



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna  
Comune di Calderara di Reno



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA	STUDIO SAMUEL SANGIORGI Via Valsellustra 32 40060 Dozza (BO)	05/10/2016

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	3
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	8
2.1	Riferimenti bibliografici.....	8
2.2	Sismicità storica.....	9
2.3	Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	11
2.4	Sorgenti sismogeniche.....	12
2.5	Ulteriori elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	14
2.5.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015)</i> .....	14
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	17
3.1	Inquadramento geologico.....	17
3.2	Inquadramento e inquadramento geomorfologico e litologico.....	19
3.3	Subsidenza.....	20
3.4	Scavernamenti.....	21
3.5	Idrogeologia.....	22
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	25
4.1	Dati pregressi.....	25
4.2	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	27
4.2.1	<i>Prove eseguite per lo studio di MS 2013.....</i>	27
4.2.1.1	<i>Prove penetrometriche statiche (CPT).....</i>	27
4.2.1.2	<i>Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW).....</i>	27
4.2.1.3	<i>Misure di microtremore sismico a stazione singola.....</i>	28
4.2.2	<i>Prove eseguite per lo studio di MS 2016.....</i>	29
4.2.3	<i>Le indagini di laboratorio.....</i>	33
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	34
5.1	Litologie sub-affioranti.....	34
5.2	Tetto delle ghiaie, “conoide alluvionale” e sottosuolo profondo.....	35
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	40
6.1	Substrato rigido e la modellazione di RSL.....	40
6.2	Liquefacibilità.....	42
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	44
7.1	Cenni introduttivi.....	44
7.2	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	45
7.3	Gli approfondimenti sulla risposta sismica locale (amplificazioni).....	45

7.3.1	Metodi di calcolo semplificati (abachi) e simulazioni numeriche.....	45
7.3.2	Areale Capoluogo.....	51
7.3.3	Areali ZI “Bargellino”.....	54
7.3.4	Areali Lippo/ZI “San Vitale”/Fabbriera.....	58
7.3.5	Areale Longara.....	61
7.3.6	Areale Castel di Campeggi.....	64
7.3.7	Areali Tavernelle/ZI “Bazzane”/ZI “Via Verde”.....	66
7.3.8	Areale Sacerno.....	70
7.4	Gli approfondimenti nelle “zone di attenzione” per liquefazioni.....	72
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	78
8.1	Carta delle Indagini (Tavola 1).....	78
8.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2).....	78
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	79
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4).....	80
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	81
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 3 (Tavole 6a/b, 7a/b, 8a/b, 9a/b).....	81
9	BIBLIOGRAFIA.....	83

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Contenuti dello studio

L'Amministrazione comunale di Calderara di Reno 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.

Occorre rammentare che il Comune di Calderara di Reno già dispone di uno studio di microzonazione sismica comunale elaborato fino al “livello 2”, redatto nel 2013 dal dr. Geol. G. Tarabusi sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012) della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo “Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica, di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 4007/2012, e decreto del 16 marzo 2012 del capo del Dipartimento della Protezione Civile”.

L'Amministrazione comunale ha affidato allo Studio scrivente l'elaborazione (nelle aree urbanizzate/urbanizzabili) di ulteriori e locali approfondimenti di “livello 3” della microzonazione sismica, 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. 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 (per implementare i nuovi dati disponibili).

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, di estensione areale complessiva pari a 41 Kmq e con una popolazione residente di circa 13.200 abitanti.

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

## 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”.

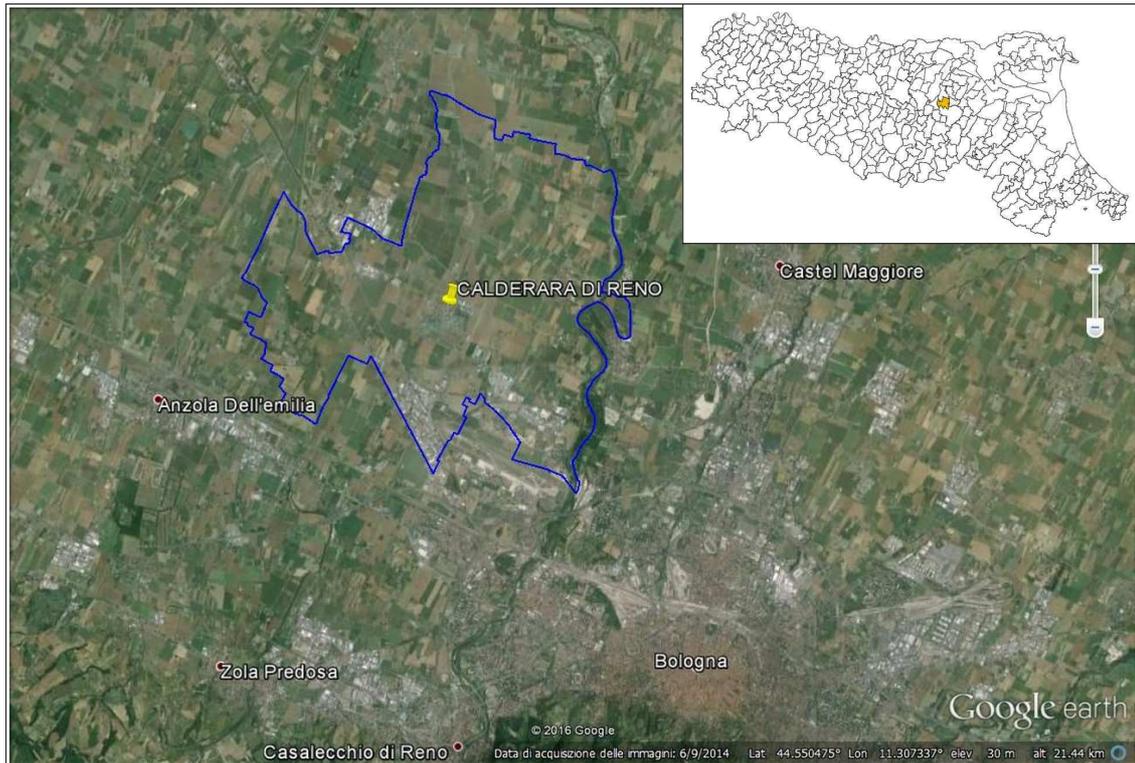


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di Calderara di Reno (da: “Google Earth”)

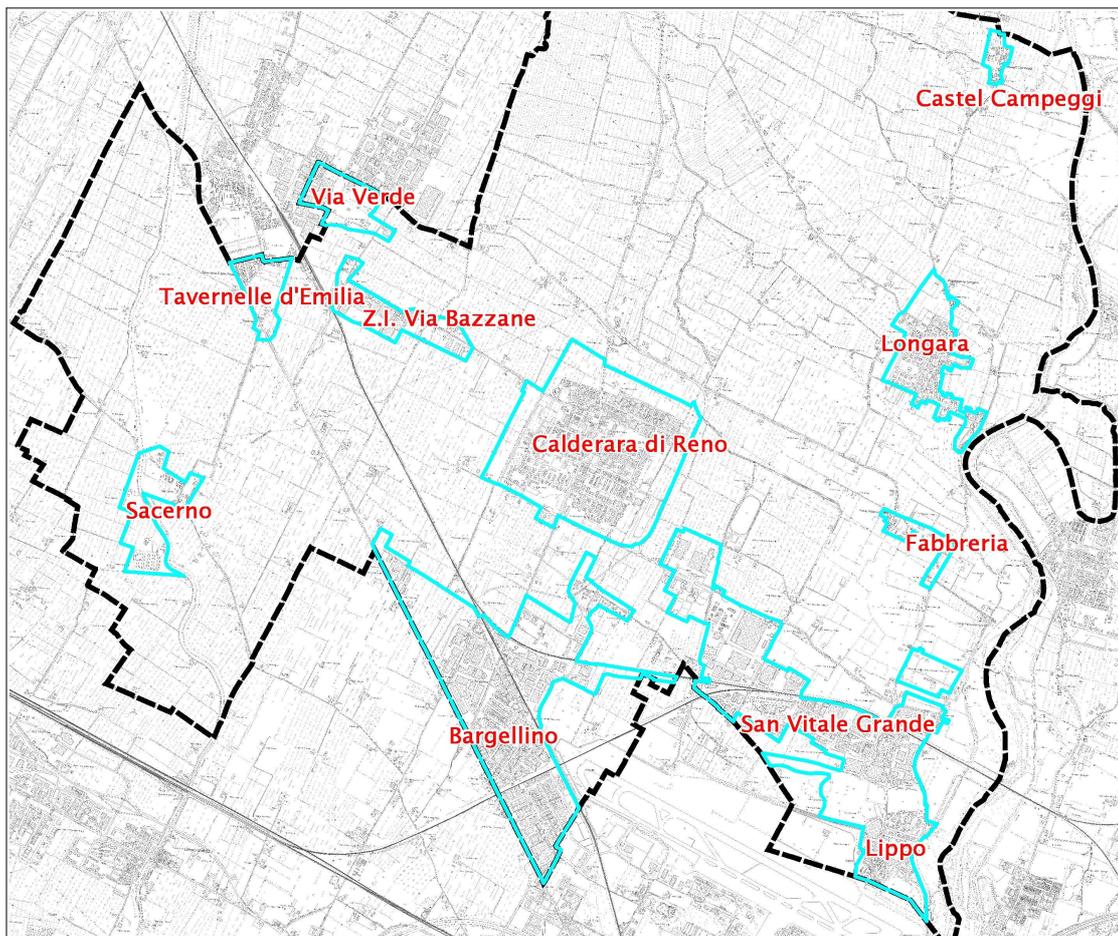


Figura 1.2 – Localizzazione delle aree oggetto di microzonazione (su base topografica alla scala 1:25.000 della Regione Emilia-Romagna)

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 Calderara di Reno già dispone di uno studio di MS di “livello 2” elaborato dal dr. Geol. G. Tarabusi<sup>1</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 2012 (standard v.2.0).

### 1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati aggiornati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Calderara di Reno 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

---

<sup>1</sup> Microzonazione sismica di “livello 2” del Comune di Calderara di Reno (OPCM n. 4007/2012), già certificato dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica.

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 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile);
- le 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	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4	1:10.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FA_{PGA}$	Tavola 6a/b	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,1-0,5}$	Tavola 7a/b	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,5-1,0}$	Tavola 8a/b	1:5.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – $FH_{0,5-1,5}$	Tavola 9a/b	1:5.000

*Tabella 1.1 - Elaborati cartografici aggiornati per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Calderara di Reno*

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 i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala

1.5.000), aggiornata al 2013. 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 *Mappa 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 (ag) 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

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta solo sei eventi (figura 2.1), con risentimenti non significativi nel territorio di Calderara di Reno (risultano associate intensità massime <3). La scarsità di dati è chiaramente imputabile alla mancanza o al non reperimento di fonti storiche relative all'area di Calderara di Reno.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1896	12	08	17	06	4	Sestola	26	5	4.33
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
NF	2000	05	10	16	52	1	Faentino	151	5-6	4.82
3	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
NF	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30

Figura 2.1- Terremoti significativi per il Comune di Calderara di Reno e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

Sono tuttavia reperibili altre informazioni, in particolare, riprendendo quanto già riportato nella Relazione di MS di "livello 2" (G. Tarabusi, 2013), il terremoto più forte e più prossimo all'area in esame, secondo quanto riportato nel CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), risulta essere quello del 3 gennaio 1505, il secondo di una sequenza con 3 scosse principali, con intensità epicentrale valutata del grado VIII della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.6. In figura 2.1 è rappresentata la mappa degli effetti del terremoto dai dati CFTI4Med in rapporto al perimetro comunale di Calderara di Reno, che si colloca in un'area con effetti compresi tra i gradi VII e VIII della scala MCS.

Per la sequenza sismica del 1504-1505, il catalogo CFTI4Med riporta la seguente sintesi degli effetti principali:

*Questa sequenza sismica cominciò il 31 dicembre 1504 e si protrasse per quasi cinque mesi, fino a oltre la metà di maggio 1505. Interessò soprattutto Bologna e la vicina area pedeappenninica dove i danni furono rilevanti.*

*Le scosse più forti furono tre: la prima avvenne il 31 dicembre 1504 alle ore 4:00 GMT circa (le 11 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna la scossa fece cadere numerosi comignoli e causò lesioni nelle volte di vari edifici, fra cui la chiesa di S.Francesco; la chiesa di S.Giacomo subì danni anche alla facciata. A Modena fu molto forte e fece cadere qualche comignolo.*

*La scossa più forte della sequenza avvenne il 3 gennaio 1505 alle ore 2:00 GMT circa (le 9 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna ci furono gravi danni alle abitazioni e agli edifici pubblici, civili e religiosi. Le case crollate totalmente furono poche, ma molte abitazioni subirono danni diffusi. La parte dell'area urbana più colpita fu quella verso la pianura, compresa tra porta S.Donato e porta S.Isaia. Risultarono danneggiati soprattutto gli edifici "a volta" (come le chiese e i palazzi), e la parte*

*più alta di numerose torri, tanto che alcune dovettero essere abbattute o abbassate per evitarne il crollo sugli edifici vicini. Nel palazzo Bentivoglio, uno dei più danneggiati, crollarono la facciata, la sala grande, cinque volte del portico e il "torresino" della vicina torre collegata al palazzo; varie stanze risultarono inoltre lesionate e tutto l'edificio sconnesso e indebolito. Più in ombra, dal punto di vista degli effetti, rimane l'area extraurbana, a cui le fonti dedicano scarsa attenzione: a Confortino, Bentivoglio e Rigosa subirono gravi danni gli edifici di proprietà della famiglia Bentivoglio; a San Lorenzo in Collina e Zola Predosa il terremoto causò lesioni nelle case e il crollo di colombaie. Ci furono danni leggeri a Ferrara, Modena, Reggio nell'Emilia. La scossa fu sentita a Firenze, Forlì, Venezia, Verona, Vicenza, e in molte altre località.*



Figura 2.2 – Effetti della scossa del 3 gennaio 1505 da dati CFTI4Med. Con la linea rossa è rappresentato il perimetro del comune di Calderara di Reno.

*Un'altra scossa molto forte avvenne il 20 gennaio, alle ore 23:50 GMT circa (le 7 della notte in orario "all'italiana"). A Bologna si aggravarono i danni alle volte di alcuni edifici, fra cui la cattedrale di S.Pietro, le chiese di S.Petronio e S.Martino, la torre del palazzo del Podestà e l'ospedale di S.Maria della Vita. Questa scossa fu sentita in un'area estesa da Forlì e Faenza, a Venezia e Verona.*

In generale, per uno studio approfondito degli effetti degli eventi sismici nel territorio bolognese è opportuno riferirsi al volume I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo (Boschi e Guidoboni, 2003), dal cui studio sono stati in seguito sintetizzati i dati del

CFTI4Med. In figura 2 è riportato il grafico della cronologia dei terremoti noti con effetti di danno nell'area di Bologna.

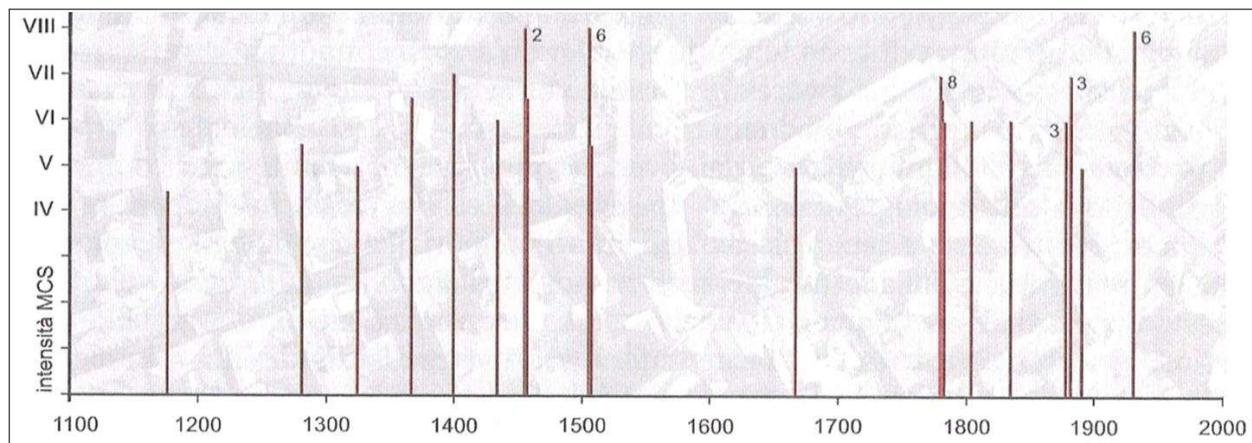


Figura 2.3- Cronologia e intensità epicentrale dei 38 terremoti noti per l'area di Bologna tra il XII e il XX secolo con effetti locali superiori o uguali al grado V-VI MCS (da Boschi e Guidoboni, 2003)

Oltre al già citato evento del gennaio 1505, altri due terremoti hanno prodotto effetti pari al grado VIII della scala MCS in area Bolognese e sono la scossa del 6 febbraio 1455 (localizzata in modo assai incerto nella Media Valle del Reno, all'altezza di Marzabotto) e quella del 20 aprile 1929, localizzata tra i comuni di Monteveglio e Monte San Pietro, una decina di chilometri a sud-ovest del comune di Calderara di Reno.

Viene di seguito riportato un estratto della sintesi degli effetti principali proposta dal catalogo CFTI4Med per la sequenza sismica del 1929:

*La sequenza sismica del 1929, caratterizzata da quasi 100 scosse, cominciò il 10 aprile 1929 e si protrasse fino all'ottobre successivo. Gli eventi di maggiore intensità furono sei e avvennero nell'intervallo di un mese: il 10 aprile (ore 5:43:12 GMT), il 19 aprile (4:15:22 GMT), il 20 aprile (1:09:46 GMT), il 22 aprile (8:25:33 GMT), il 29 aprile (18:35:59 GMT) e l'11 maggio (19:22:48 GMT). [...]. La terza scossa, avvenuta il 20 aprile, fu la più forte di tutta la sequenza: causò danni in oltre 600 siti su un'area di 680 kmq del pedeappennino fra i fiumi Reno e Samoggia e fu sentita in tutta l'Italia centrosettentrionale fino alla Toscana e alle Marche, su un'area di circa 150.000 kmq. I danni maggiori, consistenti in crolli parziali e gravi dissesti strutturali, colpirono alcune località dei comuni di Monte San Pietro e Zola Predosa. Negli altri siti le tipologie di danno più diffuse furono: strapiombi di muri, lesioni più o meno gravi ai muri e agli architravi di porte e finestre, dissesti ai tetti e ai pavimenti, caduta di comignoli. [...]*

### 2.3 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana<sup>2</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

<sup>2</sup> Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

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).

I maggiori effetti locali riscontrati sono risultati amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po<sup>3</sup>. In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g.

La figura 2.4 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) non riporta intensità macrosismiche riferibili al sisma emiliano 2012 in quanto i rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano, per la provincia di Bologna, solo le località più settentrionali e non è quindi attribuito alcun valore di intensità al sito nel comune di Calderara di Reno.

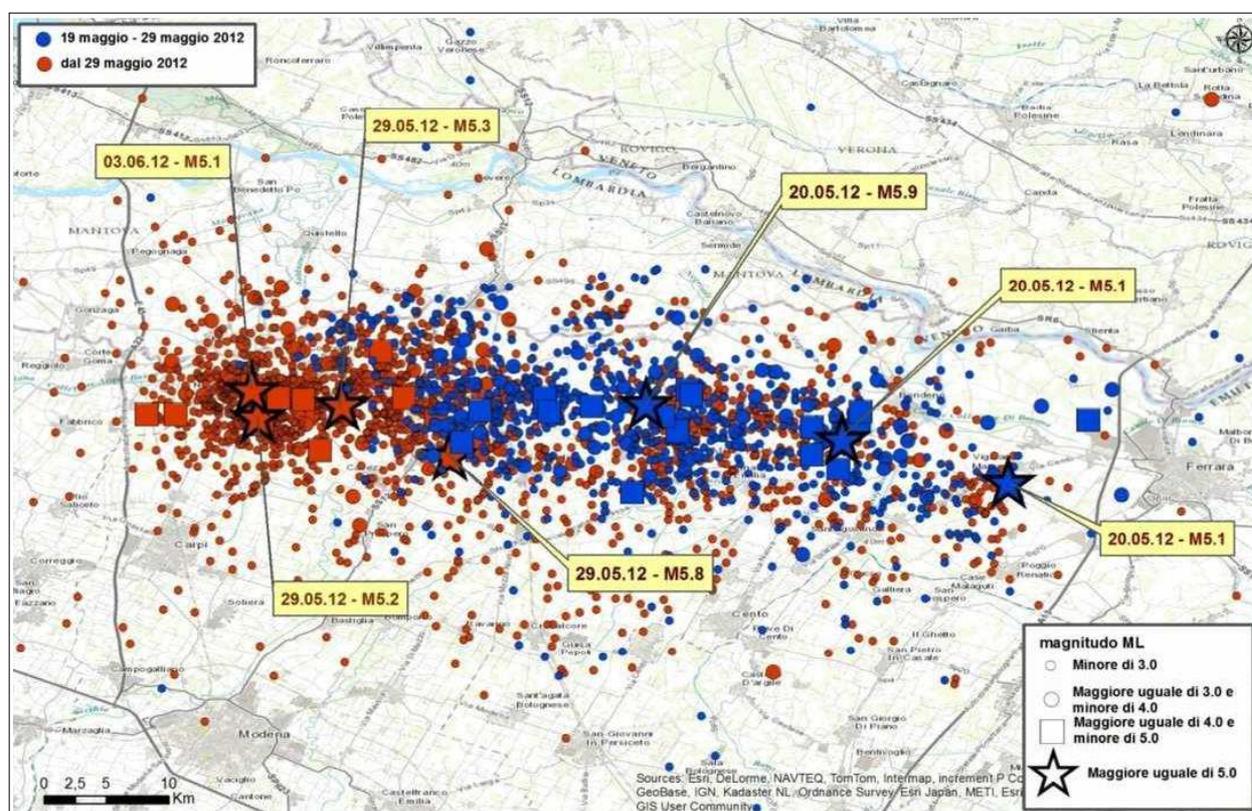


Figura 2.4 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

## 2.4 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

<sup>3</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.

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  $M_{w,max}$  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 & Valensize, 2004).

Il database DISS v. 3.2 (DISS Working Group, 2010) indica la presenza, poco a sud dell'area in esame (figura 2.5), di due sorgenti sismogenetiche individuali, ITIS091 e ITIS103, associate rispettivamente alla scossa del 3 gennaio 1505 e a quella del 20 aprile 1929.

Entrambe rientrano nella fascia delimitata dalla sorgente composta ITCS047, lungo la quale paiono essersi concentrati i maggiori eventi dell'area bolognese. Si tratta di una porzione del fronte compressivo pedeappenninico, un sistema di faglie con vergenza nordest, a cui è associata una magnitudo massima pari a 6.0. La profondità è indicata tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra circa 0.2 e 0.6 mm/anno.

Le più importanti questioni aperte citate nel database DISS, a cui è difficile dare una risposta allo stato attuale delle conoscenze, riguardano i tempi di ritorno dei terremoti associati alle sorgenti individuali e la magnitudo massima associabile all'area sottesa dalla sorgente composta.

Come già scritto nello studio di MS 2013, l'area di Calderara di Reno può anche risentire degli eventi associati a strutture sismogenetiche più distanti rispetto a quelle appena citate (figura 3) e più a nord, come i terremoti del maggio 2012, originati dalle sorgenti composte ITCS050 ("Carpì-Poggio Renatico") e ITCS103 ("Finale Emilia-Mirabello").



Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2). Foto aerea: Google Earth.

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

### 2.5.1 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 "secondo livello").

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 2.6, 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).

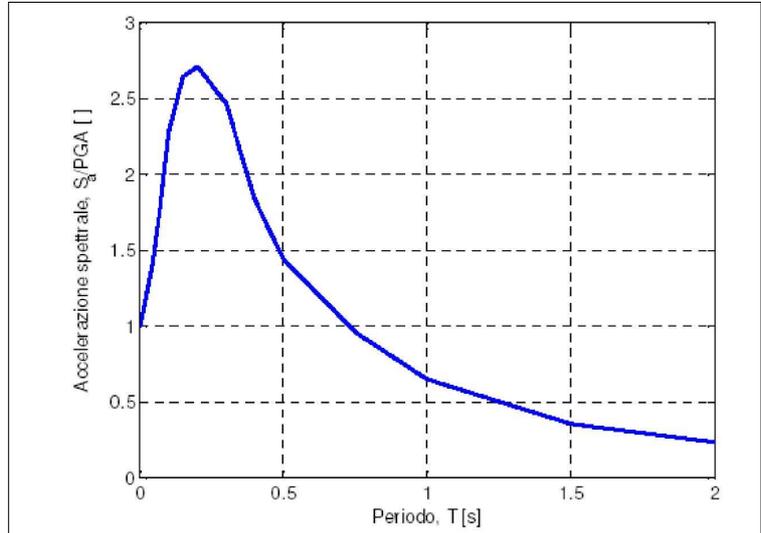


Figura 2.6- Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica ISESD dei segnali di riferimento regionale

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 riscalandolo lo spettro di figura 2.6 con la  $a_{refg}$  attribuita al sito di studio. In tal senso, la figura 2.7 riporta per il 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.

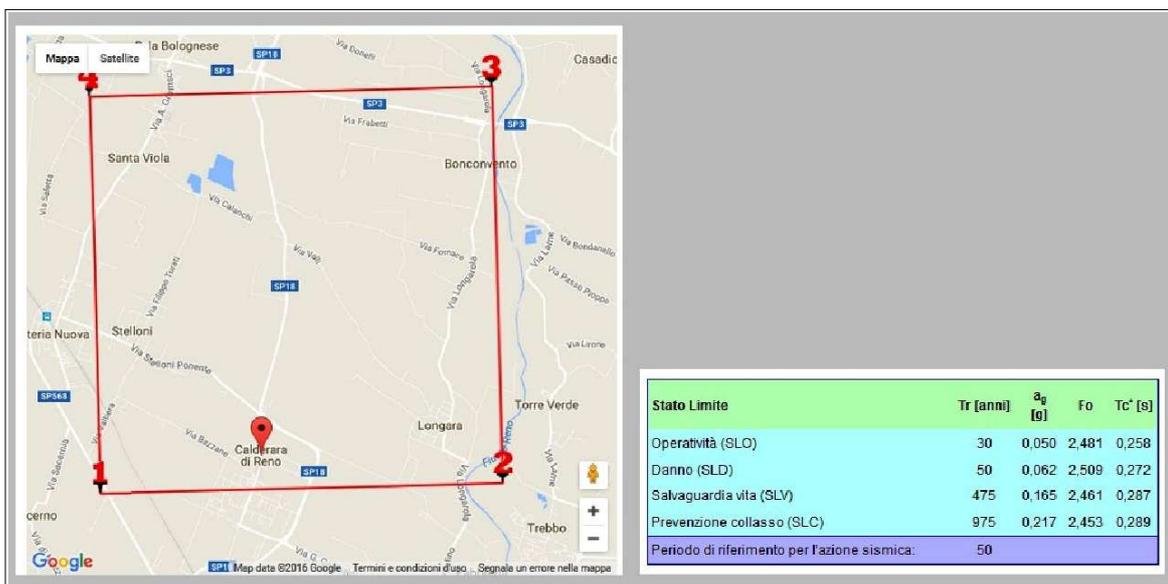


Figura 2.7 - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia relativi al Capoluogo

Si evince che per gli areali urbanizzati/urbanizzabili di Calderara di Reno Capoluogo i valori di  $a_{refg}$  (per terremoti con  $TR = 475$  anni) sono compresi tra 0,164g e 0,165g. 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).

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

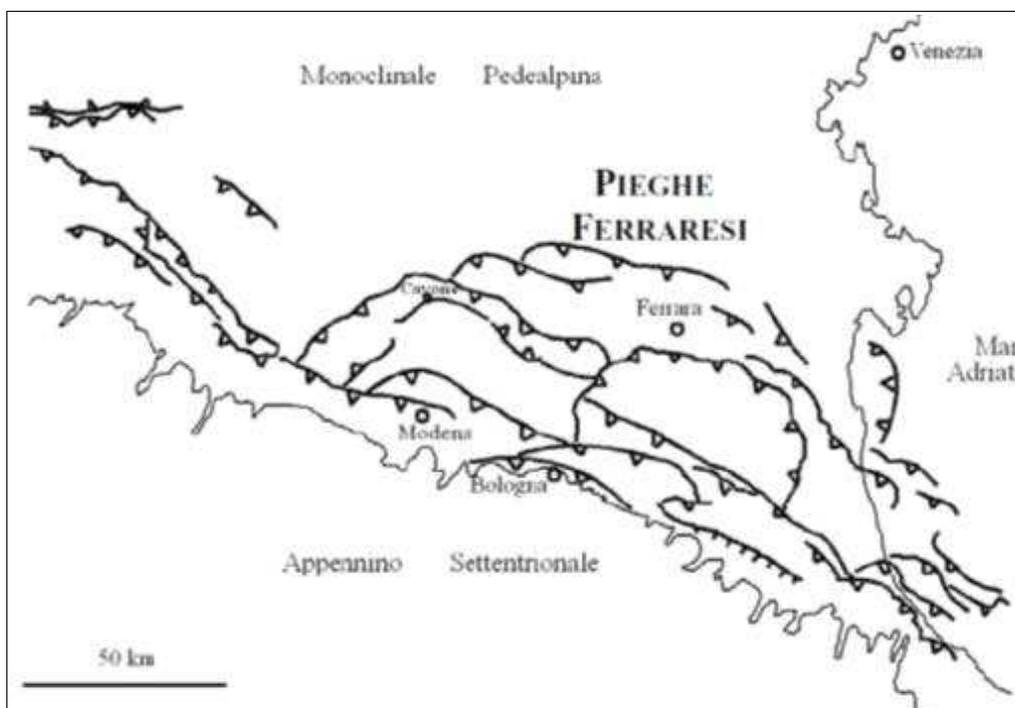
#### 3.1 Inquadramento geologico

Riprendendo quanto già scritto per lo studio di MS 2013, il territorio del comune di Calderara di Reno si posiziona nella parte centro-meridionale della Pianura Padana che costituisce, dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-quadernario di tipo sedimentario, che comincia a delinearsi sin dall'inizio del Triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo (Mesozoico, Cenozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario) che nello spazio, con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali presenti in profondità.

Il contesto geologico di riferimento è pertanto quello del Bacino Padano che strutturalmente rappresenta un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico (Dondi & D'Andrea, 1986; Pieri & Groppi, 1981).

L'area oggetto dello studio di microzonazione sismica si trova al margine esterno del fronte emerso della catena appenninica settentrionale, strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore, nella fascia di alta pianura padana dove si rinvengono spessi depositi alluvionali e in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene superiore e Quaternario. Tali deformazioni sepolte, presenti a nord di Calderara di Reno, rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi (figura 3.1) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (Pieri & Groppi, 1981).

*Figura 3.1 - Schema tettonico del settore emiliano e romagnolo-ferrarese, con la suddivisione in Pieghe Emiliane, Ferraresi, Romagnole ed Adriatiche (da Dondi et al., 1982). In particolare si evidenziano le strutture sepolte che interessano la pianura emiliana*



In particolare, questa porzione di alta pianura emiliana, in cui si colloca il comune di Calderara di Reno, è caratterizzata dalla presenza di due elementi tettonici significativi che ne hanno

condizionato e orientato i processi deposizionali e le dinamiche geomorfologiche dal Pliocene fino ad oggi:

- la “Zona delle pieghe pedeappenniniche”, dal margine collinare alla Via Emilia, costituita da una successione di sinclinali ed anticlinali, con asse a vergenza appenninica, spesso fagliate e sovrascorse sul fianco Nord;
- la “Zona della Sinclinale di Bologna–Bomporto–Reggio Emilia”, dove i depositi quaternari raggiungono il loro massimo spessore di tutta la pianura Padana.

Il territorio del comune di Calderara di Reno dal punto di vista strutturale è pertanto una sinclinale subsidente riempita dai depositi alluvionali portati dai corsi d’acqua appenninici collocata tra la porzione più esterna dell’Appennino settentrionale (Zona delle pieghe pedeappenniniche) a sud e la “Dorsale di Ferrara” a nord (Franchi, 2008).

Dal punto di vista strutturale la Pianura Padana non costituisce una unità omogenea: fanno infatti parte del suo sottosuolo le pieghe più esterne dell’Appennino settentrionale e delle Alpi meridionali lombarde, l’avampaese comune alle due catene e, nel Veneto, l’avampaese della Alpi meridionali orientali e della catena dinarica (figura 3.2); su questi elementi è impostata l’avanfossa pliocenico–quaternaria dell’Appennino. Questo settore del bacino padano è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin–tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative plicative sottostanti.

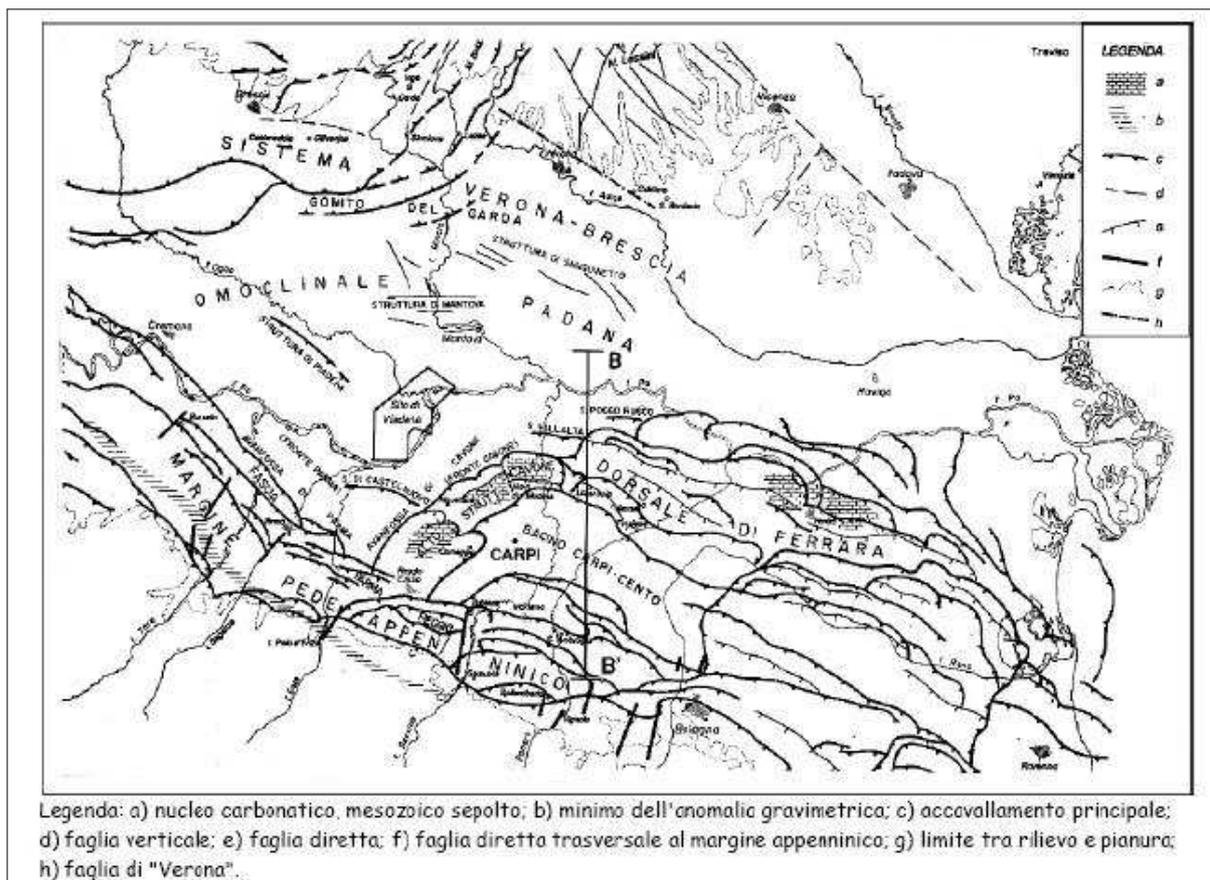


Figura 3.2 Carta degli elementi tettonici significativi dell'area Padana centro-orientale. nella quale sono visibili i sovrascorrimenti principali, la zona delle pieghe appenniniche e il bacino di Carpi-Cento (Serva, 1990)

La fase pliocenica viene denominata di flysch, in contrasto con i sedimenti di molassa che hanno caratterizzato la fase successiva, nella quale divenne dominante l’input di materiale

erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993). Con il Pleistocene si instaura un nuovo ciclo sedimentario (Qm, Ricci Lucchi et al., 1982), che porta al colmamento del Bacino Padano in un regime di subsidenza generalizzata. Gran parte delle aree precedentemente emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa che prosegue poi, ininterrottamente, fino all'Attuale. Successivamente, la sedimentazione diviene esclusivamente continentale, e prosegue con i depositi fluvio-lacustri delle alluvioni Padane (Qc, Ricci Lucchi et al., 1982). I sedimenti sabbiosi, limosi ed argillosi, che riempiono la parte più superficiale del bacino, sono stati deposti dal fiume Po e dagli altri fiumi tributari che provengono dalla catena Appenninica, compreso il fiume Reno (Dondi et al., 1982; Pieri, 1984; Dondi & D'Andrea, 1986; Ori, 1993; Vittori & Ventura, 1995; Amorosi et al., 1999).

Nel Pleistocene medio, quindi, la prosecuzione del sollevamento comporta il definitivo instaurarsi della deposizione continentale e inizia la sequenza deposizionale denominata Supersistema Emiliano Romagnolo; le tre Sequenze deposizionali proposte dalla Regione Emilia-Romagna per caratterizzare i depositi sedimentari a partire dal Pliocene mediosuperiore corrispondono a cicli trasgressivo-regressivi.

I depositi del Quaternario, soprattutto del Pleistocene medio-superiore, rappresentano degli accumuli disposti in ampie ondulazioni, con geometrie lenticolari che indicano il colmamento delle depressioni residue dei bacini pliocenici precedenti.

### **3.2 Inquadramento e inquadramento geomorfologico e litologico**

Come riportato nella Relazione geologica a corredo del quadro conoscitivo per il PSC associato Terre d'acqua (Franchi, 2008) e ripreso anche nella Relazione di MS 2013, l'area di studio ha una complessa evoluzione paleogeografica, in particolare l'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali è stato fortemente condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana, da fenomeni climatici e da interventi antropici di deviazione, regimazione e bonifica (figura 3.3).

In particolare si evidenzia la presenza di paleo alvei del fiume Reno e del torrente Lavino anche nel territorio del Comune di Calderara di Reno che trova conferma nella presenza di dorsali morfologiche e dalle litostratigrafie sia delle indagini eseguite sia di quelle recuperate nell'archivio comunale.

Le informazioni circa l'evoluzione paleo-idrografica dei corsi d'acqua principali nell'area di studio, fiume Reno e torrente Lavino, desunte da fonti bibliografiche, indicano in particolare che per quanto riguarda il fiume Reno, in origine, uscendo da Casalecchio e dopo aver costeggiato Bologna, scorreva più verso est, dalla zona di Pescarola-Corticella alle terre più basse di Minerbio e Baricella per innestarsi in un alveo antico del Po a sud di Ferrara, detto in seguito Po di Primaro (Franchi, 2008).

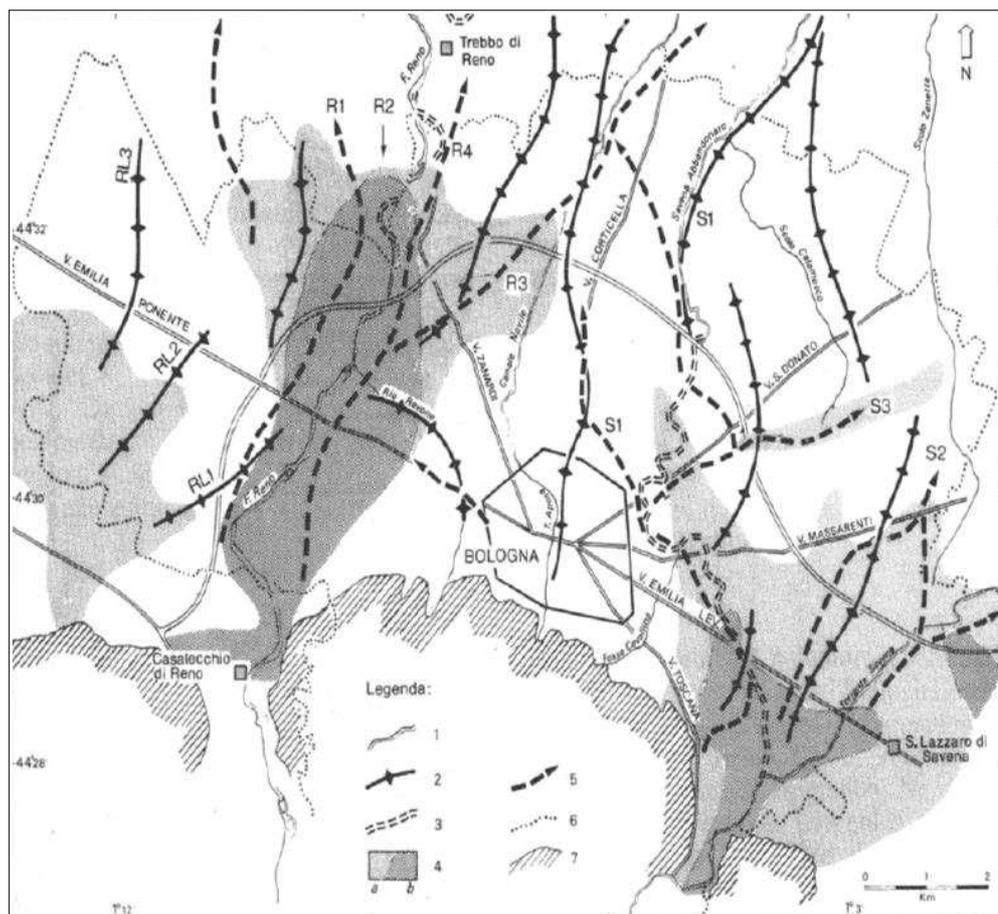
In una seconda fase, a partire dal medioevo, l'alveo di pianura del fiume Reno si sarebbe spostato più ad occidente attraverso numerose rotture di argini e vari interventi antropici; la storia del Reno è stata pertanto molto lunga e complessa, svolgendosi su un'area di pianura più vasta e anche diversa da quella toccata attualmente.

In sintesi, considerando l'evoluzione strutturale e geomorfologica deposizionale, si evidenzia che la litologia di superficie della zona di alta pianura è costituita in prevalenza da depositi

fluviali continentali a matrice sabbioso-ghiaiosa con alvei e canali frequenti e con tendenza allo sviluppo di meandri; nell'ambito deposizionale del conoide del fiume Reno tali depositi grossolani nei primi 30 metri di profondità si spingono dal margine appenninico verso la pianura per una fascia di circa 15 km interessando pertanto anche l'area in esame.

In particolare, nel territorio del Comune di Calderara di Reno si evidenzia la presenza di 10-20 metri di depositi coesivi (argillosi e limosi), con locali livelli metrici sabbiosi e limo-sabbiosi, al di sotto dei quali si incontrano le ghiaie e le sabbie costituenti le strutture sepolte (dossi) relative ai conoidi del Reno e del Lavino.

*Figura 3.3 - Reticolo idrografico attuale e ricostruzione del reticolo idrografico antico del fiume Reno. Legenda: 1) Alvei attuali; 2) Posizioni di paleoalvei dedotti dalla presenza di dorsali morfologiche; 3) percorsi storici individuati in base a documenti o indicazioni storiche; 4) lobi sabbiosi (a) o ghiaiosi (b) della litologia superficiale; 5) assi di dorsali o di lobi ghiaiosi profondi; 6,7) limiti Comunali e del rilievo collinare (Elmi et al., 1984).*



### 3.3 Subsidenza

Per quanto concerne il fenomeno della subsidenza le informazioni sono state desunte dai rapporti di monitoraggio realizzati da Arpa - Dipartimento d'Ingegneria Ambientale in collaborazione con il Servizio geologico della Regione Emilia-Romagna e presenti sui rispettivi siti web.

La fascia in cui ricade il territorio del comune di Calderara di Reno è da sempre soggetta ad un più o meno rapido abbassamento del suolo, sia per azioni tettoniche, quali l'affossamento del bacino sedimentario, sia per motivi legati alla natura ed alla stratigrafia dei sedimenti, depositatesi nei recenti periodi geologici ed in progressiva compattazione a causa del loro stesso peso.

All'abbassamento del suolo per cause naturali, nel periodo tra gli anni '60 e '70, si è andata a sovrapporre, sino a divenire causa dominante, una componente "artificiale" di tipo antropico

imputabile principalmente all'estrazione di fluidi dal sottosuolo ed in particolare al forte prelievo idrico industriale e agricolo dalle falde che ha persino provocato problemi nel corretto funzionamento della rete scolante gestita dai Consorzi di Bonifica.

La campagna di monitoraggio della subsidenza del 2000–2006 (figura 3.4), eseguita da Arpa, ha affiancato al metodo classico della livellazione geometrica di alta precisione, utilizzato nei precedenti monitoraggi eseguiti negli anni '80 e '90, la tecnica dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari. I risultati di tale monitoraggio indicano per l'area ovest della pianura bolognese abbassamenti generalmente in accentuata riduzione rispetto al periodo di monitoraggio precedente (1992–2000).

I valori maggiori (20 -30 mm/anno) si rilevano nella parte orientale dei territori comunali di San Giovanni in Persiceto, oltre che su buona parte dei territori di Sala Bolognese e in parte Calderara di Reno e Anzola Emilia.

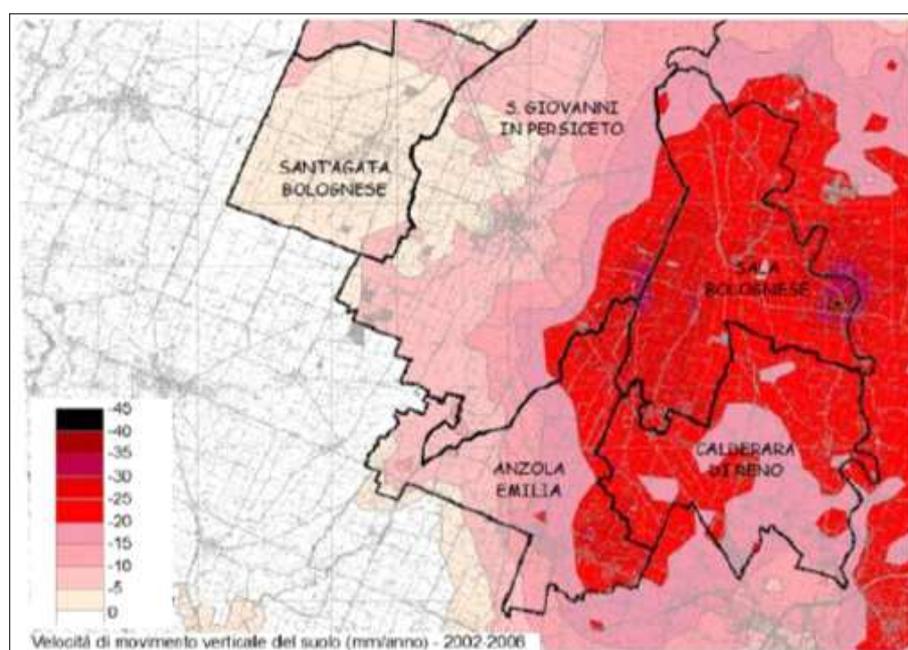


Figura 3.4 - Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 (Arpa Ingegneria Ambientale, 2007)

### 3.4 Scavernamenti

In Pianura Padana e in particolare nei territori di pianura del bolognese e modenese sono stati segnalati, nell'ultimo ventennio, alcuni fenomeni di sprofondamento che hanno interessato i depositi alluvionali quaternari e le coperture più superficiali.

Tali strutture, che sembrano manifestarsi in superficie in tempi rapidi e si presentano come "buchi" di varie dimensioni e forma, vengono comunemente denominate "sprofondamenti e/o scavernamenti del piano di campagna" SPD, oppure nella letteratura scientifica "meso-pseudo-dolines" (Mpd, doline) e collassi o "meso-pseudo-sinkholes" (Mps, inghiottitoi) (Franchi, 2008).

Le morfologia degli "scavernamenti" è essenzialmente di due tipi:

- 1) cavità dell'ordine di qualche metro e profondità generalmente inferiore a 2 m, a geometria variabile. Talvolta il collasso del materiale di margine all'interno dello sprofondamento modifica la forma iniziale;
- 2) cavità strette (15-50 cm) a forma di conca a sezione da sub-circolare ad ellittica. In

quest'ultimo caso, generalmente l'asse maggiore può superare 2 m di lunghezza con un tratto iniziale rappresentato da una tipica fessura a cunicolo (Bianchi et al., 2008). Tra le ipotesi più accreditate per la genesi dei collassi vi sono (Franchi, 2008):

- 1) volumi di gas in sovrappressione, ospitati in cavità superficiali e capaci di sostenere il sovrastante strato di terreno agrario;
- 2) distacchi ciechi della copertura in superficie, con l'apertura di fenditure al di sotto del terreno che si trova sospeso sulle camere vuote.

Altri studi recenti indicano che l'origine degli "scavernamenti" sia da ricercare in sottrazioni di massa in zone poco profonde della successione stratigrafica; in particolare il fenomeno pare strettamente legato alla distribuzione della torba o/e sedimenti facilmente compattabili, presenti nelle prime decine di metri sotto il piano campagna, in molti casi inoltre il fenomeno è amplificato dall'eccessivo pompaggio dell'acqua metanifera presente nella torba stessa (Bianchi et al., 2008).

Le numerose ricerche e gli studi geomorfologici specifici indicano pertanto come sia ancora incerta la spiegazione di tali fenomeni, che preoccupano per la loro difficile collocazione spazio temporale e perché, sebbene ad oggi non risultino avere mai causato danni ad edifici o infrastrutture, non è possibile escludere che questo possa avvenire in futuro (Franchi, 2008).

In riferimento allo studio in oggetto si rileva comunque che ad oggi non sono segnalati e censiti fenomeni di sprofondamento nel territorio comunale di Calderara di Reno.

### 3.5 Idrogeologia

Riprendendo quanto scritto nella Relazione di MS 2013, per la corretta interpretazione e descrizione idrogeologica dell'area si può fare riferimento alla figura 3.5 che fornisce uno schema di comparazione tra la nomenclatura utilizzata in letteratura nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute classicamente, le sequenze deposizionali e la denominazione delle unità idrostratigrafiche proposta più recentemente.

I rilievi piezometrici eseguiti nell'area per il presente studio di microzonazione sismica e i numerosi dati estratti dalle relazioni geologiche consultate presso l'archivio comunale, confermano l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un complesso di falde superficiali ed un complesso di falde profonde (figura 3.6).

In particolare, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale i dati desunti dal Quadro Conoscitivo del PSC di Calderara di Reno indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1,00 m e 4,00 m (es. Longara) di profondità dal piano di campagna ed una alimentazione che avviene tramite l'infiltrazione delle acque meteoriche dalla superficie (Tav. 9a/b/c del Quadro conoscitivo del PSC associato (Franchi, 2008). Gli esiti di soggiacenza della prima falda, opportunamente controllati anche con le indagini eseguite per lo studio di MS, sono stati implementati, come vedremo, nelle simulazioni numeriche di verifica della liquefacibilità (cfr. Capitolo 7).

Figura 3.5 - Schema della suddivisione dei depositi della pianura in tre unità stratigrafiche, denominate Gruppi Acquiferi A, B e C (Regione Emilia-Romagna et al., 1998)

UNITA' STRATIGRAFICHE		SEQUENZE DEPOSIZIONALI	ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE		
					GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO	SISTEMA ACQUIFERO
SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	Qc	Qc <sub>2</sub>	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE-OLOCENE	A	A1
							A2
							A3
							A4
	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	Qm	Qc <sub>1</sub>	~0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1
							B2
							B3
							B4
SABBIE DI IMOLA			Qm <sub>3</sub> "	~0.65	PLEISTOCENE INFERIORE	C	C1
			Qm <sub>3</sub> '	~0.8			C2
			Qm <sub>2</sub>	~1.0			C3
			Qm <sub>1</sub>	~2.2			C4
				~3.3-3.6			C5
GRUPPO DEL SANTERNO		P2		~3.9	PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE		
					PLIOCENE INFERIORE		
					MIOCENE		
						ACQUITARDO BASALE	

Superficie di discontinuità principale
  Superficie di discontinuità minore

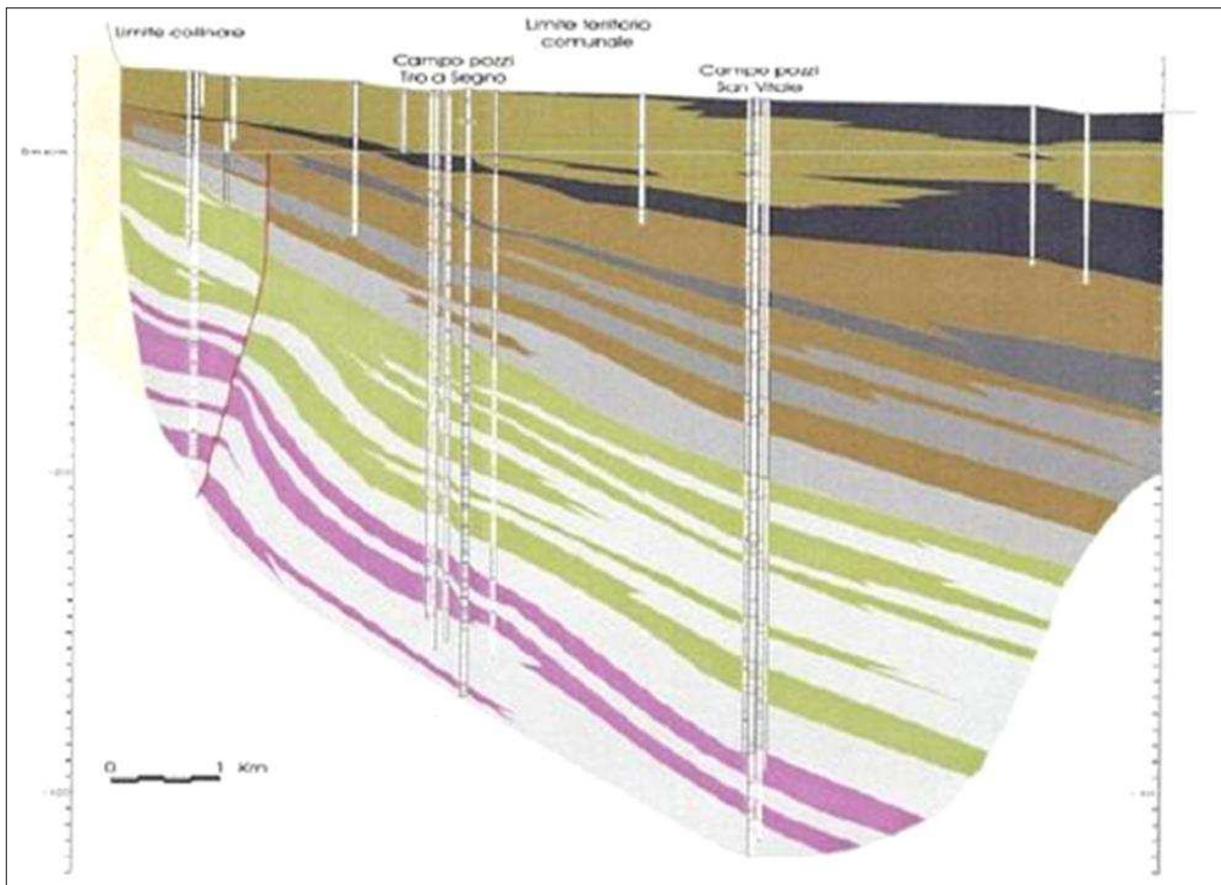
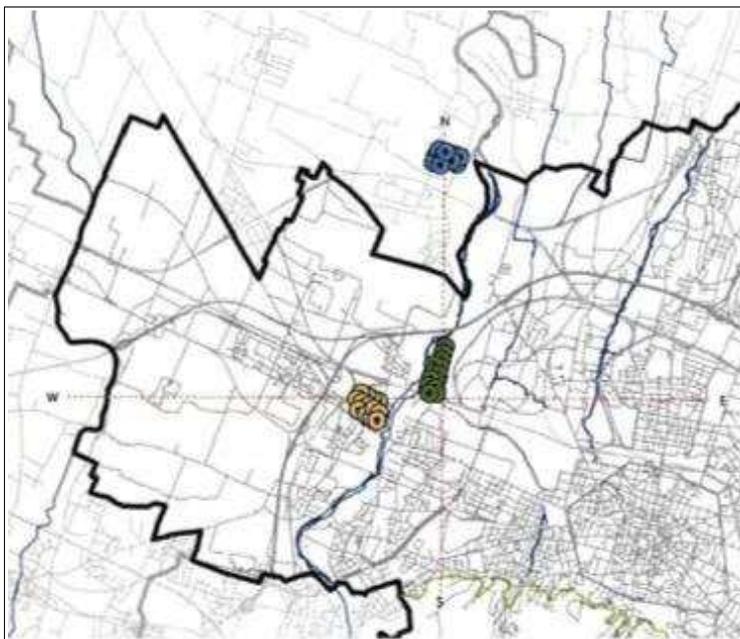


Figura 3.6- Sezione idrogeologica dell'area oggetto di studio nella quale si evidenzia la presenza di un acquifero multifalda e dei campi pozzi acquedottistici di Tiro a Segno e di San Vitale che influenzano fortemente le peizometrie dell'area di conoide (Franchi, 2008)

*Figura 3.7 - Ubicazione dei campi pozzi acquedottistici presenti nella zona di conoide del fiume Reno (Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale). Il cono di depressione dell'acquifero produce i suoi effetti sul territorio di tutti i comuni presenti in questa porzione pianura, come Calderara di Reno (Franchi, 2008).*



Per quanto riguarda l'acquifero più profondo, si rileva un livello statico che si attesta a profondità variabili mediamente comprese tra 15,00 m ed i 30,00 m dal piano campagna.

I dati piezometrici rilevati negli anni evidenziano una profonda depressione nel conoide del Reno, dovuta agli intensi prelievi dei campi pozzi acquedottistici presenti (Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale), che giunge anche a -55 m dal piano campagna (figura 3.7); in particolare il campo pozzi di San Vitale presente nel territorio del comune di Calderara di Reno dispone di una batteria di dodici pozzi profondi da 400 m a 450 m che intercettano diversi livelli dell'acquifero della conoide del fiume Reno a partire da circa 95 m di profondità (Franchi, 2008).

Il richiamo causato dall'emungimento dei pozzi profondi si trasmette anche negli acquiferi più superficiali; infatti sono documentati fenomeni di drenanza fino a circa 200 metri di profondità, pur verificandosi con particolare evidenza tra il piano campagna e i 70 metri di profondità dove la differenza tra le quote piezometriche dei diversi acquiferi è pari a circa 20-30 m.

Sebbene l'evoluzione piezometrica nella conoide del Fiume Reno negli ultimi 30 anni, indica come a partire dal 1985 si assista ad una stabilizzazione delle quote con indizi di risalita, la piezometria della porzione sud-est del territorio comunale è ancora fortemente depressa e influenzata dal cono di emungimento presente, come testimoniato anche dai dati freaticometrici rilevati e acquisiti.

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

### 4.1 Dati pregressi

La fase iniziale di lavoro è risultata agevolata per la disponibilità della banca dati georeferenziata già elaborata per lo studio di MS 2013 (livello 2). Tale B/D è costituito da un vasto archivio di indagini geognostiche/geofisiche pregresse. I dati sono stati messi a disposizione da diversi soggetti:

- ✓ dai diversi servizi del Settore Governo e Sviluppo del Territorio del Comune di Calderara di Reno, che ha fornito alcune relazioni geologiche e ha consentito l'accesso al proprio archivio di pratiche edilizie;
- ✓ dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito i dati della propria banca dati geognostica;
- ✓ da alcuni geologi professionisti che, a seguito di specifica richiesta, hanno fornito dei rapporti di indagine tratti dai propri archivi.

In particolare, per lo studio di MS 2013 è stato effettuato un approfondito lavoro di ricerca presso l'archivio cartaceo presente presso la sede del Comune di Calderara di Reno, contenente pratiche urbanistiche, edilizie e di deposito del cemento armato; sono pertanto state estratte tutte le relazioni geologiche e le relative indagini geognostiche dal 2007 fino all'epoca dello studio e, in maniera mirata, alcune relazioni geologiche antecedenti, relative ad aree rivelatesi, nel corso dello studio, di particolare interesse per la caratterizzazione geologica del sottosuolo. Per questo ulteriore approfondimento, l'Amministrazione comunale ha fornito alcune ulteriori Relazioni Geologiche elaborate a corredo di Piani attuativi più recenti, con prove che sono state georeferenziate (Capoluogo e Frazione Castel Campeggi), implementate nell'archivio informatico e riportate nella cartografia delle indagini aggiornata (Tavola 1). Il totale delle indagini pregresse risulta pari a 866 prove e la tabella 1 ne riporta le quantità distinte per tipologia:

TIPOLOGIA	QUANTITA'		
	MS 2013	MS 2016	(TOTALE)
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	450	6	456
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	17	1	18
Prove penetrometriche statiche con piezocono	13	9	22
Prove penetrometriche con piezocono sismico	3	–	3
Prove penetrometriche dinamiche leggere	15	–	15
Prove penetrometriche dinamiche pesanti	1	–	1
Prove penetrometriche in foro (SPT)	11	–	11

TIPOLOGIA	QUANTITA'		
	MS 2013	MS 2016	(TOTALE)
Sondaggi a carotaggio continuo	68	3	71
Sondaggi a distruzione di nucleo	81	–	81
Pozzi per acqua	149	–	149
Trincee o pozzetti esplorativi	2	–	2
Misure di microtremore a stazione singola	24	2	26
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	8	3	11

Sono state inoltre consultati i risultati di indagini realizzate nei comuni limitrofi a breve distanza dal confine. Alcune di queste, sebbene non siano riportate nella carta delle indagini, sono risultate assai utili per integrare i dati presenti nell'area di Calderara di Reno.

Come già scritto per lo studio di MS 2013, l'archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto immediato dei dati inseriti e la possibilità di un continuo aggiornamento. Inoltre la struttura della banca dati consente di associare al dato geografico (punto di indagine) e a quello iconografico (rapporto di prova in pdf), degli attributi alfanumerici che permettono di accedere interattivamente ai dati sintetici più importanti (profondità raggiunta, livello della falda misurato, quota del tetto delle ghiaie e del primo orizzonte sabbioso, presenza o meno di uno spessore significativo di terreni compressibili ecc.). La presenza di tali campi informativi ha permesso di realizzare delle carte tematiche specifiche ed efficaci rappresentazioni di sintesi che hanno consentito di ottenere un quadro immediato delle caratteristiche dei terreni studiati, alle diverse scale.

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto quindi osservare che buona parte del territorio comunale, ed in particolare la sua porzione urbanizzata, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale.

Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte ad accertare la profondità del bedrock sismico dell'area e a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di profondità (Vs30).

Relativamente alla qualità dei dati, nel corso dello studio di MS 2013 è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile lo studio di MS 2013 ha dunque espletato una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio, della quale si è ulteriormente tenuto conto per questi ulteriori approfondimenti.

## 4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica

### 4.2.1 Prove eseguite per lo studio di MS 2013

Al fine di caratterizzare le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche previste dal Piano Strutturale Comunale e dal Piano Operativo Comunale (all'epoca in fase di predisposizione), e le zone dell'urbanizzato che risultavano meno conosciute dal punto di vista geomeccanico e geofisico, sono stati integrati i dati pregressi con specifiche campagne di indagini. In particolare sono state eseguite:

- 10 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- 8 stendimenti Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)
- 72 misure di microtremore sismico a stazione singola

#### 4.2.1.1 Prove penetrometriche statiche (CPT)

Le prove penetrometriche statiche permettono di acquisire il valore di resistenza della punta all'infissione e dell'attrito laterale, variabili con il variare delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni. La conoscenza di questi parametri viene poi correlata attraverso l'ausilio di correlazioni empiriche che permettono una stima delle possibili caratteristiche tecniche dei terreni attraversati e di definirne un profilo stratigrafico.

Le prove sono state eseguite nel marzo 2013 con un penetrometro statico da 20 t montato su cingolato Pagani Tg63, le cui caratteristiche sono dettagliate nei rapporti di prova allegati. L'acquisizione dei dati avviene ogni 20 cm di avanzamento e le prove sono state spinte fino al rifiuto dello strumento (con  $R_p > 400 \text{ kg/cm}^2$ ). 7 prove sono arrivate ad oltre 20 metri di profondità, in due casi si sono fermate a circa 10 metri (CPT1 e CPT4), mentre in un caso la prova si è arrestata a 4,6 metri di profondità.

I dati penetrometrici ( $R_p$ ,  $F_s$ ) sono stati elaborati per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, riportati nei rapporti di prova allegati, e per eseguire speditive verifiche della liquefazione con metodi semplificati.

Le prove sono state ubicate in corrispondenza dei centri abitati presenti nel territorio comunale tenendo conto delle trasformazioni urbanistiche previste. In particolare 4 prove sono state realizzate presso l'abitato di Calderara di Reno, 2 al Bargellino, 1 a Lippo, 1 a Longara, 1 a Sacerno e 1 a Tavernelle.

#### 4.2.1.2 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)

Le prove penetrometriche statiche permettono di acquisire il valore di resistenza della punta all'infissione e dell'attrito laterale, variabili con il variare delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni. La conoscenza di questi parametri viene poi correlata attraverso l'ausilio di correlazioni empiriche che permettono una stima delle possibili caratteristiche tecniche dei terreni attraversati e di definirne un profilo stratigrafico.

Le prospezioni sismiche che prevedono l'utilizzo di onde superficiali (Onde di taglio – onde Sh/Sv) note in letteratura come MASW –Multichannel Spectral Analysis of Waves (Park et al., 1999; Park et al., 2007) realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica, hanno previsto acquisizioni con tecnica in sismica attiva mediante l'utilizzo di massa battente

come sorgente di onde superficiali.

Attraverso l'analisi del contenuto di onde superficiali, in questo caso onde di Rayleigh, che costituiscono un particolare tipo di onde dal comportamento dispersivo in un mezzo stratificato come il sottosuolo, è possibile ricavare indirettamente la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) secondo equazioni empiriche.

Per l'indagine sismica sono state acquisite registrazioni con massa battente esterna da 10 Kg ed in linea con lo stendimento sismico; le Basi Masw eseguite, per le possibilità operative presenti in corrispondenza dei siti di intervento, presentano (Compreso il punto di shot) la geometria come sotto indicato:

- Numero geofoni 24
- Spaziatura geofoni 1,5 m
- Lunghezza stendimento geofonico 34,5 m
- Distanza punto di shot da ultimo geofono 15 m
- Lunghezza complessiva 49,5 m

Le prove MASW sono state realizzate dalla Società Tecnogeofisica snc di Carpi (MO) ed è consistita nella effettuazione di 8 prove sismiche tipo MASW per consentire la ricostruzione di profili verticali di  $V_s$  fino alla profondità di 30 metri dal piano campagna. A tal fine sono stati esaminati i dati ottenuti dalle prospezioni sismiche di superficie, opportunamente tarati coi dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.,) e con le curve HVSR misurate nei siti.

#### 4.2.1.3 Misure di microtremore sismico a stazione singola

Le prove penetrometriche statiche permettono di acquisire il valore di resistenza della punta all'infissione e dell'attrito laterale, variabili con il variare delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni. La conoscenza di questi parametri viene poi correlata attraverso l'ausilio di correlazioni empiriche che permettono una stima delle possibili caratteristiche tecniche dei terreni attraversati e di definirne un profilo stratigrafico.

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale "Tromino" e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarellò e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ( $10-15 \text{ m/s}^2$ ), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSR -horizontal to

vertical spectral ratio). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012 e Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori come composti in massima parte da onde di superficie (di Rayleigh) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 30 minuti per 8 misure e pari a 14 minuti per le restanti 64.

Questa campagna di indagine geofisica, proprio perché così estesa sul territorio comunale, è risultata molto importante ai fini della caratterizzazione sismica dei terreni, in quanto ha permesso di accertare la presenza di aree oggetto di possibili fenomeni di risonanza, anche significativi, originati da contrasti di impedenza all'interno dei depositi, di mapparne in dettaglio l'andamento e di stimarne con buona precisione la profondità. In particolare, le misure eseguite hanno evidenziato la presenza di un'area a forte contrasto di impedenza proprio in corrispondenza del conoide ghiaioso sepolto del fiume Reno, con un significativo aumento dell'ampiezza dei picchi di H/V anche su brevi distanze. Per questo motivo si è deciso di realizzare un numero consistente di misure di microtremore a stazione singola, alcune delle quali sono state eseguite anche in aree dove non erano strettamente necessari gli studi di microzonazione, cioè al di fuori delle aree urbanizzate, di quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e delle fasce a cavallo delle reti infrastrutturali, al fine di ottenere un quadro complessivo per l'intera area comunale e di mappare nel dettaglio tutta la zona ad alto contrasto di impedenza caratterizzandola sia dal punto di vista delle frequenze che da quello delle ampiezze dei picchi H/V.

#### *4.2.2 Prove eseguite per lo studio di MS 2016*

Per gli approfondimenti di "livello 3", si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico e di laboratorio. Si è cercato di concentrare le indagini soprattutto nelle aree urbanizzate/urbanizzabili ancora prive di analisi di RSL semplificata in quanto classificate come "zone instabili" per liquefacibilità (come indicavano gli standard di rappresentazione e archiviazione di riferimento all'epoca dell'elaborazione della MS 2013), come riportato nella figura 4.1. Le indagini sono state dunque finalizzate ad una ulteriore caratterizzazione della RSL attraverso l'esecuzione di stendimenti ESAC, eseguiti in areali differenti come contesto sismostratigrafico emerso dallo studio di MS 2013 e cioè:

- 1) in un settore ancora di "conoide" del Reno nel territorio comunale meridionale, con ghiaie poco profonde e presumibilmente più grossolane/ciottolose e "rigide" (zona industriale Bargellino);
- 2) in un settore circa marginale alla "conoide" del Reno, nel territorio comunale nord orientale, presumibilmente caratterizzato da apporti ghiaiosi poco profondi ancora potenti ma meno "rigidi" (ghiaie meno grossolane/ciottolose) e con maggior matrice fine (frazione Longara);

- 3) nel settore centrale del territorio comunale e in particolare nel Capoluogo, caratterizzato da terreni di copertura fini più potenti e con intervalli sabbioso/ghiaiosi sottostanti ancora significativi;
- 4) nel settore centro occidentale del territorio comunale (frazione di Tavernelle), caratterizzato da successioni alluvionali ancora più fini e "soffici", con intercalazioni sabbiose/ghiaiose meno potenti.

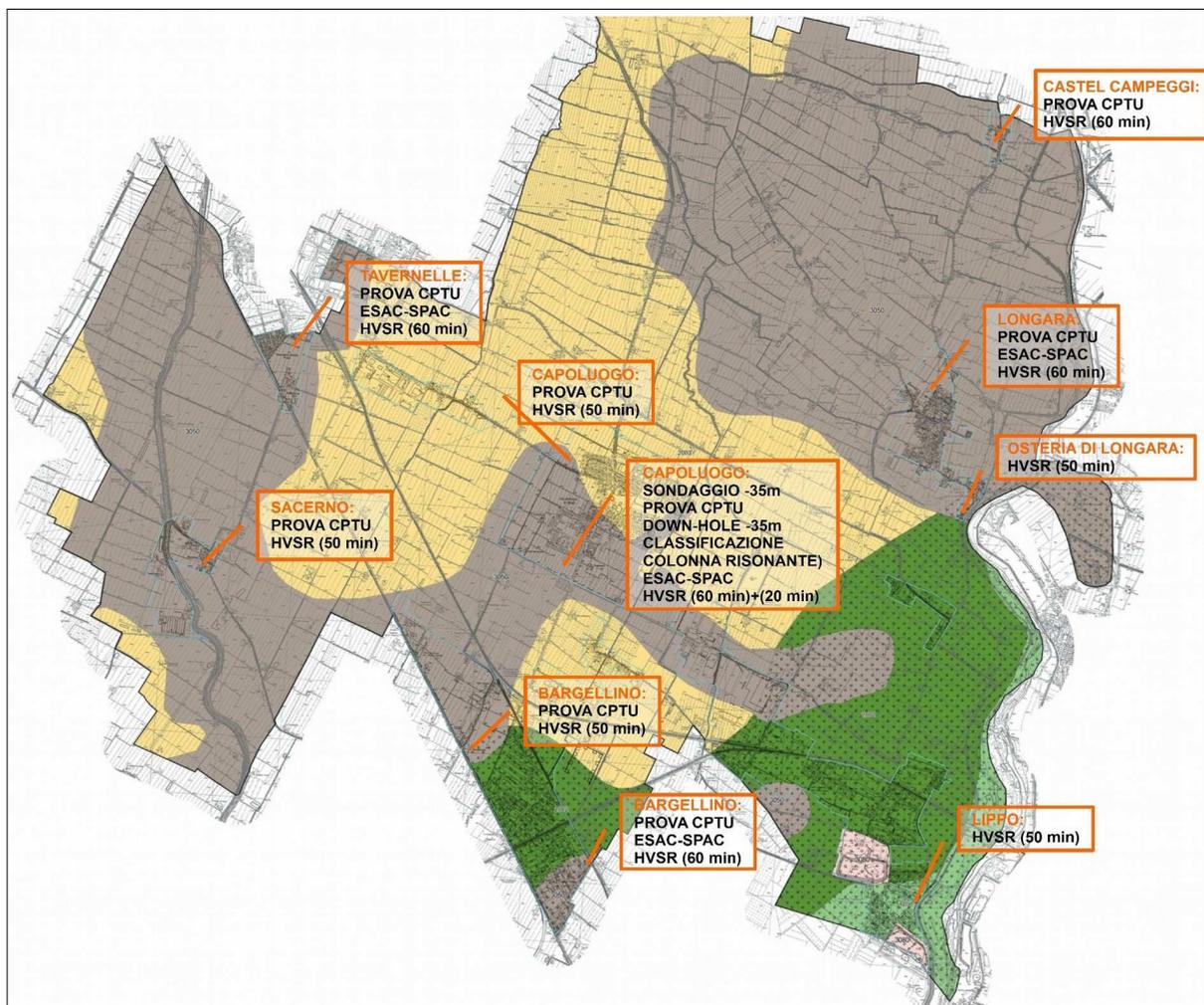


Figura 4.1 – Localizzazione schematica delle indagini eseguite per la MS 2016 (approfondimenti di “livello 3”)  
summa cartografia MOPS (MS 2013)

Nel Capoluogo è stato inoltre eseguito un sondaggio a carotaggio continuo, con recupero di campioni anche indisturbati (utilizzati anche per speciali prove di laboratorio dinamiche di “colonna risonante”). Il foro è stato inoltre predisposto per la misura diretta delle velocità di propagazione delle onde sismiche ( $V_s$  e  $V_p$ ) spinto fino a -35 metri (cioè fino alle ghiaie dell'unità AES7).

Nelle zone “liquefacibili” individuate dallo studio di MS 2013 sono state infine eseguite 8 prove penetrometriche CPTU finalizzate a verifiche quantitative della liquefacibilità e 10 acquisizioni HVSR con lunghi tempi di registrazione (50'÷60'), come ulteriore supporto della caratterizzazione della risposta sismica locale.

Si riportano qui di seguito descrizioni più dettagliate sulle indagini eseguite:

- ✓ *n. 1 sondaggio a carotaggio continuo* → spinto fino a 35 metri di profondità, è stato eseguito nel Capoluogo, nell'area verde comunale tra via Rizzoli Ponente e via Roma. Si è utilizzata una sonda autocarrata (foto 4.1). 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. 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 (tessiture; limiti di Atterberg; prove di colonna risonante).



Foto 4.1 - Esecuzione del sondaggio nel Capoluogo

- ✓ *n. 8 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 4.2). 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 4.2 - Prova CPTU eseguita a Bargellino (nord)

- ✓ *n. 4 prove sismiche 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  $V_s$  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 (foto 4.3), impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz).



Foto 4.3 – Prova ESAC eseguita nella frazione Longara (campo sportivo)

La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuata secondo un array bidimensionale, disposti a "L" secondo lo schemi riportati nelle schede delle prove e tuttavia con una spaziatura di 5 metri (ad esclusione della prova eseguita a Bargellino sud, con spaziatura di 4 m per limiti di spazio); ciò che ha consentito di estendere lo stendimento in tutta la superficie disponibile del parco pubblico.

- ✓ *n. 10 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola* → per queste prove (foto 4.4), già descritte in precedenza, i tempi di registrazione sono stati prolungati fino a 50'÷60' per ricavare spettri con rapporti del segnale H/V più pronunciato e consentire migliori valutazioni sulle frequenze di possibile amplificazione locale.

Foto 4.4 – Prova HVSR eseguita a Castel Campeggi (acquisizione di 60'). La freccia rossa indica lo strumento in fase di registrazione



### 4.2.3 Le indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel Capoluogo (area verde comunale tra via Rizzoli Ponente e via Roma), 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. 2 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 4.5). 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.

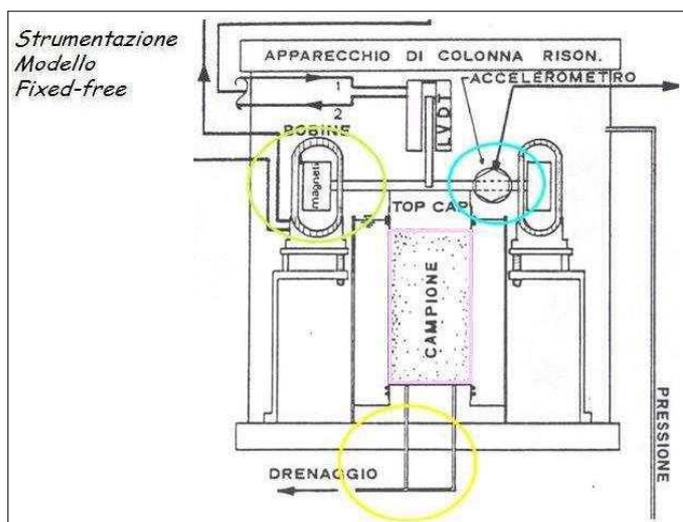


Figura 4.5 - Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO)

- ✓ *n. 6 prove di classificazione* → sono state effettuate sei 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.

In tal senso, per lo studio di microzonazione sismica di Calderara di Reno si è potuto disporre di molti punti di controllo, pur con evidenti concentrazioni in alcune aree, anche tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere una attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20–30 metri di sottosuolo nelle aree urbanizzate ed in alcuni casi anche al di fuori di queste.

### 5.1 Litologie sub-affioranti

In generale, la litostratigrafia del sottosuolo elaborata per lo studio di MS 2013 e desunta dalle indagini, ha confermato l'assetto geologico-strutturale già descritto nel capitolo 3. Gli esiti delle indagini hanno riscontrato la presenza, a partire dal piano di campagna, di spessori variabili di terreni limoso argillosi, con locali livelli (anche metrici) di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi. In ampie porzioni del territorio comunale (soprattutto nei settori orientali più prossimi al Fiume Reno e nei settori meridionali) tali coperture fini poggiano su un livello di ghiaie e sabbie ben addensate, come confermano anche le prove CPT eseguite per lo studio di MS 2014 e parte delle prove CPTU eseguite per questi ulteriori approfondimenti.

Gli esiti tessiturali ricavabili dalle indagini hanno inoltre consentito l'elaborazione della Carta Geologico Tecnica (tavola 2). Si rammenta che tale cartografia risulta un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. Lo studio di MS 2013 ha dunque elaborato una suddivisione di tutto il territorio comunale in aree a diversa litologia dei terreni sub affioranti, utilizzando come riferimento iniziale la <<Carta degli elementi geologici superficiali che possono determinare effetti locali>> della recente variante al PTCP in materia di rischio sismico (Provincia di Bologna, 2013). Tale cartografia distingue due settori, uno caratterizzato dalla presenza di "limi e argille" e una da "sabbie prevalenti". Lo studio di MS 2013 ha tuttavia consentito due ulteriori suddivisioni: la prima discrimina una stretta fascia lungo il tratto più meridionale del corso del Fiume Reno, caratterizzata da una prevalenza fin dai primi metri di ghiaie e ghiaie sabbiose; la seconda identifica terreni di riporto (eterogenei per definizione) di aree di cava attualmente già ripristinate/riempite.

Lo studio di MS 2016 si è pertanto basato sulla precedente caratterizzazione generale, apportando esclusivamente alcune lievi modifiche ai limiti delle aree con ghiaie sub affioranti e dei tombamenti di ex cava in alcuni settori interessati da approfondimenti (Longara; Lippo e la zona industriale "San Vitale").

In sintesi, i sedimenti sub affioranti del territorio di Calderara sono complessivamente ascrivibili

alle classi USCS/AGI denominate “SM” e “ML” e “GM” oltre che a terreni di riporto “RI”.

Le suddivisioni litologiche dei terreni di copertura appena descritte sono servite anche come base generale per la realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4), come già fatto per lo studio di MS 2013.

## 5.2 Tetto delle ghiaie, “conoide alluvionale” e sottosuolo profondo

Lo studio di MS 2013 ha ricostruito alla scala 1:10.000, con un buon dettaglio, le isobate del tetto delle prime ghiaie dalla superficie topografica, che sono state riportate anch'esse nella Carta geologico tecnica (tavola 2). Le misure di microtremore a stazione singola eseguite su tutta l'area comunale hanno permesso di identificare aree caratterizzate da un differente valore di frequenza fondamentale, correlabile in genere con il tetto delle prime ghiaie, quando la potenza dello strato ghiaioso è almeno di alcuni metri (vedi Carta delle frequenze naturali dei terreni, tavola 3). L'osservazione delle curve H/V ha permesso, inoltre, di individuare un'ampia zona, nella porzione sud-orientale dell'area comunale, caratterizzata da una maggiore ampiezza dei picchi (a frequenze comprese tra 3 e 13 Hz) e quindi un maggior contrasto di impedenza (punti di misura tematizzati in arancio e rosso nella tavola 3), dovuti alla presenza, al di sotto dei primi livelli limosi, di un potente orizzonte di ghiaie e ghiaie-sabbiose ben addensate (Castellaro et al., 2005). Sulla restante porzione del territorio comunale, caratterizzata da picchi meno pronunciati o addirittura assenti in corrispondenza del tetto delle prime ghiaie, lo spessore e/o l'addensamento dell'orizzonte ghiaioso-sabbioso è più ridotto. Tale ricostruzione litostratigrafica è avvalorata dai dati dei sondaggi e dei pozzi per acqua più profondi.

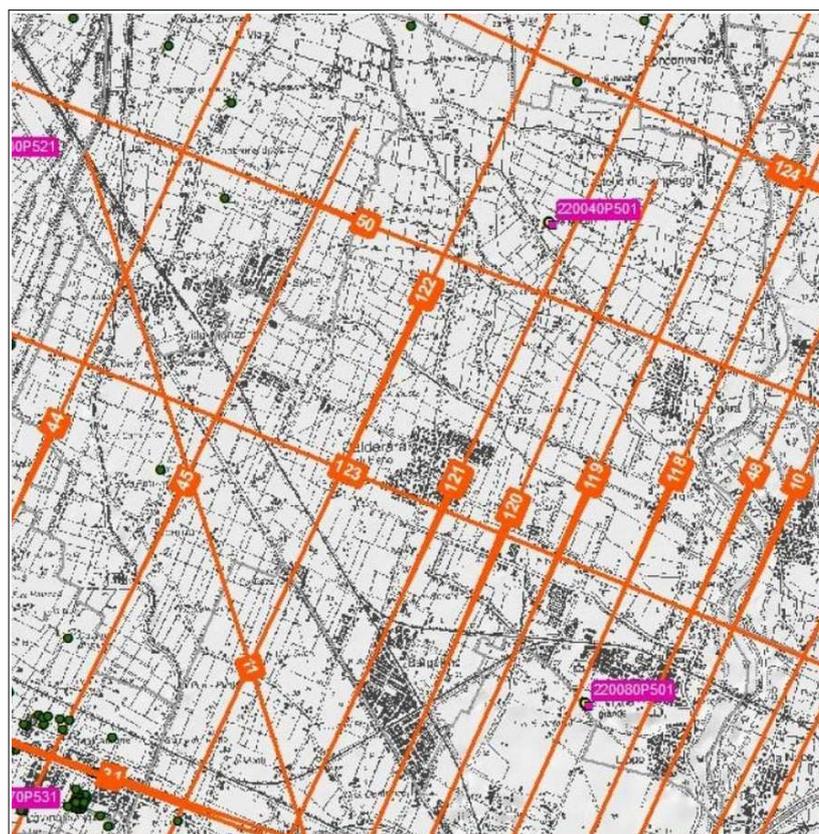
Sulla base di tali evidenze, lo studio di MS 2013 ha potuto distinguere nella Carta geologico tecnica un'area definita di “conoide alluvionale” (caratterizzata da maggiori contrasti di impedenza), che può non coincidere con il conoide identificato nelle diverse carte geomorfologiche disponibili, ognuna delle quali peraltro propone limiti diversi (Provincia di Bologna, 2013; Franchi, 2008; Bergonzoni e Elmi, 2003; Regione Emilia-Romagna, 1999; Castiglioni, 1997). Come già spiegato nella Relazione di MS 2013, per lo scopo dello studio di microzonazione sismica, infatti, non è fondamentale la definizione geomorfologica dei limiti del conoide, piuttosto è importante riuscire ad identificare una zona specifica con caratteristiche rilevanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie.

Per quanto riguarda il sottosuolo più profondo, i fondamentali 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 due sondaggi a carotaggio continuo del SGSS, spinti rispettivamente a -50,6m (sigla regionale 220040P501, eseguito a SE di Castel Campeggi) -70 m (sigla 220080P501, tra Lippo e la zona industriale San Vitale”), numerose sezioni geologiche e più profondi “pozzi per acqua”, le cui stratigrafie sono state incluse nella B/D geognostica regionale.

La figura 5.1 riporta la localizzazione planimetrica delle sezioni geologiche profonde elaborate e pubblicate dalla Regione Emilia-Romagna (SGSS). Anche questi dati risultano di fondamentale supporto per l'elaborazione dei modelli sismostratigrafici, sia per le valutazioni di RSL semplificata (abachi regionali) e sia per le simulazioni numeriche eseguite per questo studio. Per questo motivo, nella Carta Geologico Tecnica (tavola 2) sono state aggiunte anche le

seguenti sezioni RER:

- n.11 (denominata per questo lavoro con la sigla C-C' e di riferimento per le località Tavernelle e Sacerno);
- n. 45 (siglata D-D' e di riferimento per Longara e ZI "Bazzane");
- n. 50 (siglata E-E' e di riferimento per Longara);
- n. 119 (siglata F-F' e di riferimento per ZI S. Vitale; Longara e Castel Campeggi);
- n. 120 (siglata G-G' e di riferimento per Bargellino e Castel Campeggi);



*Figura 5.1 - Tracce delle sezioni geologiche che attraversano il territorio comunale di Calderara di Reno (sezioni pubblicate nel sito del SGSS regionale)*

Dal punto di vista più propriamente sismostratigrafico, le indagini geofisiche MASW eseguite per lo studio di MS 2013 di Calderara di Reno hanno evidenziato come la velocità dei livelli di ghiaia più superficiali normalmente non raggiunge i 500 m/s e tuttavia tali indagini non hanno permesso la valutazione delle Vs del sottosuolo oltre i 25÷35 metri di profondità per i limiti strumentali di tali indagini. Per tentare un'investigazione sismostratigrafica a maggiore profondità, lo studio di MS 2016 ha previsto l'esecuzione di 4 stendimenti SPAC/ESAC (Capoluogo; Bargellino; Longara; Tavernelle) e un sondaggio che ha permesso l'esecuzione di una prova sismica in foro "Down-Hole". La prova DH, eseguita fino a -35 metri, ha evidenziato la presenza di ghiaie ciottolose a sud del Capoluogo con Vs che raggiungono i 500 m/s alla profondità di circa -30 metri per poi ridivenire meno "rigide" fino a fine prova (ghiaie con matrice fine più abbondante?). La figura 5.2 propone la sovrapposizione grafica degli esiti di Vs della prova DH e della prova ESAC eseguita nel Capoluogo (stesso sito). Quest'ultima consente una stima dell'incremento ponderato di Vs nel sottosuolo, evidenziando a sua volta esiti di Vs che raggiungono un discreto grado di rigidità (600 m/s) a circa 90÷100 metri di profondità.

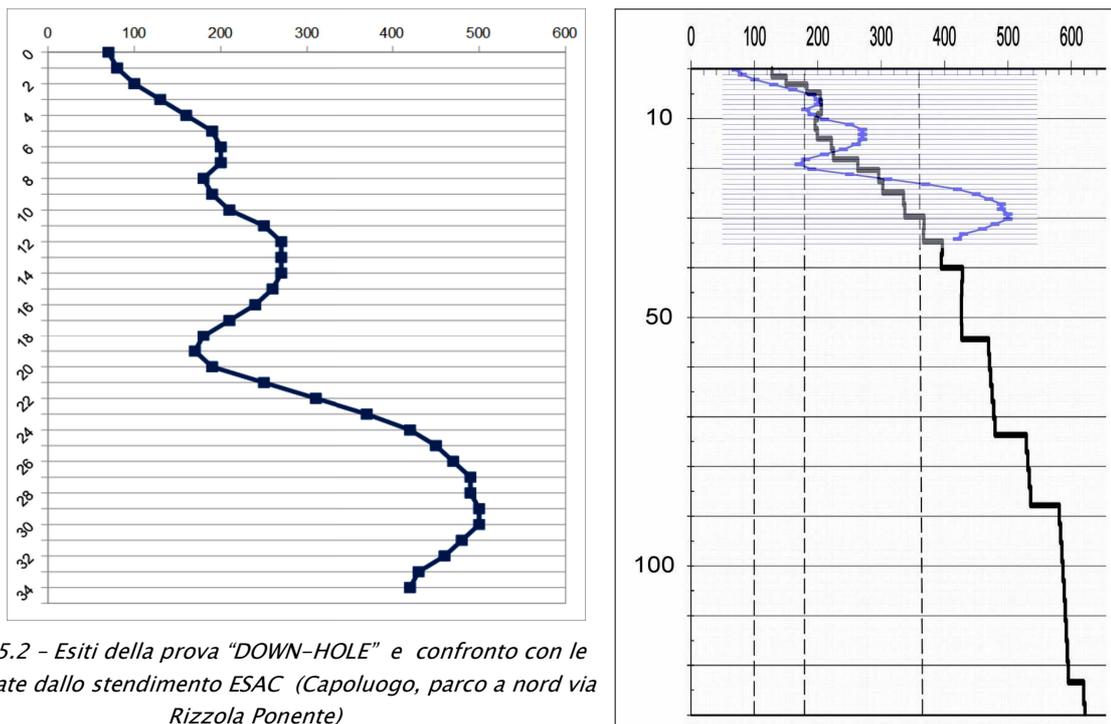


Figura 5.2 – Esiti della prova “DOWN-HOLE” e confronto con le Vs ricavate dallo stendimento ESAC (Capoluogo, parco a nord via Rizzola Ponente)

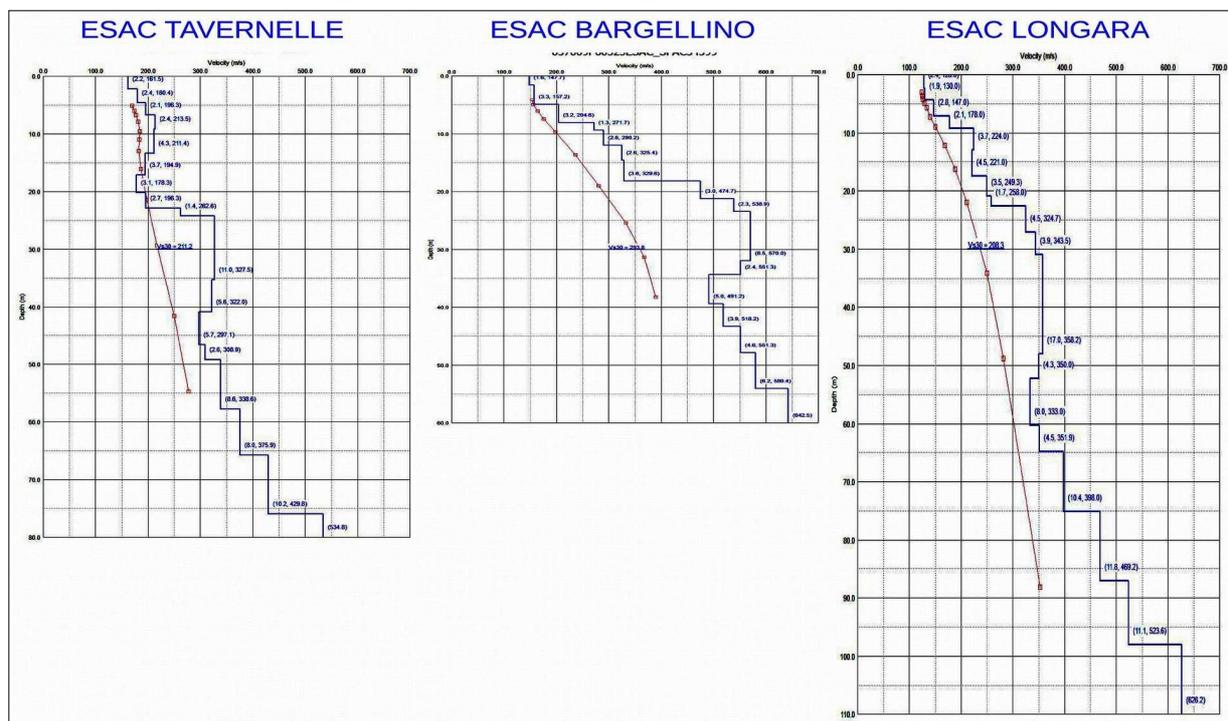


Figura 5.3 – Esiti delle altre prove ESAC eseguite nel territorio comunale

Anche la prova ESAC eseguita a Bargellino evidenzia ghiaie poco profonde con esiti di Vs che raggiungono i 550÷575 m/s alle medesime profondità dello spessore granulare del Capoluogo. La prova ESAC eseguita a Tavernelle ha consentito una migliore stima delle velocità di taglio dei sedimenti profondi oltre -20 metri e fino a una profondità fino a circa 70 metri. L'esito di Vs30 pari a 211 m/s evidenzia la presenza di sedimenti prevalentemente fini entro tale intervallo di sottosuolo. Nel complesso, per il territorio di Calderara sono dunque disponibile un buon numero di punti di controllo della Vs nel sottosuolo (figura 5.4)



Figura 5.4 - Stralcio della cartografia delle Vs e localizzazione delle indagini geofisiche nel Capoluogo ed esiti di Vs30 ricavati dalle prove (di repertorio ed eseguite per lo studio di MS)

Alle numerose registrazioni HVSr eseguite nel territorio comunale per lo studio di MS 2013 si aggiungono le 10 registrazioni HVSr eseguite con lunghi tempi di acquisizione (50'÷60'). Queste prove sono risultate di fondamentale importanza per la definizione delle zone omogenee di RSL, inoltre per lo studio di MS 2016 sono state utilizzate come ulteriore dato di controllo e/o confronto per l'elaborazione dei modelli sismostratigrafici relativi alle simulazioni numeriche della RSL. In tal senso, si rimanda al Capitolo 7 per ulteriori e elementi descrittivi degli esiti di HVSr e per gli esiti di RSL.

Ulteriori elementi conoscitivi del sottosuolo sono ricavati dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo per lo studio di MS 2016. Questa terebrazione, spinta fino a -35 m slm, ha consentito sia una migliore caratterizzazione tessitura 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 7), per l'elaborazione dei modelli numerici di RSL del Capoluogo e degli areali limitrofi. 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 (figura 5.5). Le proprietà dinamiche dei granulari sono invece ricavate da fonti bibliografiche (cfr. Capitolo 7)

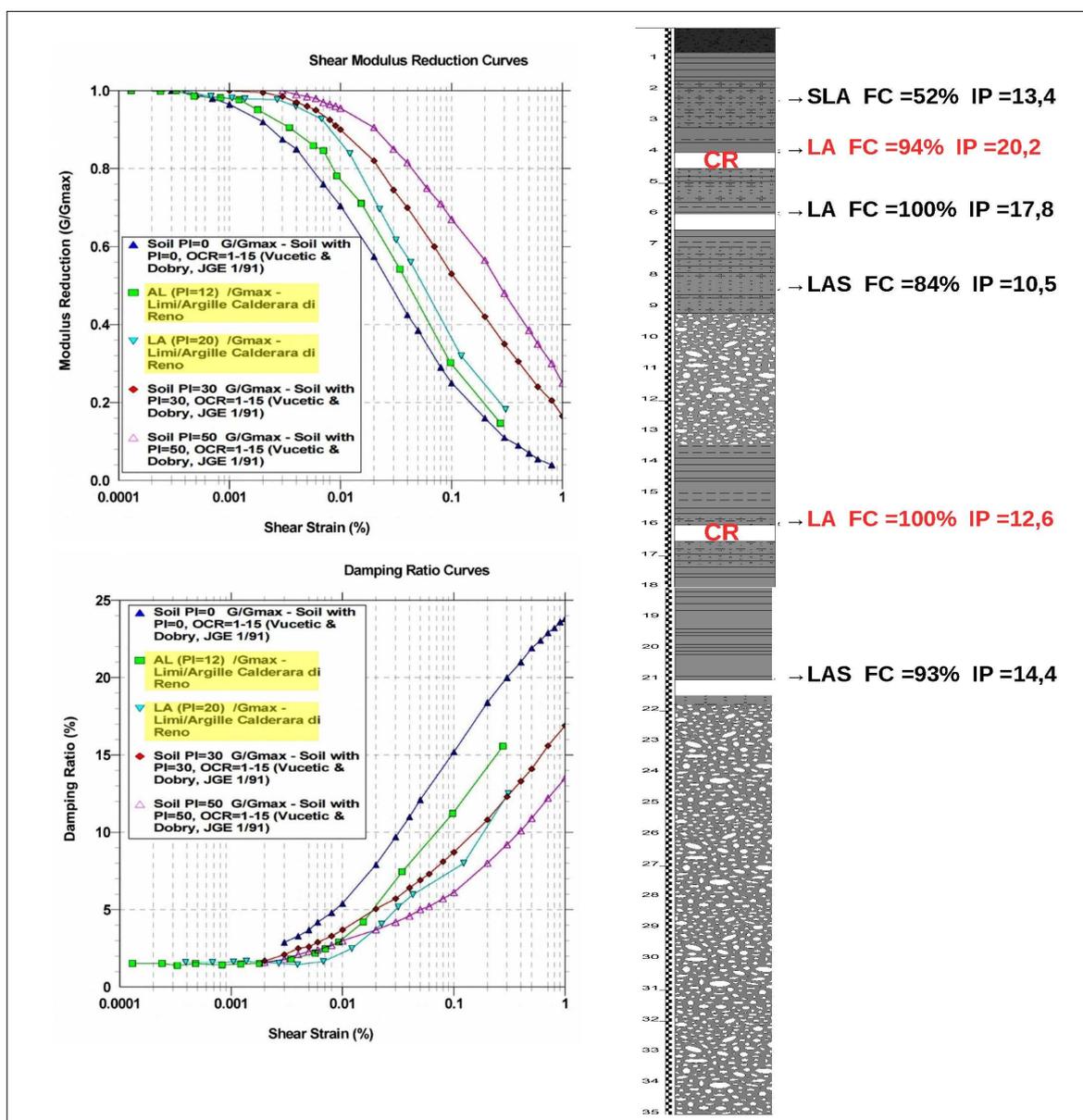


Figura 5.5- A dx: colonna stratigrafica del sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo. Si riportano gli esiti delle prove di laboratorio (caratterizzazione geotecnica) e i punti di prelievo dei campioni indisturbati oggetto di prove di "colonna risonante". A sx: le curve di decadimento dei sedimenti argillosi/limosi di riferimento per le modellazioni numeriche della RSL di Calderara di Reno. (in evidenziato le curve sito specifiche per IP = 12 e IP = 20)

## 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 la Relazione redatta per studio di MS di “livello 2” (G. Tarabusi, 2013) descrive i principali elementi di incertezza riscontrati nell'elaborazione del lavoro: questi argomenti vengono nuovamente ripresi nei successivi paragrafi, in quanto trattasi di elementi essenziali per gli approfondimenti sulla pericolosità sismica espletati con questo ulteriore studio.

### 6.1 Substrato rigido e la modellazione di RSL

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.

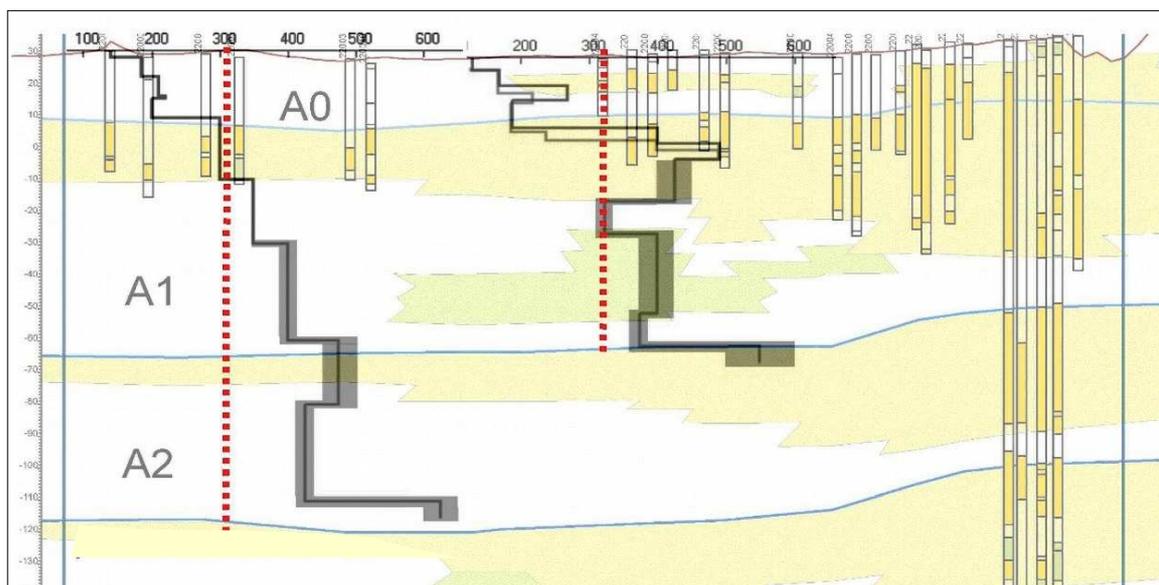
Riprendendo quanto già spiegato nello studio di MS 2013, per la porzione di pianura in esame non risulta semplice identificare univocamente una o più superfici che possano corrispondere al substrato rigido. La distribuzione delle ghiaie sul territorio e la profondità del tetto del primo orizzonte rispetto alla superficie topografica non sono ovunque coerenti con i picchi in frequenza e le loro ampiezze, poiché entrano sicuramente in gioco fattori variabili arealmente quali lo spessore, la granulometria e l'addensamento della facies ghiaiosa. Inoltre, dai risultati delle indagini MASW (MS 2013), la velocità dei livelli di ghiaia più superficiali normalmente non raggiunge i 500 m/s. Per queste ragioni, perlomeno in larga parte del territorio comunale, il tetto delle ghiaie non può essere considerato il bedrock sismico di riferimento.

Molte delle misure di microtremore eseguite e analizzate per lo studio di MS 2013 hanno evidenziato un picco, quasi sempre poco pronunciato, a frequenze comprese tra 0,75 e 1,2 Hz, che può essere correlato con la superficie che separa gli acquiferi A1 e A2 (cfr. capitolo 4), corrispondente alla base del Pleistocene superiore (125.000 anni) e che nell'area si rinviene a profondità variabili tra i 75 (sud-est) e i 110÷115 metri (nord-ovest, es. areale di Castel Campeggi) e corrispondente al tetto dell'unità alluvionale AES6. Secondo lo studio di MS 2013, questo orizzonte, pressochè continuo in tutta l'area di studio e che origina un picco ricorrente alle basse frequenze, potrebbe rappresentare, per l'intero territorio comunale, il substrato rigido di riferimento, sebbene sia ipotizzabile che anch'esso risulti caratterizzato da valori di  $V_s$  inferiori a 800 m/s.

Per consentire un'ulteriore caratterizzazione della RSL gli studi di MS 2016 hanno implementato ulteriori dati bibliografici di sottosuolo (sezioni geologiche RER) e, soprattutto, sono state eseguite ulteriori indagini geofisiche finalizzate alla caratterizzazione sismostratigrafica più profonda dei depositi alluvionali di Calderara di Reno (stendimenti ESAC; prova “Down-Hole” nel Capolugo; registrazioni HVSR prolungate fino a 50'÷60'. Le prove ESAC sono state eseguite in contesti litostratigrafici differenti, per fornire dati di riferimento riguardo le successioni

ghiaiose di “conoide” del Reno ancora relativamente potenti, ciottolose e rigide (es. Bargellino) e riguardo le sequenze ghiaiose del Reno più distali (es. Capoluogo e Longara). Tali prove hanno permesso la stima ancora sifficientemente attendibile delle velocità di onde sismiche  $V_s$  fino a profondità di 50÷60 metri. La prova ESAC eseguita a Tavernelle in un contesto litostratigrafico caratterizzato da coperture prevalentemente fini di maggior spessore ha consentito di investigare profondità fino a circa 70 metri. Infine, la prova ESAC eseguita nel Capoluogo, supportata dai dati diretti della limitrofa prova in doro “Down-Hole” ed elaborata dal prof. N. Abu Zeid (Università di Ferrara) ha consentito di stimare il tendenziale incremento di rigidità del sottosuolo fino ad una profondità spinta a circa 120÷130 metri.

Questi ulteriori dati sono risultati di fondamentale supporto per la modellazione di RSL numerica proposta negli areali urbanizzati/urbanizzabili ancora privi di RSL (classificati come “zone suscettibili di instabilità” nello studio di MS 2013) e come meglio descritto nel Capitolo 7. Si può anticipare (rimandando a quanto scritto nel Capitolo 7) che le elaborazioni dei modelli numerici concordano con l'attribuire il “pseudo bedrock” sismico al tetto dell'unità alluvionale AES6 in ampie porzioni del territorio di Calderara di Reno dati di sottosuolo, tuttavia verso il limite comunale N-NE (es. Tavernelle e Sacerno) il miglior modello sismostratigrafico si ricava con un ulteriore approfondimento fino alla base dell'unità AES6 cioè fino alla base dell'ultimo ciclo deposizionale del Pleistocenico medio (circa -140 m a Tavernelle).



*Figura 6.1 - Stralcio sezione geologica RER n. 123 (A-A') sviluppata in direzione est-ovest e modelli sismostratigrafici rappresentativi del Capoluogo (a est) e di Tavernelle (a ovest)*

La figura figura 6.1 propone uno stralcio della sezione RER n.123 (A-A'), realizzata per il Progetto Conoide Reno sovrapponendo ad essa le sismostratigrafie schematiche dei modelli sismostratigrafici rappresentativi del Capoluogo (a est) e di Tavernelle (cioè al limite ovest del territorio comunale). In conclusione, si evince come la variabilità tessiturale del complessivo spessore alluvionale dell'unità AES6 e la relativa variabilità della rigidità dei suoi sedimenti imponga un generale approfondimento delle modellazioni sismostratigrafiche da est verso ovest, cioè allontanandosi dai depositi della “conoide” ghiaiosa-ciottoleosa sepolta del Reno.

## 6.2 Liquefacibilità

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>4</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 2013 ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali

---

<sup>4</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.

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 urbanizzato/urbanizzabile è compresa tra 1 metri e 4,0 metri (es. Longara). La soggiacenza piuttosto modesta che caratterizza tutta l'area di studio, è chiaramente riconosciuta come una delle fondamentali condizioni predisponenti la liquefacibilità. In conclusione, lo studio di MS 2013 ha individuato ampie zone potenzialmente liquefacibili, in particolare nel Capoluogo, a Lippo e Bargellino si rinvennero, anche entro i primi 10 metri di profondità, diffusi livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi, organizzati in corpi di spessore variabile, a geometria lenticolare, con frequenti brusche chiusure laterali.

Per questo motivo, le indagini espletate per lo studio di MS 2016 ha previsto l'esecuzione di 8 ulteriori prove CPTU nelle zone classificate instabili per potenziale liquefacibilità. Si è potuto inoltre disporre di altre 9 prove CPTU con dati numerici disponibili. Vista la complessa situazione litostratigrafica di Calderara e l'ampiezza delle zone potenzialmente liquefacibili, si sono tuttavia considerati i dati numerici di altre 14 prove penetrometriche, seppur meccaniche (CPT), per consentire una migliore analisi della pericolosità (31 punti di controllo complessivi) e permettere di classificare gli areali di studio secondo differenti "zone pericolosità" per liquefazioni (cfr. Capitolo 7)

Occorre tuttavia precisare che i metodi semplificati di stima del potenziale di liquefazione da prove penetrometriche statiche si basano esclusivamente sulla sperimentazione con prove elettriche CPTE/CPTU. Gli esiti ricavati dalle prove CPT possono risultare anche significativamente differenti e, spesso, poco cautelativi, come le più recenti esperienze successive al terremoto dell'Emilia 2012 hanno evidenziato: ciò è da imputare soprattutto alla differente geometria delle due punte. Ciò detto, la stima dell'Indice di Liquefazione ottenuta da prove CPT è stata calcolata considerando input più cautelativi rispetto alle prove CPTU (cfr. Capitolo 7).

## 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 e/o semplificate (abachi)
- 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 Calderara di Reno, lo studio sismico di “Livello 3” ha permesso un ulteriore approfondimento della microzonazione sismica già elaborata nel 2013. Lo studio di MS 2013 aveva infatti consentito l'elaborazione della cartografia delle MOPS, individuando “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali” e “zone suscettibili di instabilità” sulla base di approfondimenti di tipo qualitativo (zone potenzialmente liquefacibili e aree di cava tombata). Non sono state invece individuate “zone stabili”. Lo studio espletato nel 2013 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, e in particolare negli areali classificati come “zone suscettibili di instabilità”. Gli ulteriori studi di “livello 3” hanno tuttavia permesso di aggiornare la cartografia MOPS come prevedono gli Standard di MS, v.4.0. Lo studio di MS 2016 ha inoltre consentito, come vedremo, di elaborare le cartografie di microzonazione sismica di “livello3”, attribuendo a parte delle zone i fattori di amplificazione locali calcolati sulla base di modellazioni numeriche di RSL e ad altre zone i fattori di amplificazione ricalcolati sulla base della metodologia semplificata indicata dalla Regione Emilia-Romagna (cfr. DGR 1227/2015).

Le carte di MS di “livello 3” del Comune di Calderara di Reno 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 Calderara di Reno.

## 7.2 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di 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 Calderara 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, 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. La figura 3.1 localizza, invece le aree oggetto di specifiche modellazioni numeriche di RSL.

Tabella 7.1 – Areali urbani/urbanizzati interessati dalla microzonazione sismica

<b>AREALI</b>	<b>METODOLOGIE DI ELABORAZIONE DELLA RSL</b>
Capoluogo	Analisi numeriche (SHAKE 2000)
ZI “Bargellino”	Analisi numeriche (SHAKE 2000) e abachi RER (DGR 1227/2015)
Lippo/ZI “San Vitale”/Fabbreria	Abachi RER (DGR 1227/2015)
Longara	Analisi numeriche (SHAKE 2000) e abachi RER (DGR 1227/2015)

<b>AREALI</b>	<b>METODOLOGIE DI ELABORAZIONE DELLA RSL</b>
Castel di Campeggi	Analisi numeriche (SHAKE 2000)
Sacerno	Analisi numeriche (SHAKE 2000)
Tavernelle/ZI "Bazzane"/ZI "Via Verde"	Analisi numeriche (SHAKE 2000) e abachi RER (DGR 1227/2015)

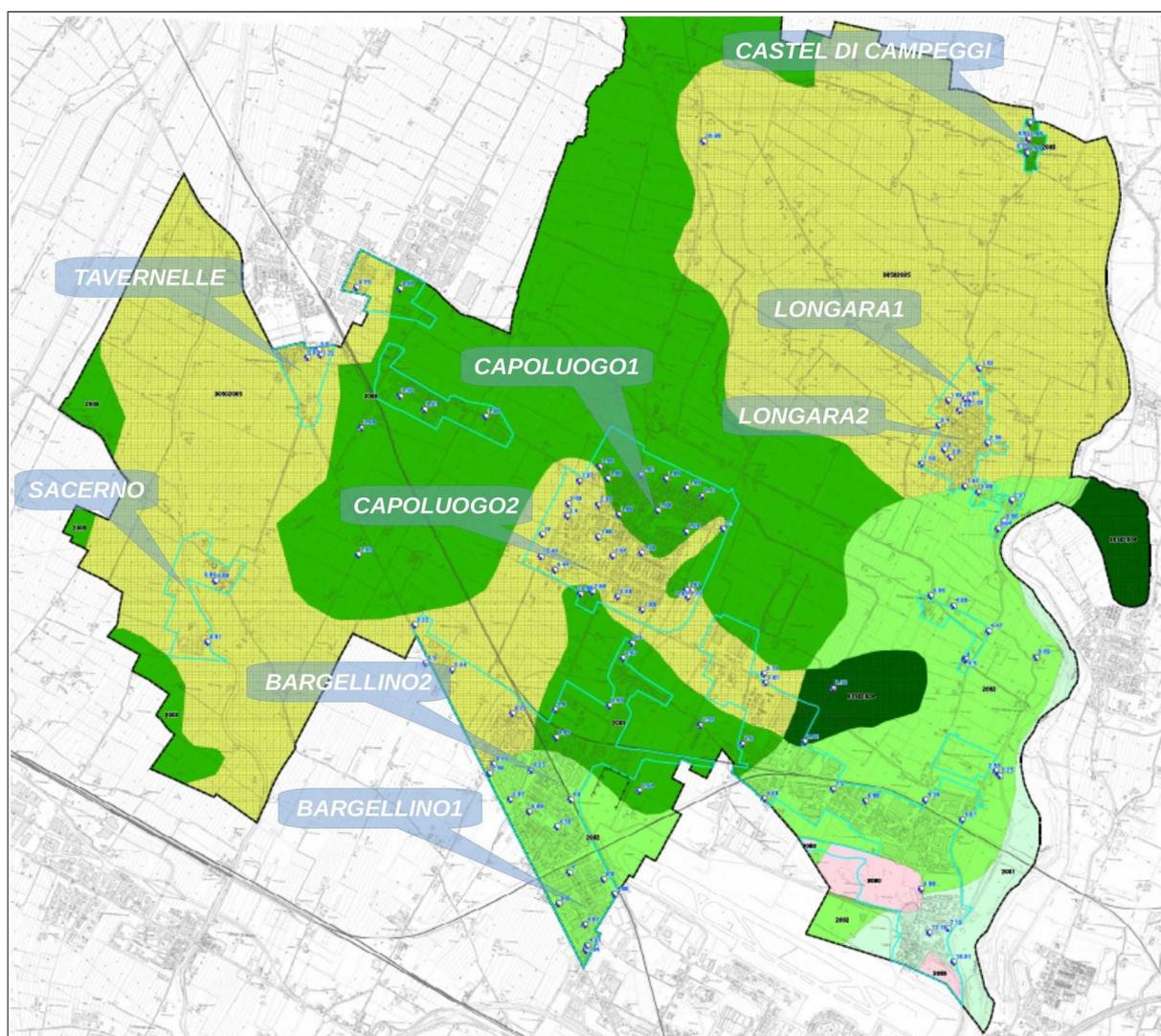


Figura 7.1 - Localizzazione dei modelli numerici di RSL elaborati sulla cartografia MOPS (MS 2016)

Nei casi di **calcolo della RSL semplificata**, 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). Per questo motivo, sono stati ricalcolati i fattori di amplificazione già attribuiti alle zone sismiche con lo studio di MS 2013 (calcolati con i precedenti abachi indicati nella DAL 112/2007). Il ricalcolo, ha ovviamente tenuto conto del modello di sottosuolo locale già definito con lo studio di MS 2013 e degli ulteriori elementi emersi con questo studio.

Nei casi di **calcolo della RSL ottenuta da modellazione numerica**, le analisi 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 (modello di sottosuolo). Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato (figura 7.1):

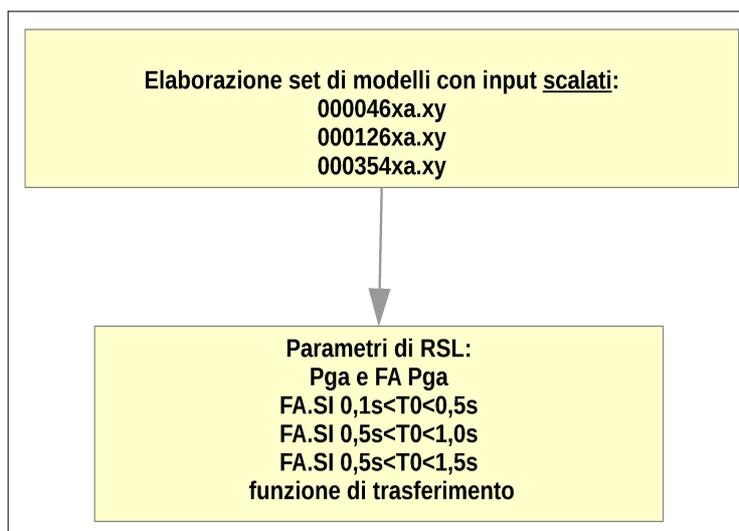


Figura 7.1 - Diagramma di flusso delle analisi numeriche di RSL

Le elaborazioni numeriche hanno implementato i tre accelerogrammi di riferimento per la Regione Emilia-Romagna: si tratta di input selezionati dalla Banca Dati accelerometrica ISESD compatibili con la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali, rappresentativi di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.2):

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

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°), ovvero rappresentativi 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,II NTC 2008).

Ciò detto, per tutti gli areali di Calderara di Reno interessati da modellazione numerica di RSL, la  $a_{refg}$  ricavabile dal reticolo INGV è risultata piuttosto omogenea (0,164÷0,165g).

Per ricavare ulteriori elementi relativamente alle “funzioni di trasferimento” (in particolare nel caso di scuotimenti sismici caratterizzati da livelli energetici più bassi), si sono elaborate modellazioni numeriche utilizzando accelerogrammi riscaldati anche al livello di pericolosità probabilistica dello “Stato Limite Operativo” (SLO) come definito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2008).

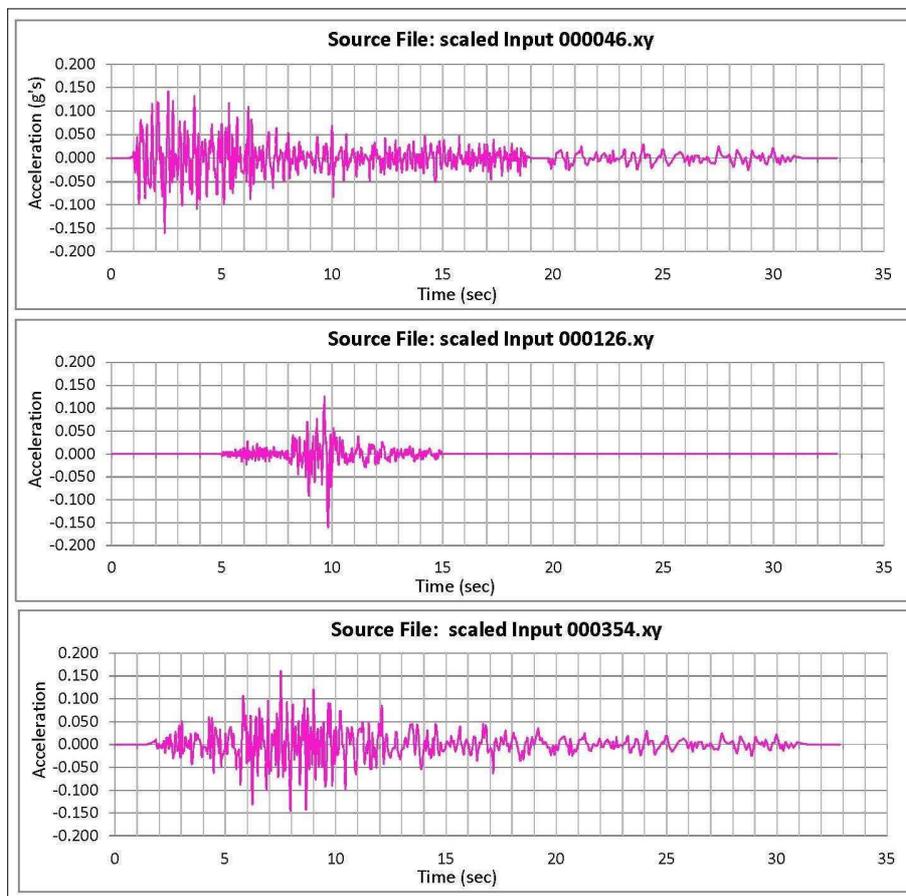


Figura 7.2 – Accelerogrammi scalati di riferimento per il Capoluogo, utilizzati per la modellazione numerica di RSL ( $a_{refg} = 0,165 g$ )

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 il bedrock sismico, 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 anche ai precedenti capitoli e ai successivi paragrafi per una più dettagliata spiegazione delle singole modellazioni sismostratigrafiche.

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 Vs), 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 effettuate su campioni di sedimenti fini prelevati nel sondaggio del Capoluogo (indici di plasticità; colonna risonante). Per 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 decadimento di Seed & Idriss (1970) per sabbie, Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi rispettivamente e ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (figura 7.3).

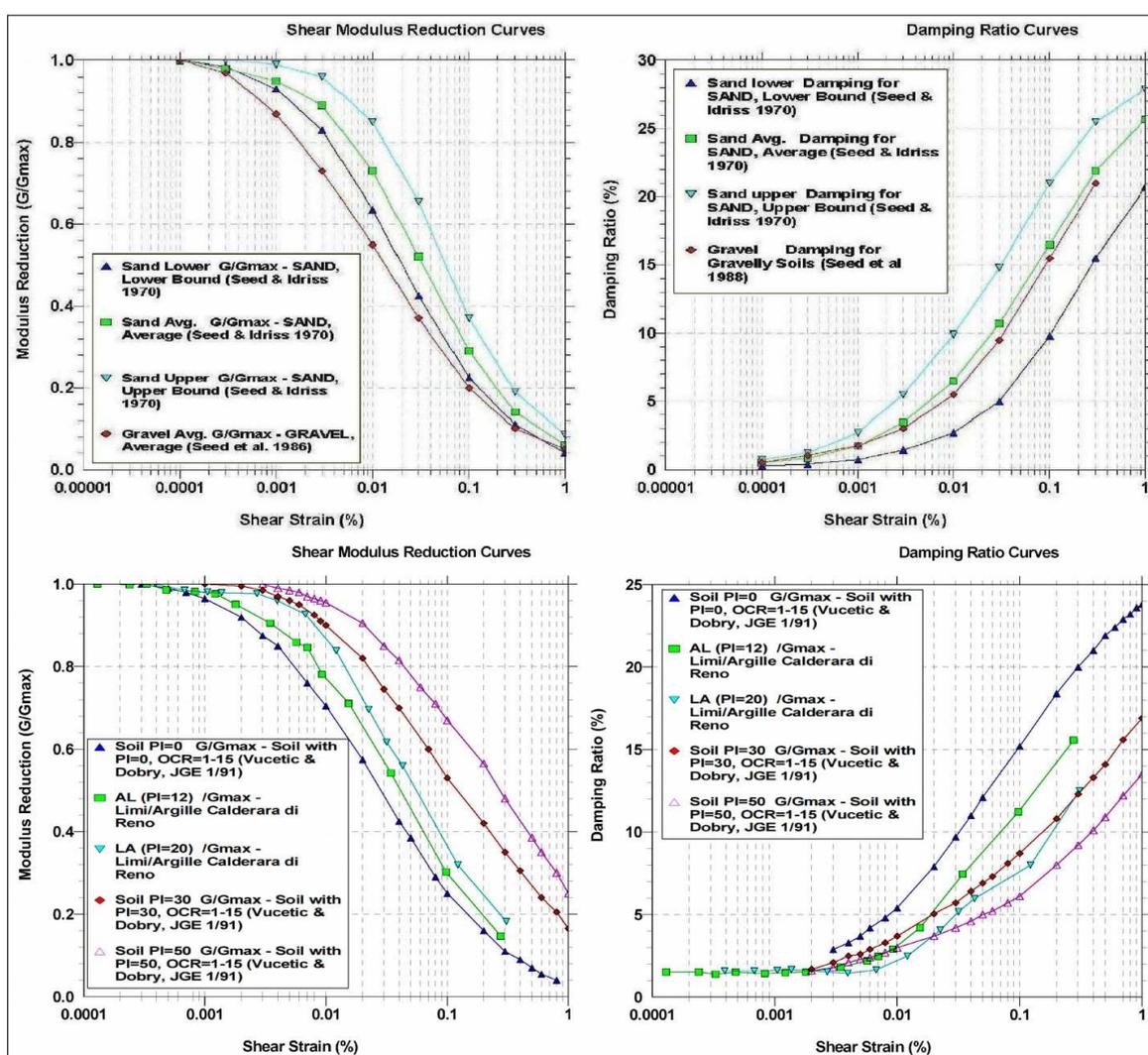


Figura 7.3- Curve di decadimento utilizzate per le modellazioni numeriche di RSL di Calderara di Reno

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. Inoltre, Tutte le simulazioni hanno considerato un modello sismostratigrafico di riferimento medio per la porzione di areale considerato.

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  $F_a P_g$
- B) i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento)
- 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 $F_a P_g$

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale  $F_a P_g$  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. In questo senso, le schede di sintesi dei modelli numerici allegate in calce alla Relazione riportano graficamente l'andamento delle accelerazioni orizzontali per i tre input sismici di riferimento e la tabella con i valori rappresentativi di  $P_g$  e di  $F_a P_g$ . I valori di  $P_g$  e  $F_a P_g$  al suolo assunti come rappresentativi per la RSL sono ricavati come valore medio ricavato dai tre input sismici.

#### B) RAPPORTI SPETTRALI DI AMPLIFICAZIONE (FUNZIONE DI TRASFERIMENTO)

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.

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").

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.

In calce alla Relazione, si allegano le schede di sintesi dei modelli numerici di RSL, che riportano il modello sismostratigrafico e i dati di output sopra descritti.

Nei seguenti paragrafi, per una migliore comprensione, vengono tuttavia descritte e motivate le metodologie di elaborazione e i risultati per ogni areale oggetto di studio della MS (semplificata e/o numerica).

#### *7.3.2 Areale Capoluogo*

Per l'areale relativo al Capoluogo, lo studio di MS 2013 ha avuto disponibilità di un buon numero di indagini geognostiche, in particolare penetrometrie CPT, CPTE/CPTU, inoltre numerose registrazioni HVSR e stendimenti sismici MASW. Molte penetrometrie risultano approfondite fino a “rifiuto” strumentale, evidenziando la presenza di uno “sheet” ghiaioso/sabbioso impenetrabile e pressoché continuo in tutto l'areale, a circa 20÷23 metri, con un blando approfondimento verso nord (-23÷24 m).

Alcune indagini hanno evidenziato un ulteriore intervallo ghiaioso-sabbioso meno profondo (tetto a circa -9 m), nella parte sud-ovest del Capoluogo, anch'esso impenetrabile dalle prove penetrometriche eseguite in quel settore. Quest'ultimo intervallo granulare, tende rapidamente a ridursi di spessore ed a sfumare in sabbie e sabbie limose nella parte nord del Capoluogo. Il sondaggio a carotaggio continuo, eseguito per lo studio di MS 2016 nella parte sud del Capoluogo, ha attraversato le citate ghiaie più superficiali (con presenza anche di ciottoli) da circa -9 metri fino a circa -13,5 metri, per poi individuare il tetto del sottostante spessore ghiaioso a -22 metri dal p.c., queste ultime risultano pressoché continue fino a fine sondaggio.

La ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo fino a circa -35÷40 metri di profondità risulta dunque piuttosto dettagliata e supportata dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche. In tal senso, risultano molto utili gli esiti delle numerose registrazioni HVSR: gli spettri H/V evidenziano come, nel settore SO del Capoluogo, siano ben distinguibili alti spettrali a circa 2,4 Hz (con alcune prove anche caratterizzate da tracce privi di picchi H/V e/o

significativamente smorzati); nel settore N-NE, gli spettri H/V evidenziano alti spettrali prevalenti e ben distinguibili a circa  $1,8 \div 2,0$  Hz.

Si rammenta che il sondaggio eseguito per lo studio di MS 2016 ha inoltre fornito ulteriori informazioni relative agli strati fini sovrastanti le ghiaie (tessiture; indici di plasticità e relative curve di decadimento dinamiche da prove di “colonna risonante”), come meglio descritto nel Capitolo 5. Nel sondaggio è stata eseguita la misura diretta delle onde Vs/Vp con la prova in foro “Down-Hole”, che ha evidenziato ghiaie ciottolose dell'unità AES7 con Vs massime fino a circa 500 m/s (a quota -30 m circa); queste ghiaie non possono tuttavia essere ancora considerate “bedrock sismico” locale. Nella medesima area del sondaggio, è stato eseguito anche uno stendimento in “array” lineare ESAC per la stima delle Vs più profonde che evidenzia un tendenziale incremento della rigidità dei sedimenti in profondità, con Vs pari a  $550 \div 600$  m/s a circa  $90 \div 100$  m di profondità.

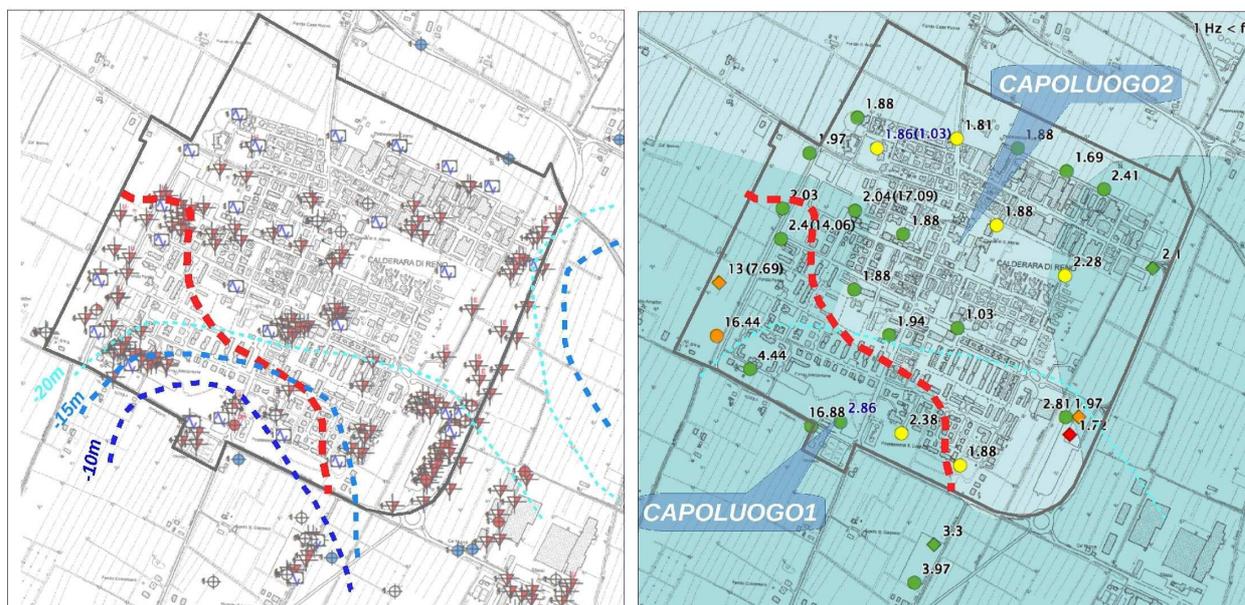


Figura 7.4 – A sx: isobate delle ghiaie e Carta delle Indagini (Tavola 1) con limiti della rappresentatività dei modelli sismostratigrafici elaborati per il Capoluogo (in tratteggiato rosso); a dx: il limite dei modelli è riportato sulla Carta delle Frequenze (Tavola 3)

Sulla base di questi dati, per il Capoluogo sono stati elaborati due modelli sismostratigrafici medi, denominati “Capoluogo1” (rappresentativo del settore SO dell'abitato) e “Capoluogo2” (settore nord), come schematizzato nella figura 7.4. Entrambi i modelli sono caratterizzati da uno “pseudo bedrock” sismico collocato a -90 metri, cioè al letto dell'unità alluvionale AES6 (figura 7.5), tuttavia con sismostrati superficiali differenti; in particolare, il modello “Capoluogo2” non prevede l'intervallo ghiaioso meno profondo rinvenuto nella parte SO del Capoluogo.

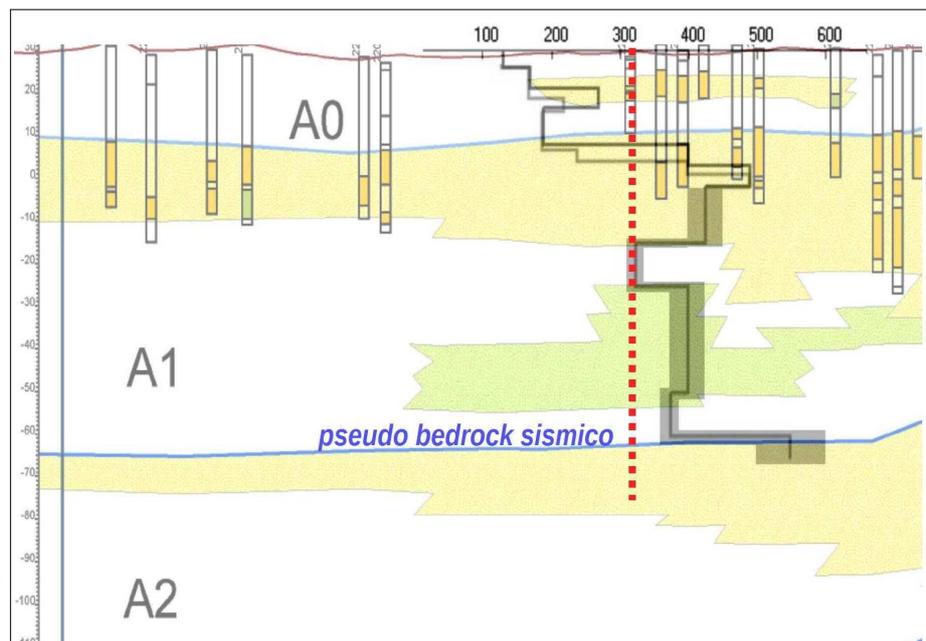


Figura 7.5 - Stralcio sezione geologica RER n. 123 (A-A') e modelli sismostratigrafici rappresentativi del Capoluogo

Come già descritto, gli esiti dei microtremori HVSr sono risultati di fondamentale importanza per l'elaborazione dei due modelli sismostratigrafici e in questo senso, la figura 7.6 propone il confronto di spettri H/V relativi ai due settori distinti del Capoluogo.

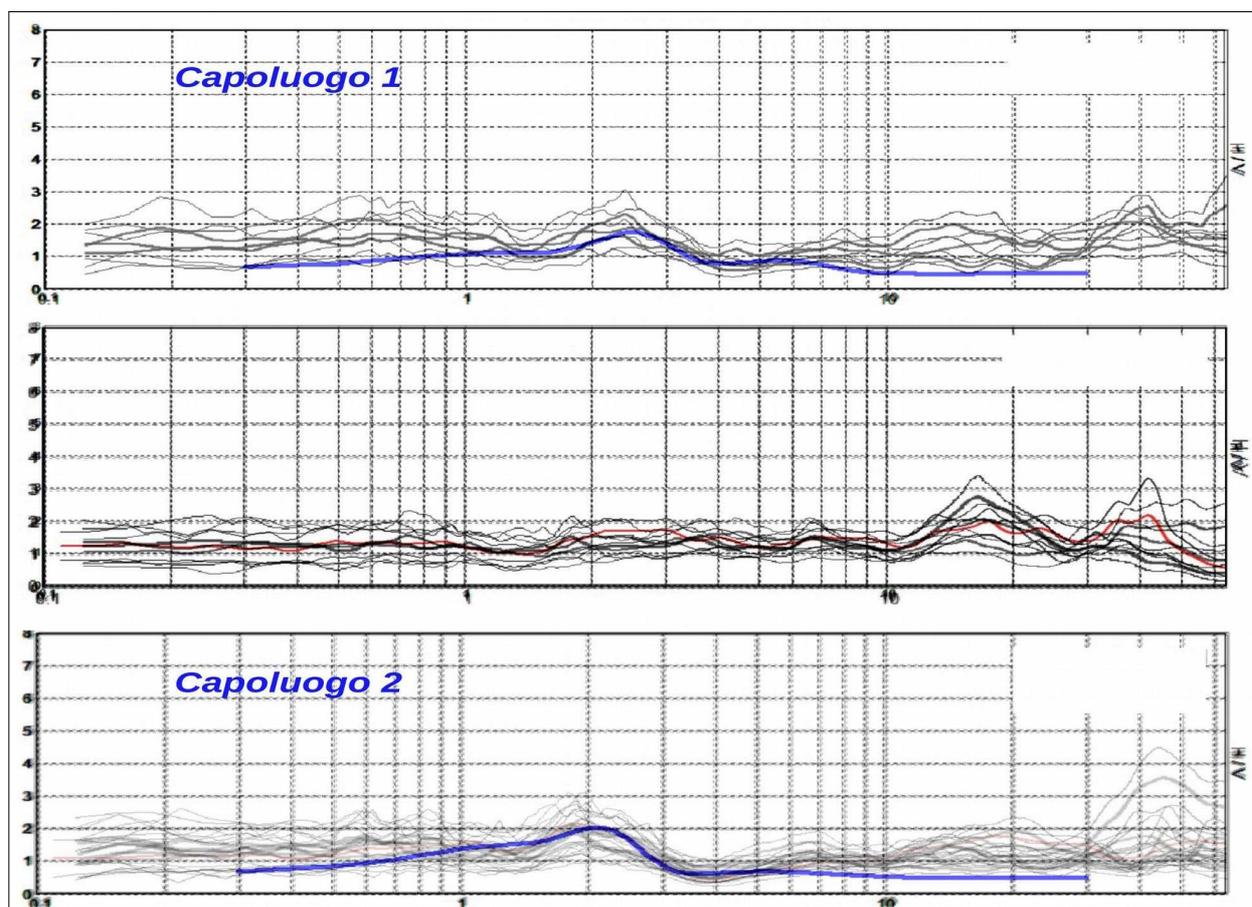


Figura 7.6 - Confronto tra spettri H/V rappresentativi del modello sismostratigrafico "Capoluogo1" (si riportano gli spettri privi di picchi significativi; in rosso è distinta la registrazione di 60' eseguita in prossimità del sondaggio e "Down-Hole") e del modello "Capoluogo2". In blu sono riportate le "curve sintetiche" dei modelli

La figura 7.7 riporta, infine, i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalle simulazioni numeriche di RSL con SHAKE 2000.

Si evince come gli spettri risultino relativamente simili, tuttavia le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo “Stato Limite di Danno” ( $a_g = 0,062g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSR (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

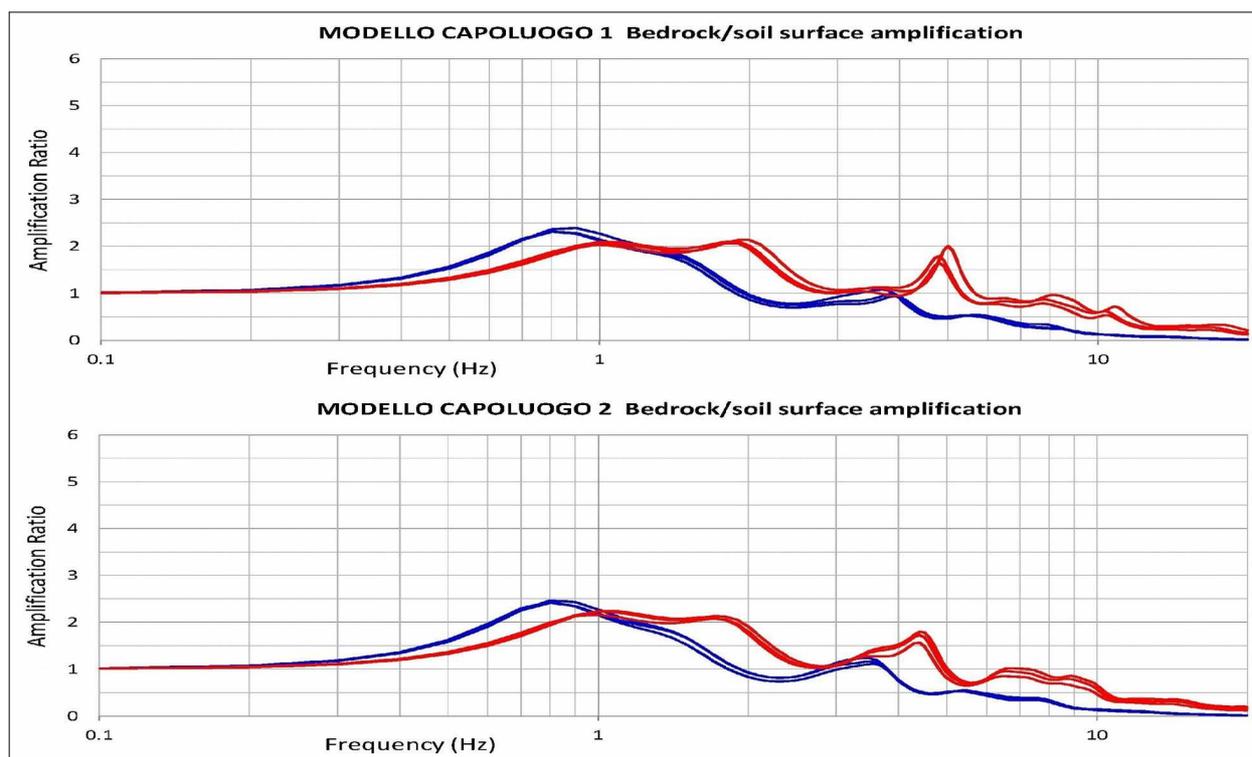


Figura 7.7 – Rapporti spettrali ottenuti dalle due simulazioni numeriche “Capoluogo1” e “Capoluogo2”. In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi riscaldati a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD – NTC 2008)

In calce alla Relazione, si riportano le schede di sintesi dei due modelli numerici relativi al Capoluogo, mentre la sottostante tabella riporta, in sintesi, gli esiti della RSL ricavati con il software SHAKE 2000:

<b>MODELLI SHAKE</b>	<b>PGA</b>	<b>FA PGA</b>	<b>FA SI 0,1_0,5s</b>	<b>FA SI 0,5_1,0s</b>	<b>FA SI 0,5_1,5s</b>
CAPOLUOGO1	0,231g	1,4	1,4	3,0	3,5
CAPOLUOGO2	0,244g	1,5	1,5	3,1	3,5

### 7.3.3 Areali ZI “Bargellino”

I dati di sottosuolo relativi alla zona industriale “Bargellino”, evidenziano la presenza di coperture alluvionali, prevalentemente fini, sovrastanti ghiaie del Reno. Lo studio di MS 2013 aveva sostanzialmente suddiviso l'areale in due principali contesti di RSL, in relazione alla

presenza di ghiaie meno profonde e continue (di un certo spessore e rigidità) e in relazione agli esiti delle numerose registrazioni HVSR eseguite; queste ultime evidenziano amplificazioni più marcate nello spettro H/V a frequenze medio-alte nel settore centrale e meridionale della zona industriale, mentre verso nord le amplificazioni H/V diventano significative e a frequenze tendenzialmente più basse. Le terebrazioni profonde e i sondaggi RER disponibili e in particolare quelle riportate nelle cartografie di MS con sigle B-B'; G-G' dimostrano che, nel settore meridionale di Bargellino, le sequenze ghiaiose del Reno risultano più potenti e con tessiture più ciottolose. Lo studio di MS 2013 ha inoltre riportato nella cartografia geologico tecnica le isobate del tetto delle ghiaie meno profonde e di spessore significativo: si è appurato un tendenziale aumento delle coperture fini verso Bargellino nord (le ghiaie vengono intercettate ad oltre -20 m di profondità). Verso N-NE si riscontrano, invece, livelli ghiaiosi del Reno più superficiali e recenti (anche a profondità minori di 10 metri), attribuibili all'unità alluvionale "AES8" ) ed estesi fino all'abitato di Calderara (settore sud), come descritto nel precedente paragrafo.

Ciò detto, le ulteriori indagini eseguite per lo studio di MS 2016 e in particolare l'esecuzione dello stendimento sismico ESAC (a Bargellino sud), delle due ulteriori CPTU (a sud e a nord) e delle due prove HVSR con tempi di acquisizione di 60' hanno consentito di elaborare due modelli di sottosuolo rappresentativi dei settori meridionali (modello "Bargellino1") e centrali ("Bargellino2"). La prova ESAC ha infatti consentito la stima attendibile delle velocità di taglio delle sequenze ghiaiose fino ad una profondità pari a circa -55 m, evidenziando per le ghiaie attribuite all'unità AES7 valori di  $V_s$  fino a circa 550 m/s (a profondità di -25÷30 metri) e un tendenziale incremento delle  $V_s$  a maggiori profondità, fino a circa 600 m/s a circa -55 metri.

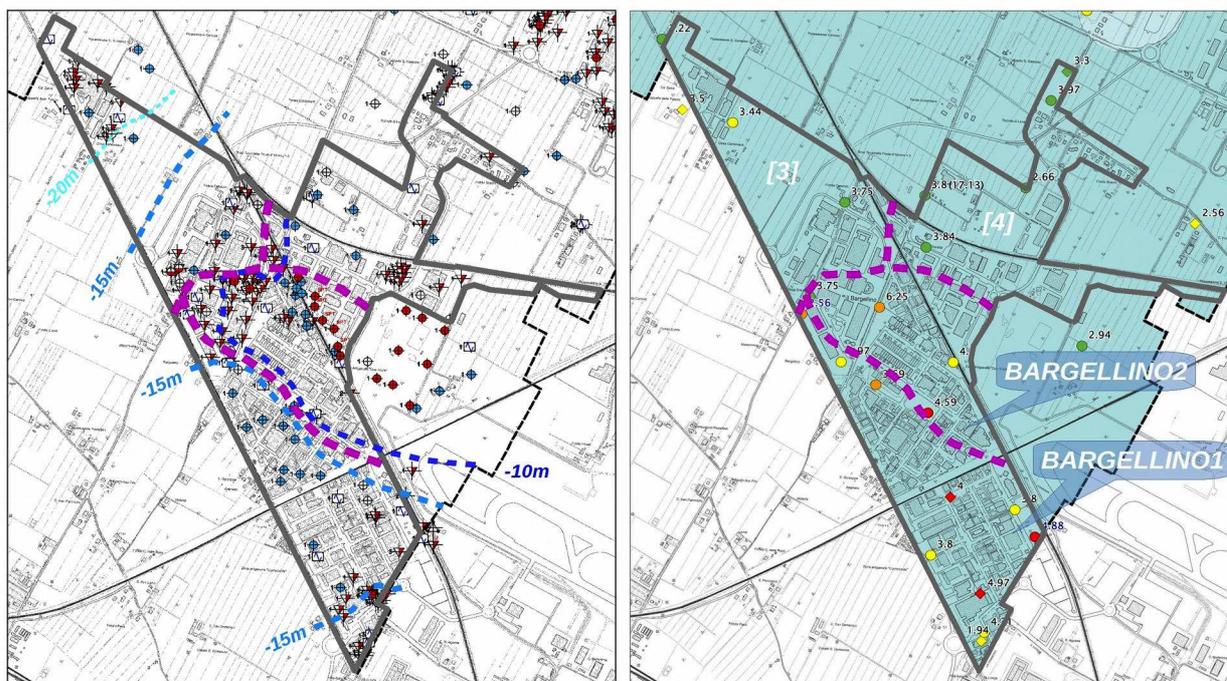


Figura 7.8 – A sx: isobate delle ghiaie e Carta delle Indagini (Tavola 1) con limiti della rappresentatività dei modelli sismostratigrafici elaborati per la ZI Bargellino (in tratteggiato rosso); a dx: il limite dei modelli è riportato sulla Carta delle Frequenze (Tavola 3). I numeri indicano i settori dell'areale caratterizzato da RSL semplificata (abachi RER)

La rappresentatività dei due modelli è inoltre relazionata alla profondità del tetto delle ghiaie meno profonde e agli esiti delle acquisizioni HVSR (figura 7.8).

I due modelli sono stati approfonditi, individuando per entrambi un “pseudo bedrock” sismico collocato a -80 metri, cioè al letto dell'unità alluvionale AES6 (figura 7.9), tuttavia con sismostrati superficiali differenti; in particolare, per il modello “Bargellino2” si è considerato anche l'intervallo ghiaioso più superficiale (tetto a circa -10 m) e recente (unità AES8).

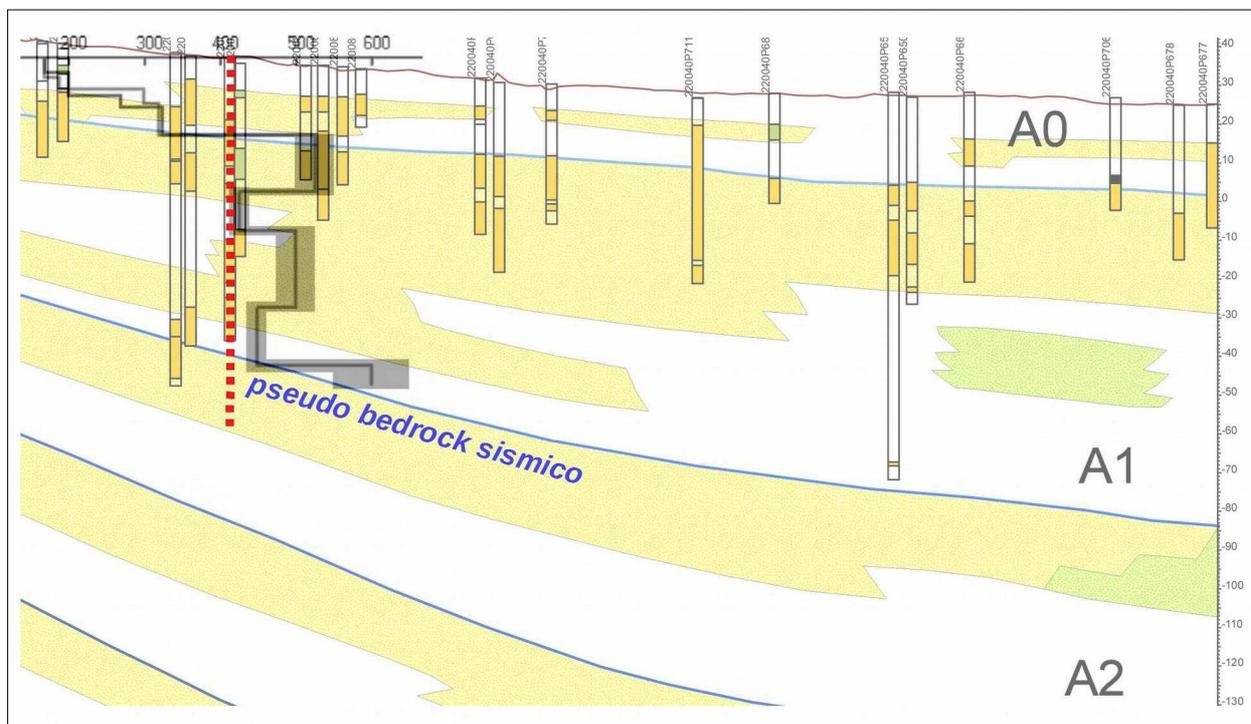


Figura 7.9 – Stralcio sezione geologica RER n. 120 (G-G') e modelli sismostratigrafici rappresentativi di Bargellino (settori sud)

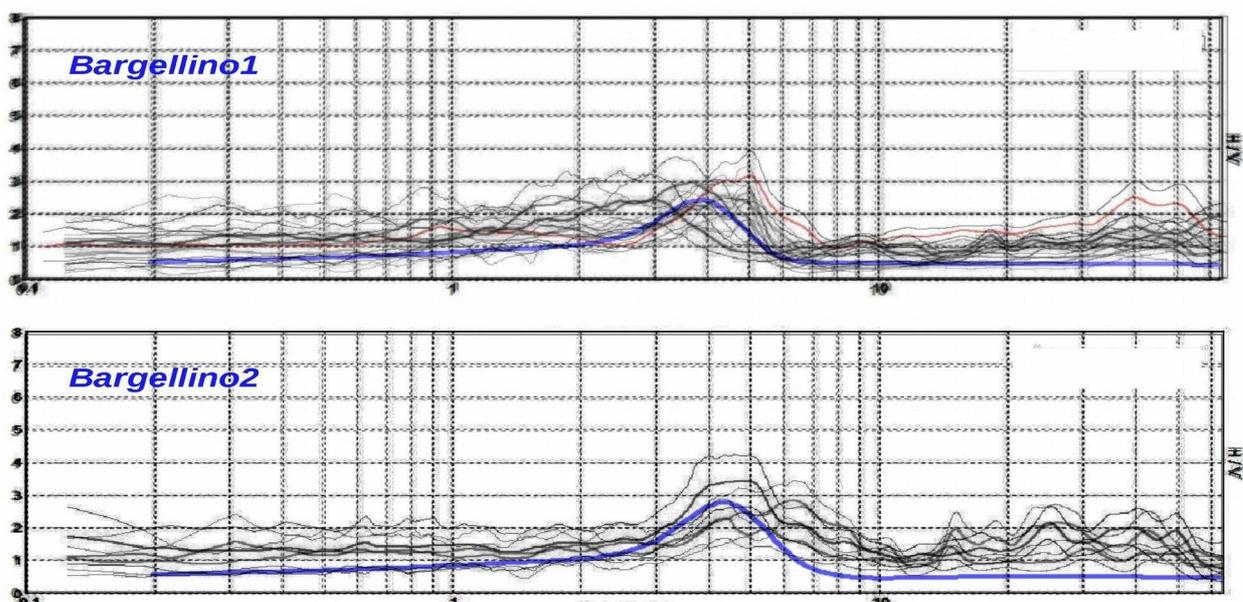


Figura 7.10 – Confronto tra spettri H/V rappresentativi del modello sismostratigrafico “Bargellino1” (n rosso è distinta la registrazione di 60' eseguita in prossimità dello stendimento ESAC) e del modello “Capoluogo2”. In blu sono riportate le “curve sintetiche” dei modelli

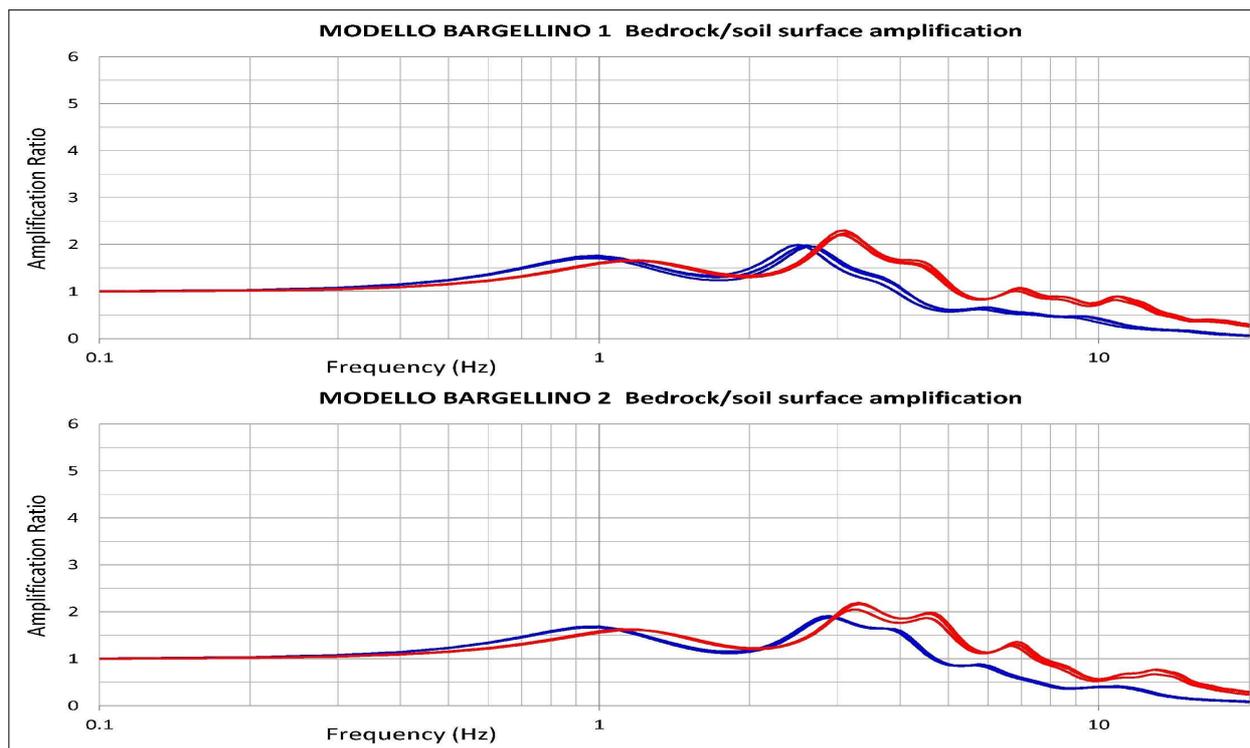


Figura 7.11- Rapporti spettrali ottenuti dalle due simulazioni numeriche “Bargellino1” e “Bargellino2”. In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi riscaldati a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD – NTC 2008)

Come già descritto, gli esiti dei microtremori HVSr sono risultati di fondamentale importanza per l'elaborazione dei due modelli sismostratigrafici: la figura 7.10 propone il confronto di spettri H/V rappresentativi dei due settori di Bargellino, mentre la figura 7.11 riporta i rispettivi rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalle simulazioni numeriche di RSL con SHAKE 2000. Anche in questo caso, si evince come gli spettri risultino relativamente simili, tuttavia le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo “Stato Limite di Danno” ( $a_g = 0,063g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSr (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

I settori più settentrionali di Bargellino sono stati invece caratterizzati secondo la metodologia semplificata, come indicato nella DGR 1227/2015 e cioè considerando gli abachi regionali. Si precisa nuovamente che gli esiti di microzonazione (in questo caso di “livello 2”) sono stati aggiornati rispetto allo studio di MS 2013 per tenere conto dei nuovi abachi regionali e tuttavia la riclassificazione risulta sostanzialmente coerente con la caratterizzazione sismostratigrafica riportata nel precedente studio.

I settori riclassificati sono indicati nella precedente figura 7.8 con i numeri progressivi “3-4” (due zone MOPS distinte). Come già scritto, sono caratterizzati da coperture alluvionali prevalentemente fini di maggior spessore (es. settore NO) oppure con livelli ghiaiosi ancora superficiali tuttavia meno potenti e meno rigidi, pertanto di minor significato per la RSL, come

indicherebbero gli esiti delle registrazioni HVSR eseguite nella parte nord di Bargellino. La risposta sismica locale per queste due zone viene pertanto considerata relativamente omogenea.

In calce alla Relazione, si riportano le schede di sintesi dei due modelli numerici elaborati per Bargellino, mentre la sottostante tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti sia numericamente con il software SHAKE 2000, sia mediante stima semplificata con gli abachi RER:

<i>MODELLI SHAKE</i>	<i>PGA</i>	<i>FA PGA</i>	<i>FA SI 0,1_0,5s</i>	<i>FA SI 0,5_1,0s</i>	<i>FA SI 0,5_1,5s</i>
BARGELLINO1	0,314g	1,9	2,1	3,2	3,4
BARGELLINO2	0,347g	2,1	2,1	3,1	3,3

<i>MODELLI SEMPLIFICATI</i>	<i>AMBIENTE</i>	<i>VS (m/s)</i>	<i>FA PGA</i>	<i>FA SI 0,1_0,5s</i>	<i>FA SI 0,5_1,0s</i>	<i>FA SI 0,5_1,5s</i>
BARGELLINO[3]	PIANURA2	VS30=300	1,6	1,8	2,4	2,5
BARGELLINO[4]	PIANURA2	VS30=300	1,6	1,8	2,4	2,5

#### 7.3.4 Areali Lippo/ZI “San Vitale”/Fabbreria

Per la frazione Lippo e l'ampia area industriale “San Vitale”, lo studio di MS 2013 ha consentito la ricostruzione accurata del tetto delle ghiaie meno profonde, riportate nella Carta Geologico-tecnica (Tavola 2), evidenziando coperture alluvionali superficiali prevalentemente fini in progressivo approfondimento verso NO, allontanandoci dall'aveo del Reno. Le ghiaie del Reno risultano addirittura sub affioranti o poco profonde (circa -5 metri) nella Frazione Lippo. Gli esiti HVSR evidenziano maggiori amplificazioni a frequenze medie-alte a Lippo, nel settore orientale e centrale dell'area industriale San Vitale e a Fabbreria, coerentemente con il contesto litostratigrafico sopra descritto. Le maggiori amplificazioni H/V dimostrano contrasti superficiali più marcati per la presenza di ghiaie più grossolane, ciottolose e rigide. La MASW eseguita a Lippo (MS 2013) ha infatti stimato, per le ghiaie intercettate a circa -5÷10 metri, esiti di Vs pari a circa 450 m/s. Si rammenta che alcune indagini sismiche in foro (“Down-Hole”) eseguite poco a SE e in territorio del Comune di Bologna hanno evidenziato la presenza dei potenti spessori ghiaioso-ciottolosi di conoide del Reno con Vs direttamente misurate pari a circa 550÷600 m/s, anche a profondità relativamente modeste (-20÷25 metri). Per questi settori, si può pertanto presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato dalle coperture alluvionali sovrastanti le ghiaie ciottolose del Reno.

Nel settore NO di San Vitale le coperture fini sovrastanti depositi le ghiaie del Reno raggiungono oltre 20 metri di spessore. In questo settore si riscontrano ancora depositi grossolani più superficiali (“rotte” sabbioso-ghiaiose del Reno, presumibilmente di età medioevale), tuttavia di minore spessore e di minor significato per la RSL, come indicano gli esiti delle registrazioni HVSR, con amplificazioni spettrali meno significative alle medie-alte frequenze. Anche le sequenze ghiaiose più profonde tendono (rapidamente) a divenire meno potenti e meno rigide verso NO per l'incremento della matrice fine, come dimostrano anche le

sezioni RER (cfr. sezioni A-A'; F-F'; G-G').

Per il settore NO dell'area industriale San Vitale, si può pertanto presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato da una colonna sismostratigrafica più profonda così come valutato per il limitrofo areale Capoluogo.

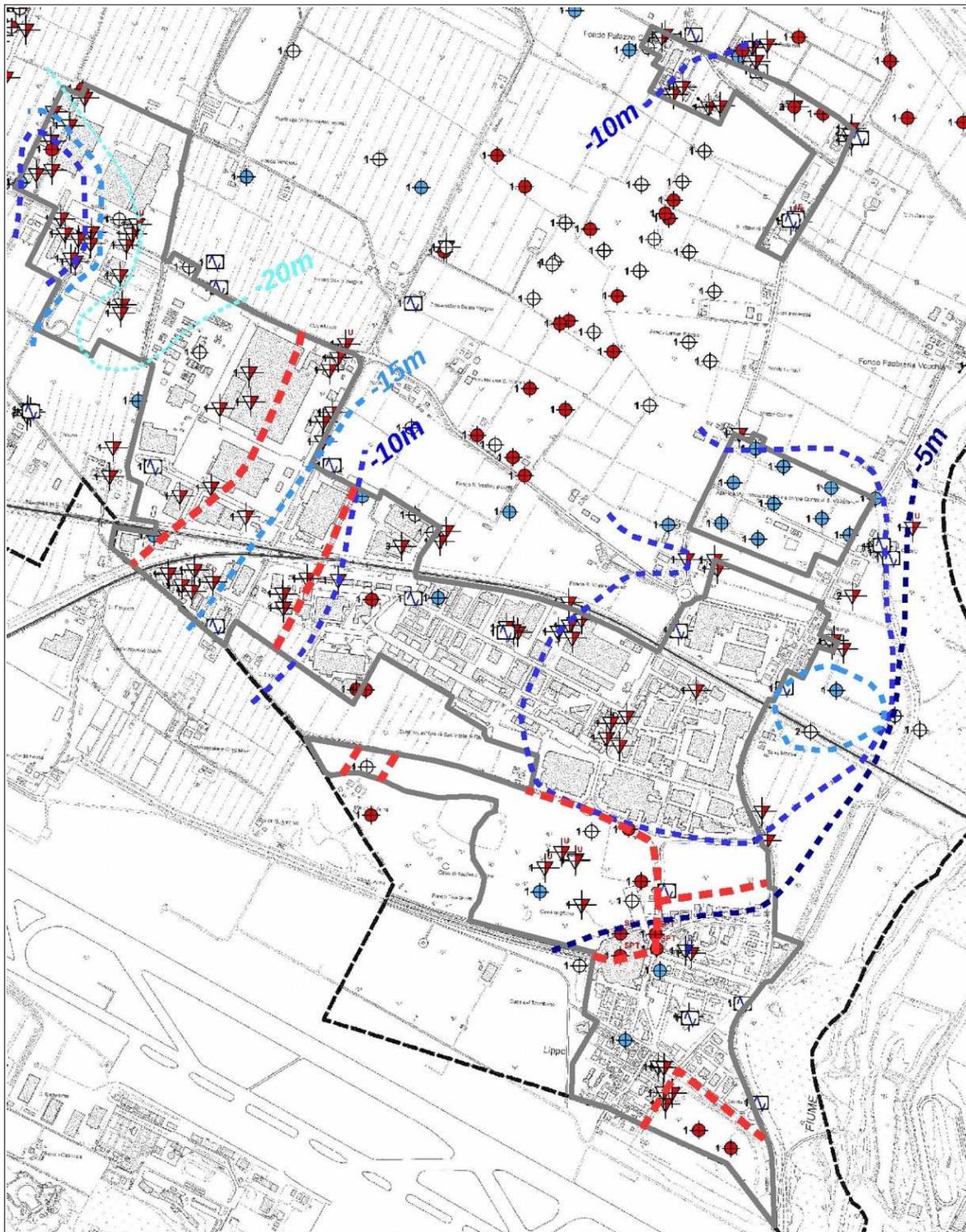


Figura 7.12 – Isobate delle ghiaie e Carta delle Indagini (Tavola 1) con limiti della rappresentatività dei modelli sismostratigrafici semplificati elaborati per Lippo, ZI San Vitale e Fabbreria (in tratteggiato rosso)

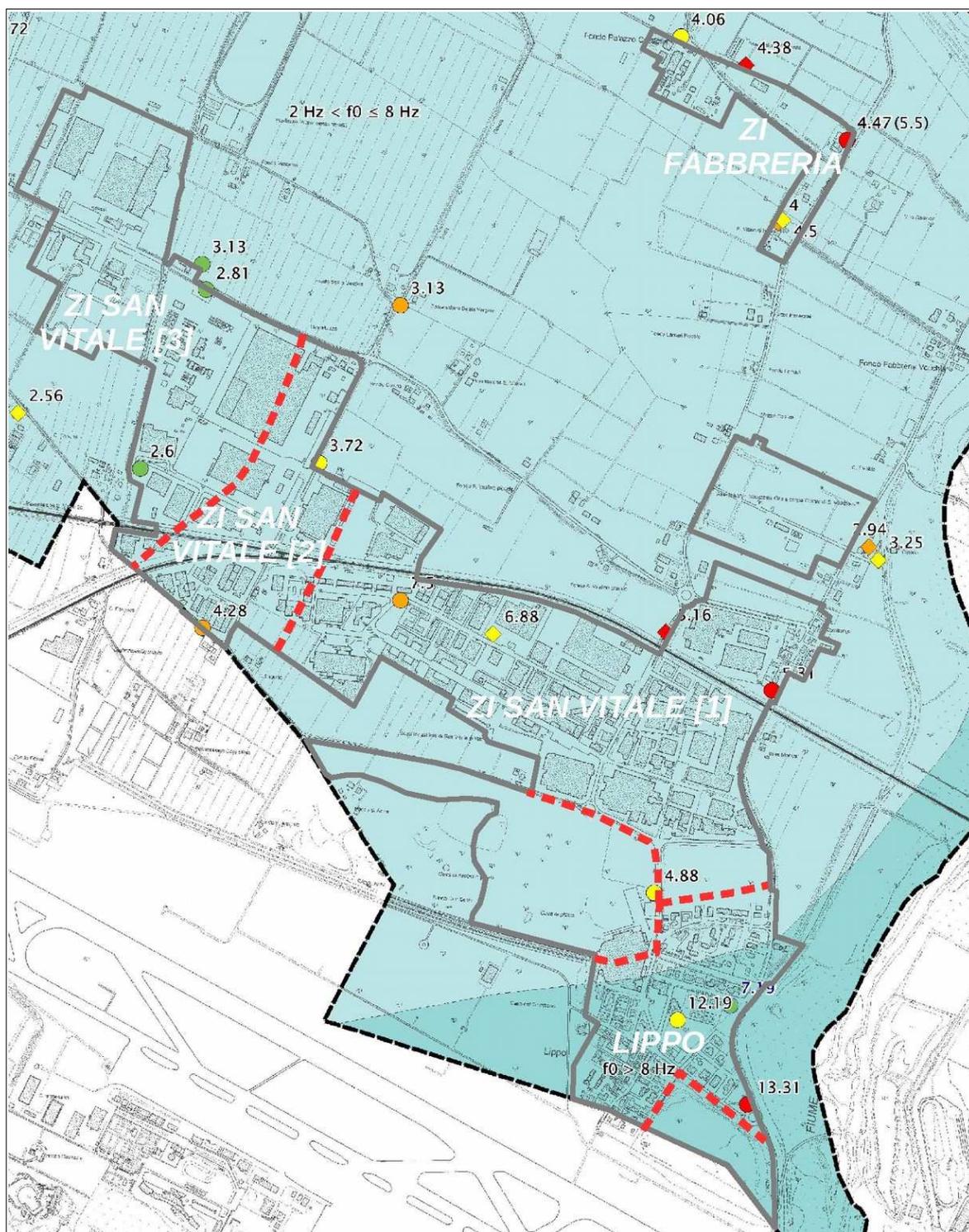


Figura 7.13 - Limiti della rappresentatività dei modelli semplificati riportati sulla Carta delle Frequenze (Tavola 3)

Per quanto scritto, lo studio di MS 2016 ha sostanzialmente confermato il contesto sismostratigrafico locale già definito con la MS 2013 e i fattori di amplificazione sono stati ricalcolati in modo semplificato e riferiti agli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 2193/2015 (Allegato A2). In tal senso, le figure 7.12 e 7.13 offrono una schematizzazione dei settori caratterizzati da RSL differenti, mentre la seguente tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti mediante stima semplificata con gli abachi RER:

<b>MODELLI SEMPLIFICATI</b>	<b>AMBIENTE</b>	<b>VS (m/s)</b>	<b>FA PGA</b>	<b>FA SI 0,1_0,5s</b>	<b>FA SI 0,5_1,0s</b>	<b>FA SI 0,5_1,5s</b>
LIPPO	MARGINE tipo A	VS5=150	2,3	2,2	1,8	nd
ZI SAN VITALE [1]	MARGINE tipo A	VS10=200	2,2	2,4	2,0	nd
FABBRERIA	MARGINE tipo A	VS10=200	2,2	2,4	2,0	nd
ZI SAN VITALE [2]	MARGINE tipo A	VS15=200	2,1	2,5	2,6	nd
ZI SAN VITALE [3]	PIANURA2	VS30=300	1,6	1,8	2,4	2,5

### 7.3.5 Areale Longara

Anche per l'areale di Longara, i dati geognostici e geofisici indicano la presenza di coperture alluvionali prevalentemente fini il cui spessore tende ad aumentare rapidamente verso NO. In particolare, nella parte SE di Longara la ricostruzione del tetto delle ghiaie meno profonde, riportate nella Carta Geologico-tecnica (Tavola 2) evidenzia una profondità dello "sheet" ghiaioso-ciottoloso meno profondo a circa  $-10 \div 15$  metri (figura 7.14) con esiti delle registrazioni HVSR che indicano amplificazioni a frequenze medio-alte relativamente significative (alti spettrali fino a 2,5 H/V), dimostrando spessori ghiaiosi ancora caratterizzata da un buon grado di rigidità. Per questo settore, si può pertanto presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato dalle coperture alluvionali sovrastanti le ghiaie ciottolose del Reno.

Nella porzione centrale di Longara, le coperture fini superficiali risultano approfondirsi, come dimostrano varie prove penetrometriche CPT di repertorio, a "rifiuto" strumentale tra  $-24$  m e  $-28$  metri circa. Nelle coperture sono tuttavia attraversati livelli sabbiosi e/o sabbioso-ghiaiosi di modesto spessore e scarsamente addensate, la cui deposizione è conseguenza di rotte d'argine del Reno relativamente recenti. Il tetto delle ghiaie costituisce ancora il primo riflettore significativo riscontrato nelle registrazioni HVSR a medie frequenze (circa  $2,3 \div 2,6$  Hz), tuttavia con "picchi" di amplificazione non particolarmente elevati (alti spettrali H/V  $< 2$ ).

Nel settore nord-occidentale della frazione, le registrazioni HVSR evidenziano principali amplificazioni esclusivamente a basse frequenze (circa  $0,9 \div 1,0$  Hz), a dimostrazione che le ghiaie meno profonde tendono presumibilmente a sfumare rapidamente a depositi meno grossolani e/o rigidi e ad approfondirsi ulteriormente. In tal senso, l'acquisizione HVSR di 60' eseguita nel campo sportivo a nord di Longara, in adiacenza alla CPTU e all'ESAC evidenzia ancora un'amplificazione del segnale a medie frequenze (circa 2,2 Hz). Lo stendimento ESAC ha inoltre consentito la stima attendibile delle Velocità di taglio nell'intervallo prevalentemente granulare a profondità di  $-25 \div 40$  metri, con Vs massime pari a circa 350 m/s. Si riscontra un tendenziale incremento delle Vs a maggiori profondità, fino a 600 m/s a circa  $-100$  metri.

Per i settori centrale e nord-occidentale di Longara, si può pertanto presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato da una colonna sismostratigrafica più profonda. Per questi due settori sono stati elaborati due modelli numerici rappresentativi

(“Longara1” e “Longara2”), sulla base dei dati sismostratigrafici disponibili, individuando per entrambi un “pseudo bedrock” sismico mediamente collocato a -105 metri, cioè al tetto dell'unità alluvionale AES6 (figura 7.15), tuttavia con sismostrati superficiali differenti; in particolare, per il modello “Longara2” si è considerato lo spessore granulare dell'unità AES7 più potente, meno profondo e più rigido rispetto al primo modello.

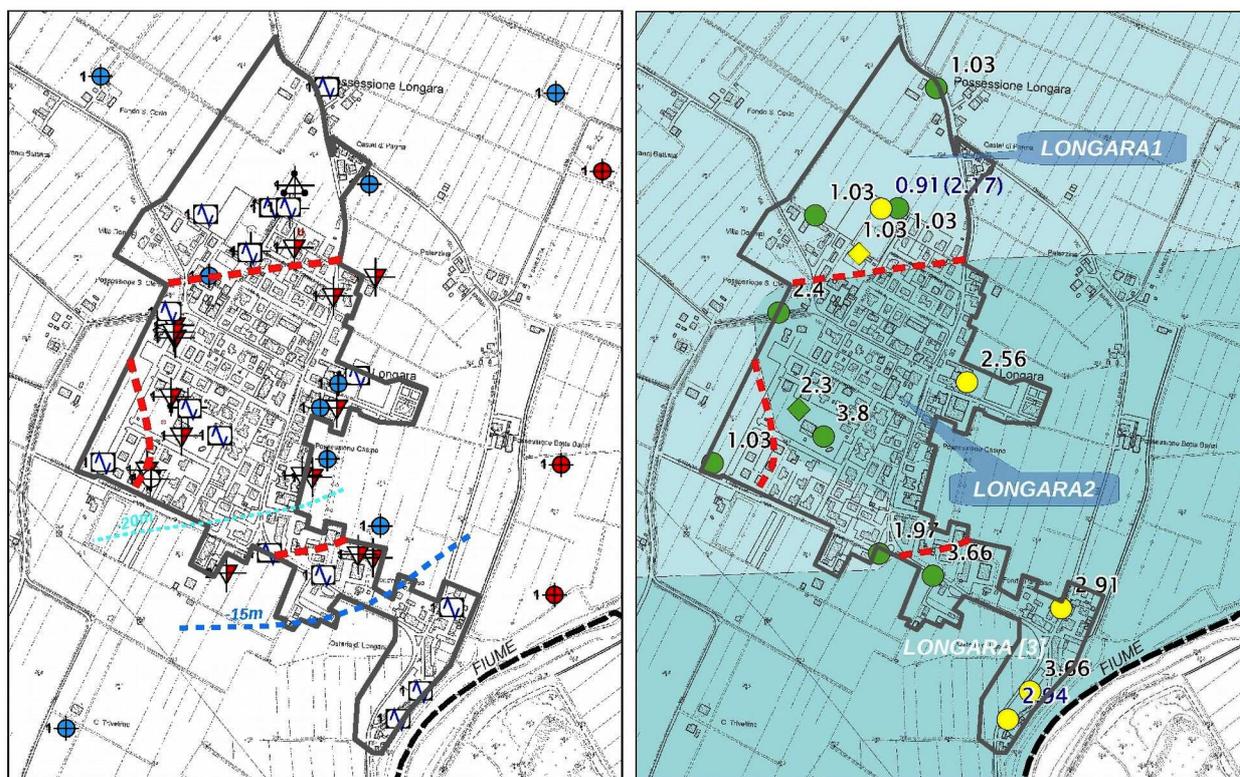


Figura 7.14 - A sx: isobate delle ghiaie e Carta delle Indagini (Tavola 1) con limiti della rappresentatività dei modelli sismostratigrafici elaborati per Longara (in tratteggiato rosso); a dx: il limite dei modelli è riportato sulla Carta delle Frequenze (Tavola 3)

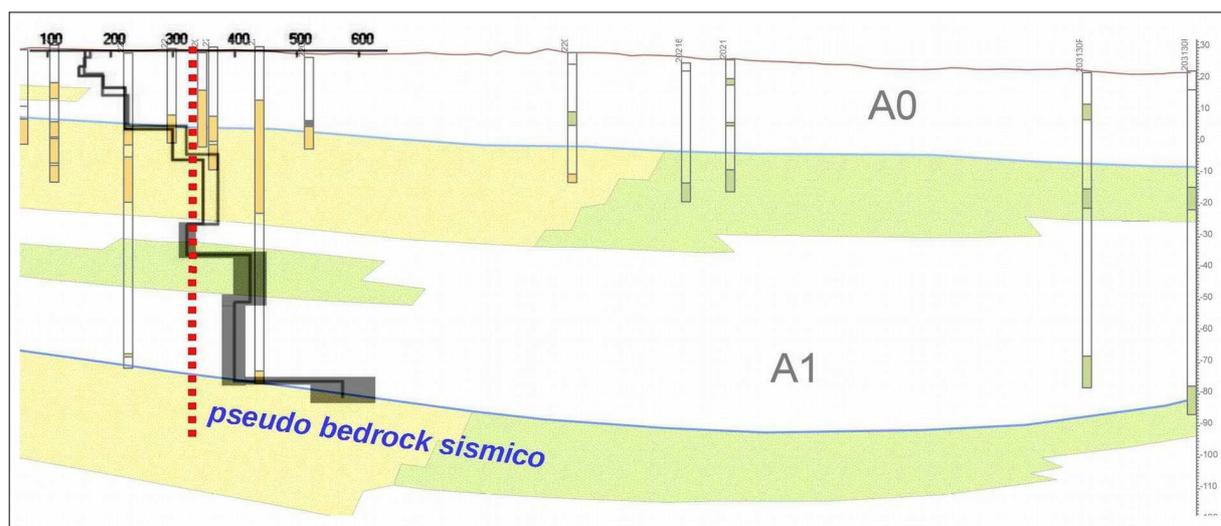


Figura 7.15 - Stralcio sezione geologica RER n. 119 (F-F) e modelli sismostratigrafici rappresentativi di Longara

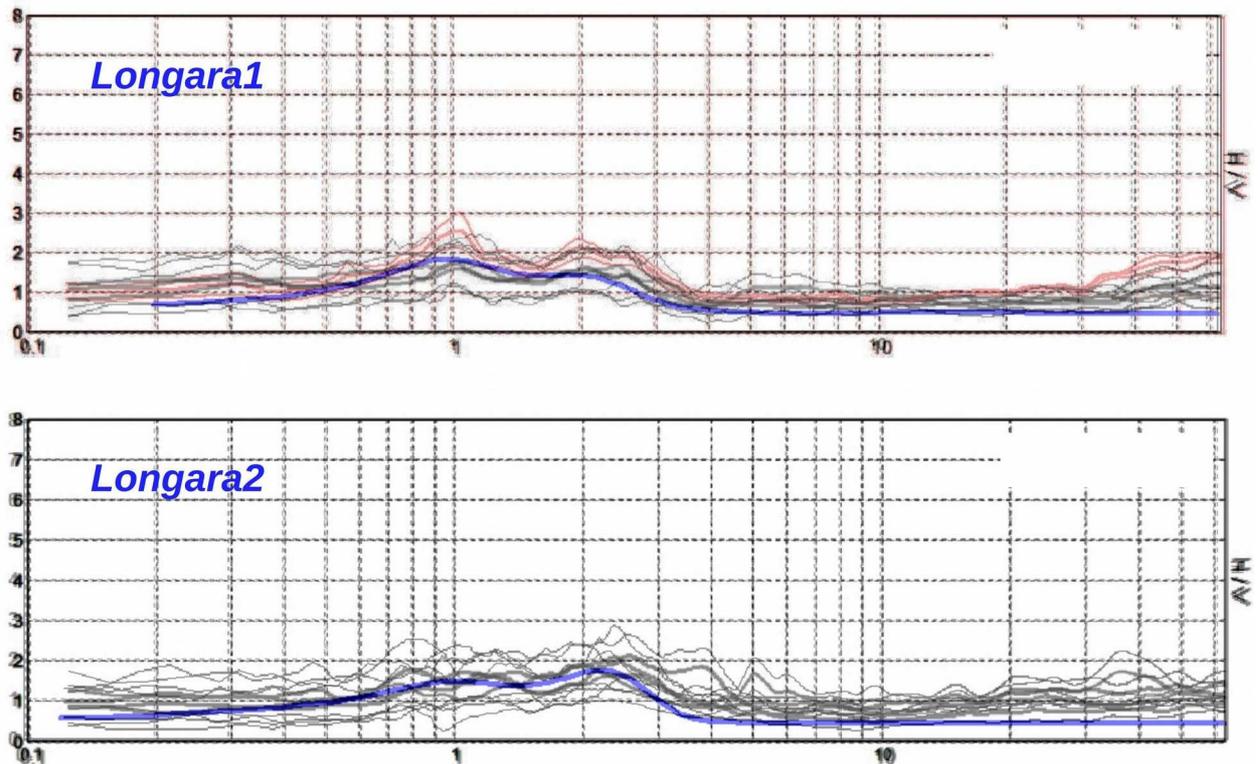


Figura 7.16 - Confronto tra spettri H/V rappresentativi del modello sismostratigrafico "Longara1" (n rosso è distinta la registrazione di 60' eseguita in prossimità dello stendimento ESAC) e del modello "Longara2". In blu sono riportate le "curve sintetiche" dei modelli

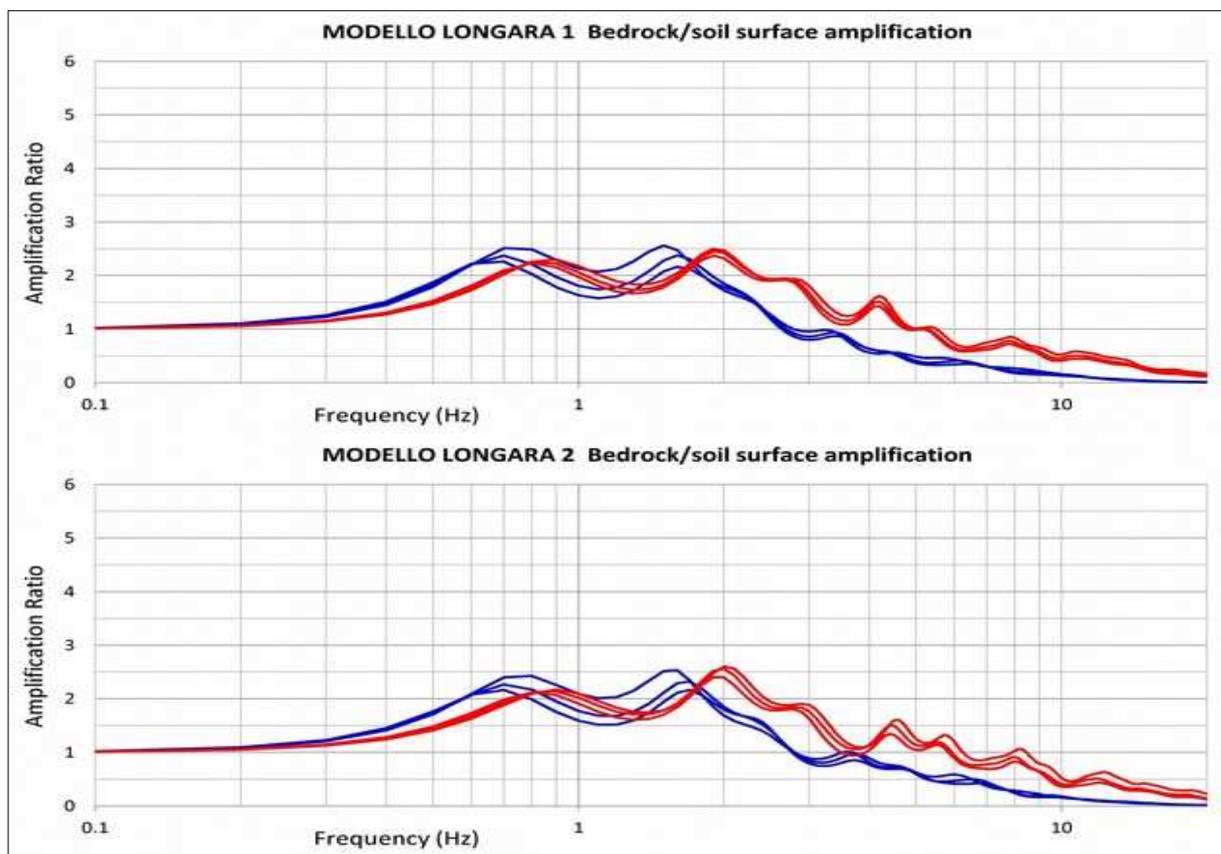


Figura 7.17- Rapporti spettrali ottenuti dalle due simulazioni numeriche "Longara1" e "Longara2". In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi risaliti a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD - NTC 2008)

Anche per Longara, le prove HVSR sono risultate di fondamentale importanza per l'elaborazione dei due modelli sismostratigrafici rappresentativi dei settori centrale e nord-occidentale della frazione: la figura 7.16 propone il confronto di spettri H/V rappresentativi dei due settori di Longara, mentre la figura 7.17 riporta i rispettivi rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalle simulazioni numeriche di RSL con SHAKE 2000. Anche in questo caso, si evince come gli spettri risultino relativamente simili, tuttavia le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo "Stato Limite di Danno" ( $a_g = 0,062g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSR (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

La parte orientale di Longara ("Longara[3]") è stata invece caratterizzata secondo la metodologia semplificata, come indicato nella DGR 1227/2015 e cioè considerando gli abachi regionali. Si precisa nuovamente che gli esiti di microzonazione (in questo caso di "livello 2") sono stati aggiornati rispetto allo studio di MS 2013 per tenere conto dei nuovi abachi regionali e tuttavia la riclassificazione risulta sostanzialmente coerente con la caratterizzazione sismostratigrafica riportata nel precedente studio.

In calce alla Relazione, si riportano le schede di sintesi dei due modelli numerici elaborati per Longara, mentre la sottostante tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti sia numericamente con il software SHAKE 2000, sia mediante stima semplificata con gli abachi RER:

<i>MODELLI SHAKE</i>	<i>PGA</i>	<i>FA PGA</i>	<i>FA SI 0,1_0,5s</i>	<i>FA SI 0,5_1,0s</i>	<i>FA SI 0,5_1,5s</i>
LONGARA1	0,257g	1,6	1,8	3,2	3,4
LONGARA2	0,266g	1,6	1,9	3,1	3,4

<i>MODELLI SEMPLIFICATI</i>	<i>AMBIENTE</i>	<i>VS (m/s)</i>	<i>FA PGA</i>	<i>FA SI 0,1_0,5s</i>	<i>FA SI 0,5_1,0s</i>	<i>FA SI 0,5_1,5s</i>
LONGARA[3]	MARGINE tipo A	VS15=200	2,1	2,5	2,6	nd

### 7.3.6 Areale Castel di Campeggi

Per la frazione Castel Campeggi sono disponibili numerose penetrometrie statiche CPT e CPTU, in alcuni casi spinte fino alla profondità di -20 metri (compresa la CPTU eseguita per lo studio di MS 2016). Sono inoltre disponibili gli esiti di due stendimenti MASW e quattro registrazioni HVSE distribuite nell'urbanizzato (figura 7.18). Per lo studio di MS 2016 si è eseguita un'ulteriore acquisizione HVSR di 60'. È inoltre disponibile una sezione geologica profonda RER n.119, riportata anche nelle cartografie di MS (sezione F-F').

I dati penetrometrici disponibili, evidenziano per questo areale terreni di copertura prevalentemente fini e di consistenza media, mentre la sezione geologica RER riporta spessori

più grossolani (sabbie e sabbie-ghiaiose) a profondità superiori a -30 metri. Gli esiti delle due MASW che attribuiscono Vs equivalenti fino a 30 metri relativamente mediocri, rispettivamente pari a 187 m/s e 201 m/s confermando il contesto sopra descritto.

Gli esiti delle registrazioni HVSR hanno evidenziato amplificazioni ben correlabili in tutto l'areale, con massimi alti spettrali a basse frequenze (circa  $0,8 \div 0,9$  Hz) e con ulteriori blande amplificazioni a circa  $2 \div 3$  Hz, correlabili a riflettori sismici meno marcati (tetto sabbie/sabbie-ghiaiose dell'unità AES7).

Per Castel Campeggi, si può presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato da una colonna sismostratigrafica più profonda. Per la frazione si è elaborato un modello numerico rappresentativo sulla base dei dati sismostratigrafici disponibili, individuando per entrambi un "pseudo bedrock" sismico mediamente collocato a -115 metri, cioè ancora al tetto dell'unità alluvionale AES6 (figura 7.19).

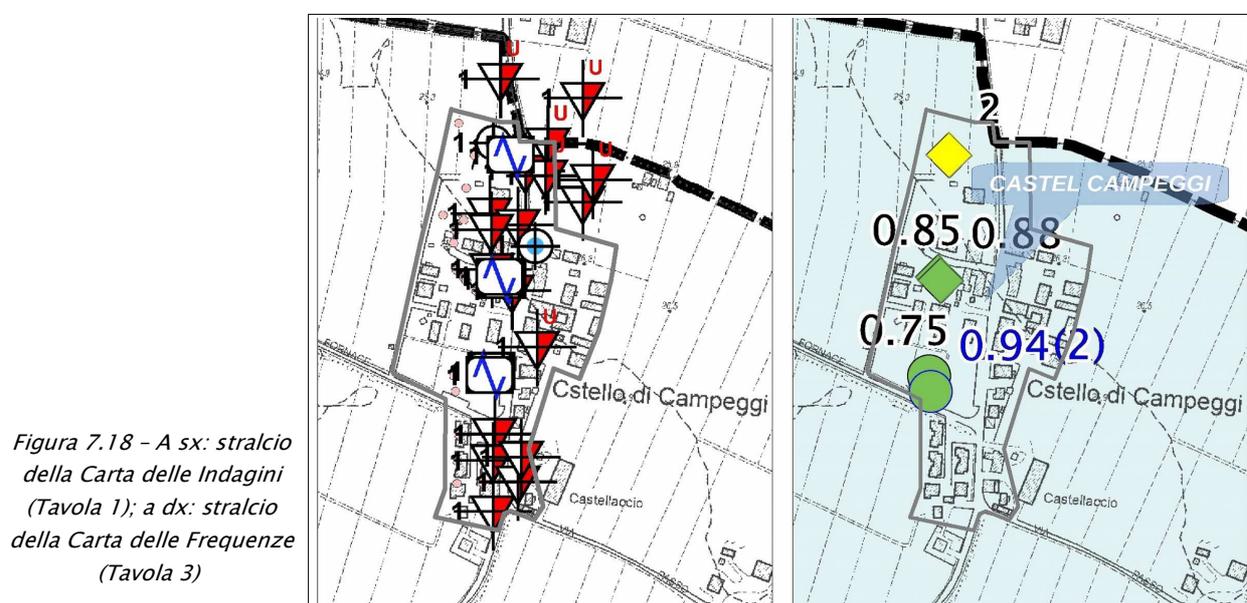


Figura 7.18 - A sx: stralcio della Carta delle Indagini (Tavola 1); a dx: stralcio della Carta delle Frequenze (Tavola 3)

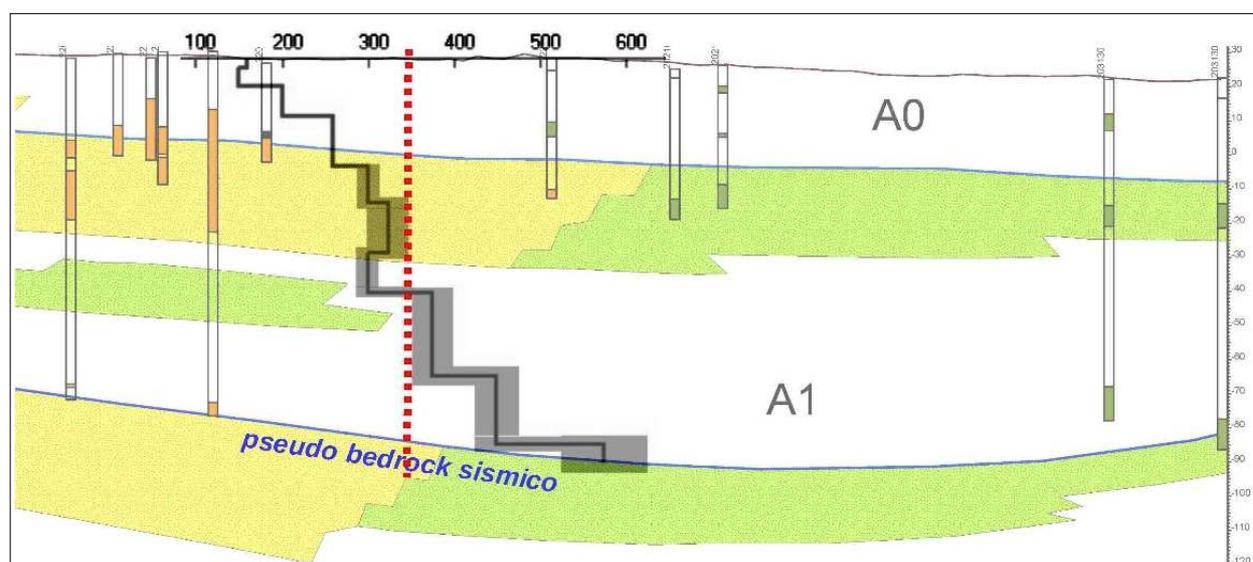


Figura 7.19 - Stralcio sezione geologica RER n. 119 (F-F') e modello sismostratigrafico rappresentativo di Castel Campeggi

Anche per Castel Campeggi, le prove HVSR sono risultate di fondamentale importanza per l'elaborazione del modello sismostratigrafico rappresentativo: la figura 7.20 propone il confronto tra spettri H/V delle registrazioni tomografiche e i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalla simulazione numerica di RSL con SHAKE 2000. Anche in questo caso, si evince come le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo “Stato Limite di Danno” ( $a_g = 0,061g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSR (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

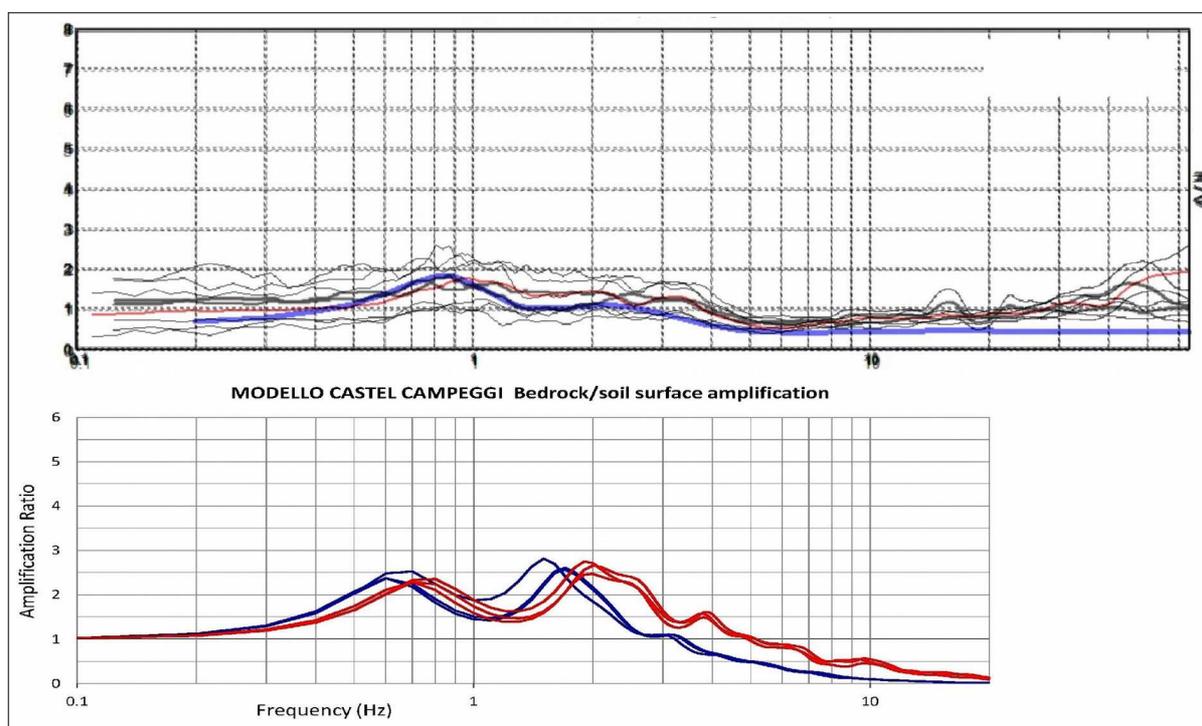


Figura 7.20- In alto: confronto tra spettri H/V delle registrazioni di Castel Campeggi (n rosso è distinta la registrazione di 60' eseguita per lo studio di MS 2016). In blu è riportata la “curva sintetica” del modello sismostratigrafico rappresentativo. In basso: rapporti spettrali ottenuti dalla simulazione numerica. In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi riscaldati a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD – NTC 2008)

In calce alla Relazione, si riporta la scheda di sintesi del modello numerico elaborato per Castel Campeggi, mentre la sottostante tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti sia numericamente con il software SHAKE 2000:

MODELLI SHAKE	PGA	FA PGA	FA SI 0,1_0,5s	FA SI 0,5_1,0s	FA SI 0,5_1,5s
CASTEL CAMPEGGI	0,259g	1,6	2,0	3,3	3,2

### 7.3.7 Areali Tavernelle/ZI “Bazzane”/ZI “Via Verde”

La frazione Tavernelle e le zone industriali denominate “Bazzane” e “Via Verde” sono state oggetto di varie registrazioni HVSR eseguite per lo studio di MS 2013. Complessivamente, sono

già disponibili gli esiti di otto prove HVSR (comprese quelle di repertorio). Oltre a queste acquisizioni, per lo studio di MS 2013 sono stati eseguiti due stendimenti sismici MASW (Tavernelle e “Bazzane”). Sono inoltre disponibili diffuse prove geognostiche (penetrometriche CPT, sondaggi e pozzi per acqua). La Regione Emilia-Romagna ha inoltre pubblicato alcune sezioni geologiche che consentono una buona caratterizzazione litostratigrafica profonda degli areali in questione, in particolare le sezioni n.11, n.44 e n. 123 (sono riportate nelle cartografia di MS rispettivamente con le sigle C-C', D-D' e A-A').

Per lo studio di MS 2016 si è deciso di integrare i dati disponibili con una penetrometria CPTU spinta fino a -20 metri, eseguita presso il campo sportivo di Tavernelle; inoltre, per consentire l'elaborazione di un modello numerico a Tavernelle, si sono eseguiti in adiacenza alla penetrometria, uno stendimento ESAC e un'ulteriore registrazione HVSR di 60'. Occorre precisare che la prova ESAC ha consentito un migliore calcolo delle Vs nei sedimenti di Tavernelle, rispetto all'indagine MASW già eseguita nel 2013. In particolare, la prova ESAC calcola una Vs30 pari a circa 211 m/s e stima, per i sedimenti prevalentemente granulari (sabbie) che costituiscono il tetto dell'unità alluvionale AES7 (-25÷30 m) Vs pari a circa 300÷325 m/s; la prova ESAC ha inoltre stimato un tendenziale incremento delle Vs nel sottosuolo, con valori pari a circa 400÷450 m/s alla profondità di -70 metri dal p.c.

Gli esiti HVSR evidenziano spettri H/V ben correlabili negli areali in oggetto (figura 7.21), con massimi alti spettrali a basse frequenze (circa 0,9 Hz) e con ulteriori blande amplificazioni a circa 1,7÷2 Hz (tetto unità AES7). Tuttavia, nella zona industriale “Via Verde” si riscontrano frequenze fondamentali ancora più basse (0,6÷0,7 Hz).

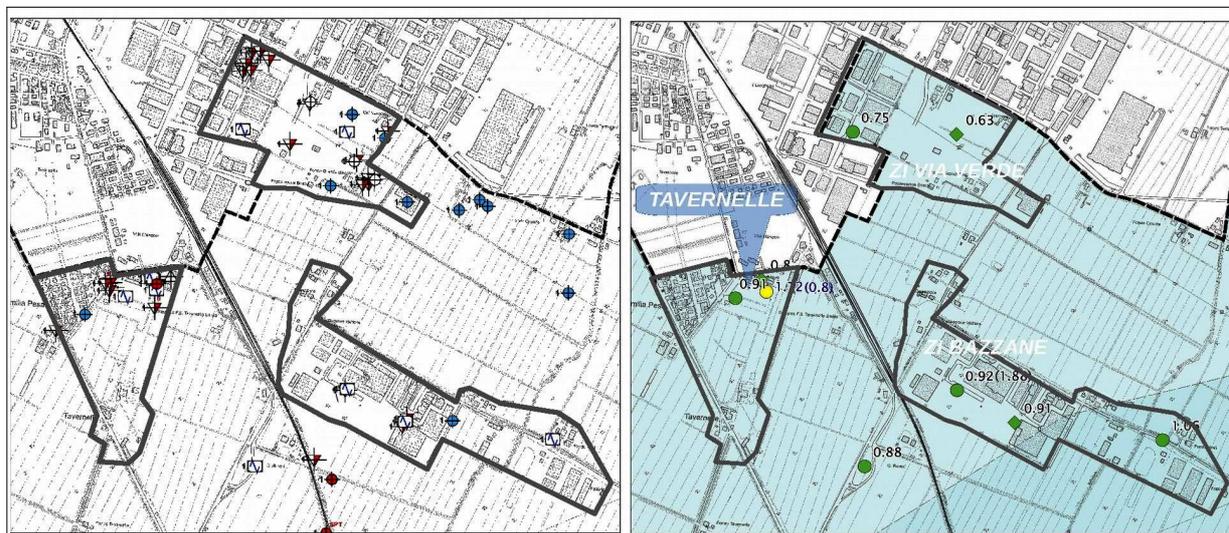


Figura 7.21 – A sx: stralcio della Carta delle Indagini (Tavola 1). A dx: stralcio della Carta delle Frequenze (Tavola 3) e areali studiati

Per gli areali in oggetto, i dati di sottosuolo disponibili portano a presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato da una colonna sismostratigrafica più profonda. Per Tavernelle e per la zona industriale “Bazzane”, si è dunque elaborato un modello numerico rappresentativo sulla base dei dati litostratigrafici e sismici disponibili. Il miglior modello sismostratigrafico rappresentativo delle aree di studio (ricavato secondo un approccio per

iterazione, che ha considerato varie ipotesi di variabilità del sottosuolo) ha previsto un “pseudo bedrock” sismico mediamente collocato a -140 metri, cioè alla base dell'unità alluvionale AES6. La figura 7.22 propone uno stralcio della sezione RER n.123 (A-A'), sovrapponendo ad essa le sismostratigrafie schematiche del modello numerico “Tavernelle” e dei modelli numeri “Capoluogo1” e “Capoluogo2” già descritti in precedenza, per meglio evidenziare; si evince come la variabilità tessiturale del complessivo spessore alluvionale dell'unità AES6 e la relativa variabilità della rigidità dei suoi sedimenti imponga un generale approfondimento delle modellazioni sismostratigrafiche da est verso ovest, cioè allontanandosi dai depositi della “conoide” ghiaiosa-ciottolosa sepolta del fiume Reno.

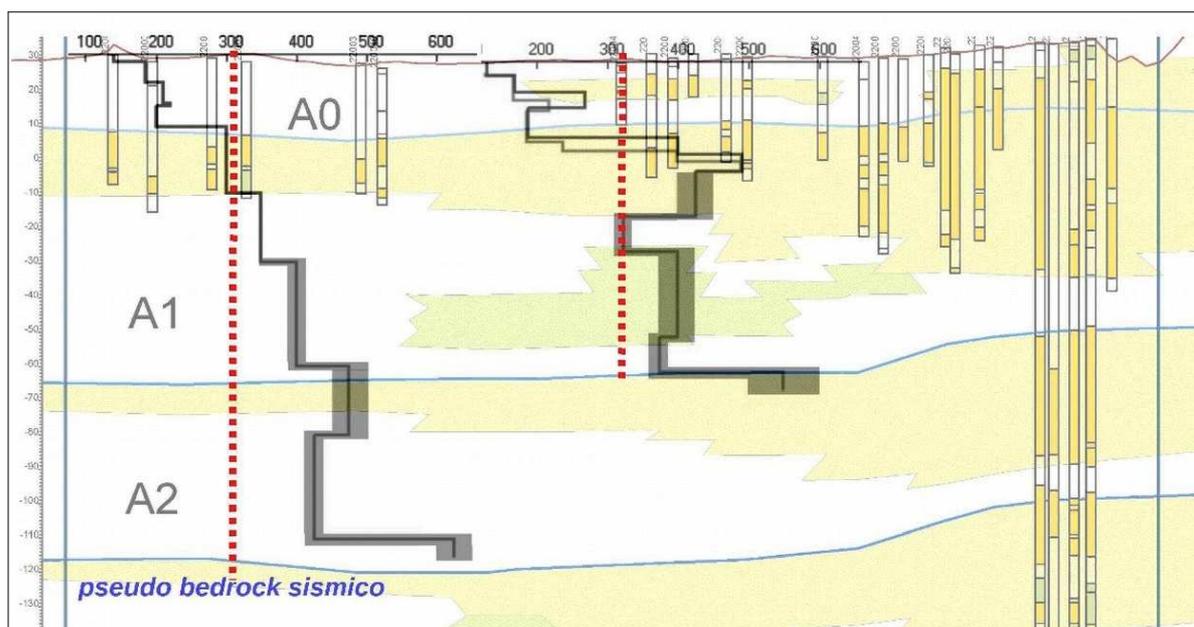


Figura 7.22 – Stralcio sezione geologica RER n. 123 (A-A') e modello sismostratigrafico rappresentativo di Tavernelle. La figura riporta anche i due modelli sismostratigrafici elaborati per il Capoluogo

Anche per Tavernelle, le prove HVSR sono risultate di fondamentale importanza per l'elaborazione del modello sismostratigrafico: la sua rappresentatività è infatti estendibile anche alla zona industriale “Bazzane”, mentre per la ZI “Via Verde” le più basse frequenze fondamentali ottenute non consentono un'ulteriore estrapolazione e per questo motivo risulta caratterizzata secondo l'approccio semplificato (abachi RER).

La figura 7.23 propone il confronto tra spettri H/V delle registrazioni tomografiche di Tavernelle e “Bazzane”, mentre la figura 7.24 mostra i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalla simulazione numerica di RSL con SHAKE 2000. Anche in questo caso, si evince come le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo “Stato Limite di Danno” ( $a_g = 0,062g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSR (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

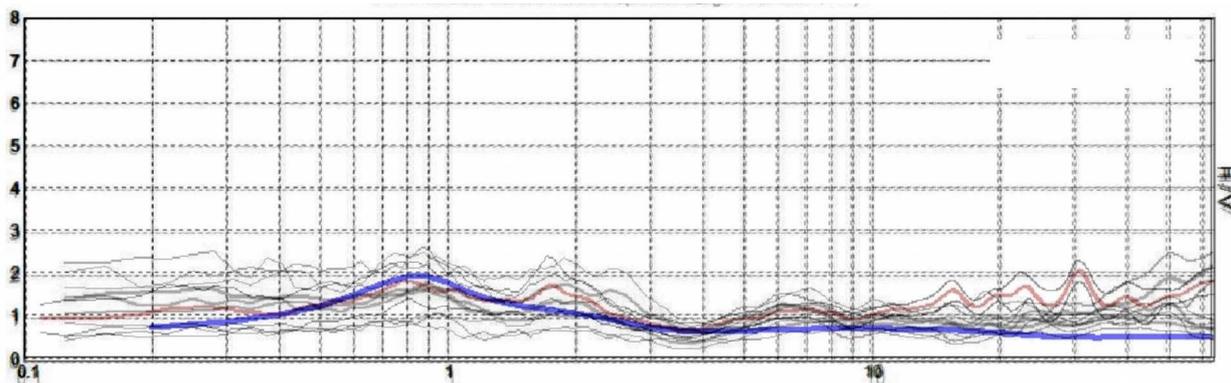


Figura 7.23- Confronto tra spettri H/V rappresentativi del modello sismostratigrafico "Tavernelle" (in rosso è distinta la registrazione di 60' eseguita in prossimità dello stendimento ESAC). In blu è riportata la "curva sintetica" del modello sismostratigrafico rappresentativo

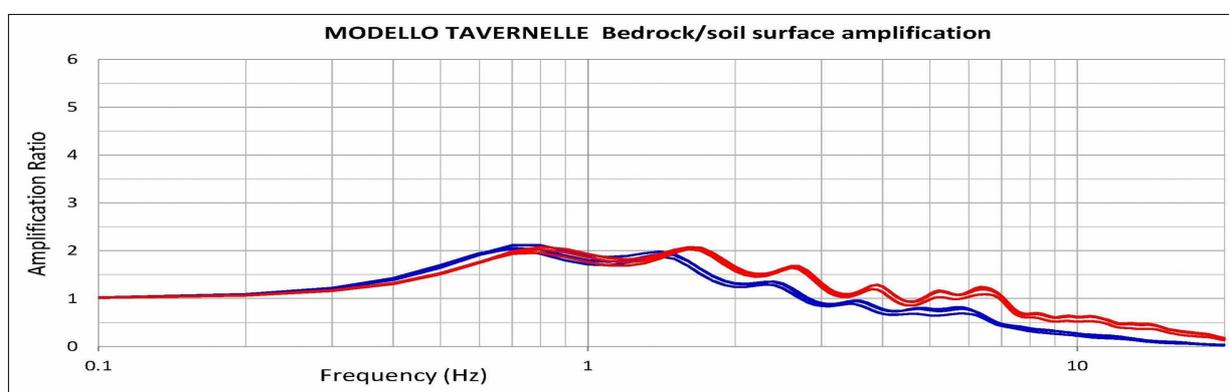


Figura 7.24- Rapporti spettrali ottenuti dalla simulazione numerica. In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi riscaldati a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD - NTC 2008)

Come già spiegato, l'area industriale "Via Verde" è stata invece caratterizzata secondo la metodologia semplificata, come indicato nella DGR 1227/2015 e cioè considerando gli abachi regionali. Si precisa nuovamente che gli esiti di microzonazione (in questo caso di "livello 2") sono stati aggiornati rispetto allo studio di MS 2013 per tenere conto dei nuovi abachi regionali e tuttavia la riclassificazione risulta sostanzialmente coerente con la caratterizzazione sismostratigrafica riportata nel precedente studio.

In calce alla Relazione, si riporta la scheda di sintesi del modello numerico "Tavernelle", mentre la sottostante tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti sia numericamente con il software SHAKE 2000, sia mediante stima semplificata con gli abachi RER:

MODELLI SHAKE	PGA	FA PGA	FA SI 0,1_0,5s	FA SI 0,5_1,0s	FA SI 0,5_1,5s
TAVERNELLE/Z.I. "BAZZANE"	0,258g	1,6	1,8	3,0	3,3

MODELLI SEMPLIFICATI	AMBIENTE	VS (m/s)	FA PGA	FA SI 0,1_0,5s	FA SI 0,5_1,0s	FA SI 0,5_1,5s
Z.I. "VIA VERDE"	PIANURA 2	VS30=200	1,7	2,0	3,0	3,3

### 7.3.8 Areale Sacerno

Anche per la frazione Sacerno sono disponibili indagini geognostiche di repertorio (CPT; CPTE; sondaggi e pozzi per acqua). Per lo studio di MS è stata eseguita una prova CPT spinta a -25 metri, inoltre uno stendimento MASW e due registrazioni HVSR. È anche disponibile la limitrofa sezione geologica RER n. 45 (riportata nelle cartografia di MS con sigla D-D') per un'ulteriore caratterizzazione litostratigrafica profonda.

Per lo studio di MS 2016 si è deciso di integrare i dati disponibili con una penetrometria CPTU (spinta fino a -20 metri) e un'ulteriore registrazione HVSR di 60' nella porzione di areale più settentrionale, per consentire l'elaborazione di un modello numerico di RSL.



Figura 7.25 - A sx: stralcio della Carta delle Indagini (Tavola 1). A dx: stralcio della Carta delle Frequenze (Tavola 3)

Gli esiti HVSR evidenziano spettri H/V ben correlabili tra loro (figura 7.25), con massimi alti spettrali a basse frequenze (circa  $0,8 \div 0,9$  Hz) e con ulteriori blande amplificazioni a circa  $2 \div 3$  Hz, come rilevato anche nella registrazione HVSR di 60'.

In conclusione, le prove HCSR dimostrerebbero un contesto di RSL relativamente omogeneo per tutta l'areale studiato.

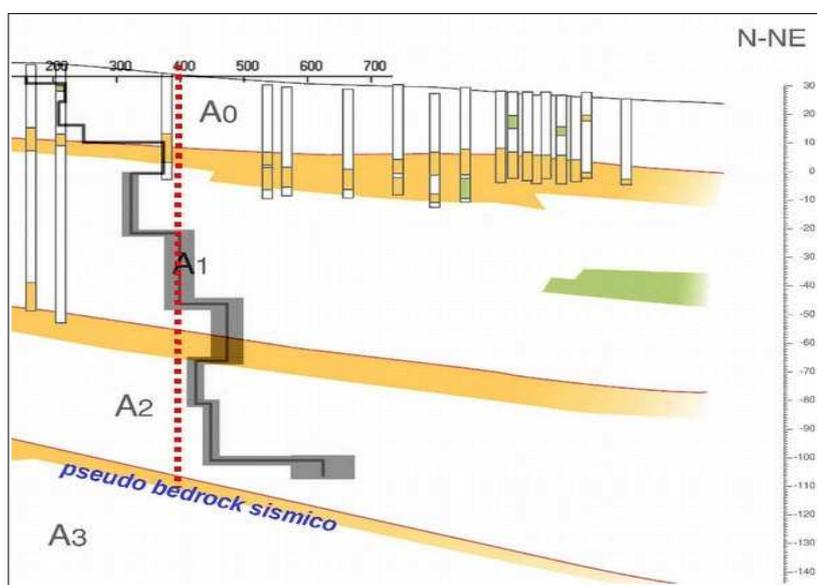


Figura 7.26 - Stralcio sezione geologica RER n. 45 (D-D') e modello sismostratigrafico rappresentativo di Sacerno

Anche per Sacerno, dati di sottosuolo disponibili portano a presupporre che il principale contributo all'amplificazione sia determinato da una colonna sismostratigrafica più profonda. Il modello numerico rappresentativo (ricavato secondo un approccio per iterazione, che ha considerato varie ipotesi di variabilità del sottosuolo), ha previsto un “pseudo bedrock” sismico mediamente collocato a -135 metri, cioè alla base dell'unità alluvionale AES6 (figura 7.26).

La figura 7.27 propone il confronto tra spettri H/V delle registrazioni tromografiche eseguite a Sacerno e i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento) ottenuti dalla simulazione numerica di RSL con SHAKE 2000. Anche in questo caso, si evince come le simulazioni eseguite con accelerogrammi scalati allo “Stato Limite di Danno” ( $a_g = 0,063g$ ) evidenziano l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al decrescere dei livelli energetici del terremoto: si riscontra, infatti, uno spostamento verso frequenze più elevate (periodi minori) dei picchi di amplificazione, risultando più correlabili con gli spettri HVSR (microtremori naturali), inoltre per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno maggiori effetti di attenuazione alle alte frequenze.

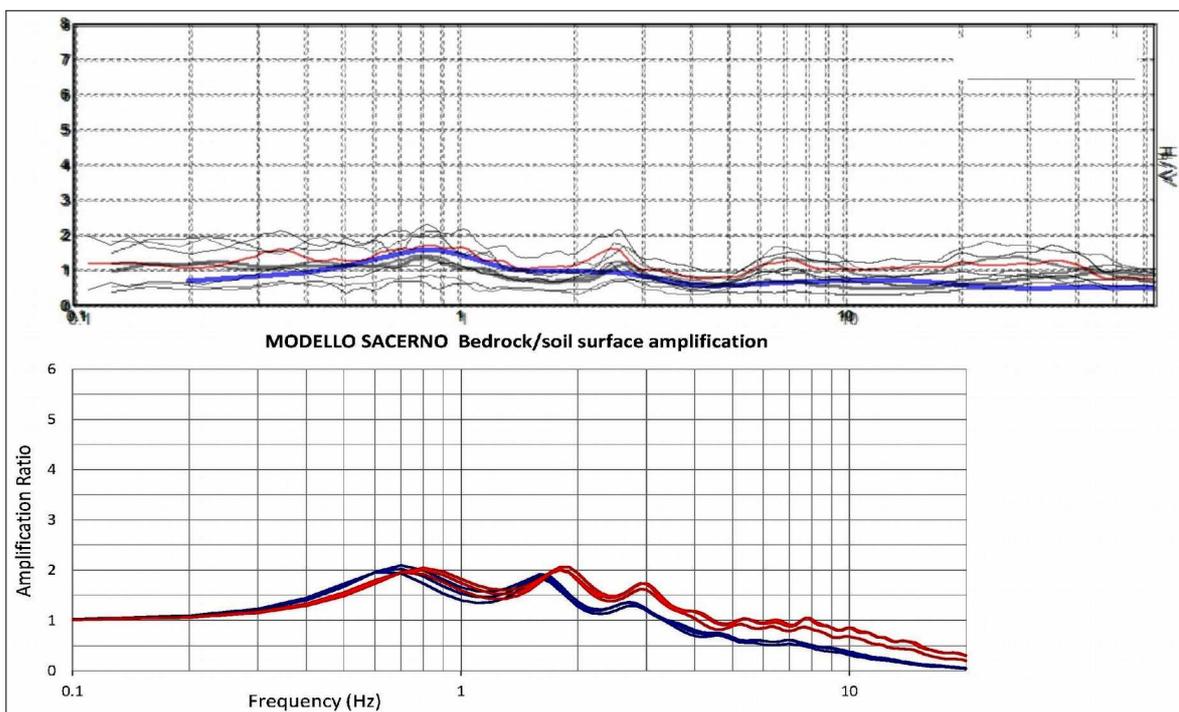


Figura 7.27– In alto: spettri H/V delle registrazioni effettuate a Sacerno (in rosso è distinta la registrazione di 50' eseguita in prossimità delloa prova CPTU e MASW). In blu è riportata la “curva sintetica” del modello sismostratigrafico rappresentativo. In basso: rapporti spettrali ottenuti dalla simulazione numerica. In rosso, si riportano gli spettri ottenuti con accelerogrammi riscaldati a bassi valori di  $a_g$  (equiparabili allo SLD – NTC 2008)

In calce alla Relazione, si riporta la scheda di sintesi del modello numerico “Sacerno”, mentre la sottostante tabella riassume gli esiti della RSL ottenuti numericamente con il software SHAKE 2000:

MODELLI SHAKE	PGA	FA PGA	FA SI 0,1_0,5s	FA SI 0,5_1,0s	FA SI 0,5_1,5s
---------------	-----	--------	----------------	----------------	----------------

SACERNO	0,269g	1,6	2,0	2,5	2,8
---------	--------	-----	-----	-----	-----

#### 7.4 Gli approfondimenti nelle “zone di attenzione” per liquefazioni

Le 8 penetrometrie CPTU eseguite per lo studio di MS 2016 consentono di calcolare 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.

Si è potuto inoltre disporre di altre 9 prove CPTU con dati numerici, ottenuti dalle Relazioni Geologiche d'archivio fornite dal Comune di Calderara e dalla Banca Dati RER. Si sono tuttavia considerati i dati numerici di altre 14 prove penetrometriche, seppur meccaniche (CPT), per consentire una migliore analisi e permettere, come vedremo, di classificare gli areali di studio secondo differenti “zone pericolosità”.

Occorre tuttavia precisare che i metodi semplificati di stima del potenziale di liquefazione da prove penetrometriche statiche si basano esclusivamente sulla sperimentazione con prove elettriche CPTE/CPTU. Gli esiti ricavati dalle prove CPT possono risultare anche significativamente differenti e, spesso, poco cautelativi, come le più recenti esperienze successive al terremoto dell'Emilia 2012 hanno evidenziato: ciò è da imputare soprattutto alla differente geometria delle due punte<sup>5</sup>. Come vedremo, la stima dell'Indice di Liquefazione ottenuta da prove CPT è ricavata considerando input più cautelativi rispetto alle prove CPTU.

Nel complesso, si è potuto disporre di 31 punti di controllo utili a caratterizzare ulteriormente le “zone di attenzione” riportate nella cartografia MOPS (Tavola 4). Su questi punti si è 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.);

<sup>5</sup> I valori misurati di resistenze alla punta  $q_c$  non si equivalgono perfettamente (nella punta meccanica occorre considerare la componente dell'attrito lungo il mantello di protezione sopra il cono), mentre le resistenze laterali  $f_s$  risultano molto diverse per l'adesione terreno-manicotto (nella punta meccanica si misura una componente di resistenza alla base - di rifluimento - dovuta al raccordo nell'estremità inferiore del manicotto; nella punta elettrica la cella di misura è invece nella stessa punta). Ciò porta a una sovrastima della componente fine/coesiva nelle verifiche numeriche di liquefacibilità.

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 semi empirica 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 comprovata sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

#### 1. procedura NCEER<sup>6</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 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*)

#### 3. procedura di Boulanger & Idriss (2014)

(R.W. Boulanger and I. M. Idriss – *CPT and based liquefaction triggering procedures, University of California at Davis, april 2014*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda 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 Boulanger & Idriss (2014) 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:

<sup>6</sup> National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

- si è utilizzata la  $a_{max}$  al suolo calcolata considerando la  $a_{ref}$  da reticolo INGV (pericolosità sismica locale di riferimento) moltiplicata per il valore del FA PGA attribuito alla microzona sismica in cui ricade la prova
- si è considerata una soggiacenza cautelativa della falda stimata in funzione del contesto idrogeologico locale (vedi capitolo 3)
- 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 oppure, in più casi, fino alla profondità di “rifiuto” strumentale della prova su ghiaie/sabbie molto addensate e impenetrabili. L'Indice di Potenziale Liquefazione 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  $FSL \geq 1.2$

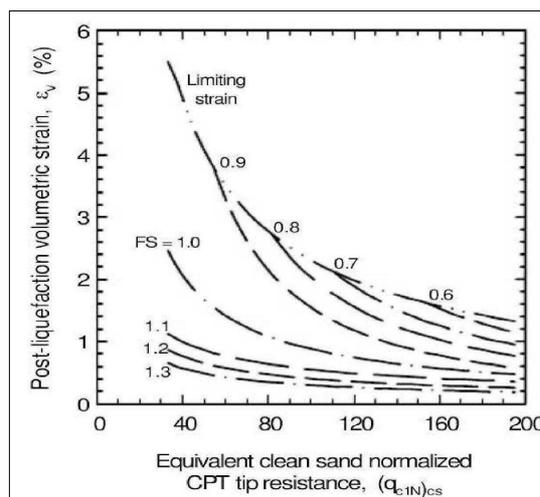
$z$  = profondità dello strato considerato

Si precisa che per le prove CPT il limite di FSL considerato per il calcolo di LPI è stato considerato cautelativamente pari a  $FSL \geq 1.4$ .

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

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 (Boulanger 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  $FS_{\gamma}=3\% = CRRM / CSR = CRR_{7,5} / CSR_{7,5}$  (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come  $FS_{\gamma}=3\% = CRR_{6,14} / CSR_{6,14}$ .

I cedimenti sono stati calcolati considerando gli esiti di FSL ottenuti dalle verifiche già descritte e utilizzando le seguenti relazioni (Robertson, 2009):

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

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

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

PROVA (SIGLA)	PROF. FALDA (m)	PGA (g)	(Limite FSL per calcolo LPI)	Stima LPI/IL			Stima cedimenti		
				NCEER 2001	ROBERTSON 2009	BOULANGER & IDRIS 2014	NCEER 2001	ROBERTSON 2009	BOULANGER & IDRIS 2014
P48837CPTU32196	2,0	0,27	FSL <1,2	0,0	0,1	2,2	0,0	0,1	0,0
P60103CPT33959	2,5	0,24	FSL <1,4	4,6	3,8	14,4	3,1	2,7	6,7
P60135CPT33991	2,5	0,24	FSL <1,4	0,7	0,7	6,4	0,6	0,6	2,8
P60149CPT34005	2,0	0,28	FSL <1,4	0,0	3,4	5,9	0,0	0,3	0,0
P60151CPT34007	2,0	0,28	FSL <1,4	6,4	5,5	8,8	3,6	3,2	3,4
P60154CPT34010	2,5	0,24	FSL <1,4	2,4	1,2	12,3	1,9	1,0	5,5
P60161CPT34017	2,5	0,26	FSL <1,4	3,1	0,9	14,5	1,7	0,5	6,0
P60199CPT34056	2,5	0,26	FSL <1,4	3,0	2,5	6,3	1,9	1,6	2,6
P60236CPTU34093	1,5	0,26	FSL <1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P60237CPTU34094	1,5	0,26	FSL <1,2	4,9	5,3	5,6	4,1	4,6	3,1
P60249CPT34106	2,5	0,27	FSL <1,4	0,0	2,1	4,8	0,0	0,3	0,0
P60270CPT34128	3,0	0,27	FSL <1,4	1,9	1,3	3,1	0,7	0,5	0,8
P60295CPT34154	2,0	0,28	FSL <1,4	11,0	10,4	16,3	5,7	5,3	5,5
P60300CPTU34159	1,0	0,35	FSL <1,2	11,5	7,8	19,0	6,1	4,4	7,7
P60301CPTU34160	1,0	0,35	FSL <1,2	25,0	22,7	32,1	13,3	12,0	12,9
P60371CPT34230	2,0	0,26	FSL <1,4	2,0	1,3	14,0	1,4	1,0	6,2
P60457CPT34316	2,5	0,26	FSL <1,4	0,4	0,2	4,2	0,4	0,2	2,1
P60478CPT34337	3,5	0,35	FSL <1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P60518CPT34379	2,5	0,25	FSL <1,4	2,1	1,1	4,9	1,3	0,7	3,4
P60523CPTU34384	2,5	0,23	FSL <1,2	1,5	1,3	1,8	1,2	1,0	1,0
P60524CPTU34397	1,5	0,24	FSL <1,2	16,2	16,0	20,3	11,2	11,1	9,4
P60525CPTU34398	2,5	0,31	FSL <1,2	0,6	0,5	1,1	0,3	0,2	0,3
P60526CPTU34401	2,5	0,31	FSL <1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P60527CPTU34403	1,5	0,27	FSL <1,2	0,4	0,4	0,6	0,0	0,1	0,0
P60528CPTU34405	1,0	0,26	FSL <1,2	0,5	0,5	2,2	0,3	0,3	1,0
P60529CPTU34406	1,5	0,26	FSL <1,2	9,5	9,2	12,7	6,9	6,7	6,2
P60530CPTU34407	1,0	0,26	FSL <1,2	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2
P60542CPTU34426	2,5	0,23	FSL <1,2	6,9	6,2	9,6	5,0	4,5	4,8
P60543CPTU34427	2,5	0,23	FSL <1,2	1,2	1,3	3,1	0,9	0,9	1,4
P60544CPTU34428	2,5	0,23	FSL <1,2	10,1	10,0	13,7	8,2	8,1	7,4
P60545CPTU34429	2,5	0,23	FSL <1,2	1,5	1,1	4,5	1,3	0,9	2,7

**PERICOLOSITA' DI LIQUEFAZIONE:**

Basso	Medio	Elevato	Molto Elevato
0	2	5	15

Figura 7.8 – Confronto dei valori di LPI e cedimenti post sisma ricavati con le tre differenti procedure di calcolo dell'FSL. Gli esiti di LPI sono attribuiti alle classi di pericolosità di liquefazione. In blu sono evidenziate le prove CPTU; in rosso sono evidenziate le prove CPT. Sono inoltre evidenziate in rosso i cedimenti superiori al "pollice"

La figura 7.8 riporta la sintesi delle verifiche di liquefacibilità sui punti di controllo disponibili. Si evince come il metodo di Idriss e Boulanger 2014 risulti il più cautelativo per il calcolo di FSL e conseguentemente anche per la stima di IL e dei cedimenti post sisma. La figura evidenzia anche gli esiti di cedimento superiori al “pollice”, generalmente più gravosi per le strutture/fondazioni di normale costruzione. Occorre tuttavia rammentare che il cedimento è cumulativo, riferito all'intero spessore di sedimenti investigati dalla prova; un'effettiva analisi del cedimento, in particolare della sua ammissibilità, dev'essere legata alle caratteristiche dei manufatti e all'effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.

Gli esiti di LPI/IL ricavati dal metodo di Boulanger & Idriss (2014) vengono considerati di riferimento per lo studio di MS e in particolare per la delimitazione delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni riportata nella cartografia di livello 3 (Tavole 6-7-8-9).

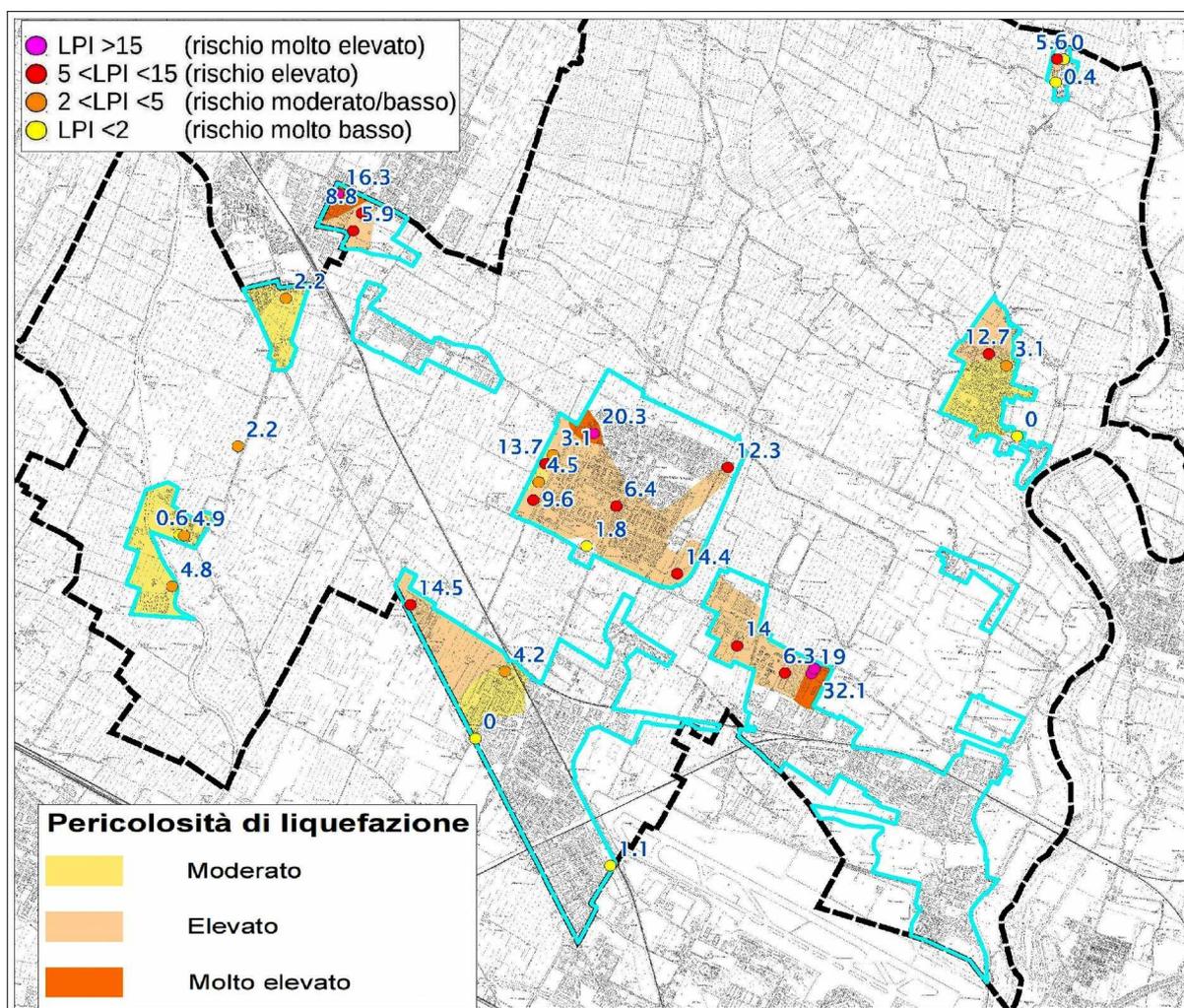


Figura 7.9 - Punti di controllo dell'Indice di Potenziale Liquefazione IL/LPI e zone di suscettibilità perimetrate nel territorio di Calderara di Reno

La figura 7.9 riporta una cartografia di sintesi delle verifiche di liquefacibilità e in particolare riporta la delimitazione delle “zone di suscettibilità” per le liquefazioni, basata sulle classi di pericolosità di Sonmez (2003) :

IL = 0	Potenziale “Nullo/Non liquefacibile”
0 < IL ≤ 2	Potenziale “basso”
2 < IL ≤ 5	Potenziale “medio”

$5 < IL \leq 15$	Potenziale “elevato”
$IL > 15$	Potenziale “molto elevato”

Dalle simulazioni sopra descritte, emergerebbe un quadro di “suscettibilità” di liquefazione relativamente complesso (da “basso” a “molto elevato”), tuttavia con areali che risultano adeguatamente classificabili. In particolare, si evidenziano le seguenti principali situazioni:

- ✓ nel settore meridionale della zona industriale “Bargellino”, la presenza di ghiaie e/o sabbie ghiaiose anche superficiali e la condizione di falda più depressa, limita se non addirittura esclude effetti significativi di liquefazione (pericolosità “bassa”). Nel settore nord ovest di Bargellino, invece, le minori soggiacenze della falda e la presenza di livelli sabbiosi poco profondi incrementa la propensione alla liquefacibilità da “moderato” a “elevato”;
- ✓ nel territorio comunale più a ovest, l'areale comprendente Sacerno evidenzia esiti di pericolosità variabili da “basso a “moderato”, tuttavia le evidenti eterogeneità tessiturali, legate alla presenza di modeste “crevasse” recenti limoso-sabbiose del vicino Torrente Lavino, consigliano di attribuire tutto l'areale a pericolosità “media”;
- ✓ più a nord di Sacerno e in particolare negli areali di Tavernelle e nella zona industriale “Via Verde”, le verifiche evidenziano un incremento della suscettibilità di liquefazione (da “medio” a “elevato”, per un contesto stratigrafico caratterizzato da apporti granulari recenti attribuibili al Torrenti Lavino e Samoggia;
- ✓ il Capoluogo, parte della zona industriale “San Vitale”, gli areali di Longara e Castel Campeggi (più a NE), hanno evidenziato esiti di pericolosità potenziale molto variabili (da “basso” a “molto elevato”, in quanto lo “sheet” ghiaioso del Fiume Reno è sovrastato da livelli sabbiosi in falda di spessori significativi (anche oltre un metro) e attribuibili anch'essi ad attività alluvionale più recente del Reno (prevalentemente rotte fluviali);

Peraltro, le nuove indagini e le verifiche di liquefacibilità, hanno consentito di modificare, nella cartografia MOPS di “livello 1”, i limiti di alcune “zone di attenzione” per liquefazioni, stralciando anche alcune piccole porzioni di territorio (es. settore sud del Capoluogo; Bargellino; Longara; Castel Campeggi).

In conclusione, gli esiti portano a giustificare la necessità di ulteriori approfondimenti relativamente alla liquefacibilità, tuttavia da prevedere alla scala locale e negli studi geologico sismici da espletare nelle fasi di progettazione. In questo senso, gli ulteriori approfondimenti dovranno anche considerare le caratteristiche prestazionali dei manufatti di progetto e le relative condizioni di ammissibilità rispetto alle condizioni di liquefacibilità che tali analisi potranno riscontrare.

Per il contesto litostratigrafico che caratterizza il territorio comunale di Calderara di Reno, si ritiene che, nelle “zone di attenzione” per liquefazioni perimetrate nella cartografia delle MOPS (Tavola 4), siano consigliabili indagini geotecniche che prevedano anche prove penetrometriche di tipo elettrico (possibilmente con piezocono) rispetto a penetrometrie con punta meccanica, in grado di fornire una migliore definizione tessiturale e meccanica degli intervalli che potrebbero risultare critici per la stabilità anche in condizioni sismiche.

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

### 8.1 Carta delle Indagini (Tavola 1)

Gli studi di microzonazione sismica hanno 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.

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 Calderara di Reno, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio. Per una descrizione dettagliata sulla tipologia delle indagini disponibili e in particolare di quelle eseguite per gli studi di MS 2013 e MS 2016 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 la tipologia delle 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 1:10.00, 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 sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.0);

Il territorio di studio è stato suddiviso nelle seguenti classi USCS/AGI:

<b>RI</b>	Aree di cava riempite con terreni di natura eterogenea
<b>GM</b>	Ghiaie e ghiaie sabbiose prevalenti con sottili livelli limosi – conoide alluvionale (ca)
<b>ML</b>	Limi argillosi e argille limose prevalenti con locali livelli di limi sabbiosi e sabbie – conoide alluvionale (ca) e piana pedemontana (pd)
<b>SM</b>	Sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi prevalenti alternati a limi argillosi e argille limose – piana pedemontana (pd)

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ “forme di superficie”, riconducibili a orli di scarpata morfologica;
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro;

- ✓ la localizzazione dei sondaggi o pozzi. Per Calderara di Reno una sola terebrazione ha consentito di raggiungere il cosiddetto “substrato geologico” inteso come depositi marini sepolti. Tuttavia cinque sondaggi (Bargellino;Lippo; Longara) consentono di intercettare il pseudobedrock sismico di riferimento per le modellazioni numeriche di RSL espletate;

La cartografia riporta, infine, le isobate del tetto delle ghiaie ricostruite all'epoca dello studio di MS 2013. I numerosi dati stratigrafici disponibili hanno infatti permesso di ricostruire alla scala 1:10.000, con un buon dettaglio, soprattutto nelle aree urbanizzate e a meno di locali incongruenze tra dati di diversa origine e qualità, le isobate del tetto delle prime ghiaie dalla superficie topografica. Tali isobate, con equidistanza 5 metri, arrivano fino ad una profondità di 20. Le isobate del tetto delle ghiaie sono risultate molto utili per la definizione dei modelli sismostratigrafici di RSL.

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

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna:  $f_0 \leq 1$  hz,  $1 < f_0 \leq 2$  hz,  $2 < f_0 \leq 8$  hz,  $f_0 > 8$  hz.

Si precisa che l'impianto della cartografia è la medesima già considerata per lo studio di MS 2013, riportando i punti di misura, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale ( $f_0$ ) registrata e quella di un eventuale secondo picco significativo a frequenza maggiore. Tali punti di misura sono tematizzati con colori per valore di ampiezza massima del picco di H/V. I valori superiori a 2.5 sono rappresentati coi colori arancio e rosso.

I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili (Castellaro, 2005), hanno permesso di individuare l'area in cui gli spessori dei depositi ghiaiosi sono prevalenti, di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito in alcuni casi il substrato rigido e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (cfr. Capitolo 7) .

È opportuno precisare che la suddivisione in aree per classi di frequenza risulta ovviamente più attendibile in corrispondenza delle principali località, poiché supportata da un numero di dati maggiore, mentre nelle aree di campagna si è dovuto ricorrere a metodi di interpolazione. Si limitano infine a poche unità le verticali di misura in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con la classe di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

La cartografia distingue le prove HVSR eseguite per lo studio di MS 2016 con lunghi tempi di registrazione, riportando gli esiti delle frequenze di amplificazione in blu.

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

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:10.000, 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", l'aggiornamento espletato con lo studio di MS 2016 permette di distinguere tre zone, così descritte in legenda:

2001

Zona 1 - Terreni di copertura costituiti da un primo livello limoso-argilloso a consistenza media di spessore inferiore a 5 metri, seguito da orizzonti ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio e rare alternanze limoso-argillose.

2002

Zona 2 - Terreni di copertura costituiti da un primo livello limoso-argilloso a consistenza media di spessore compreso tra 5 e 18 metri, seguito da livelli in prevalenza ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio alternati a limi e argille.

2003

Zona 3 - Terreni di copertura costituiti da livelli in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media.

La presenza di strati limoso sabbiosi ha imposto di delimitare due differenti "Zone di attenzione" per liquefazione (codici "30502004" e 30502005), differenziate in funzione del contesto litostratigrafico più profondo, e un'ulteriore "Zona di attenzione per cedimenti differenziali" (si tratta di aree di cava tombate), così descritte nella legenda:

30502004

ZA\_LQ - Zona di attenzione per liquefazione.

Terreni di copertura limoso-argillosi di spessore compreso tra 5 e 18 metri con livelli significativi di sabbie limose e limi sabbiosi potenzialmente liquefacibili, seguito da livelli in prevalenza ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio alternati a limi e argille.

30502005

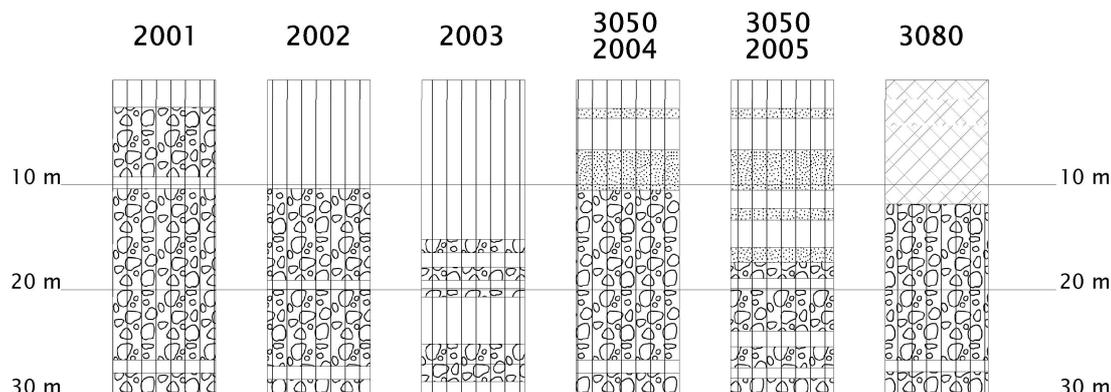
ZA\_LQ - Zona di attenzione per liquefazione.

Terreni di copertura limoso-argillosi con livelli significativi di sabbie-limose e limi-sabbiosi potenzialmente liquefacibili.

3080

ZA\_CD - Zona di attenzione per cedimenti differenziali - area di cava tombata.

Per le cinque classi individuate vengono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi, così come richiesto dalle linee guida (ICMS, 2015):



Si precisa che le due “zone di attenzione” per liquefazione sono rispettivamente assimilabili alla zona 2002 (la 30502004) e alla zona 2003 (la 30502005) tuttavia con livelli limoso sabbiosi significativi.

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 ( $V_{s_{30}}$ ) oppure della  $V_sH$ . 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), sia numerica.

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

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

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 3>> sono elaborate alla scala 1:5.000 e riportano le “zone stabili suscettibili di amplificazioni”, le “zone suscettibili di instabilità” per le liquefazioni e le “zone di attenzione” per cedimenti differenziali riscontrate nel territorio studiato di Calderara di Reno. 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 amplificazioni” 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 agli areali studiati i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base di modellazioni numeriche della RSL (approfondimenti di “livello 3”) e in altri casi 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, sono state perimetrare 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 6a/b → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- ✓ Tavola 7a/b → 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 8a/b → 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 9a/b → 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 XXIII 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.
- Tarabusi G. (2013). Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Calderara di Reno – Livello 2 – in attuazione dell'art. 11 della Legge n.77/2009.
- 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.

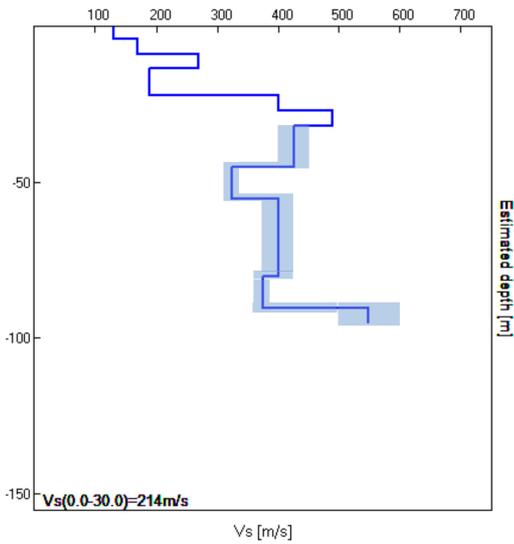
## **ALLEGATI:**

SCHEDA MODELLI NUMERICI RSL

VERIFICHE NUMERICHE LIQUEFAZIONE (BOULANGER & IDRIS 2014)

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – CAPOLUOGO1

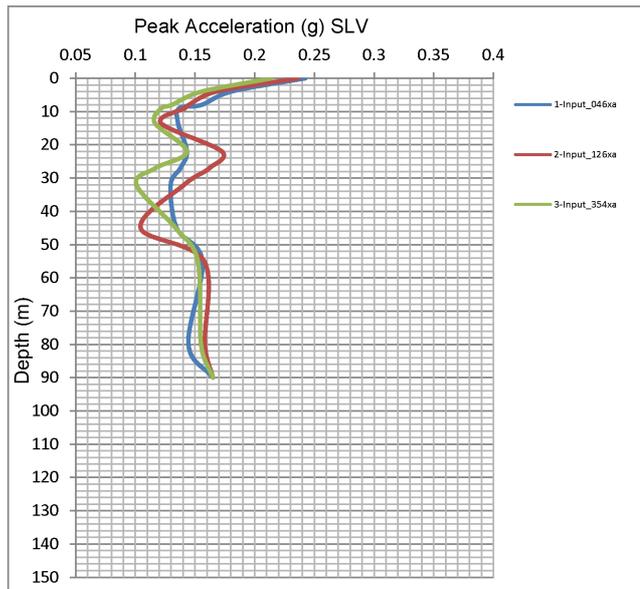
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



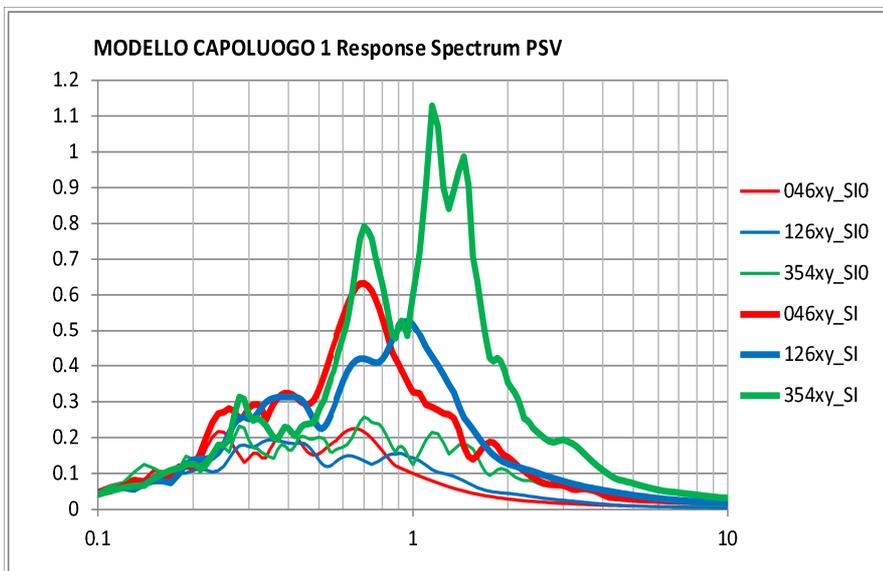
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	4,0	4,0	17,5	0,05	130	Soil PI=12 (Calderara)
2	4,0	8,0	18,0	0,05	170	Soil PI=20 (Calderara)
3	1,0	9,0	18,0	0,05	170	Soil PI=12 (Calderara)
4	4,5	13,5	19,5	0,05	270	Gravel
5	8,5	22,0	18,5	0,05	190	Soil PI=12 (Calderara)
6	5,0	27,0	20,5	0,05	400	Gravel
7	5,0	32,0	21,0	0,05	490	Gravel
8	13,0	45,0	21,0	0,05	425	Gravel
9	10,0	55,0	19,0	0,05	325	Soil PI=20 (Calderara)
10	25,0	80,0	20,0	0,05	400	Sand Upper
11	10,0	90,0	20,0	0,05	375	Soil PI=20 (Calderara)
Profondità media pseudobedrock: -90 m					550	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

CAPOLUOGO1		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.242	0.237	0.214	0.237
1227/2015	FA Pga	1.5	1.4	1.3	1.4



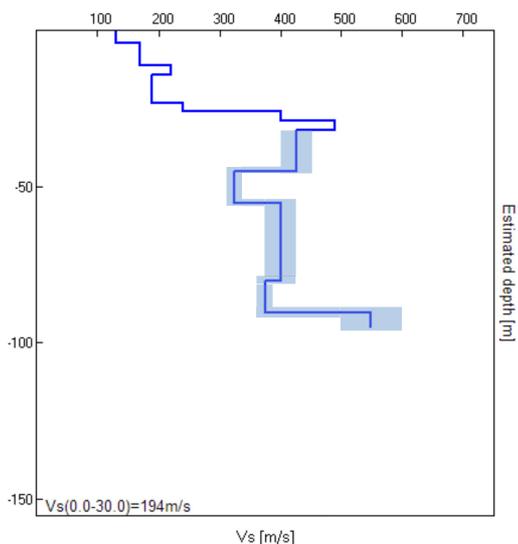
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input 000046xy	1.5	3.0	3.2
Input 000046xy	1.5	3.0	3.3
Input 000354xy	1.2	3.0	4.0
<b>MEAN</b>	<b>1.4</b>	<b>3.0</b>	<b>3.5</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – CAPOLUOGO2

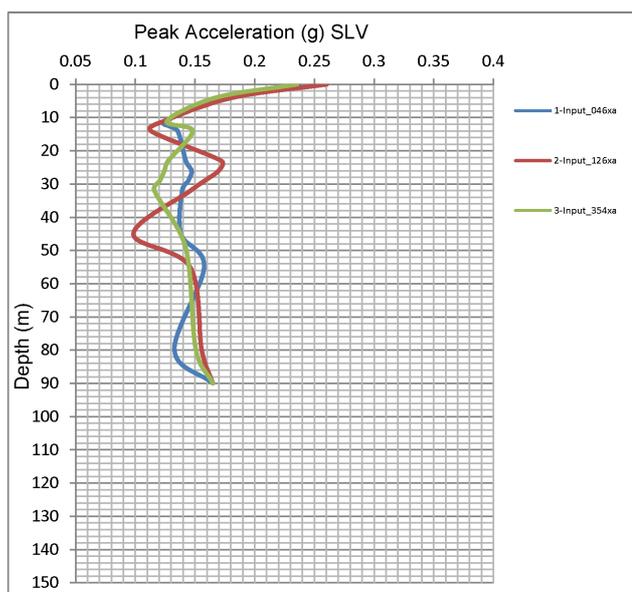
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



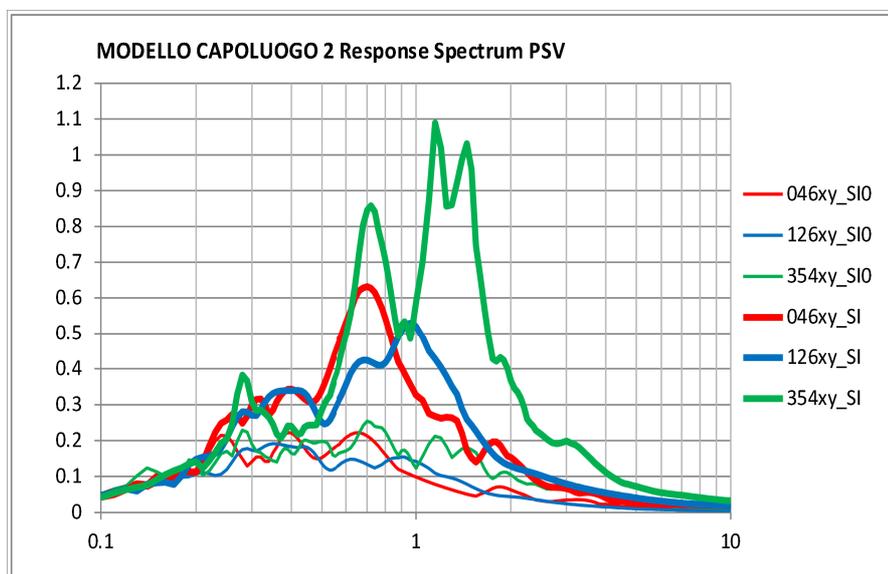
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	4,0	4,0	17,5	0,05	130	Soil PI=12 (Calderara)
2	7,0	11,0	18,0	0,05	170	Soil PI=20 (Calderara)
3	3,0	14,0	19,0	0,05	220	Sand Avg.
4	9,0	23,0	18,5	0,05	190	Soil PI=12 (Calderara)
5	3,0	26,0	19,0	0,05	240	Sand Upper
6	3,0	29,0	20,5	0,05	400	Gravel
7	3,0	32,0	21,0	0,05	490	Gravel
8	13,0	45,0	21,0	0,05	425	Gravel
9	10,0	55,0	19,0	0,05	325	Soil PI=20 (Calderara)
10	25,0	80,0	20,0	0,05	400	Sand Upper
11	10,0	90,0	20,0	0,05	375	Soil PI=20 (Calderara)
Profondità media pseudobedrock: -90 m					550	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

CAPOLUOGO2		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.237	0.260	0.236	0.244
1227/2015	FA Pga	1.4	1.6	1.4	1.5



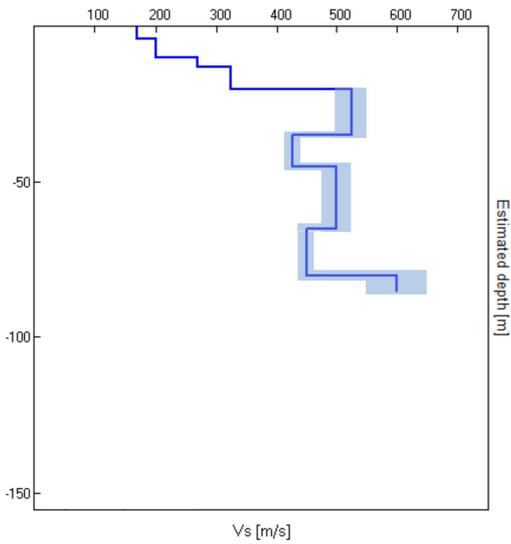
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (S<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input 000046xy	1.6	3.0	3.2
Input 000046xy	1.6	3.1	3.3
Input 000354xy	1.3	3.2	4.1
<b>MEAN</b>	<b>1.5</b>	<b>3.1</b>	<b>3.5</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – BARGELLINO1

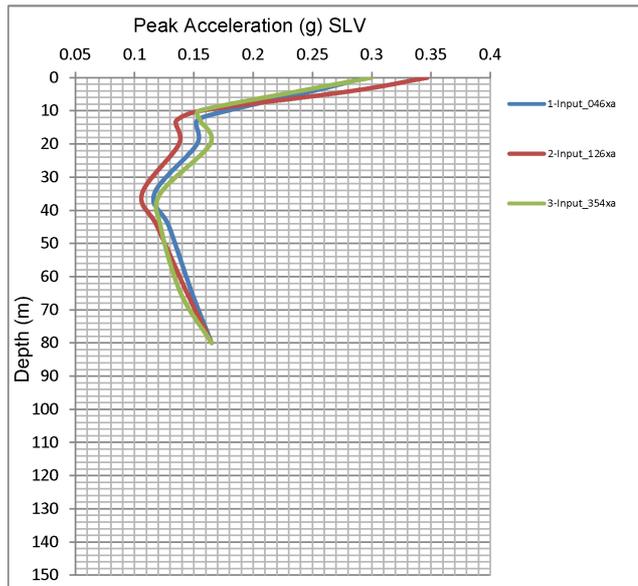
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



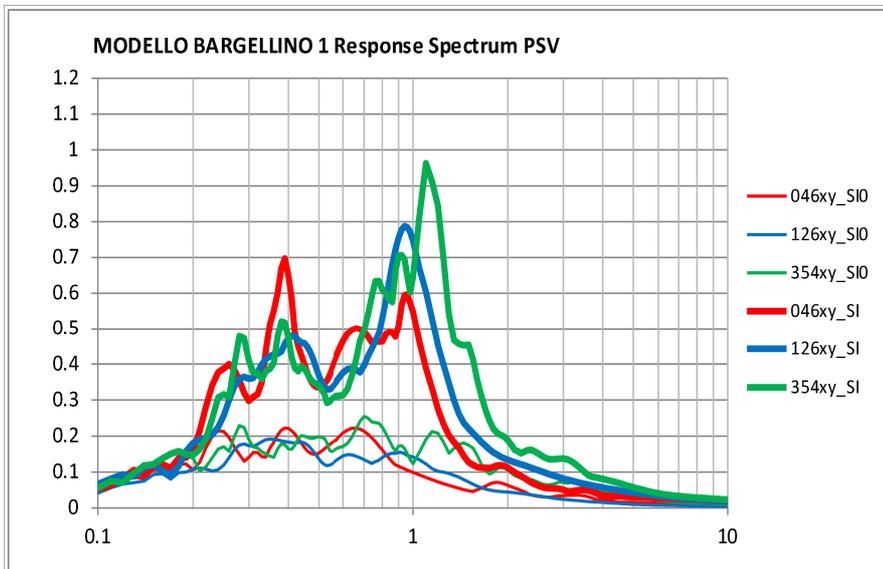
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	4,0	4,0	18,0	0,05	170	Soil PI=12 (Calderara)
2	6,0	10,0	18,5	0,05	200	Soil PI=12 (Calderara)
3	3,0	13,0	19,0	0,05	270	Sand upper
4	7,0	20,0	20,0	0,05	325	Sand upper
5	15,0	35,0	21,0	0,05	525	Gravel
6	10,0	45,0	20,0	0,05	425	Soil PI=0
7	20,0	65,0	21,0	0,05	500	Gravel
8	15,0	80,0	20,0	0,05	450	Soil PI=0
Profondità media pseudobedrock: -80 m					600	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

BARGELLINO1		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.295	0.347	0.299	<b>0.314</b>
1227/2015	FA Pga	1.8	2.1	1.8	<b>1.9</b>



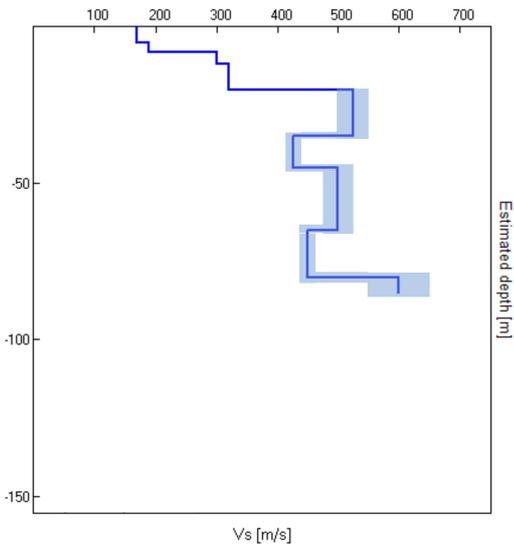
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	2.2	3.0	3.2
Input_000046xy	2.2	3.9	3.9
Input_000354xy	2.0	2.8	3.2
<b>MEAN</b>	<b>2.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.4</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – BARGELLINO2

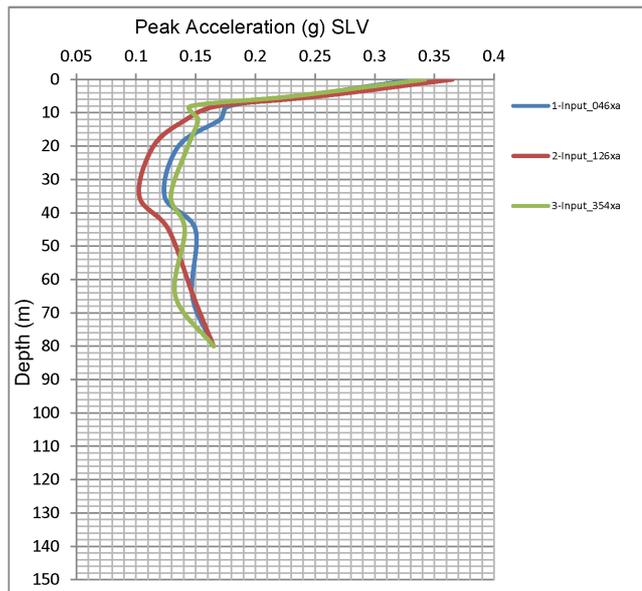
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM ↓



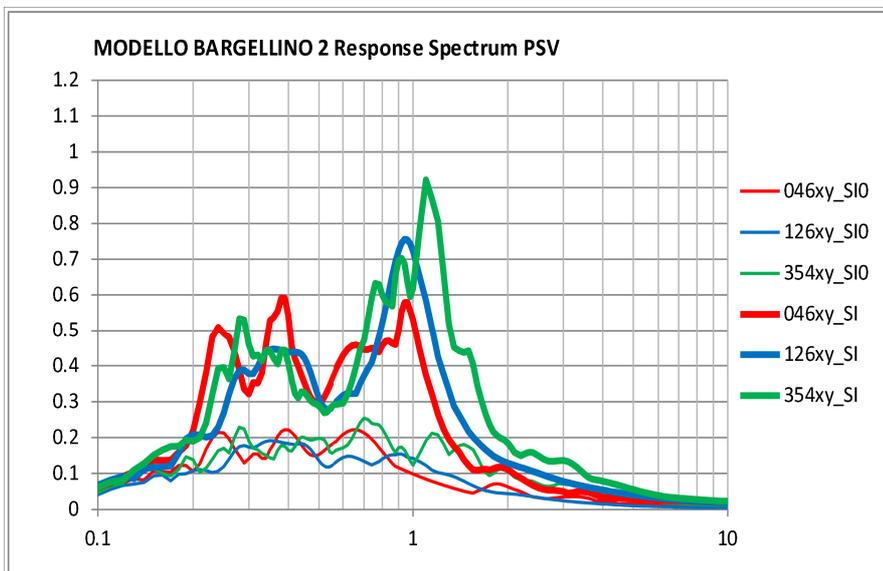
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	5,0	5,0	17,5	0,05	170	Soil PI=12 (Calderara)
2	3,0	8,0	17,5	0,05	190	Soil PI=20 (Calderara)
3	4,0	12,0	19,0	0,05	300	Sand upper
4	8,0	20,0	20,0	0,05	320	Sand upper
5	15,0	35,0	21,0	0,05	525	Gravel
6	10,0	45,0	20,0	0,05	425	Soil PI=0
7	20,0	65,0	21,0	0,05	500	Gravel
8	15,0	80,0	20,0	0,05	450	Soil PI=0
Profondità media pseudobedrock: -80 m					600	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

BARGELLINO2		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.334	0.365	0.342	0.347
1227/2015	FA Pga	2.0	2.2	2.1	2.1



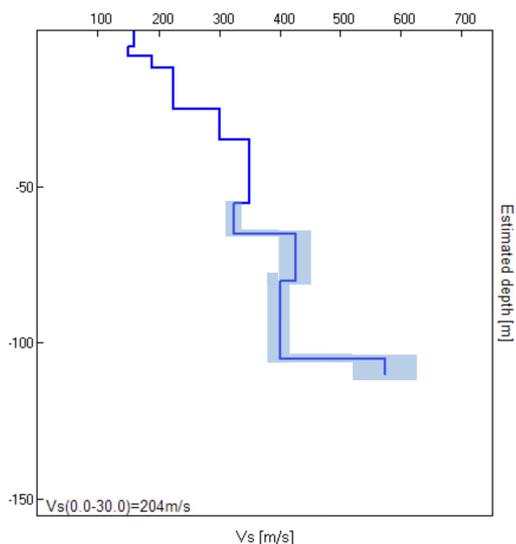
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	2.2	2.9	3.0
Input_000046xy	2.2	3.6	3.7
Input_000354xy	2.0	2.8	3.1
<b>MEAN</b>	<b>2.1</b>	<b>3.1</b>	<b>3.3</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – LONGARA1

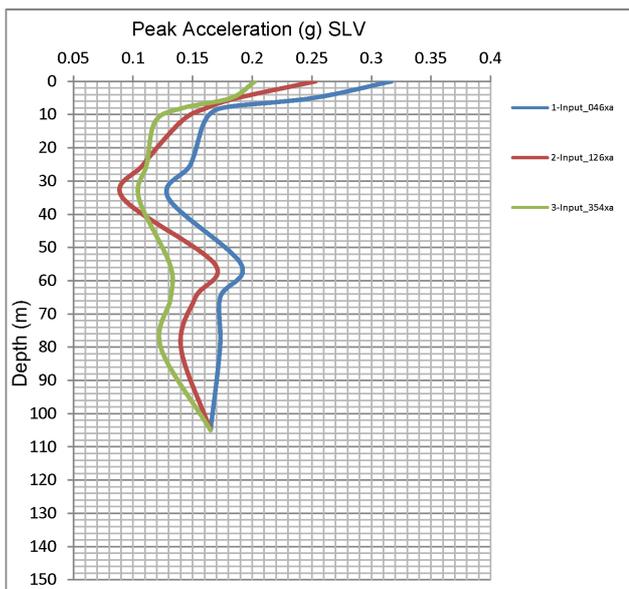
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



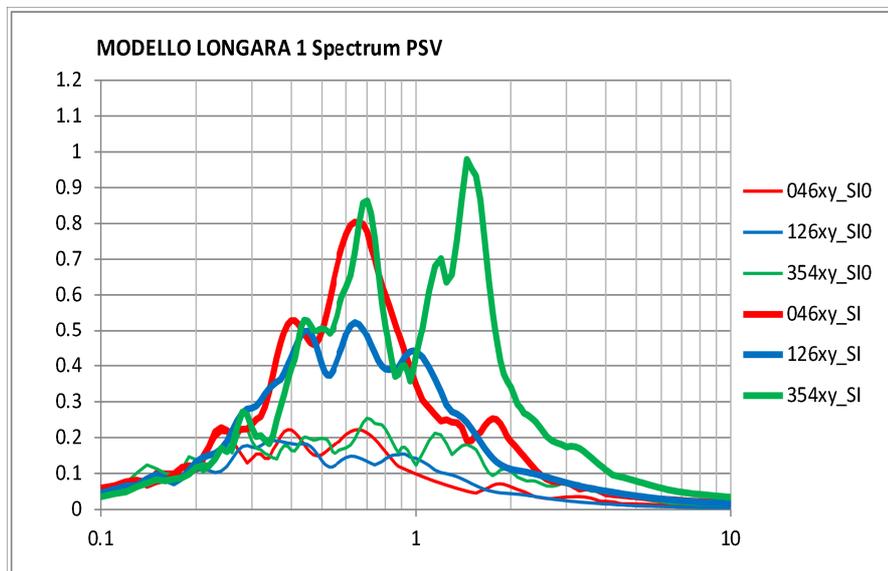
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	5,0	5,0	18,0	0,05	160	Soil PI=0
2	3,0	8,0	17,0	0,05	150	Soil PI=20 (Calderara)
3	4,0	12,0	17,5	0,05	190	Soil PI=12 (Calderara)
4	13,0	25,0	18,0	0,05	225	Soil PI=20 (Calderara)
5	10,0	35,0	20,0	0,05	300	Sand Upper
6	20,0	55,0	21,0	0,05	350	Gravel
7	10,0	65,0	19,0	0,05	325	Soil PI=20 (Calderara)
8	15,0	80,0	20,0	0,05	425	Sand Upper
9	25,0	105,0	19,0	0,05	400	Soil PI=20 (Calderara)
Profondità media pseudobedrock: -105 m					575	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

LONGARA1		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.317	0.253	0.202	0.257
1227/2015	FA Pga	1.9	1.5	1.2	1.6



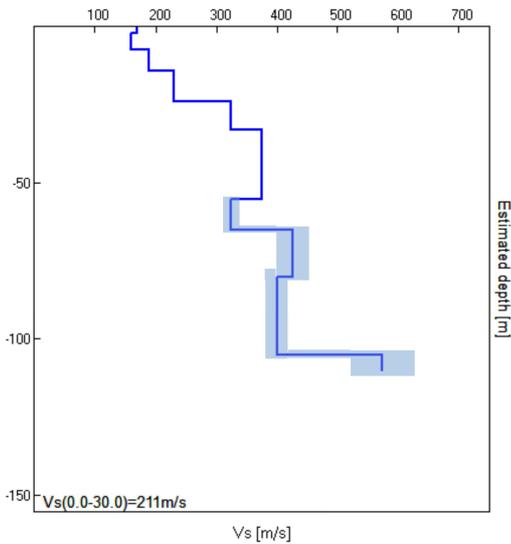
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (S<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.9	3.7	3.7
Input_000046xy	1.9	3.1	3.1
Input_000354xy	1.6	2.9	3.5
<b>MEAN</b>	<b>1.8</b>	<b>3.2</b>	<b>3.4</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – LONGARA2

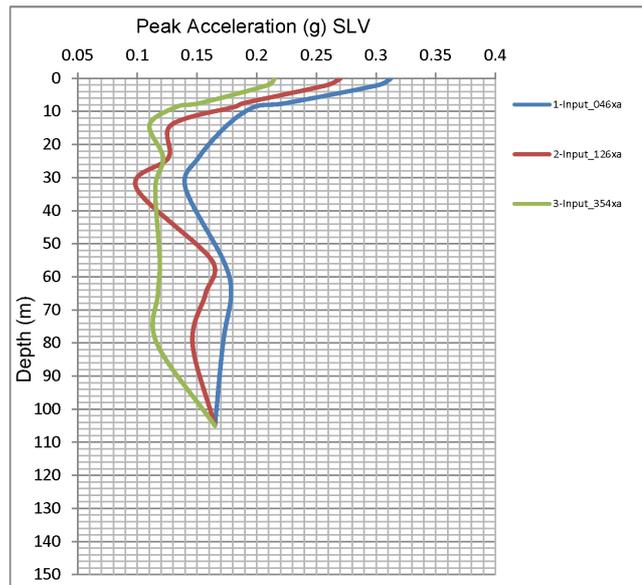
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



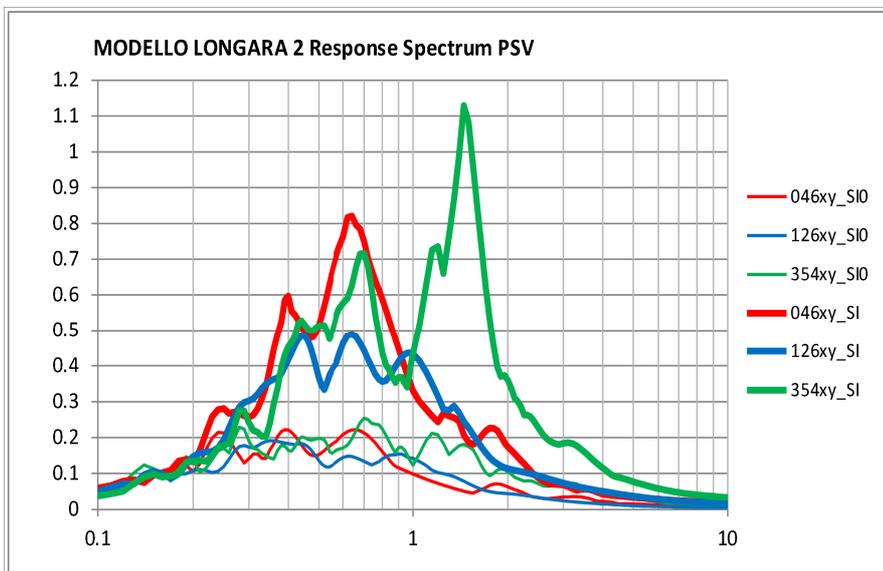
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	17,5	0,05	170	Soil PI=0
2	5,5	7,5	17,0	0,05	160	Soil PI=20 (Calderara)
3	1,0	8,5	18,0	0,05	190	Soil PI=0
4	5,5	14,0	17,5	0,05	190	Soil PI=20 (Calderara)
5	10,0	24,0	18,0	0,05	230	Soil PI=20 (Calderara)
6	9,0	33,0	20,0	0,05	325	Sand Upper
7	22,0	55,0	21,0	0,05	375	Gravel
8	10,0	65,0	19,0	0,05	325	Soil PI=20 (Calderara)
9	15,0	80,0	20,0	0,05	425	Sand Upper
10	25,0	105,0	19,0	0,05	400	Soil PI=20 (Calderara)
Profondità media pseudobedrock: -105 m					575	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

LONGARA2		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.312	0.270	0.215	0.266
1227/2015	FA Pga	1.9	1.6	1.3	1.6



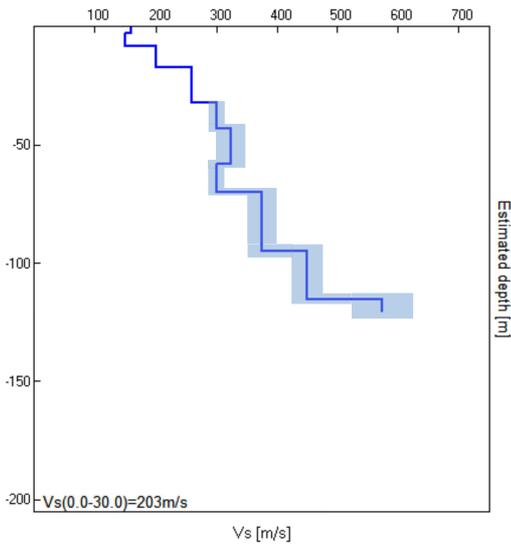
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (S<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input 000046xy	2.1	3.6	3.7
Input 000046xy	2.0	3.0	3.0
Input 000354xy	1.7	2.7	3.6
<b>MEAN</b>	<b>1.9</b>	<b>3.1</b>	<b>3.4</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – CASTEL CAMPEGGI

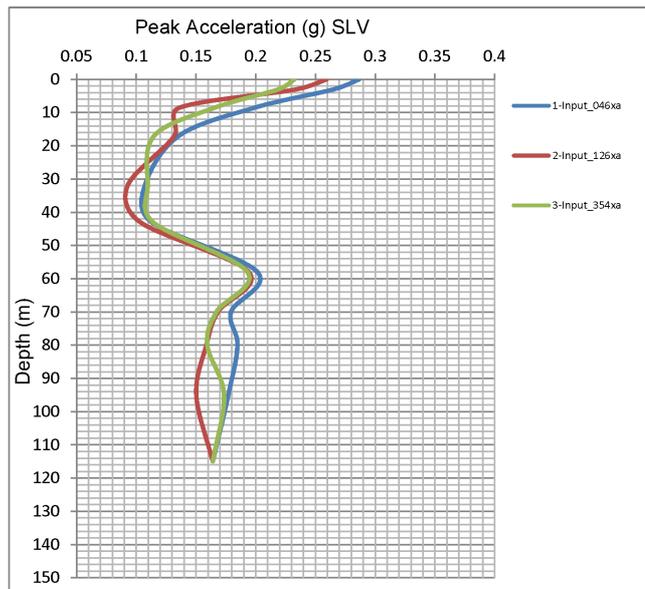
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM ↓



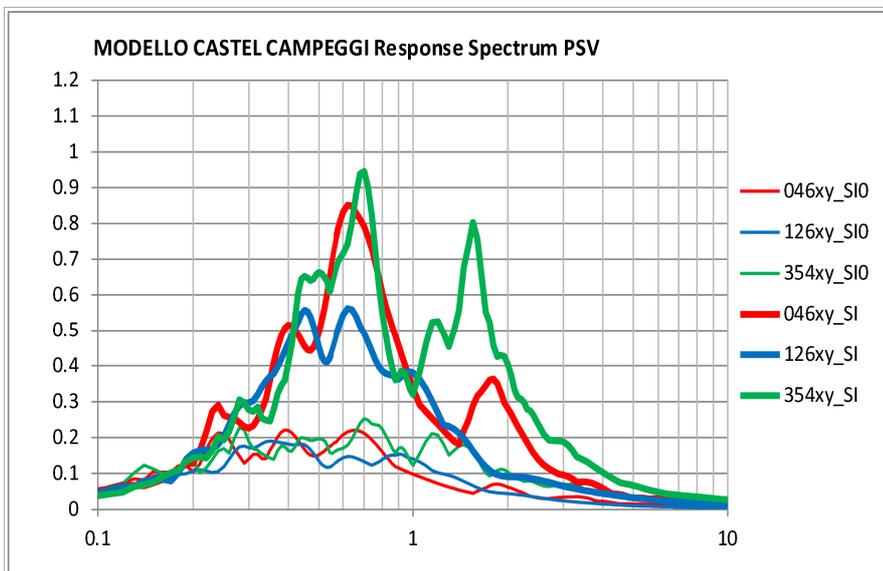
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	3,0	3,0	17,5	0,05	160	Soil PI=0
2	5,5	8,5	17,0	0,05	150	Soil PI=12 (Calderara)
3	8,5	17,0	18,0	0,05	200	Soil PI=20 (Calderara)
4	15,0	32,0	19,0	0,05	260	Soil PI=20 (Calderara)
5	11,0	43,0	20,0	0,05	300	Sand Upper
6	15,0	58,0	20,0	0,05	325	Gravel
7	12,0	70,0	19,0	0,05	300	Soil PI=20 (Calderara)
8	10,0	80,0	20,0	0,05	375	Sand Upper
9	15,0	95,0	19,0	0,05	375	Soil PI=20 (Calderara)
10	20,0	115,0	19,0	0,05	450	Soil PI=20 (Calderara)
Profondità media pseudobedrock: -115 m					575	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

CASTEL CAMPEGGI		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.286	0.259	0.232	0.259
1227/2015	FA Pga	1.7	1.6	1.4	1.6



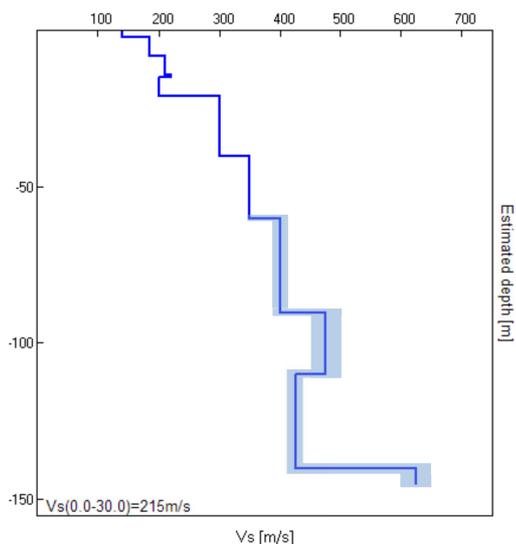
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (S<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.9	3.8	3.7
Input_000046xy	2.1	3.1	2.9
Input_000354xy	2.0	3.1	3.1
<b>MEAN</b>	<b>2.0</b>	<b>3.3</b>	<b>3.2</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – TAVERNELLE

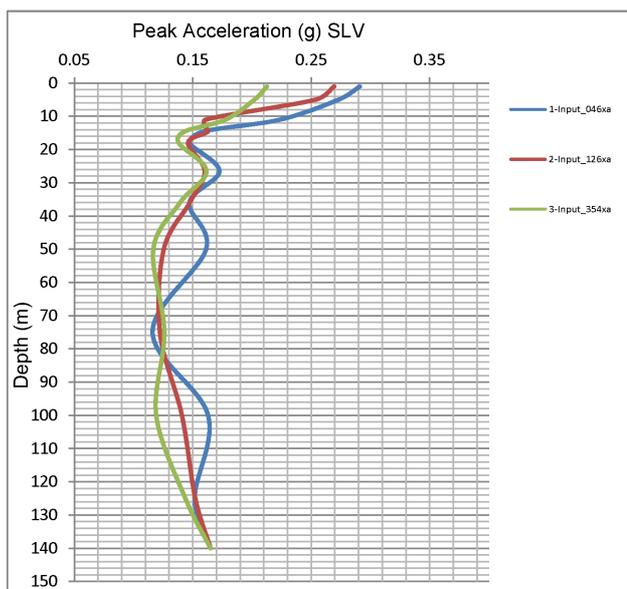
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



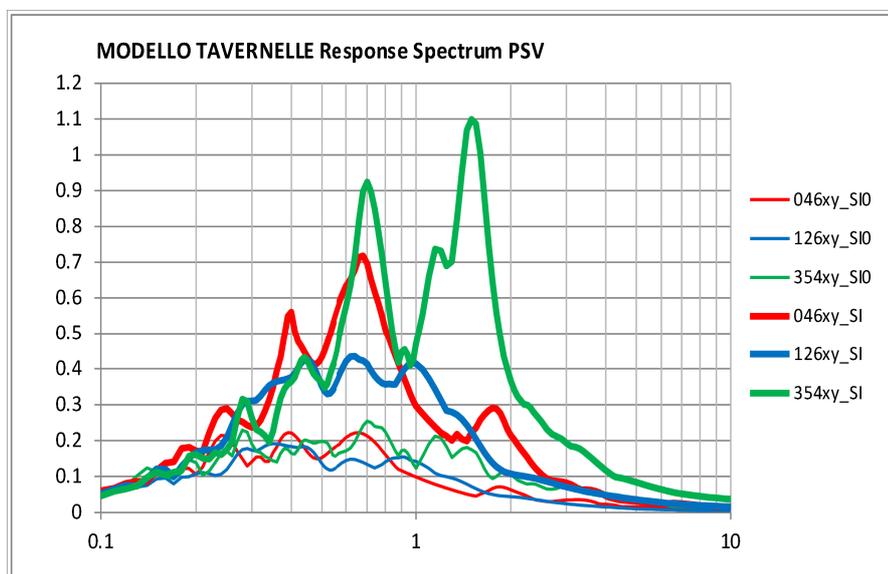
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	17,0	0,05	140	Soil PI=12 (Calderara)
2	6,0	8,0	18,0	0,05	185	Soil PI=30
3	6,0	14,0	18,5	0,05	210	Soil PI=30
4	1,0	15,0	19,0	0,05	220	Sand Avg.
5	6,0	21,0	18,0	0,05	200	Soil PI=30
6	11,0	32,0	20,0	0,05	300	Sand Avg.
7	8,0	40,0	19,0	0,05	300	Soil PI=30
8	20,0	60,0	19,0	0,05	350	Soil PI=30
9	30,0	90,0	19,5	0,05	400	Soil PI=30
10	20,0	110,0	21,0	0,05	475	Sand Upper
11	30,0	140,0	21,0	0,05	425	Soil PI=30
Profondità media pseudobedrock: -140 m					625	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

TAVERNELLE		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.291	0.269	0.213	0.258
1227/2015	FA Pga	1.8	1.6	1.3	1.6



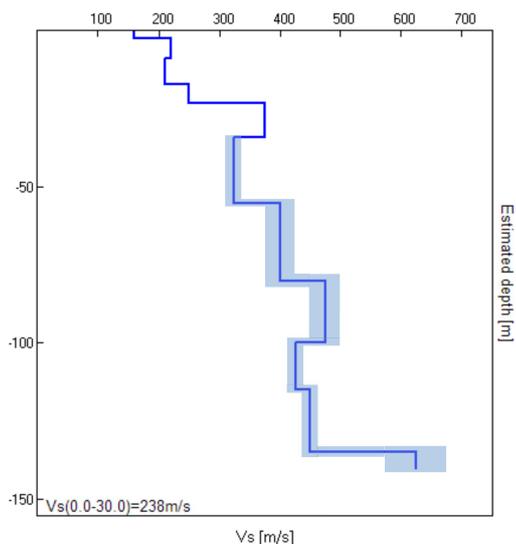
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input 000046xy	1.9	3.1	3.2
Input 000046xy	1.9	2.8	2.9
Input 000354xy	1.6	3.1	3.8
<b>MEAN</b>	<b>1.8</b>	<b>3.0</b>	<b>3.3</b>

# MODELLO SHAKE MS CALDERARA DI RENO – SACERNO

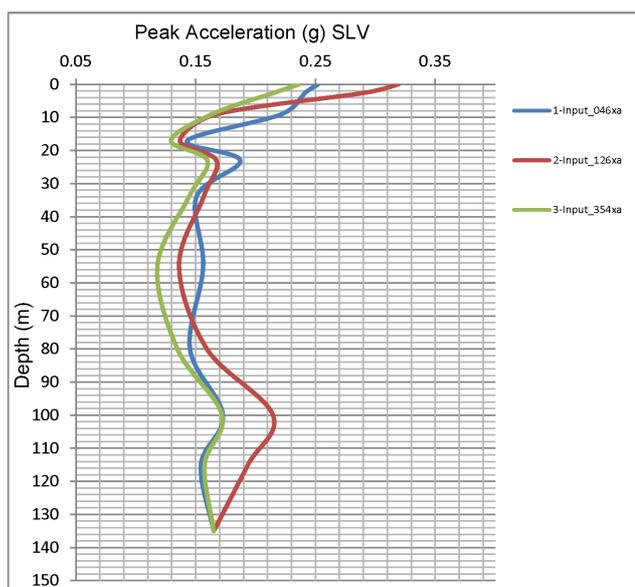
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI ↓



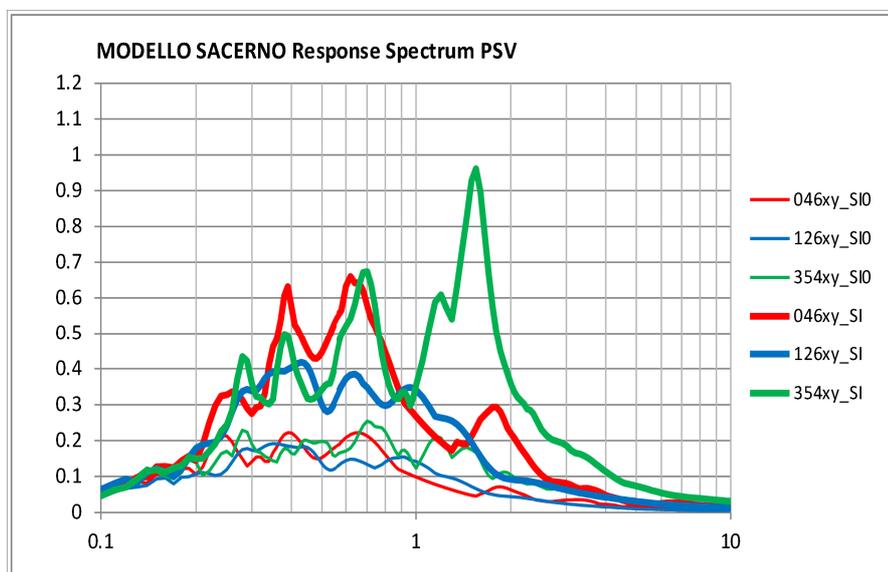
Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,5	2,5	18,5	0,05	160	Soil PI=12 (Calderara)
2	6,5	9,0	18,5	0,05	220	Soil PI=30
3	8,0	17,0	18,0	0,05	210	Soil PI=30
4	6,0	23,0	18,5	0,05	250	Soil PI=30
5	11,0	34,0	20,0	0,05	375	Gravel
6	21,0	55,0	19,0	0,05	325	Soil PI=30
7	25,0	80,0	19,0	0,05	400	Soil PI=30
8	20,0	100,0	21,0	0,05	475	Gravel
9	15,0	115,0	20,0	0,05	425	Soil PI=30
10	20,0	135,0	21,0	0,05	450	Soil PI=30
Profondità media pseudobedrock: -135 m					625	

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →

SACERNO		Input_046xy	Input_126xy	Input_354xy	MEAN
DGR 1227/2015	Max ag (g)	0.252	0.319	0.236	0.269
	FA Pga	1.5	1.9	1.4	1.6

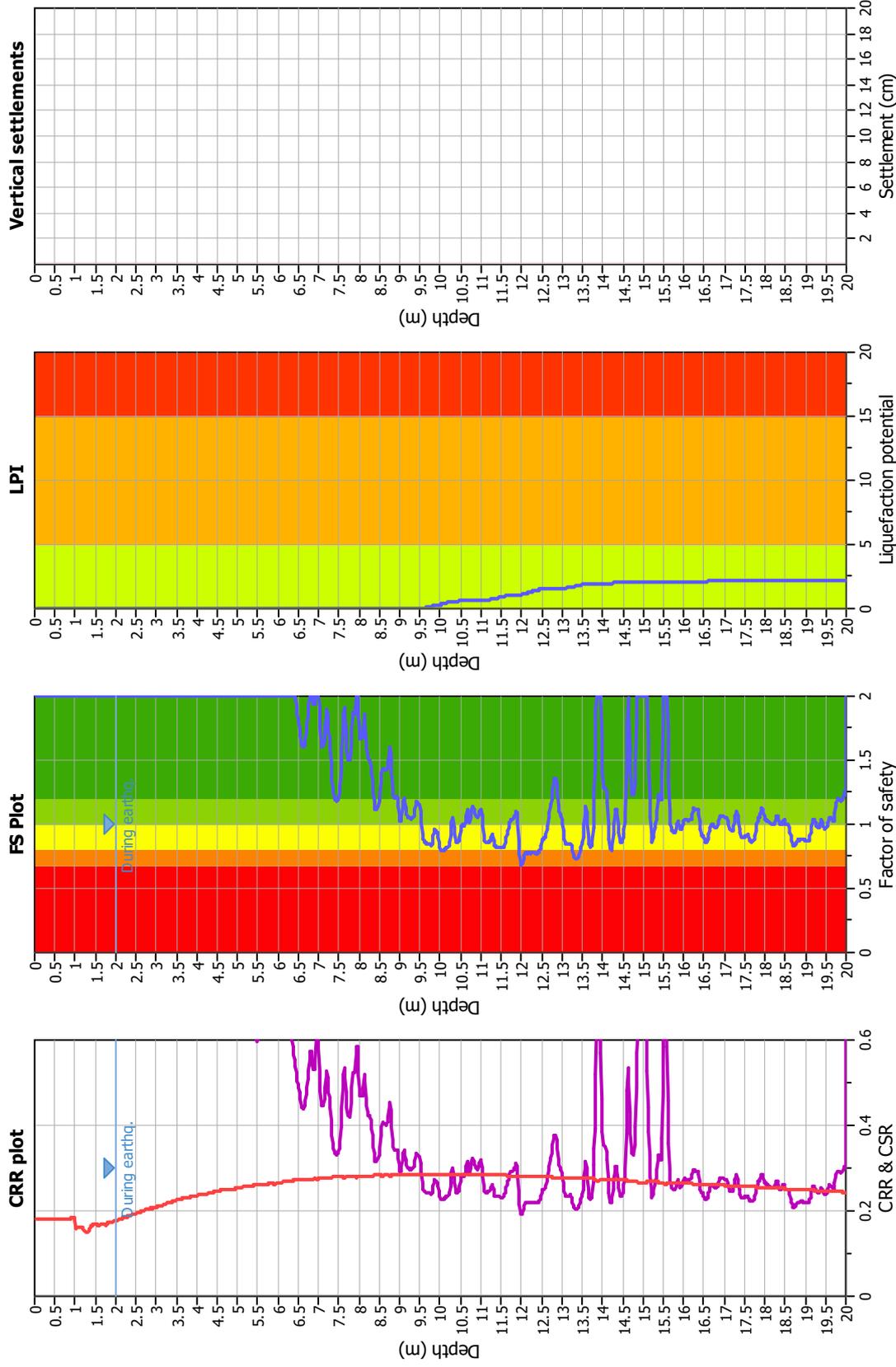


SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI<sub>0</sub>) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI ↓



DGR 1227/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input 000046xy	2.2	2.8	2.9
Input 000046xy	2.0	2.4	2.5
Input 000354xy	1.8	2.3	3.0
<b>MEAN</b>	<b>2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>2.8</b>

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

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

Depth to GWT (earthq.): 2.00 m  
 Average results interval: 3  
 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  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

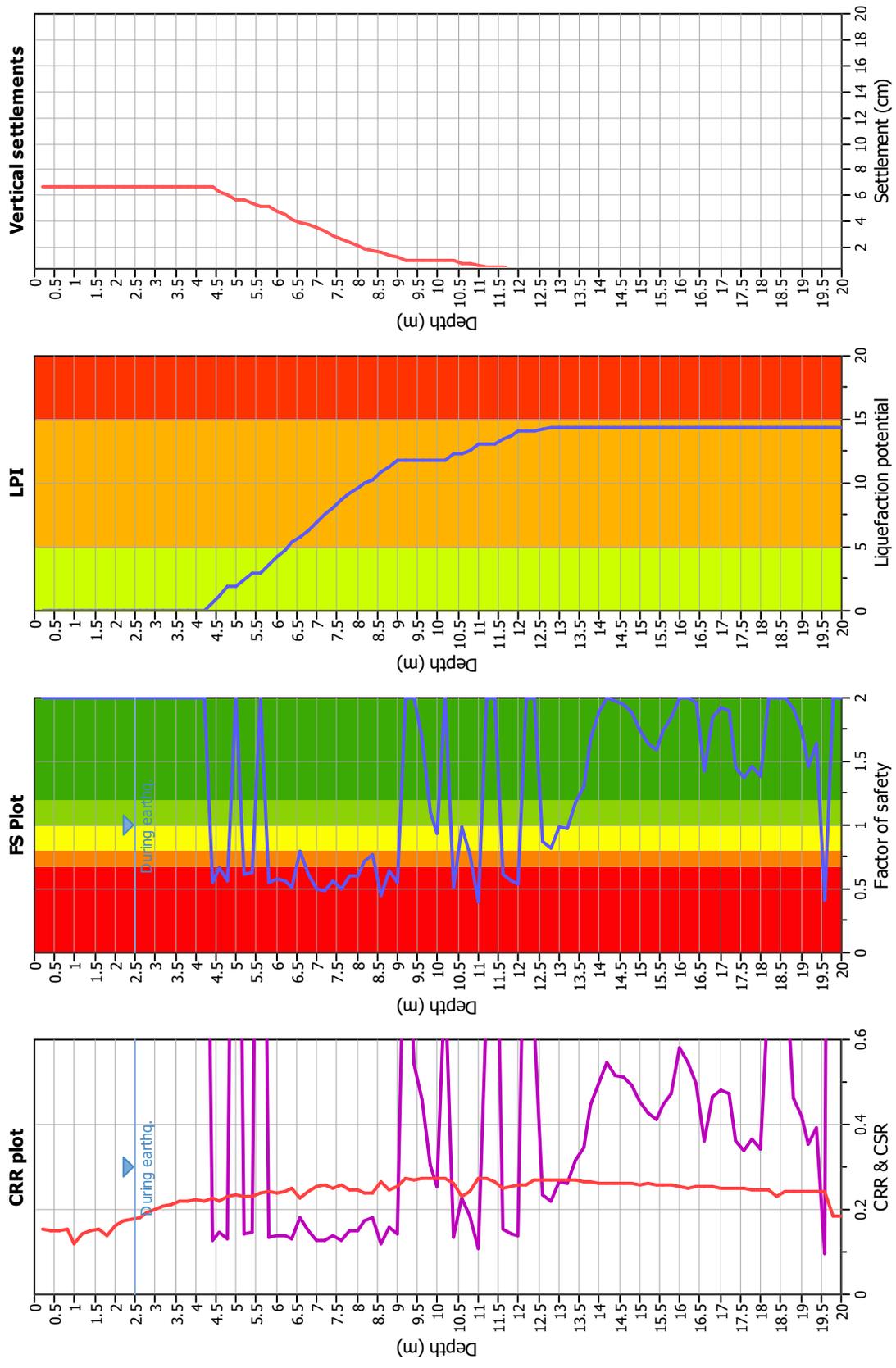
#### F. S. color scheme

■ 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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.24  
 Depth to water table (insitu): 3.20 m

### F. S. color scheme

Fill weight: 2.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

### LPI color scheme

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

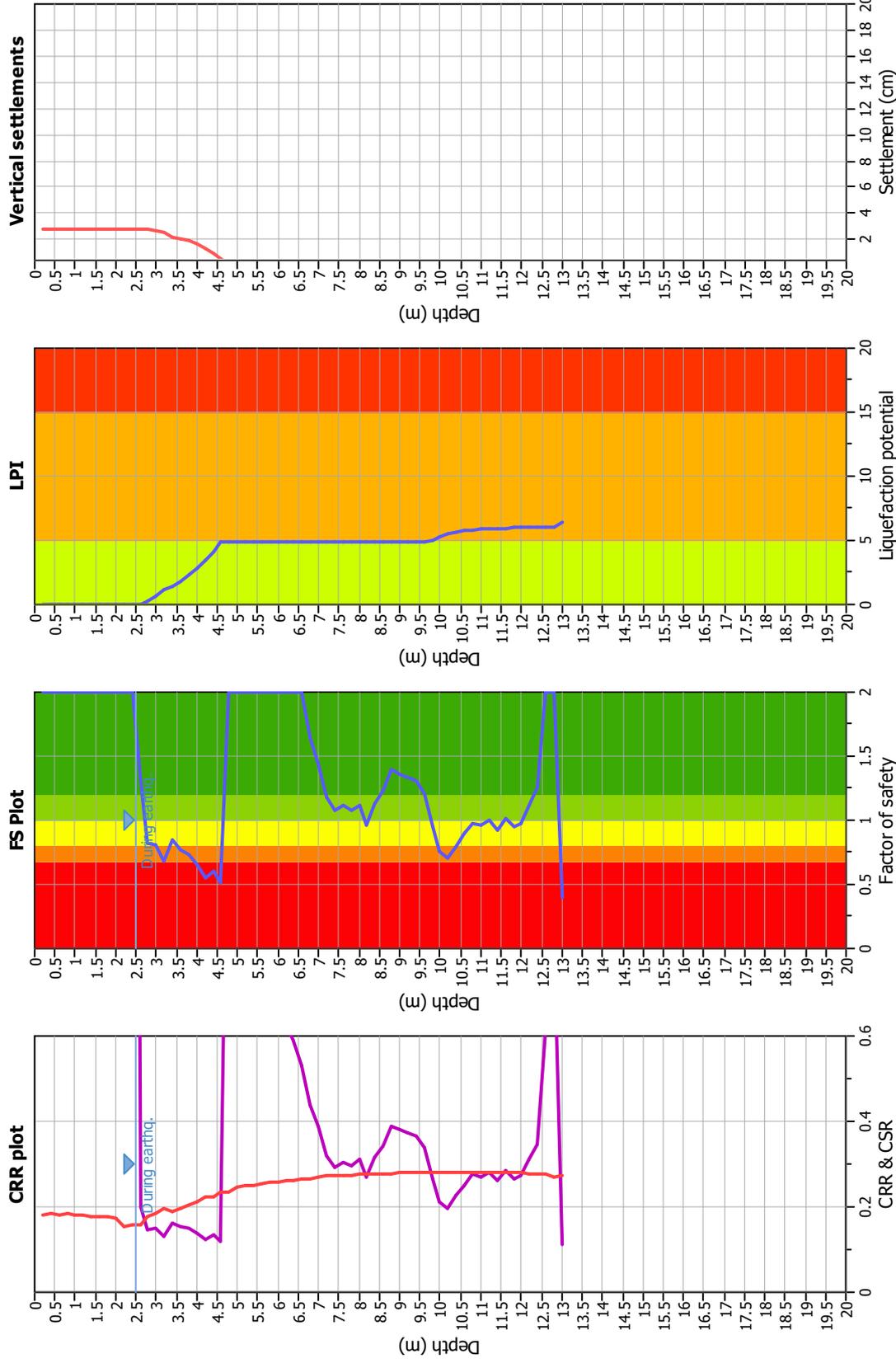
### F. S. color scheme

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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.24  
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

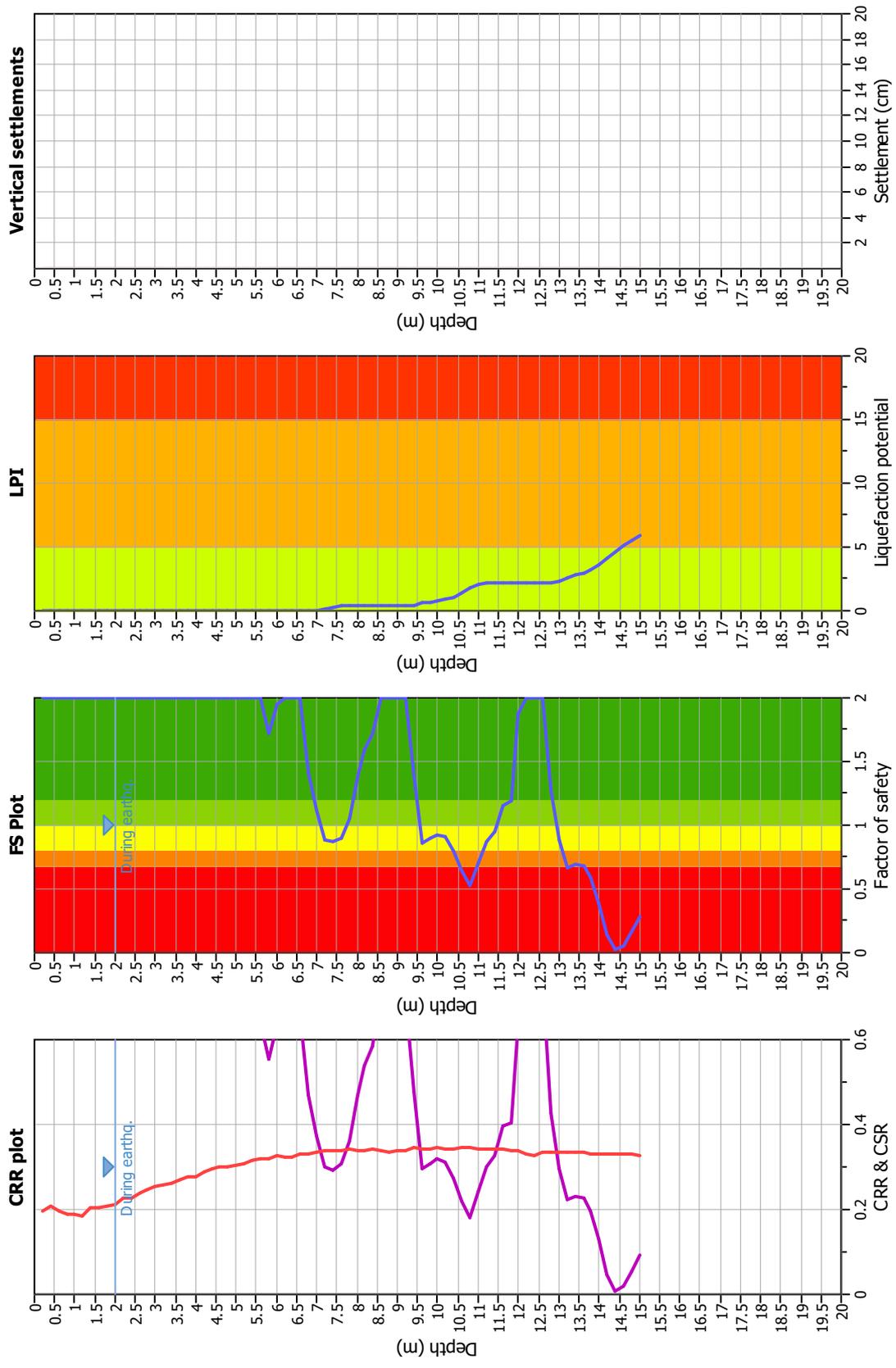
#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

#### F. S. color scheme

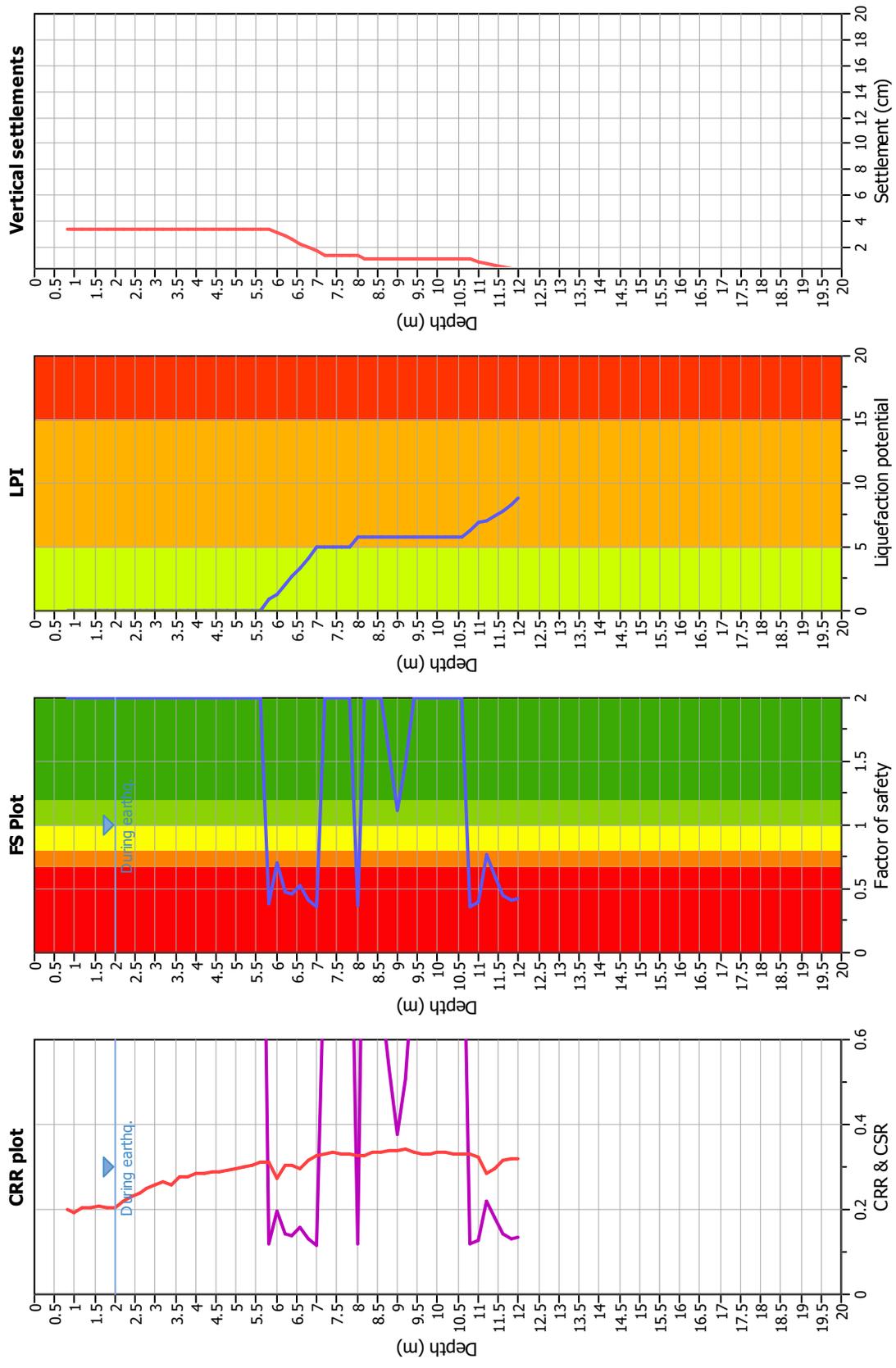
■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

#### 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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.50 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

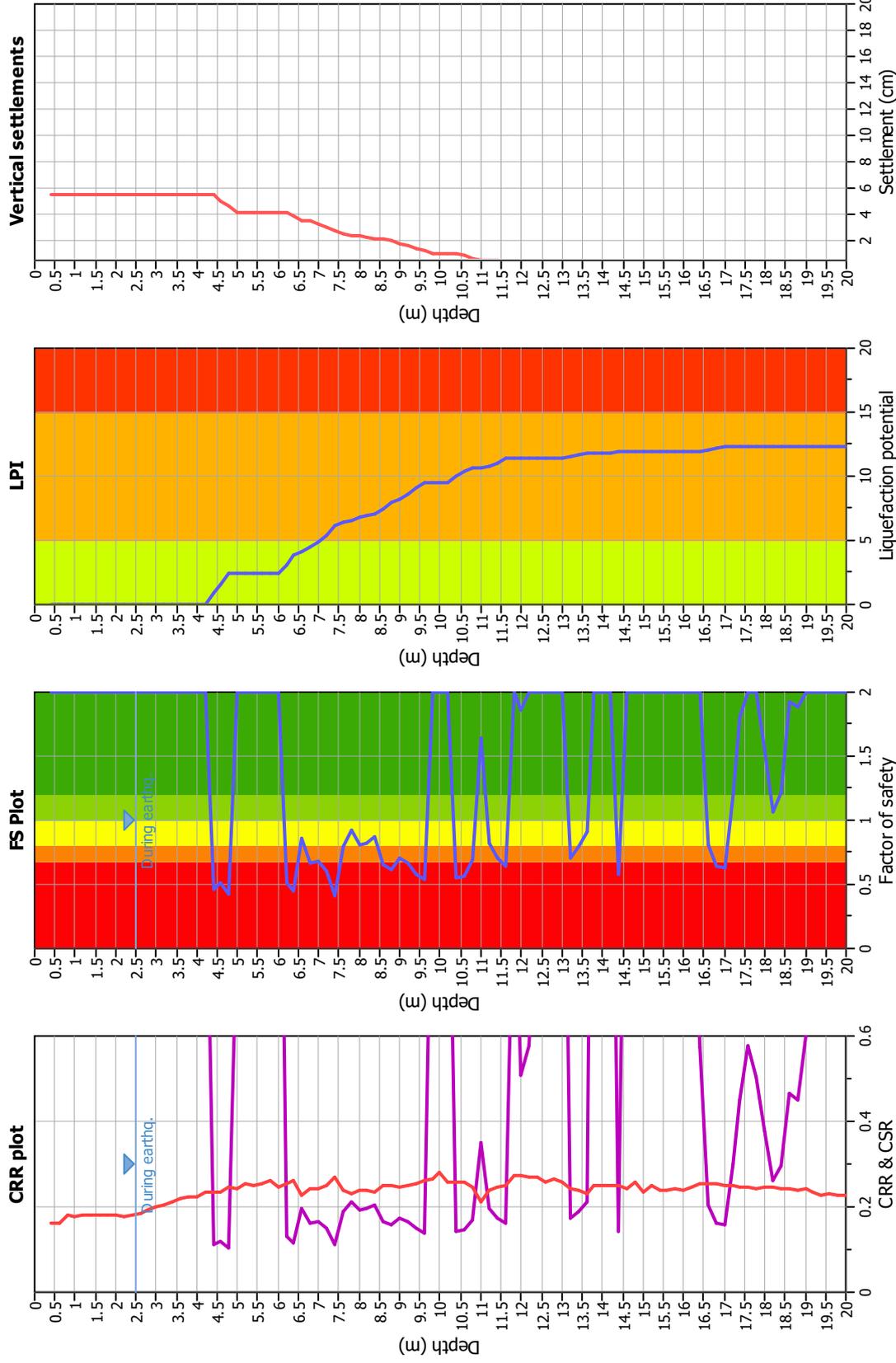
#### LPI color scheme

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

#### F. S. color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.24  
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

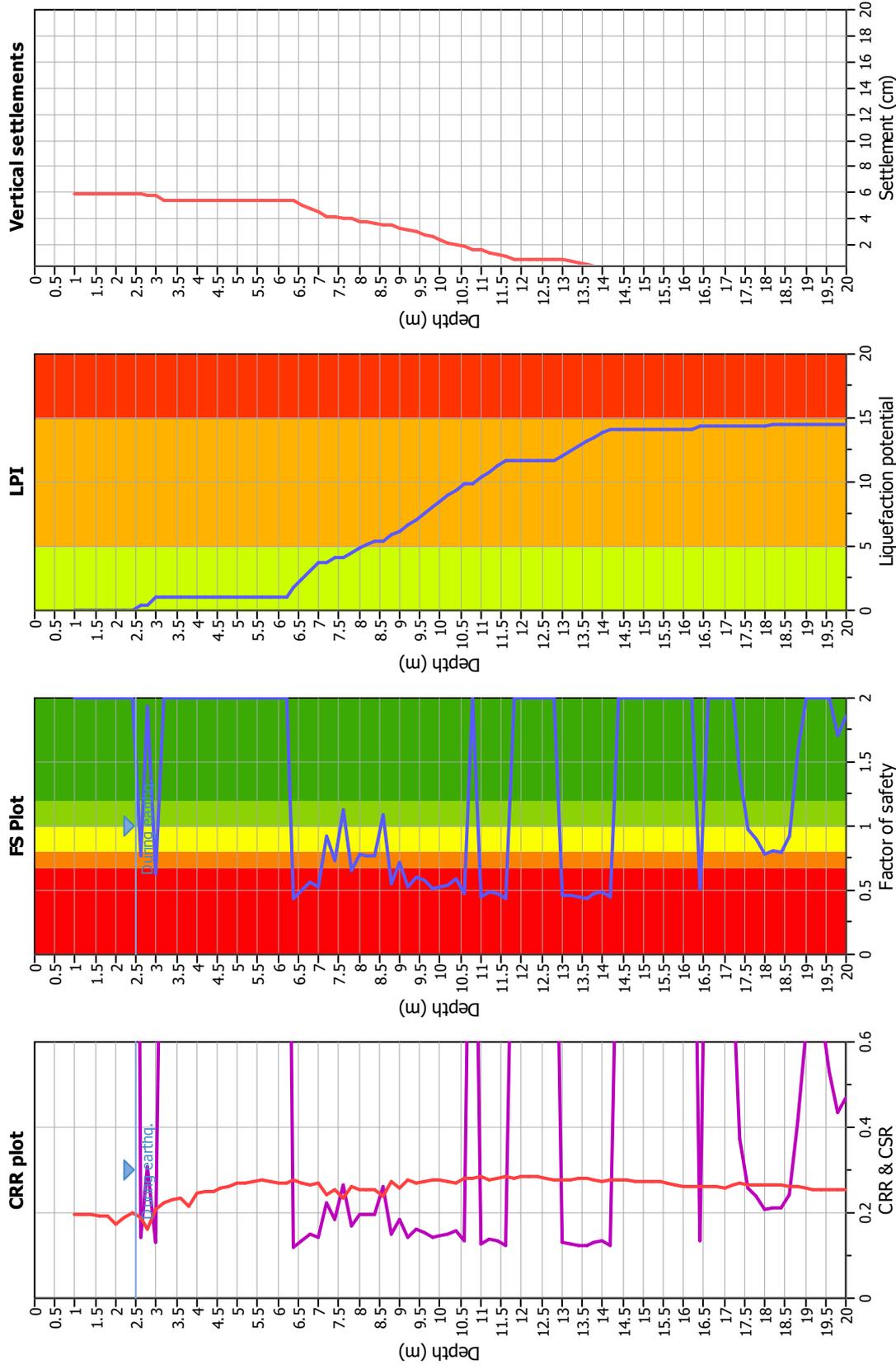
#### F. S. color scheme

■ 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 2.50 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

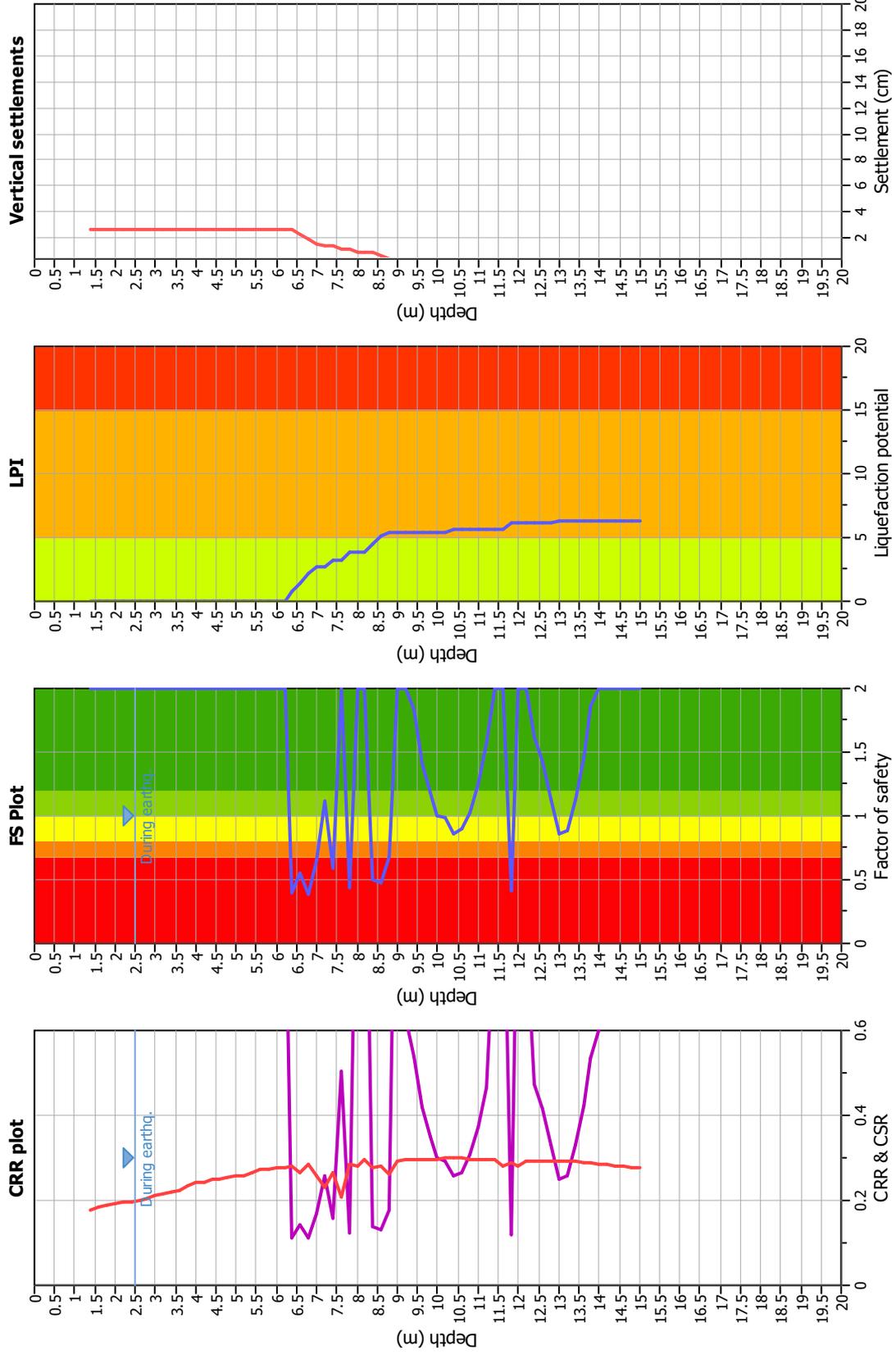
#### LPI color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

Fill weight: 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.): 2.50 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 2.50 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

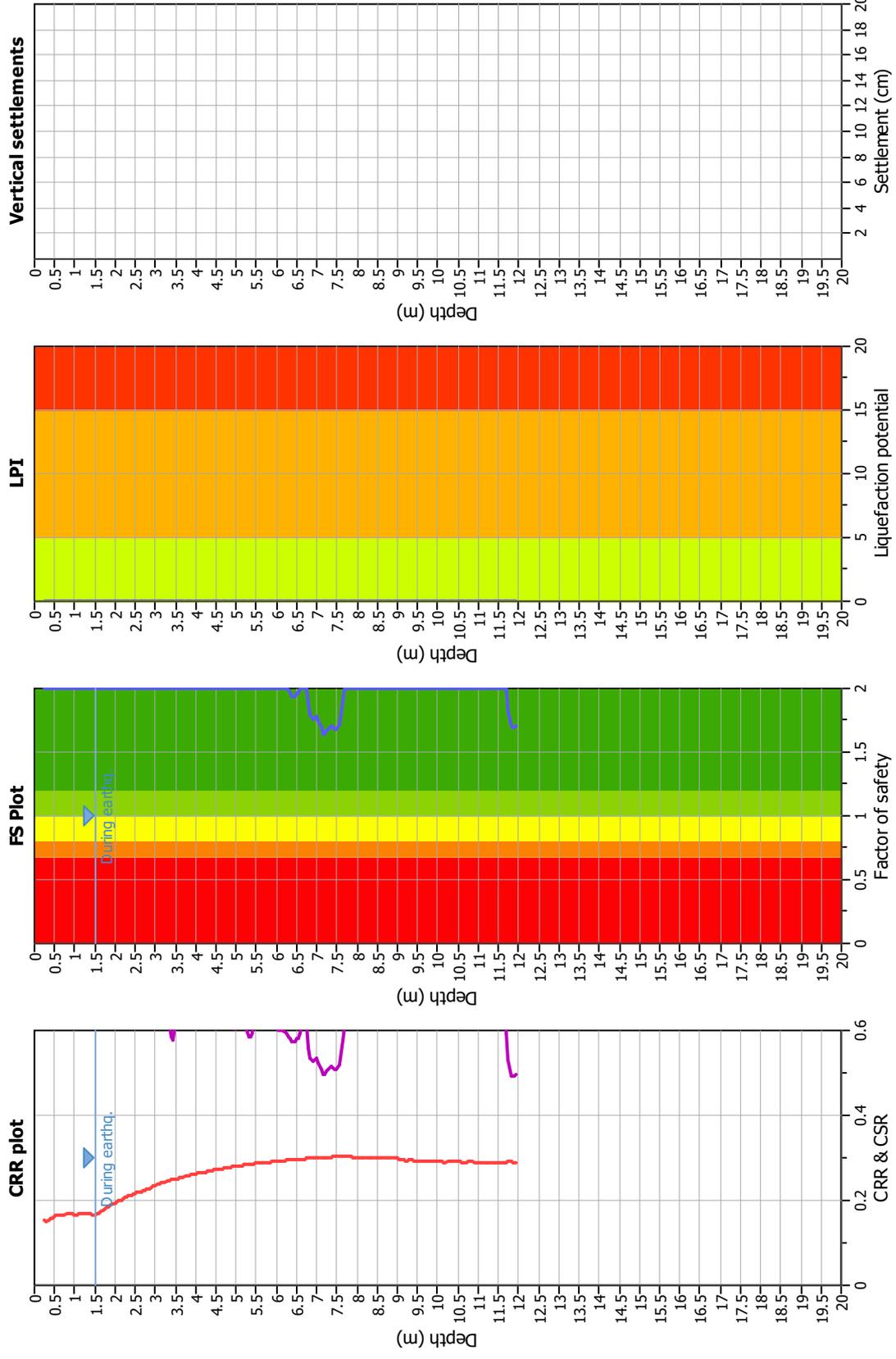
#### LPI color scheme

■ 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.): 2.50 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 2.30 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: 1.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

#### LPI 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

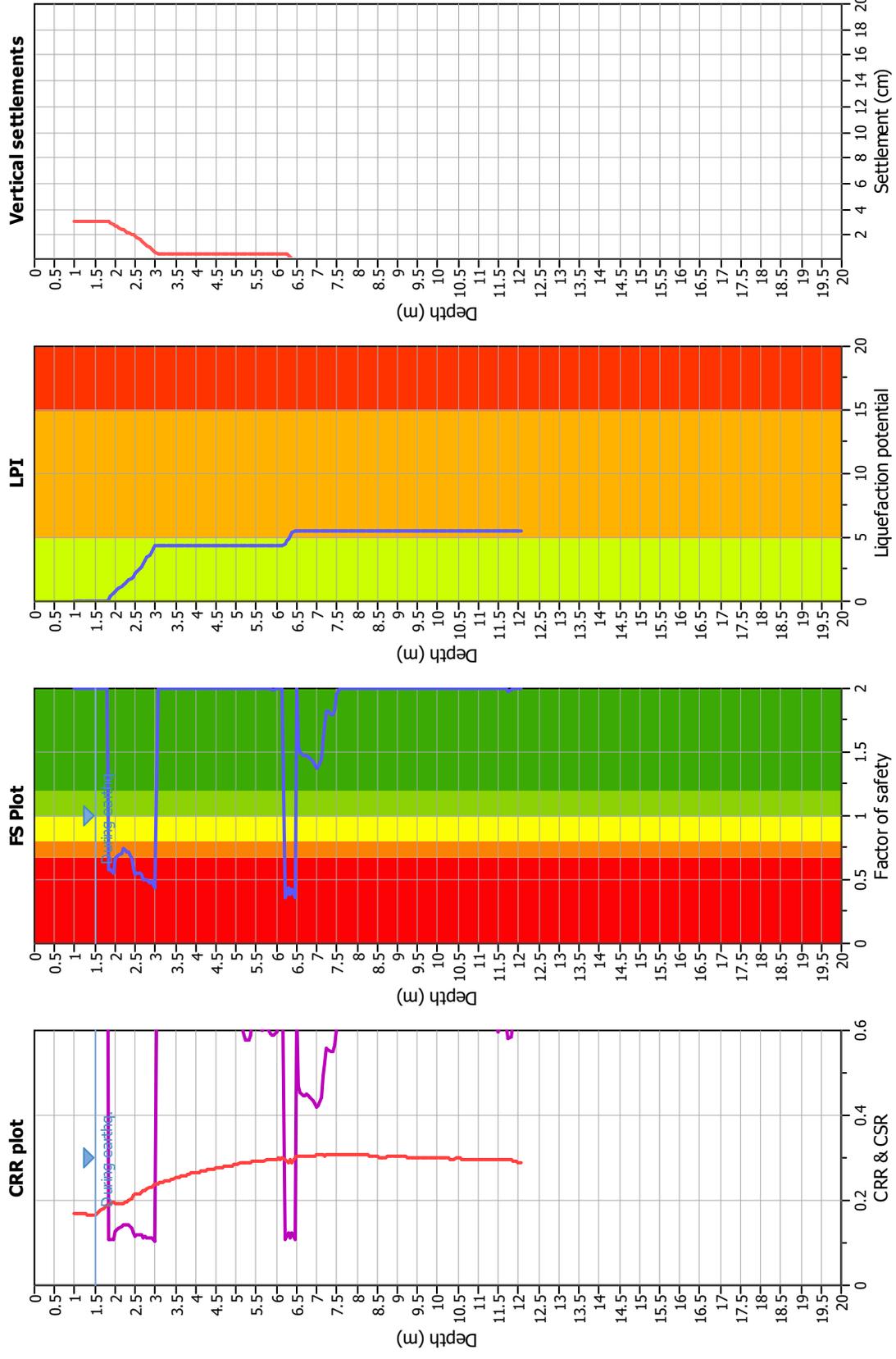
#### F. S. color scheme

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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 1.80 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: 1.50 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: Yes  
 Limit depth applied: Sand & Clay  
 Limit depth: 20.00 m

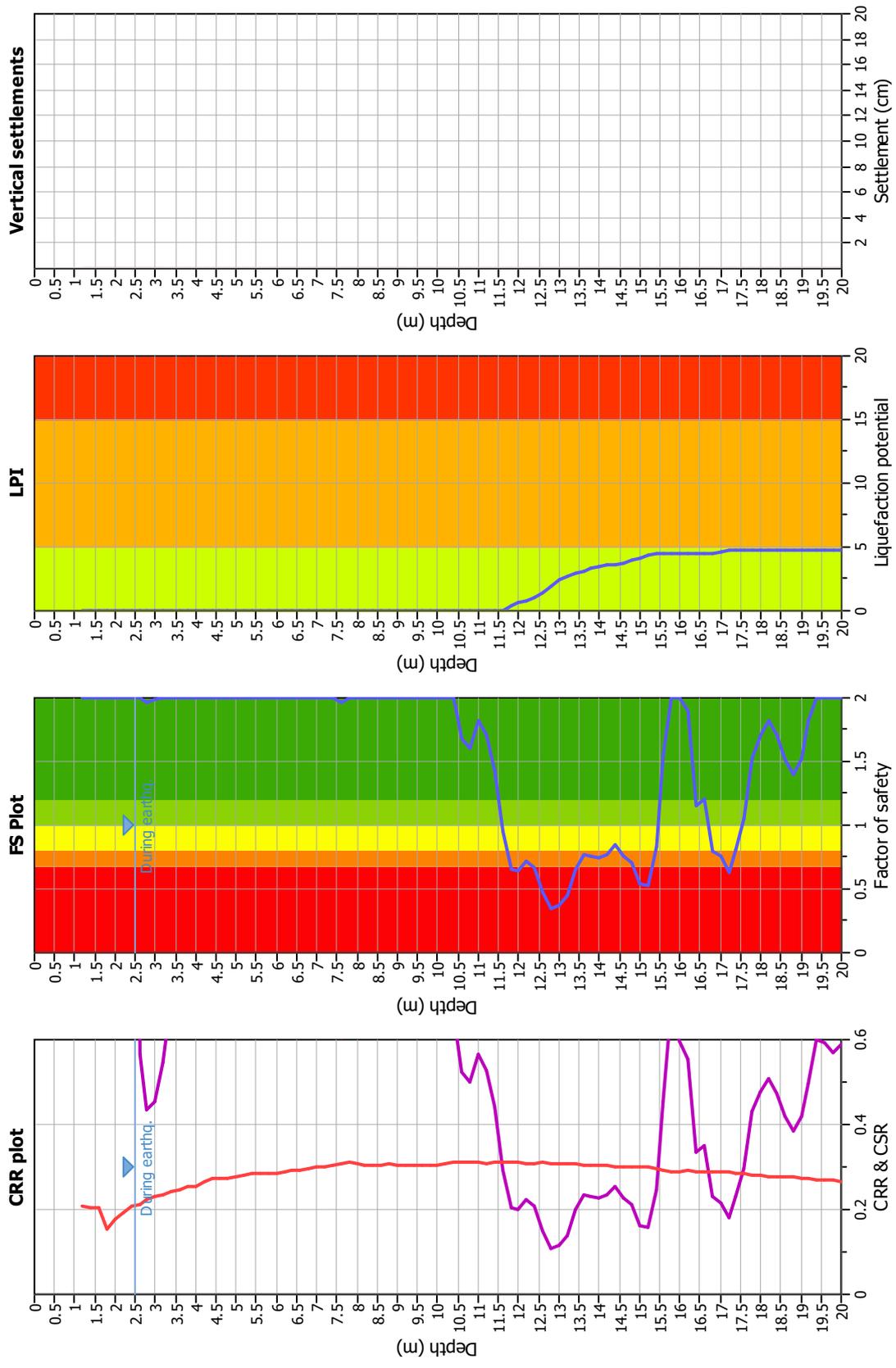
#### F. S. color scheme

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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 2.50 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

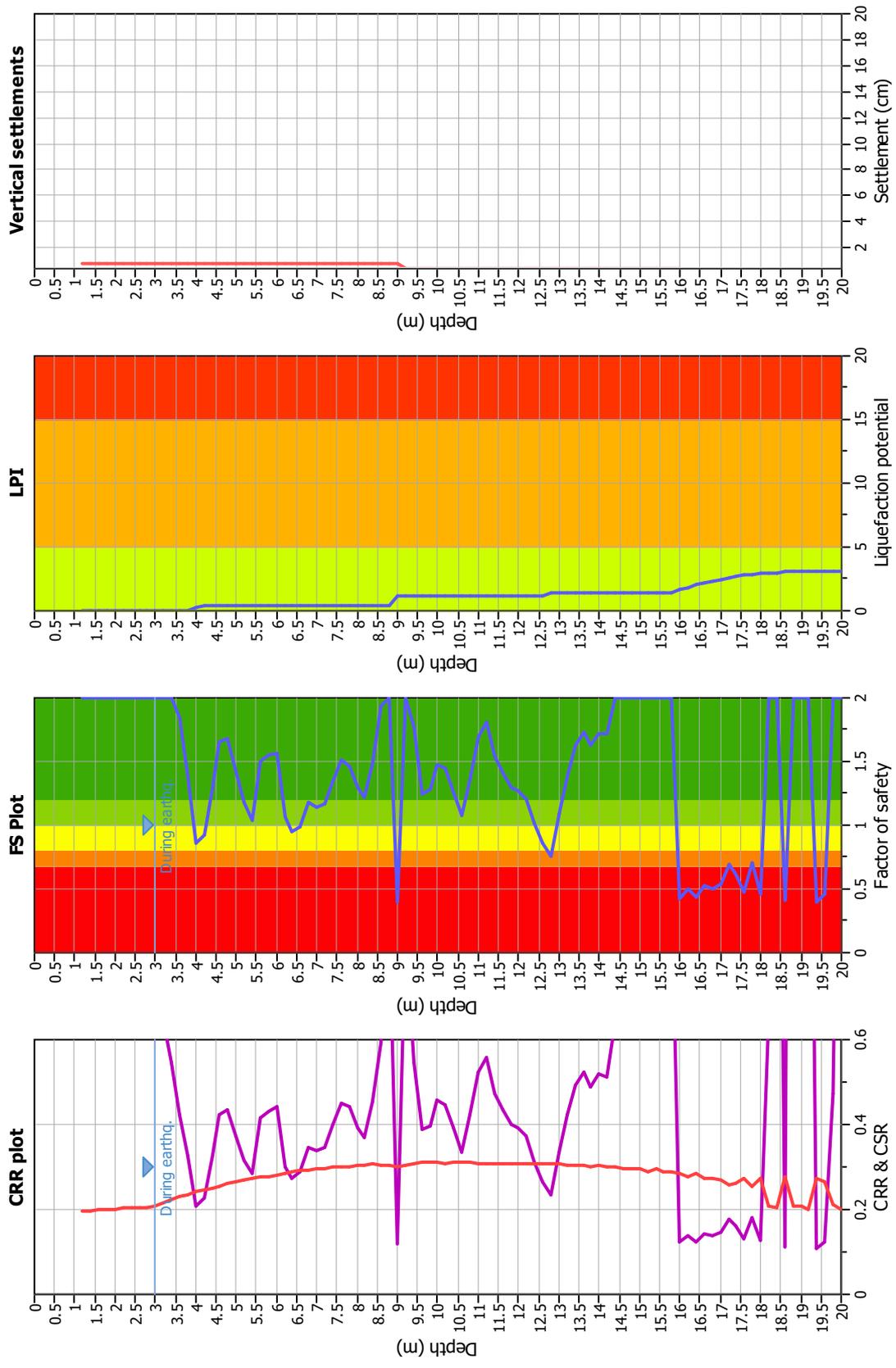
### LPI color scheme

- 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

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 3.20 m

#### F. S. color scheme

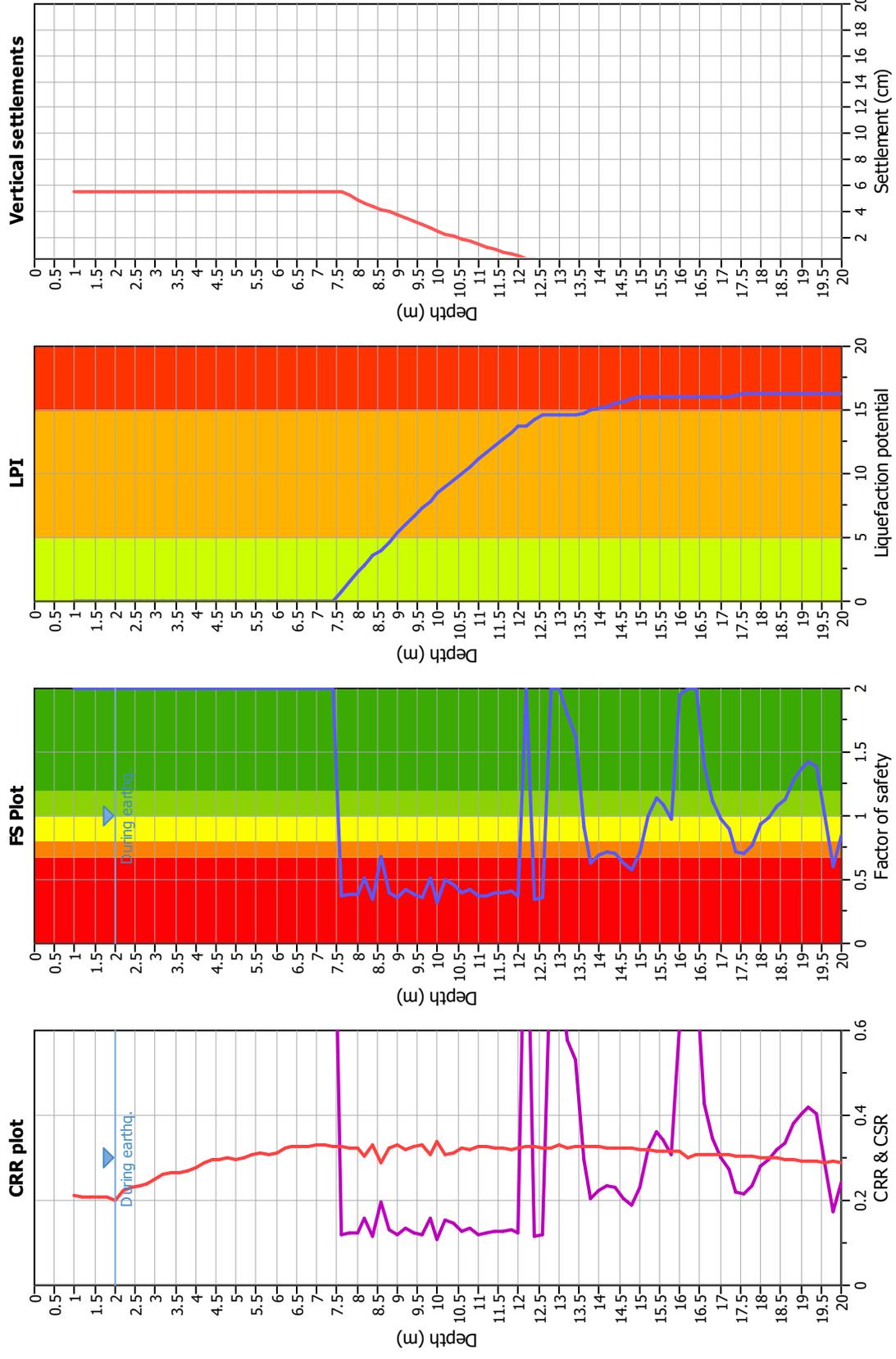
■ Almost certain it will liquefy  
■ Very likely to liquefy  
■ Liquefaction and no liq. are equally likely  
■ Unlikely to liquefy  
■ Almost certain it will not liquefy

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

Fill weight: 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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.20 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: 2.00 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

#### 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

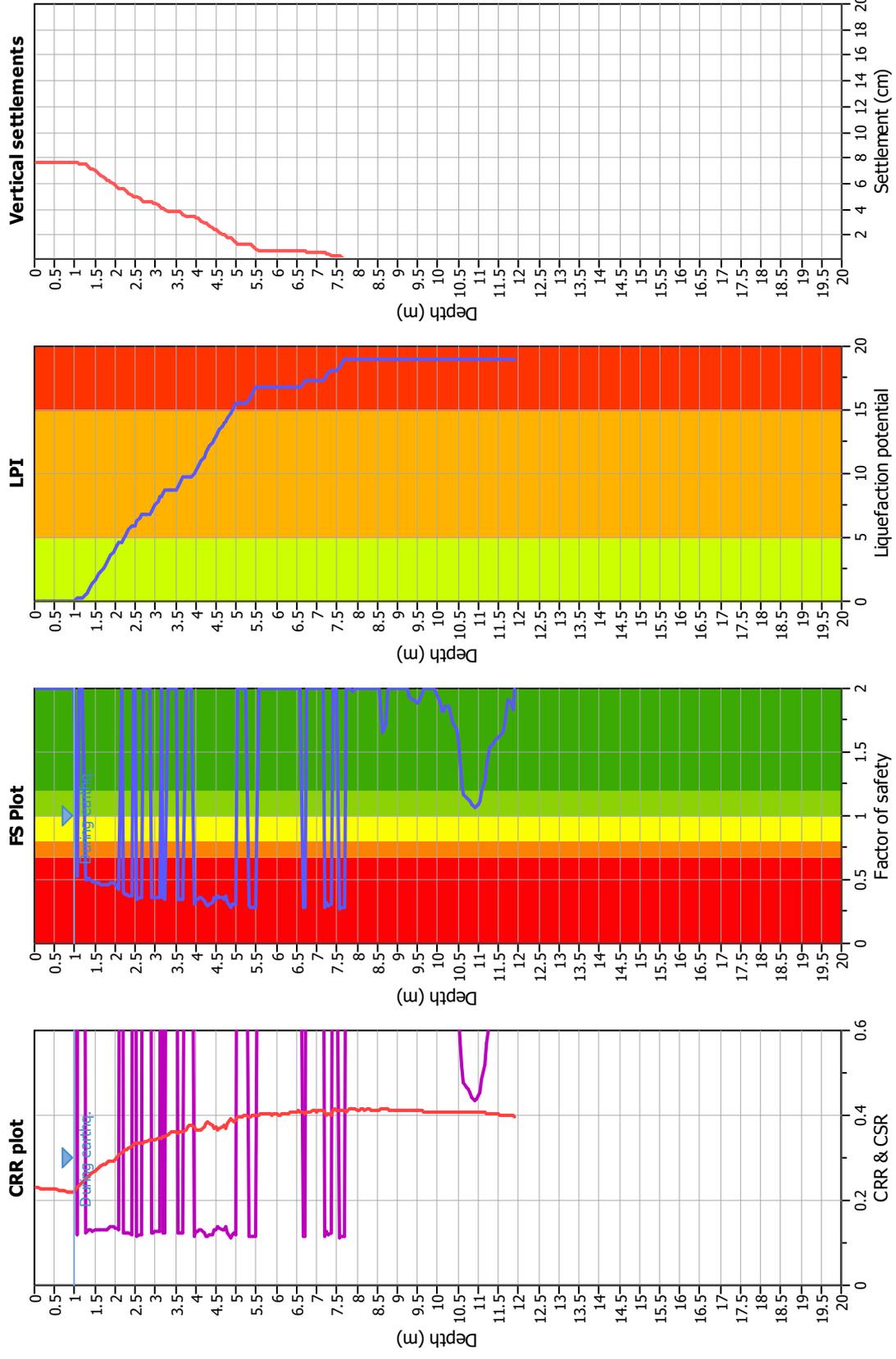
#### F. S. color scheme

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 overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.35  
 Depth to water table (insitu): 1.20 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

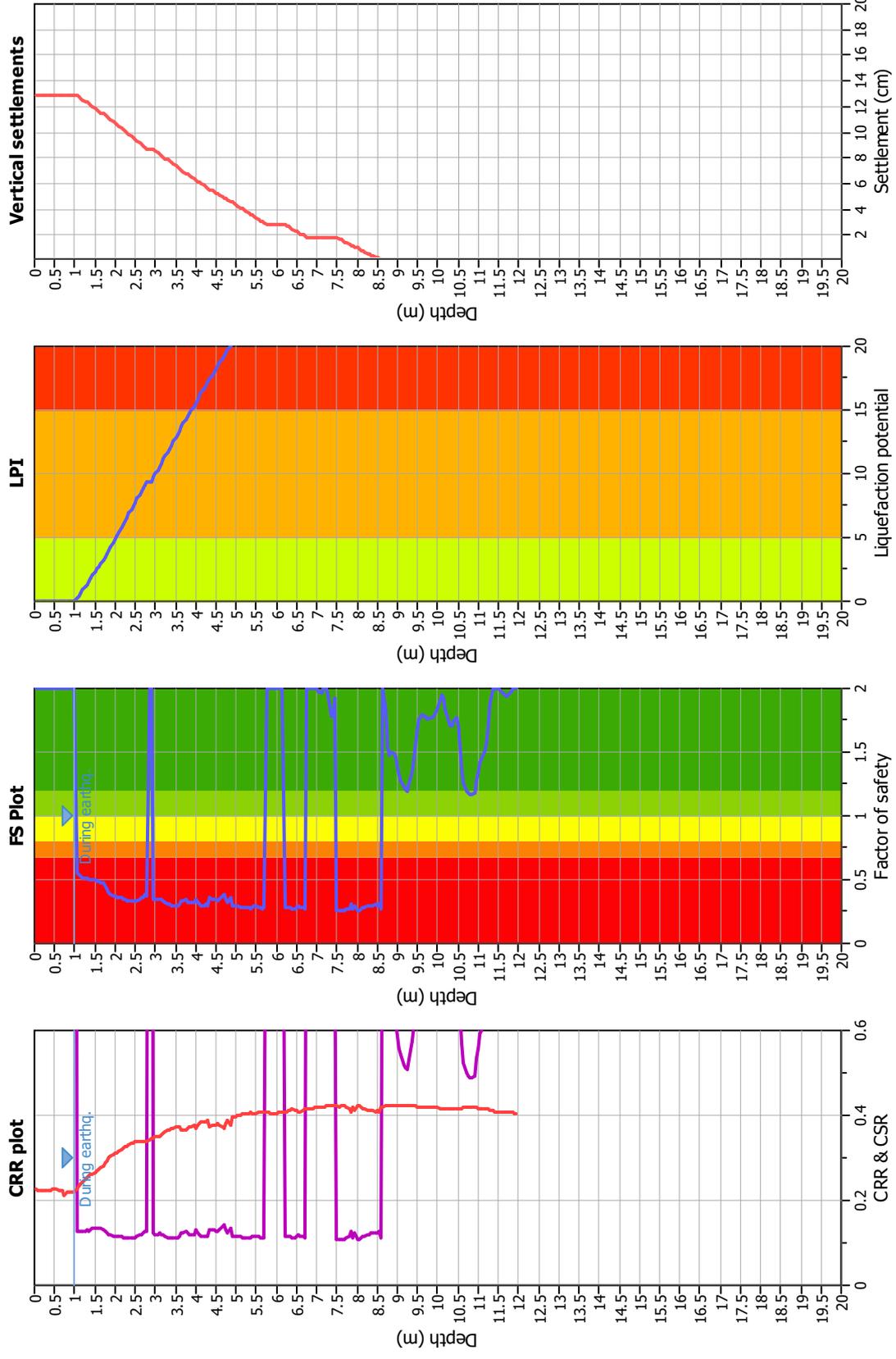
**F. S. color scheme**

- 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 overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.35  
 Depth to water table (insitu): 0.80 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

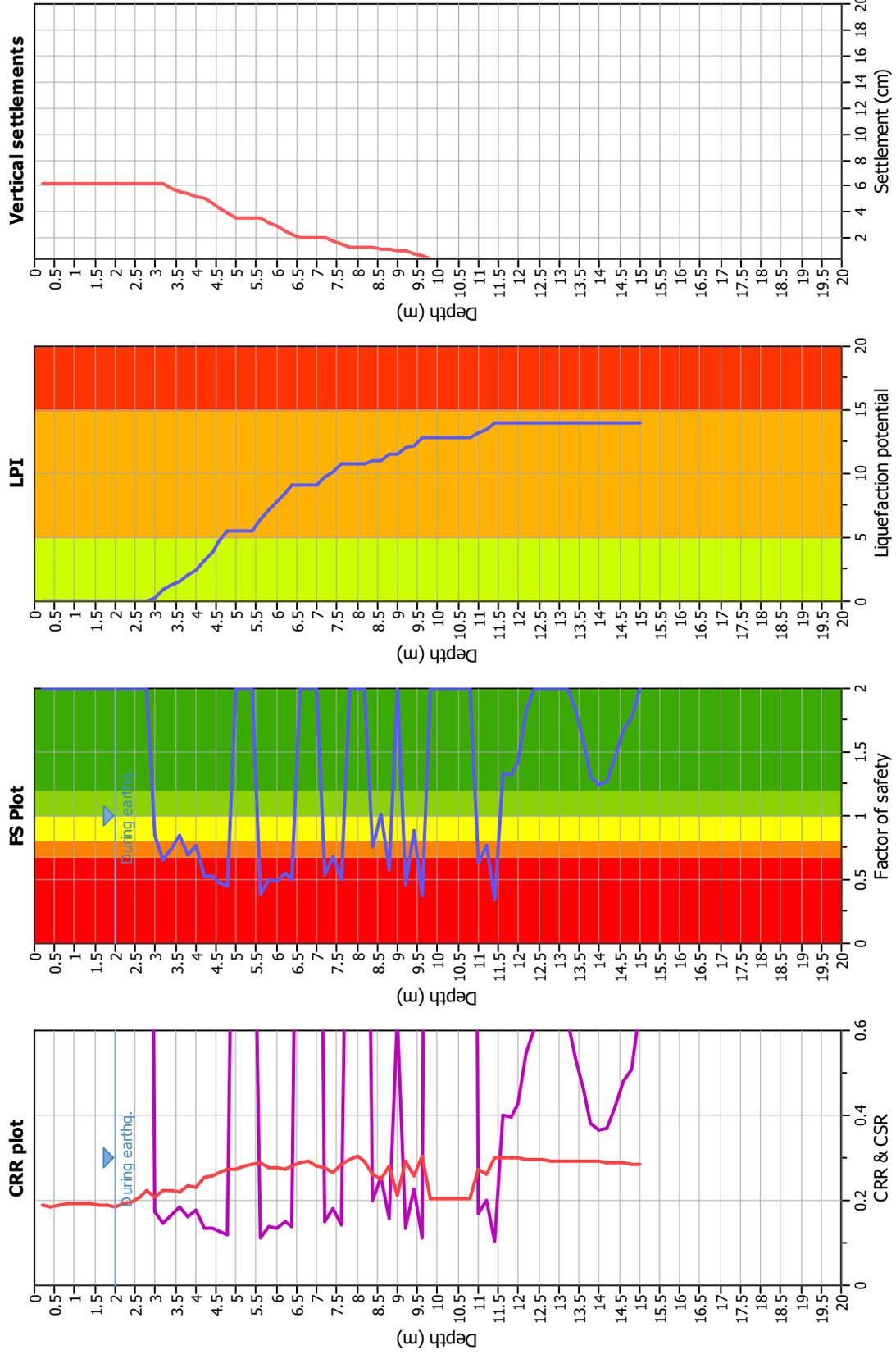
**F. S. color scheme**

- 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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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

Fill weight: 2.00 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

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

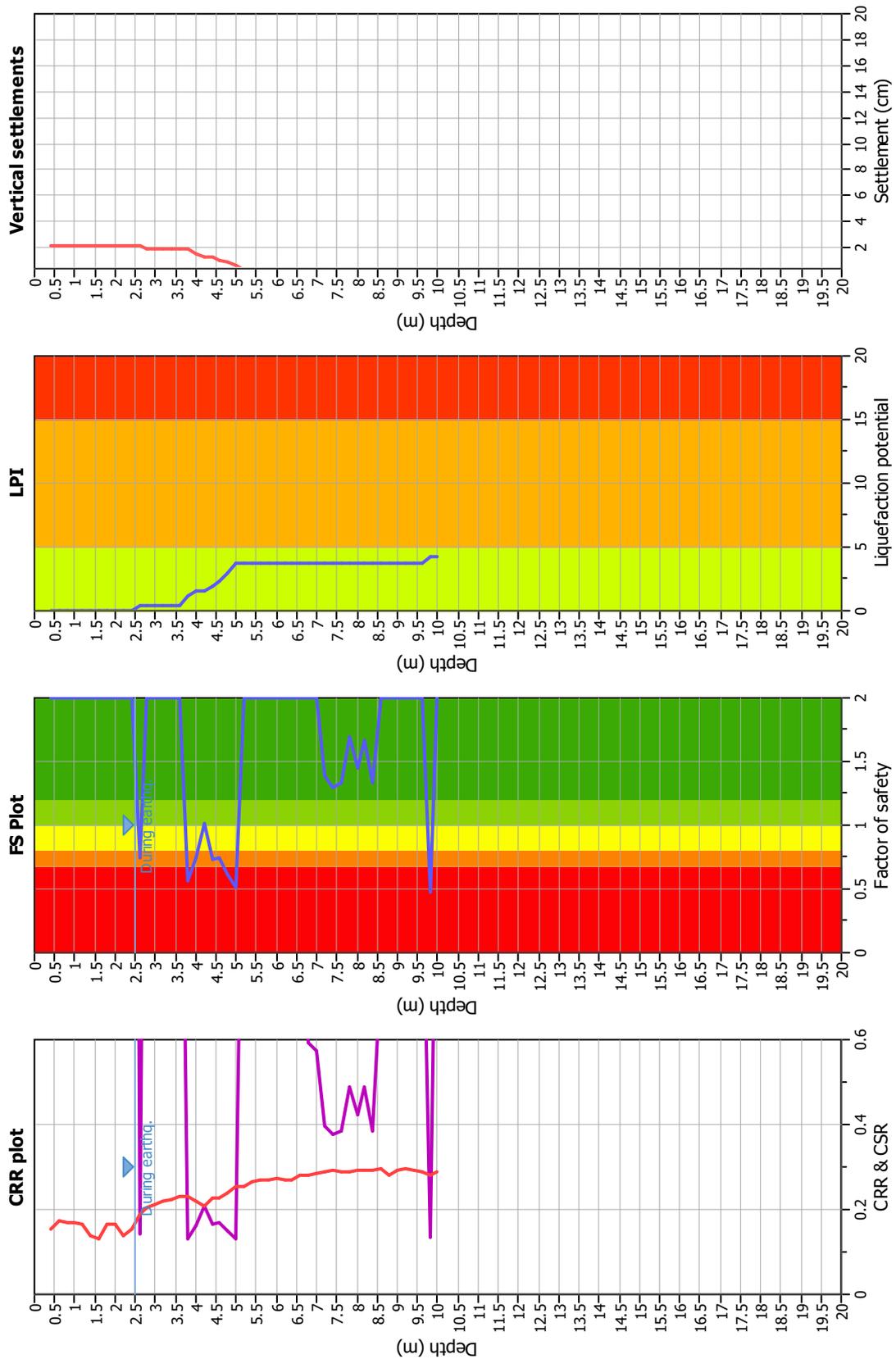
### F. S. color scheme

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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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): 6.60 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

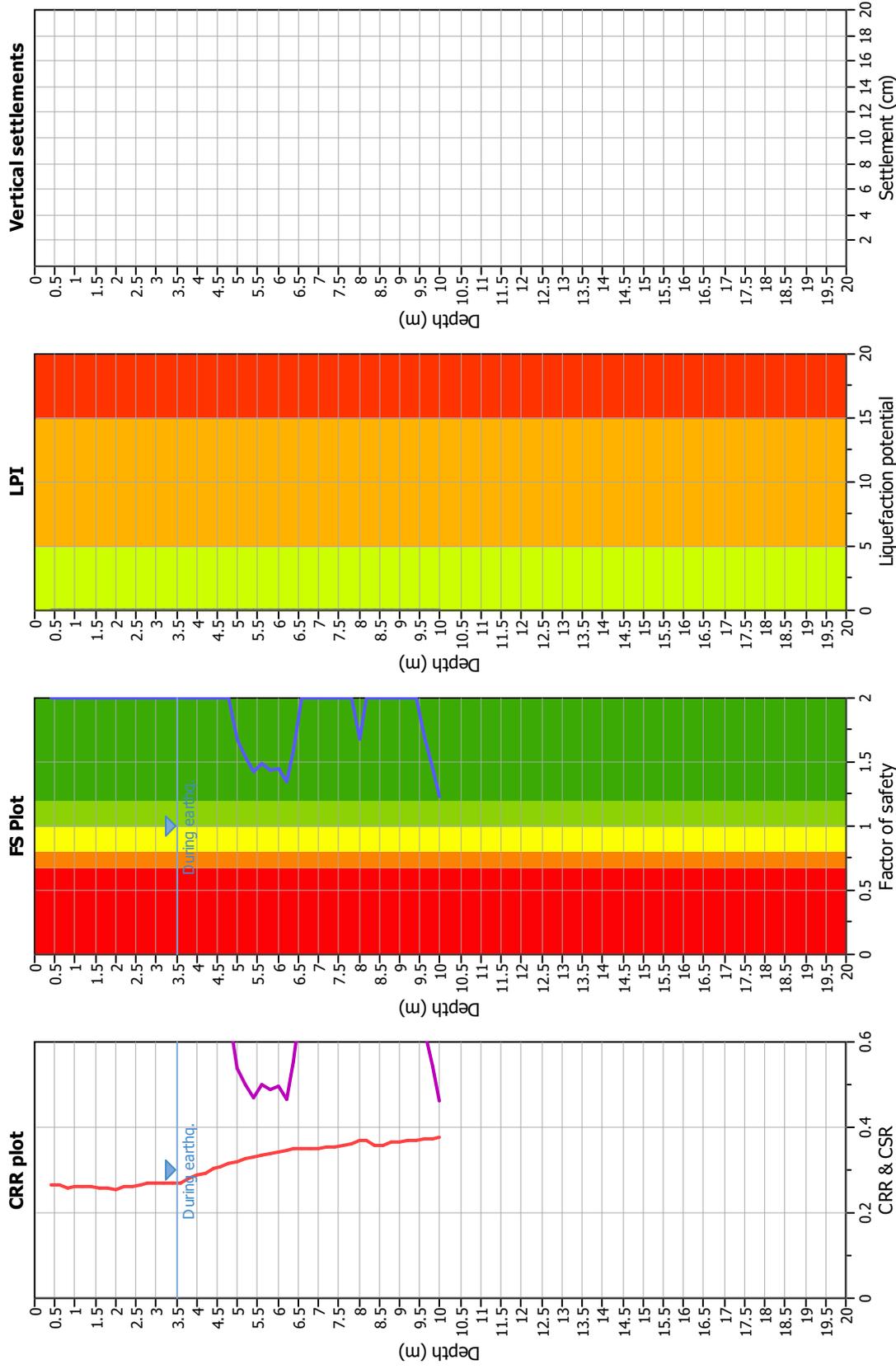
### LPI color scheme

■ 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.): 2.50 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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.35  
 Depth to water table (insitu): 3.60 m

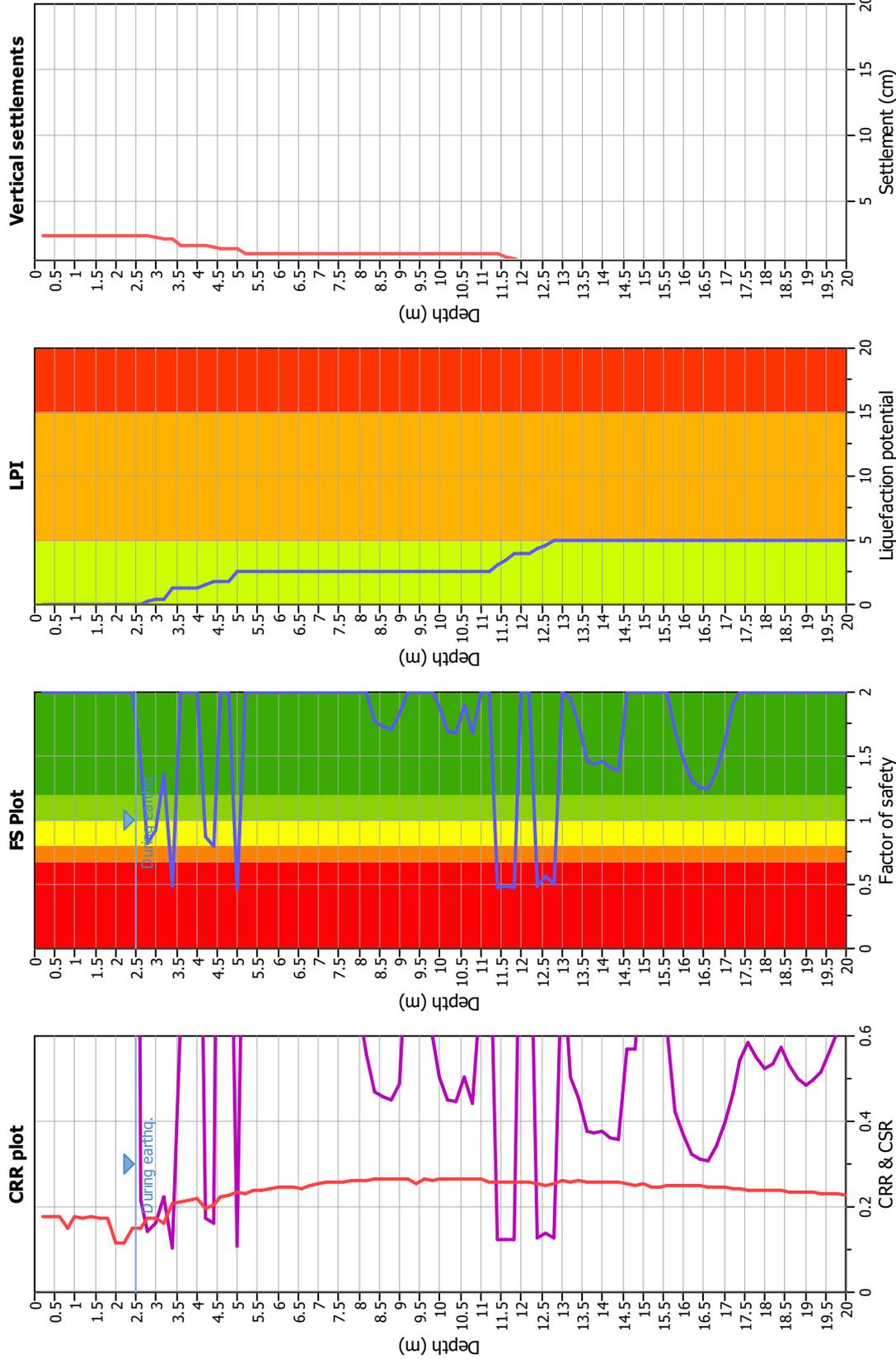
Depth to GWT (earthq.): 3.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_s$  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

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.25  
 Depth to water table (insitu): 3.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

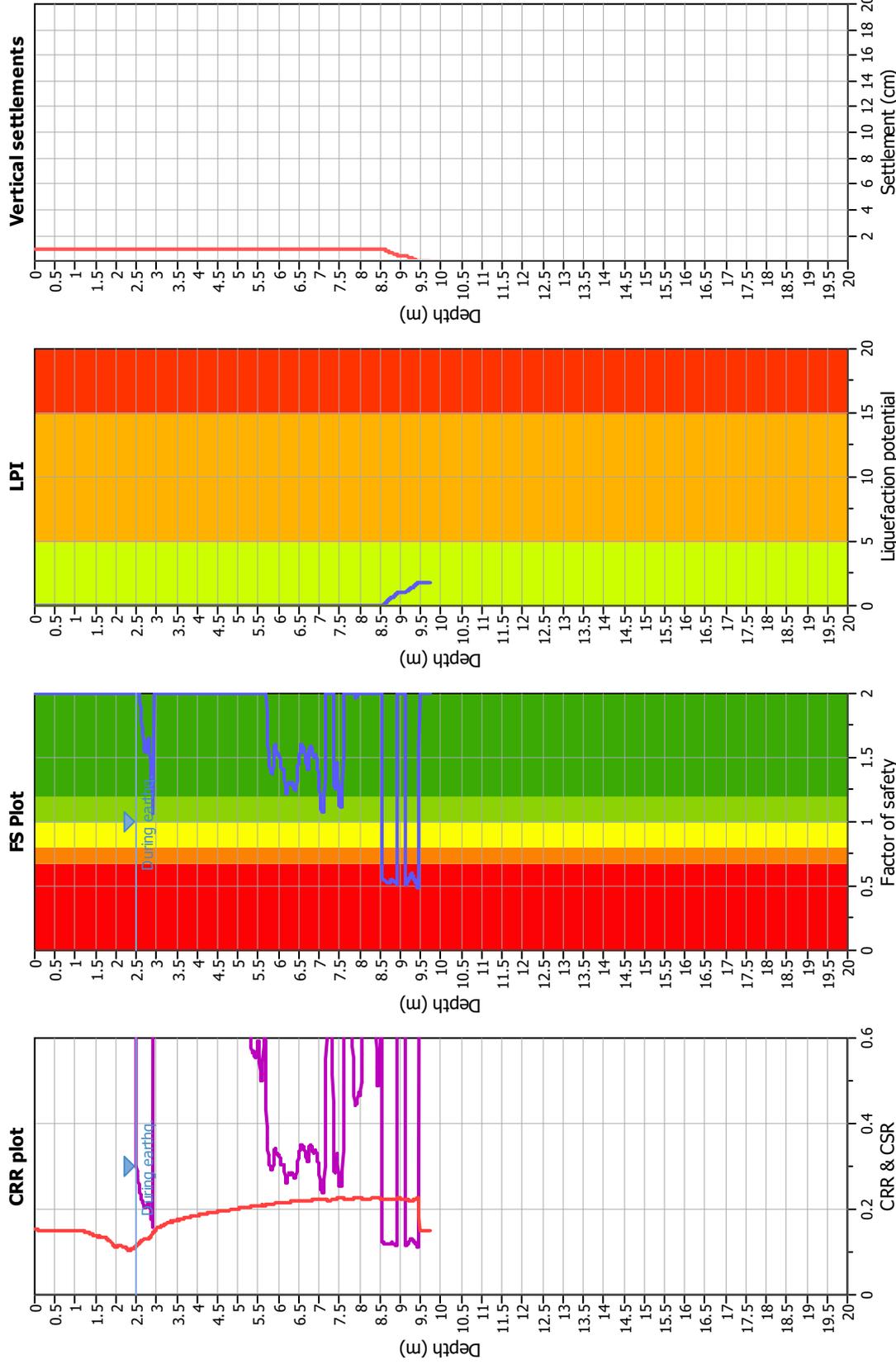
#### F. S. color scheme

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

#### LPI color scheme

■ Very high risk  
■ High risk  
■ Low risk

### Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.23  
 Depth to water table (insitu): 4.90 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A  
 Transition detect. applied: No  
 $K_0$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

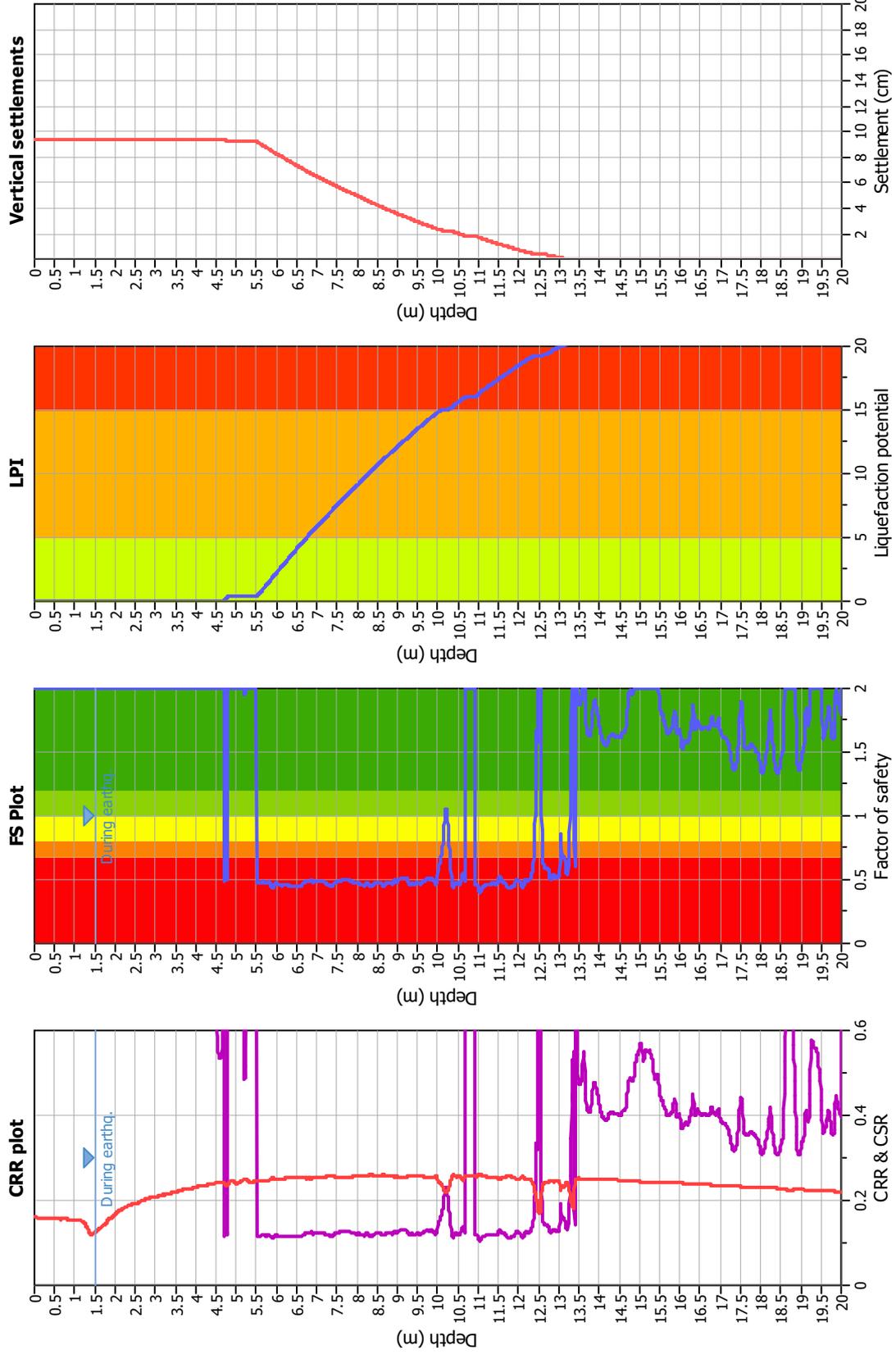
### F.S. color scheme

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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.24  
 Depth to water table (insitu): 1.80 m

#### F. S. color scheme

Fill weight: 1.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

#### 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

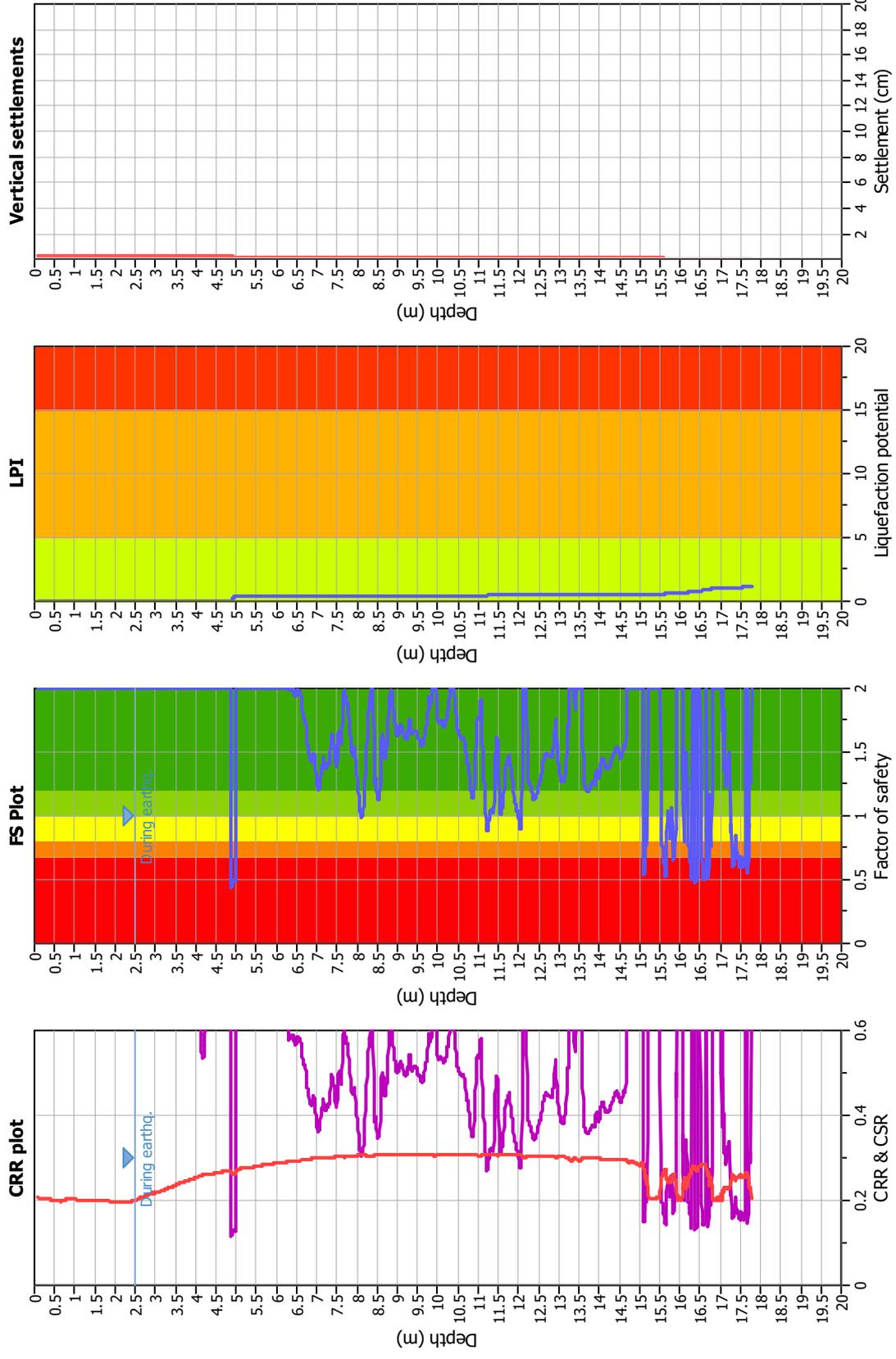
#### F. S. color scheme

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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.31  
 Depth to water table (insitu): 7.00 m

### F. S. color scheme

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

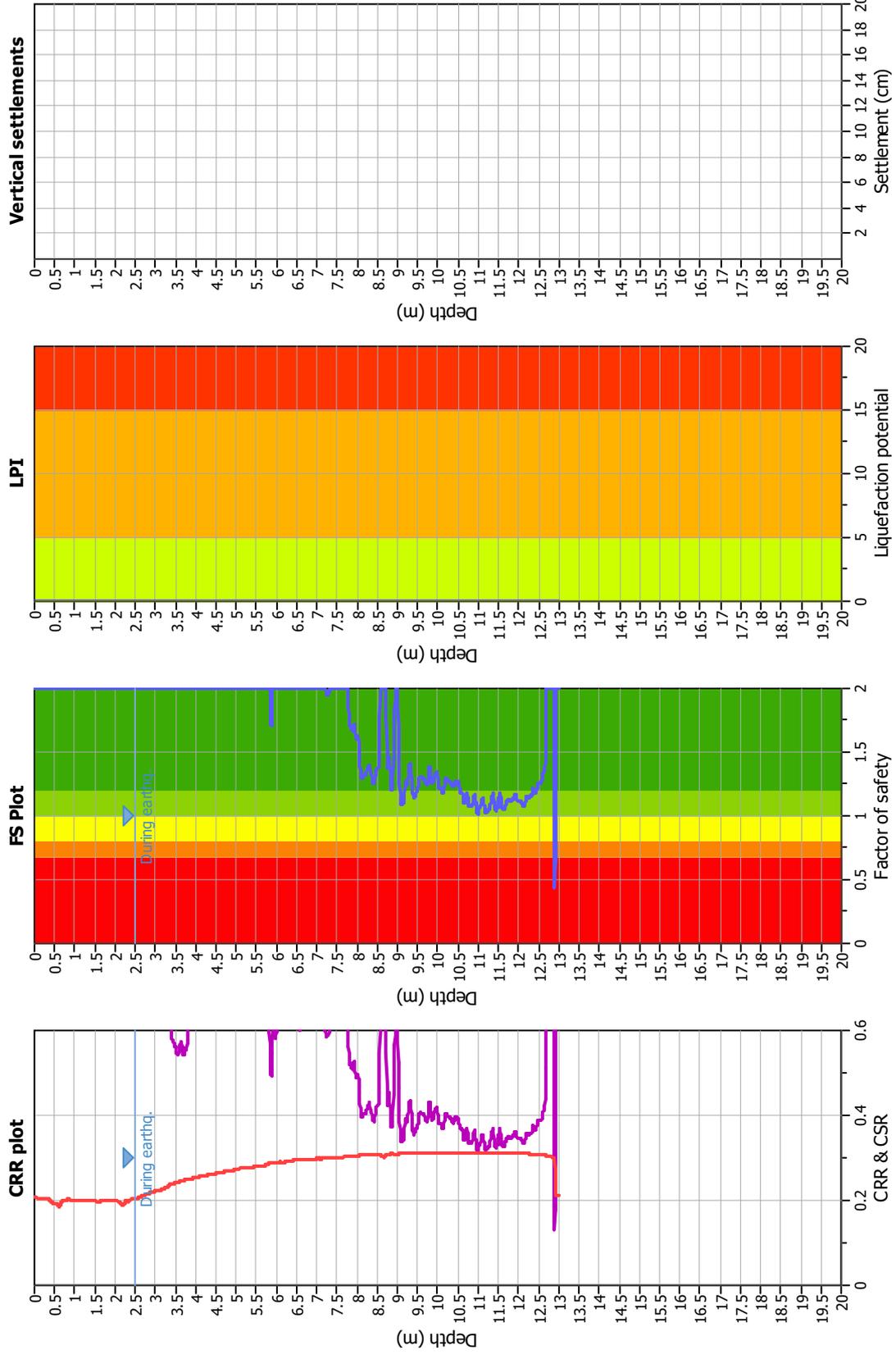
### LPI color scheme

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

### F. S. color scheme

Very high risk  
 High risk  
 Low risk

### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.31  
 Depth to water table (insitu): 3.20 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A

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

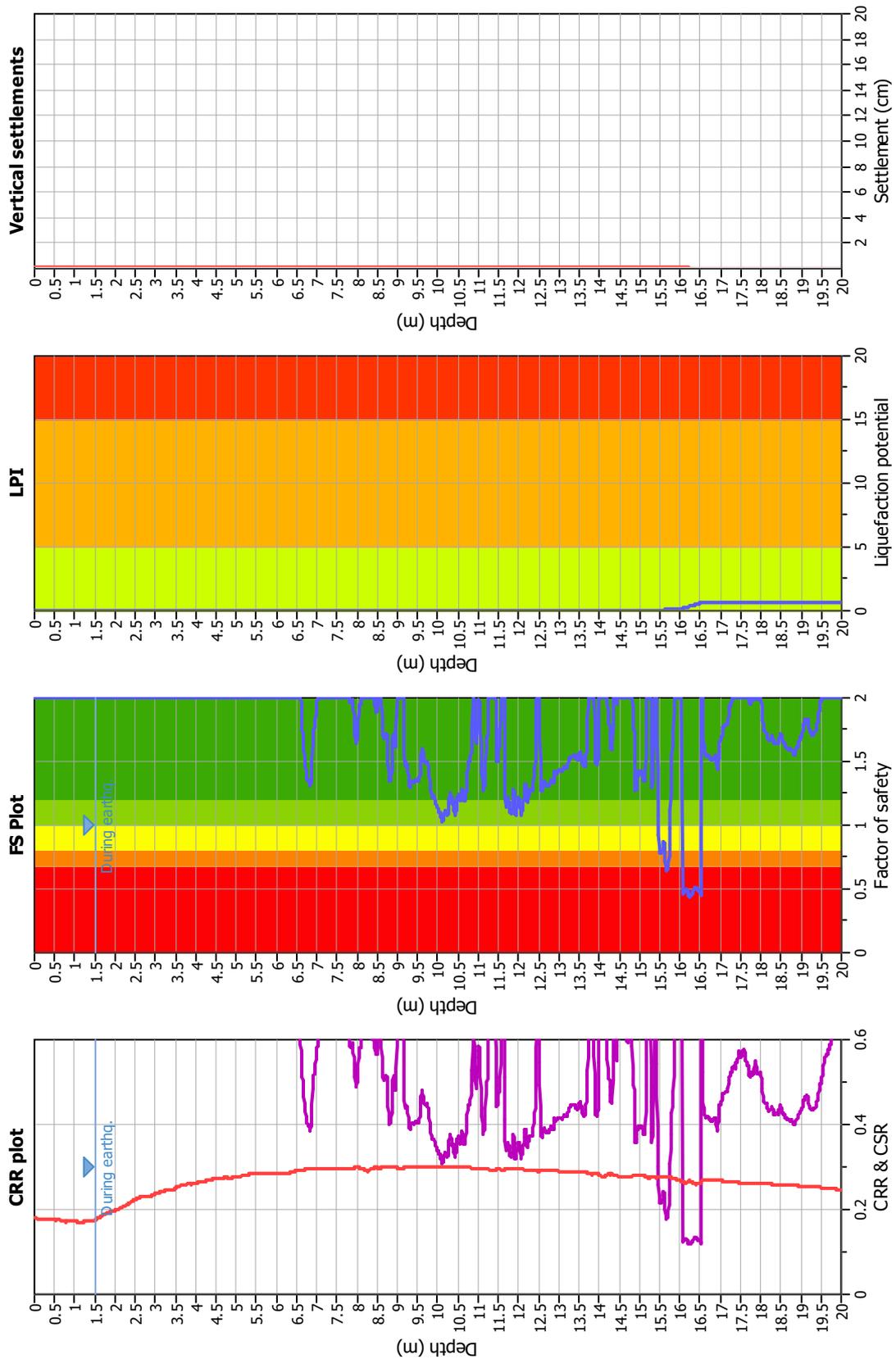
#### F.S. color scheme

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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.27  
 Depth to water table (insitu): 1.80 m

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

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

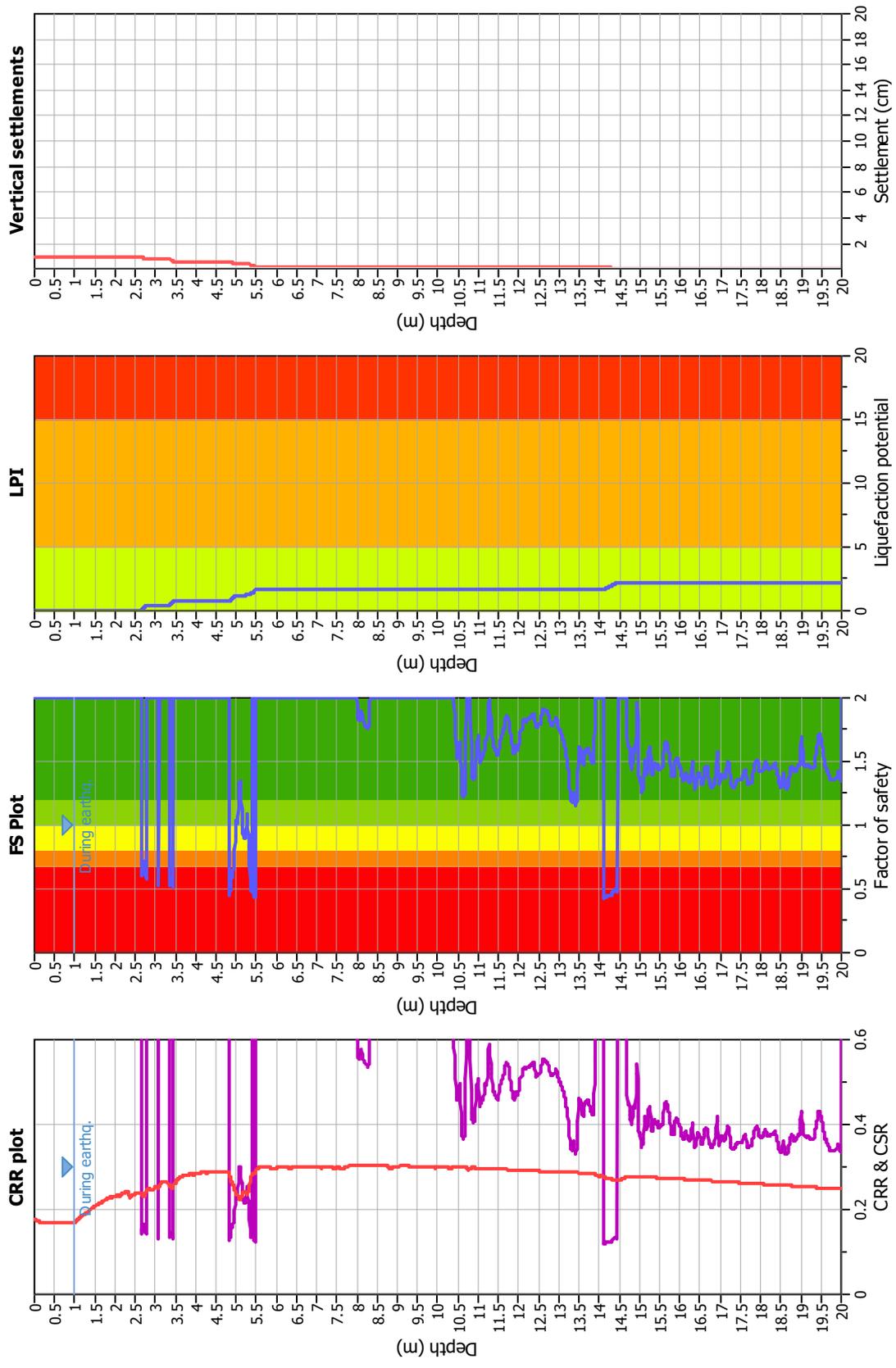
#### F. S. color scheme

■ 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 overall plots



**Input parameters and analysis data**

- Analysis method: B&I (2014)
- Fines correction method: B&I (2014)
- Points to test: Based on Ic value
- Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14
- Peak ground acceleration: 0.26
- Depth to water table (insitu): 1.00 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

- 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

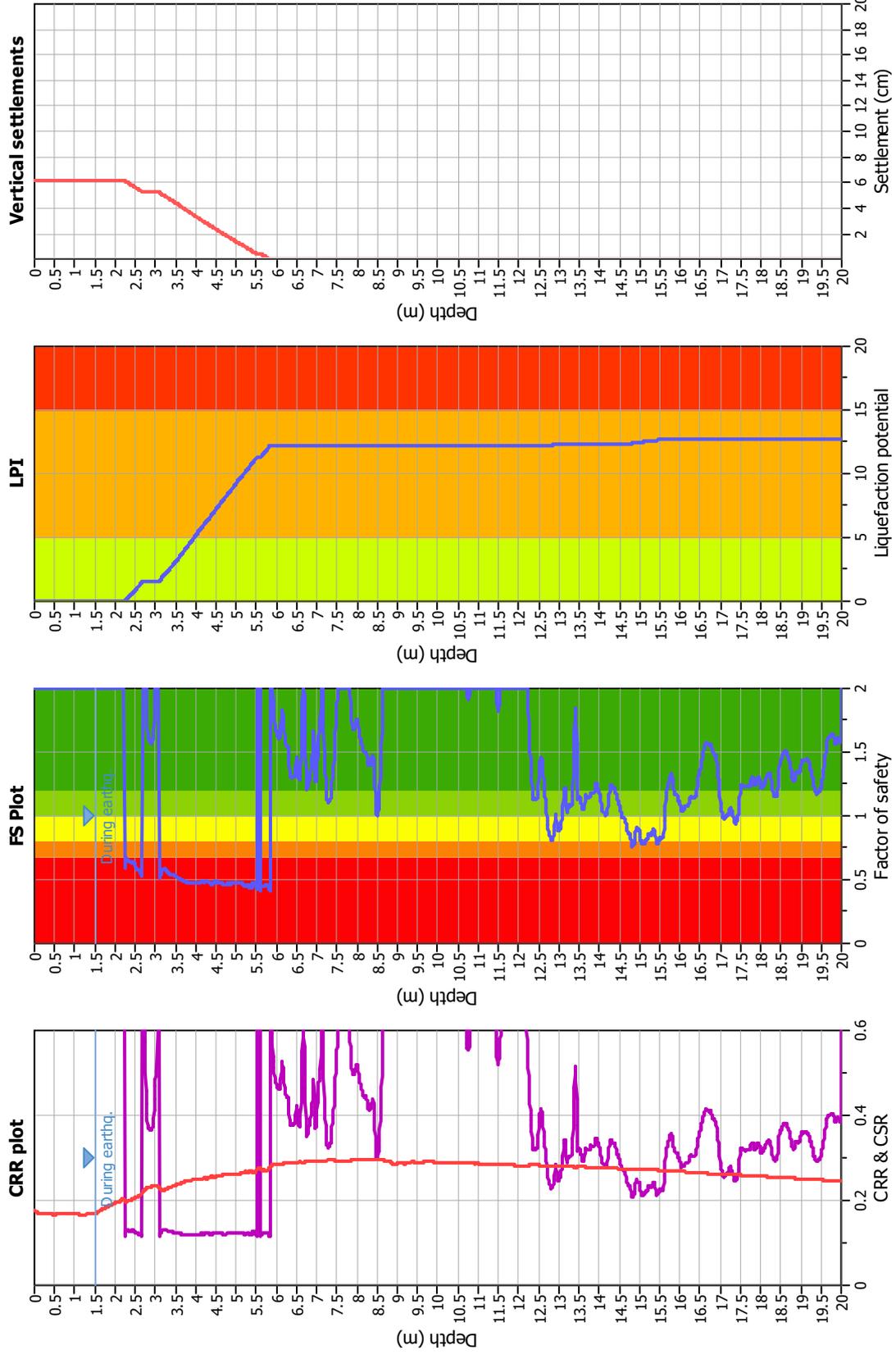
**F. S. color scheme**

- 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 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

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

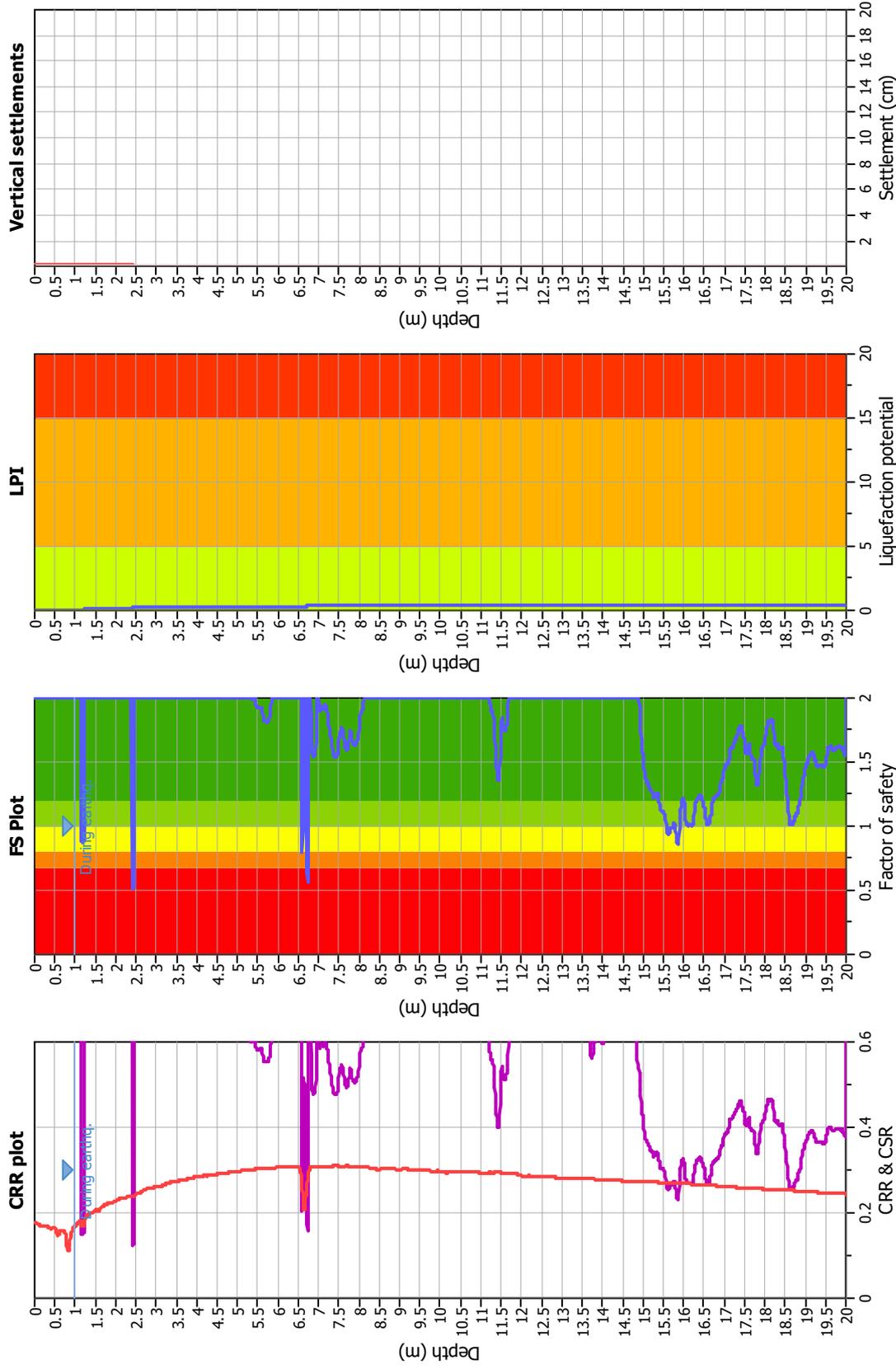
#### LPI color scheme

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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.26  
 Depth to water table (insitu): 0.40 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  
 $K_s$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

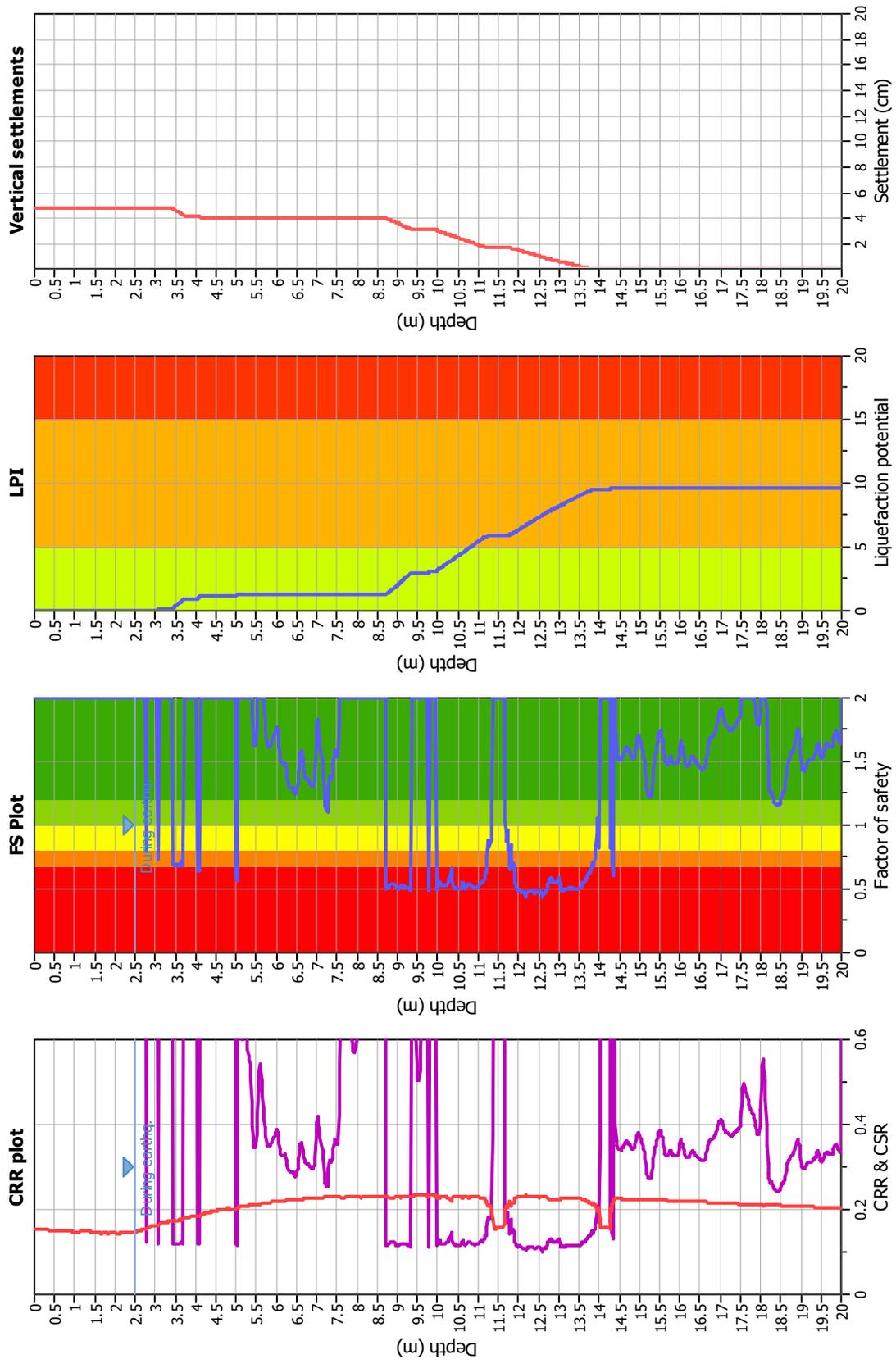
#### F. S. color scheme

■ 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 overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.23  
 Depth to water table (insitu): 3.80 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

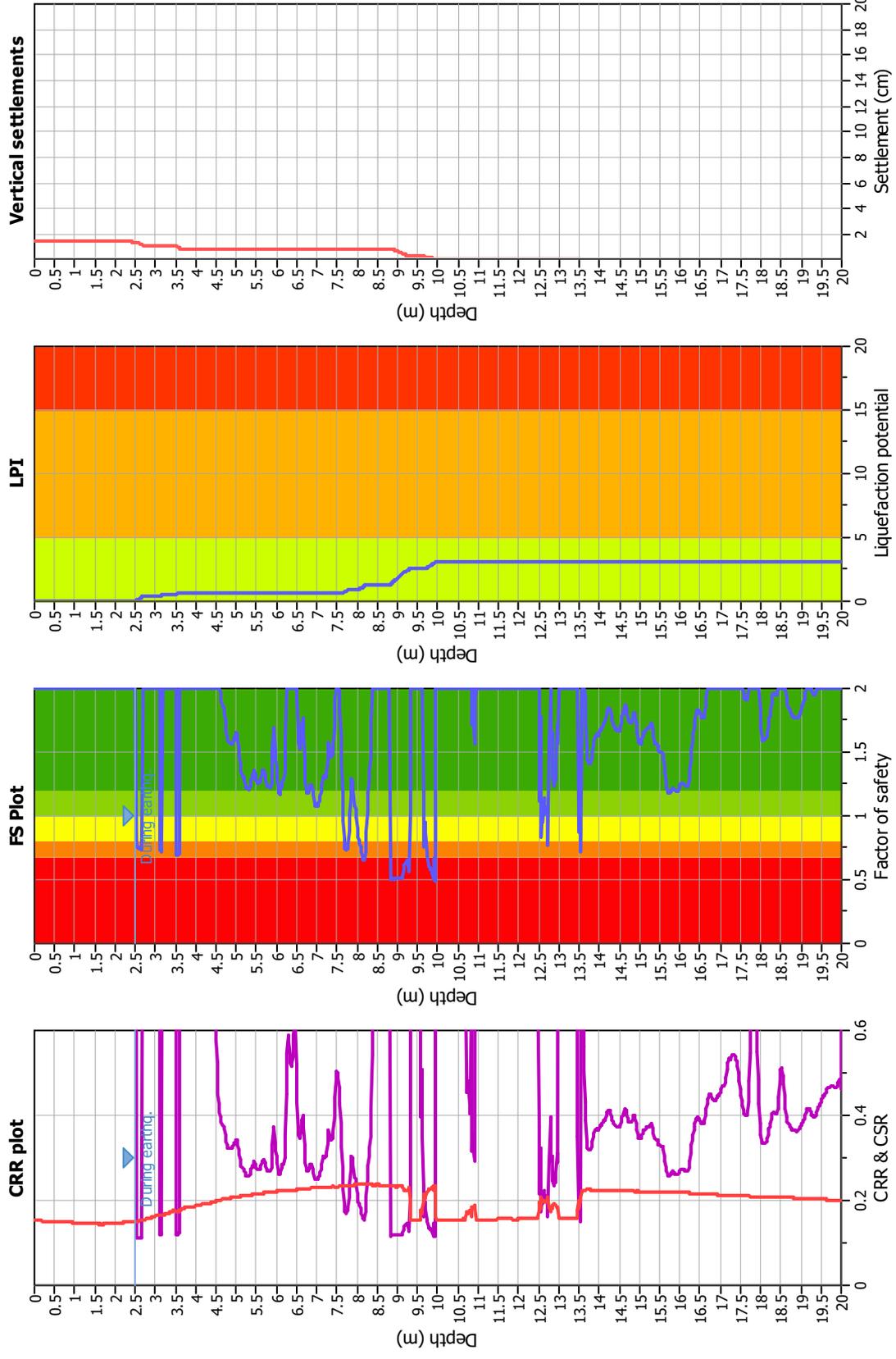
**F.S. color scheme**

- 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 overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.23  
 Depth to water table (insitu): 3.80 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

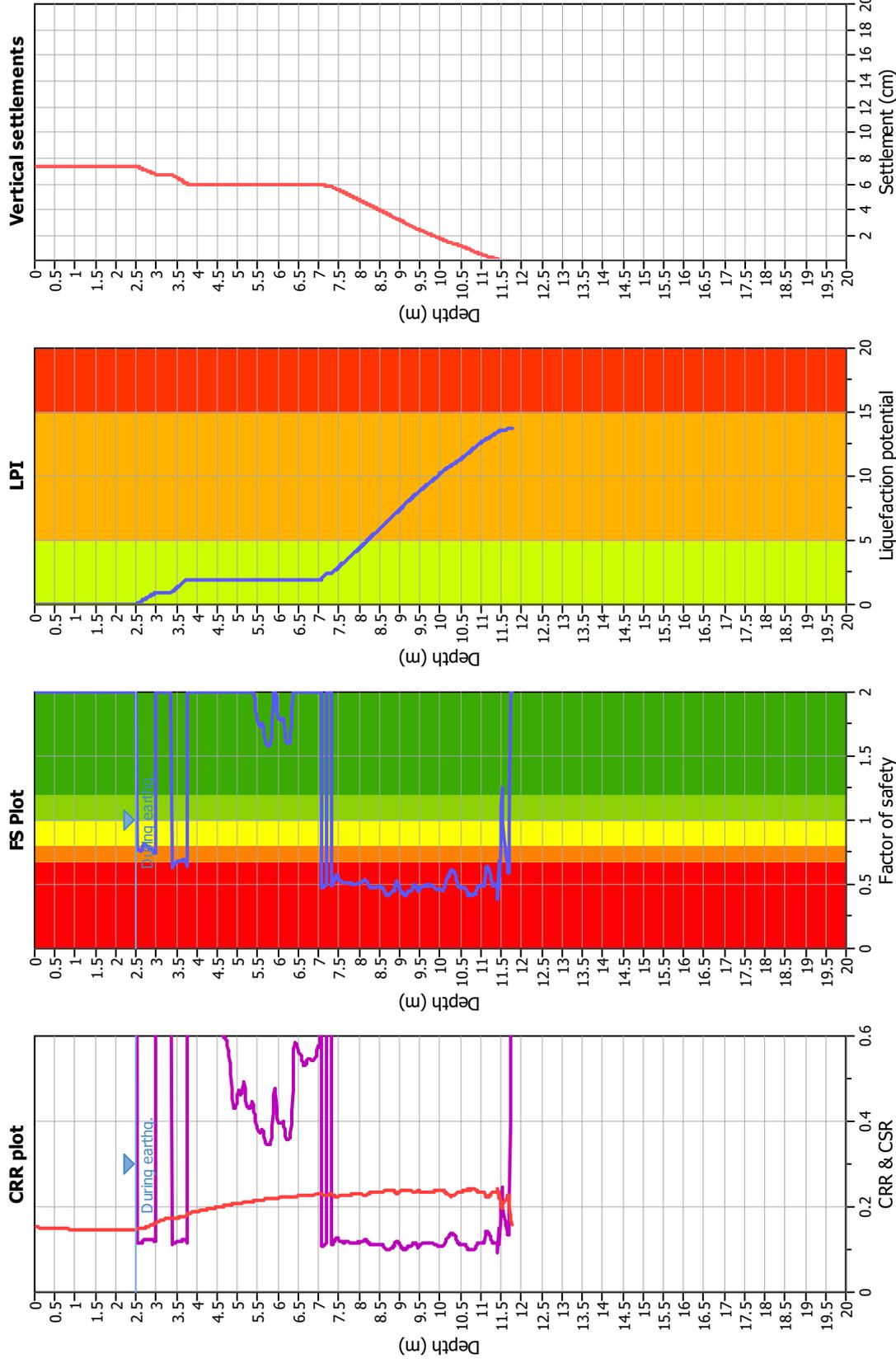
**F. S. color scheme**

- 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 overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.23  
 Depth to water table (insitu): 3.80 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

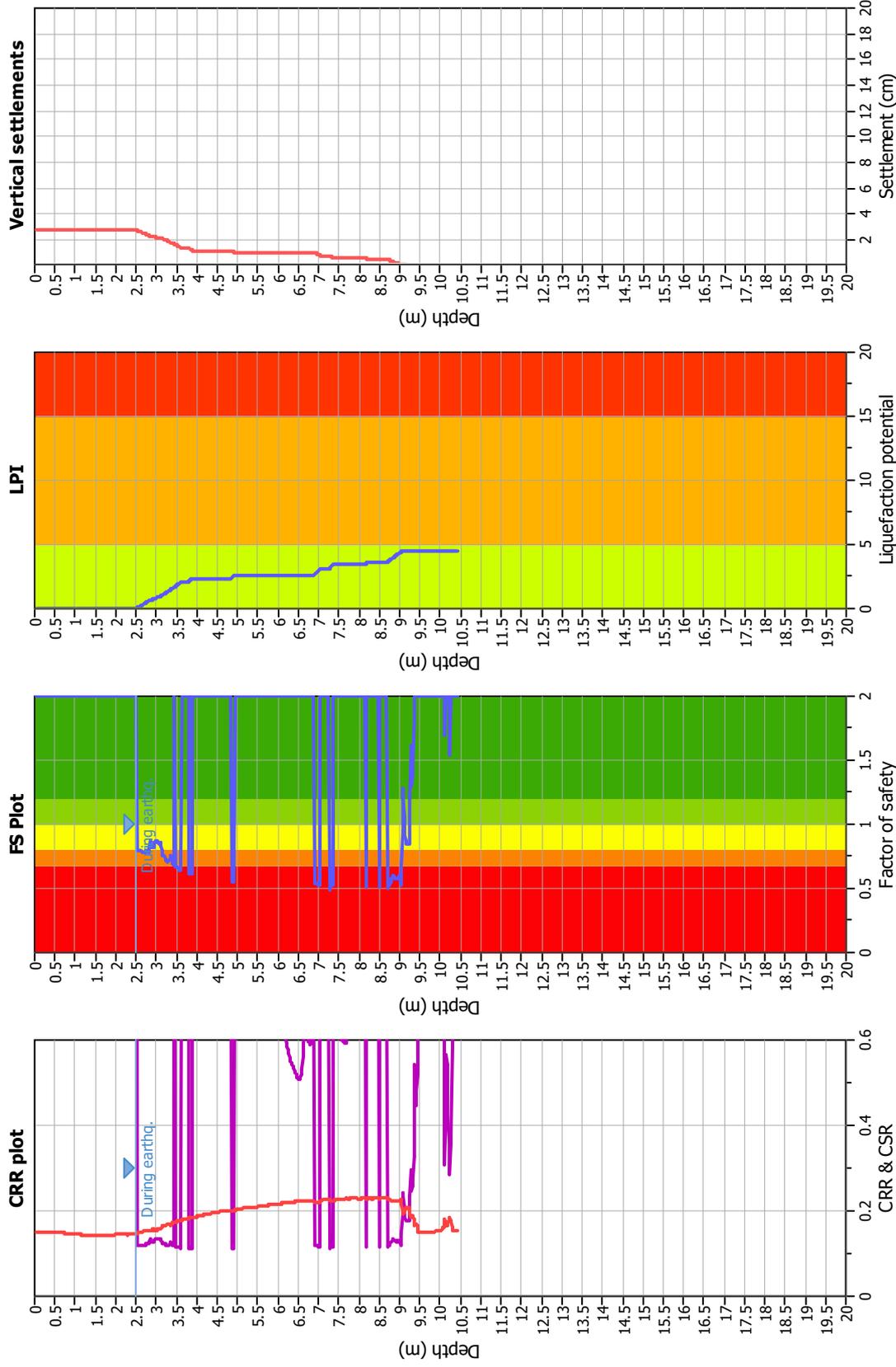
#### LPI color scheme

■ 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.): 2.50 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 overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)  
 Fines correction method: B&I (2014)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.23  
 Depth to water table (insitu): 3.80 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  
 $K_0$  applied: Yes  
 Clay like behavior applied: Sand & Clay  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 m  
 Average results interval: 3  
 Ic cut-off value: 2.60  
 Unit weight calculation: Based on SBT  
 Use fill: No  
 Fill height: N/A