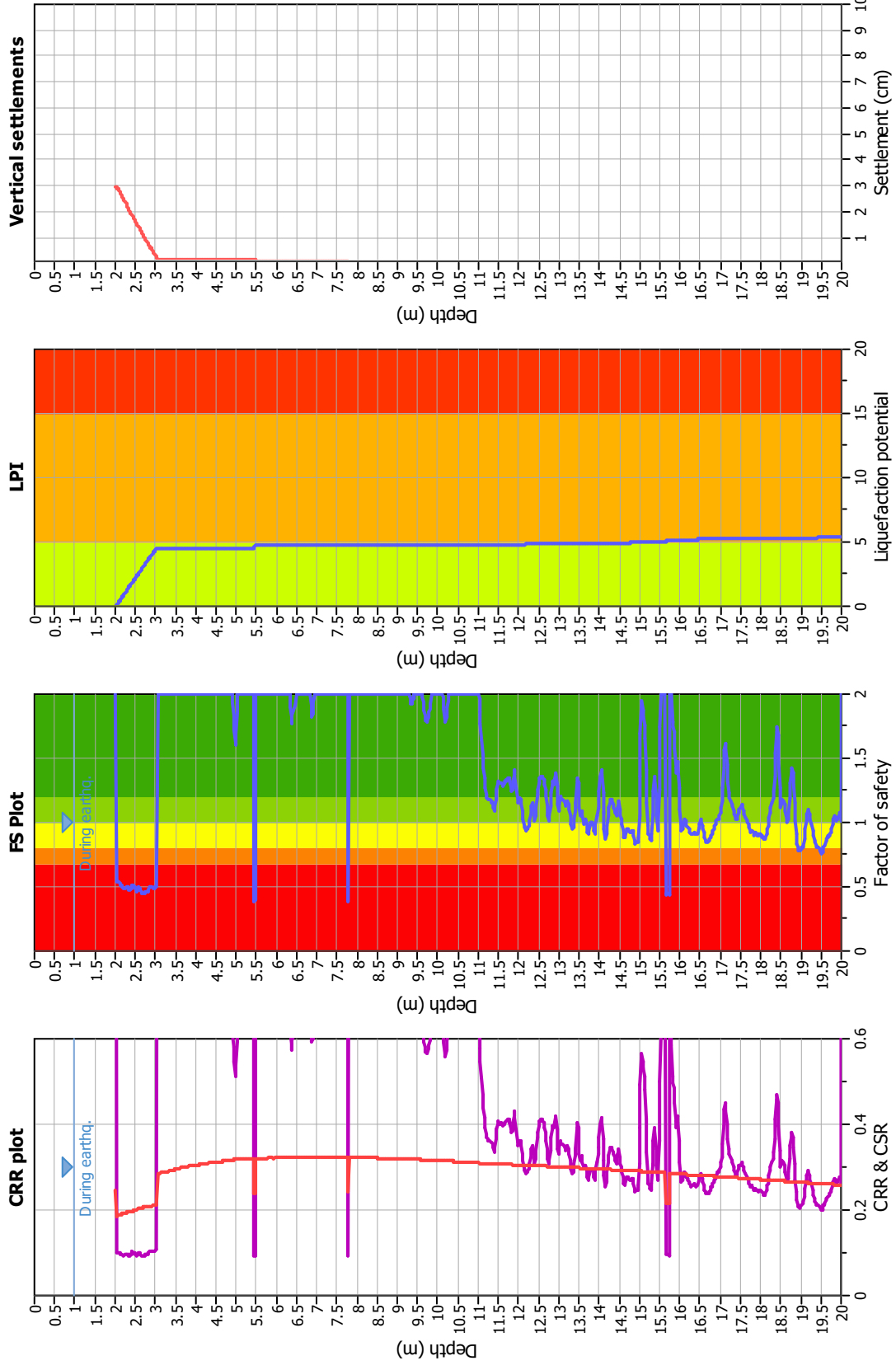
**CPT file : P38CPTU50 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

#### LPI color scheme

Transition detect. applied: N/A  
 K<sub>σ</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 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  
 Unlikely to liquefy  
 Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

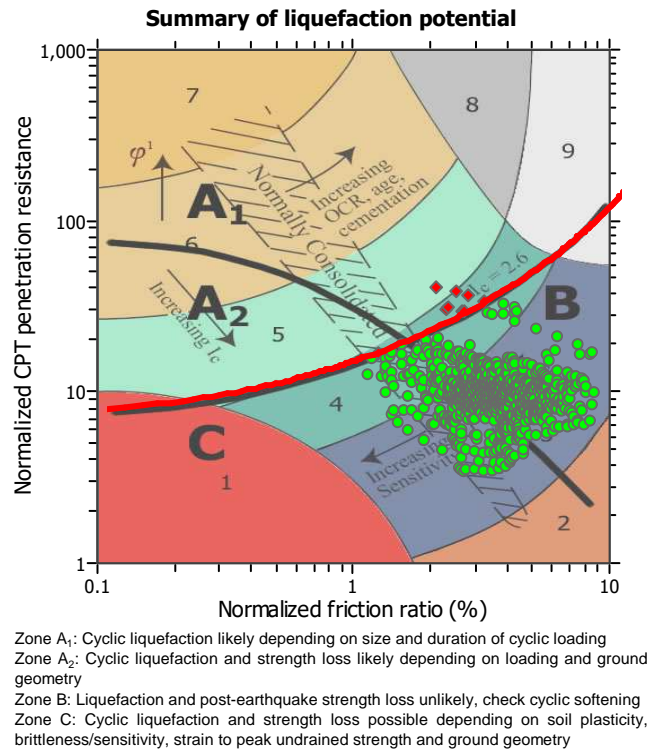
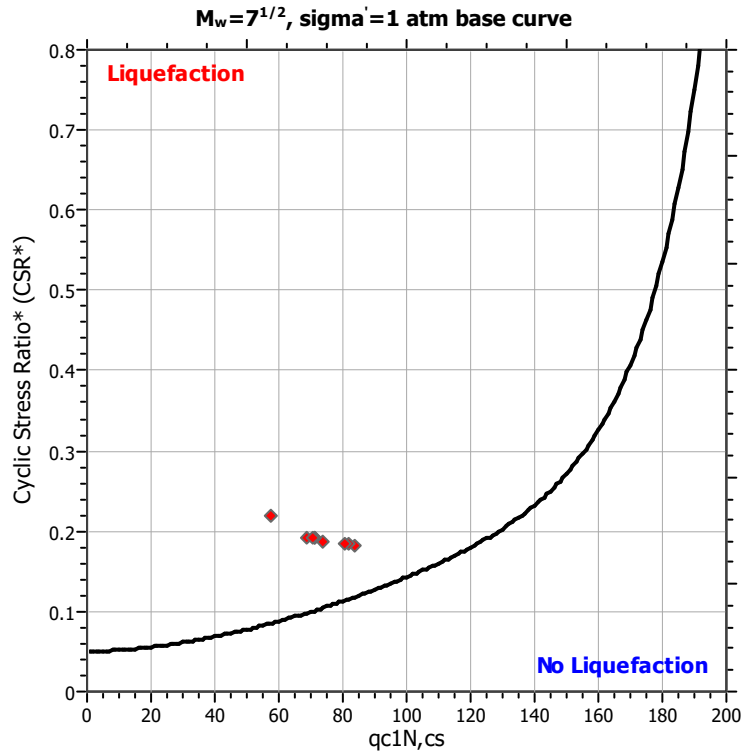
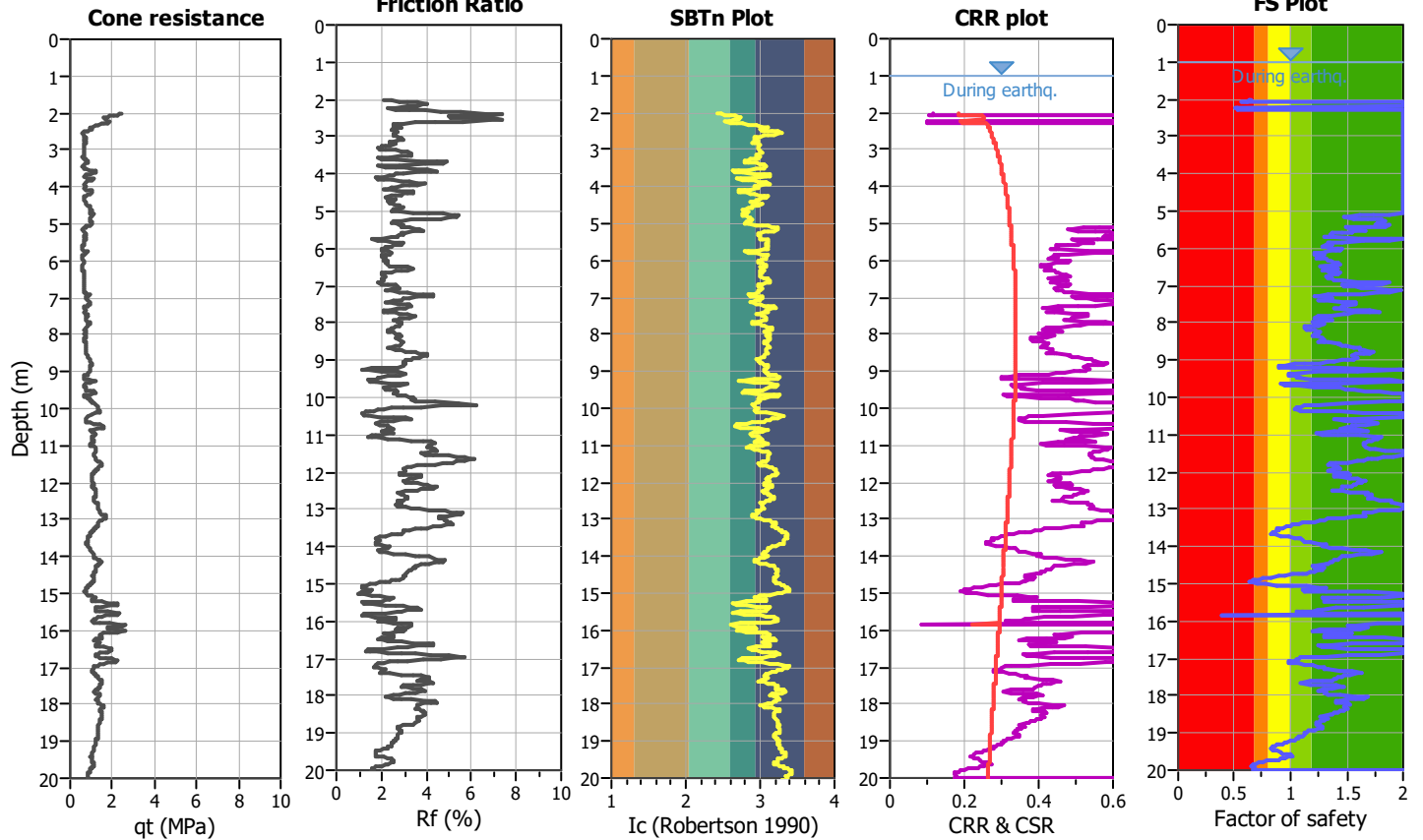
**Project title :**

**Location :**

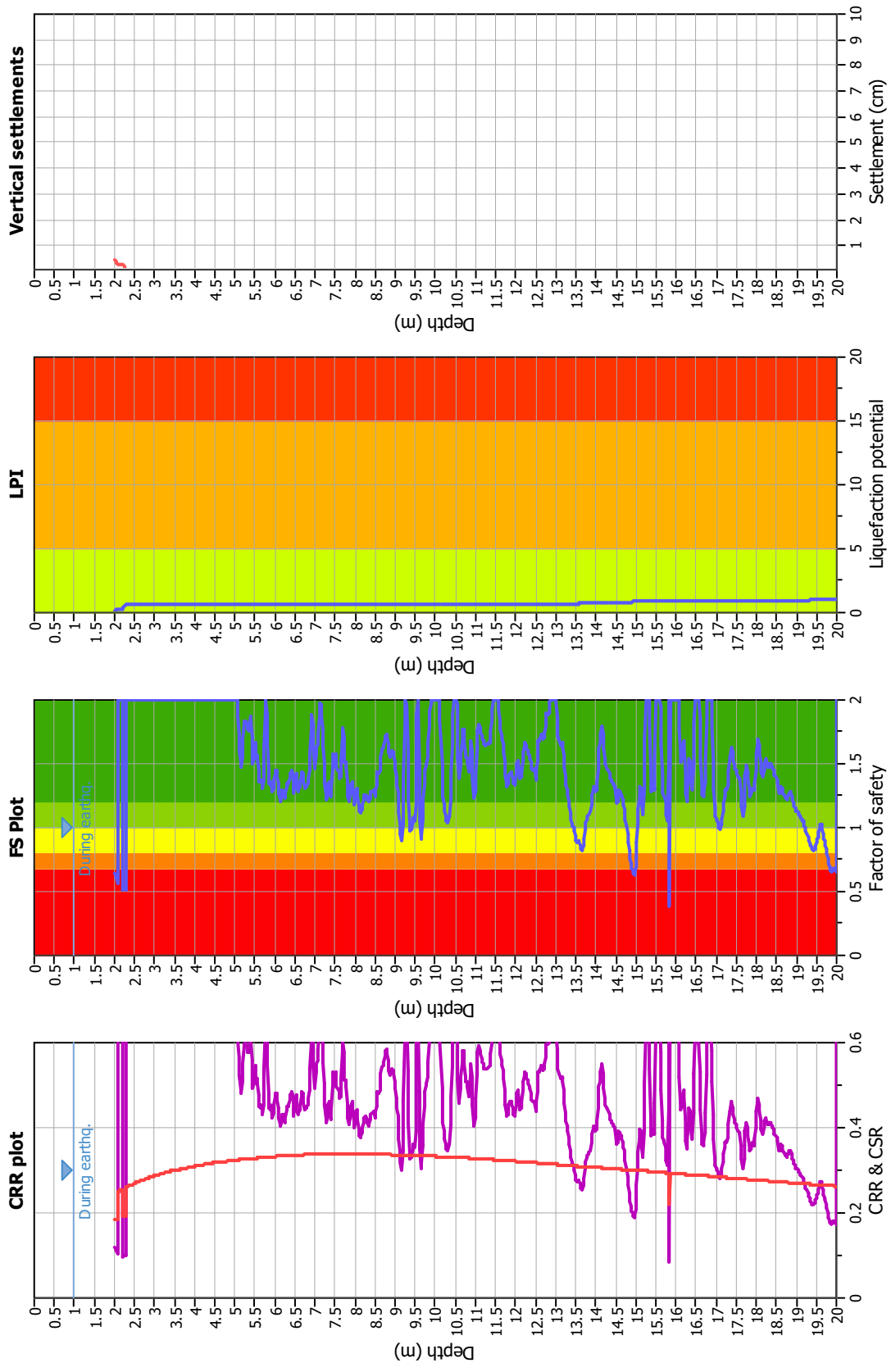
**CPT file : P39CPTU51 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### Fill weight:

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

#### Transition detect. applied:

N/A  
 No  
 Yes  
 Sand & Clay  
 Yes  
 Limit depth applied: 20.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

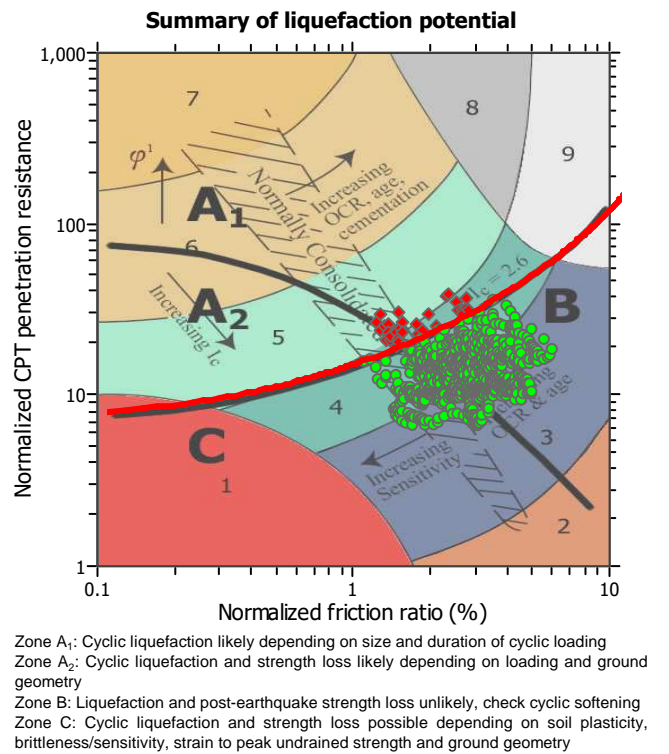
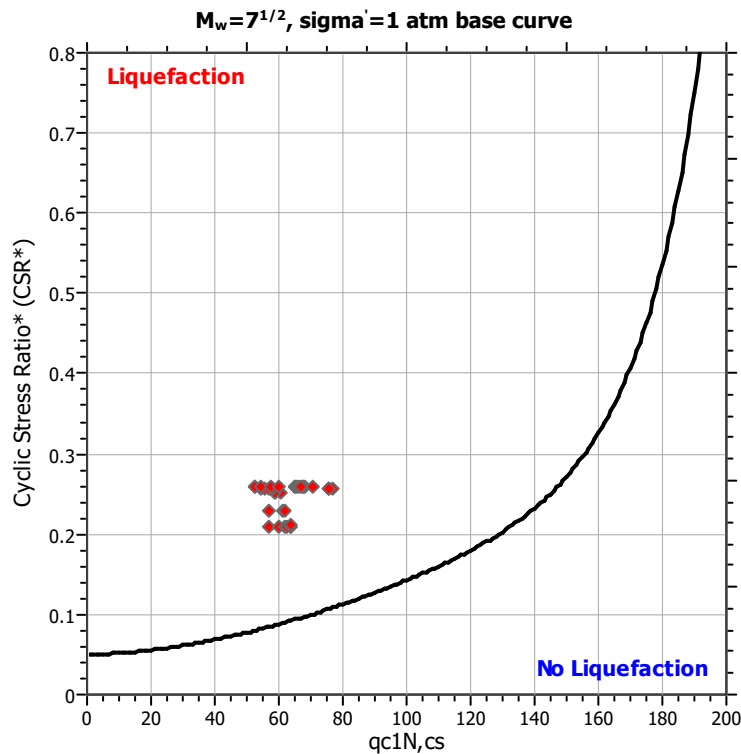
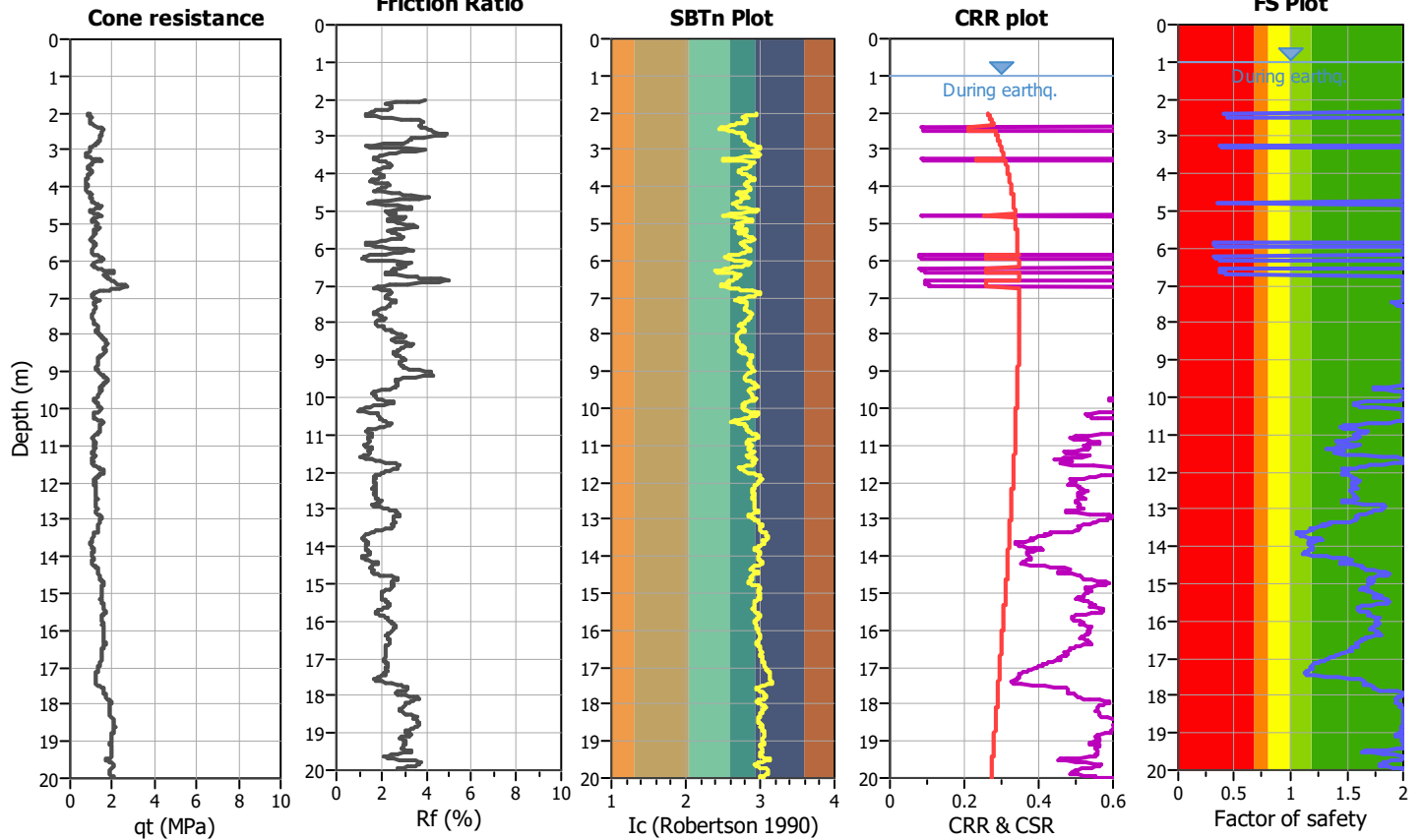
**Project title :**

**Location :**

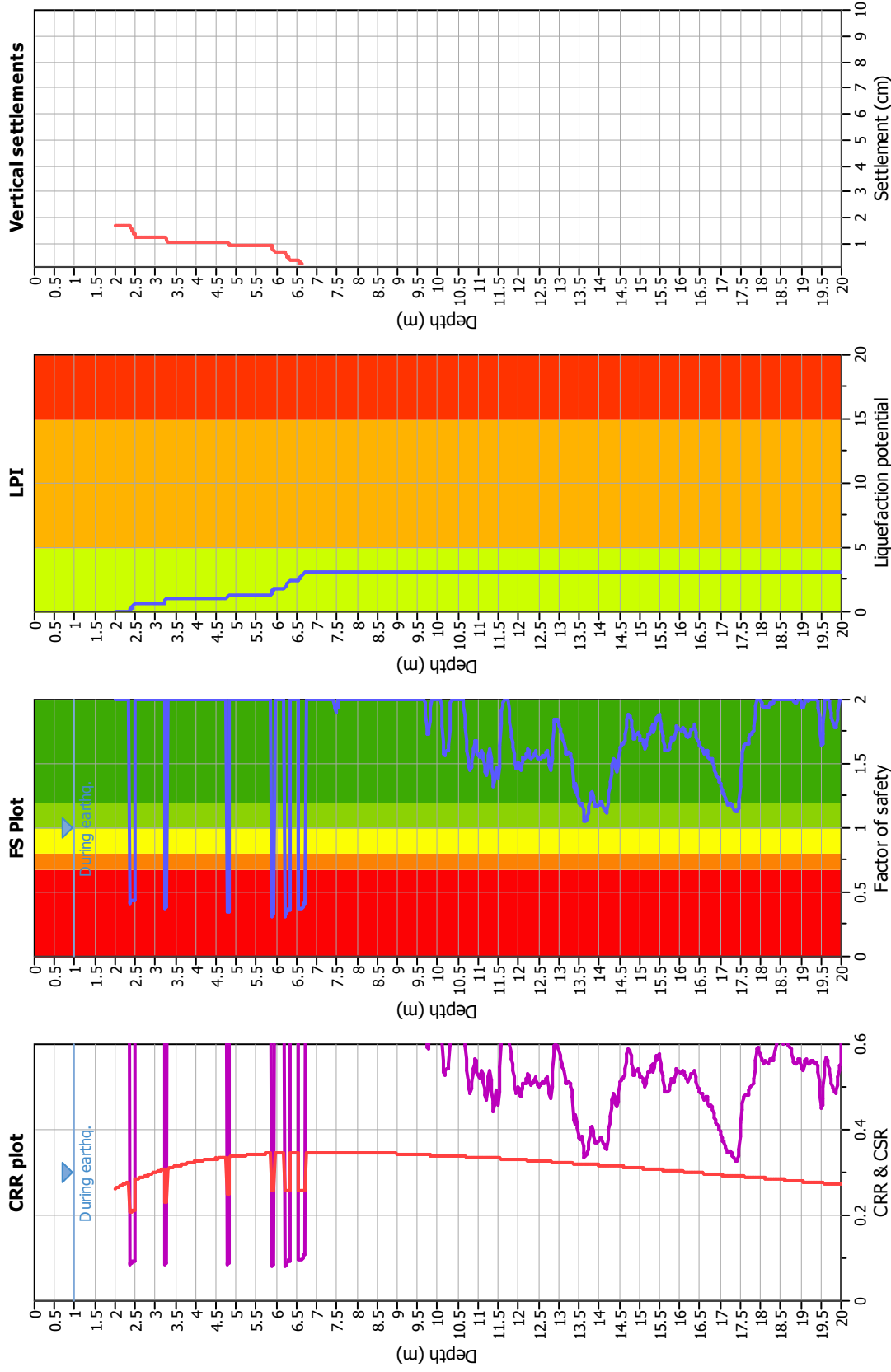
**CPT file : P40CPTU52 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

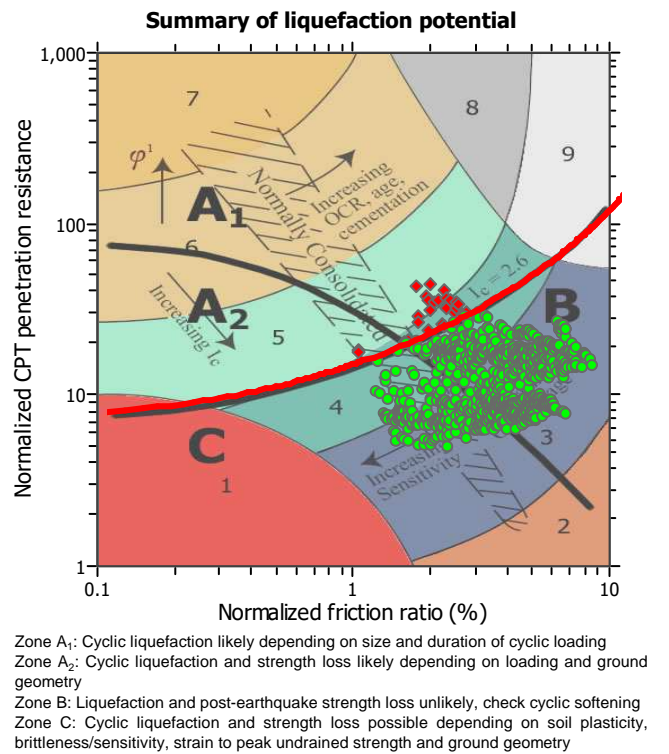
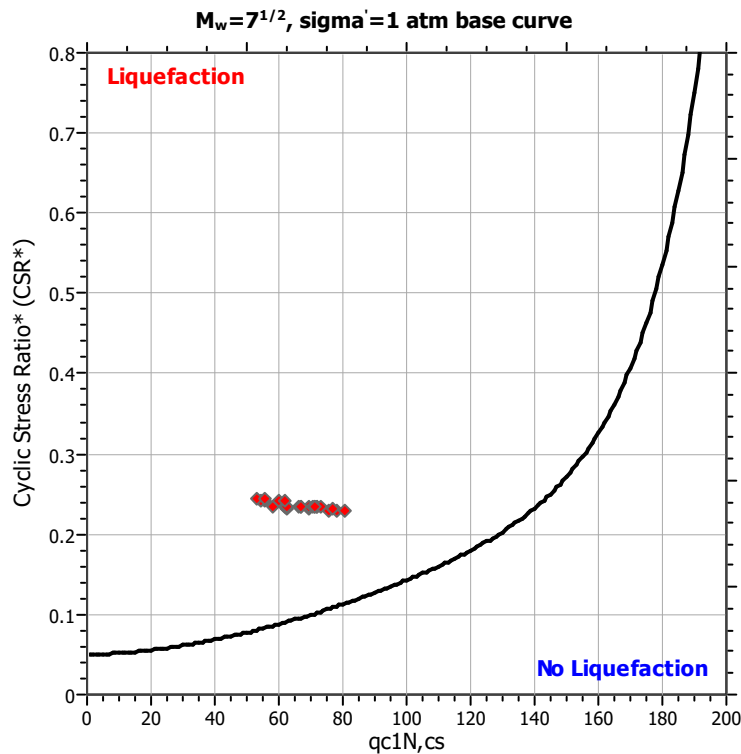
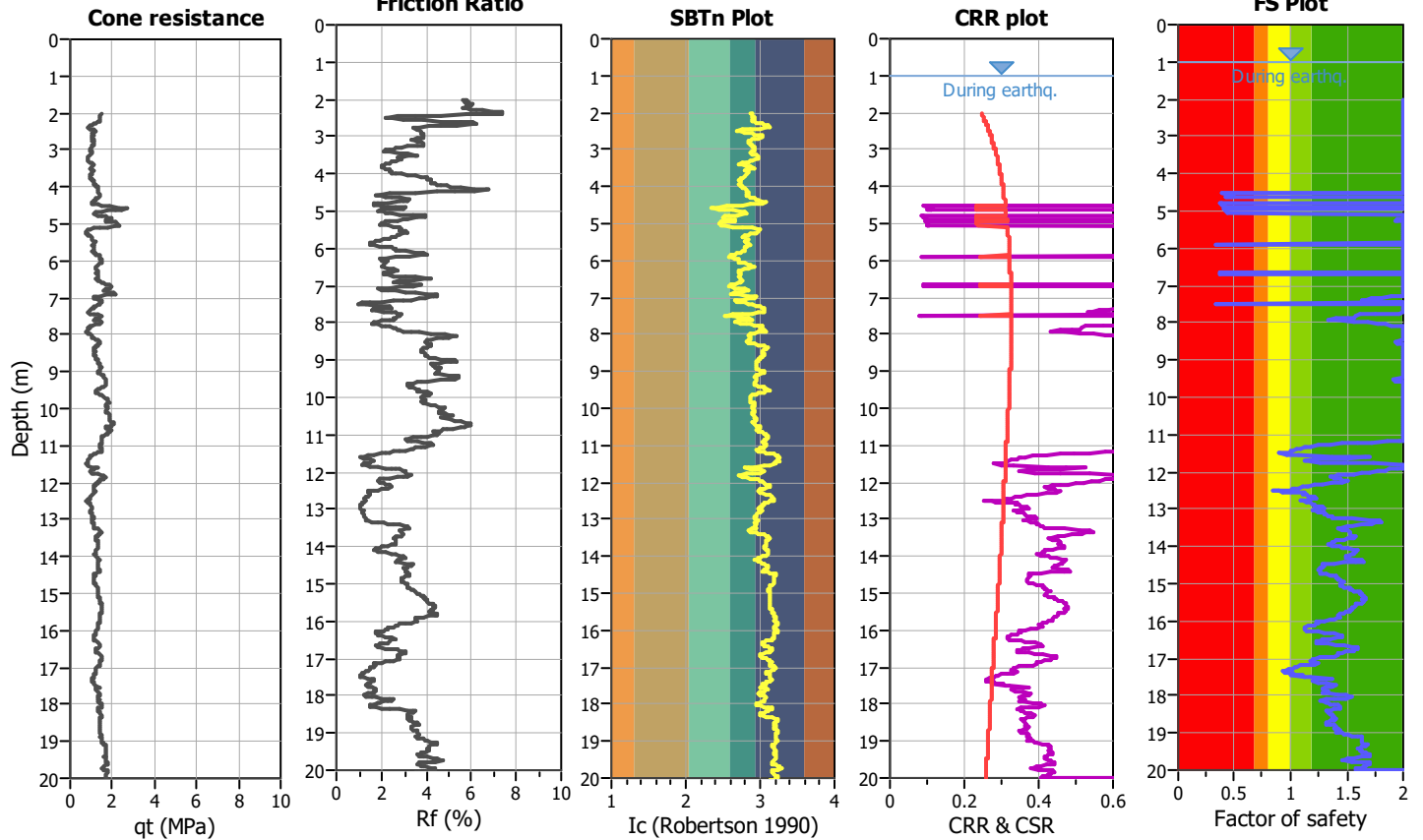
**Project title :**

**Location :**

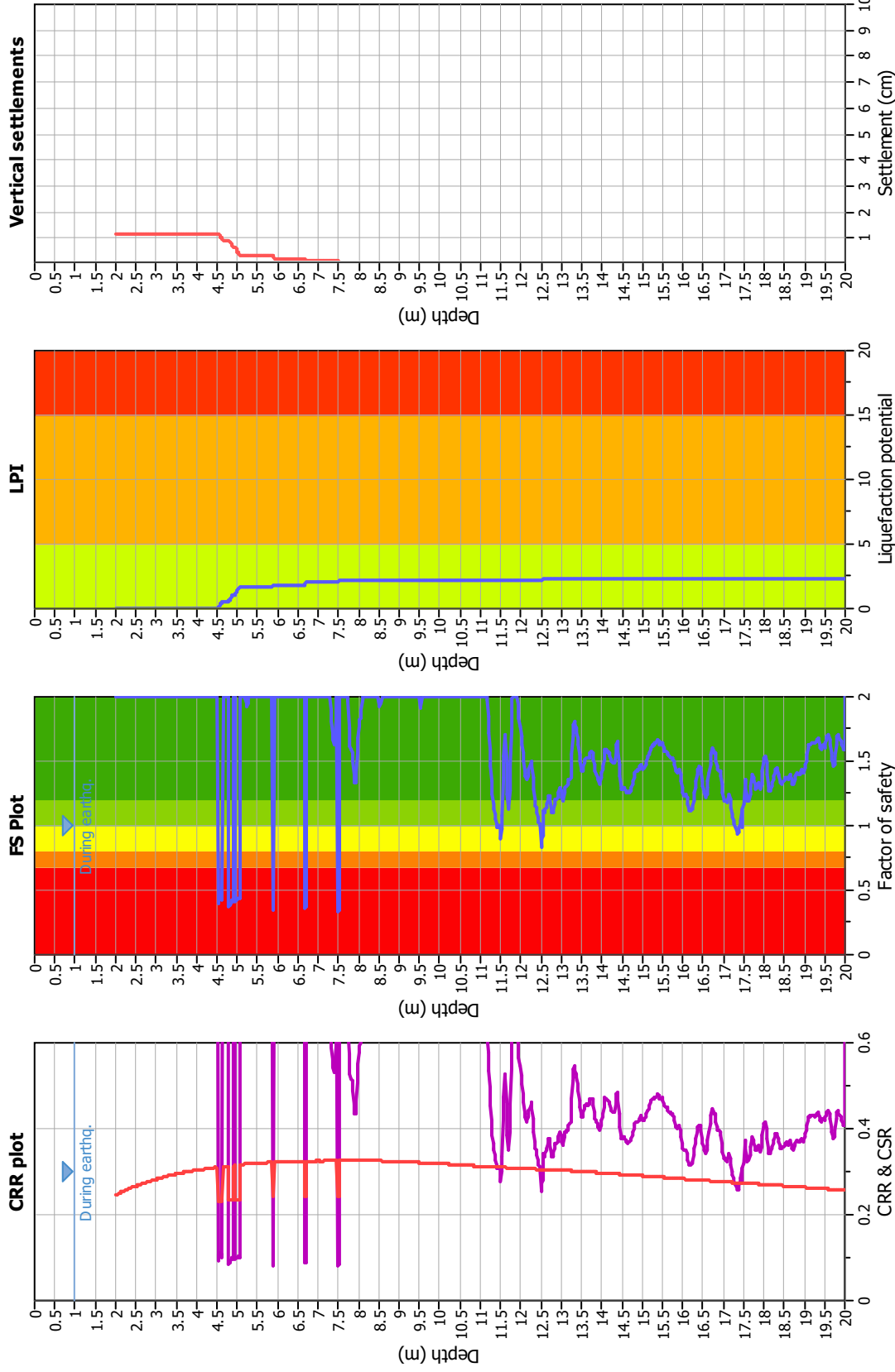
**CPT file : P41CPTU53 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 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  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

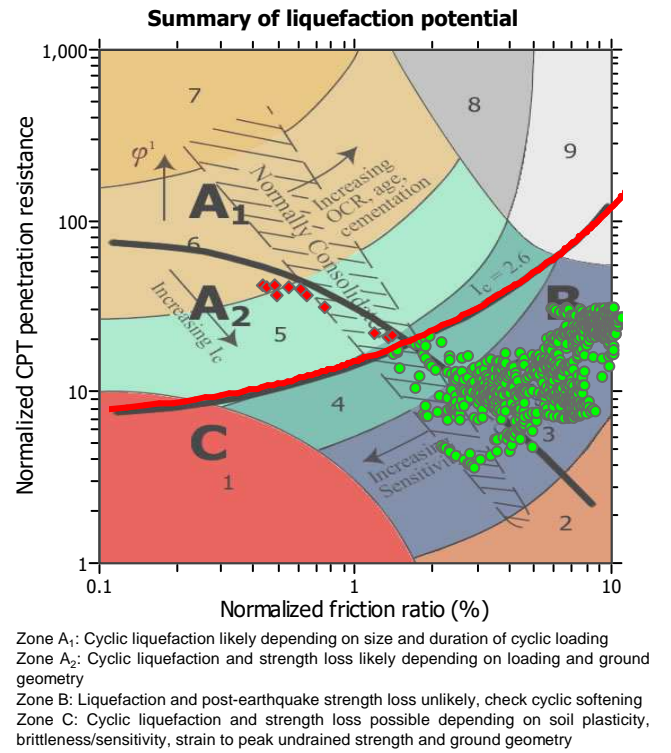
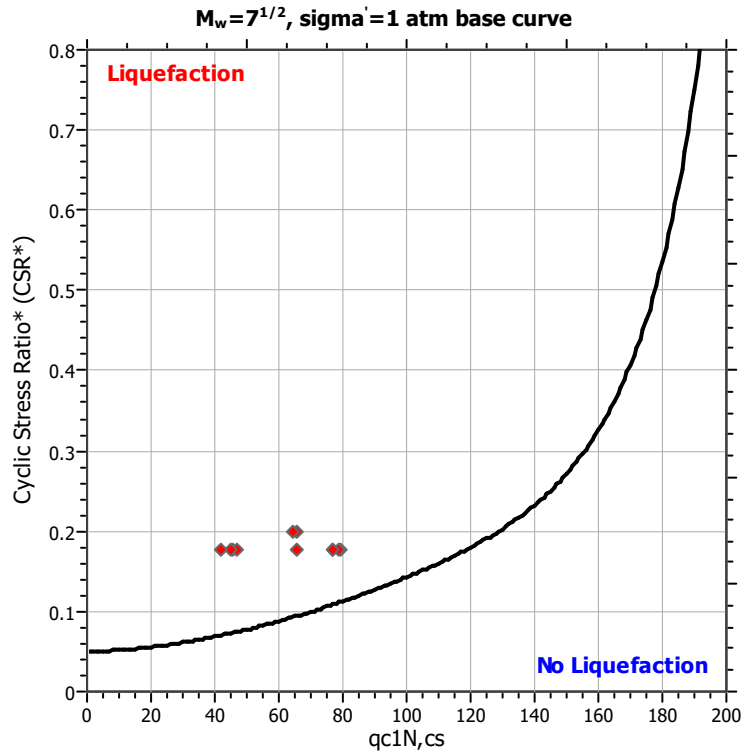
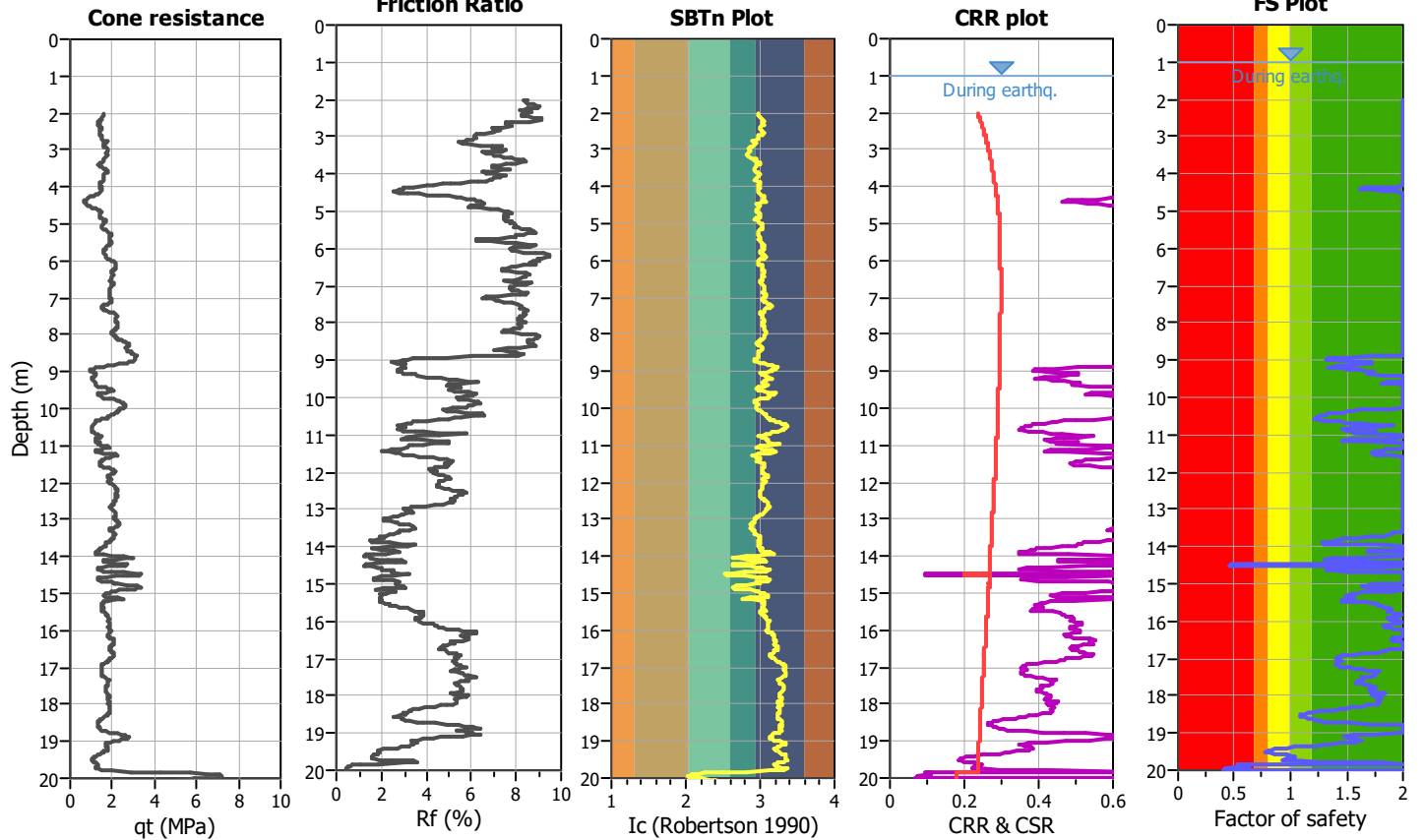
**Project title :**

**Location :**

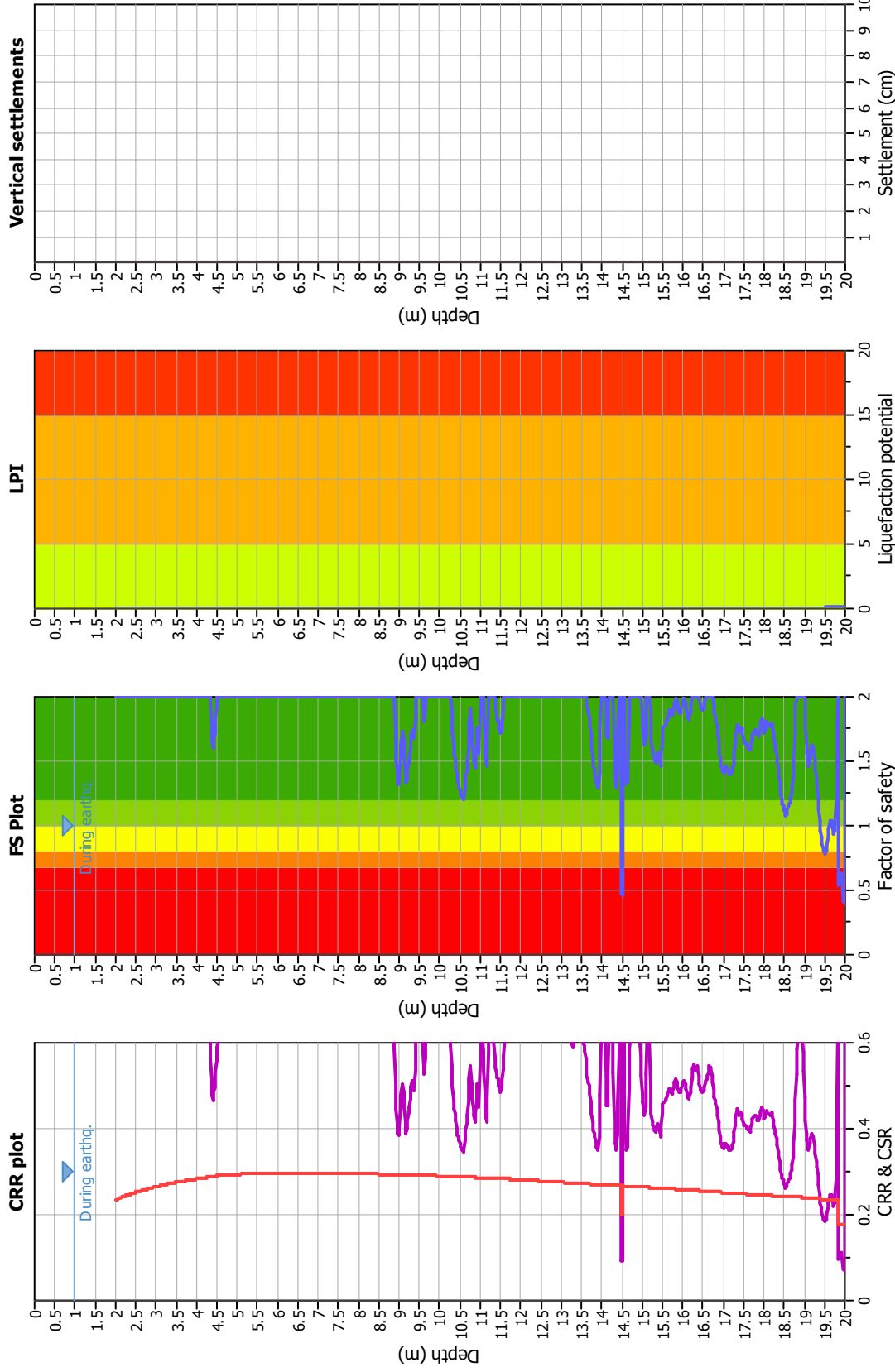
**CPT file : P83CPTU99 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.26	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 2.60 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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  
 $K_v$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 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  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

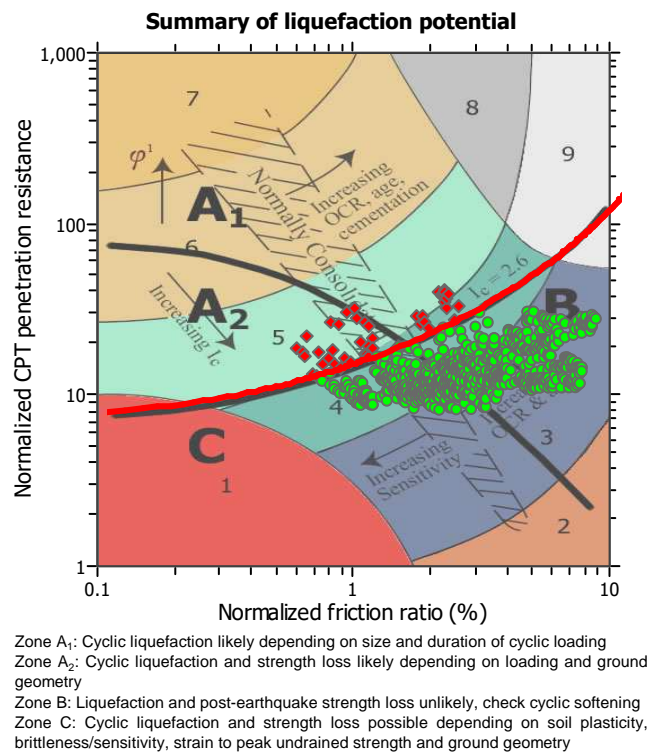
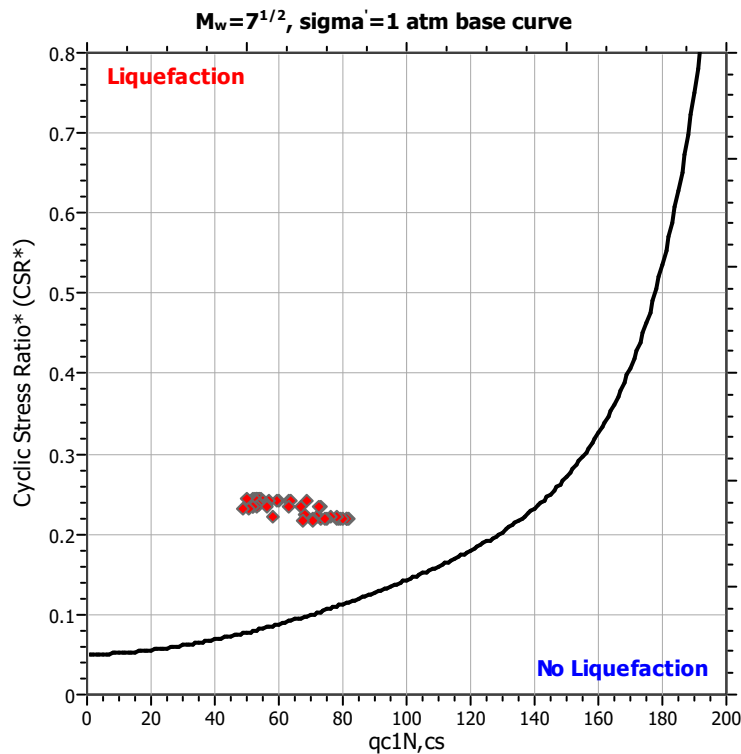
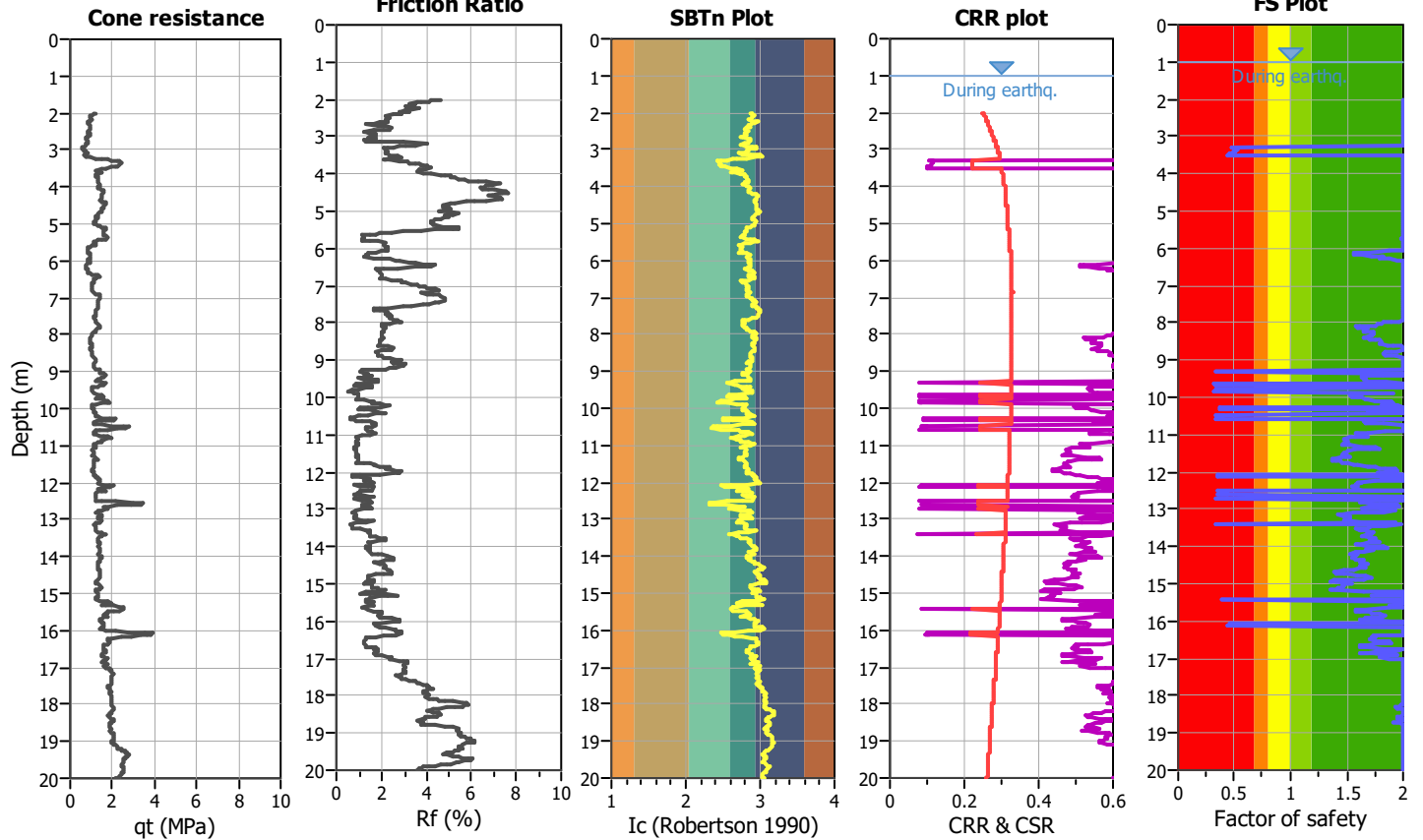
**Project title :**

**Location :**

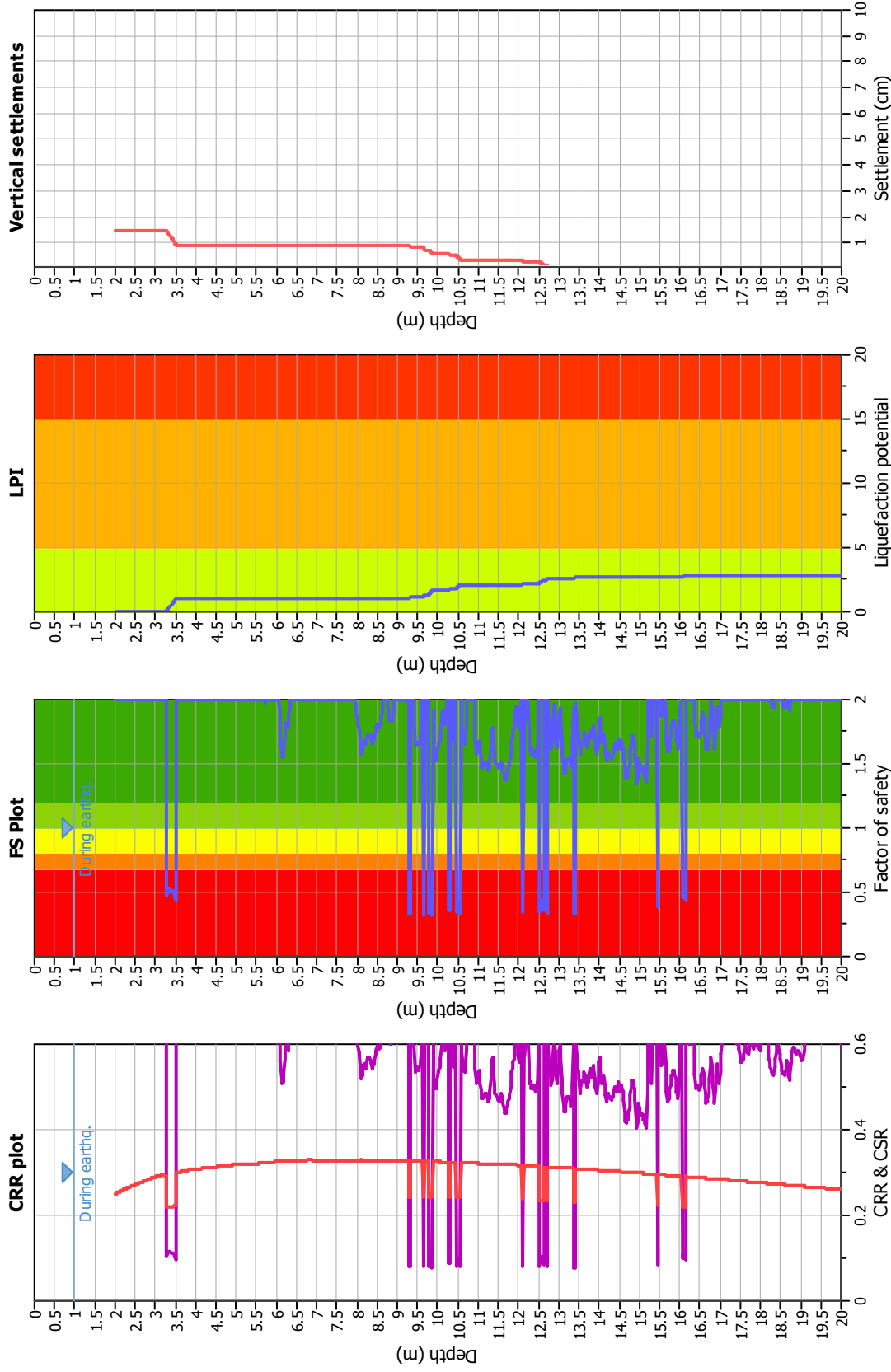
**CPT file : P84CPTU101 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

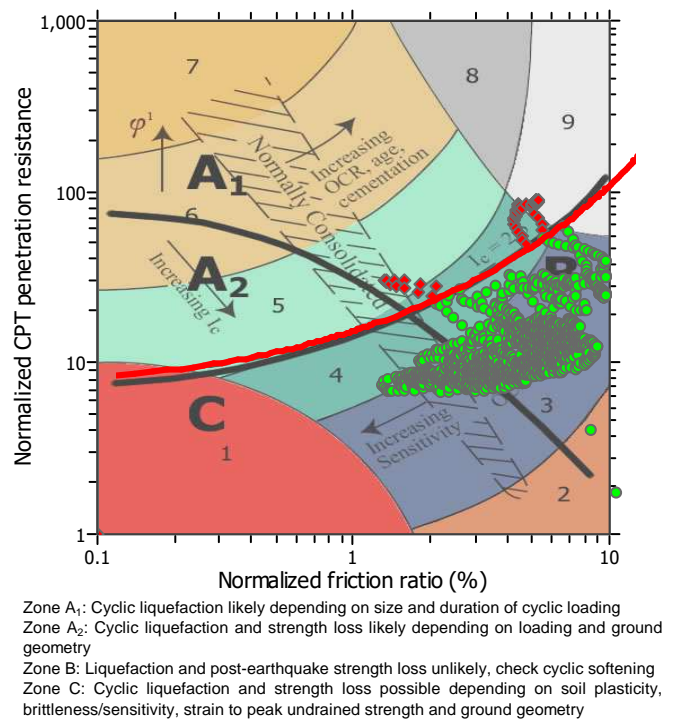
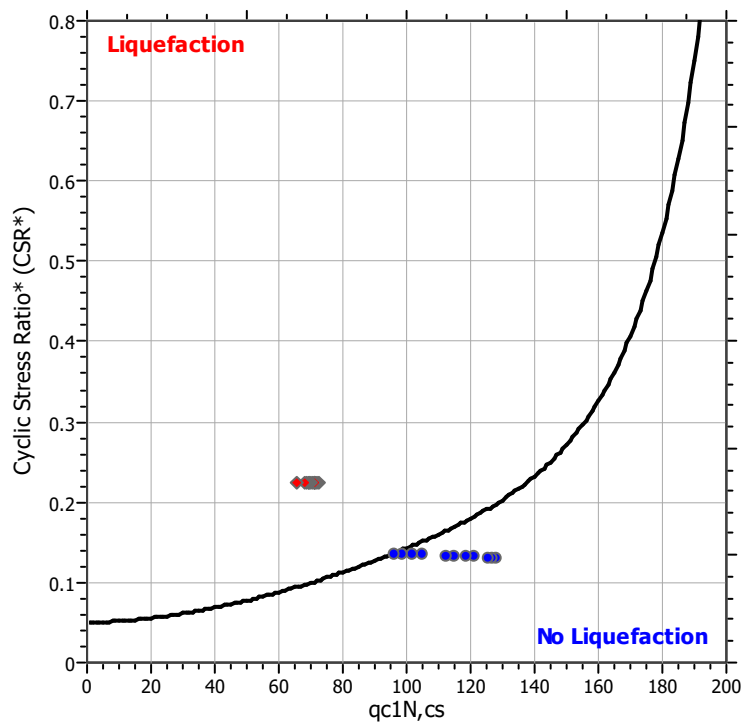
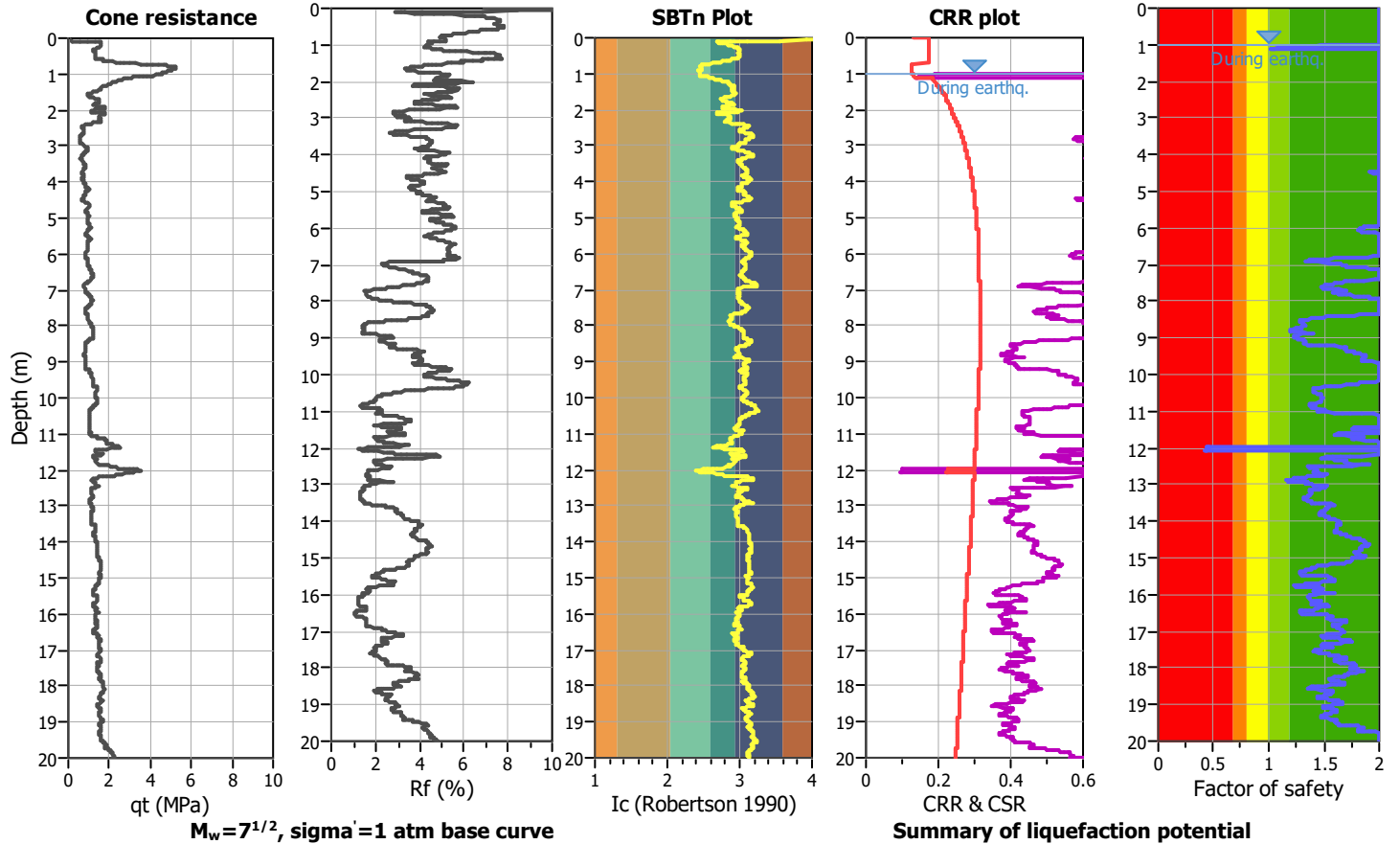
**Project title :**

**Location :**

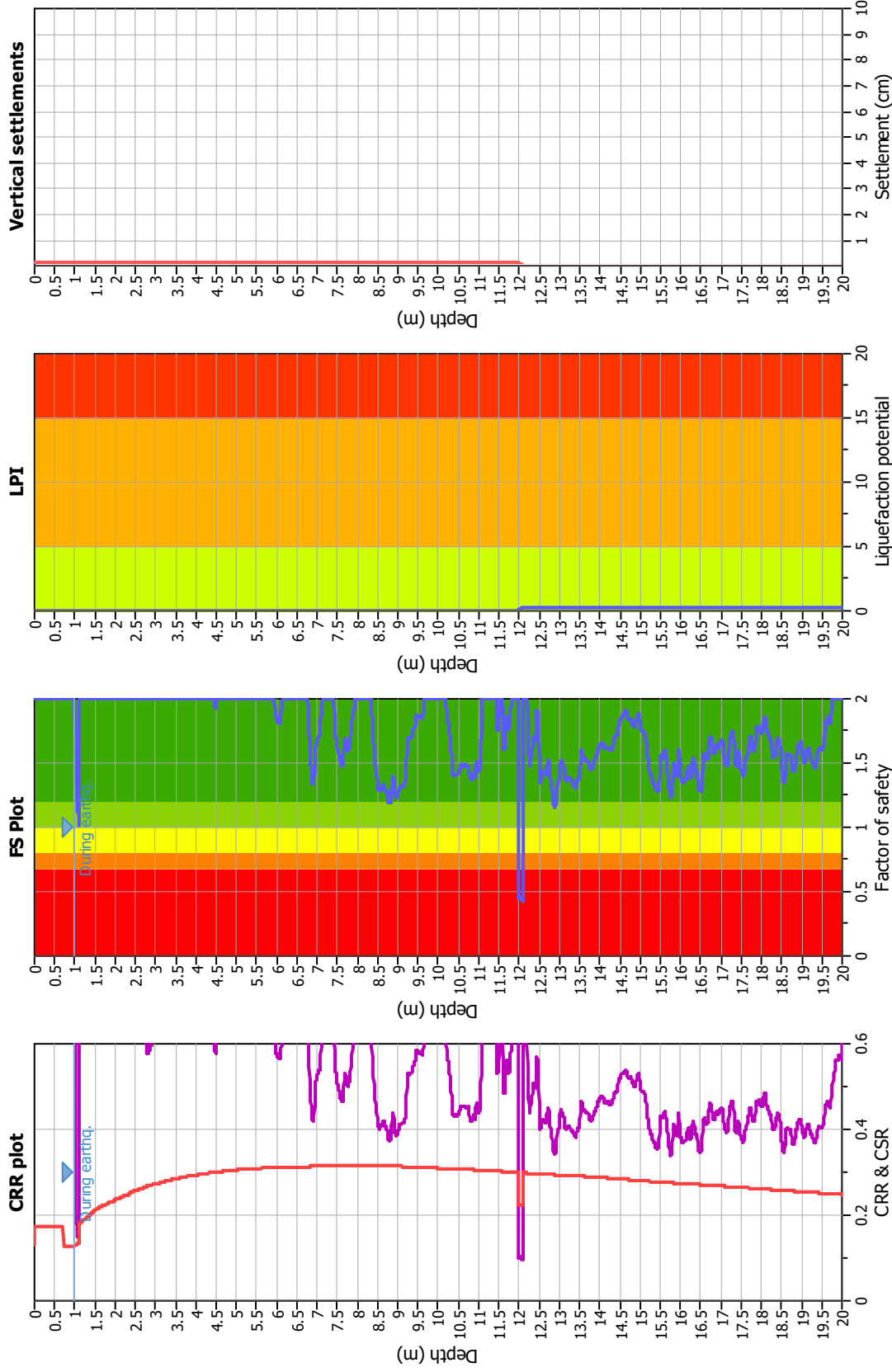
**CPT file : P131CPTU168 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

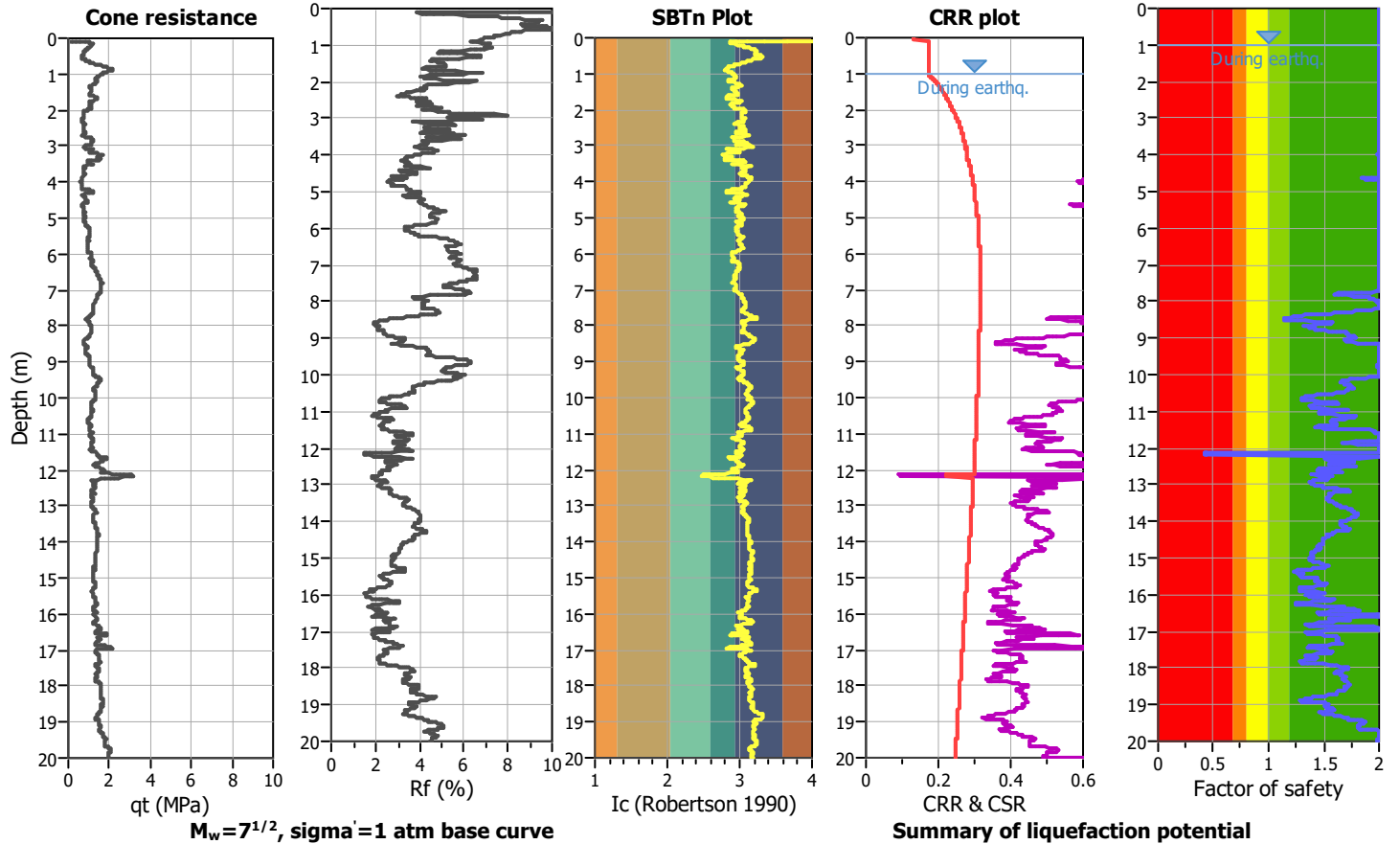
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P132CPTU169 - I&B2008**

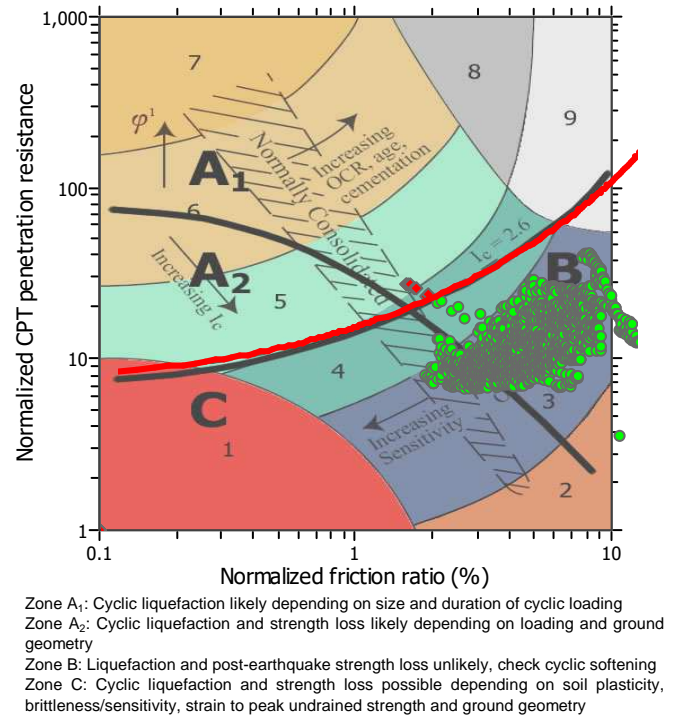
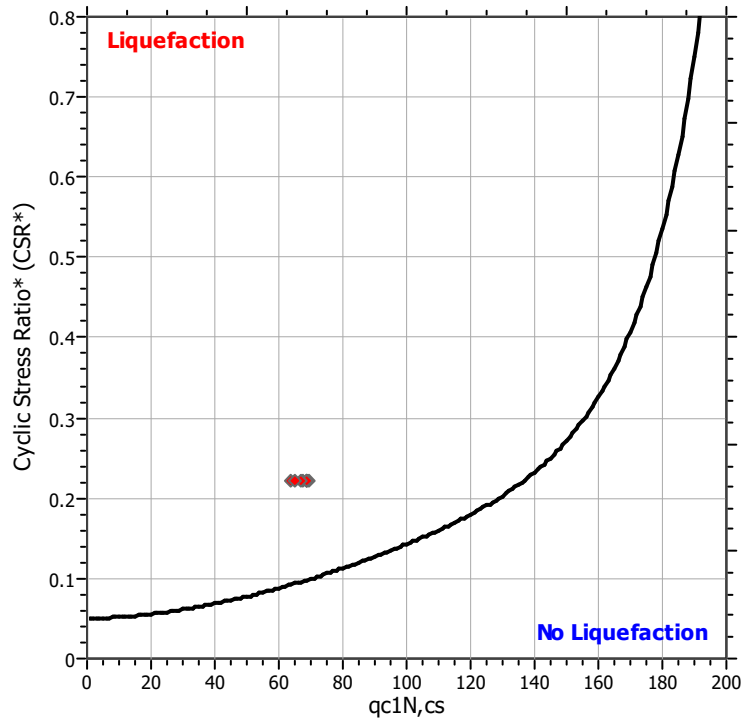
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		

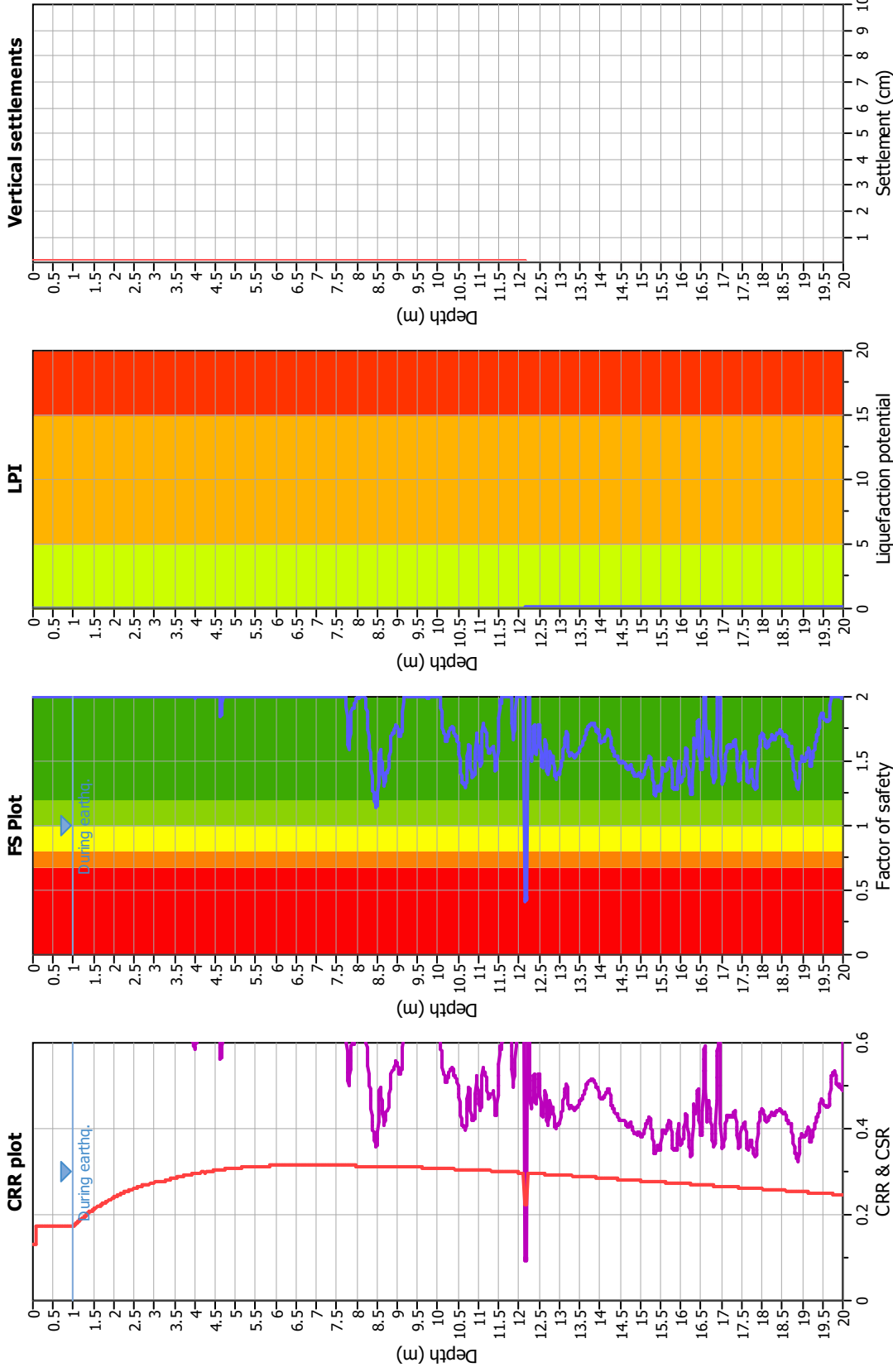


$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



### Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.60 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

### F.S. color scheme

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

### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

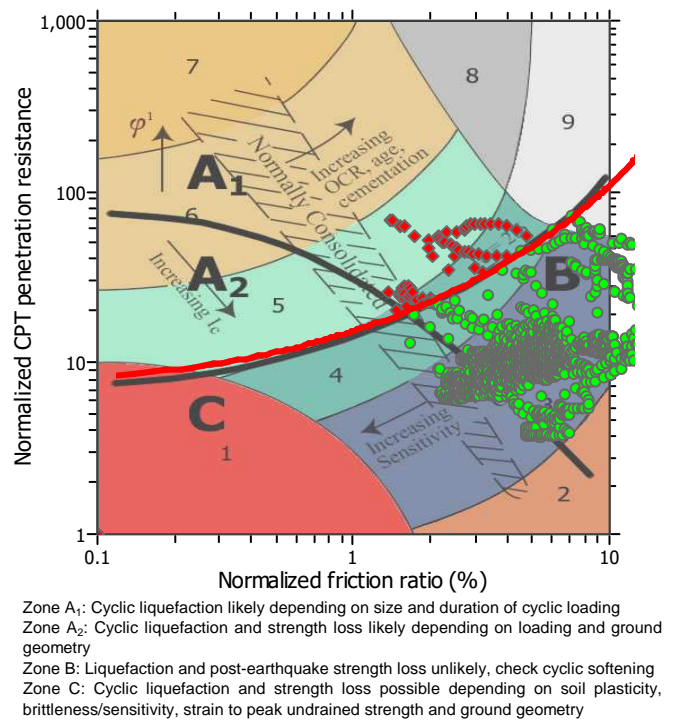
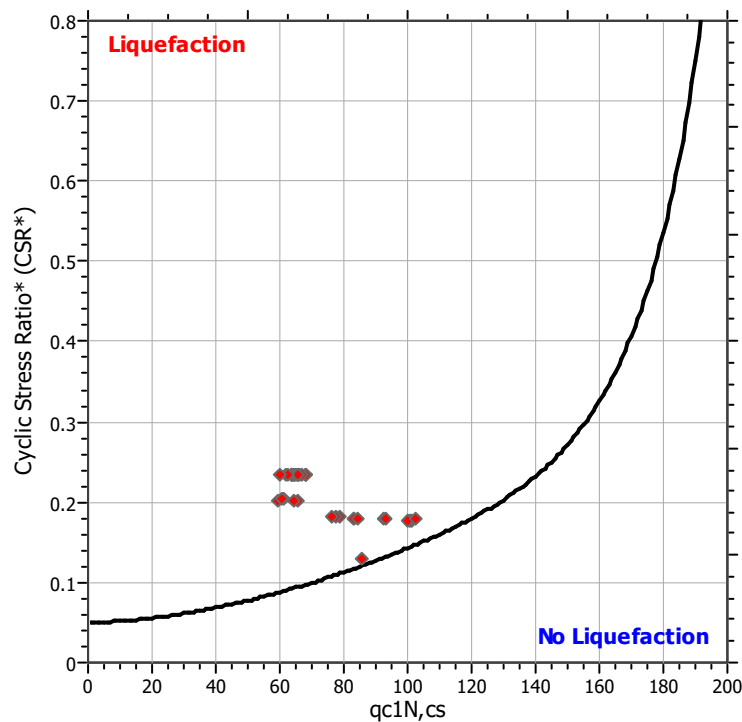
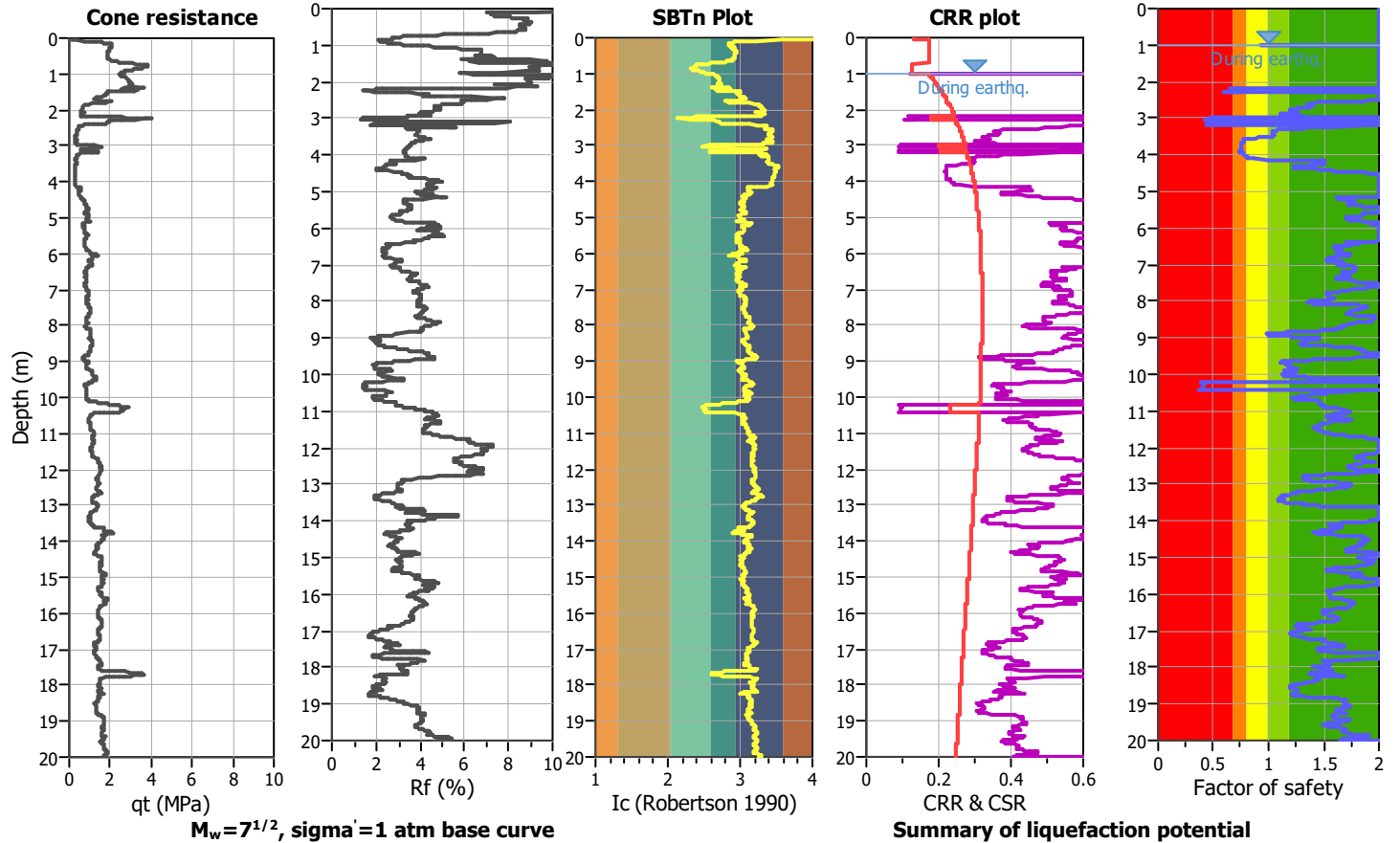
**Project title :**

**Location :**

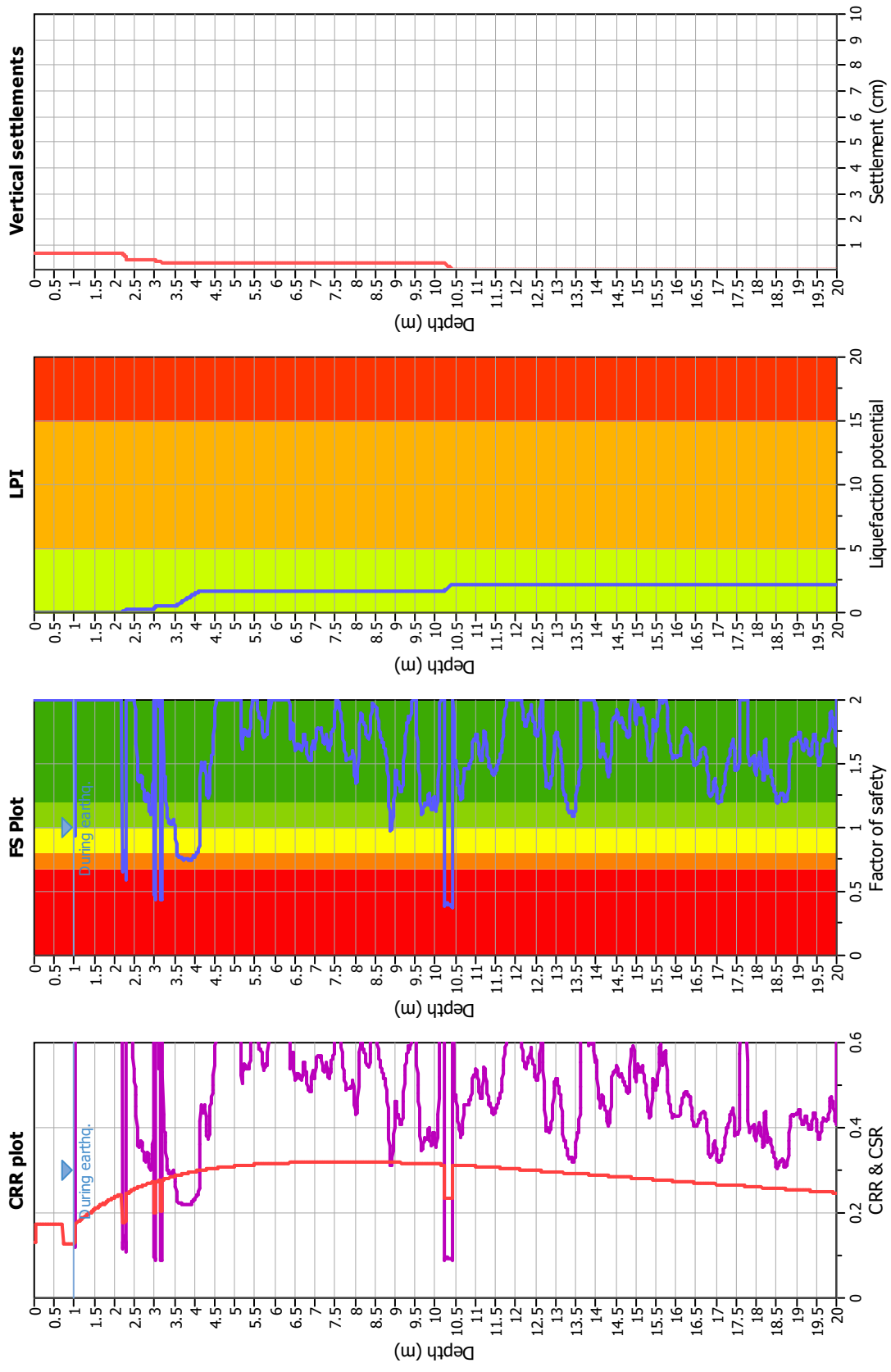
**CPT file : P133CPTU170 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

#### Fill weight:

Transition detect: applied: N/A  
 K<sub>σ</sub> applied: No  
 Clay like behavior applied: Yes  
 Limit depth applied: Sand & Clay  
 Limit depth: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### Depth to GWT (earthq.):

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

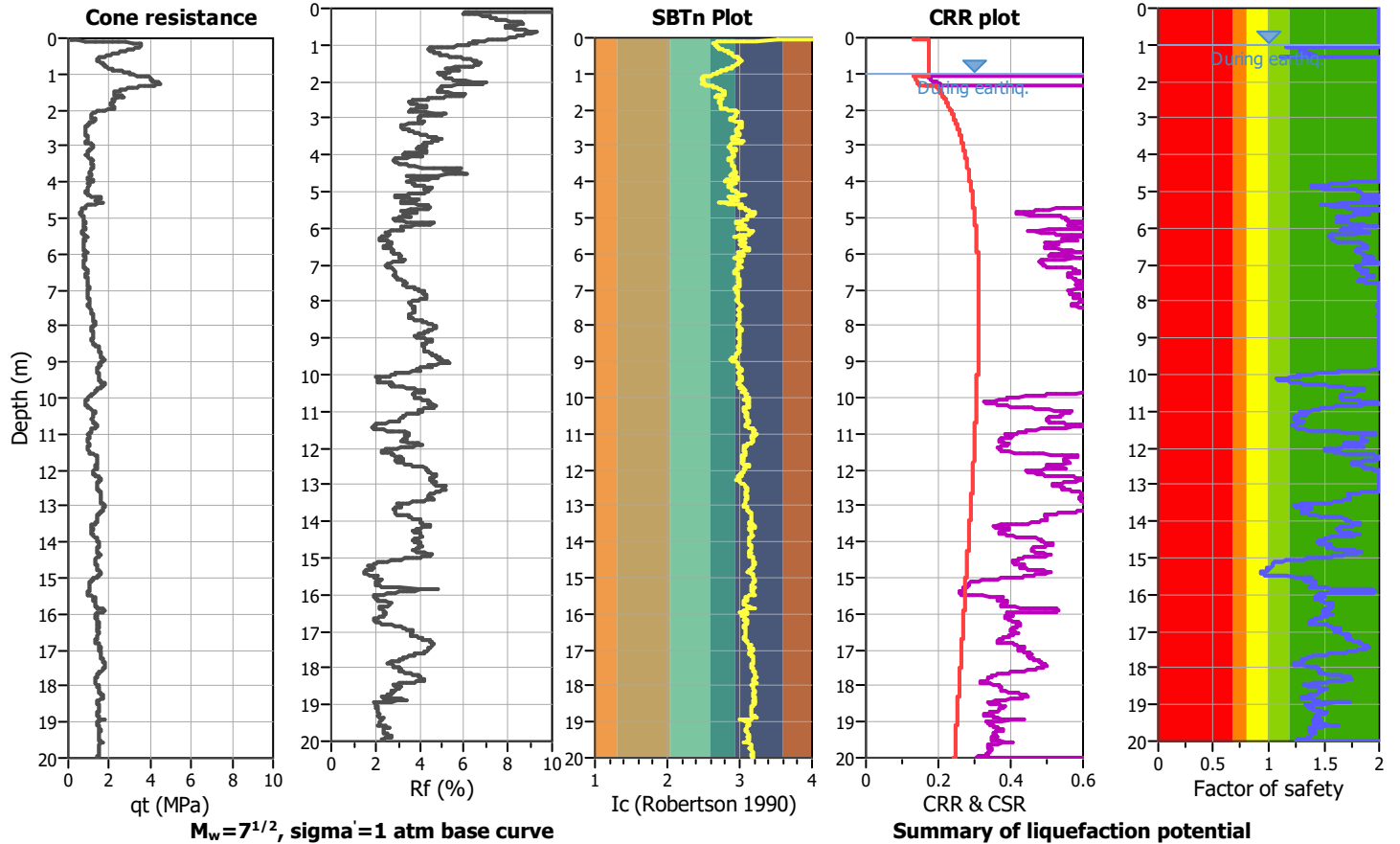
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P134CPTU171 - I&B2008**

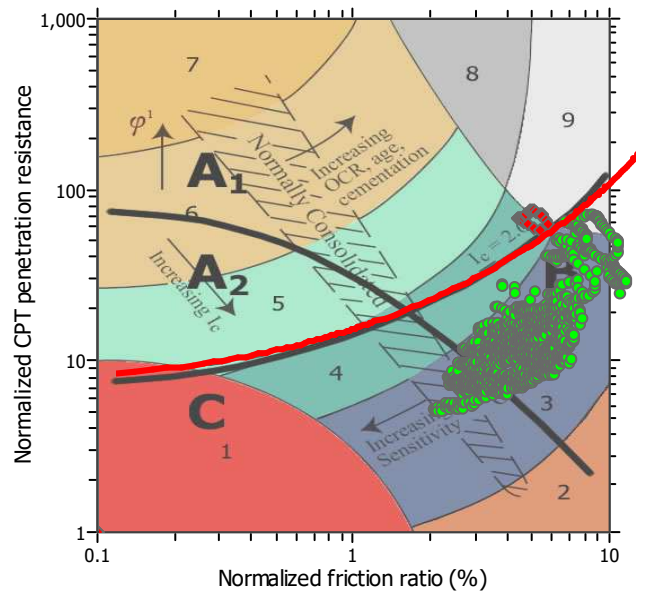
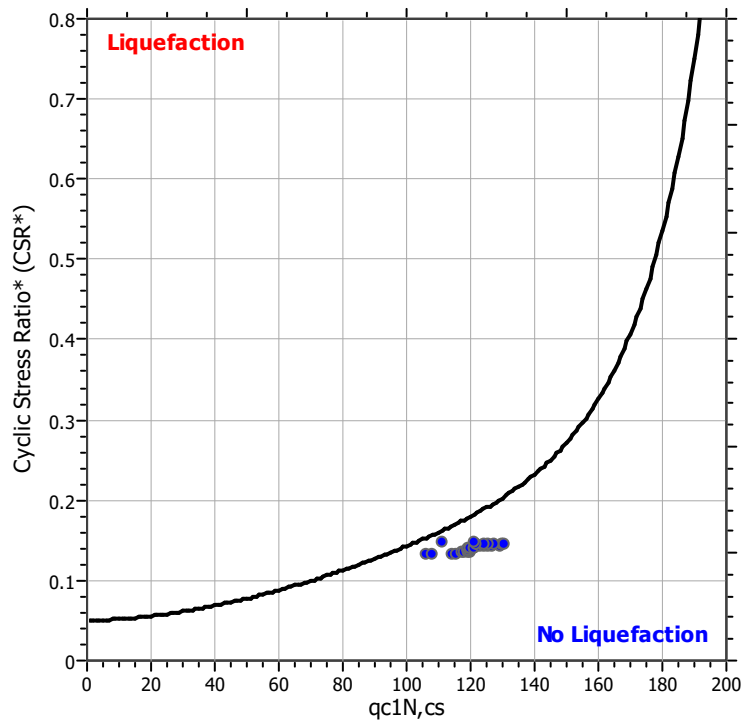
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



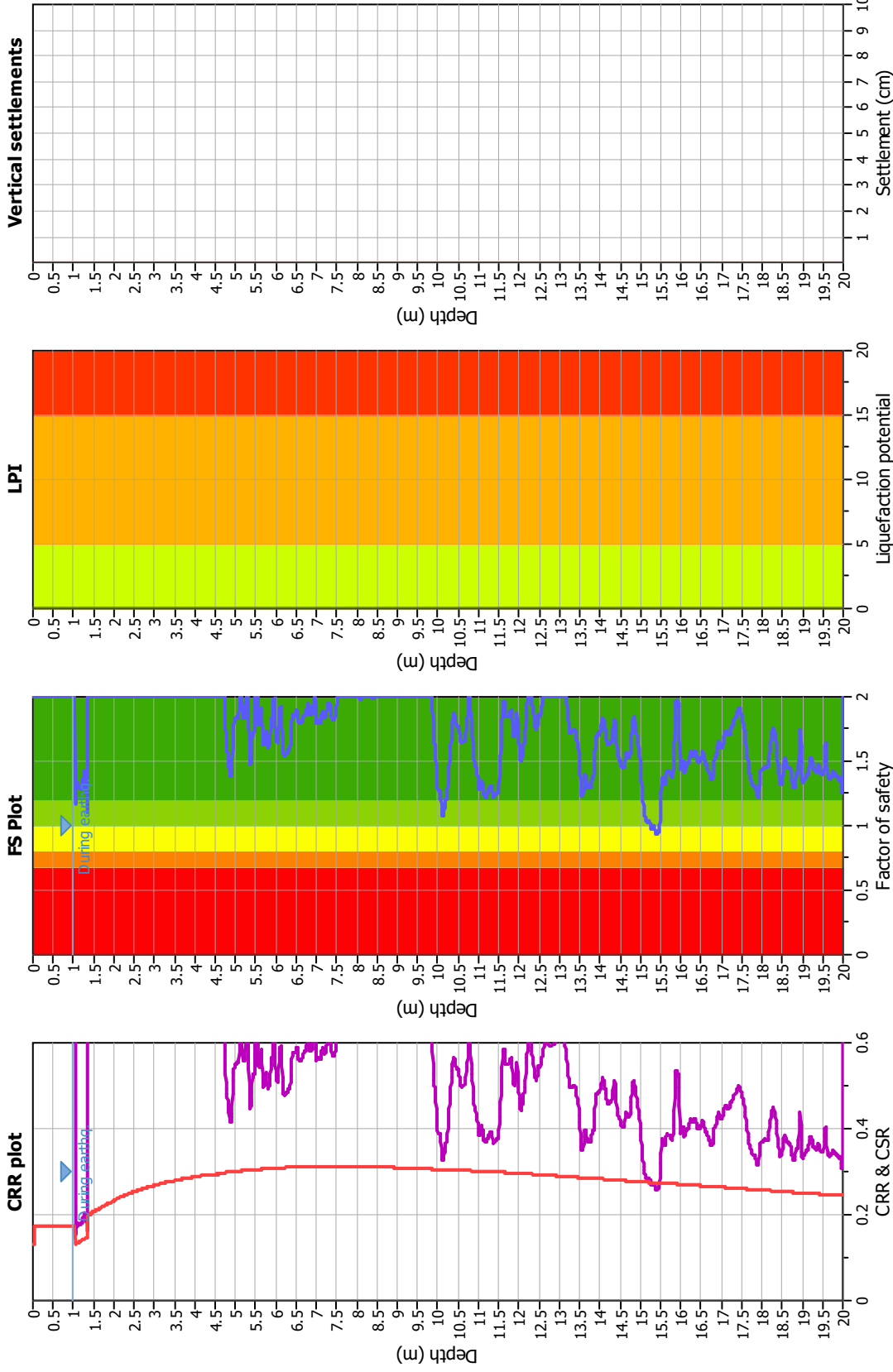
$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 K<sub>s</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A



**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

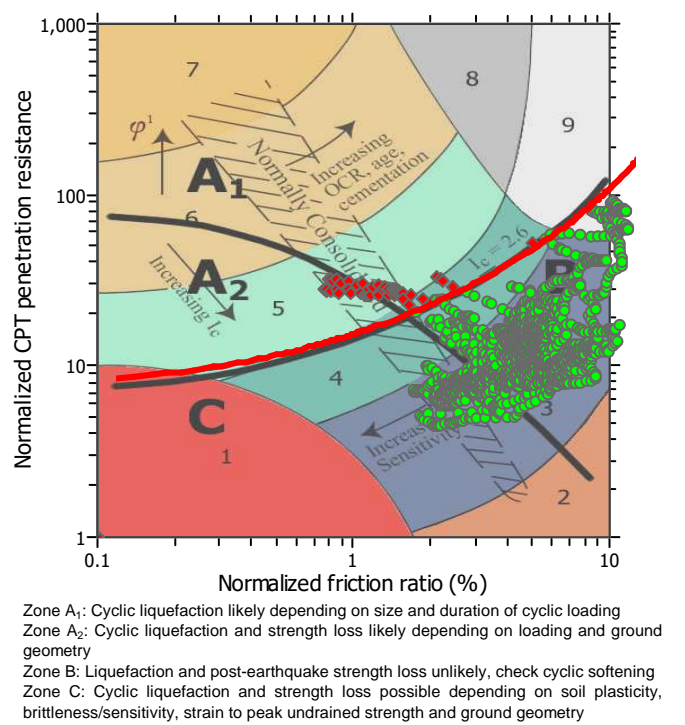
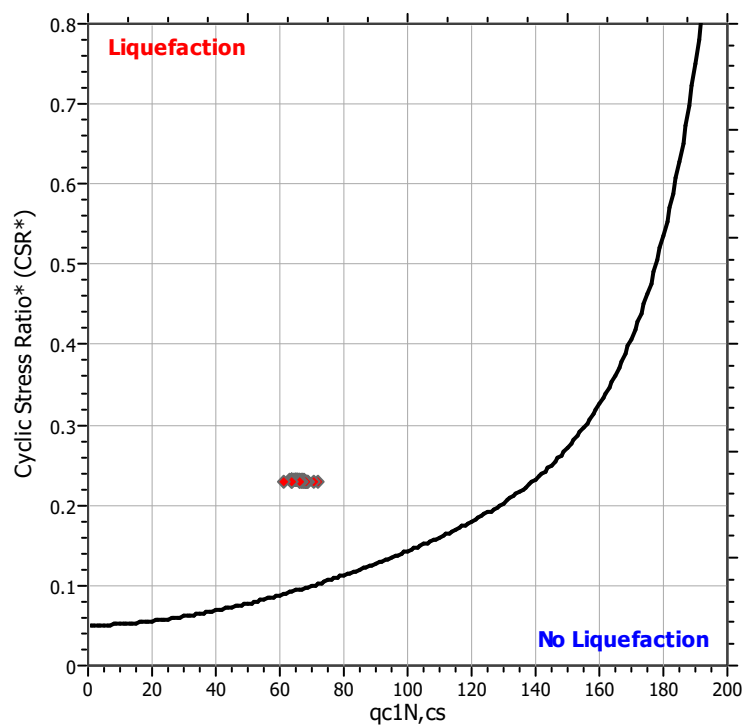
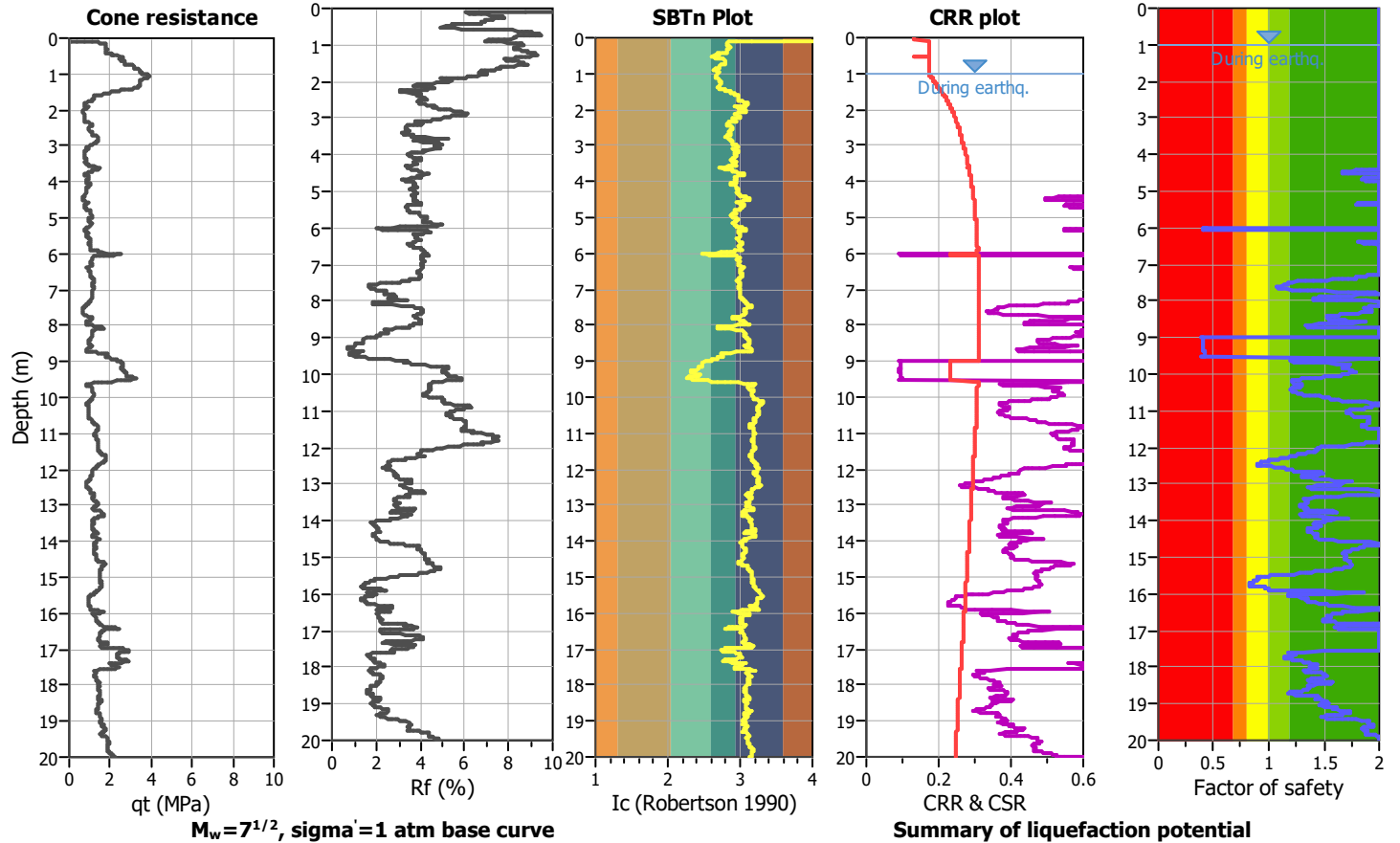
**Project title :**

**Location :**

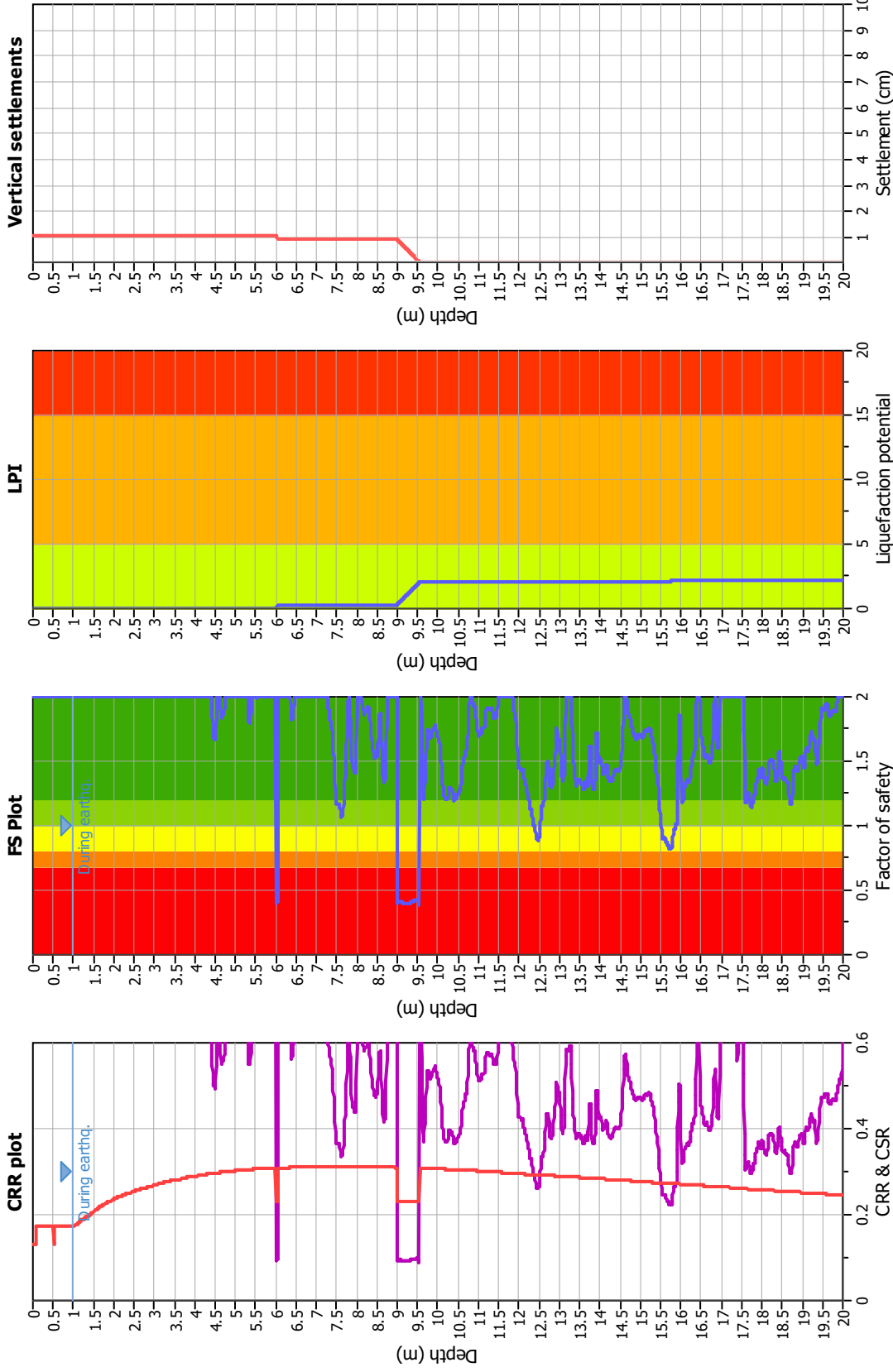
**CPT file : P135CPTU172 - I&B2008**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.05 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 2.05 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

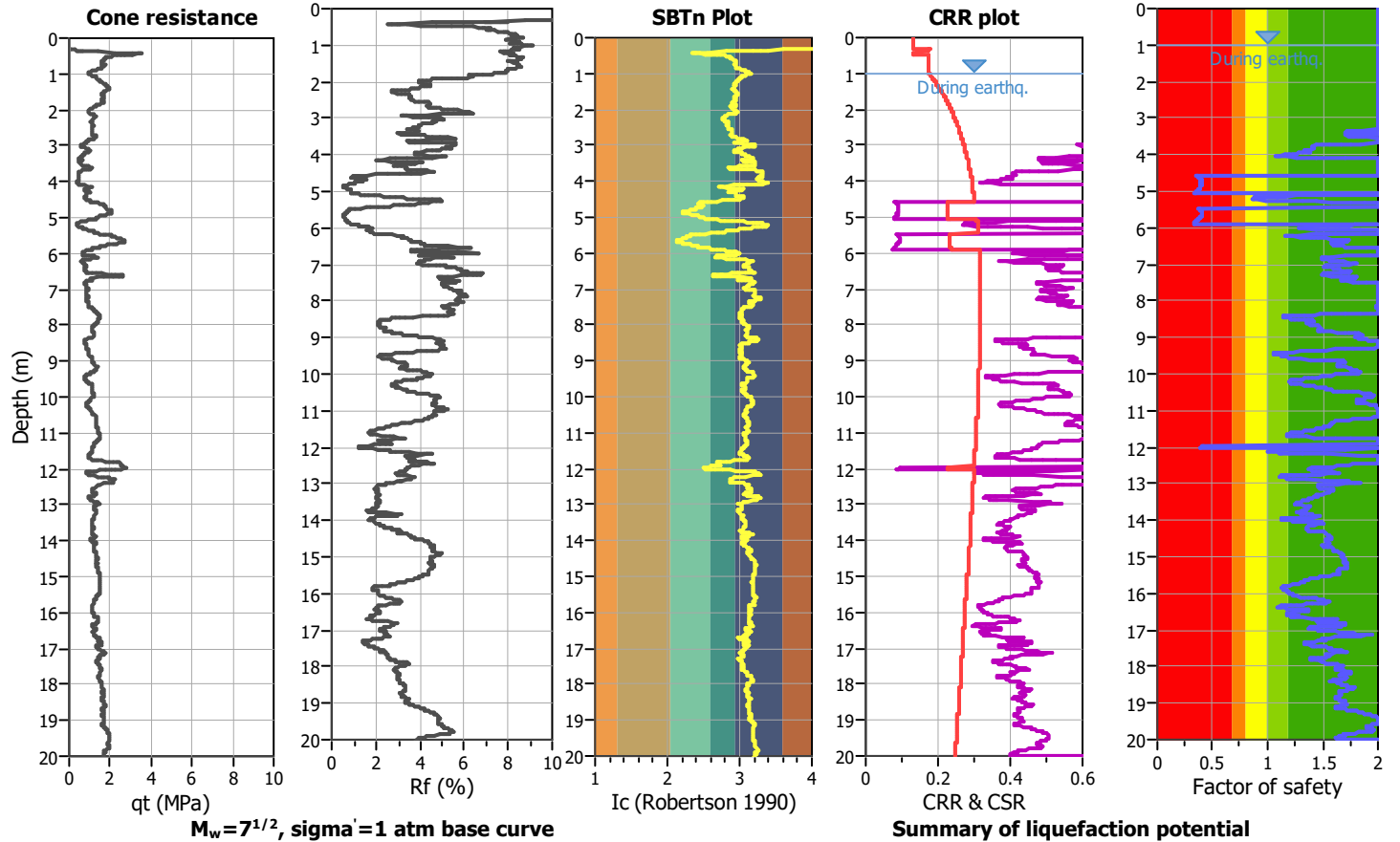
**Project title :**

**Location :**

**CPT file : P136CPTU173 - I&B2008**

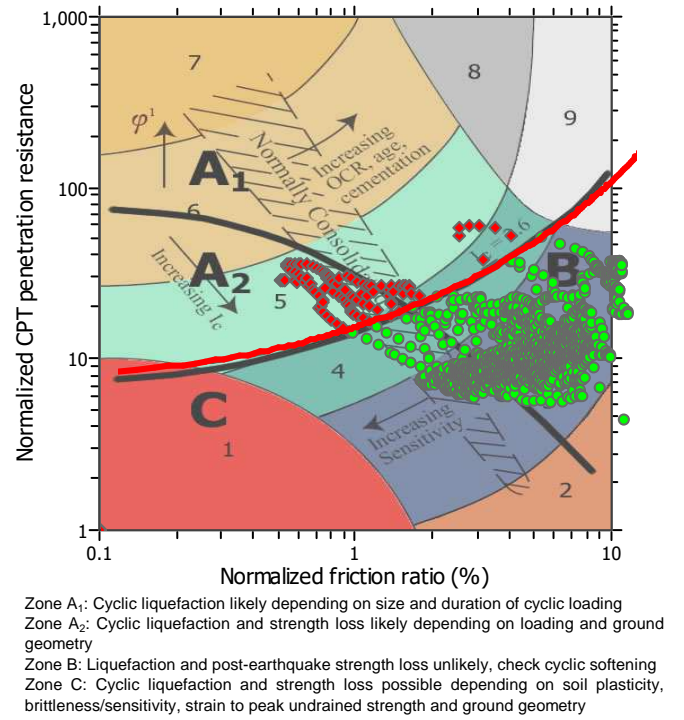
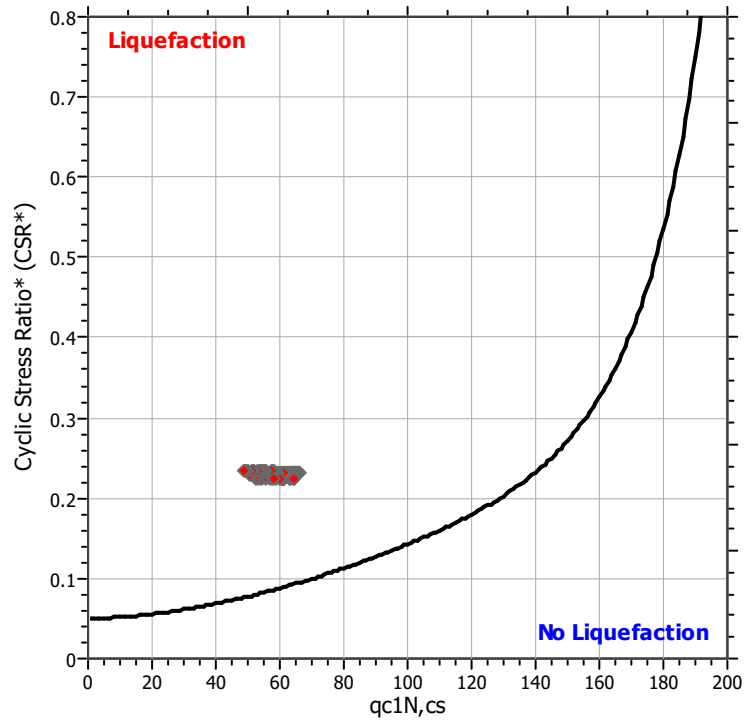
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.26	on:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		

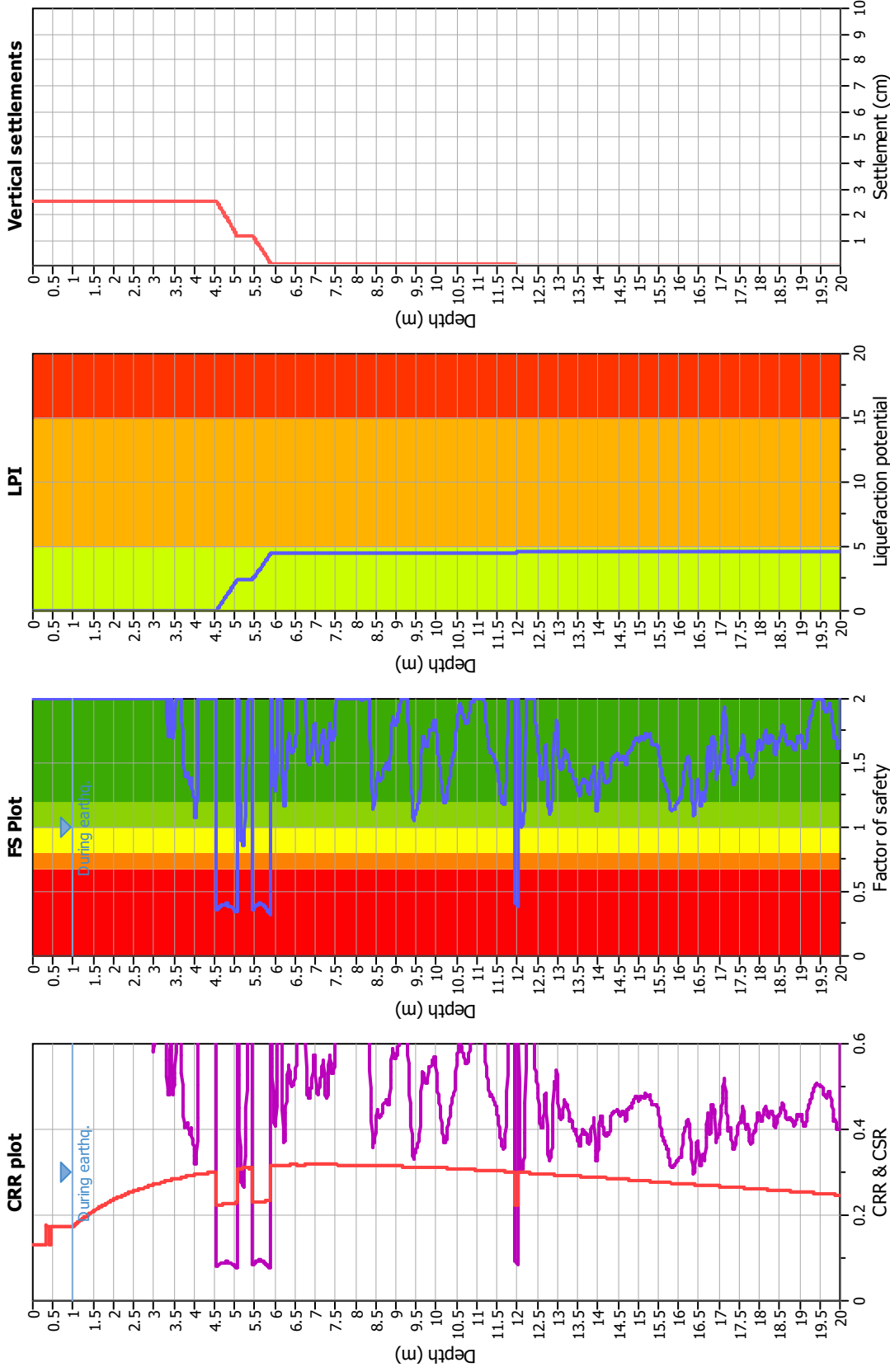


$M_w=7^{1/2}$ ,  $\sigma'_v=1$  atm base curve

**Summary of liquefaction potential**



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)  
 Fines correction method: R&W (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>σ</sub> applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk