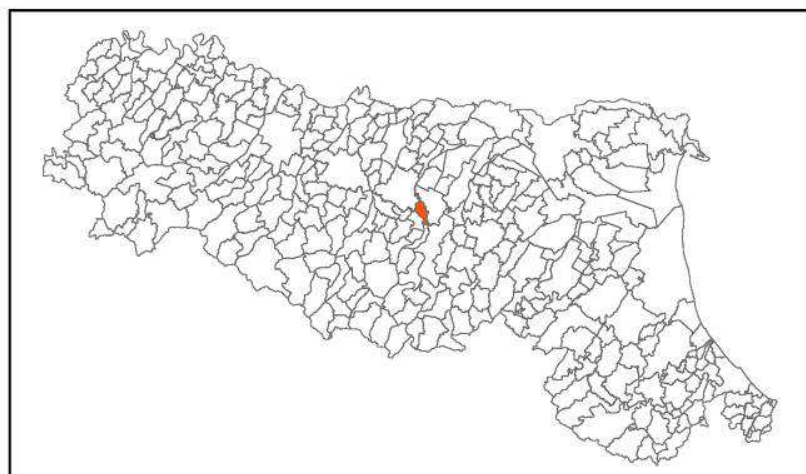


Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009, n. 77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia – Romagna
Comune di San Cesario sul Panaro



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia Romagna	Dott. Geol. Giorgio Gasparini	Maggio 2025

STUDIO GEOLOGICO AMBIENTALE

ARKIGEO

di Gasparini Dott. Geol. Giorgio

Via S. Martino 4 - 41030 BASTIGLIA (MO)

Tel. /Fax : 059 – 815262

e-mail : <arkigeo@arkigeo.191.it>

C.F.: GSP GRG 54M14 A959S P. I.V.A.: 02350330367

INDICE RELAZIONE ILLUSTRATIVA

1. INTRODUZIONE	3
2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1. <i>Classificazione sismica</i>	7
2.2. <i>Pericolosità sismica</i>	12
2.2.1. <i>Pericolosità di base</i>	12
2.2.2. <i>Pericolosità locale</i>	20
3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI	
SAN CESARIO SUL PANARO	23
3.1. <i>Inquadramento tettonico e strutturale</i>	23
3.2. <i>Inquadramento stratigrafico-litologico</i>	33
3.2.1. <i>Stratigrafia</i>	33
3.2.1.1. <i>Subsintema di Villa Verucchio (Unità di Vignola)</i>	34
3.2.1.2. <i>Subsintema di Ravenna</i>	34
3.2.1.3. <i>Depositi attuali in evoluzione</i>	35
3.3. <i>Inquadramento morfologico</i>	40
4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI	42
5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO	43
5.1. <i>Modelli geologici</i>	47
6. INTERPRETAZIONE E INCERTEZZE	51
6.1. <i>Interpretazioni</i>	51
6.1.1. <i>Andamento del bedrock sismico</i>	52
6.2. <i>Incertezze</i>	53
7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI	56
7.1. <i>Prima fase</i>	56
7.2. <i>Seconda fase</i>	57
7.2.1. <i>Primo livello di approfondimento</i>	57
7.2.2. <i>Secondo livello di approfondimento</i>	59
7.2.2.1. <i>Carta di pericolosità sismica (H_{SM} Hazard Seismic Microzonation)</i>	59
7.2.3. <i>Terzo livello di approfondimento</i>	60
7.2.3.1. <i>Premessa</i>	60
7.2.3.2. <i>Risposta Sismica Locale (RSL)</i>	61
7.2.3.3. <i>Microzonazione della pericolosità sismica (HSM Hazard Seismic Microzonation)</i>	86
7.2.3.4. <i>Stabilità delle scarpate dell'ambito estrattivo "Cava Ghiarella"</i>	89

7.2.3.5. <i>Rischio di liquefazione</i>	91
7.2.3.5.1. <i>Indice di potenziale liquefazione (IPL)</i>	92
7.2.3.5.2. <i>Liquefaction Severity Number (LSN)</i>	94
7.3. <i>Terza fase</i>	95
8. ELABORATI CARTOGRAFICI	96
9. BIBLIOGRAFIA	101
10. ELENCO ALLEGATI	105

1. INTRODUZIONE

Nella presente relazione sono descritti le ricerche, i dati, le analisi e gli elaborati prodotti nell'ambito dello studio di Microzonazione sismica di terzo livello (MS3) del Comune di San Cesario sul Panaro (MO).

Il lavoro riprende, aggiornandoli, gli elaborati e la banca dati della precedente microzonazione sismica di secondo livello datata 2014¹ e che fu oggetto (nel 2022) di parziale aggiornamento nell'ambito dei lavori a supporto della progettazione del Piano Urbanistico Comunale (PUG).

Lo studio è stato prodotto con riferimento agli standard di archiviazione informatica e cartografici per la Microzonazione Sismica della Protezione Civile (versione 4.2 del dicembre 2020).

Più in particolare, si è proceduto:

- all'aggiornamento e all'integrazione della banca dati esistente con l'inserimento delle indagini contenute nelle relazioni geologico-geotecniche e sismiche allegate alle pratiche edilizie più recenti consultate presso l'UTC comunale;
- all'individuazione preliminare, di concerto con il Comune di San Cesario sul Panaro, degli areali nei quali svolgere gli approfondimenti di terzo livello (valutazione della risposta sismica locale e valutazione dell'Indice di Potenziale Liquefazione IPL negli areali per quali i dati stratigrafici suggeriscono la presenza di terreni potenzialmente liquefacibili). Con il procedere dei lavori si è optato, anche di concerto con il Servizio Geologico, sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, di estendere l'analisi di terzo livello a tutto il territorio comunale, con esclusione delle aree di cava e di ex-cava, fatta eccezione per la cava denominata Ghiarella, per la quale si è proceduto con un'analisi di risposta sismica locale 2D e con la verifica di stabilità lungo scarpata ovest;
- all'esecuzione di nuove indagini penetrometriche (4 prove CPTU accompagnate da altrettante indagini con cono sismico) e sismiche (6 acquisizioni multicanale attive in onde di superficie MASW (componente verticale)² e 6 registrazioni passive a stazione singola (HVSr), nonché al loro inserimento in banca dati;
- all'aggiornamento delle cartografie, per tenere conto dei nuovi dati sia da archivio che originali, nonché delle analisi di approfondimento di terzo livello relative alla valutazione della Risposta Sismica Locale (RSL) e dell'Indice di

¹ Studio Geologico Ambientale Arkigeo di Bastiglia (MO) (responsabile: dott. Geol. Giorgio Gasparini).

² A ciascuna acquisizione attiva è stata abbinata un'acquisizione passiva mediante antenna sismica 2D, elaborata secondo la metodologia ESAC. Ciascuna coppia di acquisizioni (attiva e passiva) è stata elaborata combinando le curve di dispersione effettive in una unica. Per tale motivo le acquisizioni multicanale passive (ESAC) non sono state inserite in banca dati come indagini puntuali a sé stanti in quanto la loro elaborazione, al fine di ottenere un modello di velocità del sottosuolo, era parte di quella delle indagini attive che invece sono state inserite in banca dati come indagini di tipo lineare (MASW).

Potenziale Liquefazione dei terreni sabbiosi.

Il presente lavoro è stato realizzato in collaborazione con l'Amministrazione Comunale e con l'Unità Tecnica comunale ed è stato condotto in conformità ai contenuti e agli indirizzi della:

- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 564 del 26 aprile 2021 (*Integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).*
- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 476 del 12 aprile 2021 (*Aggiornamento dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)*) di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019 n. 630).
- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 630 del 29 aprile 2019 (*Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).*
- Gruppo di lavoro MS, 2018 "*Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ).* Versione 1.0. Approvate dalla Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- Gruppo di lavoro MS, 2008 "*Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*" approvati dalla Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"* (suppl. alla rivista Ingegneria Sismica, 2011).
- *Standard di archiviazione e rappresentazione informatica* versione 4.2 (commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (art. 5, comma 7 dell'OPCM 13 novembre 2010, n. 3907) del dicembre 2020.
- *Deliberazione di Giunta Regionale n. 743 del 17/01/2024, recante "O.C.D.P.C. 978/2023: Approvazione elenco degli enti locali destinatari dei contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite di emergenza", con la quale vengono attribuiti contributi al Comune di San Cesario sul Panaro per euro 17.250,00 (pari al 75% del costo complessivo).*

* * *

Il territorio del Comune di San Cesario sul Panaro si estende su una superficie

di circa 27,4 Km² nella medio-alta pianura modenese, a est del F. Panaro³. Esso confina con i comuni di Modena, Spilamberto, Savignano sul Panaro, Castelfranco Emilia, tutti in Provincia di Modena, e di Valsamoggia, in provincia di Bologna (Figura 1 e Figura 2).

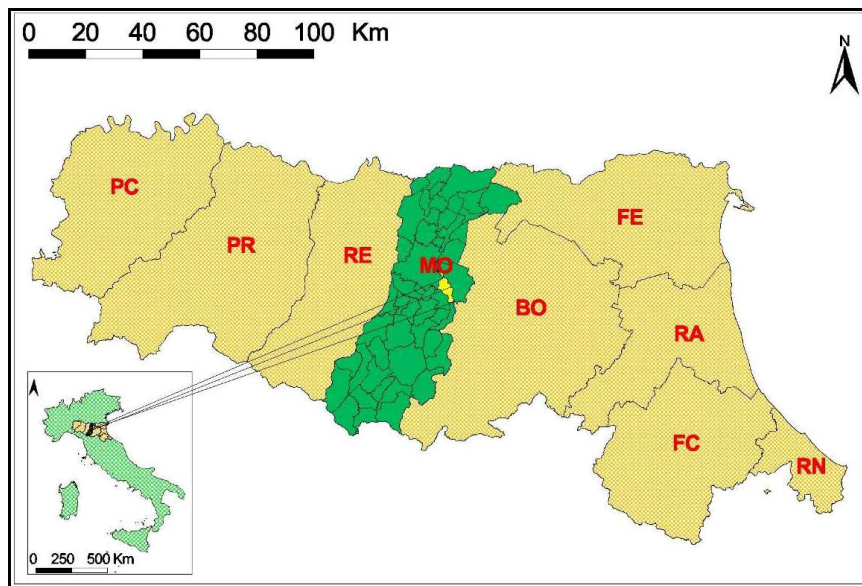


Figura 1 – Inquadramento regionale del territorio del Comune di San Cesario sul Panaro.

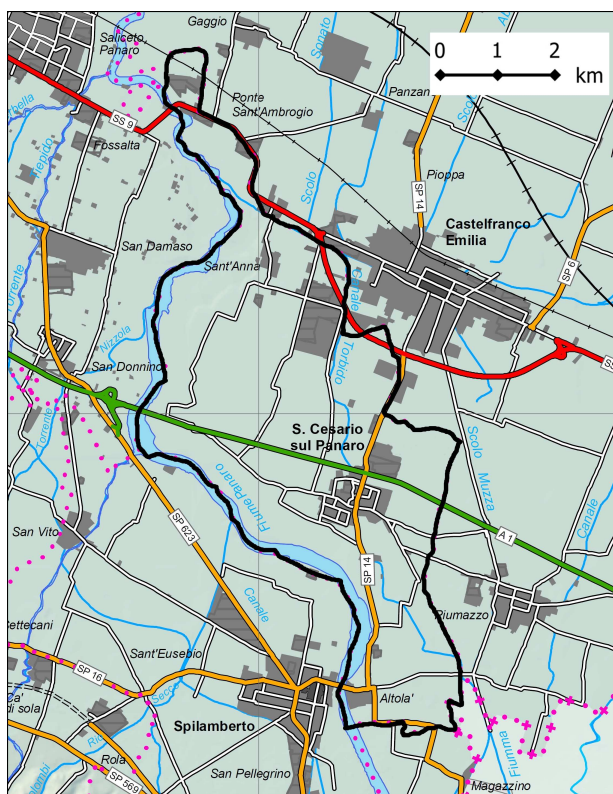


Figura 2 – Comune di San Cesario sul Panaro (Base topografica: estratto con inserti grafici da Provincia di Modena - Carta del territorio alla scala 1:100.000).

³ Una piccola striscia di territorio comunale ricade in sinistra Panaro.

Dal punto di vista cartografico la topografia del territorio comunale è descritta nelle seguenti Tavole alla scala 1:25.000 della Carta Topografica Regionale nn. 201SE, 202SO, 219NE e 220NO e nelle Sezioni alla scala 1:10.000 della Carta Tecnica Regionale nn. 201160, 202130, 219040, 220010 e 220050.

Per la redazione delle tavole cartografiche allegate al presente studio è stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale, utilizzando gli Elementi alla scala 1:5000, nella versione del 2013 (DBTR2013).

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

2.1. *Classificazione sismica*

Il Comune di San Cesario è compreso nell'elenco dei comuni sismici classificati in zona 3 dall'Allegato n. 1 all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 (s.m.i) del 20 Marzo 2003 (*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica*) (Figura 3).

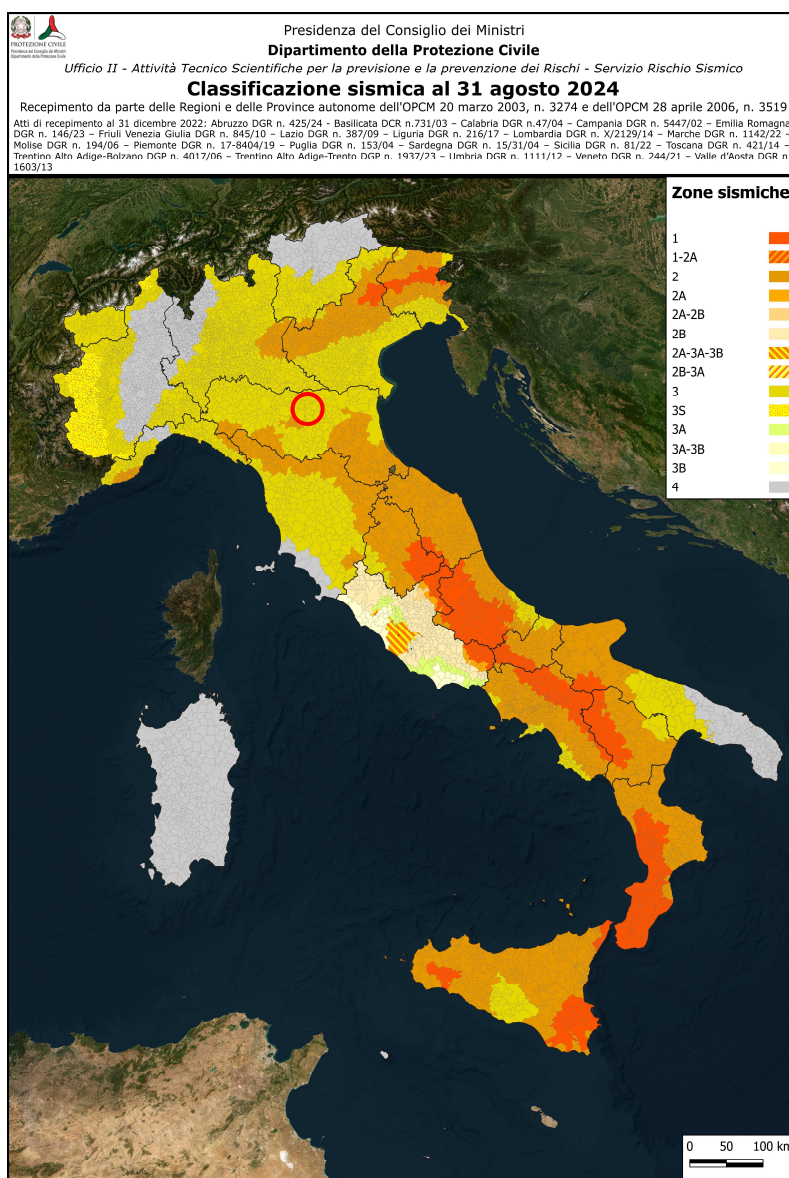


Figura 3 – Classificazione sismica del territorio italiano aggiornata al 31 agosto 2024 (il cerchio rosso individua l'ubicazione dell'area in studio) (fonte dati: <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/classificazione-sismica/>).

La Mappa di Pericolosità sismica di riferimento per la regione Emilia-Romagna (Figura 4 in alto) indica per il territorio del Comune di San Cesario valori di accelerazione massima al suolo (a_{max})⁴ dell'ordine di $0,150g \div 0,175g$ ⁵;

Se si prende invece in considerazione la mappa di pericolosità sismica di base che tiene conto anche delle sorgenti sismogenetiche (Figura 4 in basso), i valori dell'accelerazione massima al suolo (a_{max}) previsti risultano, per il territorio di San Cesario sul Panaro, relativamente più alti ($0,175g \div 0,200g$).

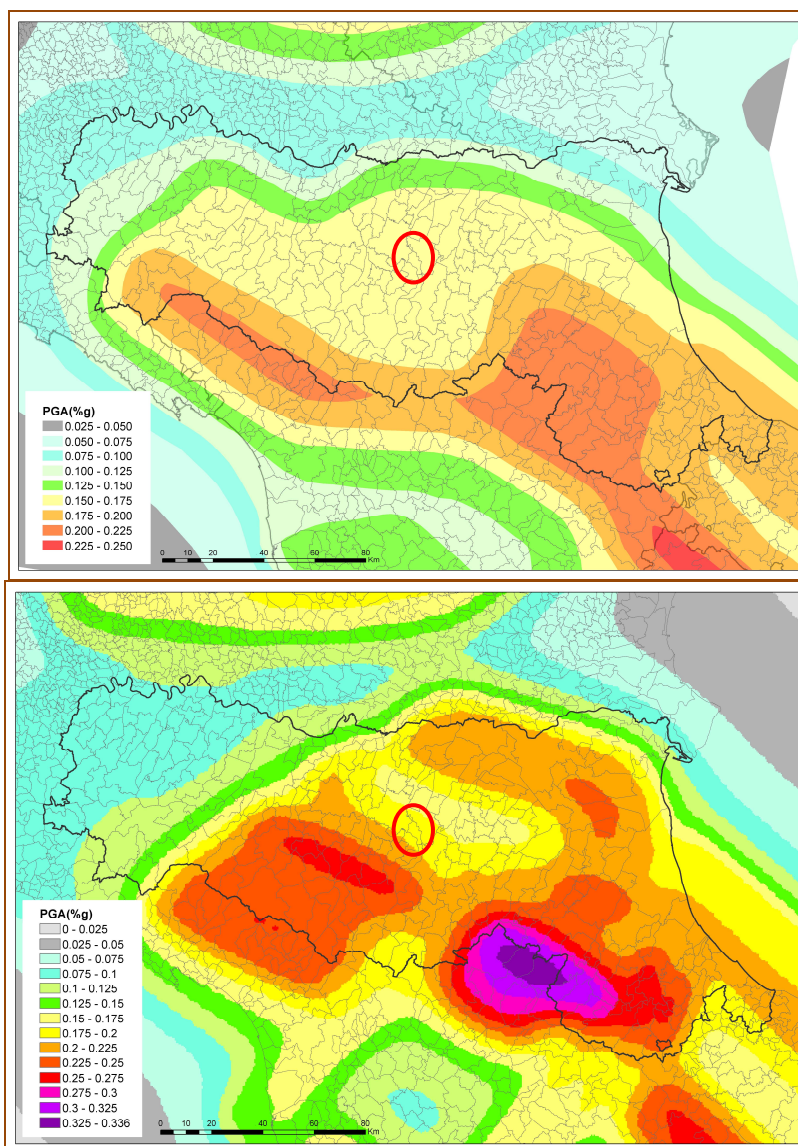


Figura 4 - In alto: Mappa di pericolosità sismica di base MPS04 (OPCM 3519/2006) per l'Emilia-Romagna e aree limitrofe (per TR=475 anni); in basso: Mappa di pericolosità sismica di base per l'Emilia-Romagna e aree limitrofe (per TR=475 anni), elaborata sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismogenetiche (Martelli et al., 2017b). (Fonte di entrambe le immagini: <https://webbook.arpae.it/indicatore/Pericolosit-sismica-di-base-Pb-00001/?espandi=grafici>).

⁴ In altre sedi è possibile che l'accelerazione massima al suolo sia indicata sia con la sigla a_{max} , ma anche con PGA (*Peak Ground Acceleration*, lett. Accelerazione di Picco al Suolo).

⁵ Ascrivibile a una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita ai suoli rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat. A di cui al DM 17.01.2018)

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, approvate con DM 14 Gennaio 2008 e successivamente aggiornate con DM 17 gennaio 2018, hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva, ma solo ai fini progettuali. Per ciascuna zona - e quindi territorio comunale - in precedenza veniva infatti fornito un valore di accelerazione di picco, e quindi di spettro di risposta elastico, da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche. Al contrario, dal 1° Luglio 2009 per ogni costruzione si deve considerare un'accelerazione di riferimento di sito, individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini comunali.

In conseguenza di quanto appena esposto, la classificazione sismica (zona sismica di appartenenza del Comune) non ha valore per il singolo intervento, ma mantiene ancora una sua utilità, come per il caso della Microzonazione Sismica, a livello di gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli Enti preposti (Regione, Genio Civile, ecc.).

In riferimento agli effetti macrosismici osservati (*Scala Mercalli Cancani Sieberg*), si riporta la carta, per l'Emilia-Romagna, delle massime intensità macrosismiche attese dove si può notare che per il Comune di San Cesario l' I_{max} raggiunge l'8° grado (Figura 5).

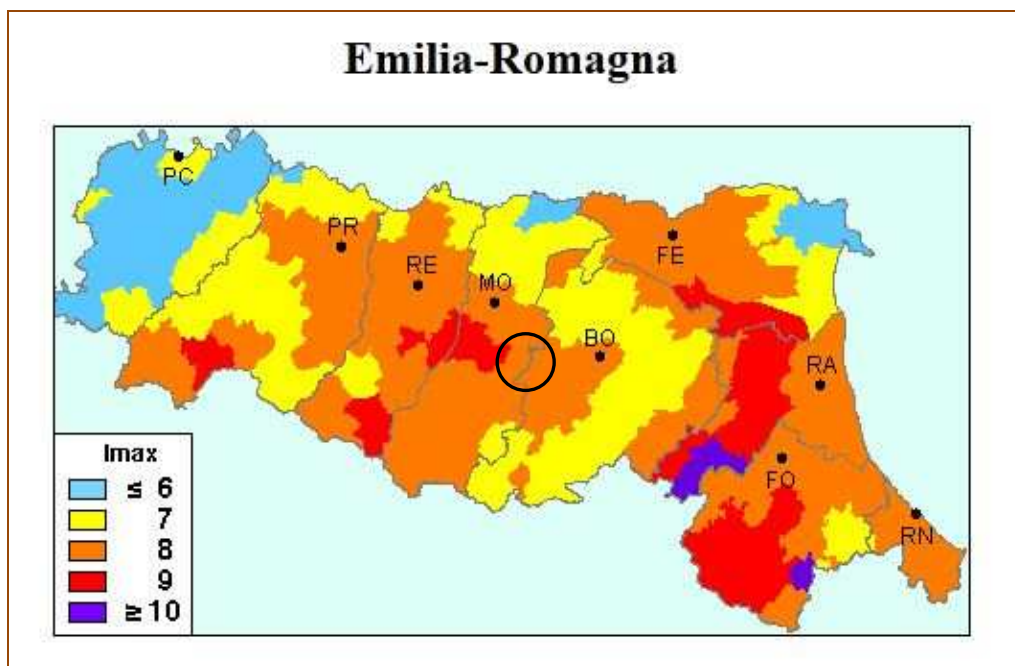


Figura 5 – Massime intensità macrosismiche.

A questo proposito va segnalato che anche nella proposta avanzata da

Mantovani *et alii* (2013) al territorio di San Cesario viene attribuito l'VIII° della scala MCS. Si riportano, al riguardo, la carta con la proposta di classificazione comune per comune e la relativa tabella tratta dallo studio testé citato (Figura 6 e Figura 7).

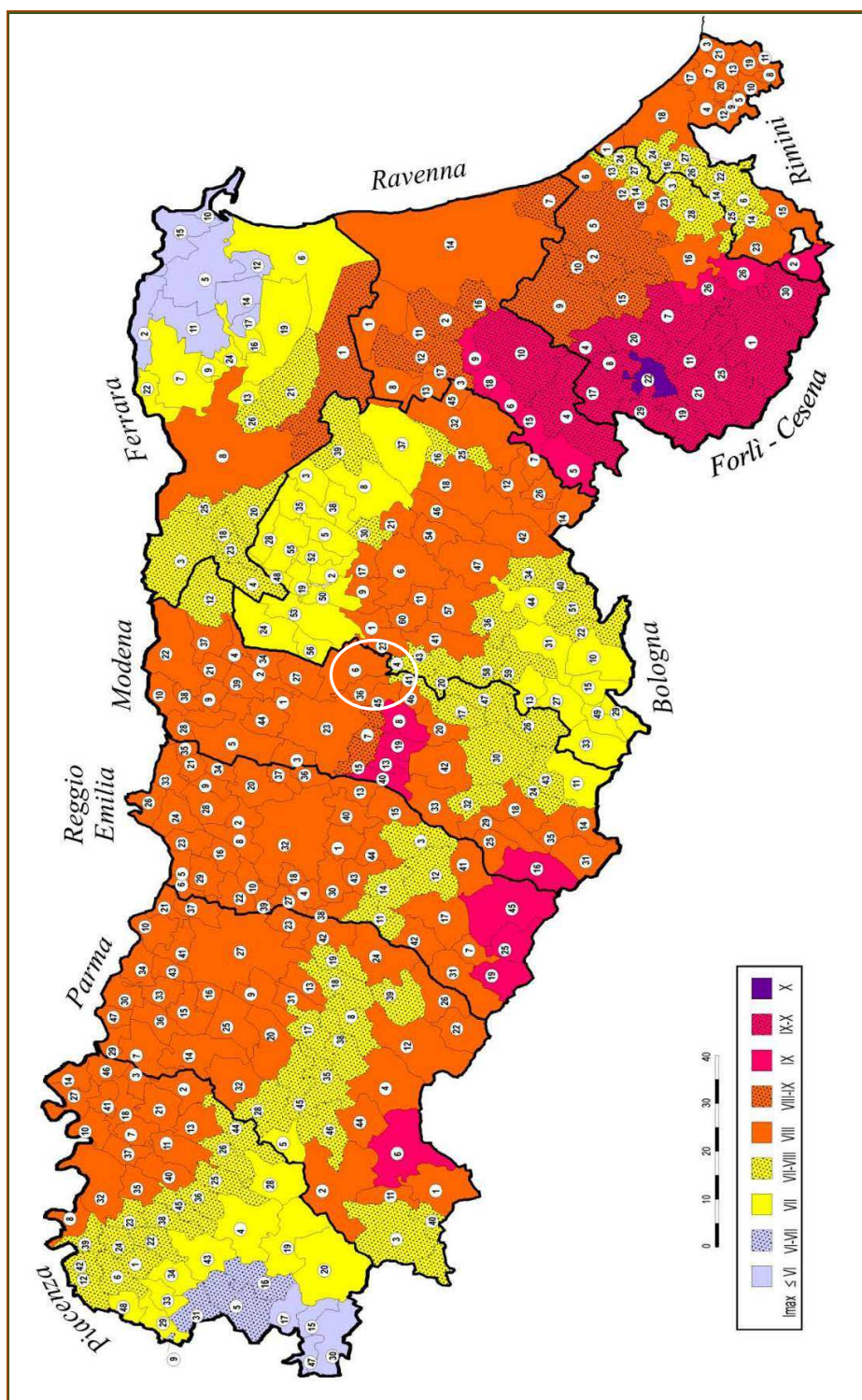


Figura 6 – Proposta di riclassificazione macrosismica della Regione Emilia-Romagna di Mantovani *et al.*, 2013. Il Comune di San Cesario è indicato con il n. 36 (ovale bianco).

MODENA		Intensità massima				Numero di risentimenti (da DBMI11)					
N	Comune	NP	MO	DB	AA	Anno	9≤I<10	8≤I<9	7≤I<8	6≤I<7	5≤I<6
1	Bastiglia	8	7	5	7 ^M	1996					1
2	Bomporto	8	7	5	7 ^M	1971-1996					2
3	Campogalliano	8	8	7	8 ^M	1832			1	4	4
4	Camposanto	8	7	6	7 ^M	1987				1	2
5	Carpi	8	7	7	7-8 ^S	1832-1928			2	11	11
6	Castelfranco Emilia	8	8	6	8 ^M	1929-1874				3	4
7	Castelnuovo Rangone	8-9	8	5-6	8 ^M	1929					3
8	Castelvetro di Modena	9	9	9		1501	1				1
9	Cavezzo	8	7	5-6	7 ^M	1978					3
10	Concordia sulla Secchia	8	7	7	7 ^M	1971			1	1	5
11	Fanano	7	8	7		1740-1914			3	2	
12	Finale Emilia	7-8	7	7	7-8 ^I	1574			1	6	5
13	Fiorano Modenese	9	9	7-8	9 ^C	1501			2	1	1
14	Fiumalbo	8	8	7		1920			1	2	3
15	Formigine	8-9	9	8-9		1501		1		1	2
16	Frassinoro	8	8	8		1920		1	4		4
17	Guiglia	7-8	8	6	7 ^M	1920				1	3
18	Lama Mocogno	8	8	8		1920		1		3	1
19	Maranello	9	9	9		1501	1				4
20	Marano sul Panaro	8	8	7-8		1501			2		
21	Medolla	8	7	6	7-8 ^I	1987				1	2
22	Mirandola	8	≤6	6	7 ^M	1796-1891-1914 1971-1987				5	7
23	Modena	8	8	7-8	8 ^M	1249-1501			6	10	25
24	Montecreto	7-8	8	7-8		1501			2	2	1
25	Montefiorino	8	8	7-8		1920			1		
26	Montese	7-8	7	8		1399		1		2	3
27	Nonantola	8	7	6	8 ^G	1671				1	6
28	Novi di Modena	8	7	5-6	7 ^M	1987-1996					4
29	Palagano	8	8	4-5		2000					
30	Pavullo nel Frignano	7-8	8	7		1920-1937			2	2	3
31	Pievepelago	8	8	8		1920		5	1	2	3
32	Polinago	8	8	7-8		1920			2		1
33	Prignano sulla Secchia	8	8	6		1987				1	1
34	Ravarino	8	7	5	7 ^M	1909					2
35	Riolunato	8	8	6		1740-1904				5	3
36	San Cesario sul Panaro	8	8	5	8 ^M	1996					1
37	San Felice sul Panaro	8	7	6	7 ^M	1796-1987				3	4
38	San Possidonio	8	7	6	7 ^M	1971				1	2
39	San Prospero	8	7	6	7 ^M	1983				1	2
40	Sassuolo	9	9	9		1501	2			6	3
41	Savignano sul Panaro	7-8	8	6	7 ^M	1929				2	3
42	Serramazzoni	8	8	6		1995				1	
43	Sestola	7-8	8	6-7		1740-1920				2	2
44	Soliera	8	7	6	7 ^M	1928				1	6
45	Spilamberto	8	8	5-6	8 ^M	1909					4
46	Vignola	8	8	6	7 ^M	1904-1914-1920 1929-1983				5	5
47	Zocca	7-8	8	7	7 ^M	1869			1	2	4

Tab. 6.1.6. Intensità massima e altre informazioni macrosismiche per i comuni della Provincia di Modena

NP=intensità massima da noi proposta sulla base dei dati macrosismici e delle conoscenze sul quadro tettonico; MO=intensità massima proposta da Molin et alii (1996); DB=Intensità massima ricavata dal catalogo DBMI11 (Locati et alii, 2011); AA=Intensità massima suggerita da altri lavori (G=Guidoboni et alii, 2005; M=Magri e Molin, 1986, vedi Fig. 6.1.1), o da scosse riportate dal catalogo CPTI11 (C=Rovida et alii, 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>) e dal sito www.ingv.it (I). Per ogni comune sono anche riportati l'anno del terremoto che ha prodotto l'intensità massima riportata nel catalogo DBMI11(Anno) e il numero dei risentimenti per varie fasce di intensità.

Figura 7 – Intensità massima e altre informazioni macrosismiche per i Comuni della Provincia di Modena.

2.2. Pericolosità sismica

Il concetto di pericolosità è definito come la probabilità che un evento “pericoloso” di un dato valore di magnitudo colpisca un determinato territorio durante uno specifico intervallo di tempo.

In coerenza con tale definizione, per stabilire la pericolosità sismica di una certa area, o sito di interesse, occorre:

- fissare un valore di un determinato parametro sismico: magnitudo, scuotimento; accelerazione, ecc.;
- delimitare il territorio per il quale si vuole definire la pericolosità;
- stabilire un tempo di ritorno dell'evento per il quale si vuole determinare la probabilità che esso si presenti.

Le numerose ricerche e soprattutto le osservazioni compiute in occasione di eventi tellurici che nel passato, anche recente, hanno colpito varie regioni del mondo, hanno evidenziato che non sempre esiste una relazione diretta tra i dissesti, o i danni causati dal terremoto, e l'energia sprigionata dal medesimo. Ne consegue che il parametro “magnitudo”, nelle sue diverse varianti, è utile per comparare gli eventi tellurici in sé, ma non per valutare la pericolosità sismica di un determinato territorio o sito specifico.

Si è inoltre osservato che, a parità di distanza dall'epicentro, in alcune aree si riscontravano danni maggiori rispetto ad altre, con casi, apparentemente paradossali, per i quali il terremoto ha ingenerato i danni maggiori a centinaia di chilometri di distanza dall'epicentro, mentre le zone a esso vicine risultavano colpite in maniera minore.

Tale duplice natura della pericolosità sismica viene solitamente espressa attraverso la combinazione di due distinte componenti: la pericolosità di base e la pericolosità locale.

2.2.1. Pericolosità di base

La pericolosità di base (o pericolosità regionale) prescinde dalle caratteristiche locali e dipende esclusivamente dalla sismicità i cui effetti possono essere risentiti nella regione all'interno della quale si colloca il territorio preso in considerazione (in questo caso il Comune di San Cesario sul Panaro).

Nel capitolo precedente, in riferimento alla “Classificazione sismica”, si è già dato conto dell'attribuzione quantitativa di legge della pericolosità sismica di base; si ricordano ora, visto il loro interesse, dati e mappe più significativi utilizzati, nel procedimento probabilistico di analisi della pericolosità sismica (PSHA), per la

costruzione delle mappe di pericolosità. Tale metodologia è quella ufficialmente adottata dagli Enti di Ricerca.

In relazione alla **sismicità** è stata caratterizzata la distribuzione temporale (ricorrenza), spaziale e di magnitudo dei terremoti tramite catalogo tenendo conto del periodo di completezza di quest'ultimo.

Senza pretese di esaustività si ritiene d'interesse riportare qui la "storia sismica" del Comune di San Cesario sul Panaro (Figura 8 e Figura 9).

San Cesario sul Panaro

PlaceID IT_39011
 Coordinate (lat, lon) 44.562, 11.033
 Comune (ISTAT 2015) San Cesario sul Panaro
 Provincia Modena
 Regione Emilia-Romagna
 Numero di eventi riportati 10



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1899	06	26	23	17	2	Valle del Bisenzio	138	7	5.02
2	1967	04	03	16	36	1	Reggiano	45	5	4.44
4	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
2	1971	09	11	23	18	1	Pianura emiliana	15	5	4.19
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
3	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
5	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
3	1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
NF	1998	02	21	02	21	1	Pianura emiliana	104	5	3.93

Località	Eqs	Distanza (km)
Spilamberto	22	3
Piumazzo	6	3
Castelfranco Emilia	30	4
Cavazzona	1	7
San Damaso	6	7
Riolo	1	7
Valsamoggia (Bazzano)	33	7
Castelnuovo Rangone	20	8
Calcara	1	8
Gaggio	1	8
Ponte Samoggia	1	9
Vignola	44	9
Recovato	1	9
Savignano sul Panaro	14	9
Crespellano	17	9
Solignano Nuovo	1	9
Castelvetro di Modena	26	10

Figura 8 - Storia Sismica del Comune di San Cesario (ripreso da: https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/).

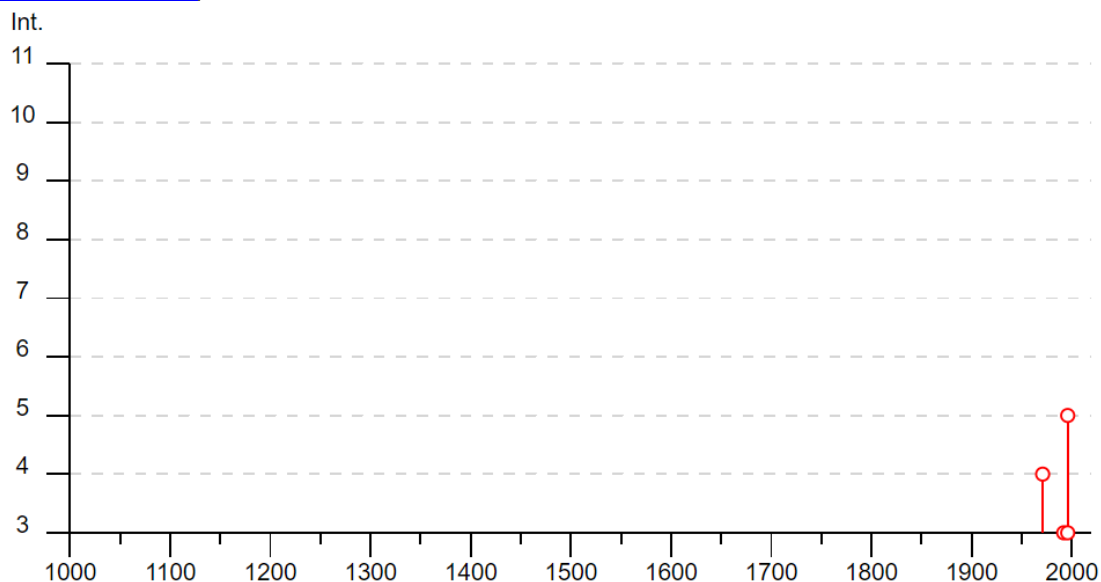


Figura 9 - "Storia sismica" Comune di San Cesario sul Panaro (ripreso da: https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/).

Per quanto riguarda le **sorgenti** si fa riferimento alle faglie attive attraverso parametri che ne riassumono il comportamento (zone sismiche). A tale proposito si riportano:

1) un estratto, dal “Geoportale Nazionale” (Ministero dell’Ambiente) della mappa delle zone sismiche (Figura 10) (tratta da “*Rapporto Conclusivo della zonazione sismogenetica ZS9 - Appendice 2*” (Marzo 2004), del Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa di Pericolosità Sismica (Ordinanza PCM 20.03.03 n. 3274) dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, dalla quale, per le zone riguardanti il Comune in oggetto e cioè la n. 912 e la n. 913, si possono dedurre i seguenti valori massimi della magnitudo momento (M_{Wmax}):

- Zona 912 “Dorsale Ferrarese” $M_w = 6,14$
- Zona 913 “Appennino Emiliano-Romagnolo” $M_w = 6,14$

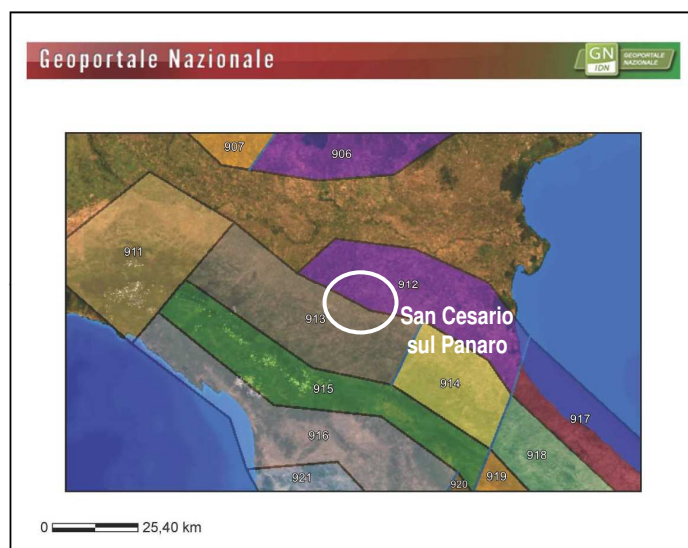


Figura 10 – Mappa zone sismiche (modificato).

2) un estratto della mappa delle “Sorgenti sismogenetiche” (Figura 11) tratto dal “*Database of Individual Seismogenetic Sources – 3.3.1 (DISS3.3.1)*” versione pubblicata nel marzo 2025, dal quale si può segnalare, per l’area di interesse, la sorgente sismica codificata come:
ITCS047 “Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme” (sorgente sismica composita riferibile al così detto *Fronte di accavallamento pedeappenninico – Pedeapennine Thrust Front* di Boccaletti et al., 1985).

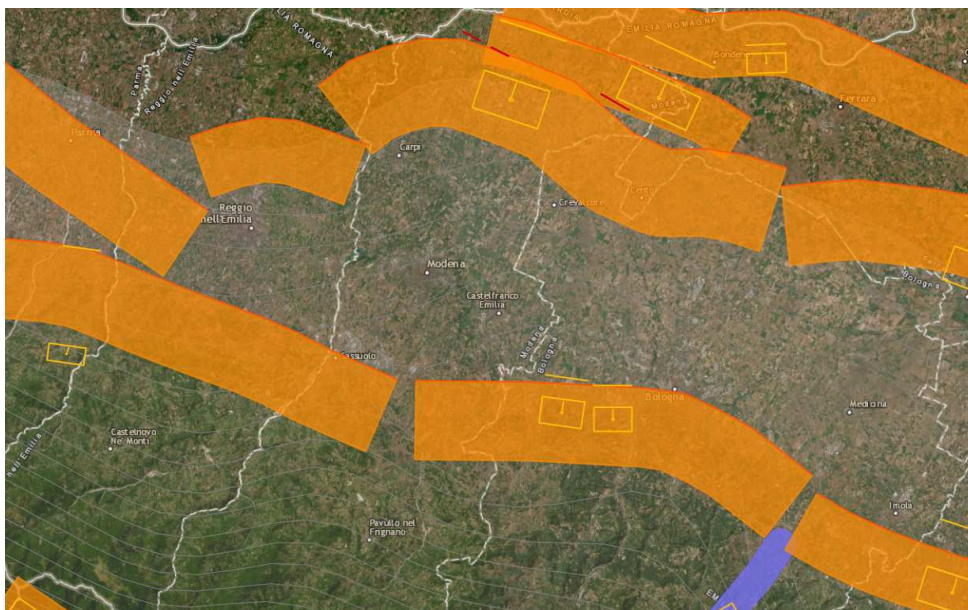


Figura 11 – Estratto da mappa “Sorgenti sismogenetiche” (DISS 3.3.1 del marzo 2025). (Da: <https://diss.ingv.it/mapper/>).

Per quanto attiene, infine, la “**propagazione dell’energia**”, sono stati definiti i modelli empirici predittivi del moto al suolo in funzione di distanza, frequenza e magnitudo.

Fra le leggi di attenuazione sismica più usate in letteratura si segnala quella di *Pugliese e Sabetta*.

* * *

L’approccio metodologico ufficiale (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA*) soprarichiamato è stato oggetto di critiche da parte di Mantovani et alii (2013) che ne propongono un altro, presentando un’organizzazione delle zone sismogenetiche diversa di cui se ne riporta di seguito un estratto:

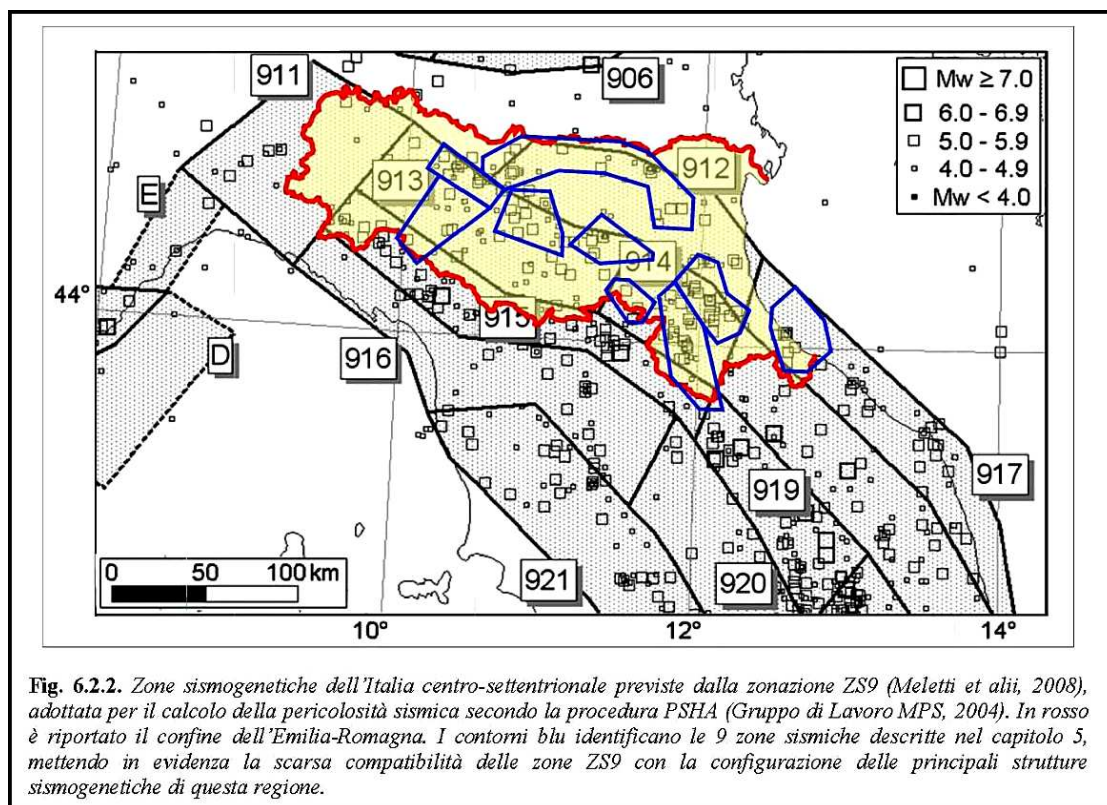
... omissis

Tra le altre zone esposte spiccano la fascia pedemontana a sud di Modena e Reggio Emilia e l’Alto Appennino reggiano e parmense. Una bassa pericolosità ($I_{max} < 6$) è invece assegnata alla provincia di Piacenza, al settore ferrarese del Delta del Po ed alla parte nord-orientale del Modenese. Quest’ultima zona, peraltro, costituisce parte dell’area colpita dai terremoti del Maggio 2012, ove è stata stimata una $I_{max} = 7-8$ MCS (Galli et alii, 2012).

... omissis

Nell’ambito delle procedure probabilistiche è comunque opportuno distinguere tra due approcci assai diversi, come descritto nel quadro tracciato da Gomez Capera et alii (2010), cui si rimanda per ulteriori approfondimenti e per i numerosi riferimenti. Il primo tipo di approccio (e.g. Slejko et alii, 1998) stima l’intensità massima mediante la procedura PSHA, che prevede una serie di operazioni, come la scelta della base di dati (catalogo sismico), la definizione di zone sismogenetiche, l’analisi di completezza del catalogo, la stima del tasso di sismicità e dei parametri della relazione Gutenberg-Richter e la scelta di funzioni di attenuazione dell’intensità macrosismica con la distanza epicentrale (e.g. Gomez Capera, 2006; Gomez Capera et alii, 2008). È evidente che i punti deboli della procedura PSHA (discussi in Mantovani et alii, 2011) interessano anche la valutazione probabilistica dell’ I_{max} . Basti ricordare che la suddetta procedura ipotizza la sostanziale casualità dei terremoti e la completa indipendenza tra le

sorgenti sismiche, nonostante che le faglie responsabili siano fratture in un mezzo solido (la crosta terrestre) e quindi meccanicamente connesse l'un l'altra (e.g., Stein, 1999; Scholz e Gupta, 2000; Steacy et alii, 2005). C'è inoltre il problema cruciale della zonazione sismogenetica adottata (Meletti et alii, 2000, 2008), che per l'Appennino settentrionale prevede pochi e vasti settori molto allungati in senso NO-SE e quindi scarsamente rappresentativi della reale distribuzione spaziale delle strutture sismogenetiche. La figura 6.2.2 mette in evidenza questo aspetto per l'Emilia-Romagna, confrontando la più recente zonazione adottata per la metodologia PSHA (ZS9 di Meletti et alii, 2008) con le zone sismogenetiche da noi proposte e descritte nel capitolo 5 di questa pubblicazione. Altri problemi della metodologia PSHA sono discussi da Castanos e Lomnitz (2000), Klugel (2007) e soprattutto Stein et alii (2012), i quali mettono in evidenza che le carte di PSHA hanno ripetutamente sottostimato lo scuotimento sismico nelle zone del mondo colpite di recente da forti terremoti (e.g., Algeria 2003, Marocco 2004, Cina 2008, Haiti 2010, Nuova Zelanda 2010 e Giappone 2011). Il secondo tipo di procedura probabilistica (e.g., Albarello et alii, 2002), definito come "approccio di sito", consiste invece nell'analisi statistica della storia sismica (risentimenti documentati) di ciascuna delle località italiane considerate (di solito i capoluoghi comunali). Il principale merito di questo tipo di approccio, come descritto da Gomez Capera et alii (2010), è quello di evitare gli artifici e le difficoltà connesse con la procedura PSHA, rimanendo legato al dato primario, ossia il risentimento (danneggiamento) registrato nelle cronache storiche. C'è però da considerare che tale impostazione incorpora nella stima di I_{max} le incertezze e incompletezze della documentazione macrosismica e che, essendo unicamente basata sulla storia sismica, non prende in considerazione il fatto che possono esistere ulteriori sorgenti sismiche oltre a quelle attivate dai terremoti storici conosciuti. Informazione che il nostro approccio tenta di ricavare dalle conoscenze attualmente disponibili sull'assetto sismotettonico della regione italiana, e in particolare dell'Appennino settentrionale e Val Padana.



... omissis

Si riporta inoltre, sempre degli stessi autori, l'identificazione in carta delle zone sismogenetiche n. 3 – "Modenese" e n. 9 "Dorsale Ferrarese" che riguardano più da

vicino, sia direttamente che indirettamente, il Comune di San Cesario (Figura 12).

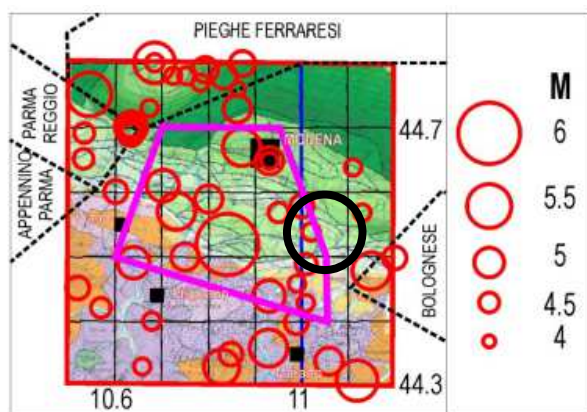


Fig. 5.3.1 I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dall'anno 1000 nel Modenese (Tab. 4.3.1). La linea blu indica il contorno della zona dove si assume una $I_{max}=7.5$. La linea rosa comprende la zona dove si assume una $I_{max}=9$. Altre informazioni come in figura 5.1.1.

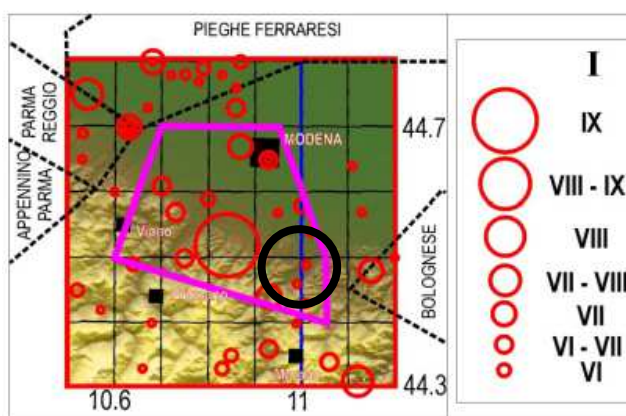


Fig. 5.3.2 I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dall'anno 1000 nel Modenese. Altre informazioni come in figura 5.3.1.

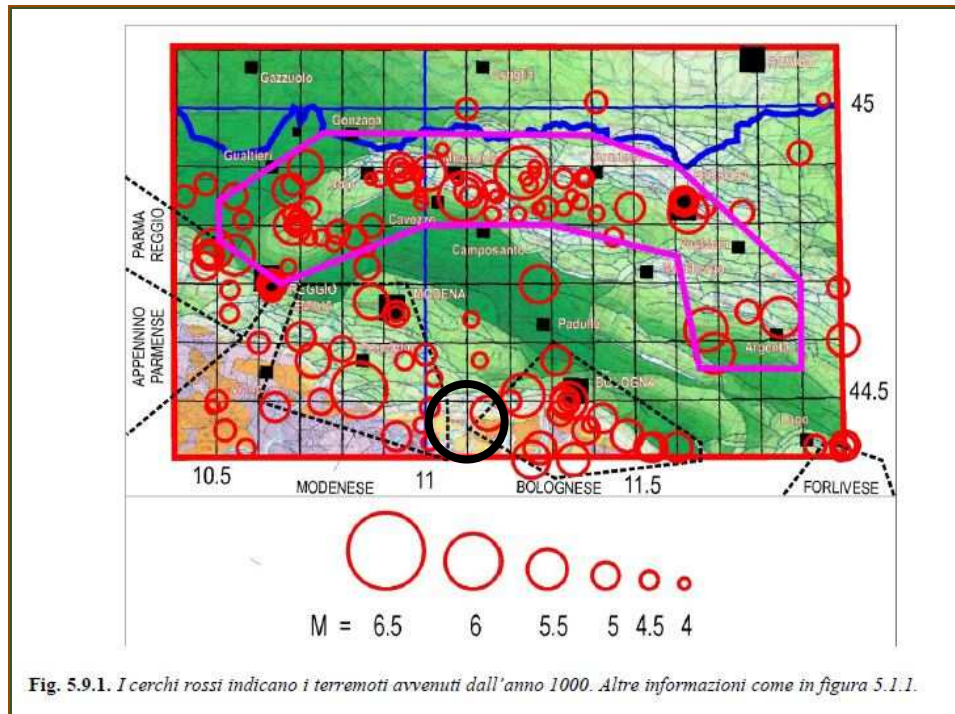
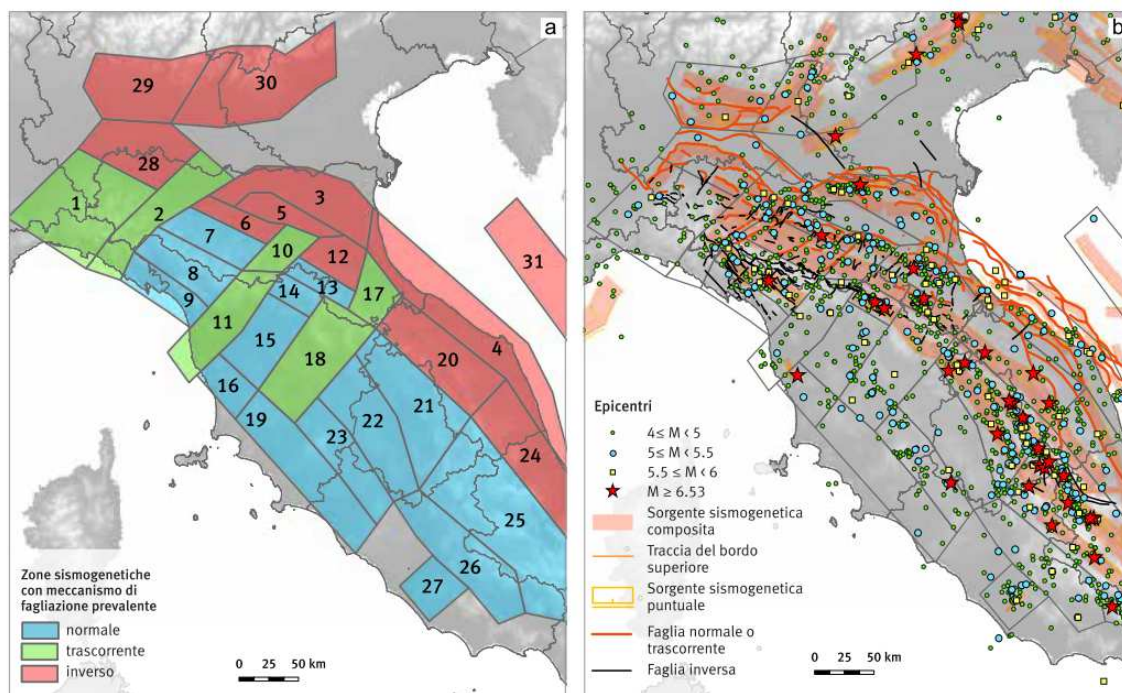


Fig. 5.9.1 I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dall'anno 1000. Altre informazioni come in figura 5.1.1.

Figura 12 – Individuazione della zona sismogenetica n. 3 – “modenese” e della zona sismogenetica n. 9 “Dorsale Ferrarese” secondo Mantovani et al. 2013, con inserimenti grafici. Il cerchio nero individua approssimativamente l'ubicazione del Comune di San Cesario.

Nella Figura 13 si riporta invece una proposta di zonizzazione sismogenetica ancor più recente (Martelli et al., 2017a e 2017b), che mira a tenere conto sia dei dati sismologici che di quelli geologici. In particolare vi si identificano alcuni settori trasversali alla catena (fasce antiappenniniche) caratterizzati anche da cinematismi di tipo trascorrente. Il comune di San Cesario, secondo tale classificazione, si colloca indicativamente a cavallo o prospiciente alle Zone 5 e 6 (Figura 13).



N.	Orientazione delle principali faglie attive	Geometrie principali (secondarie)	Profondità ipocentrale	M_{max}	
				Oss.	Calc.
1	NE-SW?	Trascorrente	?	5,7	5,93 +/- 0,25
2	NE-SW (S/45-60)	Trascorrente (Inversa)	5-30	5,5	5,71 +/- 0,29
3	S-SSW/45	Inversa	5-15	6,1	5,94 +/- 0,24
4	SW/30	Inversa	5-15	6,1	6,16 +/- 0,21
5	S-SSW/15-30	Inversa	15-35	5,5	6,00 +/- 0,53
6	S/45-60	Inversa	10-30	6	6,31 +/- 0,29
7	N/65 (S/30)	Normale (Inversa)	5-10 (>15)	5,5	5,61 +/- 0,23
8	NE/60-70(60%) SW/60-70(40%) (NE-SW)	Normale (transtensiva destra)	5-15 (10-20)	6,5 (5,1)	6,50 +/- 0,23
9	SW/65 (NE65)	Normale	5-15	5,4	6,28 +/- 0,27
10	NNE-SSW (S/45-60)	Trascorrente (Inversa)	5-15 (15-35)	5,5	5,73 +/- 0,30

Figura 13 – Proposta di zonazione sismogenetica per l'Appennino settentrionale e la Pianura Padana centrale e orientale (a sinistra in alto). Dati di riferimento (a destra in basso); Caratteristiche delle zone 1, 2, 4, e 5. Il territorio comunale di San Cesario ricade tra le Zona 5 e 6, caratterizzate principalmente da meccanismi cinematici di tipo inverso (zona in compressione) e profondità ipocentrali dell'ordine dei 10-35 km (Estratto da Martelli et al 2017a).

La zona 5 denominata Nonantola – Budrio (Martelli et al., 2017a) è la Zona

compresa tra le Pieghe Ferraresi e il margine appenninico (Pieghe Romagnole - thrust pede-appenninico) caratterizzata da bassa sismicità e rare evidenze di attività tettonica recente. Corrisponde alla parte meridionale della zona 912 della ZS9 (v. zona Pieghe Ferraresi); i terremoti attesi sono compressivi e profondi (>10 km), con direzione di compressione (assi P) circa N-S, lungo piani a basso angolo (di fatto corrisponde alla zona di flat delle Pieghe Ferraresi) immergenti verso sud. La magnitudo storica massima è $M \approx 5,5$.

La zona 6 denominata Margine Emiliano è la Zona caratterizzata da numerose evidenze geologiche di attività tettonica recente, collegate essenzialmente al thrust pede-appenninico, e frequenti terremoti di forte intensità; i terremoti di questa zona sono prevalentemente compressivi, con direzione di compressione (assi P) circa N-S, piani immergenti verso sud di 45° - 60° , con ipocentri a profondità variabili, per lo più tra 10 e 30 km; la magnitudo storica massima è $M \approx 6$. Corrisponde al settore centro-settentrionale della zona 913 della ZS9.

2.2.2. Pericolosità locale

La pericolosità locale dipende dai fattori geologici e morfologici locali. È pertanto possibile che lo stesso evento sismico venga percepito in maniera diversa in settori distinti dello stesso territorio qualora questi siano caratterizzati da differente assetto geologico, anche a parità di tipologia edilizia (così detto effetto a “macchie di leopardo”).

La pericolosità locale è quella componente della pericolosità sismica che tiene conto dei fattori locali che, in caso di terremoto, possono dare luogo a instabilità locale e/o ad amplificazione locale dello scuotimento.

Sulla base delle normative e indirizzi recenti si assume per gli studi di microzonazione sismica come pericolosità sismica di base il terremoto con probabilità di accadimento pari a uno (certezza probabilistica) in un intervallo di tempo di 475 anni⁶. Ciò corrisponde a una probabilità di accadimento del 10% su 50 anni.

* * *

Per descrivere la pericolosità del terremoto di riferimento si possono utilizzare varie grandezze quali ad esempio:

- il valore atteso di accelerazione massima al suolo PGA (*peak ground acceleration*) o a_{max} , già introdotto nel paragrafo 2.1;
- lo spettro di risposta elastico (che può essere definito in accelerazione, in velocità o in spostamento);
- l'Intensità di Housner;
- altri parametri.

⁶ Alcuni studiosi (ad es. Wang & Ormsbee, 2005) criticano tali scelte che sono comunque entrate a far parte dell'impianto normativo di numerosi paesi. Con argomentazioni fisico-matematiche viene infatti evidenziato che l'incertezza nel determinare la pericolosità sismica può essere molto grande, tanto che l'assegnare un determinato valore di pericolosità a una data area può essere affetto da un errore elevato.

Le grandezze elencate vengono solitamente utilizzate per esprimere il valore della pericolosità di base per l'intero territorio considerato (frazione di un comune, un'intera municipalità o anche più grande). Esse descrivono il "terremoto di riferimento" definito su base statistica analizzando la serie storica degli eventi sismici che hanno interessato l'area in studio o nella regione che la comprende.

Gli stessi parametri possono essere utilizzati, attraverso vari procedimenti più o meno rigorosi, per valutare, e quindi tenerne conto, qualitativamente e quantitativamente gli effetti sismici di sito che possono variare all'interno del territorio considerato in dipendenza delle differenti caratteristiche morfologiche e litotecniche locali.

Il dato della pericolosità di base è di norma riferito a un contesto litologico e morfologico ideale, riassumibile in un "sito di riferimento" pianeggiante con substrato roccioso (o comunque, per definizione, rigido⁷) affiorante o subaffiorante (con assenza di copertura soffice di spessore significativo).

Tali condizioni non corrispondono quasi mai al contesto reale del sito o del territorio per il quale si vuole valutare la pericolosità sismica. Basta ad esempio la presenza di una copertura detritica di alcuni m di spessore perché vi sia la possibilità che, in caso di terremoto, si verifichino degli effetti locali di amplificazione dello scuotimento e che quindi la pericolosità sismica locale risulti più alta della pericolosità di base.

Attraverso valutazioni quali-quantitative è possibile stimare localmente il potenziale d'incremento dello scuotimento utilizzando le stesse grandezze (PGA, Spettro di risposta elastico, Intensità di Housner o intensità spettrale SI) e quindi calcolare l'eventuale fattore di amplificazione, rapportando il risultato ottenuto con quello del sito di riferimento al quale viene attribuita la pericolosità di base (ad es. attraverso i rapporti PGA/PGA_0 , SI/SI_0 , ...).

Il fattore di amplificazione non è quindi altro che il valore del rapporto tra la grandezza che esprime la pericolosità al sito (comprensiva quindi degli effetti locali) e il valore attribuito al sito di riferimento e cioè quello definito dalla pericolosità di base.

Nella progettazione e nella pianificazione territoriale la pericolosità di base (o pericolosità regionale), essendo un parametro che non può essere modificato perché dipende solamente dalla sismicità naturale dell'area, può essere tenuta in considerazione a livello delle prescrizioni normative. Essa è infatti quasi sempre applicabile su area vasta (territorio comunale o una grande sua parte) senza differenze particolarmente marcate all'interno di settori anche molto estesi. Si tratta,

⁷ Suolo di tipo A (DM 17.01.2018).

di fatto, di un dato da assumere tal quale nella progettazione.

I risultati dell'analisi della pericolosità locale, proprio perché indirizzati a riconoscere quelle situazioni territoriali o di sito per le quali la pericolosità sismica si discosta dal valore regionale, possono invece essere presi come riferimento per guidare non solo gli orientamenti normativi e d'indirizzo per l'uso di un territorio, ma anche le scelte urbanistiche nonché quelle propriamente progettuali.

La pericolosità locale dipende infatti dalle caratteristiche del sito e può variare in maniera significativa in relazione al variare delle condizioni morfologiche e litologiche. Già a livello dell'intero territorio comunale è quindi spesso possibile riconoscere settori caratterizzati da pericolosità locale diverse (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica o MOPS).

3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DEL TERRITORIO DEL COMUNE DI SAN CESARIO SUL PANARO

3.1. Inquadramento tettonico e strutturale

Dal punto di vista geologico il territorio comunale si colloca nella fascia pedappenninica e, più in particolare, nella medio-alta pianura modenese, a ridosso della prima fascia collinare (posta pochi chilometri più a sud del confine comunale). A San Cesario non s'individua la presenza di rocce e/o sedimenti di ambiente marino in superficie, ma solo nelle perforazioni profonde. I più vicini affioramenti di rocce marine, Argille Azzurre Plioceniche e altre formazioni più antiche, sono osservabili alcuni chilometri più a sud (comuni di Vignola e Savignano sul Panaro) sia nell'alveo del Fiume Panaro che nelle colline. Nell'alveo fluviale, presso Savignano, le Argille Azzurre plioceniche affiorano per via dell'erosione, al di sotto dei sedimenti recenti fino all'incirca all'altezza della località Mulino, circa 3-4 km a sud del territorio di San Cesario. Procedendo invece verso nord il tetto dei depositi marini s'approfondisce rapidamente oltre i 100 m dal p.c., rimanendo ricoperti da una spessa successione di depositi continentali (Figura 14, Figura 15 e Figura 16).

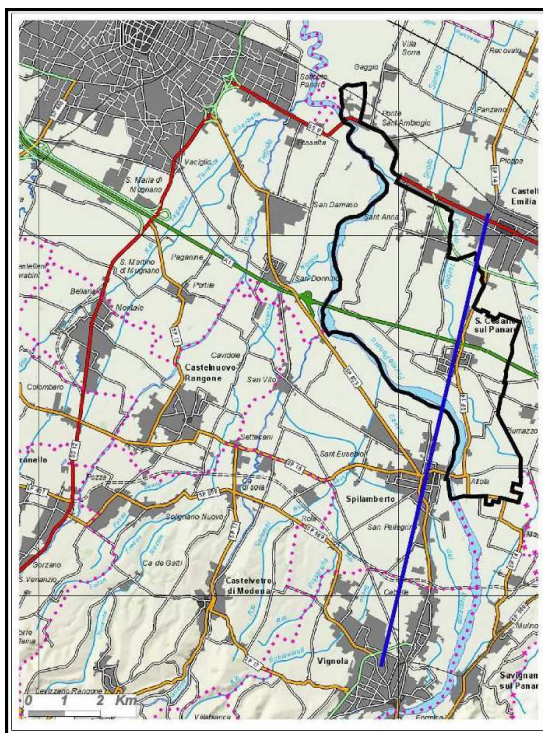


Figura 14 – Comune di San Cesario (perimetro in nero), inquadramento territoriale. (Base cartografica estratta e ridotta con inserti grafici da provincia di Modena, Carta del territorio, scala originale 1:100.000). La linea blu indica la traccia della Sezione Geologica di cui alla Figura 14.

A scala regionale, l'architettura stratigrafica dei depositi continentali della pianura emiliano-romagnola viene descritta per mezzo della stratigrafia sequenziale e delle unità a limiti inconformi⁸ (*unconformity bounded units*) (Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1997).

I depositi del così detto Quaternario continentale della pianura emiliano-romagnola sono stati raggruppati dai geologi della Regione Emilia-Romagna (Figura 15 e Figura 16) in un unico *Supersintema emiliano romagnolo*, il cui limite inferiore affiora solamente a ridosso del margine appenninico oppure nelle aree intravallive collinari (Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1998).

A sua volta il *Supersintema emiliano romagnolo* è stato suddiviso in due sintemi:

- *Sintema emiliano-romagnolo inferiore*, che comprende le unità stratigrafiche di ambiente continentale, sedimentate all'incirca tra 650 mila e 350/450 mila anni fa, indicato con la sigla cartografica AEI;
- *Sintema emiliano-romagnolo superiore*, comprendente i depositi continentali da 350/450 mila anni fa fino al presente, indicato con la sigla cartografica AES, i cui termini superiori (subsintema di Ravenna-AES8 e subsintema di Villa Verucchio-AES7) affiorano o comunque s'incontrano negli scavi e nelle perforazioni, a relativamente bassa profondità anche nel Comune di San Cesario (Figura 15).

Come già accennato in precedenza, i terreni marini, sottostanti i depositi continentali, sono costituiti principalmente dalle Argille Azzurre (argille marnose e/o sabbiose grigio bluastre con orizzonti fossiliferi e livelli o orizzonti anche importanti di sabbie, del Pliocene medio-superiore), che comunque non affiorano nel territorio comunale, ma si trovano a profondità generalmente superiori ai 100-150 m rispetto il p.c (in aumento procedendo da sud verso nord: Figura 15).

⁸ Unità stratigrafiche delimitate alla base e al tetto da superfici di discontinuità dimostrabili, significative e specificamente designate (discordanze angolari, disconformità, ecc.), di estensione regionale, o comunque significativa a scala subregionale.

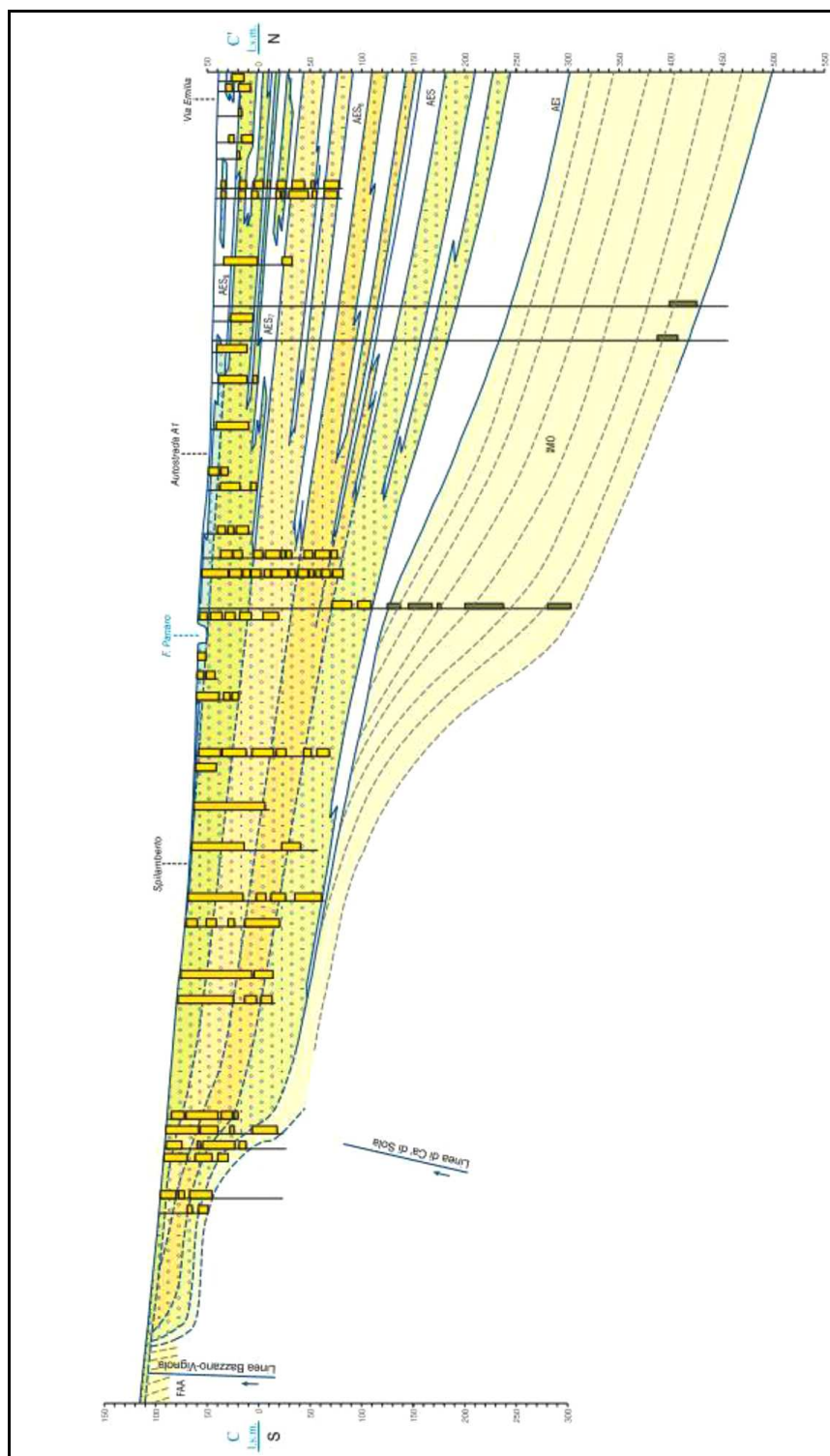


Figura 15 – Sezione geologica da Vignola a Castelfranco Emilia (da sito web cartografico della Regione Emilia-Romagna, Ufficio Geologico, Sismico e dei Suoli); non in scala. Sigle principali: AES8: subsintema di Ravenna; AES7b: subsintema di Villa Verucchio, Unità di Vignola; AES7a: subsintema di Villa Verucchio, unità di Niviano; AES6: Subsintema di Bazzano; AES: Sintema emiliano-romagnolo superiore (indifferenziato); AEI: Sintema emiliano-romagnolo inferiore; IMO: Sabbie di Imola (Quaternario marino); FAA: Argille Azzurre (Pliocene marino). Per gli altri simboli si veda la Figura che segue (Figura 16).

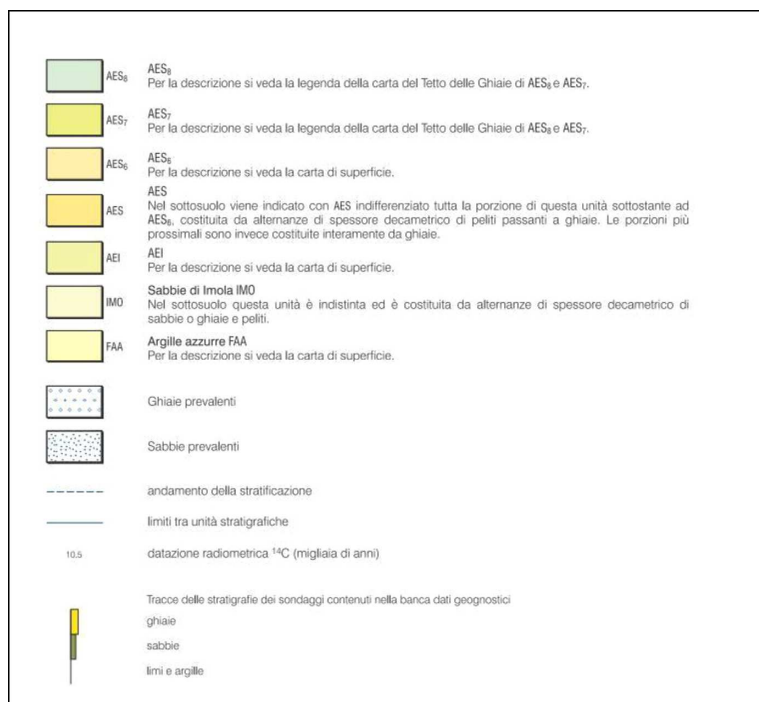
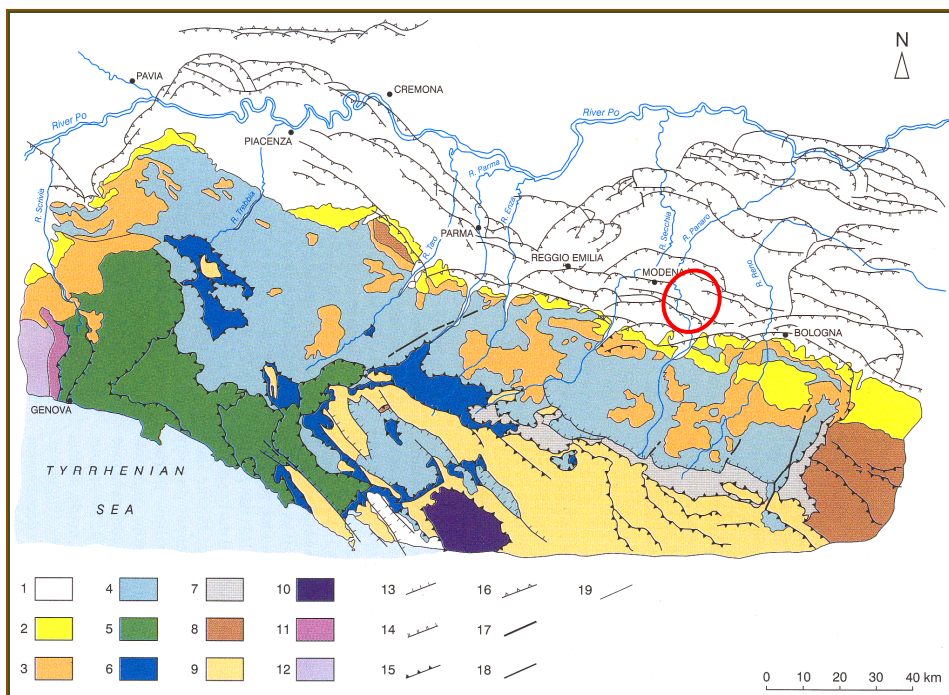


Figura 16 – Legenda della Sezione Geologica riportata nella Figura precedente. Legenda stratigrafica: AES8: subsistema di Ravenna (AES8a:Unità di Modena); AES7:subsistema di Villa Verucchio (AES7b: unità di Vignola; AES7a:Unità di Niviano); AES6:subsistema di Bazzano; AES: Sintema emiliano-romagnolo superiore indifferenziato ma distinto da AES6, AES7 e AES8; AEI: Sintema emiliano-romagnolo inferiore.



La catena appenninica (considerando sia la sua parte emersa che quella sepolta nel sottosuolo padano) è attualmente ancora in evoluzione, come mostrano con la loro attività sismica le strutture tettoniche (Figura 17 e Figura 18) che hanno controllato la sedimentazione nel bacino padano, dislocando (mentre venivano depositati i sedimenti) anche le unità marine plio-pleistoceniche (che affiorano nei pressi del margine pedecollinare o sono state individuate nelle perforazioni in pianura) e i depositi continentali del Pleistocene, che affiorano principalmente nelle valli o che formano il sottosuolo della pianura.

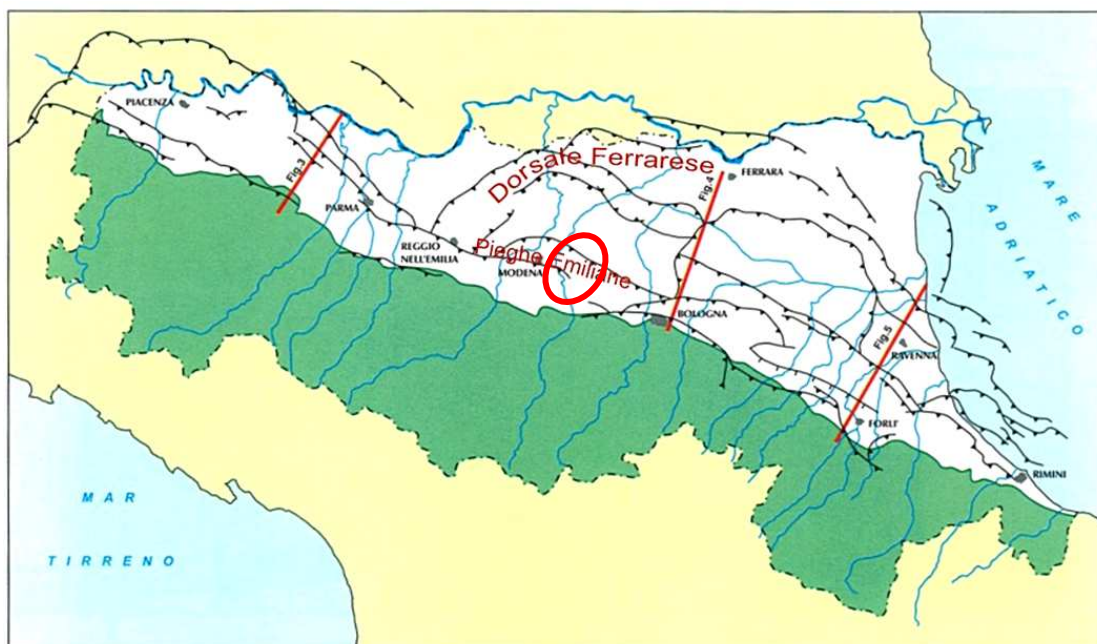


Figura 18 – Principali strutture sepolte della Pianura Emiliano-Romagnola. (Estratto con modifiche da Regione Emilia-Romagna, Eni-Agip, 1998). L'ovale a bordo rosso indica il territorio di San Cesario.

Tale attività sismogenetica si localizza in settori specifici della catena montuosa (Martelli, 2011):

- 1) nell'alto Appennino, soprattutto in corrispondenza del crinale principale;
- 2) nel basso Appennino, principalmente nell'area pedemontana;
- 3) in pianura, in corrispondenza delle strutture tettoniche sepolte (così dette Pieghe Emiliane e Pieghe Ferraresi) (Figura 18, Figura 19 e Figura 20) fino a nord del fiume Po.

Dati geologici, morfologici e strutturali mostrano che il settore romagnolo dell'Appennino Settentrionale (a est della Linea del Sillaro) risulta più sollevato rispetto al settore emiliano (Martelli, 2011).

I dati gps confermerebbero l'attuale sollevamento differenziale della catena in

diminuzione relativa da est verso ovest⁹ (Martelli, 2011).

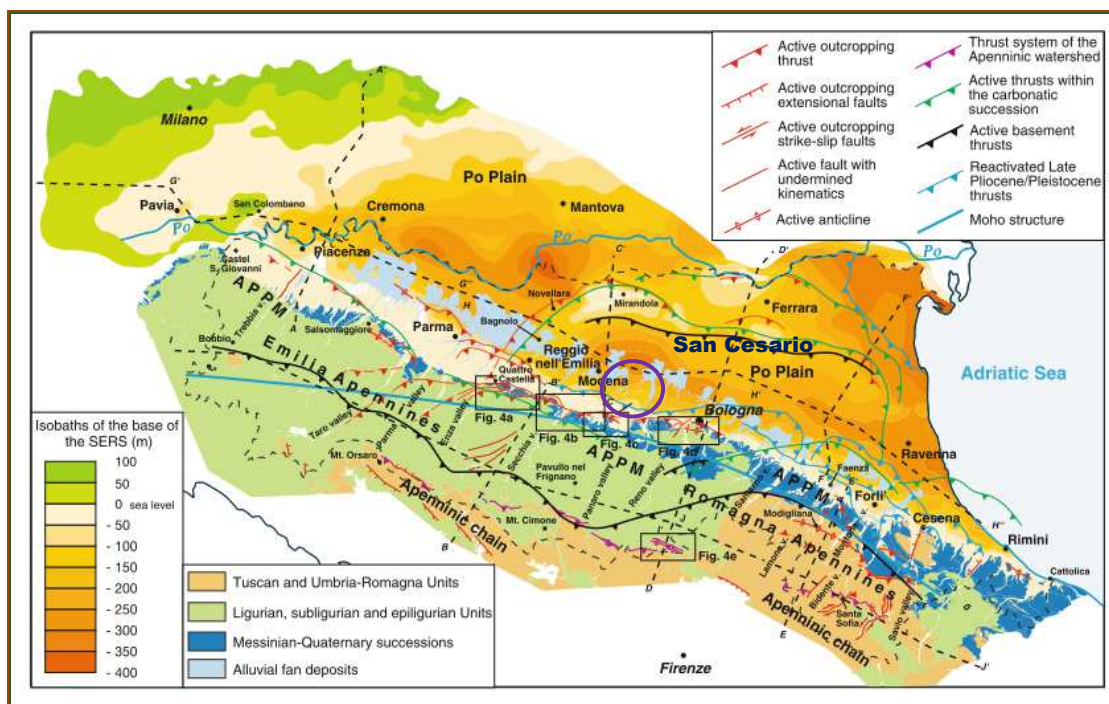


Figura 19 – Strutture tettoniche attive del settore padano dell'Appennino Settentrionale (estratto da Boccaletti et al., 2011 con inserimento grafico).

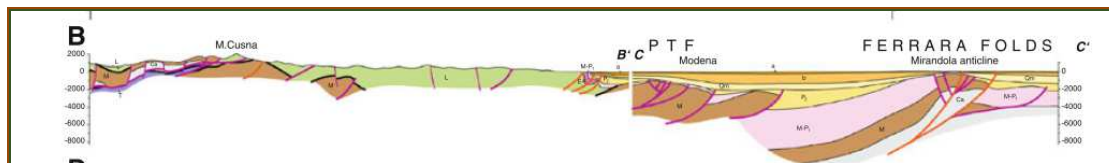


Figura 20 – Sezioni geologiche attraverso l'Appennino Settentrionale fino a comprendere i settori sepolti della catena in Pianura Padana (per l'ubicazione si veda la Figura 18) (estratto da Boccaletti et al., 2011).

Nel settore di alta montagna (presso il crinale principale) i dati sismologici mostrano meccanismi focali sia di tipo estensionale che di tipo compressivo, con i primi localizzati a profondità relativamente basse (entro 12-15 Km) rispetto i secondi (generalmente oltre i 20 km) (Boccaletti et al., 2004 e 2010; Catalogo dei meccanismi dei terremoti mediterranei RCMT, <http://www.bo.ingv.it/RCMT/>).

La zona pede-appenninica è caratterizzata da meccanismi focali di tipo prevalentemente compressivo (Boccaletti et al., 2004; 2011) che si concentrano in una fascia nella quale le evidenze geologiche di attività tettonica sono piuttosto significative (dislocazione di depositi continentali, modifiche del reticolo idrografico, scarpate strutturali; ecc.) (Ghiselli e Martelli, 1997; Boccaletti et al., 2004; Boccaletti et al., 2011; Martelli, 2011). La stessa è riconducibile a un sistema di strutture di

⁹ Velocità di sollevamento crostale relativamente più alte per i settori orientali della catena (Martelli, 2011).

accavallamento che nel complesso formano il così detto *Fronte di Accavallamento Pedemontano* (*Piedmont Thrust Front*, Boccaletti et al., 1985).

Facendo riferimento ai vicini settori della Pianura Padana, dove le conoscenze geologiche profonde sono storicamente riconducibili agli studi per la ricerca petrolifera (Pieri & Groppi, 1981), si rileva che le strutture che mostrano maggiori dislocazioni recenti sono le *Pieghe Emiliane*, l'arco delle *Pieghe Ferraresi* e le *Pieghe Adriatiche* (Figura 17, Figura 18 e Figura 19) (Martelli, 2011), come confermato sia dalle recenti sequenze sismiche del 2012 (i cui effetti non hanno provocato danni nel territorio di San Cesario, ma con le scosse più forti che sono state chiaramente avvertite: Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23), sia da altri eventi sismici, anche forti e con magnitudo che ha raggiunto e/o superato il valore 5, avvenuti negli ultimi 30-40 anni (Figura 23).

Più in particolare, la sequenza sismica del maggio-giugno 2012 viene interpretata come causata dalla mobilitazione di due strutture di fronte di accavallamento tettonico, grossomodo parallele l'una all'altra (Figura 22) oppure come la mobilitazione in punti diversi (e anche a profondità diverse) della superficie di scollamento basale nella quale, secondo alcune interpretazioni, convergono tutti i fronti di accavallamento che nel loro complesso formano l'arco delle Pieghe Ferraresi (Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

Al di là delle diverse interpretazioni, la sequenza sismica del 2012 è la chiara evidenza dell'attuale attiva sismicità delle strutture sepolte della pianura emiliano-romagnola, le quali hanno condizionato non solo la deposizione sedimentaria durante il Pliocene¹⁰, ma probabilmente anche durante tutto il Pleistocene, fino ai giorni nostri, con effetti riscontrabili ad esempio sull'andamento del reticolo idrografico superficiale (Burrato et al., 2003).

È infatti ben noto, ad esempio, che il corso del Panaro in epoca preistorica e storica ha subito un progressivo spostamento da est verso ovest, tanto che nel territorio di San Cesario e in quello limitrofo di Castelfranco Emilia è possibile riconoscere e tracciare nel primo sottosuolo l'andamento di diversi paleoalvei composti da corpi nastriformi continui, e allungati secondo una direttrice circa S-N, SSO-NNE, formati prevalentemente da materiali grossolani: ciottoli e ghiaie in matrice limo-sabbiosa.

È da ascrivere a tale migrazione longitudinale dell'alveo principale del fiume la

¹⁰ La profondità della base dei depositi marini pliocenici presenta differenze di quota anche dell'ordine delle diverse migliaia di metri a seconda della posizione che si considera rispetto alle strutture tettoniche sepolte: in corrispondenza di una cresta di culmine risulta meno profonda rispetto alle zone di bacino.

presenza nel primo sottosuolo di corpi grossolani minori (prevalentemente sabbiosi), probabilmente riconducibili a ventagli di rotta, a barre di meandro e a strutture arginali secondarie il cui andamento appare di difficile definizione sia per la bassa densità dei dati a disposizione nelle aree di campagna, sia per le condizioni ambientali originarie piuttosto dinamiche (tracimazioni, rotte, salti di meandro, ecc.). Per tali motivi può capitare d'individuare un corpo sabbioso nel diagramma di una prova penetrometrica o di un sondaggio, senza rilevarne la presenza in indagini effettuate nelle immediate vicinanze.

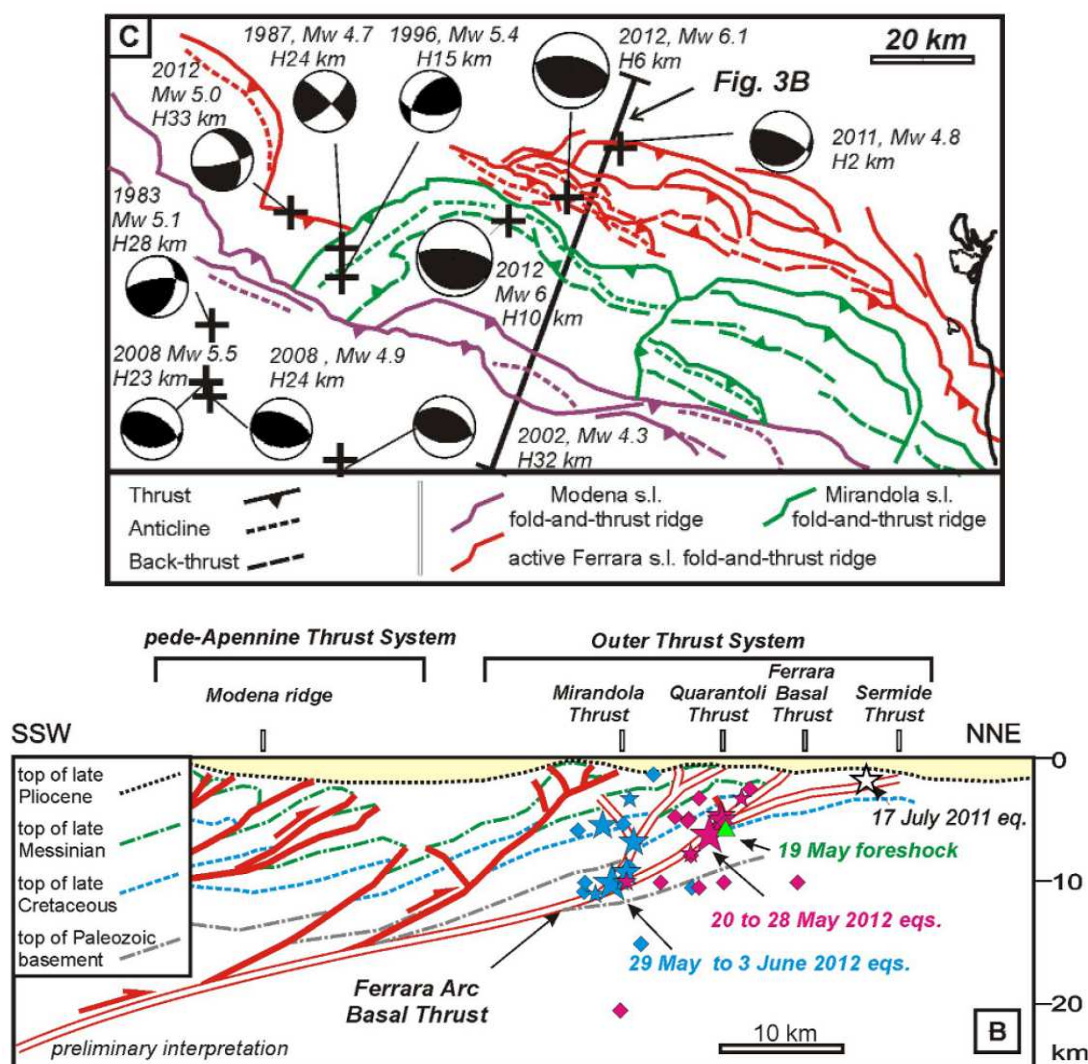


Figura 21 – Quadro sismotettonico della pianura emiliano-romagnola, con indicazione della posizione epicentrale e della risoluzione focale dei principali eventi sismici avvenuti negli ultimi decenni.

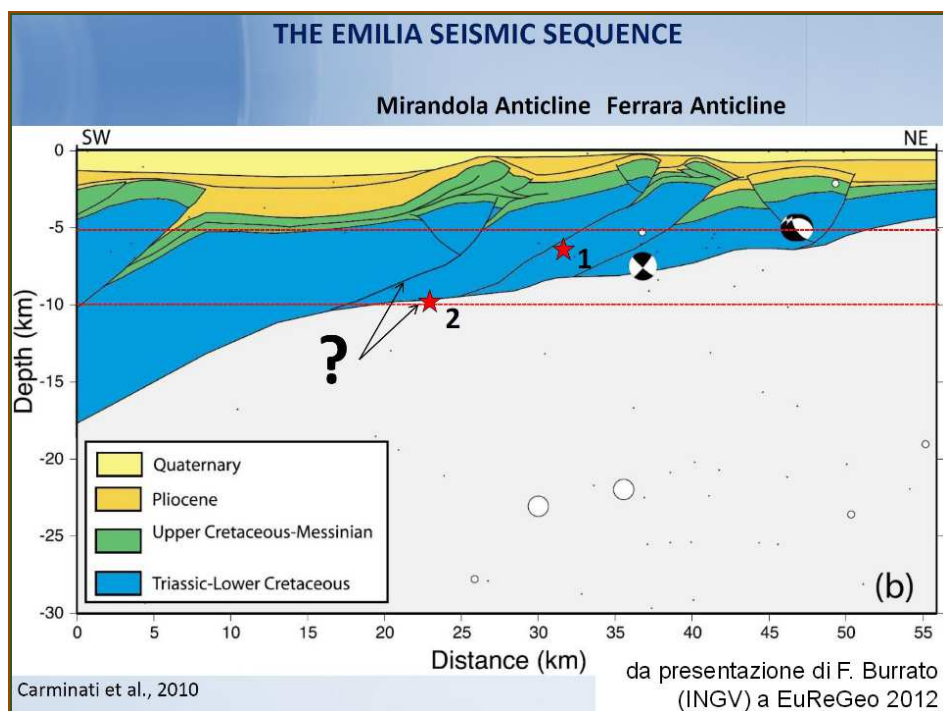


Figura 22 – Sezione geostrutturale attraverso la pianura emiliana orientale con indicata l'ubicazione dell'epicentro della scossa principale (1) del 20 Maggio 2012 non sulla superficie di scollamento basale ma su un fronte di accavallamento e che evidenzia i dubbi interpretativi relativi all'ubicazione della scossa principale (2) del 29 Maggio 2012.

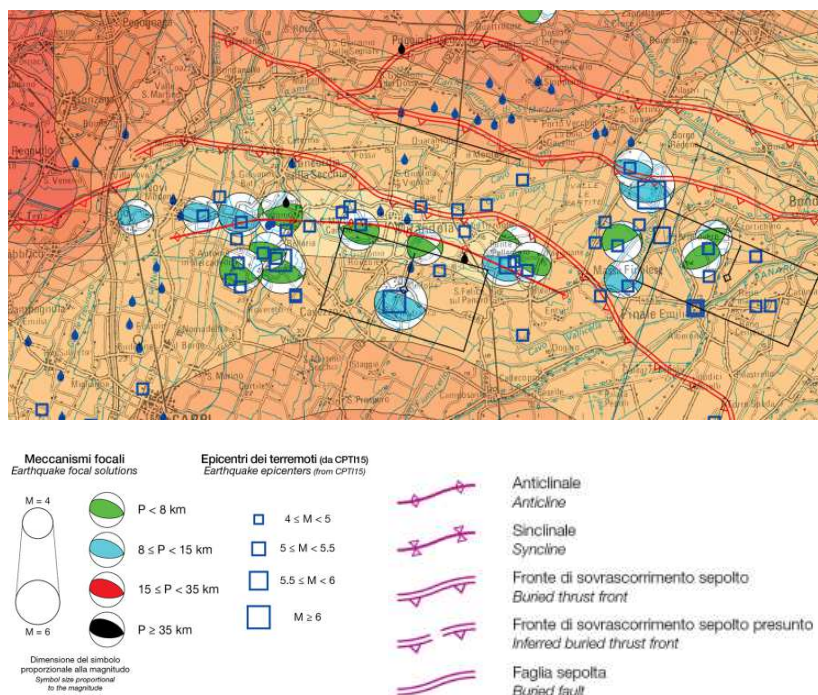


Figura 23 – Estratto da Martelli et al. (2017c)-“Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe.

La Figura 24 e la Figura 25 descrivono l'andamento delle principali strutture tettoniche sepolte che caratterizzano l'assetto geologico della pianura modenese, inquadrata a livello regionale come da Figura 17, Figura 18 e Figura 19. Sono

presenti principalmente strutture (pieghe e faglie) con andamento ONO-ESE/O-E (fronti principali) le cui rampe laterali (ad andamento generalmente SO-NE) si posizionano al di fuori dei confini provinciali (ad esempio la direttrice di collegamento tra Novi di Modena, e Reggio Emilia, passando per Correggio, che rappresenta la rampa laterale del sistema delle Pieghe Ferraresi). Tali strutture sepolte coinvolgono nella tettonogenesi e sismogenesi oltre che i livelli più profondi della copertura alluvionale quaternaria (la cui sedimentazione è stata controllata dai movimenti di tali strutture), soprattutto le formazioni marine antiche (plioceniche e pre-plioceniche).

Se si prende come riferimento la profondità del tetto dei sedimenti marini, che rappresenta lo spessore dei depositi continentali, si riconosce una morfologia sepolta a valli e dorsali orientata all'incirca secondo un andamento est-ovest. Tale morfologia è ancor più accentuata se si fa riferimento al tetto delle unità pre-plioceniche (Figura 24).

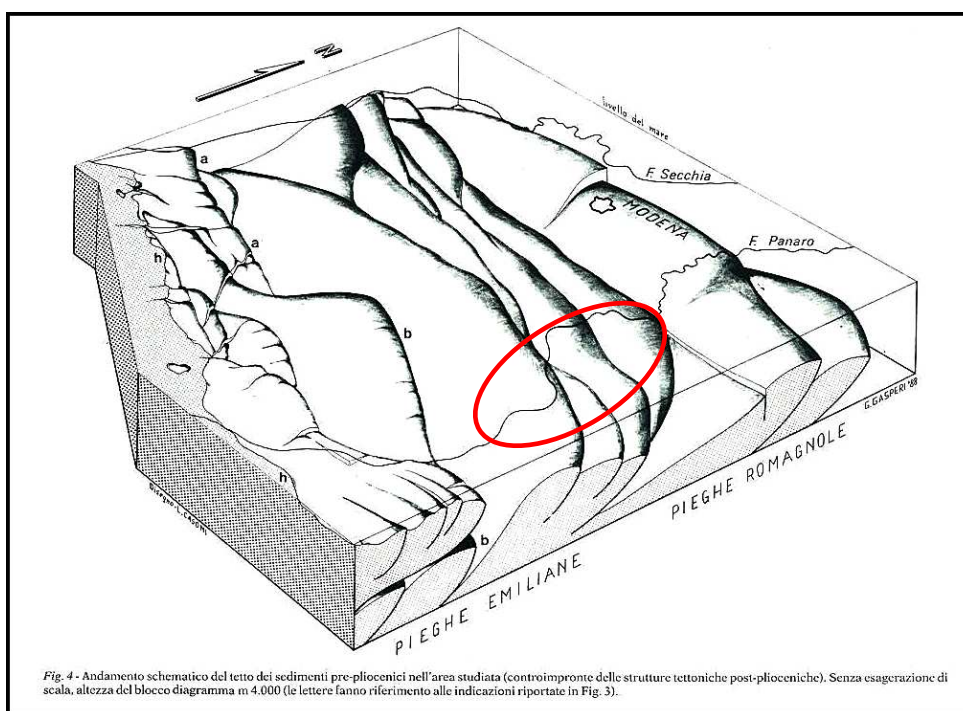


Figura 24 – Andamento schematico del tetto dei sedimenti pre-pliocenici. (Il cerchio rosso individua indicativamente la posizione del territorio di San Cesario) (Estratto da Gasperi et al., 1987).

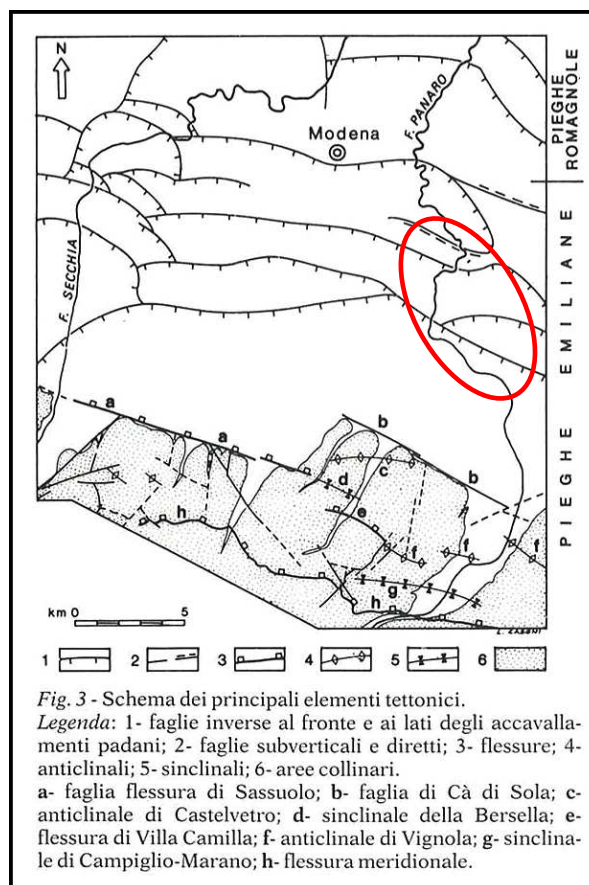


Figura 25 – Schema strutturale dell'alta pianura modenese (Il cerchio rosso individua indicativamente la posizione del territorio di San Cesario) (Estratto da Gasperi et al., 1987).

Si tratta per lo più di strutture ad andamento arcuato (in pianta) riconducibili a superfici di accavallamento lungo le quali si concentrano l'energia e la deformazione tettonica indotte, a scala regionale, dal movimento relativo di avvicinamento dell'Europa all'Africa, con la prima che tende a sottoscorrere alla seconda. Tale processo, che dura da decine di milioni di anni e che ha dato origine alle catene Alpina e Appenninica, è tutt'ora in corso, come evidenziato anche dalla sismicità collegata a tali strutture (ad es. terremoto del 1996 presso Correggio-Novellara, o, più recentemente, sequenza sismica del 2012 nella bassa pianura modenese e ferrarese).

3.2. Inquadramento stratigrafico-litologico

3.2.1. Stratigrafia

Come già accennato nel capitolo precedente, il primo sottosuolo del territorio comunale (Figura 15) è formato da depositi alluvionali ascrivibili al subsintema di Ravenna e al sottostante subsintema di Villa Verucchio.

Ne consegue che in affioramento, o negli scavi nel primo sottosuolo, si possono osservare solamente sedimenti di ambiente continentale relativamente recenti, riferibili al subsistema di Ravenna (Figura 26) o, in via subordinata, depositi fluviali in evoluzione confinati esclusivamente nell'alveo del Fiume Panaro.

Solo in alcuni scavi di cava e, localmente, nell'incisione fluviale sono osservabili ghiaie forse attribuibili al subsistema di Villa Verucchio che affiora più estesamente nell'area pedecollinare, poco più a sud del territorio comunale di San Cesario, tra Vignola, Spilamberto e Savignano sul Panaro.

3.2.1.1. *Subsistema di Villa Verucchio (Unità di Vignola)*

I terreni più antichi, osservati in scavi di cava sono (dubitativamente) attribuibili alla così detta unità di Vignola, i cui limiti inferiore e superiore sono rispettivamente datati grossomodo tra i 30.000/35.000 e gli 8.000/15.000 anni fa (note illustrative Fogli Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000: nn. 201, 202, 219, 220 e relative bibliografie).

L'unità è composta, nei settori di alta e media pianura, principalmente da ghiaie grossolane e da ciottoli fluviali sub-arrotondati in matrice clasto-sostenuta limosa e limo sabbiosa.

Per quanto riguarda San Cesario sul Panaro, l'unità è visibile in affioramenti limitati all'interno delle cave, ma spesso le ghiaie non sono distinguibili dai sovrastanti depositi del subsistema di Ravenna, soprattutto in assenza (o se non viene riconosciuto) del paleosuolo che solitamente è posto alla sommità dell'unità di Vignola e che indicherebbe un periodo di stasi nella sedimentazione.

Dal punto di vista stratigrafico, l'unità di Vignola costituisce la porzione sommitale del subsistema di Villa Verucchio.

3.2.1.2. *Subsistema di Ravenna*

Pressoché tutti i depositi sedimentari affioranti o sub affioranti nel territorio in esame sono da attribuire a tale unità (Figura 15 e Figura 26) la cui sedimentazione è riconducibile principalmente ad ambienti di piana inondabile.

Essa comprende sedimenti, prevalentemente fini, nella bassa e media pianura; grossolani, nell'alta pianura e nei fondivalle collinari, depositi durante il periodo dell'ultimo postglaciale, al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso riferibile all'unità di Vignola.

Nel subsistema di Ravenna si distingue un'unità superficiale (Unità di Modena) formata dai sedimenti di deposizione post-romana, distinguibile, soprattutto nella

media-bassa pianura, per la presenza in posizione immediatamente sottostante di un paleosuolo (di età romana) che nei diagrammi delle prove penetrometriche viene segnalato da un incremento repentino dei valori di resistenza alla punta.

L'unità è formata principalmente da depositi fini che ricoprono i sottostanti depositi grossolani. Tali materiali fini presentano spessori variabili da pochi metri a quasi assenti nei settori a sud del capoluogo fino a oltre una decina a nord dell'autostrada.

Come detto, a sud dell'autostrada e, localmente a nord in corrispondenza di paleoalvei del Panaro, i depositi superficiali fini presentano uno spessore limitato, da quasi assenti fino a circa 5 m e ricoprono terreni ghiaioso-ciottolosi e subordinatamente sabbiosi, indicativi di ambienti di canale, argine o rotta fluviale ad alta energia, anch'essi ascrivibili al subsistema di Ravenna.

Lo spessore complessivo dell'unità è variabile da pochi metri fino anche a 20 m (zona della Graziosa dove si sovrappone alle ghiaie della sottostante unità di Vignola).

Per quanto riguarda l'unità di Modena, non vi sono grosse differenze, a livello litologico, con la generalità del subsistema di Ravenna. La si individua principalmente su base morfologica (attraverso l'andamento del microrilievo) e per la posizione (lungo una fascia sub parallela e prospiciente al corso attuale del fiume (Figura 26) a testimoniarne l'attuale posizione acquisita sostanzialmente dopo l'epoca romana) oppure, come già accennato, è riconoscibile nel sottosuolo per la presenza alla base di un orizzonte sovraconsolidato (paleosuolo romano).

L'unità di Modena comprende i sedimenti di deposizione recente (post sesto secolo d.C.) e pertanto costituisce la parte stratigraficamente più alta e più recente, spesso subaffiorante, del subsistema di Ravenna, la cui porzione basale viene invece indicativamente riferita all'Olocene (post-glaciale: 10000-12000 anni b.p.).

3.2.1.3. Depositi attuali in evoluzione

Nell'alveo del fiume Panaro sono presenti sedimenti fluviali in evoluzione ghiaiosi a sud, più fini (limoso sabbioso argillosi) nella porzione settentrionale del tratto fluviale che delimita a ovest il territorio comunale.

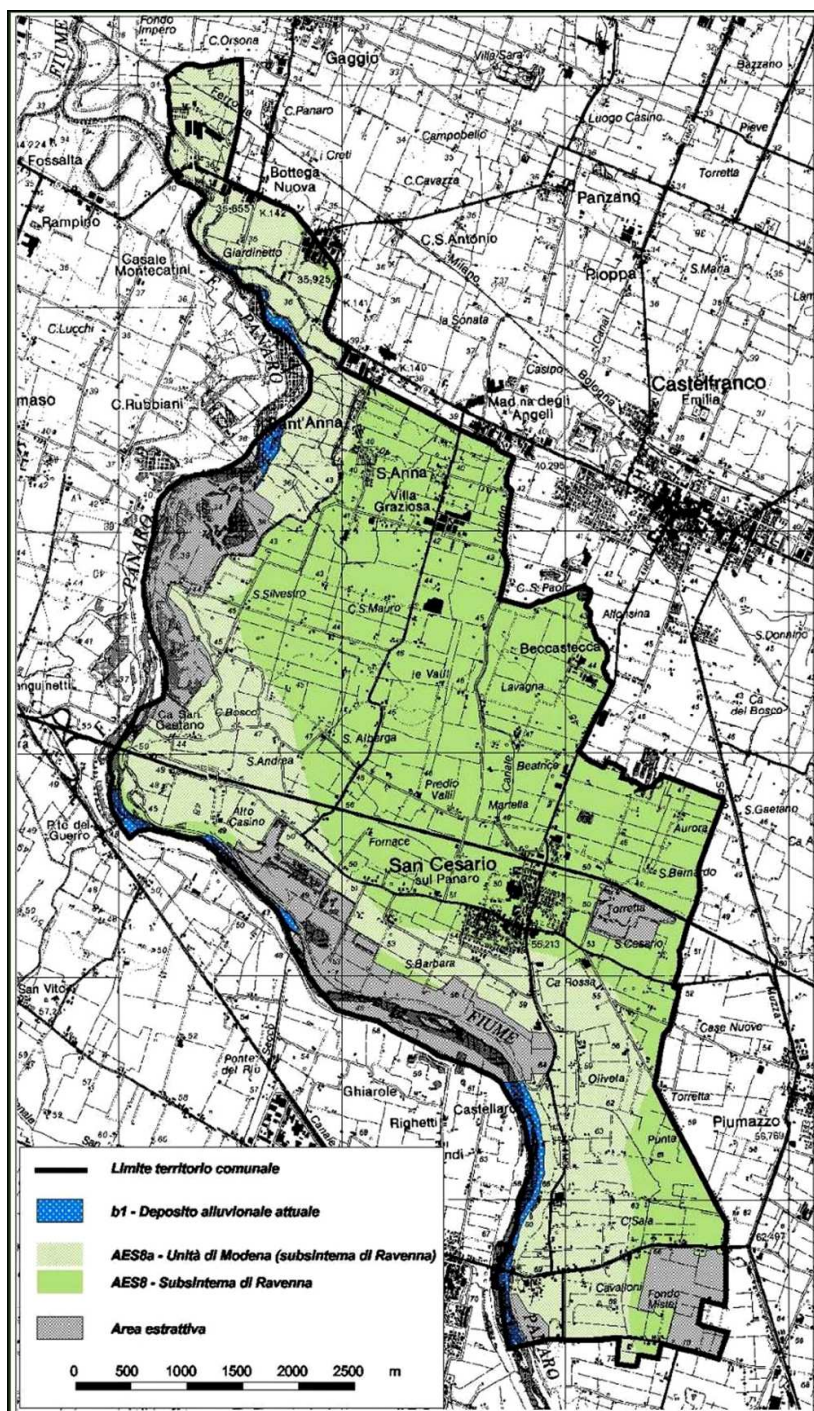


Figura 26 – Carta geologica del comune di San Cesario sul Panaro (unità affioranti o sub affioranti della copertura olocenica). (Basato sui dati della carta geologica regionale desumibili dal sito web cartografico e dal catalogo dei dati cartografici della Regione Emilia-Romagna - Ufficio Geologico Sismico e dei Suoli; Base topografica: estratto da carta topografica alla scala 1:50.000).

La deposizione di materiali fini si verifica attualmente anche all'interno dell'area delle casse di espansione fluviale di Sant'Anna, in occasione delle piene principali che comportano un apporto torbido di materiali limo-argillosi e sabbiosi che, per gran parte, decanta all'interno dei laghi prima che l'acqua in eccesso defluisca verso il

fiume.

Attraverso l'analisi interpretativa di dati stratigrafici derivanti da prove penetrometriche e stratigrafie di pozzi e sondaggi, e per mezzo della realizzazione di alcune sezioni geologiche (cfr. tavole fuori testo), è stato possibile tracciare a grandi linee l'andamento delle principali unità stratigrafiche del primo sottosuolo del territorio comunale di San Cesario (indicativamente fino a profondità di 50-100 m).

Si possono pertanto distinguere tre settori:

- un settore meridionale, a sud dell'autostrada;
- un settore centrale, tra l'autostrada e la Via Emilia;
- un settore settentrionale, a nord della Via Emilia.

Il settore sud è caratterizzato da un primo sottosuolo a composizione prevalentemente ghiaiosa e ciottolosa (Figura 27). I depositi grossolani sono ricoperti da un sottile strato di suolo e/o di terreni limosi che possono raggiungere anche i 3-5 m di spessore, ma che in generale sono dell'ordine di 1-2 m.

Tale prima bancata ghiaiosa supera i 10-15 m di spessore e, verso fiume, può anche raggiungere i 20-25 m, laddove è formata dall'amalgamazione dei depositi ghiaiosi recenti (unità di Modena del subsistema di Ravenna) con altri più antichi (persino con quelli dell'unità di Vignola del subsistema di Villa Verucchio). Le ghiaie e i ciottoli formano pertanto un grosso corpo, lateralmente esteso e continuo, delimitato alla base da un banco argilloso e argilloso-limoso plurimetrico non ovunque continuo, soprattutto verso fiume.

Alcune stratigrafie di pozzi (che per imprecisioni descrittive e di nomenclatura sono ritenute non pienamente affidabili) indicano ghiaie superficiali con spessori fino a 40-50 m, in contrasto tuttavia con altri dati vicini che ridurrebbero a circa la metà lo spessore complessivo dei depositi grossolani superficiali. Al di sotto del primo banco argilloso (che, ove presente, è posto alla base delle ghiaie superficiali), nel settore meridionale del territorio comunale s'individua un secondo orizzonte ghiaioso (attribuibile alla così detta unità di Vignola del subsistema di Villa Verucchio). Il suo spessore è valutato (da sezioni geologiche interpretative) in circa 10-20 m, con base posta a circa 50 m dal p.c.

Scendendo in profondità la successione prosegue con un orizzonte prevalentemente pelitico (Unità di Niviano del subsistema di Villa Verucchio) sovrastante depositi grossolani attribuibili al subsistema di Bazzano (suddivisi in almeno due orizzonti plurimetrici separati da un banco pelitico) la cui base si attesterebbe alla profondità di circa 70-80 m dal p.c.

Nel settore centrale del territorio comunale, pur distinguendo la medesima

successione di unità stratigrafiche appena descritta per il settore meridionale, si verificano alcune variazioni significative a livello litologico. Il tetto del primo orizzonte ghiaioso tende a posizionarsi a una profondità compresa tra i 5 e i 15 o più metri dal p.c., al di sotto di una copertura superficiale plurimetrica di peliti argilloso-limose. Le ghiaie presentano poi uno spessore di diversi metri, variabile lateralmente, e sovrastano un secondo banco plurimetrico di argille, posto al di sopra delle ghiaie dell'Unità di Vignola, la cui base si posiziona a circa 30-35 m dal p.c. Il resto della successione è simile a quella descritta per il settore meridionale, se non che aumentano le profondità delle diverse unità con la base dell'unità di Niviano a circa 50 m dal p.c. e la base delle ghiaie del subsistema di Bazzano a circa 80-90 m dal p.c.).

Minori informazioni dirette si hanno sulla stratigrafia del settore settentrionale. Qui i terreni pelitici superficiali presentano spessori pluridecametrici, con i depositi grossolani dell'unità di Vignola che hanno uno spessore di pochi metri posizionandosi a tra i 27-30 e i 31-33 m dal p.c. Essi sono in parte ghiaiosi, ma tendono a passare verso nord a depositi sabbiosi, all'incirca in corrispondenza del confine comunale nord. Al di sotto delle ghiaie dell'unità di Vignola è presente un banco plurimetrico di peliti (dubitativamente attribuito nelle sezioni all'unità di Niviano), il quale sovrasta i depositi grossolani del subsistema di Bazzano che qui presentano uno spessore ridotto a pochi metri e anch'essi passano da ghiaiosi a sabbiosi all'incirca nei pressi dell'estrema propaggine nord del territorio comunale. Circa a 40 m di profondità i dati stratigrafici indicherebbero la presenza di una potente successione pelitica (parte inferiore del subsistema di Bazzano) con base posta oltre i 90 m dal p.c. a sovrastare un altro banco ghiaioso plurimetrico.

* * *

Degna di nota è la segnalazione della locale presenza di strati sabbiosi entro le sequenze prevalentemente pelitiche che sovrastano il primo orizzonte ghiaioso, nel settore centrale del territorio comunale. La maggioranza dei dati disponibili si concentra tuttavia nelle aree urbanizzate (località di "La Graziosa" e "Sant'Anna"), mentre per i settori di "campagna" sono disponibili solo poche informazioni sparse.

Per quanto riguarda le aree urbanizzate, la presenza di sabbie entro profondità di 10-15 m, suggerita dai diagrammi penetrometrici, parrebbe avere significatività locale. È infatti dubbia l'effettiva continuità laterale degli orizzonti sabbiosi. A diagrammi penetrometrici che segnalano la presenza di strati sabbiosi, anche di spessore metrico, se ne accompagnano infatti altri nei quali la presenza di sabbie non è per nulla evidente, nonostante siano riferiti a prove eseguite nelle immediate

vicinanze (spesso nel medesimo lotto d'intervento edilizio).

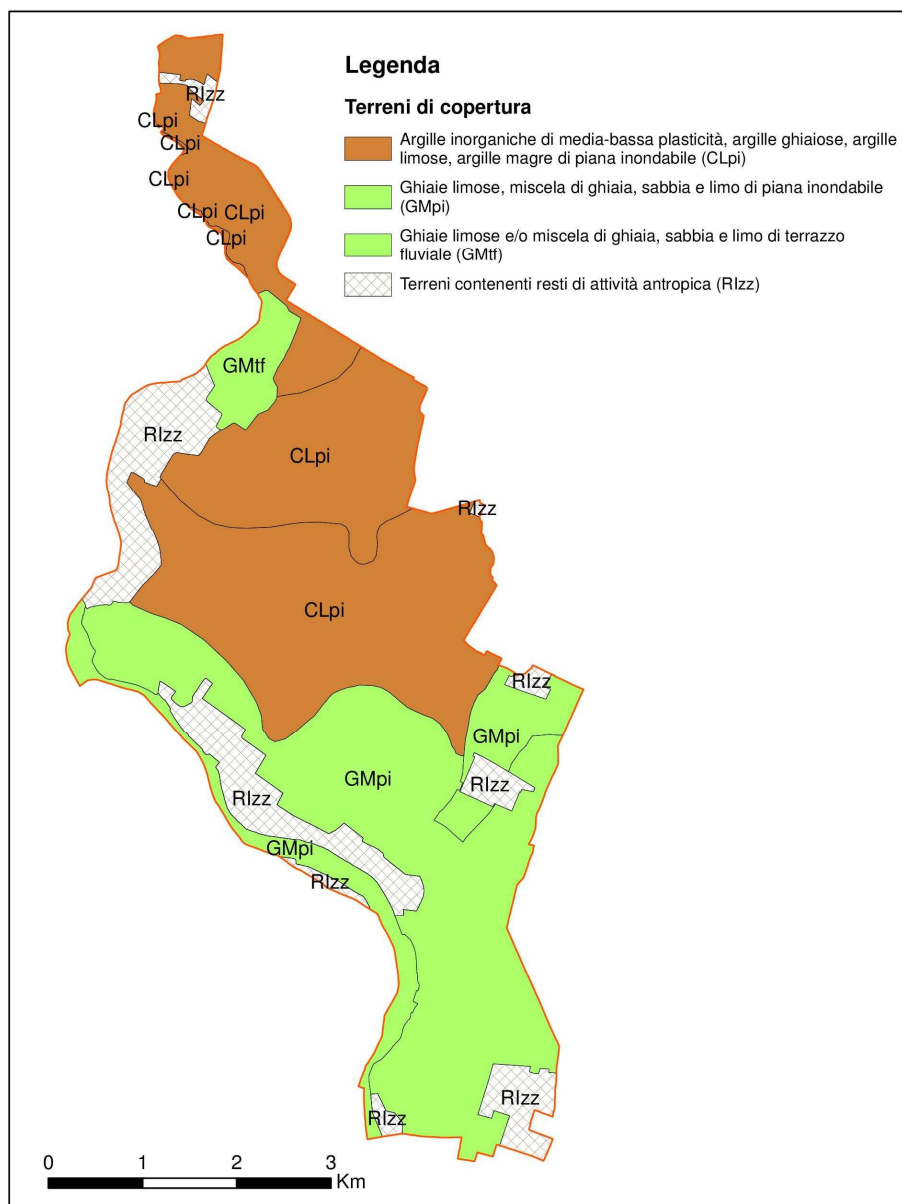


Figura 27 - Carta Geologico-Tecnica (ridotta e semplificata dalla tavola omonima).

L'analisi di facies dei diagrammi penetrometrici (secondo la metodologia di Campo et al., 2023 che prende in considerazione i tipici parametri rilevati durante le indagini CPTU: Qc, fs, U e FR%) indicherebbe che tali corpi sabbiosi non sarebbero riferibili ad ambienti di canale (*fluvial-channel facies*), ma piuttosto a depositi di tracimazione o di rotta (*crevasse/leeve facies*) (Figura 28).

Tale interpretazione giustificerebbe anche la non continuità laterale degli orizzonti sabbiosi, trattandosi appunto di sedimenti rilasciati da un flusso non canalizzato la cui energia si ridurrebbe fortemente entro distanze brevi dal canale

fluviale.

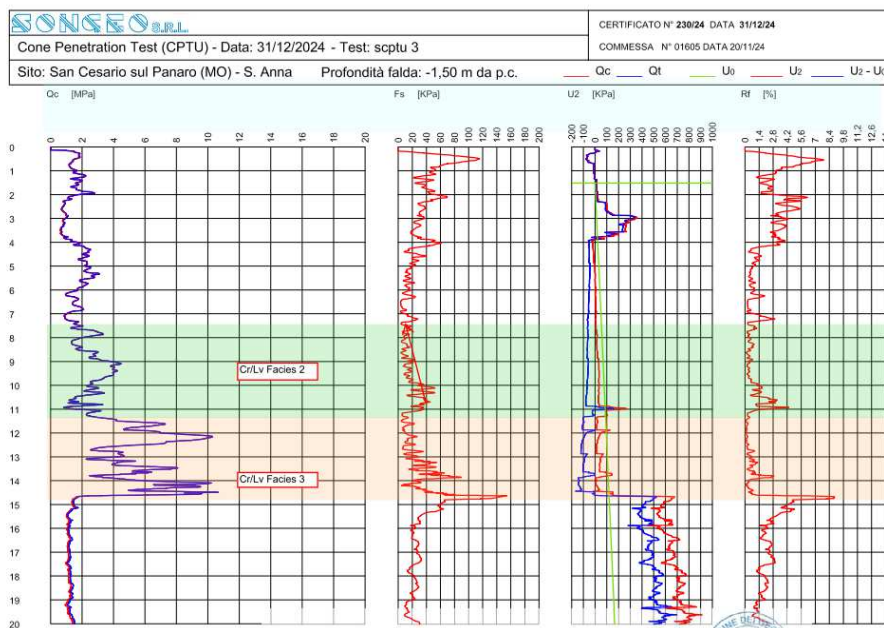


Figura 28 – Località Sant'Anna, prova 036036P568CPTU570: l'analisi di facies dei corpi sabbiosi (metodologia proposta da Campo et al., 2023) li attribuirebbe a depositi di rotta e/o tracimazione.

3.3. Inquadramento morfologico

Il territorio comunale è complessivamente pianeggiante. I valori di acclività sono mediamente molto contenuti: 0,05-0,1 gradi nei settori nord e un po' più alti, dell'ordine di 0,1-0,3 gradi, a sud del capoluogo.

I bassi valori del gradiente topografico comportano l'assenza di morfologie rilevanti a parte alcune situazioni locali, tutte di origine artificiale con l'esclusione del Fiume Panaro, quali: le Casse di Espansione del fiume Panaro, gli scavi di cava e il rilevato dell'autostrada A1 (Milano-Bologna-Roma).

Come detto, con l'eccezione del fiume (che comunque presenta un corso non pienamente naturale), le forme del paesaggio attuali e la loro evoluzione sono fortemente collegate alle trasformazioni umane piuttosto che agli agenti morfogenetici naturali e, in ogni caso, i dislivelli topografici non sono mai molto pronunciati, come normalmente atteso in aree di pianura.

Il Fiume Panaro, ad esempio, scorre ribassato rispetto la campagna circostante, in un alveo che per gran parte è bordato da muri in calcestruzzo, così detti *muraglioni*. Tali manufatti furono realizzati nel secolo scorso per finalità di difesa idraulica, in un'epoca durante la quale il livello medio del fiume era più elevato di quanto non lo sia attualmente. Tali strutture in calcestruzzo, che spesso manifestano i segni del tempo, sono ora pensili rispetto l'alveo fluviale, tanto che la loro funzione

originaria non è più in essere.

Il fiume, in tempi più recenti, è andato soggetto ad inalveamento pronunciato dopo la realizzazione della traversa tra Altolà e Spilamberto, realizzata a difesa del ponte stradale, ma che ha determinato la formazione di un salto idraulico e la conseguente erosione accelerata a valle, con la quota d'alveo che si è abbassata di diversi metri.

Le casse di espansione e le altre aree estrattive rappresentano invece settori di estensione ragguardevole per il territorio di San Cesario, dove l'escavazione di materiali inerti, nonostante gli interventi di ripristino finale, ha comportato la sostanziale modifica del paesaggio con la formazione di ampie depressioni (profonde fino a dieci metri) in un areale che altrimenti sarebbe stato pianeggiante.

Anche l'autostrada A1 può essere considerata come un elemento del paesaggio di origine artificiale che ne ha modificato i caratteri naturali, sia a livello morfologico che idraulico nonché visuale.

Con tali premesse ne deriva che solamente in corrispondenza della regione fluviale, delle casse di espansione, del rilevato autostradale e del canal torbido, nonché nelle aree di cava e di ex-cava, si può riscontrare la presenza di elementi morfologici che determinano passaggi di quota localmente bruschi (scarpate) o declivi, sempre comunque su dislivelli dell'ordine di pochi metri, mentre tutto il restante territorio comunale è da considerare pianeggiante, tanto che anche le tracce di alcuni paleoalvei del Panaro sono forme mal percettibili sul terreno, individuabili solo a livello interpretativo (analisi del microrilievo) o soprattutto attraverso la mappatura dei sedimenti grossolani presenti in superficie o nel primo sottosuolo.

4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Per la realizzazione dello studio di aggiornamento della microzonazione sismica ci si è avvalsi dei dati geologici e sismici ricavati da varie fonti che sono stati raccolti allo scopo di integrare e aggiornare la banca dati presente nella MS2014 e che, per gran parte, sono stati forniti dallo stesso Comune di San Cesario attraverso i file delle relazioni geologico geotecniche e sismiche allegate alle pratiche edilizie realizzate dopo il 2014.

La Banca dati contiene all'incirca 640 dati puntuali e lineari:

- 247 prove penetrometriche statiche (CPT);
- 8 prove penetrometriche statiche, punta elettrica e piezocono (CPTU) e una con punta elettrica (CPTE);
- 36 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL);
- 8 prove penetrometriche dinamiche medie (DN);
- 41 prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP);
- 13 prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DS);
- 74 stratigrafie di pozzi per acqua (PA);
- 25 stratigrafie di sondaggi a carotaggio continuo (S);

Si aggiungono poi 5 stratigrafie di trincee e pozzetti esplorativi e diverse indagini geofisiche tra le quali:

- 38 rilievi sismici attivi in onde di superficie, componente verticale, (MASW) dei quali 6 combinati ciascuno con un rilievo sismico passivo con antenna sismica 2D (ESAC);
- 6 prove SCPTU (cono sismico) realizzate in corrispondenza di sei delle CPTU;
- 6 rilievi passivi in onde di superficie, componente verticale, (REMI);
- 15 rilievi sismici attivi a rifrazione (SR);
- 15 sondaggi elettrici verticali (SEV);
- 108 misure di rumore ambientale a stazione singola (HVSr).

Per una visione d'insieme della localizzazione e distribuzione delle singole prove geognostiche e indagini geofisiche si rimanda alla consultazione della carta specifica (Carta delle Indagini) nella quale è indicata la localizzazione di ogni singolo dato puntuale e/o lineare.

Tutte le prove (geognostiche e geofisiche) sono state raccolte in un data base informatico organizzato sulla base dello schema di struttura dati secondo lo standard stabilito dalla Protezione Civile (versione 4.2).

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

È stata condotta un'analisi comparata delle informazioni stratigrafiche, litologiche, sedimentarie, geognostiche e geofisiche deducibili:

- dalle carte e dalle sezioni geologiche disponibili (ad esempio, le informazioni reperibili sui vari siti web tematici curati dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna: sito della carta geologica, sito delle sezioni geologiche, sito dedicato all'idrogeologia, ecc.);
- da osservazioni puntuali occasionali (scavi, trincee, ecc.);
- dalle indagini geognostiche (prove penetrometriche, stratigrafie di pozzi e indagini geofisiche) contenute nella Banca Dati;
- dalle sezioni geologiche che sono riportate nella Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

Tale lavoro è stato condotto con lo scopo di definire un quadro interpretativo dell'architettura stratigrafica del sottosuolo del Comune di San Cesario, al fine d'identificare areali con caratteristiche simili e descrivibili attraverso il medesimo modello geologico-stratigrafico.

Le risultanze dell'analoga analisi condotta per la MS2014 sono state per gran parte confermate, ma, a causa dell'ampliamento della base di dati disponibili, sono state introdotte modifiche anche sostanziali sia nella delimitazione delle diverse MOPS sia nel loro numero. Ciò ha conseguentemente comportato alcune modifiche alla Carta delle MOPS che risulta quindi in parte diversa rispetto a quelle realizzata nell'ambito della MS2014.

Si è dapprima proceduto alla revisione critica di tutte le prove penetrometriche, sondaggi, nonché indagini geofisiche contenute nella banca dati aggiornata. In questa fase si è prestata attenzione soprattutto all'individuazione di orizzonti presumibilmente sabbiosi, condizione predisponente per il fenomeno della liquefazione dei terreni in condizioni sismiche.

Si è pertanto verificato, come già evidenziato nella MS2014, che:

- per le porzioni di territorio meridionali (indicativamente a sud della località "La Graziosa") tale condizione è da escludere, per la presenza a bassa profondità (a circa a 5 m o meno dal p.c.) della già descritta bancata ghiaiosa e ciottolosa da plurimetrica a decametrica che comporta l'assenza di orizzonti sabbiosi sotto falda. Si discosta da tale condizione una piccola area di campagna in via San Bernardino dove i risultati derivanti da un paio di prove penetrometriche suggeriscono la presenza di sabbie.

- per i settori a nord si segnalano strati sabbiosi soprattutto nell'area produttiva de' "La Graziosa" e in una zona posta a limite sud ovest della frazione di Sant'Anna e che è stata approfondita grazie all'esecuzione di un'apposita prova penetrometrica CPTU accompagnata da indagini geofisiche.

L'individuazione di due nuove aree, che nella carta delle MOPS2014 erano comprese in zone stabili suscettibili di amplificazione e che ora invece sono classificate come zone di attenzione per liquefazione, oltre che alla modifica di alcune delimitazioni e suddivisioni delle microzone, non deve essere considerata un fatto sorprendente. Si tratta infatti della constatazione che l'incremento delle basi di dati disponibile comporta un miglioramento e affinamento delle conoscenze pregresse. Considerato che, soprattutto nelle aree di campagna al di fuori dei centri abitati, la disponibilità e la densità d'informazioni sono minori, non si può escludere che eventuali studi di approfondimento in tali aree mettano in luce delle condizioni del sottosuolo che localmente differiscono, anche in modo sostanziale, da quanto definito sulla base dei dati tutt'ora disponibili. Si ricordi, ad esempio, quanto già riportato nel capitolo 3 a proposito della non continuità laterale dei corpi sabbiosi riconosciuti localmente nel sottosuolo. Tale non continuità laterale dei corpi sabbiosi, fino ad ora riconosciuti (località "La Graziosa", Sant'Anna e via San Bernardino,) sarebbe interpretabile con il fatto che si tratterebbe più di locali depositi di tracimazione o di rotta (*crevasse/léeve facies*) che non di depositi di canale fluviale che invece tenderebbero ad avere una maggiore continuità e sviluppo laterali (Figura 28).

* * *

Nell'ambito della MS2014, attraverso la comparazione delle stratigrafie e dei diagrammi penetrometrici erano state definite 8 stratigrafie tipo corrispondenti ad altrettanti modelli geologici, per mezzo dei quali si era descritto il primo sottosuolo del Comune di San Cesario fino alla profondità di circa 30-40 m (Figura 29). Ora, con i dati aggiuntivi, il numero delle stratigrafie tipo è salito a 11 (due delle quali sono state utilizzate per descrivere il sottosuolo della cava così detta Ghiarella che è stata oggetto di approfondimenti di terzo livello (verifica di stabilità delle scarpate e RSL 2D).

Sulla base di tali modelli geologici il territorio comunale viene suddiviso in zone utilizzate anche per la *Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica* (Figura 30) che sono tutte da considerare suscettibili di effetti di amplificazione stratigrafica. Due di queste presentano caratteristiche del sottosuolo (livelli sabbiosi, altezza della falda, ecc.) da farle ritenere potenzialmente suscettibili di instabilità da liquefazione. Tali areali sono ascritti alle così dette *zone di attenzione per instabilità* e

più precisamente come *Zone di attenzione per liquefazione*, di cui si è già accennato in precedenza. A queste zone si aggiungono le aree estrattive o oggetto di attività estrattiva in passato (che nelle carte di microzonazione sono state classificate come *Zone di attenzione per cedimenti differenziali/crolli di cavità/sinkhole*) e che (con esclusione della già nominata Cava Ghiarella) non sono state oggetto di approfondimento di terzo livello.

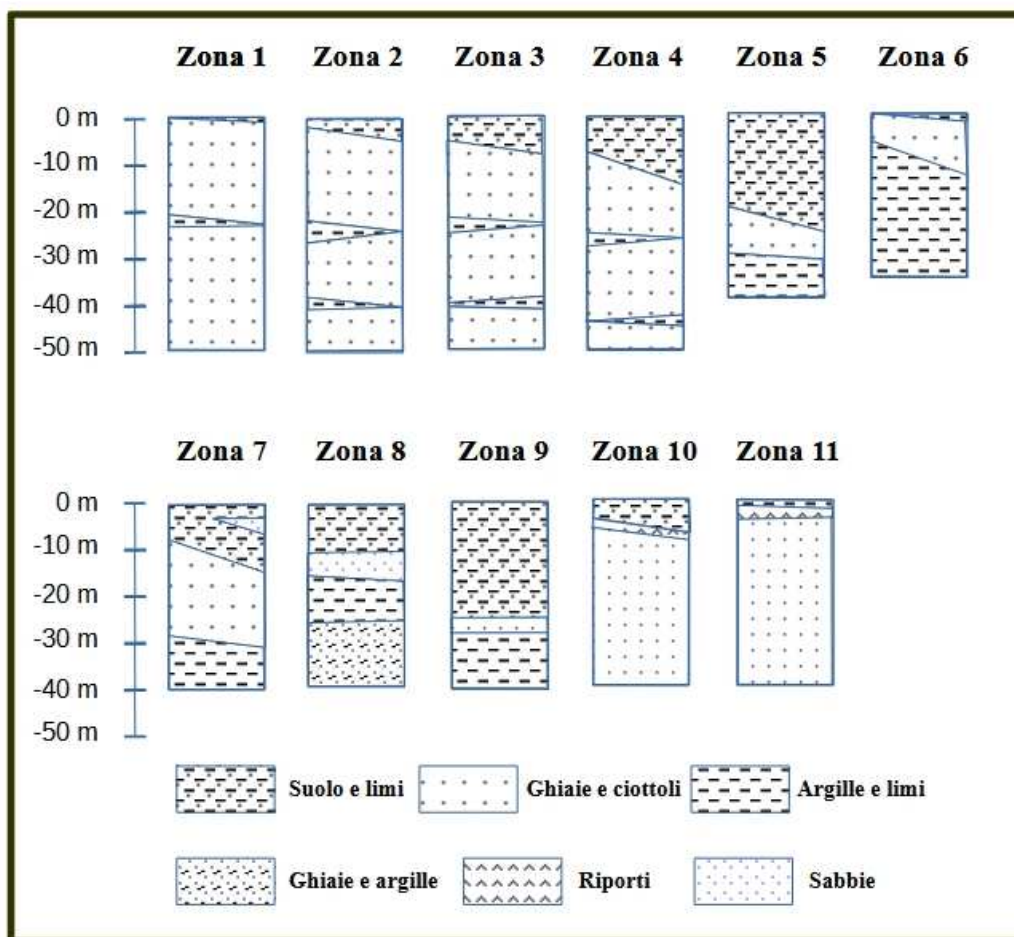


Figura 29 – Colonne stratigrafiche descrittive degli 11 modelli geologici utilizzati per descrivere il sottosuolo comunale. Ogni stratigrafia corrisponde ad una MOPS (Figura 30).

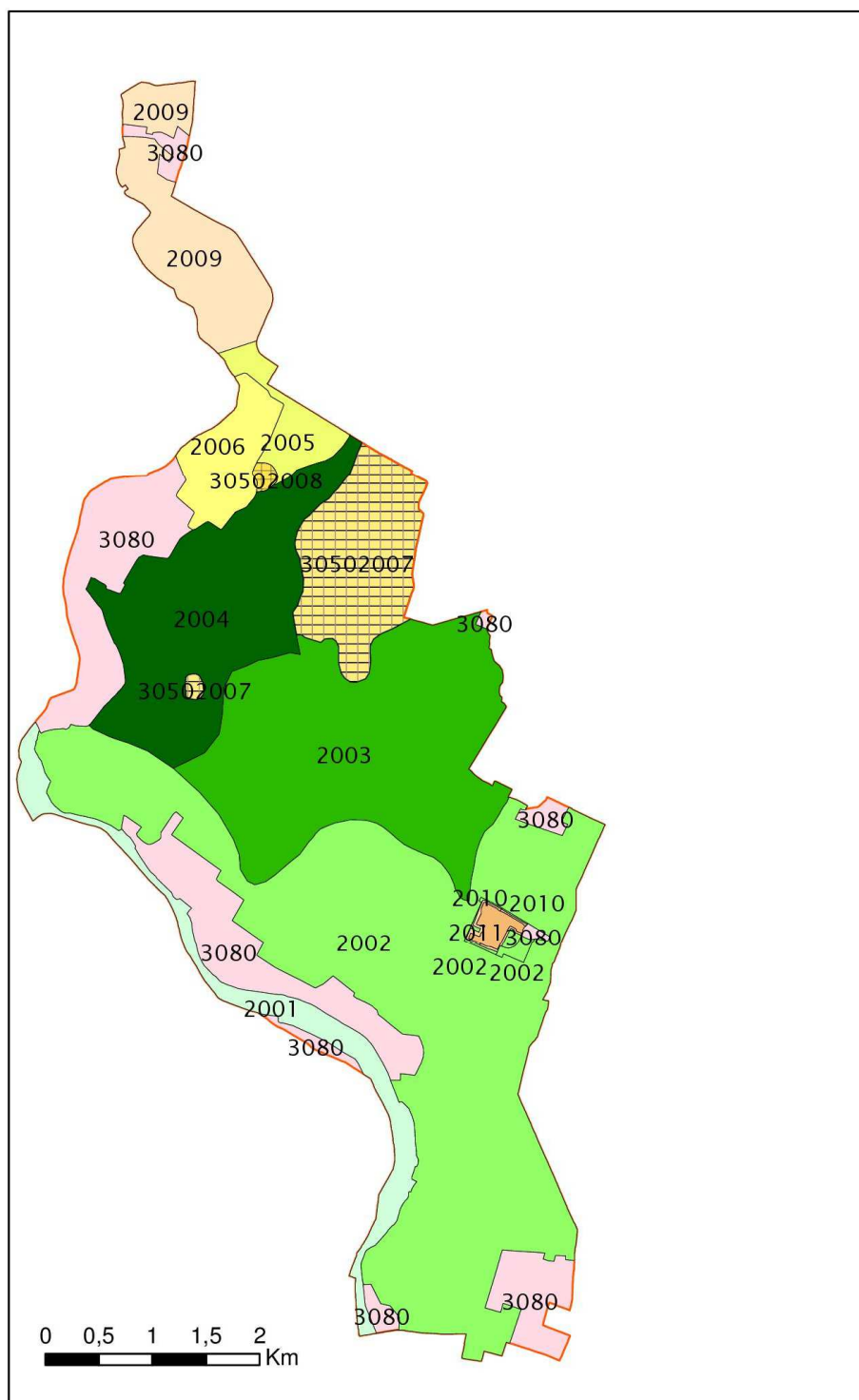


Figura 30 – Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica con indicate le sigle identificative dei modelli geologici (le aree in rosa rappresentano le "Zone di attenzione per cedimenti differenziali/Crollo di cavità sotterranee/Sinkhole"). I codici preceduti da 3050 sono quelli relativi alle Zone di attenzione per instabilità da liquefazione. In questi casi il codice identificativo del modello geologico è quello dato dalle ultime quattro cifre (2007 e 2008). (Ridotto e semplificato a partire dalla tavola omonima).

Come già detto, gli undici modelli geologici sono stati definiti tenendo conto sia di dati puntuali (sondaggi e prove penetrometriche) che di analisi di tipo "estensivo" (morfologia, unità litologiche e geologiche di superficie, assetto topografico, ecc.). Si

tratta quindi di strumenti che descrivono non puntualmente, ma diffusamente le caratteristiche medie del sottosuolo comunale e pertanto ognuno di essi può presentare una certa variabilità negli spessori dei diversi orizzonti (che localmente possono risultare anche al di fuori degli intervalli indicati). Ciò può avere come conseguenza che settori il cui sottosuolo è descritto dal medesimo modello geologico possono, a una verifica puntuale, mostrare differenze negli spessori e/o nelle profondità di una determinata unità o orizzonte stratigrafico.

5.1. Modelli geologici

Come già accennato, l'analisi dei dati stratigrafici congiunta con la realizzazione delle sezioni geologiche interpretative, unitamente ai dati di geologia di superficie (Carta geologico-tecnica, Carta geologica regionale, Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e altre carte tematiche), hanno permesso di delineare un quadro interpretativo dell'architettura del primo sottosuolo fino a una profondità di circa 30-40 m. È stato così possibile il tracciamento in sezione delle principali interfacce stratigrafiche ascrivibili ai passaggi tra unità a limiti inconformi, così come definiti per la pianura emiliano-romagnola dai geologi regionali: subsistema di Ravenna (e unità di Modena) e subsistema di Villa Verucchio (unità di Vignola).

* * *

Vengono di seguito riportate in forma tabellare le descrizioni dei modelli geologici utilizzati come riferimento per la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) (Figura 30) e che sono anche riportati sotto forma di colonnine stratigrafiche nella Figura 29. I log stratigrafici descrittivi delle Zone 7 e 8 sono riferiti alle aree classificate come Zone di attenzione per liquefazione, di cui il log relativo alla Zona 7 è il più ampiamente diffuso (parte settentrionale) con la Zona 8 limitata ad un'area posta nel settore sud occidentale della Frazione Sant'Anna.

Oltre alle tabelle si riporta inoltre la descrizione sintetica utilizzata anche nella legenda della Carta delle MOPS.

La banca dati facendo riferimento agli standard di archiviazione e rappresentazione informatica adotta una codifica precisa delle Microzone che fa riferimento al tipo di microzona (stabile, stabile con amplificazione o instabile) e all'eventuale tipologia di instabilità. Si riportano qui le relative corrispondenze con la denominazione identificativa utilizzata nelle tabelle descrittive che seguono.

Zona 1 → 2001

Zona 2 → 2002

Zona 3 → 2003

Zona 4 → 2004

Zona 5 → 2005

Zona 7 → 30502007

Zona 9 → 2009

Zona 11 → 2011

Zona 6 → 2006

Zona 8 → 30502008

Zona 10 → 2020

ZONA 1			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	0-2 m	Terreno agrario e/o suolo a tessitura prevalentemente limosa	Subsistema di Ravenna
Strato 2	20-40 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa di spessore metrico con lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici	Subsistema di Ravenna e Subsistema di Villa Verucchio

ZONA 2			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	2-5 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limosa	Subsistema di Ravenna
Strato 2	20-30 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con sporadiche presenze di lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici di spessore decimetrico	Subsistema di Ravenna e Subsistema di Villa Verucchio

ZONA 3			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	5-8 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limosa	Subsistema di Ravenna
Strato 2	20-30 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con di lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici di spessore da decimetrico a metrico	Subsistema di Ravenna e Subsistema di Villa Verucchio

ZONA 4			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	8-15 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limo-argillosa soffici	Subsistema di Ravenna
Strato 2	10-20 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici di spessore da decimetrico a metrico	Subsistema di Villa Verucchio

ZONA 5			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	>15 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limo-argillosa soffici	Subsistema di Ravenna e Subsistema di Villa Verucchio (?)
Strato 2	5-10 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con lenti e/o strati limosi e/o pelitici di spessore da decimetrico a metrico	Subsistema di Villa Verucchio

ZONA 6			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	0-2 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limo-argillosa soffici	Subsistema di Ravenna
Strato 2	5-10 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con lenti e/o strati limosi e/o pelitici di spessore da decimetrico a plurimetrico	Subsistema di Ravenna
Strato 3	>10 m	Terreni pelitici (alternanze di limi, limi argillosi, argille limose e argille con più radi strati sabbiosi e/o ghiaiosi)	Subsistema di Ravenna

ZONA 7			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	8-15 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limo-argillosa soffici, con presenza di spessori apprezzabili di terreni sabbiosi	Subsintema di Ravenna
Strato 2	10-20 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa con di lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici di spessore da decimetrico a metrico	Subsintema di Villa Verucchio

Zona 8			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	> 20 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limosa, con presenza di spessori apprezzabili di terreni sabbiosi	Subsintema di Ravenna e subsintema di Villa verucchio
Strato 2	20-30 m	Strati e banchi di ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa alternati a argille e limi con strati sabbiosi	Subsintema di Villa Verucchio

Zona 9 - Bedrock a oltre 100 m di profondità			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	> 25 m	Terreno agrario, suolo e depositi superficiali a tessitura prevalentemente limosa, con presenza di spessori apprezzabili di terreni sabbiosi	Subsintema di Ravenna e subsintema di Villa verucchio
Strato 2	> 50 m	Successione di terreni pelitici con intercalati strati e banchi di ghiaie in matrice limo-sabbiosa e/o di sabbie	Subsintema di Villa Verucchio

Zona 10 - Cava Ghiarella (scarpate)			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	4-7 m	Materiale di riporto e/o rimaneggiato composto principalmente da suolo e limi argillosi.	
Strato 2	1 - 2 m	Scarti di cava composti da limi prevalenti con ghiaie e ciottoli	
Strato 3	10-20 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa di spessore metrico con lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici	Subsintema di Villa Verucchio

Zona 11 - Cava Ghiarella (Area di fondo)			
	Spessore	Descrizione litologico-tessiturale	Note
Strato 1	1-2 m	Materiale di riporto composto principalmente da suolo e limi argillosi.	
Strato 2	1 - 2 m	Scarti di cava composti da limi prevalenti con ghiaie e ciottoli	
Strato 3	10-20 m	Ghiaie e ciottoli in matrice limo-sabbiosa di spessore metrico con lenti e/o strati poco continui lateralmente limosi e/o pelitici	Subsintema di Villa Verucchio

Zona - 2001 - Terreni prevalentemente ghiaiosi e/o ciottolosi in matrice limo-sabbiosa subaffioranti e di spessore pluridecametrico.

Zona 2 - 2002 - Terreni prevalentemente ghiaiosi e/o ciottolosi in matrice limo-sabbiosa di spessore pluridecametrico, tetto a circa 2-5 m di prof, al di sotto di

sedimenti limosi.

Zona 3 - 2003 - Terreni prevalentemente ghiaiosi e/o ciottolosi in matrice limo-sabbiosa, con tetto posto a circa 5-8 m di profondità, al di sotto di sedimenti prevalentemente pelitici.

Zona 4 - 2004 - Depositi pelitici fino a circa 8-15 m di profondità, sovrastanti strati ghiaiosi alternati ad orizzonti pelitici.

Zona 5 - 2005 - Depositi pelitici di spessore superiore ai 20 m, sovrastanti strati ghiaiosi alternati a orizzonti pelitici.

Zona 6 - 2006 - Depositi ghiaiosi fino a circa 5-10 m di profondità, sovrastanti terreni prevalentemente pelitici.

Zona 7 - ZALQ- Zona di Attenzione per Liquefazione - 30502007 - Depositi prevalentemente limosi di 8-15 m di spessore, con intercalazioni sabbiose da decimetriche a metriche, sovrastanti depositi in prevalenza ghiaiosi.

Zona 8 - ZALQ - Zona di Attenzione per Liquefazione - 30502008 - Depositi prevalentemente limosi di 20 e più m di spessore, con intercalazioni sabbiose metriche, sovrastanti depositi in prevalenza ghiaiosi.

Zona 9 - 2009 - Depositi fini pluridecametrici con intercalati strati di ghiaie metrici a profondità oltre i 25 m (bedrock oltre i 100 m).

Zona 10 - 2010 - Pareti Cava Ghiarella - Materiali di riporto (suolo e limi argillosi) fino a circa 4-7 m, sovrastanti 1-2 m di scarti di cava (limi con ciottoli) su terreni prevalentemente ghiaiosi.

Zona 11 - 2011 - Fondo Cava Ghiarella -Ghiarella - Materiali di riporto (suolo e limi argillosi) fino a circa 1-2 m, sovrastanti 1-2 m di scarti di cava (limi con ciottoli) su terreni prevalentemente ghiaiosi

Le aree di cava e di ex cava per le quali non è possibile definire un modello del sottosuolo univoco, per via della mancanza di dati, e che presentano morfologie che di fatto si discostano anche dal modello di sottosuolo monodimensionale sono codificate nella carta delle MOPS (e anche nelle carte di microzonazione sismica di terzo livello e nelle carte di pericolosità sismica – HSM) come ZACD - 30080 - Zone di attenzione per cedimenti differenziali/crollo di cavità/sinkhole.

6. INTERPRETAZIONE E INCERTEZZE

6.1. Interpretazioni

I dati disponibili e quelli di nuova acquisizione, per lo più di natura puntuale, hanno richiesto un notevole sforzo d'interpretazione e omogeneizzazione. Si è inoltre reso necessario valorizzare certi dati, ritenuti "soggettivamente" di qualità migliore rispetto ad altri: sia per l'accuratezza delle informazioni contenute, sia per la maggiore estensione della verticale indagata che ha permesso di definire un modello stratigrafico puntuale fino a profondità maggiori rispetto alle profondità usualmente raggiunte dalle indagini standard, sia anche per la maggiore chiarezza nell'esporre le informazioni oltre che nel controllo diretto che si è potuto esercitare durante l'acquisizione.

Il grado d'interpretazione è stato diverso a seconda del lavoro o dell'elaborato da approntare.

Per la "Carta geologico-tecnica", si è fatto riferimento alle carte pubblicate, alle sezioni geologiche, ma soprattutto al confronto comparato e alla correlazione tra dati geognostici puntuali. Tenuto conto che si tratta di una carta che descrive principalmente la litologia "superficiale", noi sono state necessarie delle modifiche rispetto alla versione della MS2014, nonostante l'incremento del numero di indagini disponibili in banca dati.

Per le sezioni geologiche si è cercato di dare un'interpretazione di tipo stratigrafico-ambientale ai sondaggi e alle prove penetrometriche, al fine di riconoscere i limiti tra le unità stratigrafiche principali.

In seguito si è proceduto nel correlare tali informazioni dapprima tra di loro, per poi verificare se fosse possibile (nei limiti della qualità dei dati) riconoscere tali unità anche nelle stratigrafie di pozzi per acqua.

Per quanto attiene la Carta delle MOPS l'interpretazione dei dati penetrometrici, sia passati (che sono comunque stati tutti rivisti) e sia quelli nuovi, ha comportato anche la valutazione (fortemente interpretativa, perché basata sia sull'assunzione di correlazioni empiriche che sull'assunzione di valori discriminanti di percentuali di spessore) degli spessori cumulati di terreni sabbiosi e terreni soffici, la cui esistenza è stata valutata sulla base rispettivamente del valore del rapporto R_p/R_I e della correlazione empirica tra valore di resistenza alla punta e coesione non drenata. Per alcune delle indagini CPTU si è inoltre applicata (Figura 28, capitolo 3) l'analisi di facies dei diagrammi penetrometrici (secondo la metodologia di Campo et al., 2023)

al fine di meglio definire l'ambiente sedimentario nel quale si sono formati gli strati sabbiosi. Rispetto alla versione MS2014 la nuova Carta delle MOPS ha subito alcune modifiche sia nella delimitazione delle singole microzone sia nel loro numero.

Per quanto riguarda le carte delle indagini, delle frequenze e delle velocità, non si è dovuto procedere a interpretazioni particolari dei dati in quanto questi sono stati semplicemente georeferiti e riportati, sebbene occorra precisare che per quanto attiene la frequenza di sito e le velocità Vs30, il processo d'interpretazione sta a monte del risultato finale (determinazione del picco di frequenza H/V e sua interpretazione in chiave stratigrafica; determinazione della curva di dispersione delle onde di superficie, *picking* e relativa modellazione, ecc.)¹¹. Considerata l'acquisizione di nuove indagini sia presso l'Unità tecnica comunale sia di acquisizione originale, tali carte differiscono sostanzialmente da quelle della MS2014.

Anche per quanto riguarda le carte di amplificazione, gran parte del processo interpretativo è inglobata nei dati relativi alle indagini sismiche e alla definizione del modello di velocità utilizzato per la valutazione della Risposta Sismica Locale (RSL). A differenza di quanto fatto per la MS2014, che prevedeva uno studio di primo e di secondo livello, il presente lavoro è stato impostato inizialmente come approfondimento di terzo livello nelle zone urbanizzate. Durante l'esecuzione dello studio si è deciso, in accordo con la RER, di estendere l'analisi di terzo livello, per quanto attiene la valutazione dei fattori di amplificazione, a tutto il territorio comunale. Sono state escluse dall'approfondimento solamente le aree di cava e di ex-cava, ad eccezione della cava denominata "Ghiarella" per la quale si è eseguito un approfondimento di terzo livello con codice di calcolo 2D.

6.1.1. Andamento del bedrock sismico

Come già descritto nei capitoli precedenti, il primo sottosuolo del territorio comunale risulta quasi sempre formato dalla sovrapposizione di depositi fini di superficiali che ricoprono materiali sedimentari molto grossolani (prevalentemente ghiaie e ciottoli in matrice limosa) (Figura 29). Ciò che cambia da zona a zona (MOPS) è lo spessore dei materiali fini di copertura che varia da assente, o di pochi metri, nei settori prospicienti il confine comunale sud, fino ad oltre 20-25 m presso la frazione di Sant'Anna.

Se si esclude (MOPS 2009, Figura 29) l'areale prospiciente il confine nord occidentale (località Sant'Ambrogio) si è verificato che sussiste pressoché ovunque

¹¹ Non sono stati reperiti, e pertanto non sono presenti in banca dati, rilievi sismici elaborati attraverso metodologie del tipo "Full Waveform Inversion" (Dal Moro, 2019) che mirano a ridurre fortemente la componente interpretativa e soggettiva dal processo di elaborazione degli spettri di velocità.

un evidente contrasto d'impedenza tra i sedimenti fini di copertura e il primo orizzonte ghiaioso. Nei modelli di velocità ricavati attraverso le indagini geofisiche si riscontrano valori più che doppi se non maggiori nelle ghiaie rispetto i depositi superficiali. Tale condizione è rimarcata anche dai valori delle frequenze di picco dei grafici delle registrazioni sismiche passive a stazione singola per i quali si riscontra una tendenza al diminuire dei valori delle frequenze (approfondimento dell'interfaccia del contrasto di impedenza) procedendo da sud verso nord.

Tali evidenze hanno portato alla scelta di considerare il passaggio tra depositi superficiali e sottostanti depositi grossolani come l'interfaccia di riferimento per i calcoli della Risposta Sismica Locale, abbandonando quindi l'idea di definire l'andamento del così detto *bedrock* sismico definito come l'interfaccia al di sotto della quale si riscontrano valori di velocità V_s maggiori di 800 m/s.

6.2. Incertezze

La maggiore o minore densità di distribuzione delle informazioni condiziona fortemente il grado d'incertezza interpretativa, nonché di coerenza di un qualsiasi studio a scala territoriale basato sulla comparazione di dati puntuali (o tutt'al più rilevati lungo una disposizione lineare o bidimensionale di sensori, che comunque copre un'estensione limitata) e su analisi di tipo estensivo (morfologica, topografica, litologica, paleo ambientale, ...).

Già la collocazione in un ambiente di alta e media pianura rende incerto il quadro stratigrafico a causa della variabilità intrinseca dell'ambiente sedimentario fluviale. Oltre tutto la variabilità spaziale dei depositi sedimentari in ambiente di pianura non sempre si riflette in variazioni delle caratteristiche "sismiche" del sottosuolo: uno strato di sabbia, anche plurimetrico, all'interno di una successione prevalentemente pelitica può non essere distinguibile per mezzo del metodo geosismico, in quanto non sempre "contrasta" in maniera significativa con sedimenti più fini.

Anche una carta geologica, seppure di dettaglio, riporta pochi dati oggettivi (l'ubicazione degli affioramenti, gli assetti stratigrafici nell'ipotesi che il rilievo non sia stato affetto da errore e che la polarità fosse evidentemente chiara, ecc.), mentre per gran parte rappresenta un documento di lavoro e d'interpretazione "soggettiva", basata su ipotesi che hanno lo scopo di inquadrare in uno schema generale i dati pressoché sempre puntuali e sparsi.

Considerate tali premesse, è alquanto opinabile pretendere un'assoluta validità e affidabilità per un modello geologico su tutto l'areale per il quale è stato definito, se

non facendo riferimento alla descrizione per proprietà medie.

Si è pertanto sempre cercato un compromesso tra conoscenze stratigrafiche e litologico-tecniche legate, in alcuni casi, a pochi dati puntuali (analisi puntuale) e coerenza con il contesto geologico all'intorno (analisi estensiva).

Come già accennato le fonti principali alle quali si è attinto sono state:

- per le informazioni geognostiche puntuali (prove penetrometriche, sondaggi a carotaggio e indagini geofisiche) l'archivio comunale e quello regionale, nonché le nuove indagini realizzate nell'ambito del presente studio;
- per le informazioni geologico cartografiche i siti web specifici che fanno capo all'Ufficio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna;
- altre informazioni sono state mutate dal PTCP della Provincia di Modena, nonché dalle indagini e documenti allegati al vigente Strumento Urbanistico Locale e dalle pratiche edilizie presentate successivamente all'approvazione della MS2014.

* * *

Al di là delle problematiche inerenti la distribuzione spaziale delle indagini disponibili, occorre puntualizzare alcuni elementi relativi alla rappresentatività e affidabilità delle informazioni:

- non sono state reperite stratigrafie da sondaggi a carotaggio continuo che esplorassero delle verticali significative (oltre i 10-15 m) al di fuori di quelle eseguite in passato all'interno di cave per le quali i lavori hanno determinato la modifica sostanziale della morfologia (scavi) e di conseguenza hanno annullato l'utilità dei sondaggi medesimi nel descrivere una condizione stratigrafica che risulta ad oggi mutata (per l'abbassamento del piano campagna, l'asportazione di una parte della successione litologica ed il riporto parziale di materiale rimaneggiato);
- le stratigrafie dei pozzi per acqua sono spesso sommarie e non è possibile verificarne l'attendibilità sia in chiave litologica che granulometrica. Spesso nelle stratigrafie di pozzi per acqua i termini "argilla" e "terra" fanno riferimento a generici terreni fini (argille, ma anche limi e talvolta sabbie fini). Stesso discorso per il termine "sabbia" utilizzato per indicare l'insieme dei terreni incoerenti: sabbie ma anche limi. Alcune stratigrafie indicano dati in contraddizione con altre inerenti pozzi posti nelle immediate vicinanze per cui, soprattutto nella realizzazione delle sezioni (cfr. Carta geologico-Tecnica e Carta delle MOPS) è stato necessario valutare criticamente stratigrafie di pozzi che indicavano la presenza di ghiaie continue fino a 40-50 m di profondità;
- anche per le prove penetrometriche (per gran parte CPT) si hanno informazioni

molto varie. In alcuni casi mancano le caratteristiche della strumentazione di prova; spesso è presente il solo grafico della Rp, o della Rp e della RI; le unità di misura non sono sempre omogenee (kg/cm²; MPa per la resistenza alla punta e Kg/cm² oppure KPa per la resistenza laterale);

- le prove penetrometriche CPTU sono più precise e apportatrici di un maggior numero di informazioni;
- spesso risulta difficile correlare dati puntuali (prove penetrometriche, stratigrafie, ecc.) anche distanti pochi metri l'uno dall'altro, sia per effettive cause geologiche (variazioni laterali di facies e degli spessori) sia per le soprarichiamate disomogeneità presenti nella documentazione disponibile¹²;
- le indagini geofisiche reperite in archivio non sempre sono complete e comunque non sono ben distribuite sul territorio. A volte mancano i dati originali, sismogrammi o spettri di velocità; più spesso non sono presenti informazioni relative alla geometria della stesa e ai parametri di acquisizione; pressoché sempre non si hanno indicazioni relative alla fase interpretativa (se sia stato adottato un approccio d'inversione automatica dei dati ovvero di modellazione diretta facendo riferimento alle conoscenze geologiche locali derivanti da indagini geognostiche, rilevamento diretto e cartografie tematiche). Nel complesso, volendo dare una valutazione soggettiva¹³ ai contenuti informativi delle indagini geofisiche reperite in archivio (non al risultato finale dell'interpretazione), la gran parte delle indagini presenta una valutazione di media qualità: la maggioranza delle indagini geofisiche (quasi i 2/3) contiene infatti informazioni non complete, ma comunque sufficienti per attribuire loro con un giudizio per lo meno di media qualità.

¹² Al terzo livello sono state riclassificate (cambiando la carta di primo livello) come Zone di suscettibilità per liquefazione alcune aree che al primo livello erano risultate classificate come zone stabili suscettibili di amplificazione, per via della valutazione del valore dell'indice IL su prove CPTU.

¹³ Le indagini sismiche in onde di superficie, attive e passive, sono state valutate per il contenuto informativo che apportavano con un giudizio sintetico (Buono, Medio, Scarso) basato esclusivamente sul fatto che fossero disponibili almeno 5 informazioni su 7 (Buono) o 3 su 7 (Medio) tra le seguenti: geometria della stesa e parametri di acquisizione; sismogrammi, spettro di velocità, picking della curva di dispersione; modello di profilo verticale di velocità, scostamento statistico tra modello e dati; correlazione tra indagine geofisica e dati geologici disponibili. Per le indagini a rifrazione sono stati considerati i seguenti criteri: sismogrammi, dromocrone, geometria della stesa e parametri di acquisizione e modello sismostratigrafico (giudizio Buono in presenza di almeno 3 delle quattro informazioni; giudizio Medio per disponibilità di almeno sismogrammi-o dromocrone- e modello sismostratigrafico). Per le indagini a stazione singola si è fatto riferimento alla presenza delle seguenti informazioni: grafico H/V, spettro delle singole componenti, parametri di acquisizione; parametri di elaborazione, grafico direzionalità e modello di profilo verticale di velocità (Buono per compresenza di tutte e 6 le informazioni, Medio per compresenza di 5 informazioni su 6).

7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Come già accennato nel capitolo 1, i riferimenti principali che sono stati presi come guida per l'espletamento del presente studio sono stati:

- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 564 del 26 aprile 2021 (*Integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).*
- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 476 del 12 aprile 2021 (*Aggiornamento dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)* di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019 n. 630).
- Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 630 del 29 aprile 2019 (*Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).*
- Gruppo di lavoro MS, 2018 "*Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ).* Versione 1.0. Approvate dalla Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- Gruppo di lavoro Ms, 2008 "*Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*" approvati dalla Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"* (suppl. alla rivista Ingegneria Sismica, 2011).

In linea generale si può affermare che il lavoro si è articolato su tre fasi, non distinte l'una dall'altra, ma in parziale sovrapposizione.

7.1. Prima fase

Nella PRIMA FASE si è proceduto:

- al reperimento presso l'Ufficio Tecnico comunale e in rete di indagini geognostiche e geofisiche allegate a pratiche edilizie recenti, che non fossero già state inserite nella banca dati della MS2014 nonché in quella allestita per la MS realizzata a supporto del Piano Urbanistico Generale. Ogni singolo dato è stato localizzato in cartografia e ne è stato preparato (quando non già esistente) un file

- (in formato .pdf) contenente i diagrammi, le tabelle e tutto ciò che fosse utile per una lettura e interpretazione delle informazioni derivanti dall'indagine specifica;
- all'esecuzione di nuovi rilievi geognostici (CPTU) e geofisici (ESAC, MASW, HVSR), come già descritto nel capitolo 3 della presente relazione;
 - all'aggiornamento della banca dati esistente con l'inserimento dei dati di cui ai due punti precedenti;
 - a una prima valutazione di coerenza dei dati nuovi con l'interpretazione stratigrafica alla scala comunale proposta con la MS a supporto del PUG;
 - all'aggiornamento della Carta delle indagini (elaborata secondo gli standard cartografici della Protezione Civile) con i dati puntuali e lineari di nuova esecuzione e/o di recente acquisizione. Dalla carta delle indagini aggiornata sono stati poi derivati gli aggiornamenti alla Carta delle frequenze e alla Carta delle velocità (la cui elaborazione è prevista dalle Direttive Regionali).

7.2. Seconda fase

Nella SECONDA FASE dello studio si è proceduto all'analisi e interpretazione dei dati (si veda il capitolo 4 per una descrizione delle indagini disponibili e il capitolo 6 per una descrizione delle problematiche interpretative e delle incertezze insite nella base informativa) con lo scopo di verificare la coerenza con i modelli geologici del sottosuolo descritti nella MS a supporto del PUG.

Sono state riviste tutte le indagini puntuali contenute nelle banca dati, non solo quelle di nuova esecuzione e/o inserimento, ma anche quelle presenti nella base dati della MS2014. Ciò ha comportato, alla luce delle nuove conoscenze disponibili e anche ai risultati derivanti dall'analisi di terzo livello, a modifiche sostanziali della carta di primo livello (Carta delle MOPS) rispetto alla versione MS2014 con l'introduzione di nuove MOPS e con la modifica delle delimitazioni di alcune di esse (Figura 30).

Questa fase dello studio ha previsto pertanto analisi e studi che rientrano sia nel primo che nel secondo¹⁴ livello che nel terzo livello di approfondimento previsti dalle Delibere 564/2021, 476/2021 e 630/2019 a livello regionale e dai Criteri nazionali della Protezione Civile.

7.2.1. Primo livello di approfondimento

Nell'ambito degli studi del primo livello di approfondimento sono state affrontate

¹⁴ Come già anticipato, l'analisi di terzo livello è stata di fatto estesa a tutto il territorio comunale con l'eccezione delle aree estrattive.

le tematiche relative a:

- analisi dell'assetto geologico di inquadramento regionale e comprensione del modello geologico, descritto attraverso le sezioni geologiche e le colonne stratigrafiche esemplificative dei modelli geologici relativi alle diverse MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica). La carta delle MOPS è stata poi successivamente modificata e integrata a seguito delle analisi di terzo livello. Di fatto si può affermare che non vi sia una distinzione netta tra l'analisi di primo, di secondo e di terzo livello, ma al contrario che più si passa ad un livello di approfondimento maggiore più può accadere di dover comunque modificare gli elaborati dei livelli inferiori;
- litologia di superficie (Carta Geologico-Tecnica: Figura 27) per descrivere le caratteristiche litologiche, sedimentarie e granulometriche del primo sottosuolo (entro 2-3 m da p.c.). In questo caso i dati aggiunti alla base informativa hanno confermato quelle che erano state le conclusioni della MS2014;
- valutazione della presenza di terreni sabbiosi sotto falda (fattore predisponente il fenomeno della liquefazione dei terreni in condizioni sismiche) (Figura 28). Come descritto in precedenza sono state individuate tre zone di attenzione per liquefazione;
- dalla valutazione comparata di tutti i dati ed elaborati disponibili, compresi quelli realizzati e/o modificati per l'occasione (carta geologico-tecnica, sezioni geologiche, banca dati e carta delle indagini, ecc.) si è confermata solo in parte la validità dei modelli geologici della previgente MS2014 che descrivono il sottosuolo di tutto il territorio comunale, tenendo conto della stratigrafia delle prime decine di metri a partire dal p.c. Alcune delimitazioni territoriali sono state modificate, mentre il numero dei modelli geologici è passato da otto a undici. Si rimanda al capitolo 5 per una descrizione più dettagliata dei modelli geologici e delle modalità che hanno portato alla loro definizione (Figura 29 e Figura 30);
- predisposizione della cosiddetta "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" che descrive il territorio sulla base dei modelli geologici e dell'esistenza delle condizioni locali predisponenti i fenomeni della liquefazione e dei cedimenti post-sismici, che (vedi allinea precedente) coincide solo in parte con quella realizzata per la MS2014.

7.2.2. Secondo livello di approfondimento

In una prima fase del lavoro era stato pianificato di valutare al terzo livello solo le aree urbanizzate ed un loro intorno, mentre per le zone di campagna ci si sarebbe limitati ad una valutazione di secondo livello con determinazione dei fattori di amplificazione tramite gli abachi allegati alla disposizioni regionali in materia.

Col progredire dell'analisi si è invece deciso di estendere la valutazione di terzo livello anche alle aree di campagna, escludendo quindi solo le zone di cava e di ex cava. Per queste ultime è rimasta la classificazione come *Zone di attenzione per cedimenti differenziali/crollo di cavità/sinkhole*¹⁵.

Quanto appena riferito ha come conseguenza che il presente lavoro non contiene le cartografie o gli elaborati grafici tipicamente previsti per gli studi di secondo livello se non la Carta di pericolosità sismica HSM Figura 31 che qui è comunque accompagnata dalle analoghe cartografie specifiche per gli intervalli di frequenza 0.4-0.8 secondi, 0.7 - 11 secondi e 0.5 – 1.5 secondi, previste per gli studi di terzo livello.

7.2.2.1. Carta di pericolosità sismica (*H_{SM} Hazard Seismic Microzonation*)

La *carta di pericolosità sismica* (Figura 31) rappresenta la distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM} (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (in termini di frazione di g, accelerazione di gravità), dato dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA), calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = (ASI_{UHS}/\Delta T) \times FA.$$

Per quanto attiene le valutazioni dei parametri HSM si rimanda ai paragrafi che seguono (terzo livello di approfondimento). La carta di cui alla Figura 31 è stata qui introdotta in quanto la sua realizzazione è prevista dalle direttive regionali nell'ambito degli studi di secondo livello. Tuttavia, avendo il presente studio esteso le indagini di terzo livello a tutto il territorio comunale, la determinazione dei valori HSM (e di quelli

¹⁵ Si tratta di areali dove si possono avere 1) marcate eterogeneità geometriche con scarpate in ghiaia ad elevate inclinazioni (localmente subverticali) con o senza gradonature, fondi suborizzontali, quote variabili con dislivelli anche di diversi metri, ecc.); 2) terreni di ripristino vari che rendono le caratteristiche del primo sottosuolo non omogenee e quindi non descrivibili attraverso un unico modello geologico-stratigrafico.

correlati) è stata effettuata nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello.

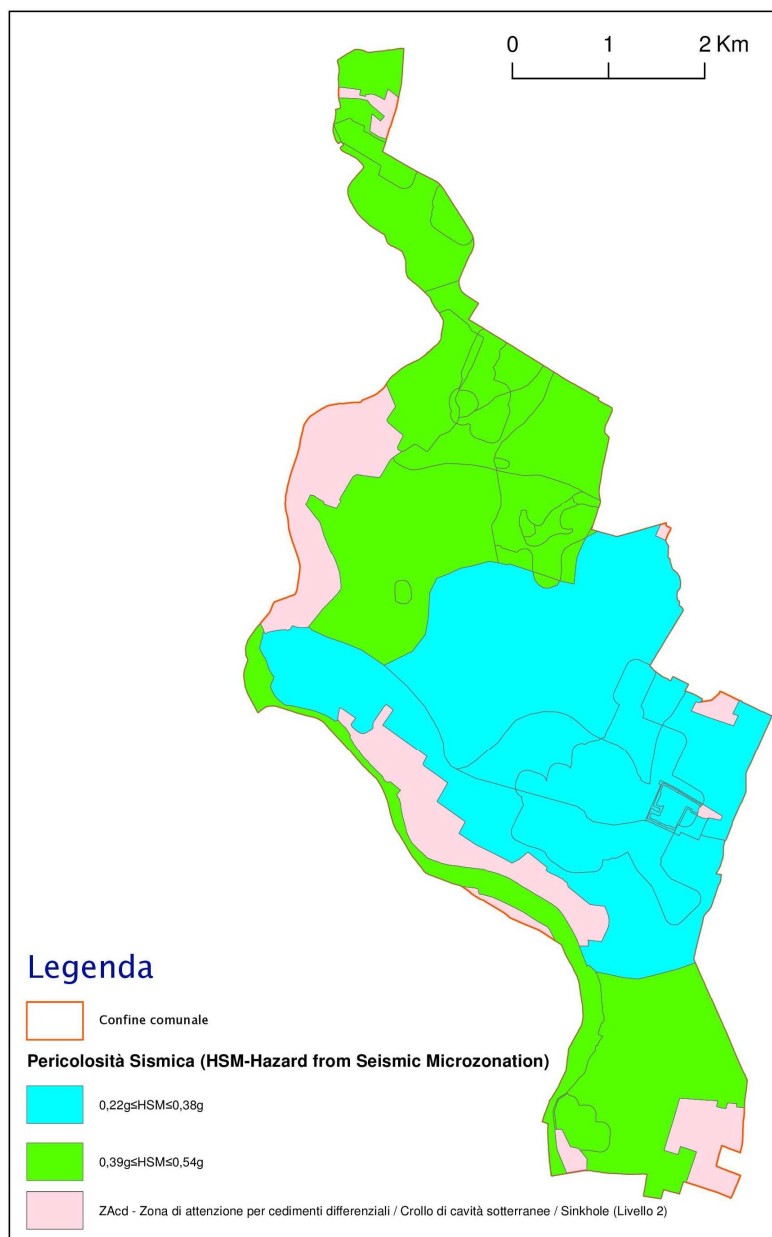


Figura 31 – Carta di pericolosità sismica (H_{SM}) (ridotto e semplificato a partire dalla tavola omonima).

7.2.3. Terzo livello di approfondimento

7.2.3.1. Premessa

Come già riferito, sebbene inizialmente si fosse deciso di analizzare al terzo livello sole le zone del territorio urbanizzato, successivamente si è deciso di estendere l'analisi a tutto il territorio comunale con esclusione delle aree di cava e di ex-cava.

7.2.3.2. Risposta Sismica Locale (RSL)

Il presente studio è l'approfondimento dell'analisi di terzo livello per il Comune di San Cesario s/P. All'interno delle aree urbanizzate, tenendo anche conto della presenza di edifici di rilevante interesse pubblico (**strategici** nello studio della Condizione Limite dell'Emergenza – CLE), sono state individuate le verticali più rappresentative riferibili alle relative MOPS. L'ubicazione di tali verticali è riportata nella Figura 32.

Verticale sismica	Indagini di riferimento	Segnali simici di rif. -DGR 476/21
Capoluogo		
Capoluogo, parco di Via De Gasperi	Esac+Masw parco Via De Gasperi 6/11/24; HVSR 19/12/24; CPT 220010C70; Pozzo Cartiera, anno 1960.	nodo 16504
Ghiarella	Esac+Masw parco Via De Gasperi 6/11/24; MASW palestra 24/4/20; HVSR palestra 23/3/20; HVSR 19/12/24; CPT 220010C70; CPT 22001C069; DPSH 22001D075; DPSH 22001D076; 036036P149DP149; 036036P150DP150; Pozzo Cartiera, anno 1960;	nodo 16504
Altolà		
Altolà, parco S.Pertini	Esac+Masw parco S.Pertini 8/11/24; Hvsr 19/12/24; CPT 036036P62CPT62; Pozzo 036036P370PA371.	nodo 16726
Sant'Anna		
Sant'Anna, centro sportivo	Esac+Masw c. sportivo 6/11/24; Hvsr 19/12/24; SCPTU3 31/12/24; pozzo 036036P331PA332.	nodo 16282
Graziosa Nord	Esac+Masw Via Commercio 26/11/24; HVSR 19/12/24; SCPTU4 31/12/24; Pozzo 036036P354PA355; Pozzo 036036P335PA336.	nodo 16282
Graziosa Sud	Esac+Masw Via Elettronica 22/11/24; HVSR 19/12/24; SCPTU2 30/12/24; pozzo 036036P338PA339.	nodo 16282
P.te Sant'Ambrogio		
Via Emilia	Esac+Masw S.Ambrogio 22/11/24; HVSR 30/12/24; SCPTU1 30/12/24; Pozzo 201160P622; pozzo 036036P243PA244.	nodo 16282

Tabella 1 - Indagini di riferimento per MOPS ed edifici strategici principali.

Per n. 6 di tali verticali di studio (esclusa l'area così detta "Cava Ghiarella") sono state effettuate indagini sismiche (ESAC+MASW+HVSr) e per n. 4 di queste (escluse "Capoluogo" e "Altolà") prove sismico-meccaniche (prove penetrometriche statiche a punta elettrica con cono sismico, SCPTU) di cui alla Tabella 1.

Per tutte dette verticali sono poi stati raccolti e selezionati i dati geofisici, geotecnici e stratigrafici più significativi di quelli presenti e disponibili (Tabella 1).

Sulla base di tali informazioni sono quindi stati definiti i modelli verticali di velocità (locali) da utilizzare nella valutazione della Risposta Sismica Locale¹⁶:

Per quanto riguarda i segnali sismici si è fatto riferimento ai nodi d'interesse delle NTC 18 (DM 17/01/2018) n. 16282, 16504 e 16726 ai quali sono associati i segnali sismici di riferimento, allegati alla DGR 476 del 12/04/2021; in particolare vengono attribuiti a ogni verticale sismica d'interesse della soprastante tabella 1 i nodi in questa indicati.

¹⁶ Gli edifici strategici sono stati presi come riferimento per definire ulteriori suddivisioni all'interno delle MOPS e delle microzone di terzo livello definite nell'ambito della MS a supporto del PUG comunale.

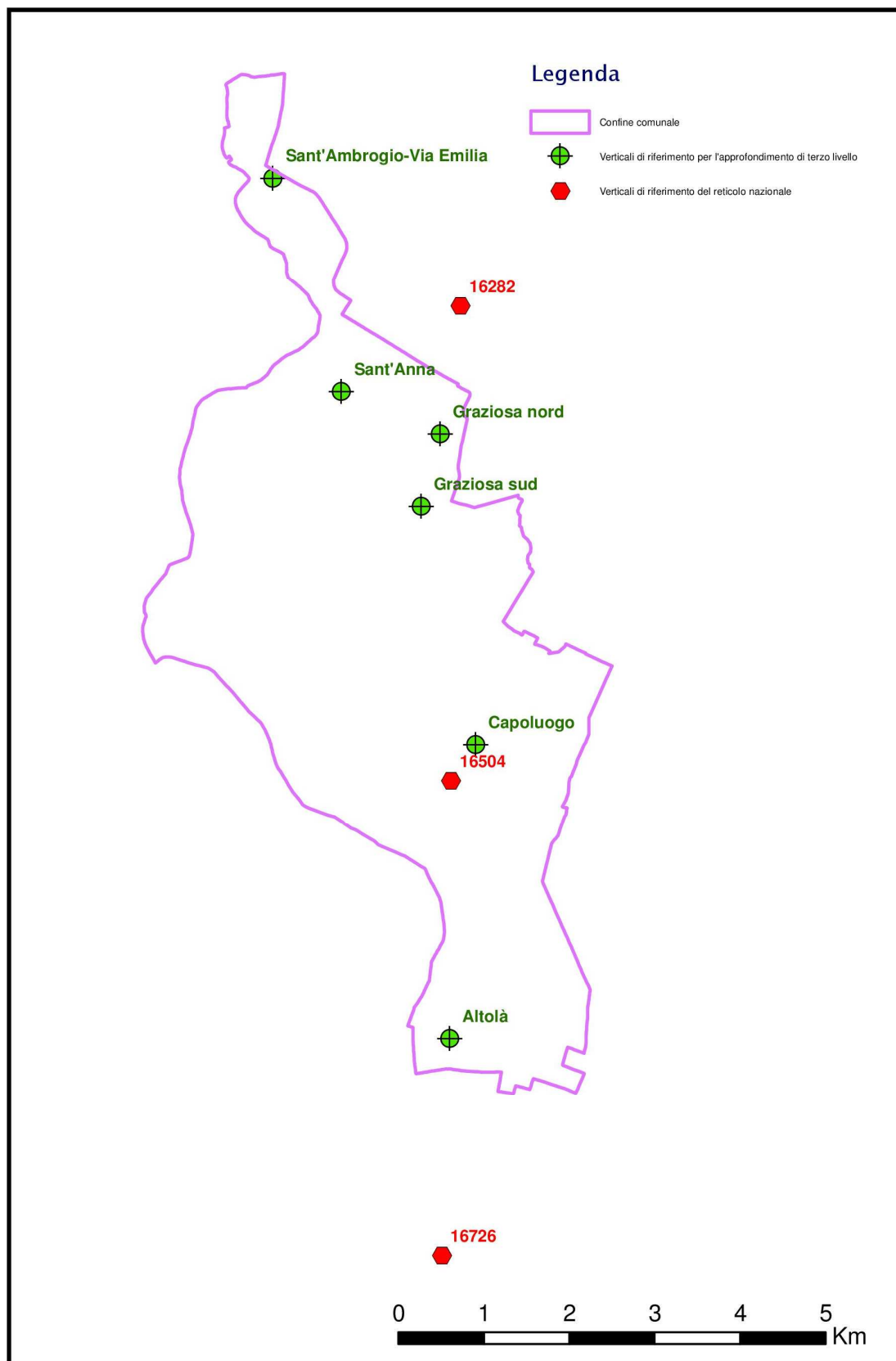



Figura 32 – Ubicazione delle verticali di riferimento per il presente studio (approfondimenti geognostici, geofisici, RSL, ecc.).

Come prima detto i riferimenti stratigrafici, delle velocità delle onde di taglio Vs

e per l'individuazione del bedrock sismico sono riportati nella precedente tabella 1. Le curve dinamiche di rigidezza e di smorzamento (G/G_{max} e D) e i pesi di volume assunti, sono indicati nelle tabelle 2.

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) Output Specification Compute Results					
Soil Types					
	Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G _{max} Model	Damping Model	Notes
1	Limo con Argilla	19.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	
2	Limo con Argilla sabbiosa	19.00	Limo con arg.sabb CastelfrS1_SH2	Limo con arg.sabb CastelfrS1_SH2	

Tabella 2.1 – Capoluogo - Curve dinamiche e Pesì di volume.

Name: Copertura Color:  Set...

Dynamic

Material Model: Equivalent Linear

Unit Weight: 19 kN/m³ C': 5 kPa

Poisson's Ratio: 0.4 Phi': 20 °

☐ Specify Insitu Ko: 0.6666667

G Reduction Fn: Castels1_H1_G Ka Fn: (none)

PWP Fn: (none) KS Fn: (none)

Cyc. Num. Fn: (none)

Damping Ratio

☐ Constant:

☒ Function: Castels1_H1_D ☐ Use steady-state strength when liquefied

Steady-state strength (Css): 0 kPa


Collapse surface angle: 0 °

Gmax

☒ Constant: 112000 kPa

☐ Function: (none)

Tabella 2.2.a – Cava Ghiarella - Curve dinamiche e Pesì di volume (Copertura)

Name: Base Color:  Set...

Dynamic

Material Model: Equivalent Linear

Unit Weight: 19 kN/m³ C': 5 kPa

Poisson's Ratio: 0.38 Phi': 25 °

☐ Specify Insitu Ko: 0.61290323

G Reduction Fn: Castels1_H2_G Ka Fn: (none)

PWP Fn: (none) KS Fn: (none)

Cyc. Num. Fn: (none)

Damping Ratio

☐ Constant:

☒ Function: Castels1_H2_D ☐ Use steady-state strength when liquefied

Steady-state strength (Css): 0 kPa

Collapse surface angle: 0 °

Gmax

☒ Constant: 198000 kPa

☐ Function: (none)

Tabella 2.2.b – Cava Ghiarella - Curve dinamiche e Pesì di volume (Base)

Name: Base Ovest Color: █ Set...

Dynamic

Material Model: Equivalent Linear

Unit Weight: 19 kN/m³ C': 5 kPa

Poisson's Ratio: 0.38 Phi': 25 °

☐ Specify Insitu Ko: 0.61290323

G Reduction Fn: CastelS1_H2_G Ka Fn: (none)

PWP Fn: (none) KS Fn: (none)

Cyc. Num. Fn: (none)

Damping Ratio

☐ Constant:

☒ Function: CastelS1_H2_D ☐ Use steady-state strength when liquefied

Steady-state strength (Css): 0 kPa

Collapse surface angle: 0 °

Gmax

☒ Constant: 280000 kPa

☐ Function: (none)

Tabella 2.2.c – Cava Ghiarella - Curve dinamiche e Pesì di volume (Base Ovest)

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Soil Types						
Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Notes		
1 Limo con argilla	19.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			

Tabella 2.3 – Altolà - Curve dinamiche e Pesì di volume

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Soil Types						
Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Notes		
1 Argille limose	18.00	Argilla Limosa S.Carlo	Argilla Limosa S.Carlo			
2 Limi sabbiosi	19.00	Limi Sabbiosi /Lomb)	Limi Sabbiosi (Lomb)			
3 Limi con argille	18.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			
4 Limi con argille1	18.50	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			
5 Sabbie	19.00	Idriss (1990), Sand	Idriss (1990), Sand			
6 Limi con Argille2	19.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			

Tabella 2.4 – S.Anna - Curve dinamiche e Pesì di volume

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Soil Types						
Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Notes		
1 Limi con Argilla	19.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			
2 Limi sabbiosi	19.00	Limi Sabbiosi /Lomb)	Limi Sabbiosi (Lomb)			
3 Limi con argilla1	19.50	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			
4 Limi con argilla2	20.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1			

Tabella 2.5 – Graziosa Nord - Curve dinamiche e Pesì di volume

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Soil Types						
	Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model		
1	Limi con Argilla	19.00	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1		
2	Sabbie limose	19.00	SabbiaLimosa_S.Carlo	SabbiaLimosa_S.Carlo		
3	Limi con Argilla1	19.50	Limo con argilla CastelfrS1_SH1	Limo con argilla CastelfrS1_SH1		

Tabella 2.6 – Graziosa Sud - Curve dinamiche e Pesì di volume

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Soil Types						
	Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G_max Model	Damping Model	Notes	
1	Argilla Limosa	18.50	Argilla Limosa S.Carlo	Argilla Limosa S.Carlo		
2	Argilla Limosa1	19.00	Argilla Limosa S.Carlo	Argilla Limosa S.Carlo		
3	Limi con Argilla	19.00	LimoConArgilla_Mirandola4	LimoConArgilla_Mirandola4		
4	Sabbie Limose	19.50	SabbiaLimosa_S.Carlo	SabbiaLimosa_S.Carlo		
5	Limi con Argilla2	19.50	LimoConArgilla_Mirandola4	LimoConArgilla_Mirandola4		
6	Ghiaie	20.00	Ghiaie (Rollins)	Ghiaie (Rollins)		
7	Limi con Argilla3	20.50	LimoConArgilla_Mirandola4	LimoConArgilla_Mirandola4		
8	Ghiaie1	21.00	Ghiaie (Rollins)	Ghiaie (Rollins)		

Tabella 2.7 – Via Emilia - Curve dinamiche e Pesì di volume

In sintesi si espongono di seguito (Tabelle 3) i profili dei modelli stratigrafici e di velocità utilizzati per le verticali prima descritte.

Si evidenzia che la situazione morfologica di cui alla verticale “Ghiarella” (ex Cava di ghiaia risistemata mediante parziale ritombamento), richiede l'utilizzo di un modello bi-dimensionale (2D).

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Spec
Site Profile				
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	2.80	Limo con Argilla	170.00
2	2.80	2.20	Limo con Argilla sabbiosa	330.00
3	5.00	Half-Space	Bedrock	440.00

Tabella 3.1 – Modello Capoluogo

Per quanto riguarda la cava Ghiarella, non si riporta il dato tabellare in quanto trattasi di una valutazione RSL secondo un modello in configurazione 2D che si riporta in allegato alla presente relazione (Allegato 4). In questo caso il parametro Vs

viene “sostituito” dal “Modulo di rigidità al Taglio” Gmax.

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) Output				
Site Profile				
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	2.00	Limo con argilla	170.00
2	2.00	1.00	Limo con argilla	200.00
3	3.00	Half-Space	Bedrock	420.00

Tabella 3.2 – Modello Altolà

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) Output				
Site Profile				
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	2.00	Argille limose	180.00
2	2.00	2.00	Limi con argille	135.00
3	4.00	5.00	Limi con argille1	160.00
4	9.00	1.00	Sabbie	190.00
5	10.00	1.50	Limi con Argille2	195.00
6	11.50	3.00	Limi sabbiosi	200.00
7	14.50	11.50	Limi con Argille2	210.00
8	26.00	Half-Space	Bedrock	580.00

General Settings Soil Types Soil Profile Motion(s) Output

Site Profile				
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	6.50	Limi con Argilla	150.00
2	6.50	1.00	Limi sabbiosi	185.00
3	7.50	1.00	Limi con argilla1	175.00
4	8.50	1.00	Limi con argilla2	214.00
5	9.50	2.50	Limi con argilla1	175.00
6	12.00	Half-Space	Bedrock	300.00

Tabella 3.3 – Modello Sant’Anna

General Settings		Soil Types		Soil Profile		Motion(s)		Output	
Site Profile									
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type		Vs (m/s)				
1	0.00	6.50	Limi con Argilla		150.00				
2	6.50	0.50	Limi sabbiosi		185.00				
3	7.00	2.00	Limi con argilla1		175.00				
4	9.00	Half-Space	Bedrock		310.00				

Tabella 3.4 – Modello Graziosa Nord

General Settings		Soil Types		Soil Profile		Motion(s)		Output	
Site Profile									
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type		Vs (m/s)				
1	0.00	8.00	Limi con Argilla		150.00				
2	8.00	0.50	Sabbie limose		170.00				
3	8.50	3.00	Limi con Argilla1		190.00				
4	11.50	Half-Space	Bedrock		350.00				

Tabella 3.5 – Modello Graziosa Sud

General Settings		Soil Types		Soil Profile		Motion(s)		Output	
Site Profile									
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type		Vs (m/s)				
1	0.00	2.00	Argilla Limosa		175.00				
2	2.00	7.00	Argilla Limosa		170.00				
3	9.00	1.00	Limi con Argilla		190.00				
4	10.00	4.00	Argilla Limosa1		190.00				
5	14.00	4.00	Limi con Argilla		190.00				
6	18.00	1.50	Argilla Limosa1		190.00				
7	19.50	1.50	Limi con Argilla		200.00				
8	21.00	5.00	Sabbie Limose		270.00				
9	26.00	10.00	Limi con Argilla2		230.00				
10	36.00	5.00	Ghiaie		350.00				
11	41.00	56.50	Limi con Argilla3		350.00				
12	97.50	3.50	Ghiaie1		500.00				
13	101.00	19.00	Limi con Argilla3		450.00				
14	120.00	Half-Space	Bedrock		700.00				

Tabella 3.6 – Modello Via Emilia

Per la valutazione del moto sismico in superficie si è proceduto, ad esclusione della verticale “Ghiarella”, implementando il codice di calcolo 1D (ricorrendone nel nostro caso le condizioni di validità) STRATA (was written da Albert Kottke working with Professor Ellen Rathie at Teh University of Texas at Austin – Version 0.5.5-97ca19c).

Per la verticale “Ghiarella” è stata invece approntata una modellazione della risposta sismica locale in configurazione 2D per mezzo del codice di calcolo Quake/W.

Per quanto riguarda i segnali sismici di riferimento, come già anticipato a inizio capitolo, sono stati utilizzati quelli allegati alla DGR n. 476 del 12/04/2021 della RER, riferiti a un tempo di ritorno di 475 anni, già scalati con i valori della pericolosità sismica di base:

	Altola	Capoluogo e Ghiarella	Graziosa Sud	Graziosa Nord	S.Anna	Via Emilia
a _{base} (g)	0.1642	0.1613	0.1642	0.1642	0.1642	0.1642

In particolare, tali input sismici, costituiti da un Gruppo di n. 7 accelerogrammi

spettrocompatibili agli spettri delle NTC2018, sono relativi a n. 3 nodi del reticolo di riferimento del NTC2018 (DM 17/01/2018): ID 16282; ID 16504 e ID 16726 (Figura 32); questi sono attribuiti alle 7 verticali di approfondimento, come riportato nella precedente Tabella 1.

Sono stati quindi calcolati gli spettri di risposta in accelerazione al *bedrock* (Figure 33-39) e in superficie (Figure 40-46), nonché il loro confronto mediante il rapporto spettrale in accelerazione (Figure 47-53).

Va precisato che per quanto riguarda la verticale “Ghiarella”, non trattandosi di un punto in superficie (1D) ma di una spezzata (2D), per caratterizzare i segmenti sismicamente significativi (sommità e piede scarpate; piano campagna ribassato) sono stati analizzati n. 5 punti della sezione (Allegato 4) afferente alla verticale stessa: H51 e H52 (sommità scarpate rispettivamente Ovest ed Est); H7 e H23 (rispettivamente piede scarpata Ovest ed Est); H18 (piano di campagna ribassato). Gli spettri di risposta in accelerazione in superficie saranno quindi 5 così come il loro rapporto spettrale “superficie/bedrock”.

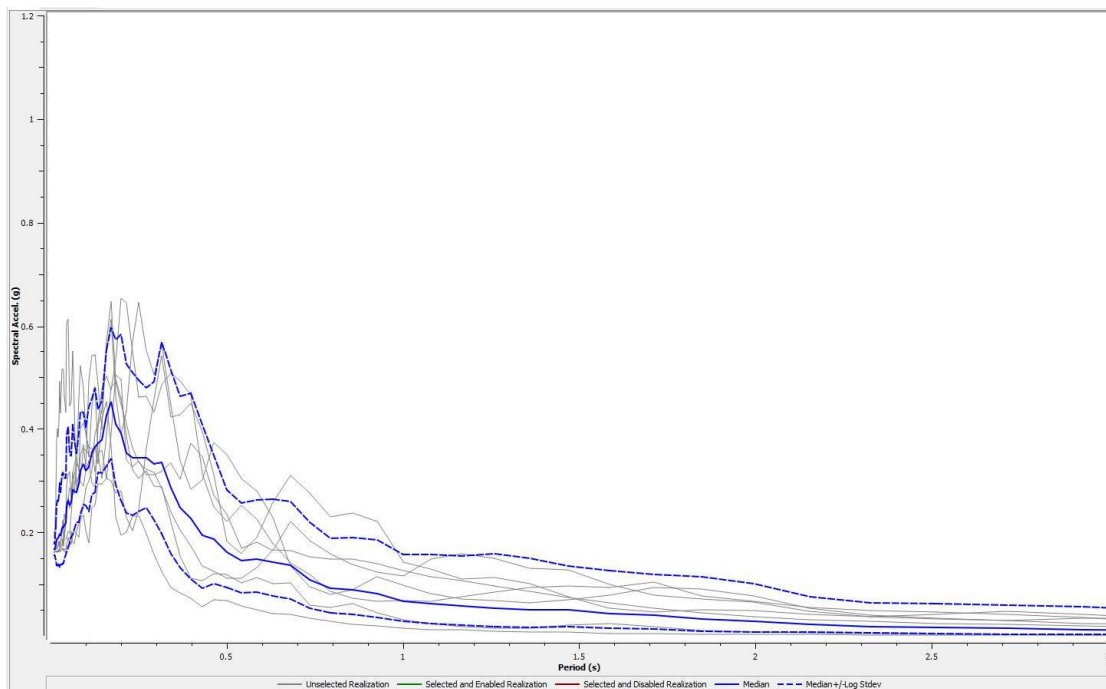


Figura 33 – Capoluogo - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

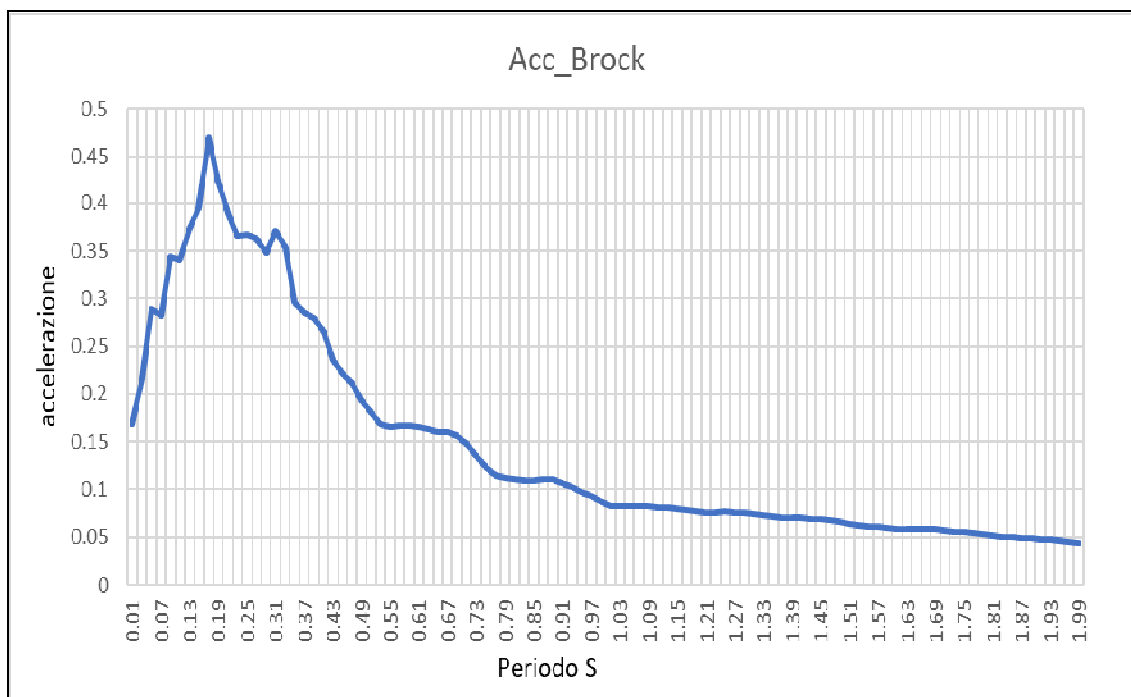


Figura 34 – Ghiarella - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

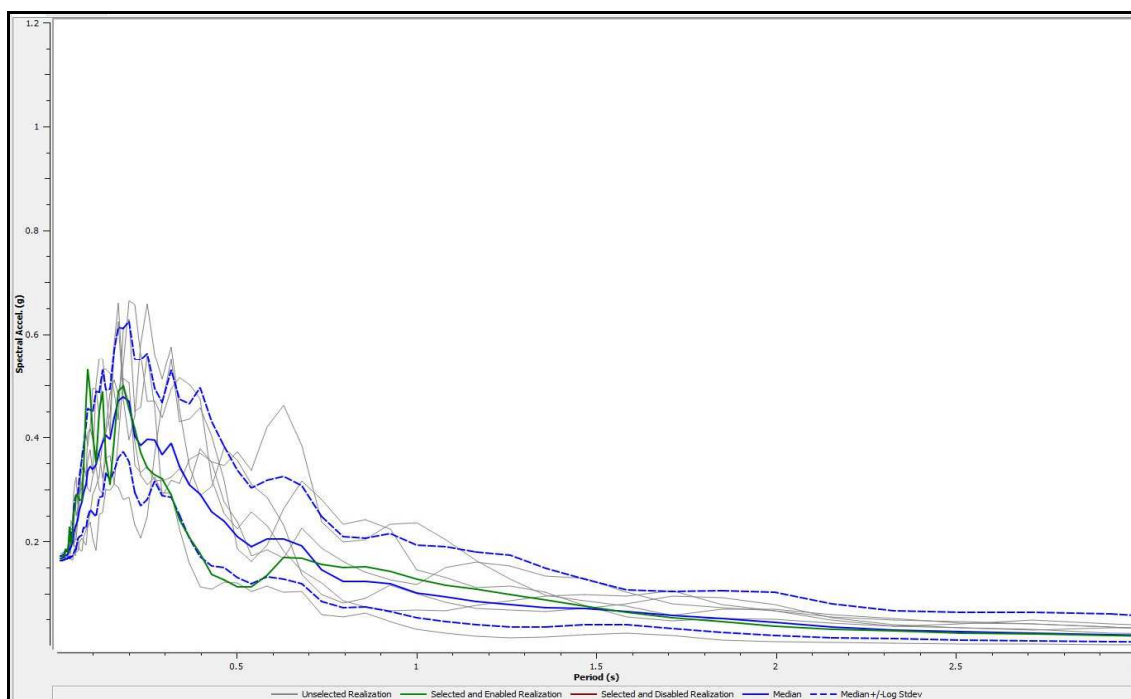


Figura 35 - Altolà - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

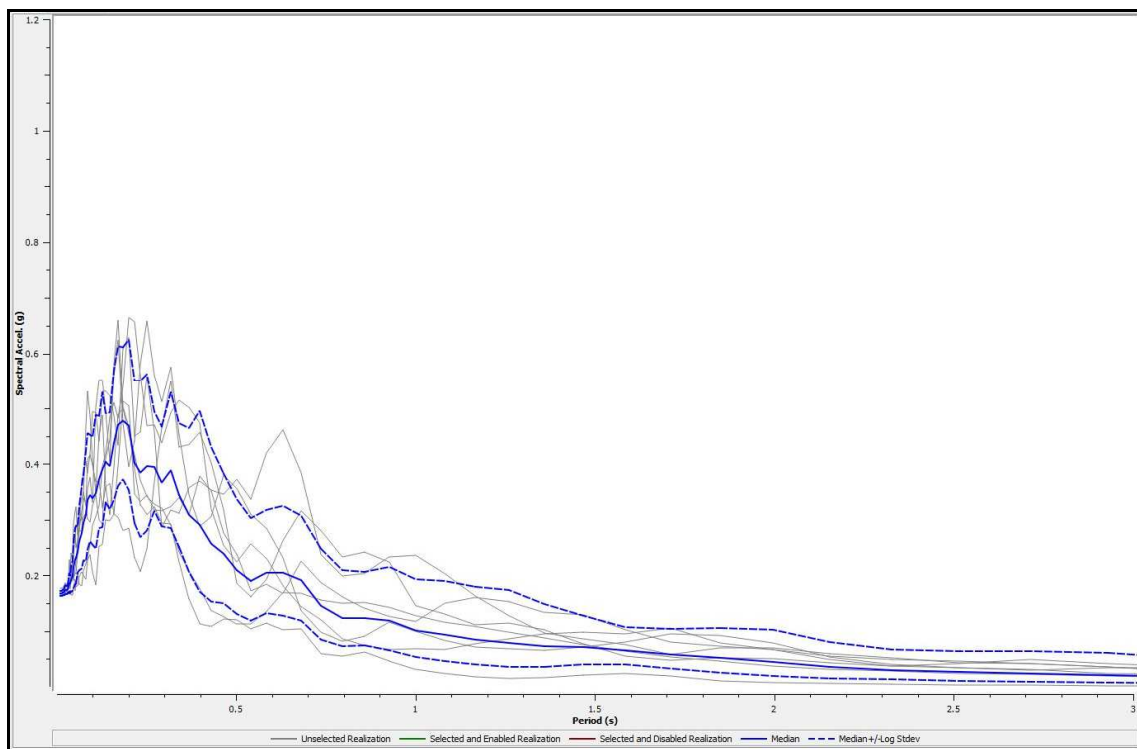


Figura 36 – Sant'Anna - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

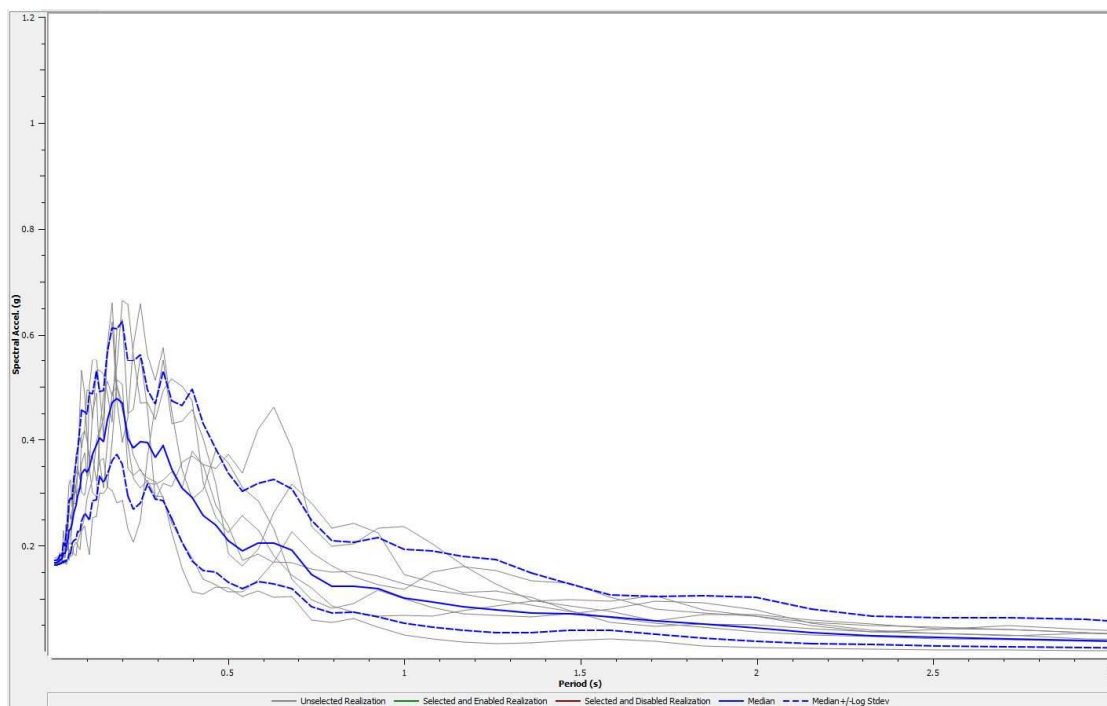


Figura 37 - Graziosa Nord - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

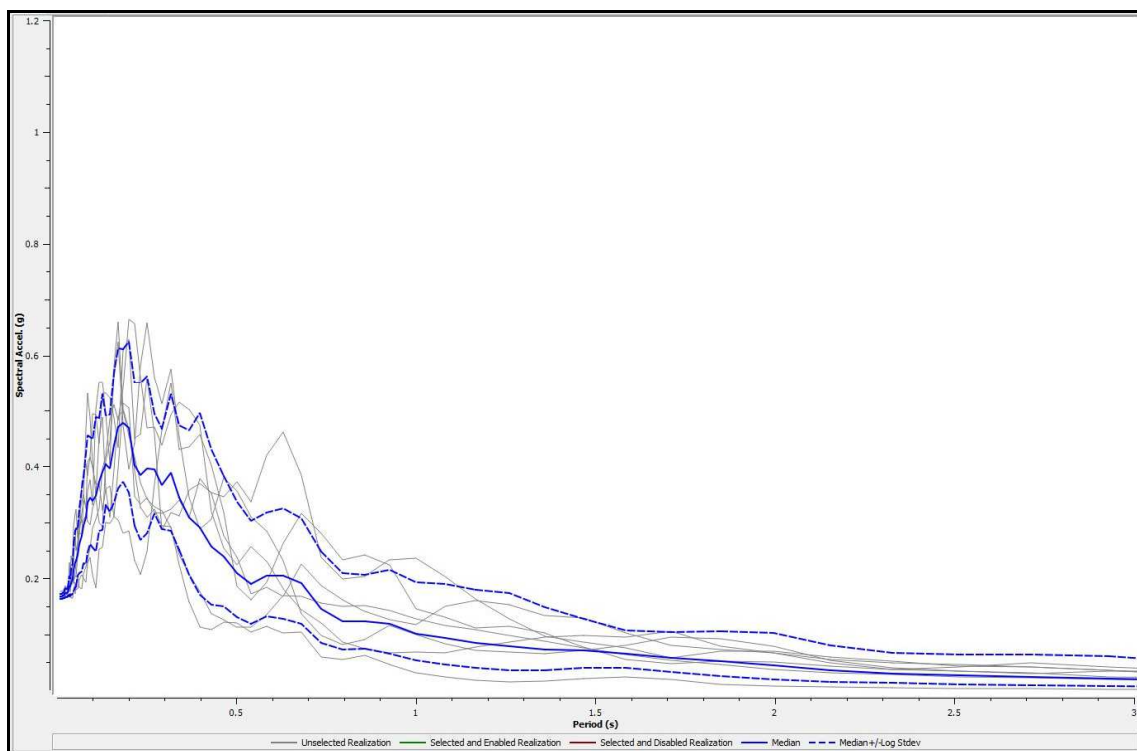


Figura 38 – Graziosa Sud - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

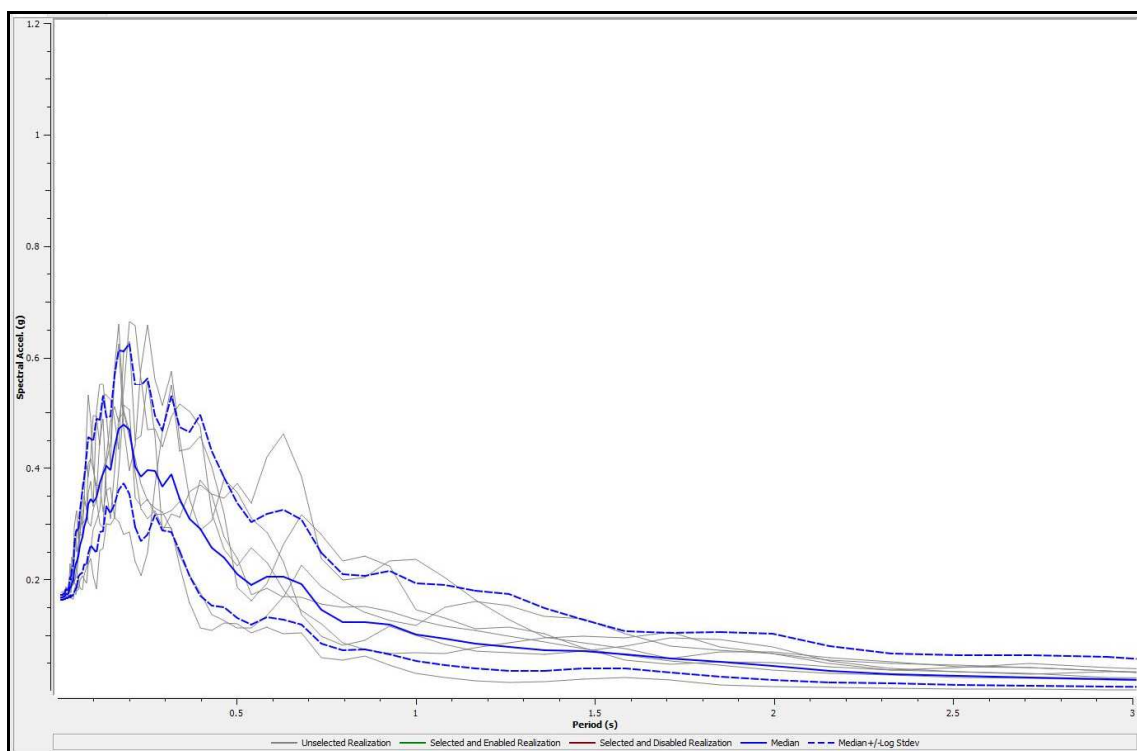


Figura 39 – Via Emilia - Spettro di risposta in accelerazione al Bedrock.

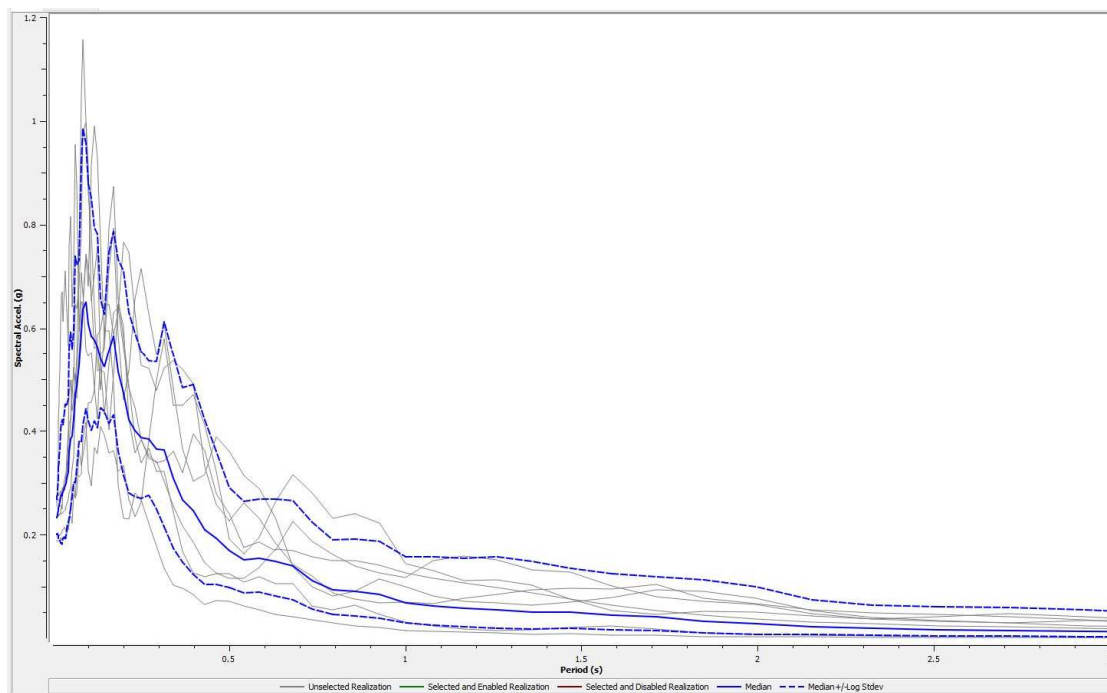


Figura 40 – Capoluogo - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

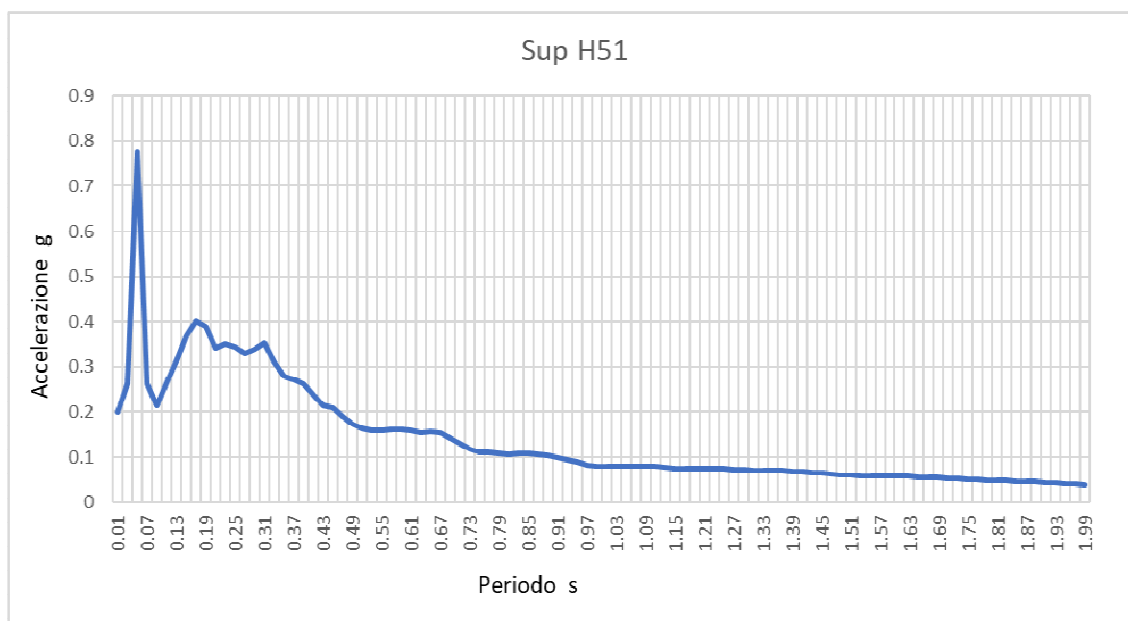


Figura 41/1- Ghiarella punto H52 - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

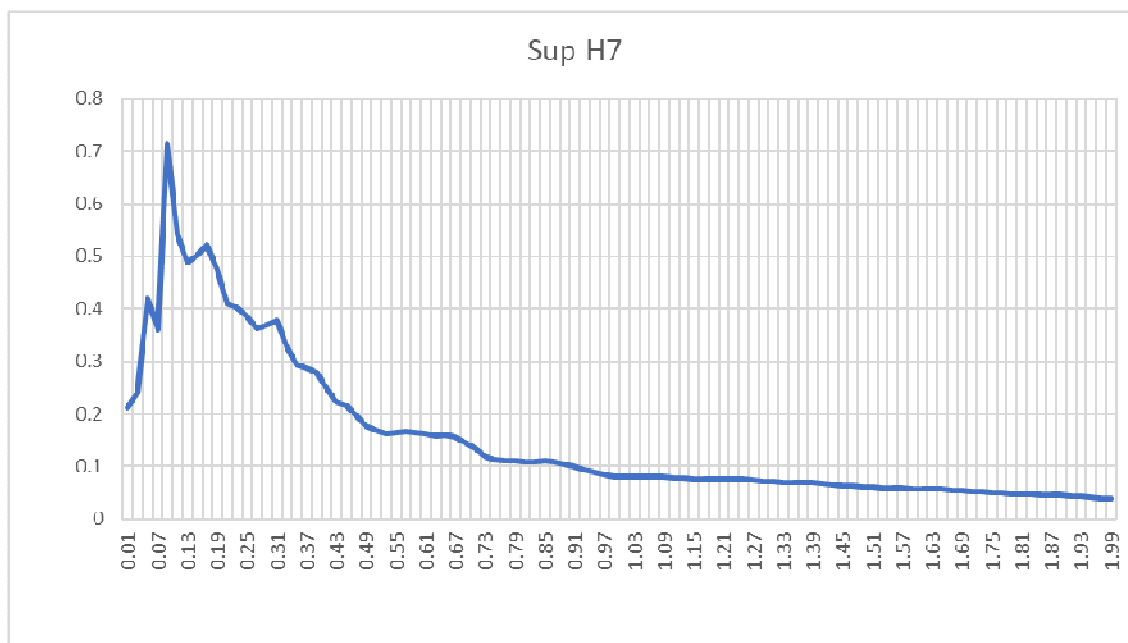


Figura 41/2 - Ghiarella punto H7 - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

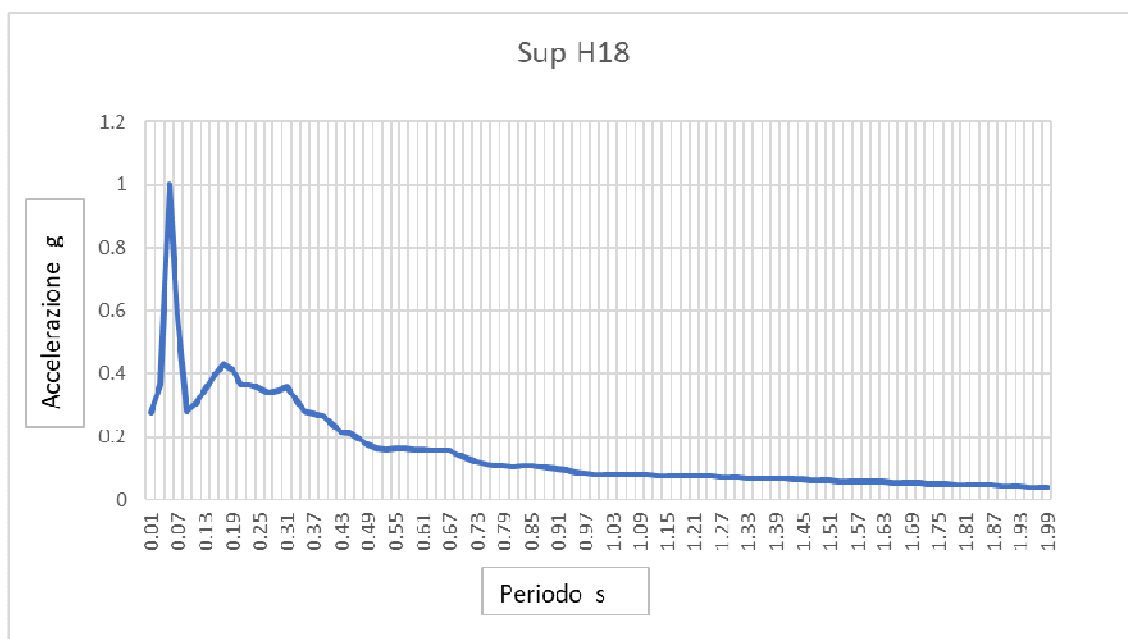


Figura 41/3 - Ghiarella punto 18 - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

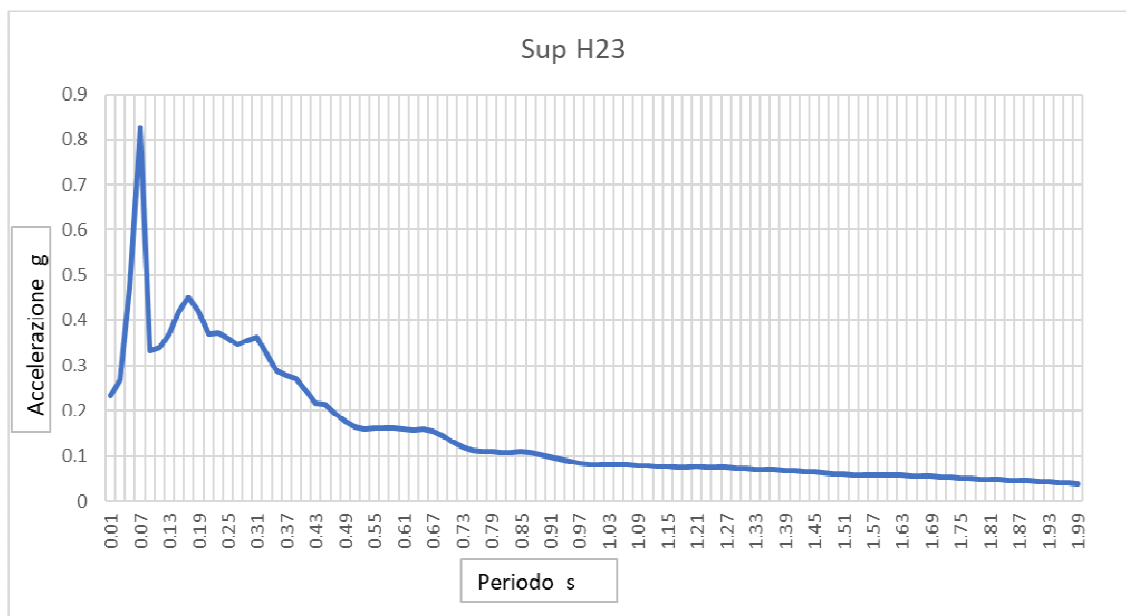


Figura 41/4 - Ghiarella punto 18 - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

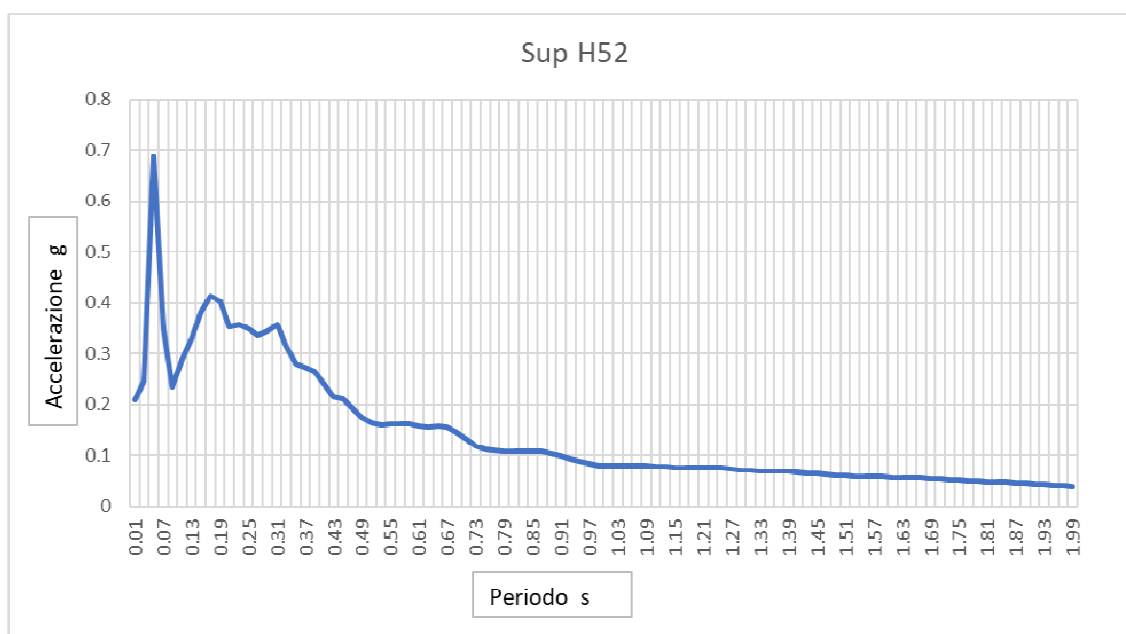


Figura 41/5- Ghiarella punto H52 - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

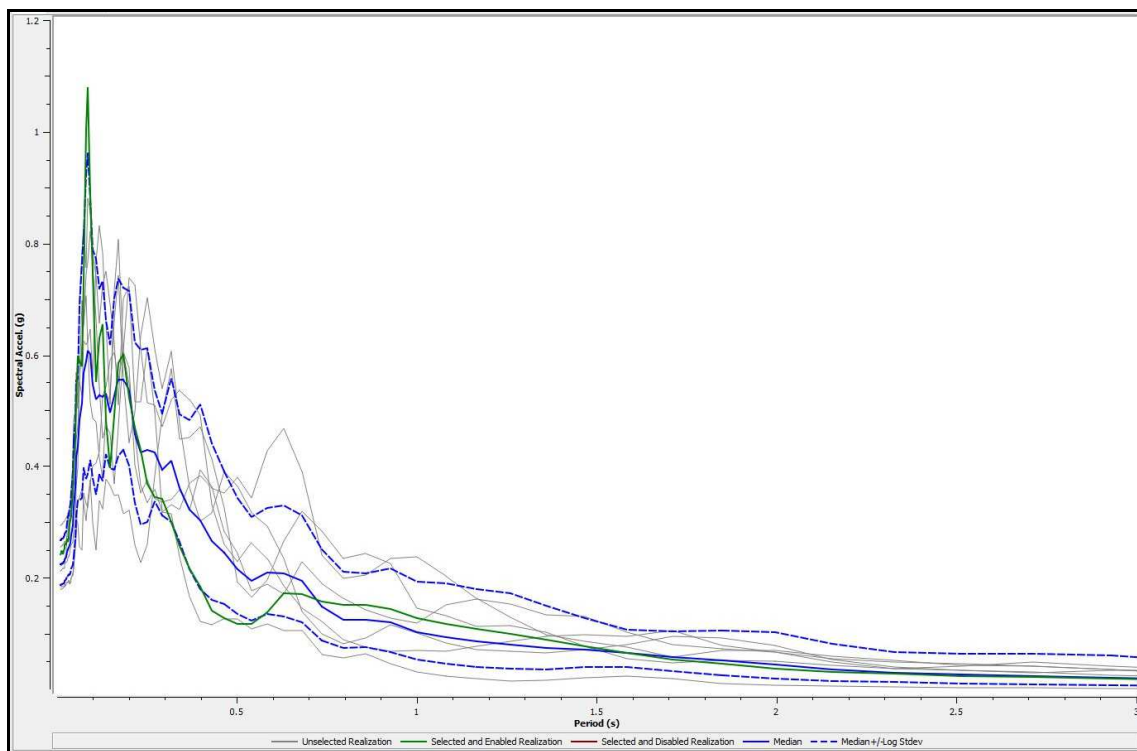


Figura 42- Altola - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

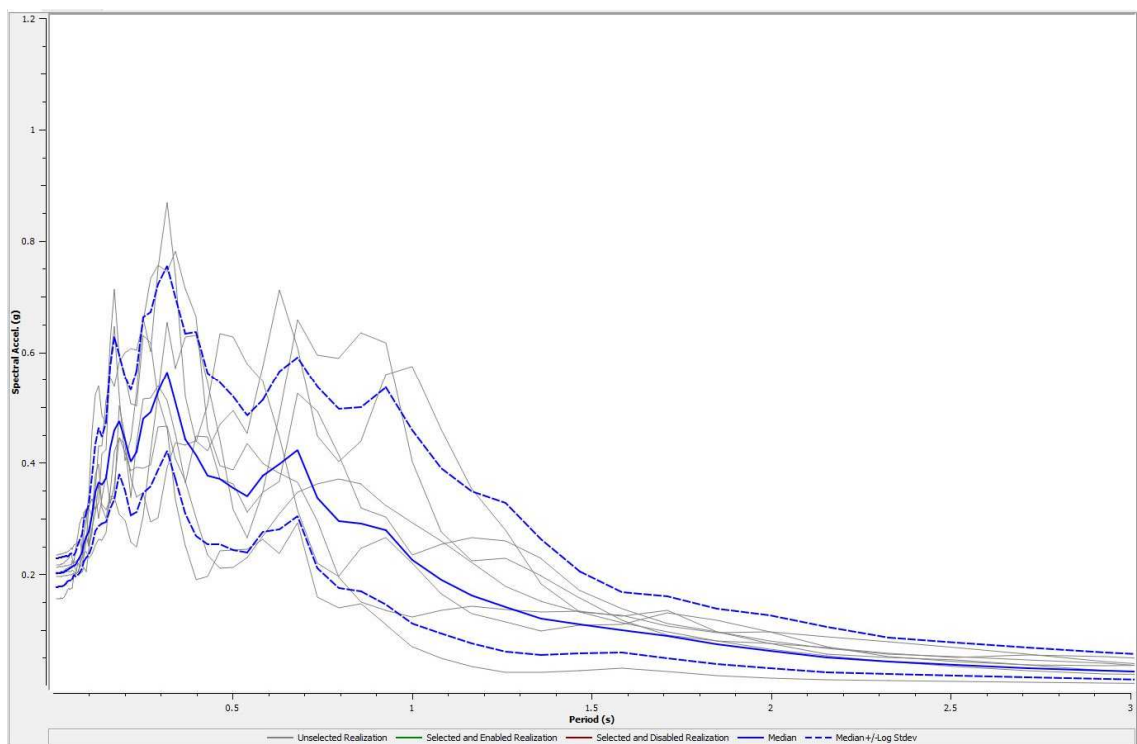


Figura 43- Sant'Anna - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

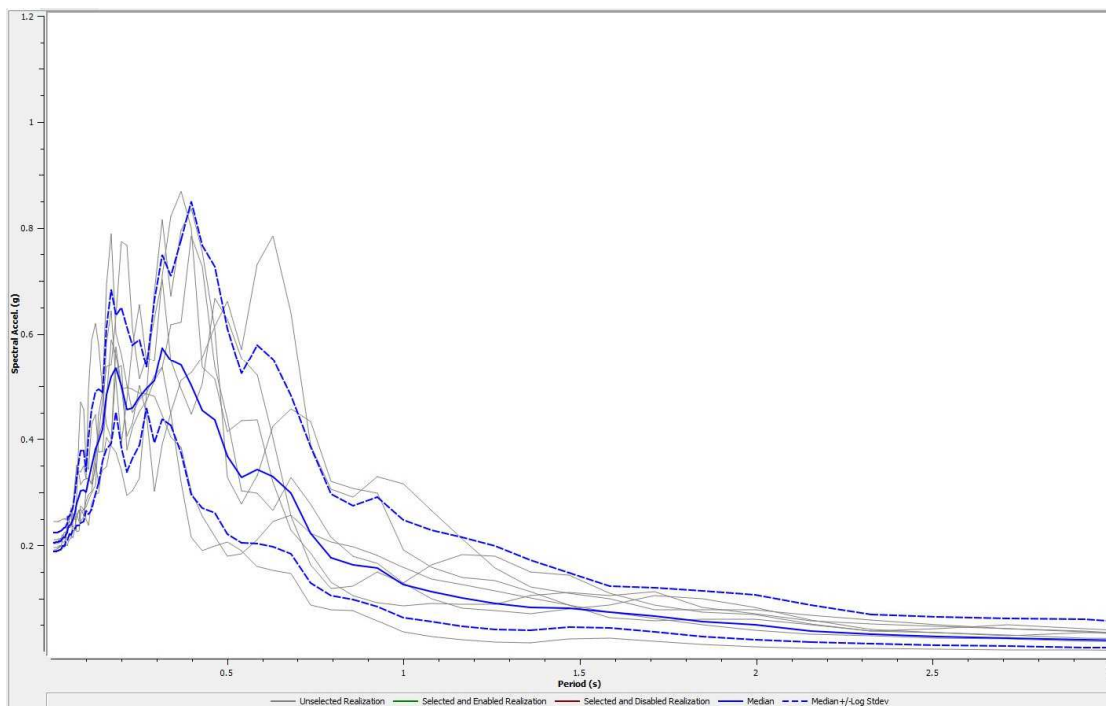


Figura 44- Graziosa Nord - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

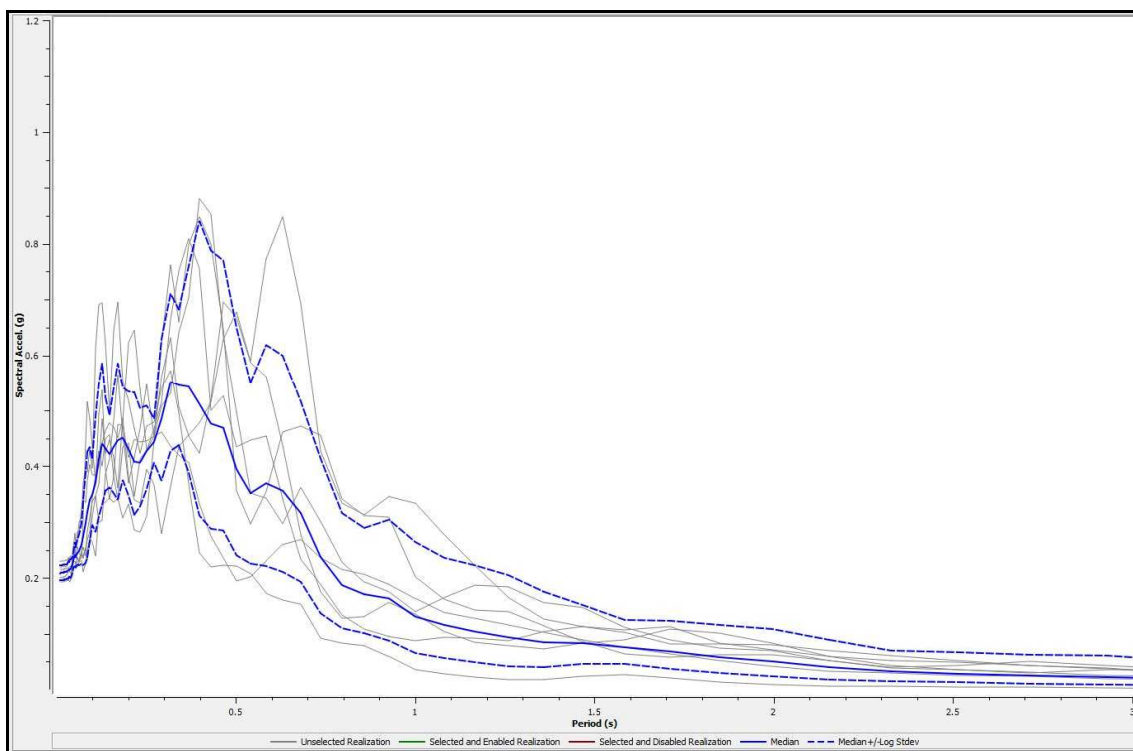


Figura 45- Graziosa Sud - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

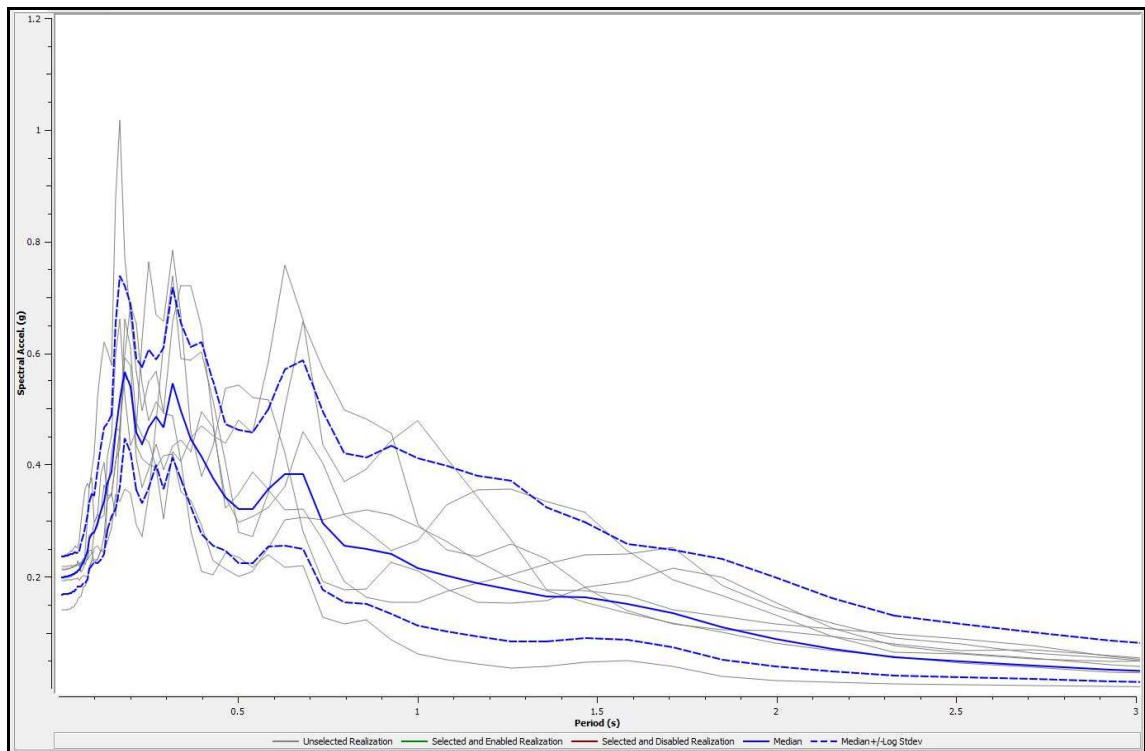


Figura 46- Via Emilia - Spettro di risposta in accelerazione in superficie.

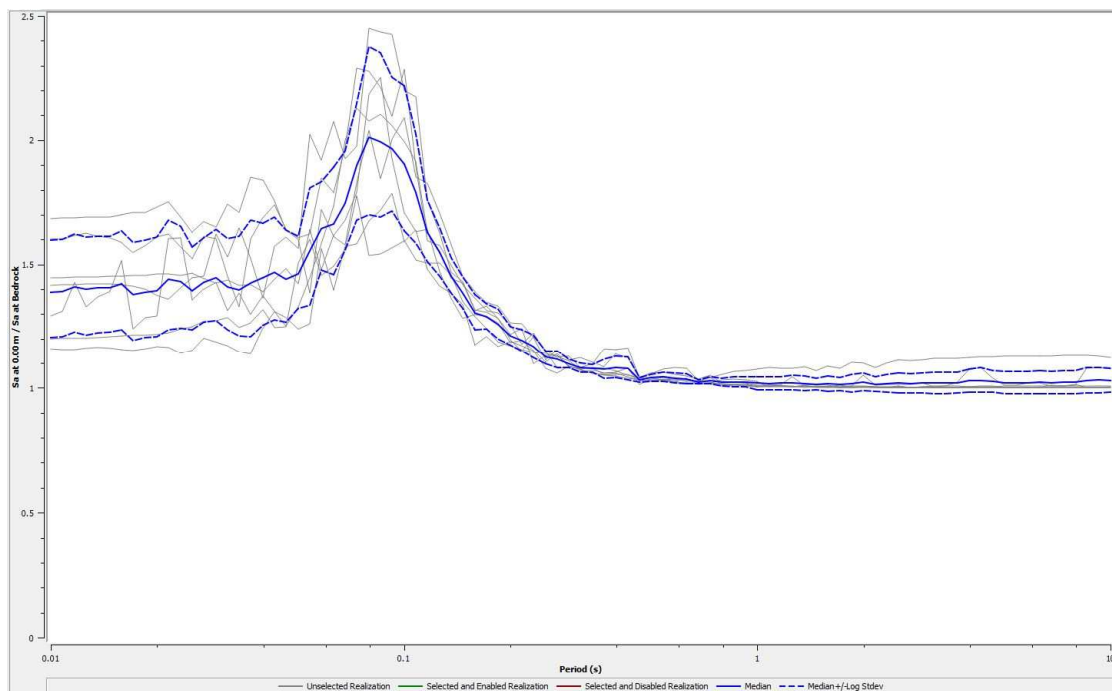


Figura 47- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Capoluogo.

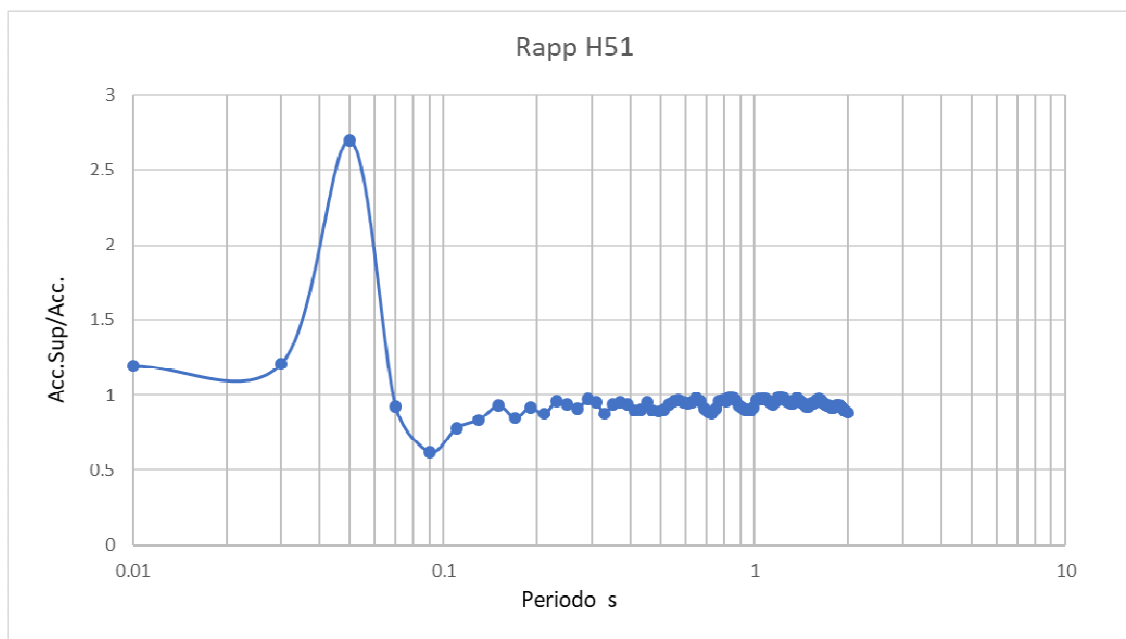


Figura 48/1- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Ghiarella punto H51.

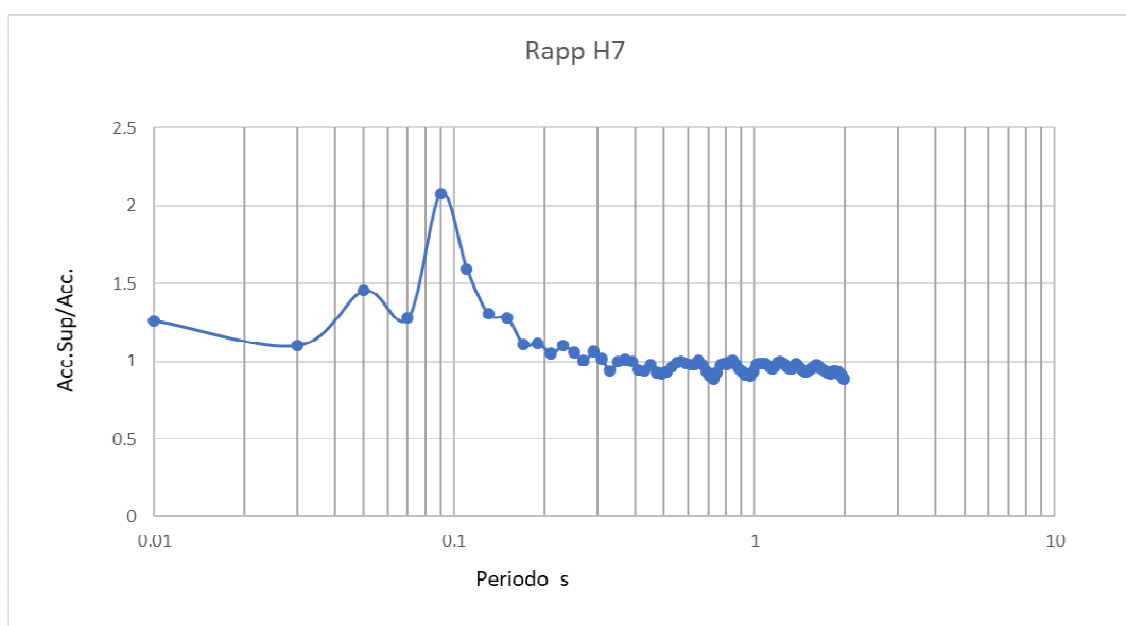


Figura 48/2- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Ghiarella punto H7.

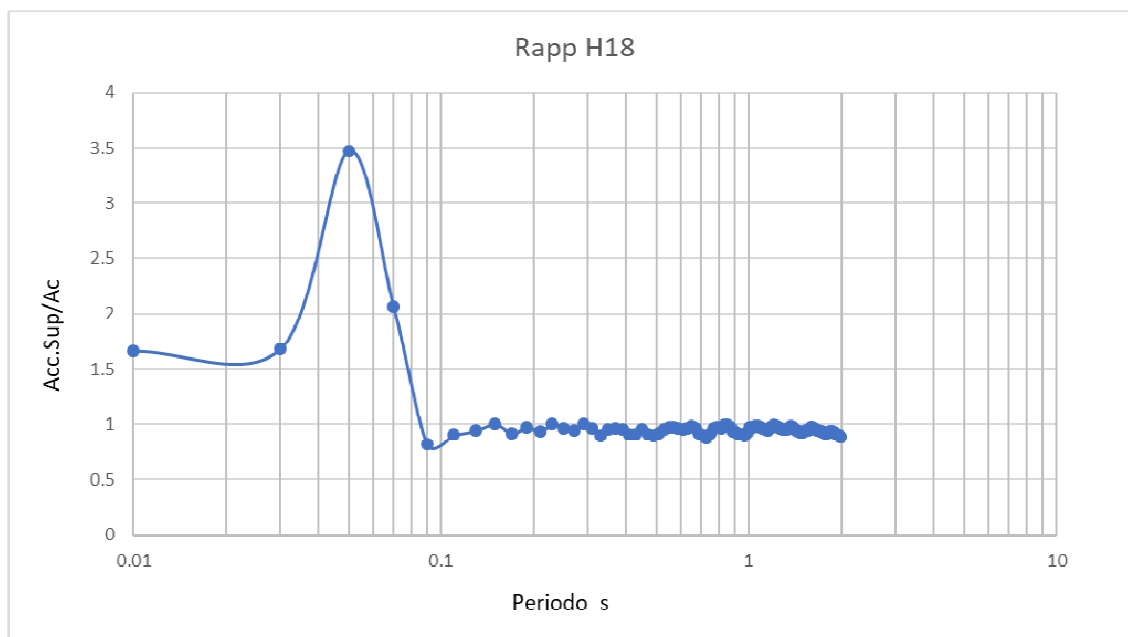


Figura 48/3- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Ghiarella punto H18.

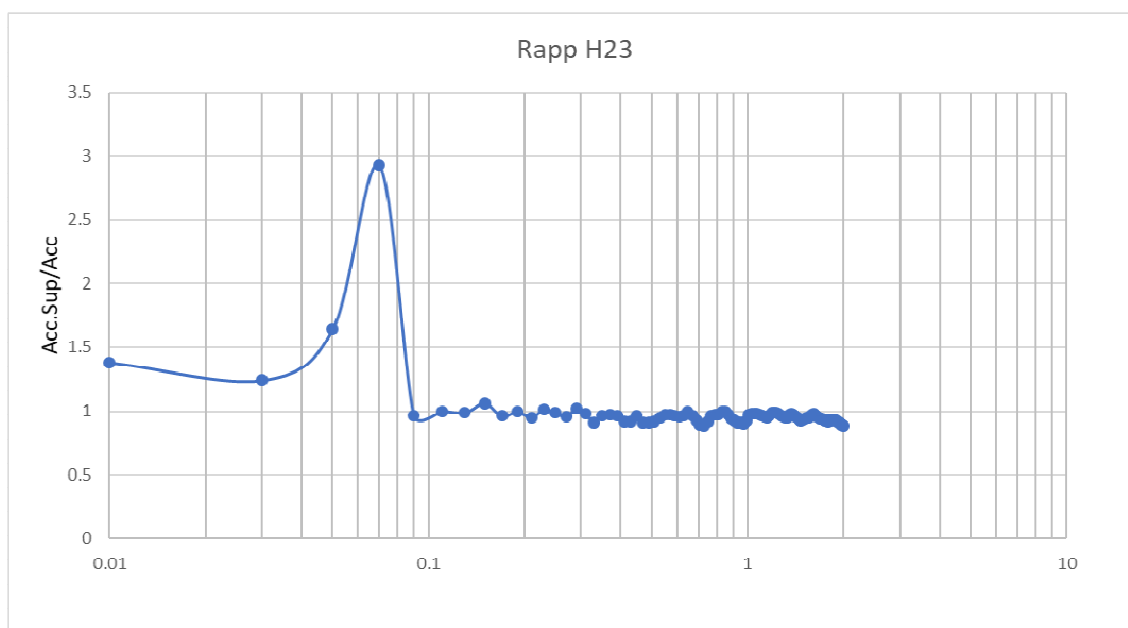


Figura 48/4- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Ghiarella punto H23.

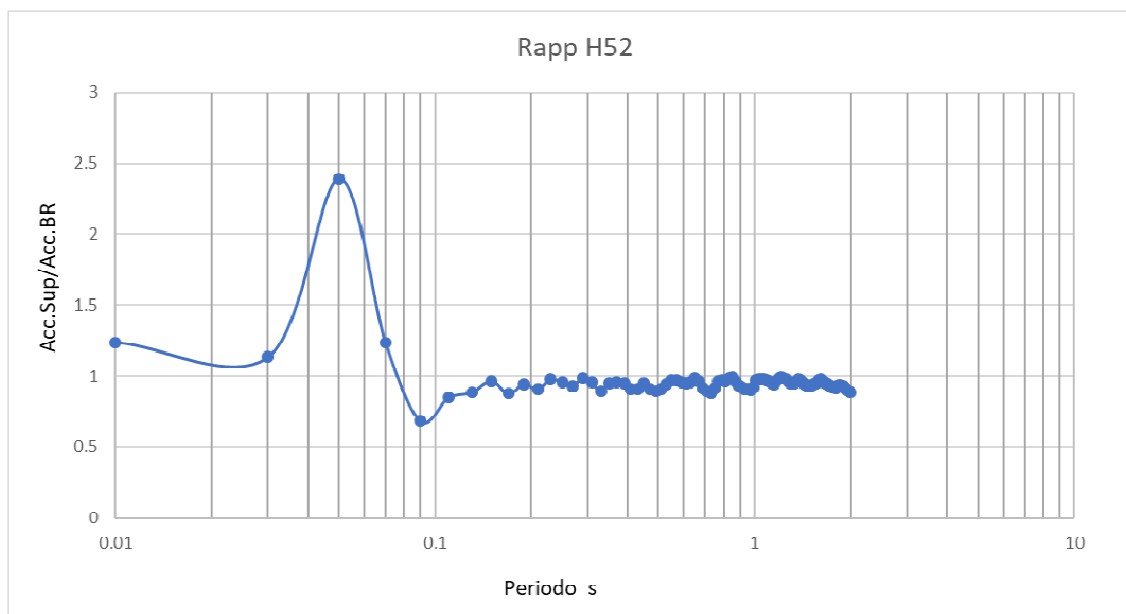


Figura 48/5- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Ghiarella punto H52.

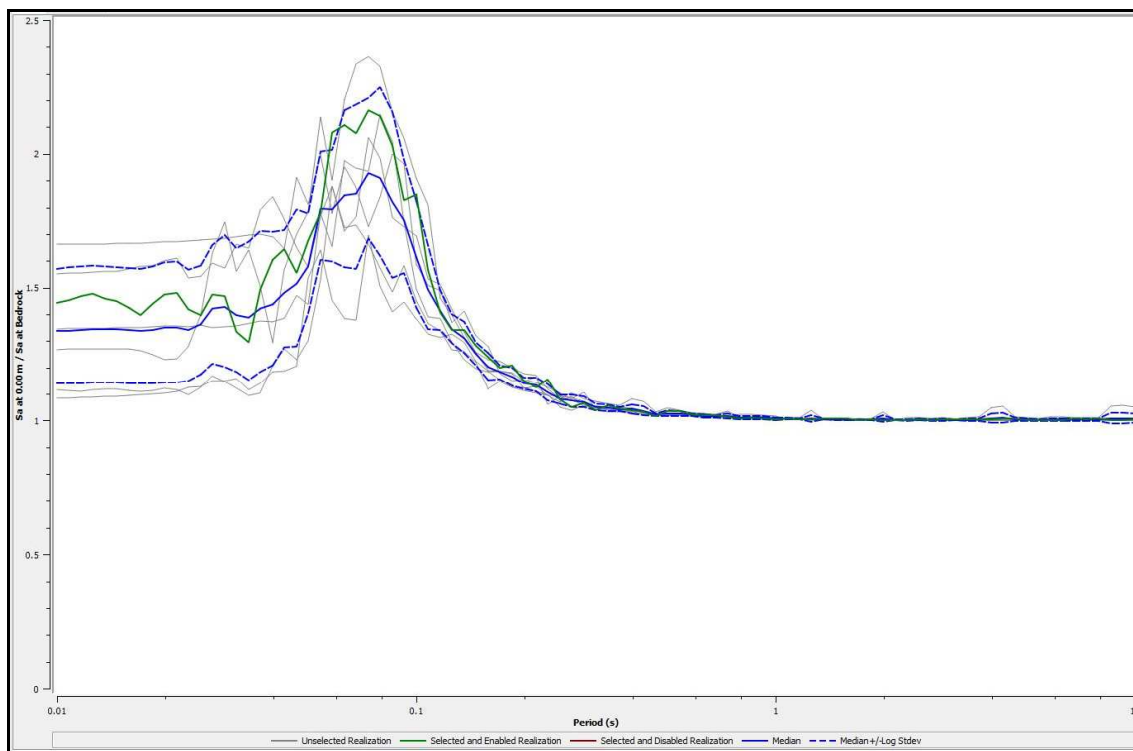


Figura 49-- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Altolà.

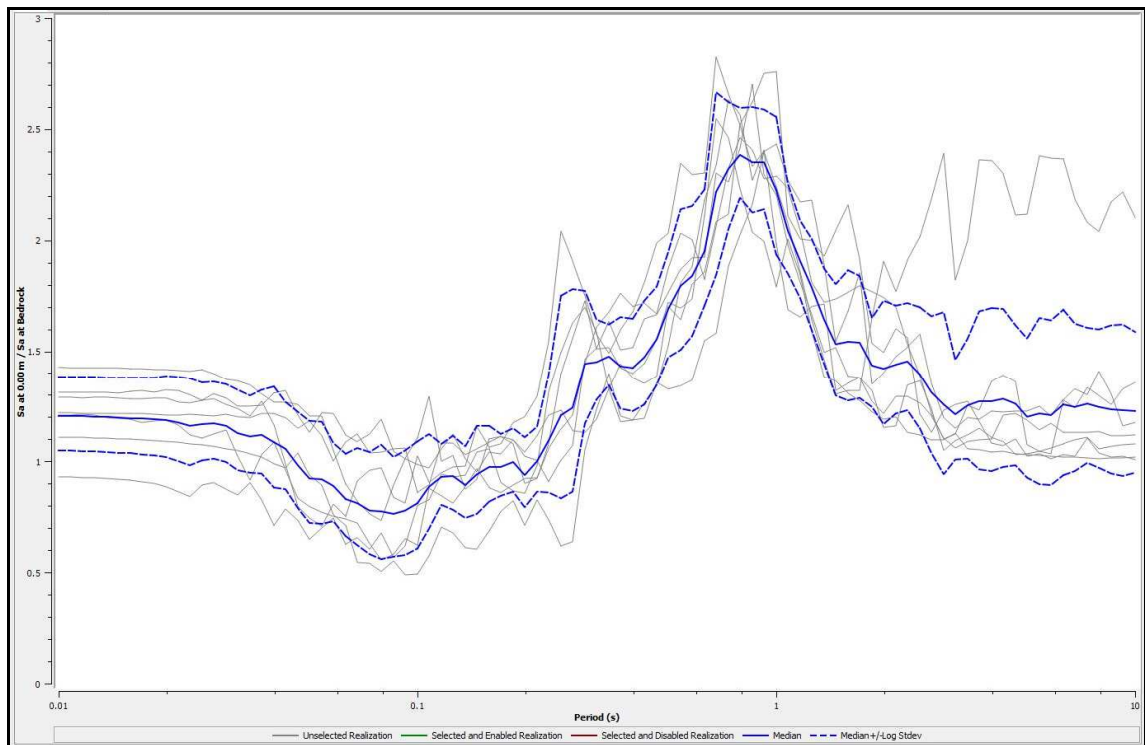


Figura 50-- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Sant'Anna.

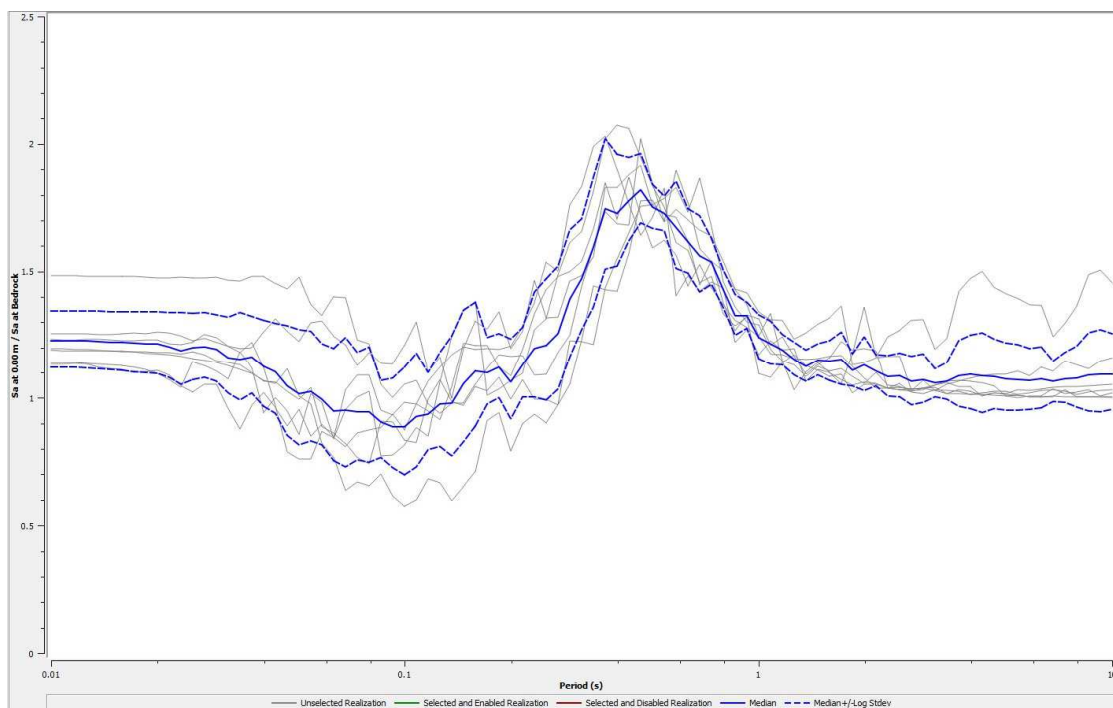


Figura 51 - Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Graziosa Nord.

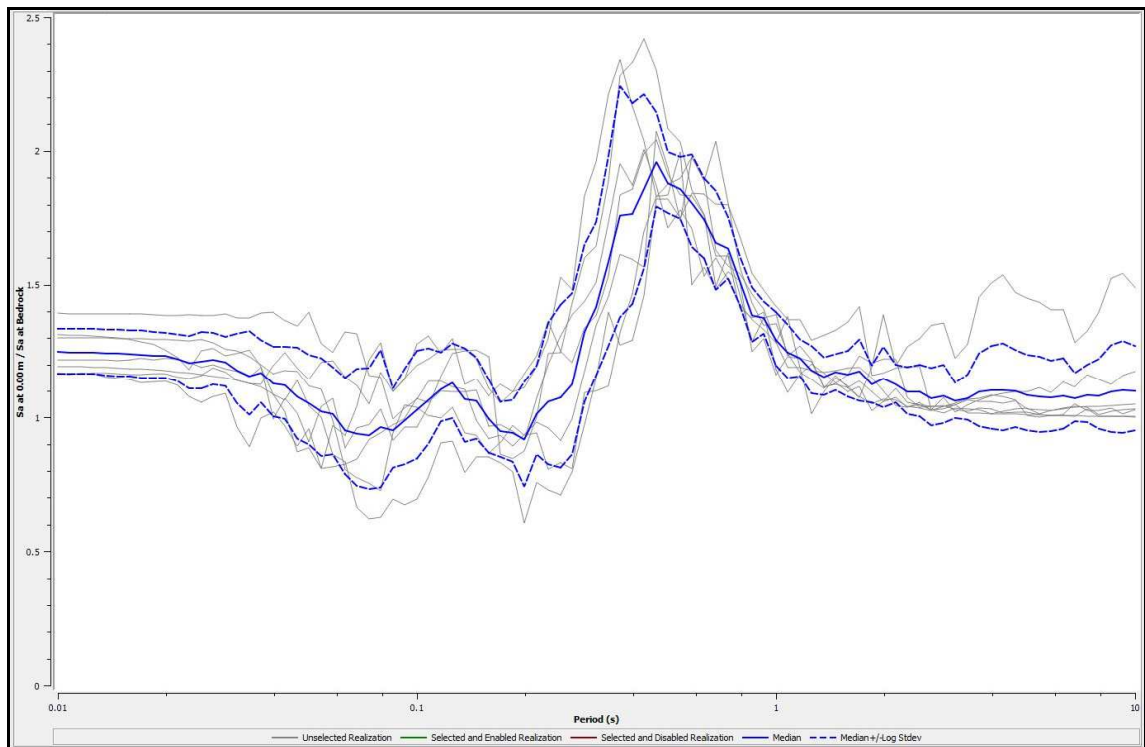


Figura 52-- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Graziosa Sud.

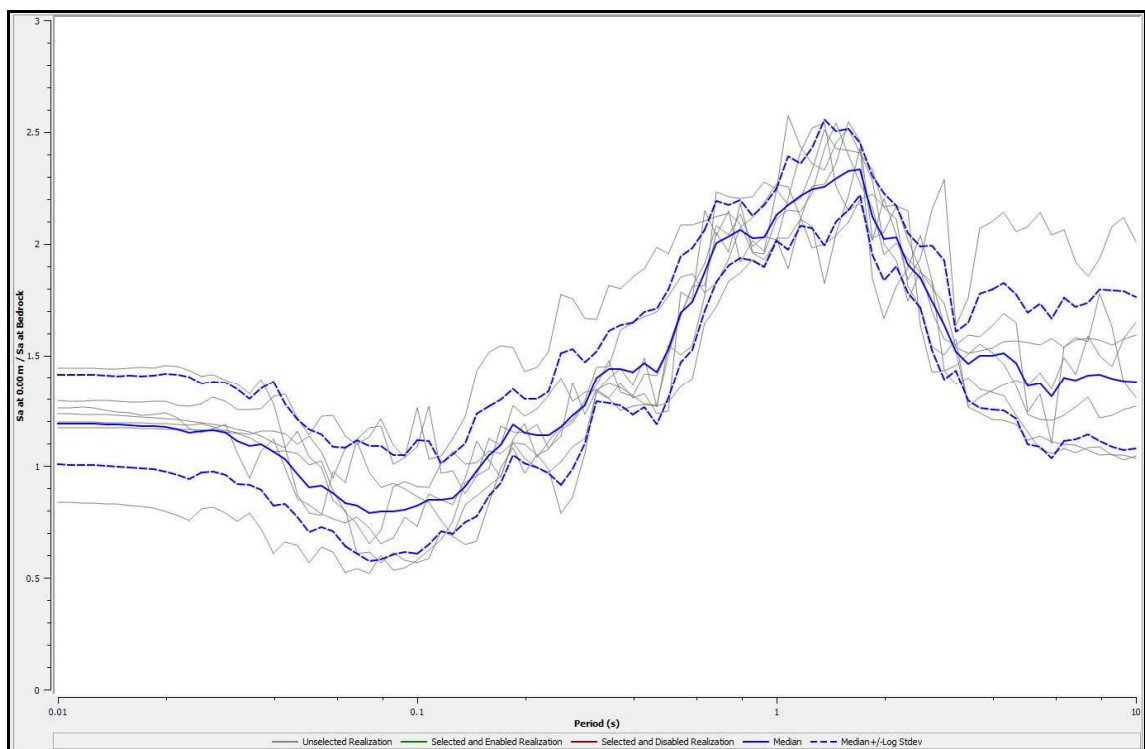


Figura 53-- Rapporto spettrale in accelerazione Bedrock/Superficie in Via Emilia.

Dai valori numerici di questi rapporti spettrali sono stati ottenuti i seguenti fattori di amplificazione (Tabelle 3 e 3bis per “Ghiarella”):

	Altolà	Capoluogo	Graziosa Sud	Graziosa Nord.	<u>S. Anna</u>	Via Emilia
FA (PGA) in <u>accell.</u> T=0	1.30	1.39	1.25	1.23	1.20	1.19
FA in <u>accell.</u> <u>vari.</u> <u>range</u> di T						
SA1 (0,1÷0,5 s)	1.18	1.29	1.22	1.24	1.14	1.15
SA2 (0,4÷0,8 s)	1.03	1.05	1.79	1.68	1.8	1.68
SA3 (0,7÷1,1 s)	1.01	1.02	1.47	1.40	2.28	2.05
SA4 (0,5÷1,5 s)	1.02	1.03	1.57	1.48	2.01	1.94
FH in <u>velocità</u> <u>vari.</u> <u>range</u> di T (intensità di <u>Housner</u>)						
SI1 (0,1÷0,5 s)	1.13	1.20	1.35	1.37	1.24	1.24
SI2 (0,5÷1 s)	1.02	1.03	1.62	1.52	2.11	1.91
SI3 (0,5÷1,5 s)	1.01	1.03	1.49	1.41	2.01	2.01

Tabella 3 - Fattori di amplificazione

	H51	H7	H18	H23	H52
FA (PGA) in <u>accell.</u> T=0	1.20	1.26	1.66	1.38	1.24
FA in <u>accell.</u> <u>vari.</u> <u>range</u> di T					
SA1 (0,1÷0,5 s)	0.99	1.18	1.03	1.06	1.00
SA2 (0,4÷0,8 s)	1.09	1.12	1.09	1.1	1.09
SA3 (0,7÷1,1 s)	1.18	1.19	1.18	1.19	1.18
SA4 (0,5÷1,5 s)	1.18	1.20	1.19	1.19	1.19
FH in <u>velocità</u> <u>vari.</u> <u>range</u> di T (intensità di <u>Housner</u>)					
SI1 (0,1÷0,5 s)	1.02	1.14	1.05	1.07	1.03
SI2 (0,5÷1 s)	1.13	1.15	1.13	1.14	1.13
SI3 (0,5÷1,5 s)	1.22	1.23	1.22	1.22	1.22

Tabella 3bis - Fattori di amplificazione per la verticale "Ghiarella"

7.2.3.3. Microzonazione della pericolosità sismica (HSM Hazard Seismic Microzonation)

Come previsto nell'Allegato A della DGR 476/2021, nonché dalle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni” versione 2.0 del 2022, sono state elaborate quattro Carte di pericolosità sismica (Hazard Seismic Maps):

- Carta di pericolosità sismica H_{SM} , riferita all'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (Figura 53);
- Carta di pericolosità sismica H_{0408} , riferita all'intervallo di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$;
- Carta di pericolosità sismica H_{0711} , riferita all'intervallo di periodi $0,7s \leq T \leq 1,1s$;
- Carta di pericolosità sismica H_{0515} , riferita all'intervallo di periodi $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Le carte sono state elaborate utilizzando le tabelle numeriche degli spettri di risposta in accelerazione in *superficie* – *Output* (Figure.40÷46), ricostruiti mediante l'analisi di risposta sismica locale di cui al precedente cap. 7.2.3.2.

Dalle tabelle numeriche di tali spettri sono stati calcolati gli integrali dei periodi di riferimento poi divisi per il valore temporale (in secondi) del periodo stesso

Si riportano di seguito, sotto forma tabellare, le sintesi dei risultati ottenuti, poi utilizzati per la redazione dei relativi elaborati grafici di pericolosità sismica ricavati in corrispondenza delle verticali di riferimento per le verifiche di risposta sismica locale, delle quali si evince la localizzazione rispetto al territorio comunale nella Figura 38.

periodo	Δt (s)	HSM
Altola		
0,1÷0,5	0.4	0.4
0,4÷0,8	0.4	0.21
0,7÷1,1	0.4	0.12
0,5÷1,5	1	0.12

periodo	Δt (s)	HSM
Graziosa Sud		
0,1÷0,5	0.4	0.48
0,4÷0,8	0.4	0.36
0,7÷1,1	0.4	0.17
0,5÷1,5	1	0.18

periodo	Δt (s)	HSM
Capoluogo		
0,1÷0,5	0,4	0,37
0,4÷0,8	0,4	0,16
0,7÷1,1	0,4	0,09
0,5÷1,5	1	0,09

Via Emilia		
0,1÷0,5	0,4	0.44
0,4÷0,8	0,4	0.35
0,7÷1,1	0,4	0.25
0,5÷1,5	1	0.24

periodo	Δt (s)	HSM
H7		
0,1÷0,5	0,4	0.37
0,4÷0,8	0,4	0.17
0,7÷1,1	0,4	0.1
0,5÷1,5	1	0.1

periodo	Δt (s)	HSM
H18		
0,1÷0,5	0,4	0.32
0,4÷0,8	0,4	0.17
0,7÷1,1	0,4	0.1
0,5÷1,5	1	0.1

periodo	Δt (s)	HSM
Graziosa Nord		
0,1÷0,5	0,4	0,49
0,4÷0,8	0,4	0,34
0,7÷1,1	0,4	0,17
0,5÷1,5	1	0,17

S.Anna		
0,1÷0,5	0,4	0.44
0,4÷0,8	0,4	0.38
0,7÷1,1	0,4	0.28
0,5÷1,5	1	0.24

periodo	Δt (s)	HSM
H51		
0,1÷0,5	0,4	0.3
0,4÷0,8	0,4	0.16
0,7÷1,1	0,4	0.1
0,5÷1,5	1	0.1

periodo	Δt (s)	HSM
H23		
0,1÷0,5	0,4	0.33
0,4÷0,8	0,4	0.17
0,7÷1,1	0,4	0.1
0,5÷1,5	1	0.1

H52		
0,1÷0,5	0.4	0.31
0,4÷0,8	0.4	0.16
0,7÷1,1	0.4	0.1
0,5÷1,5	1	0.1

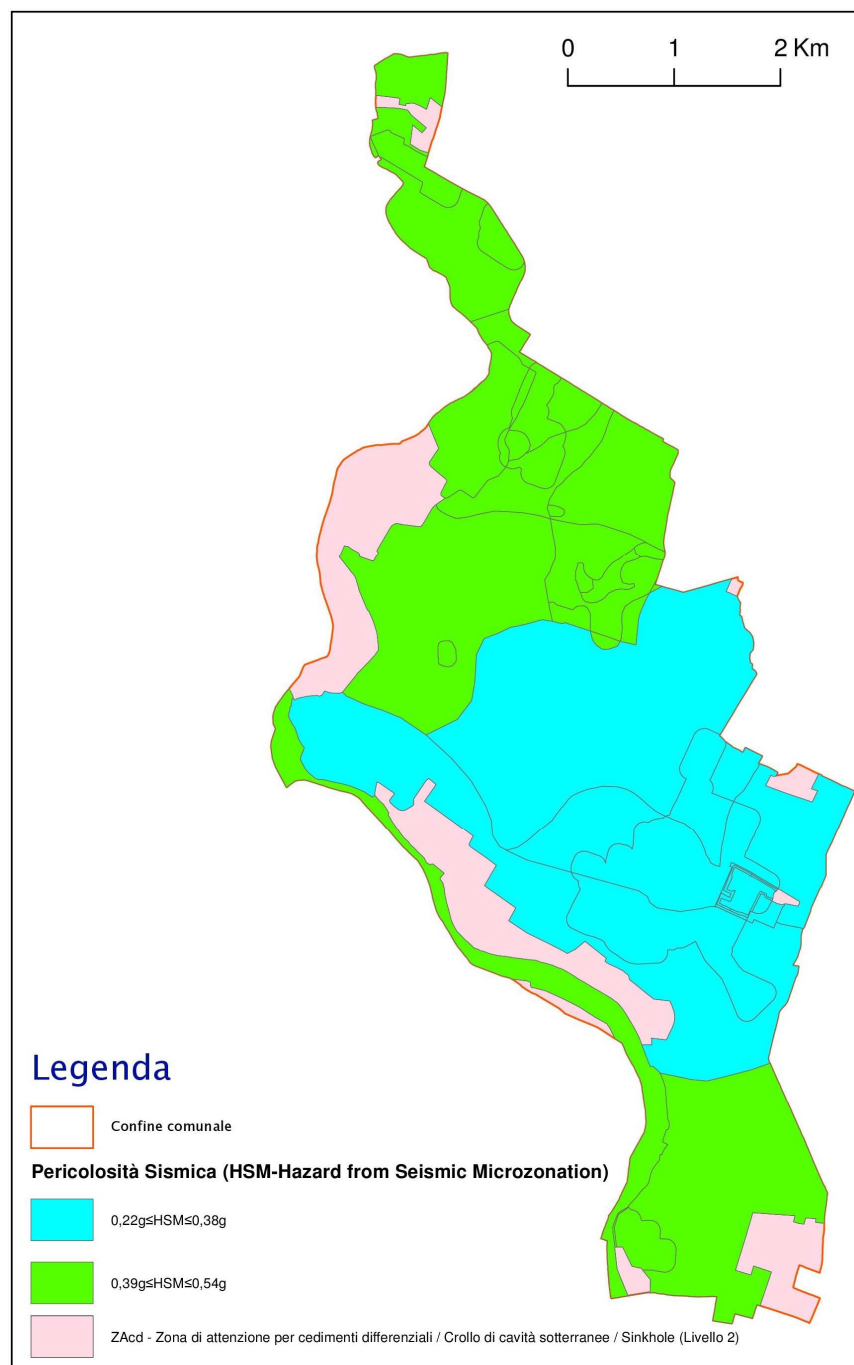


Figura 54 – Carta di pericolosità sismica (HSM) (Ridotta e semplificata dalla Tavola cartografica omonima).

In riferimento ai valori di $H_{SM}(0,1\div0,5)$, Naso et al. (2019) hanno proposto una correlazione di tali valori con i livelli di danno potenziale, che si riporta di seguito, nella quale i valori di HSM erano espressi in termini di accelerazione assoluta (cm/s^2).

Table 1 - Possible thresholds for H_{SM} and others physical parameters.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s^2)	≤ 180	$180 < H_{SM} \leq 340$	$340 < H_{SM} \leq 650$	$650 < H_{SM} \leq 1240$	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	$\leq \text{VI}$	VII	VIII	IX	$\geq \text{X}$

Le Linee guida del 2022, indicano invece di utilizzare valori di accelerazione rapportati all'accelerazione di gravità g (Figura 54) e per alcune parti del territorio di San Cesario sono stati ricavati valori compresi nella classe tra $0.39g$ e $0.54g$ corrispondente a una pericolosità moderata (Figura 54) oppure, per altri settori, nella classe inferiore (tra $0.22g$ e $0.38g$).

7.2.3.4. Stabilità delle scarpate dell'ambito estrattivo "Cava Ghiarella"

Una porzione dell'ambito estrattivo Cava Ghiarella è in buona parte stata scavata e ripristinata a piano ribassato con recupero ad attività sportive e verde urbano. L'altra porzione dell'area è ancora area estrattiva e normata dal vigente PAE comunale.

La parte ribassata ospita poi un'area di emergenza (ammassamento) prevista nell'analisi comunale della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), nonché la relativa struttura di connessione (strada di collegamento fra la viabilità del capoluogo e l'avvallamento di ex cava) che supera la scarpata di ripristino mediante una rampa ricavata nella scarpata stessa.

In tale situazione, e a garanzia della funzionalità della struttura di connessione citata, in condizioni sismiche di emergenza si espone di seguito il controllo della stabilità di detta scarpata.

Si tratta della sezione di cui alla Figura 55, ubicata come da Figura 56.

La verifica è stata condotta secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 ($A2+M2+R2$) con $YR2$ pari a 1,1 (NTC 2018) e riguarda la situazione durante il sisma.

Per quanto riguarda la verifica post-sisma gli effetti di degradazione sulla resistenza vengono ritenuti improbabili (Silver, 1987) in quanto il terreno è insaturo e l'umidità naturale molto ridotta.

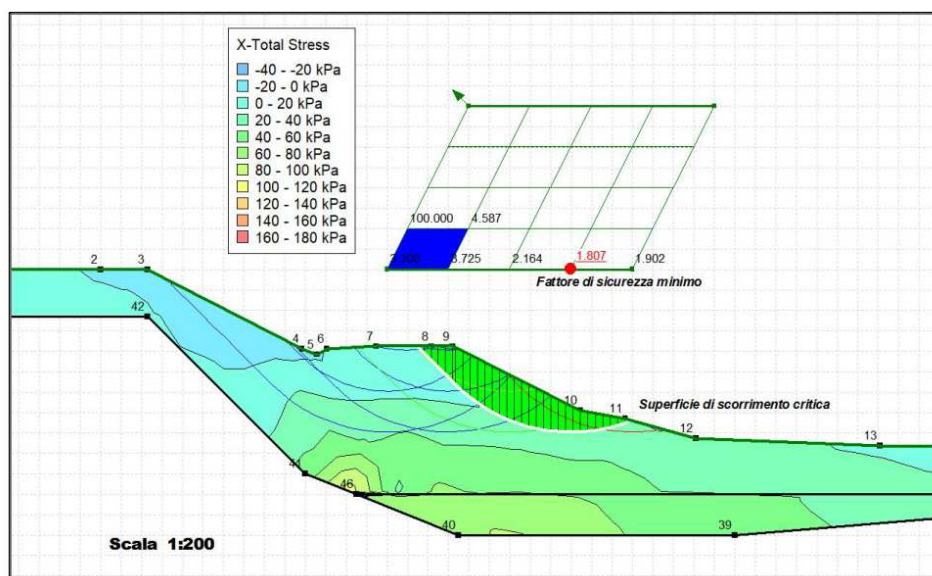


Figura 55 – Scarpata Ovest Ghiarella: sezione Ovest-Est in corrispondenza della struttura viabilistica di connessione prevista nell'analisi di CLE (non in scala).

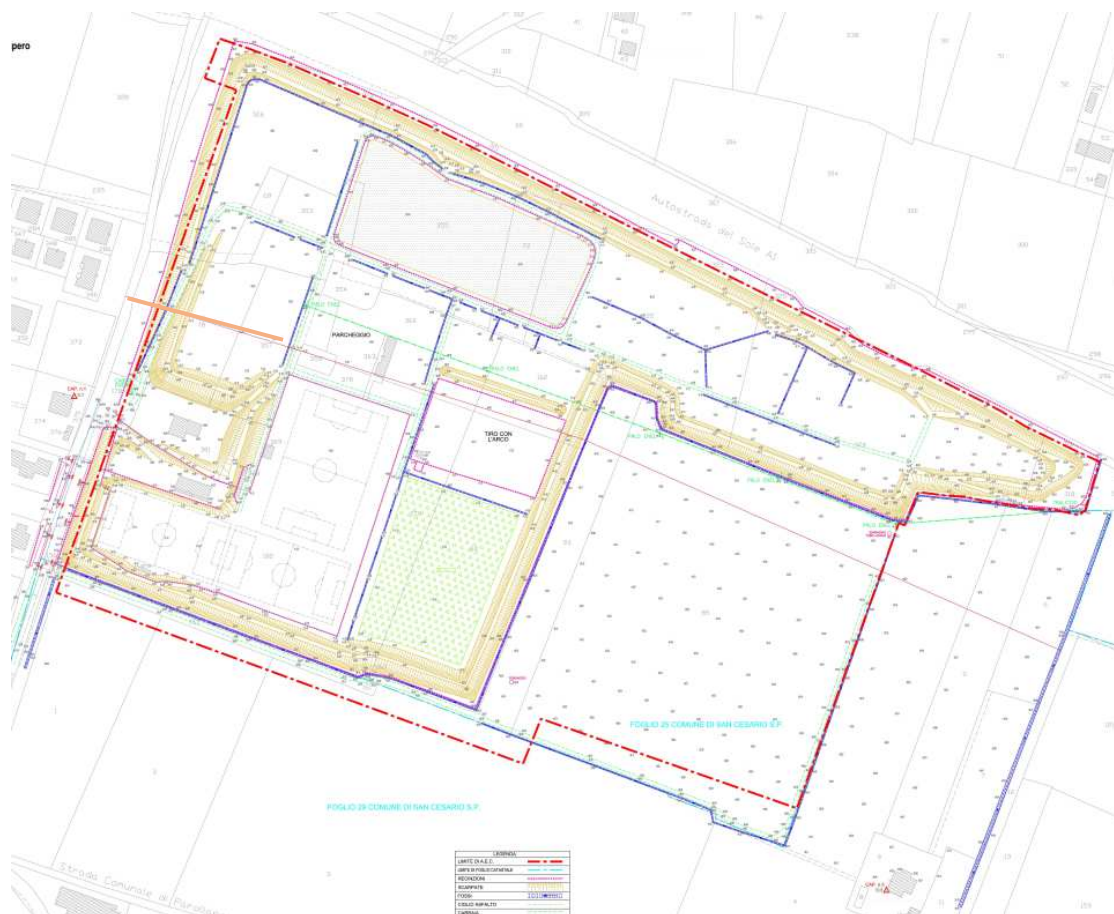


Figura 56 – Planimetria Ambito Estrattivo Ghiarella con (in arancione) ubicazione della traccia della sezione di cui alla Figura 55.

La verifica è stata condotta con un apposito codice di calcolo (*Slope/W* –

GeoStudio 2018 R2) i cui risultati verranno moltiplicati per un fattore riduttivo (0,73) onde tener conto dei coefficienti parziali di legge ($YR2=1.1$; $YTR=1.25$ (M2)).

Tale codice utilizza un modello agli elementi finiti le cui condizioni di stress compressive vengono assunte e implementate direttamente dall'analisi sismica condotta per il modello 2D con il codice QUAKE/W dello stesso GeoStudio 2018 R2; tali risultati sono stati esposti nel paragrafo 7.2.3.2.

Le caratteristiche geotecniche dei materiali, i cui valori sono caratteristici, vengono riportate in Figura 57, mentre la verifica in condizioni sismiche è riportata nell'Allegato n. 5.

Materiali	
Copertura	
Modello:	Mohr-Coulomb
Peso unitario:	19 kN/m ³
Coesione':	5 kPa
Phi':	20°
Phi-B:	0°
Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica:	19 kN/m ³
Base	
Modello:	Mohr-Coulomb
Peso unitario:	19 kN/m ³
Coesione':	5 kPa
Phi':	25°
Phi-B:	0°
Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica:	19 kN/m ³
Base Ovest	
Modello:	Mohr-Coulomb
Peso unitario:	19 kN/m ³
Coesione':	5 kPa
Phi':	25°
Phi-B:	0°
Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica:	19 kN/m ³

Figura 57 - Caratteristiche geotecniche dei materiali di scarpata.

In riferimento all'esito della verifica di cui all'Allegato n. 5, il fattore di sicurezza minimo risulta pari $F_s = 1.807 \cdot 0.73 = 1.32$, superiore all'unità, e pertanto la condizione $E_d \leq R_d$ è rispettata.

7.2.3.5. Rischio di liquefazione

Verranno di seguito presi in considerazione due indicatori di rischio: l'indice di

potenziale liquefazione (IPL) e il numero di severità di liquefazione (LSN).

In riferimento al paragrafo 7.11.3.4 delle NTC 2018 sono state esaminate le aree poste a nord del capoluogo, in quanto a sud non sono presenti condizioni stratigrafiche predisponenti il fenomeno della liquefazione.

7.2.3.5.1. Indice di potenziale liquefazione (IPL)

Per la stima del potenziale di liquefazione si è adottato il metodo semplificato, basato sui risultati delle prove penetrometriche statiche, di Boulanger e Idriss 2014, come indicato nell'allegato A3 della DGR n. 476/2021.

I parametri di input utilizzati sono stati i seguenti:

- 1) Magnitudo massima momento $M_{Wmax} = 6,14$ quale valore massimo atteso per la zona sismogenetica n. 912, di appartenenza del Comune di San Cesario s/P;
- 2) Pseudo-accelerazione massima al suolo, come da risposta sismica locale di cui al precedente capitolo 7.2.3.2:

	Altolà	Capoluogo e Ghiarella	Graziosa Sud	Graziosa Nord	S.Anna	Via Emilia
a_{base} (g)	0.1642	0.1613	0.1642	0.1642	0.1642	0.1642
FA PGA in accell. T=0	1.33784	1.2054	1.2474	1.29488	1.20442	1.19217
a_{max}	0.21967	0.19443	0.20482	0.21261	0.19776	0.19575

- 3) Soggiacenza della falda: si è fatto riferimento alla falda superficiale e/o ipodermica in quanto contenuta negli acquiferi potenzialmente soggetti a liquefazione.

Sono stati raccolti 56 dati di soggiacenza, presenti nei rapporti di prova delle varie indagini geognostiche (prove penetrometriche e sondaggi), distribuiti nel territorio di interesse e rappresentativi delle varie stagioni. Di tali valori si è fatto riferimento ai valori minimi dal pdc.

Sono quindi state esaminate:

- n. 74 prove penetrometriche (n. 8 a punta elettrica e n. 66 a punta meccanica), elaborate con il software "CLiq v.3.0.3.4 della "Geologismiki geotechnical software";

Dai valori del potenziale di liquefazione si è poi calcolato l'Indice di potenziale liquefazione (IPL), secondo Sonmez 2003, ottenendo i risultati esposti nella Tabella 4 che segue, i cui rapporti di calcolo sono riportati nell'Allegato n. 6.

CPT/CPTU	IPL	LSN
036036P12CPT12	0	0

036036P15CPT15	0	0
036036P35CPT35	0	0,356
036036P36CPT36	0	0
036036P38CPT38	0,104	2,116
036036P40CPT40	0,069	1,105
036036P41CPT41	1,103	3,294
036036P50CPT50	1,372	7,525
036036P54CPT54	3.487	20.572
036036P55CPT55	6.413	28.225
036036P65CPT65	0,534	1,036
036036P67CPT67	0,569	1,173
036036P74CPT74	0.435	1.083
036036P75CPT75	0	0
036036P106CPT106	1,836	3,632
036036P107CPT107	5,752	15,564
036036P113CPT113	13,245	46,544
036036P114CPT114	0	0
036036P115CPT115	0	0
036036P118CPT118	0	0
036036P127CPT127	9.107	49
036036P133CPT133	0,841	1,883
036036P135CPT135	1,96	4,513
036036P137CPT137	0,783	1,818
036036P139CPT139	4,699	10,518
036036P140CPT140	1,545	3,827
036036P144CPT144	0,651	1,447
036036P146CPT146	1.871	4.358
036036P157CPT157	0	4,407
036036P158CPT158	1,63	11,767
036036P159CPT159	1,994	5,539
036036P161CPT161	10,525	26,953
036036P165CPT165	1,84	9,892
036036P166CPT166	4,592	19,791
036036P167CPT167	2,321	6,94
036036P238CPT239	0	0
036036P239CPT240	0	0
036036P240CPT241	0	0
036036P261CPT262	0,181	5,914
036036P265CPT266	0.6	1.353
036036P288CPT289	1,576	4,238
036036P291CPT292	4,05	8,812
036036P292CPT293	1.85	4.421
036036P294CPT295	0	0
036036P295CPT296	1.156	4.133

036036P296CPT297	0	0
036036P417CPT418	1,042	6,257
036036P422CPT423	0,339	0,818
036036P439CPT440	5,262	32,061
036036P440CPT441	2,008	8,479
036036P443CPT444	0,531	1,62
036036P444CPT445	1,463	4,837
036036P447CPT448	0	0
036036P452CPT453	0	0
036036P462CPT463	0,899	4,596
036036P473CPT474	0,425	1,67
036036P489CPT490	1.254	3.638
0360036P503CPT504	0	0
036036P514CPT515	0,735	4,942
036036P515CPT516	0	0
036036P517CPT518	0	0
0360036P522CPT523	0,014	1,254
0360036P523CPT524	1,26	3,185
036036P558CPT559	0	0
036036P560CPT561	0	2,229
036036P564CPT565	0.236	1.535
036036P249CPTU250	7,318	17,486
036036P424CPTU425	0,43	1,744
036036P425CPTU426	0,165	3,517
036036P430CPTU431	2,936	6,539
036036P567CPTU569	0,207	0,845
036036P568CPTU570	17,752	46,684
036036P571CPTU574	1.736	4.156
036036P573CPTU577	1,294	5,792

Tabella 4- Prove penetrometriche CPTU/CPT e relativi valori di IPL e LSN.

7.2.3.5.2. *Liquefaction Severity Number (LSN)*

Utilizzando prima le prove penetrometriche a punta elettrica, essendo le più affidabili e poi anche le CPT, in quanto le CPTU/CPTE non erano in numero sufficiente a coprire in maniera adeguata le aree da indagare, elaborate con il software CLiq v.3.0.3.4 e adottando il metodo semplificato di Boulanger & Idriss 2014, è stato calcolato un ulteriore indicatore di rischio alla liquefazione, ovvero l'indice denominato LSN (*Liquefaction Severity Number*) riferito alla deformazione volumetrica post-liquefazione alias cedimenti (Tonkin & Taylor 2013).

I valori così ottenuti (Tabella 4), classificati secondo il criterio sopra indicato, sono mostrati nella Figura 58 (Capitolo 8).

7.3. Terza fase

Nella terza fase dello studio si è proceduto all'allestimento delle cartografie specifiche per le analisi di primo e di terzo livello che descrivono tutto il territorio comunale.

8. ELABORATI CARTOGRAFICI

Nell'approntare l'aggiornamento allo studio di microzonazione sismica del Comune di San Cesario (come anche richiesto dalle linee guida della Protezione Civile e regionali) sono state allestite diverse cartografie sia di natura analitica sia di sintesi (carte di microzonazione sismica p.d.), per le quali si è adottata una scala 1:10.000 che permette di rappresentare l'intero territorio comunale in un unico foglio formato A0, utilizzando come base topografica gli elementi della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 nella versione nota come DBTR2013.

Per i simbolismi e le legende si è fatto riferimento agli standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2 della Commissione Tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2020).

CARTE PERTINENTI L'ANALISI DI PRIMO LIVELLO:

- CARTA DELLE INDAGINI. Riporta le ubicazioni di tutte le indagini geognostiche sia di tipo meccanico che di tipo geofisico (cfr. capitolo 4), distinguendole per tipologia attraverso i simbolismi standard (versione 4.2). È stata redatta un'unica carta delle indagini (valida sia per il primo che per il terzo livello di analisi), nella quale sono state riportate le ubicazioni di tutte le indagini che sono state reperite e inserite in banca dati. Considerato che In occasione del presente studio la banca dati delle indagini è stata implementata con diverse decine di nuove indagini, sia originali che da archivio, è stato necessario aggiornare tale documento cartografico rispetto alla versione contenuta nella MS2014.
- CARTA GEOLOGICO-TECNICA. Descrive, per tutto il territorio comunale, le caratteristiche litologiche del primo sottosuolo e gli eventuali elementi morfologici che potrebbero determinare degli effetti locali, sia in termini di amplificazione (stratigrafia) che di instabilità (potenziale liquefazione e cedimenti). La carta è stata compilata principalmente sulla base dell'interpretazione dei dati geognostici (prove penetrometriche e sondaggi) nonché di valutazioni geomorfologiche interpretative, basate principalmente sull'andamento del microrilievo e sul confronto critico con le cartografie disponibili in bibliografia. Dopo la riesamina dei dati già disponibili e di quelli (sia da archivio che originali) che hanno integrato la banca dati, non sono state ravvisate differenze sostanziali rispetto all'omonimo documento contenuto nella MS2014.
- CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI DEI TERRENI. Riporta l'ubicazione dei punti in cui sono state eseguite rilevazioni di microtremore a stazione singola e il valore

ricavato della frequenza naturale. La carta mostra che in linea generale si ha un decremento del valore della frequenza procedendo verso nord, a indicare un progressivo approfondimento della interfaccia responsabile del contrasto di impedenza che genera il picco nel grafico HVSR. A sud, i valori di frequenza generalmente alti sono da attribuire al passaggio tra copertura superficiale fine e orizzonti ghiaiosi decametrici posto a pochi metri dalla superficie e in approfondimento procedendo verso nord. Non mancano tuttavia alcune indagini di difficile interpretazione, e forse di minore affidabilità, il cui risultato si discosta da quello generale. In alcuni casi si notano grafici HVSR con due picchi dei quali quello a minore frequenza risulta pressoché poco evidente e/o marcato.

- CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA. Come già evidenziato nel capitolo 5, la carta delle MOPS è stata realizzata per tutto il territorio comunale. Rispetto all'analoga prodotta nell'ambito della MS2014, sono state apportate diverse modifiche, alcune delle quali dopo i risultati dell'analisi di terzo livello. Le modifiche consistono sia nella rimodulazione dei limiti tra alcune microzone sia nell'introduzione di altre microzone, onde tenere conto dei nuovi dati che hanno permesso di riconoscere alcune aree con presenza di terreni sabbiosi. I modelli stratigrafici ascrivibili a ciascuna MOPS sono stati definiti sulla base della stratigrafia delle prime decine di metri a partire dal p.c.

CARTE PERTINENTI L'ANALISI DI SECONDO LIVELLO

- CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO, che riporta i valori puntuali del V_s equivalente (velocità media equivalente delle onde di taglio nei primi 30 m a partire dal piano campagna) ricavata dalle indagini sismiche (Remi, MASW e rifrazione in onde S). A differenza della MS2014, si è assunto come riferimento per agganciare i calcoli della Risposta Sismica Locale, il passaggio tra copertura fine superficiale e depositi ghiaiosi e/o ciottolosi sottostanti. Sebbene in linea generale questi ultimi non siano caratterizzati da valori di V_s maggiori a 800 m/s, si è ritenuto che il contrasto di velocità (e d'impedenza) con i sovrastanti depositi fini sia comunque marcato e suscettibile di ingenerare effetto di amplificazione. Pertanto si è ritenuto di riportare in carta i valori di V_s equivalente e non di V_{s30} , V_{s30} che è stato mantenuto solo per le porzioni più a nord ovest (Località "Sant'Ambrogio") del territorio comunale, laddove il contrasto di impedenza tra depositi fini e primo orizzonte ghiaioso non è risultato così marcato.
- CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA
Avendo esteso l'analisi di terzo livello a tutto il territorio comunale, non è stato

necessario realizzare carte di microzonazione di secondo livello.

- CARTA DI PERICOLOSITÀ SIMICA H_{SM}

Le Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni versione 2.0 (2022) richiedono che per l'intero territorio comunale la "Carta di pericolosità simica H_{SM}, riferita all'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, realizzata ad analoghe carte (riferite a periodi di oscillazione diversi) prodotte per l'analisi di terzo livello.

CARTE PERTINENTI L'ANALISI DI TERZO LIVELLO:

Carte di Microzonazione sismica

Per l'analisi di terzo livello sono stati definiti i modelli stratigrafici riferiti alle sei verticali descritte nel capitolo precedente utilizzate per la valutazione di Risposta Sismica Locale

I risultati dell'analisi di Risposta Sismica Locale sono poi stati utilizzati, non solo per la redazione delle carte di microzonazione sismica di terzo livello e per le carte di pericolosità sismica, ma anche per la valutazione dell'Indice di Potenziale Liquefazione (Figura 58) e del LSN (Liquefaction Severity Number) (Figura 59).

L'Indice del Potenziale di Liquefazione è stato poi integrato nelle carte di microzonazione sismica di terzo livello che descrivono le aree oggetto di studio approfondito (aree del territorio urbanizzato) sulla base dei coefficienti di amplificazione (PGA, Intensità spettrale e accelerazione spettrale) e della suscettività a liquefazione.

A completamento dello studio di terzo livello, come richiesto dall'Allegato A della DGR 476/2021 e nelle Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni del 2022, è stata realizzata la già citata "Carta di pericolosità simica H_{SM}", riferita all'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (Figura 54), nonché le carte analoghe riferite agli intervalli: $0,4s \leq T \leq 0,8s$; $0,7s \leq T \leq 1,1s$; $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

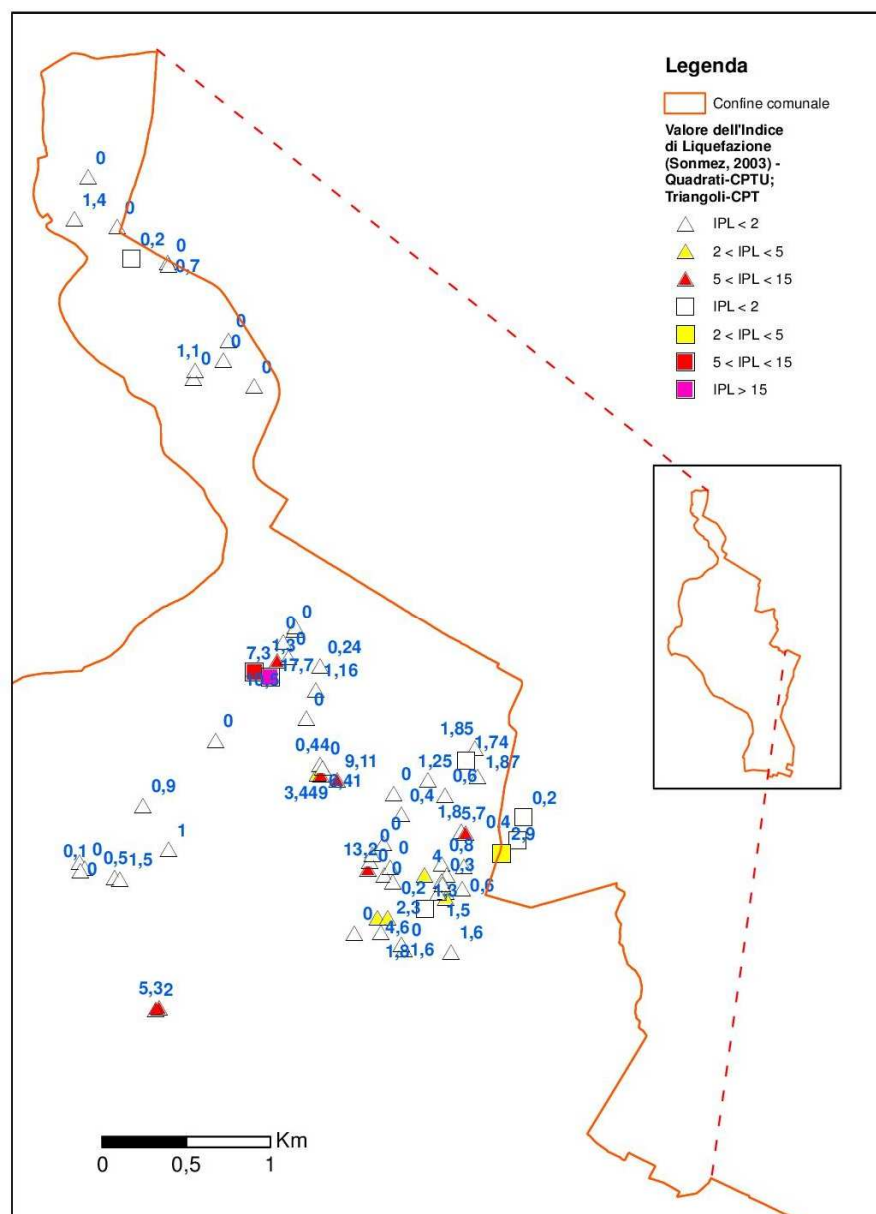


Figura 58 - Ubicazione delle verticali in corrispondenza delle quali è stato calcolato l'Indice di Potenziale Liquefazione.

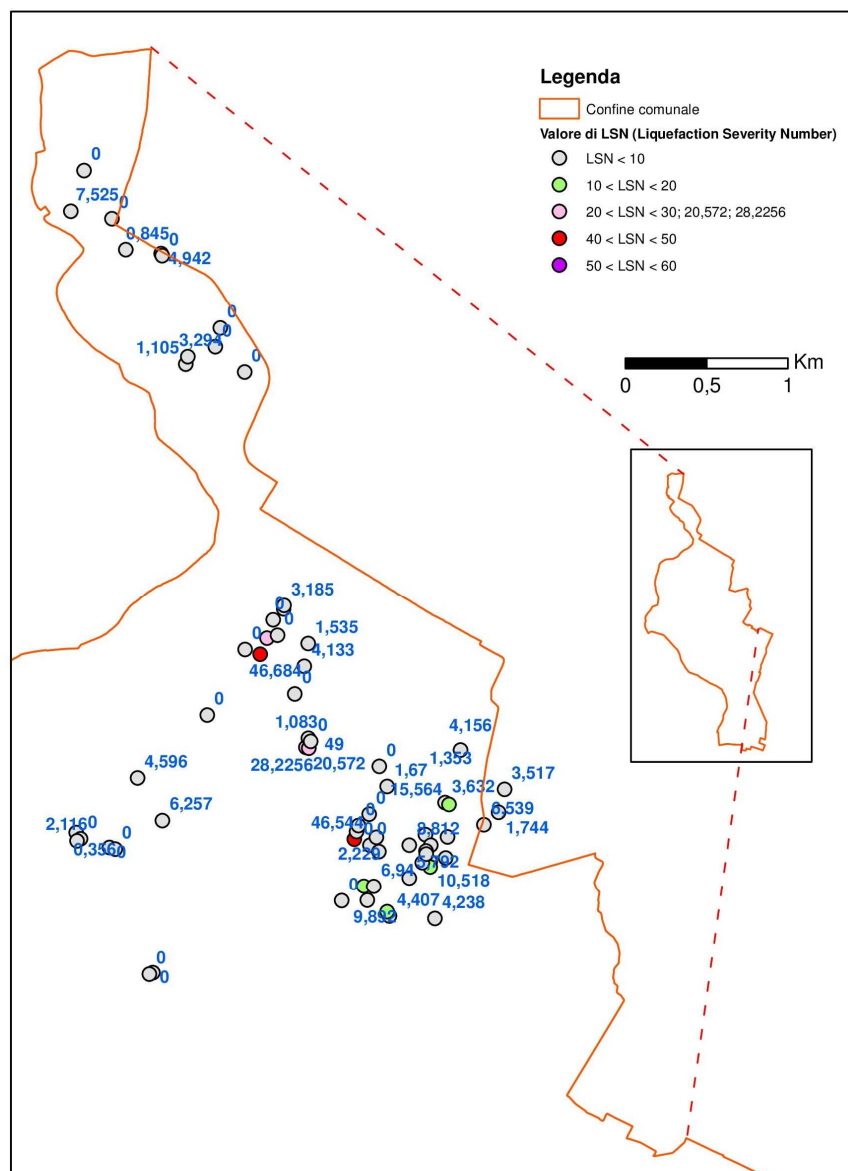


Figura 59 - Ubicazione delle verticali in corrispondenza delle quali è stato determinato l'indice LSN.

Bastiglia, maggio 2025.

Dott. Geol. Giorgio Gasparini

9. BIBLIOGRAFIA

- ◆ AA.VV. (1992) - *Appennino Tosco-Emiliano. (A cura di Bortolotti V.) Guide geologiche regionali*. N. 4, pp. 336, BE-MA Editrice, Firenze.
- ◆ AA. VV. (1997) – *La microzonazione sismica nella pianificazione urbanistica e territoriale: l'esperienza del "Masterplan" del Rubicone e prospettive regionali*. Proc. Conv. Geologia delle grandi aree urbane, Bologna 4/5 Novembre 1997.
- ◆ AA.VV. (2001) – *Il rischio sismico in Italia. Ingegneria Sismica*, 1/2001, 5-36.
- ◆ AA.VV. (2005) - *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida*. Patron Editore, Bologna, edizione Provvisoria.
- ◆ ARPA-Emilia-Romagna (2010) - *Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna per la ricostruzione del quadro conoscitivo relativo ai principali acquiferi freatici di pianura*.
- ◆ Benini A., Martelli L., Poccianti C. & Rosselli S. (a cura di) (in stampa) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 253- Marradi*. (sito web cartografico dell'Ufficio Geologico, Sismico e dei Suoli della regione Emilia-Romagna).
- ◆ Bettelli G. & De Nardo M.T. (2001) – *Geological outlines of the Emilia Apennines (Italy) and introduction into the rock units cropping out in the areas of landslides reactivated in the 1994-1999 period*. Quad. Geol. Appl. N. 8/1(2001), 1-26, Pitagora Ed., Bologna.
- ◆ Bettelli G. & Panini F. (1989) - *I Melanges dell'Appennino Settentrionale dal T. Tresinaro al T. Sillaro*. Mem. Soc. Geol. It., 39(1987), 187-214.
- ◆ Bettelli G. & Panini F. (1992) – *Liguridi, melanges e tettoniti nel Complesso caotico lungo la «linea del Sillaro» (Appennino settentrionale, Province di Firenze e Bologna)*. Mem. Descr. Carta geol. D'It. XLVI(1991), 387-415.
- ◆ Bettelli G., Panini F., Fioroni C., Nirta G, Remitti F., Vannucchi P e Carlini M. (2012) - *Revisiting the Geology of the "Sillaro Line", Northern Apennines, Italy*. Rend. Soc. Geol. It., 22, 14-17.
- ◆ Boccaletti M, Coli M, Eva C, Ferrari G, Giglia G, Lazzarotto A, Merlanti F, Nicolich R, Papani G, Postpischl D (1985) *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonophysics 117,7–38.
- ◆ Boccaletti M., Bonini M, Corti G, Gasparini P, Martelli L, Piccardi L, Severi P, Vannucci G (2004) *Seismotectonic map of the Emilia- Romagna Region*. Emilia-Romagna Region-SGSS and CNR-IGG, Selca, Florence.
- ◆ Boccaletti M. Corti G. e Martelli L. (2011) - *Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy)*. Int J Earth Sci. Pubbl. online 19may2010.
- ◆ Boncio P., Bracone V. (2009) - *Active stress from earthquake focal mechanisms along the Padan–Adriatic side of the Northern Apennines (Italy), with considerations on stress magnitudes and pore-fluid pressures*. Tectonophysics 476,180–194.
- ◆ Burrato P., Ciucci F., Valensise G. (2003) - *An inventory of river anomalies in the Po*

- Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting.* Ann Geophys 46(5), 865–882.
- ◆ Calabrese L. & Cibi U. (a cura di) (in stampa) – *Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n. 222 Lugo.* Regione Emilia-Romagna.
 - ◆ Camassi R & Stucchi M. (1996) – *NT4.1-Un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia di danno.*
 - ◆ Campo B., Bruno L. e Amorosi A. (2023) – *Sedimentary facies characterization through CPTU profiles: An effective tool for subsurface investigation of modern alluvial and coastal plains.* Sedimentology, 70, 1302-1327.
 - ◆ Castellarin A., Eva C., Giglia G. e Vai G.B. (1986) – *Analisi strutturale del fronte appenninico padano.* Giornale di Geologia, 47, (1-1) (1985), 47-75.
 - ◆ Castellarin A. & Pini G.A. (1989) (con contributo di Borsetti A.M. e Rabbi E.) - *L'arco del Sillaro: la messa in posto delle argille scagliose al margine appenninico padano (Appennino bolognese).* Mem. Soc. geol. It., 39(1987), 127-141.
 - ◆ Cerrina Ferroni A., Martelli L., Martinelli P & Ottria G. (2002) – *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo.* Scala 1:250.000. Carta e Note Illustrative, S.EL.CA, Firenze.
 - ◆ Cerrina Ferroni A., Ottria G. & Ellero A. (2004) – *The Northern Apennines, Italy: Geological structure and transpressive evolution.* In "Geology of Italy" Spec. Vol. of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004, 15-32.
 - ◆ Colombi A., Curli S., Ercolessi G., Loffredo G., Martelli L., Minghini F., Romagnoli M., Stevanin E., Veronese T. & Zanetti D. (2014) – *Analisi del rischio di liquefazione dell'area produttiva "Piccola e media Industria di Ferrara.* GNGTS2014, Sessione 2.2.
 - ◆ Dal Moro Giancarlo (2019) – *Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica.* Dario Flaccovio Editore, pp. 280.
 - ◆ Elmi C. & Zecchi R. (1974) - *Caratteri sismotettonici dell'Emilia Romagna.* Quad. Mercanzia n. 21, Cam. Comm. Ind. Art. e Agr., Bologna.
 - ◆ Ghiselli F. & Martelli L. (1997) - *Evoluzione dei campi di stress lungo il margine appenninico-padano dal Pleistocene all'Attuale: analisi strutturale dei depositi pleistocenici affioranti tra Castell'Arquato (Piacenza) e Rimini.* Il Quaternario 10(2):437–444.
 - ◆ Lavecchia G., De Nardis R., Cirillo D., Brozzetti F. & Boncio P. (2012) - *The May-June 2012 Ferrara Arc earthquakes (northern Italy): structural control of the spatial evolution of the seismic sequence and of the surface pattern of coseismic fractures.* Annals of geophysics, 55, 533-540.
 - ◆ (A cura di:) Mantovani E., Viti M., Babbucci D., Cenni N., Tamburelli C., Vannucchi A., Falciani F., Fianchisti G., Baglione M., D'Intinosante V., Fabbroni P., Martelli L., Baldi P., Bacchetti M. - *Assetto tettonico e potenzialità sismogenetica dell'Appennino Tosco-Emiliano-Romagnolo e Val Padana - Regione Emilia-Romagna* (Servizio

- Geologico Sismico e dei Suoli); Regione Toscana, Università di Siena 1240 (Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente).
- ◆ Martelli L., Filippini M., Bagli S., Severi P. & Tomasetti F. (2006) - *Riduzione del rischio sismico nella pianificazione territoriale e urbanistica in Emilia-Romagna: definizione e rappresentazione della pericolosità sismica locale. L'esempio della cartografia per il quadro conoscitivo del PTCP di Rimini*. Il Geologo dell'Emilia-Romagna, n. 24, 7-17.
 - ◆ Martelli L., Amorosi A. & Severi P. (a cura di) (in stampa) – *Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n. 221 Bologna*.
 - ◆ Martelli L. (2011) – *Quadro sismo tettonico dell'Appennino Emiliano-Romagnolo e della Pianura Padana centrale*. Atti del GNGTS 2011, sessione 1.2.
 - ◆ Martelli L., Ercolessi G., Sani F., Bonini M., Corti G., Santulin M., Tamaro A., Rebez A. & Sleiko D. (2017a) – *Analisi 3D della pericolosità sismica dell'Appennino Settentrionale. Proposta di nuova zonazione sismogenetica e analisi della pericolosità sulla base di un modello 3D delle sorgenti sismiche*. Rapporto Conclusivo. Regione Emilia-Romagna, settembre 2017, pp. 37.
 - ◆ Martelli L., Santulin M., Sani M., Tamaro A., Bonini M., Rebez A., Corti G. & Sleiko D. (2017b) – *Seismic hazard of the Northern Apennines based on 3D seismic sources*. Journal of Seismology, 21, 1251-1275.
 - ◆ Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. & Severi P. (2017c) – *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe*. Regione Emilia-Romagna.
 - ◆ Mascandola C. Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L. & Poggi V. (2019) - *Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring*. Bulletin of the Seismological Society of America (2019) 109 (1): 164–177
 - ◆ Michetti A, Giardina F., Livio F., Mueller Karl, Serva L., Sileo G, Vittori E., Devoti R., Riguzzi F., Carcano C., Rogledi S., Bonadeo L., Brunamonte F. e Fioraso G (2012) - *Active compressional tectonics, Quaternary capable faults and the seismic landscape of the Po Plain (Northern Italy)*. Ann. Geophys. 55, 5, 969-1001.
 - ◆ Pagani M. & Marcellini A. (a cura di) (2003) - *Castelnuovo ne' Monti: analisi di pericolosità sismica*. CNR-Regione Emilia-Romagna. Scaricabile da Sito Web Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna.
 - ◆ Pieri M. & Groppi G. (1981) – *Subsurface Geological Structure of the Po Plain, Italy*. C.N.R., Prog. Finaliz. Geodinamica, Pubbl. n. 414, pp. 13.
 - ◆ Regione Emilia-Romagna.(2003) – *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna e CNR.
 - ◆ Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP (1998) – *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio. S.EL.CA Firenze, pp. 120.
 - ◆ Regione Lombardia (1996) - *Determinazione del rischio sismico a fini urbanistici in Lombardia*.

- ◆ Sowers/G. F. (1962) – *Shallow Foundation*. Fondation Engineering G.A. Leonards Ed. Chapter 6.
- ◆ TC4 (1993) Technical Committee for earthquake engineering, ISSMGE (1993) - *Manual for zonation on seismic geotechnical hazard*. The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- ◆ Tinto A., Arrigoni V., Frassinetti G. & Martelli L. (2002) - *Elementi di microzonazione sismica dell'area di Predappio Bassa*. Scaricabile da Sito Web Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna.
- ◆ Treves B. (1984) - *Orogenic belts as accretionary prism: the example of the Northern Apennines*. *Ofioliti*, 9/3, 577-618.
- ◆ Vai G.B. & Castellarani A. (1993) – *Correlazione sinottica delle unità stratigrafiche nell'appennino settentrionale*. Studi Geol. Camerti, CROP 1/1, Vol. Spec. (1992/2), 171-185.

10. ELENCO ALLEGATI

- Allegato n. 1 – Grafici e tabelle indagini CPTU e SCPTU originali
- Allegato n. 2 – Report indagini in array sismico attive/passive (MASW/ESAC)
- Allegato n. 3 – Report indagini passive a stazione singola (HVSr)
- Allegato n. 4 – RSL 2D – Cava Ghiarella
- Allegato n. 5 – Verifica di stabilità “Scarpata Cava Ghiarella”
- Allegato n. 6 – Elaborazione dei valori dell'indice di potenziale liquefazione (IL)

Allegato n. 1

Grafici e tabelle indagini CPTU e SCPTU originali



SONGEO SRL

Via A. Ascari, 6 - 44019 Gualdo di Voghiera (FE)
Tel. 0532 773136 - 0532 815683 Fax 0532 776455

www.songeo.it info@songeo.it

P.IVA e C.F. 01083140382

Certificazione UNI EN ISO 9001: 2015 N° 3233 rilasciata da Quaser Certificazioni Srl
Albo Nazionale Gestori Ambientali Iscrizione n° BO 03079 Cat. 9-E e 2BIS

Commessa 01605 del 20/11/24
Località San Cesario sul Panaro (MO)
Cantiere Località varie in comune di San Cesario sul Panaro

Committente

Studio ARKIGEO

Elenco dei certificati

Rif.	Certificato	del	Prova	Specifica	Metodo
SCPTU 1	228/24	31/12/24	Prova penetrometrica	ASTM D 5778-07; AGI 1977	Punta elettrica e piezococono sismico
SCPTU 2	229/24	31/12/24	Prova penetrometrica	ASTM D 5778-07; AGI 1977	Punta elettrica e piezococono sismico
SCPTU 3	230/24	31/12/24	Prova penetrometrica	ASTM D 5778-07; AGI 1977	Punta elettrica e piezococono sismico
SCPTU 4	231/24	31/12/24	Prova penetrometrica	ASTM D 5778-07; AGI 1977	Punta elettrica e piezococono sismico

Corografia e Planimetria



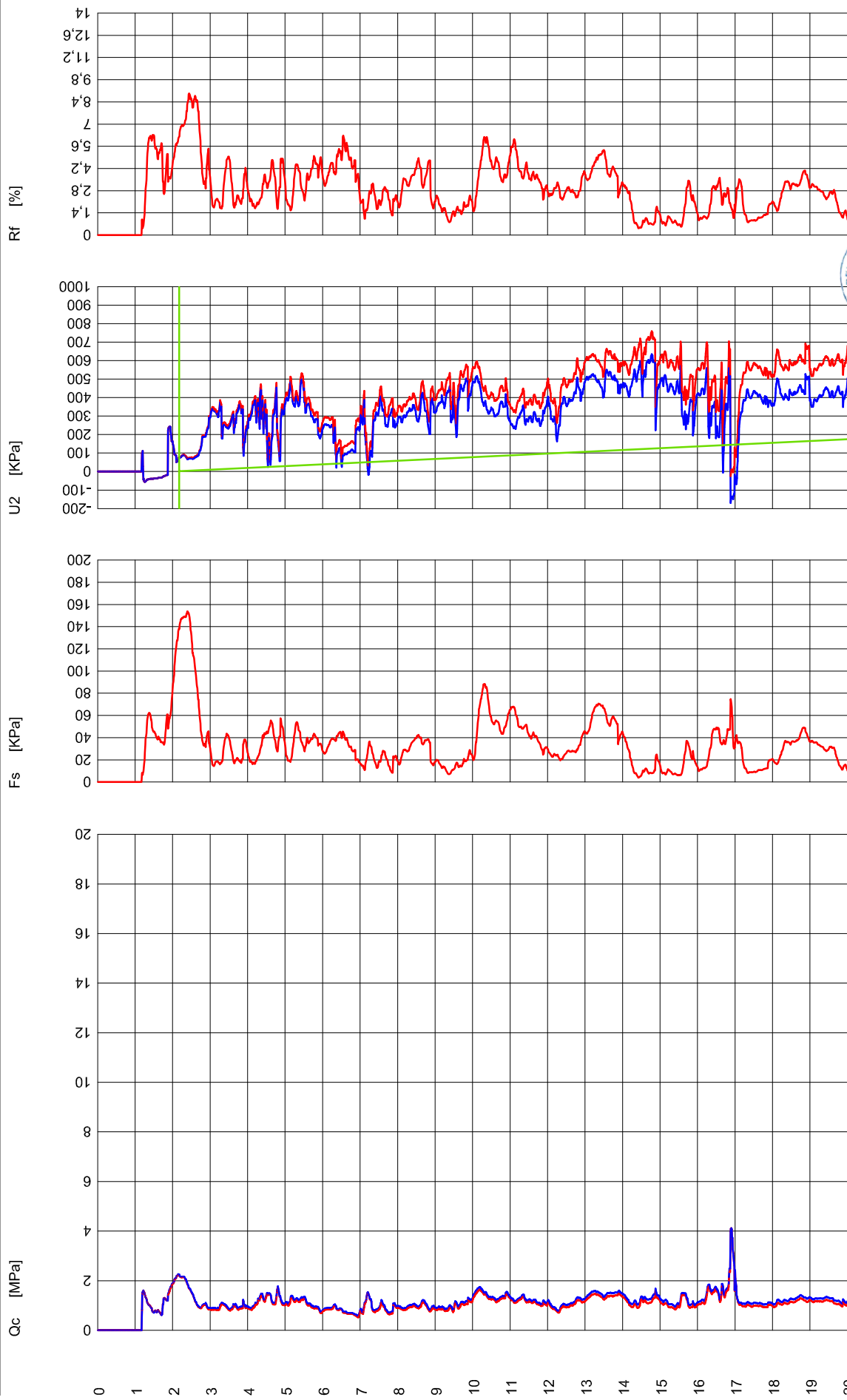
Sperimentatore

Squarreda Mirco

Direttore



pag. 1 di 5



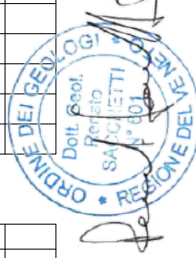
Qc [MPa]

Fs [KPa]

U2 [KPa]

Rf [%]

Qc U2 Fs Qc Qt U0 U2 U2 - U0

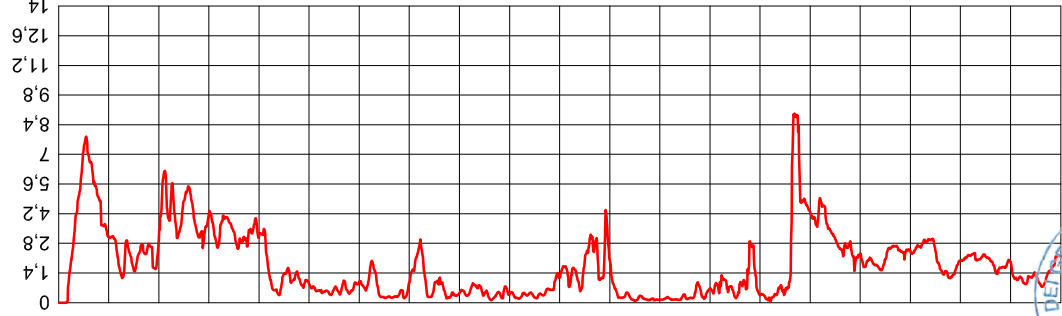
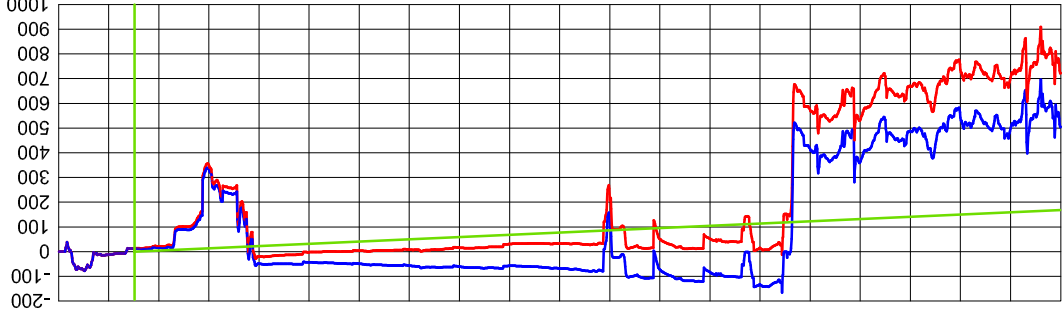
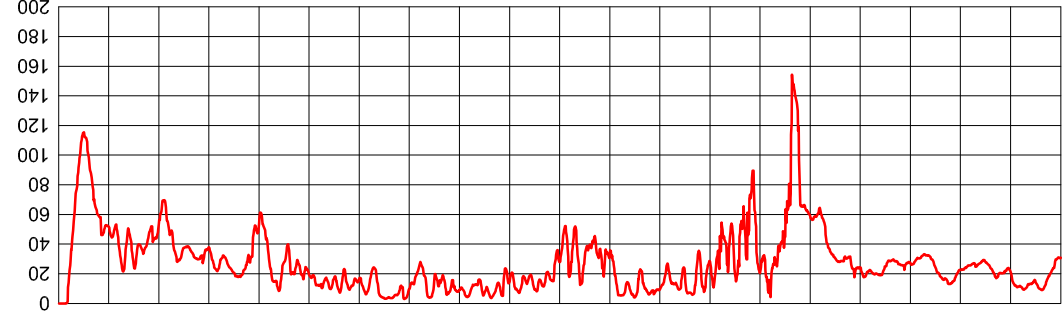
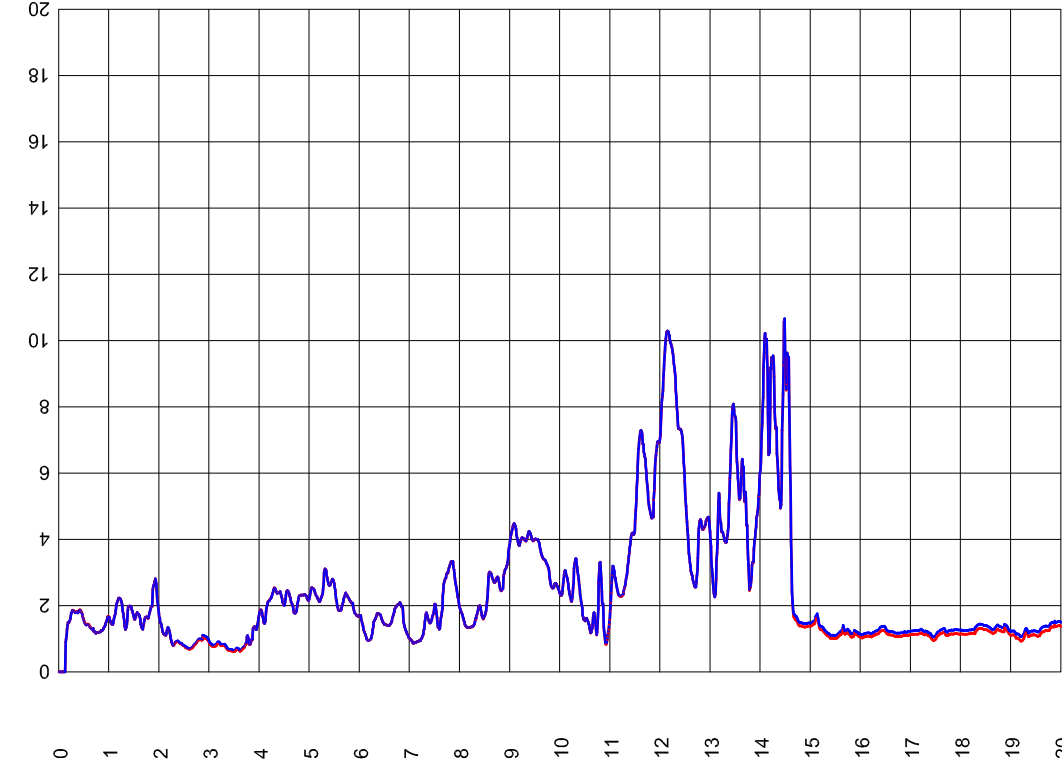


Qc [MPa]

Fs [kPa]

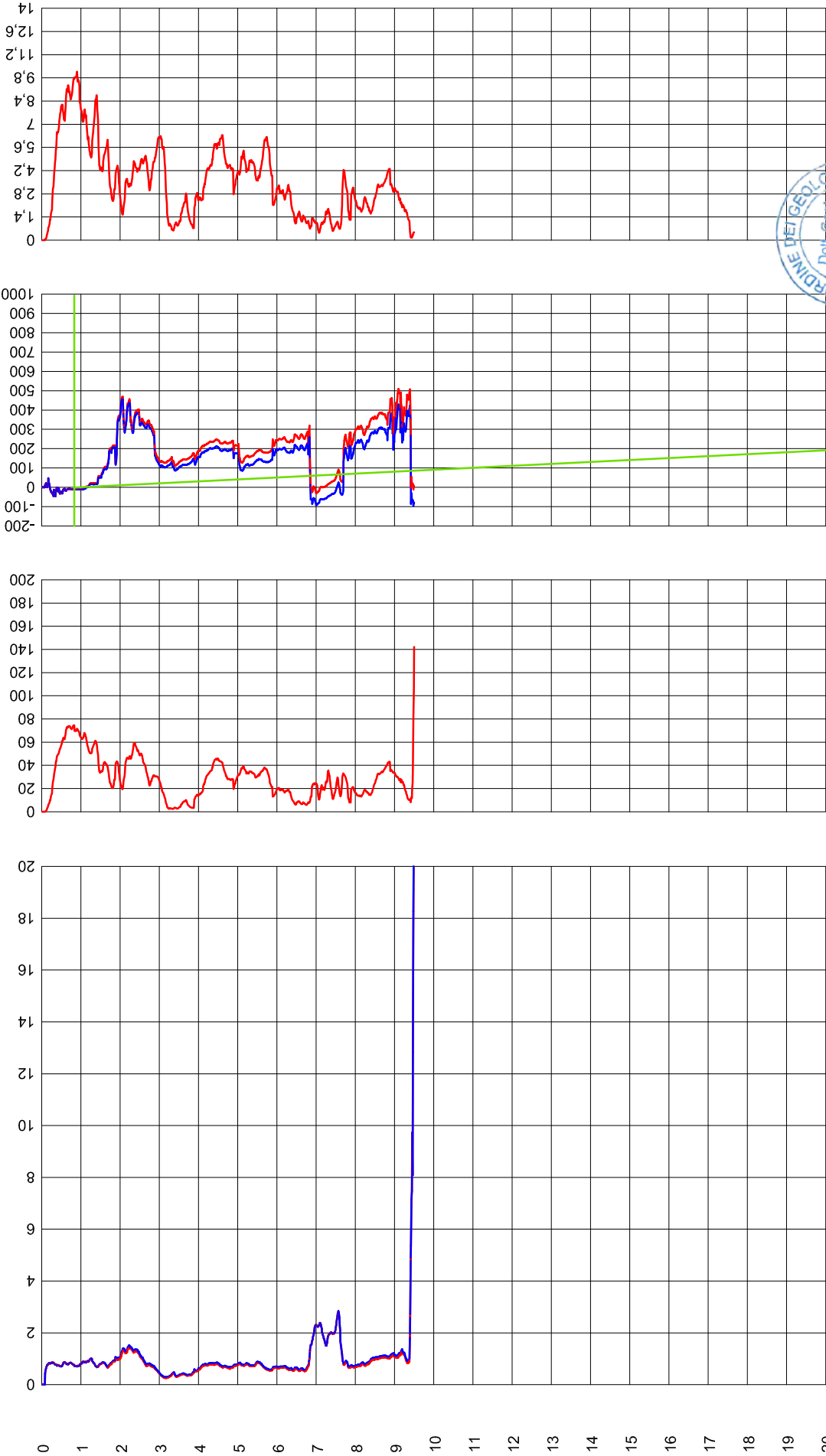
U2 [kPa]

Rf [%]



Sito: San Cesario sul Panaro (MO) - La Graziosa Profondità falda: -0,80 m da p.c.

Qc [MPa] Fs [KPa] U2 [KPa] Qc Qt U0 U2 U2 - U0 Rf [%]



COMMITTENTE:

Studio ARKIGEO

LOCALITA':

Ponte S. Ambrogio - San Cesario sul Panaro (MO)

PROFONDITA' DELLA PROVA:

20,00 m

PROFONDITA' DELLA FALDA:

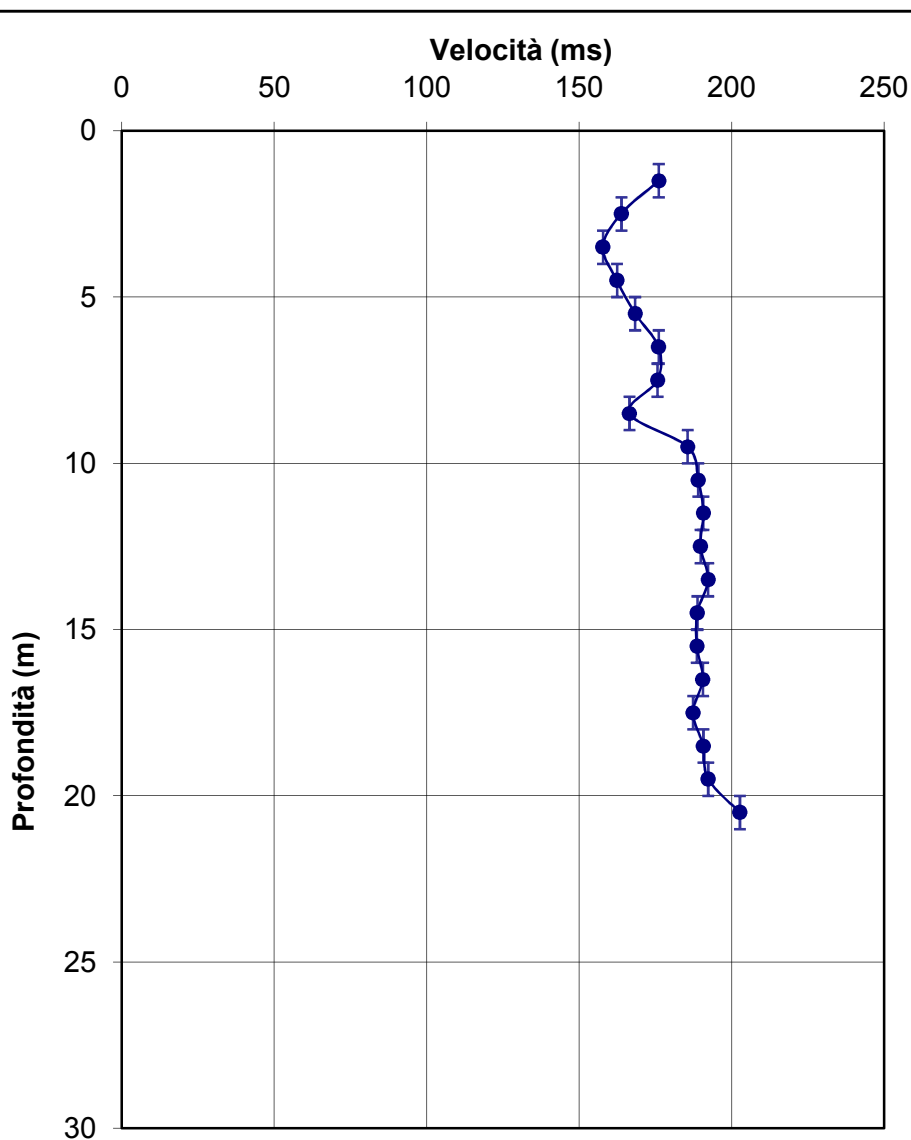
2,10 m

PREFORO:

1,18 m

[illegible]

GRAFICO ONDE S

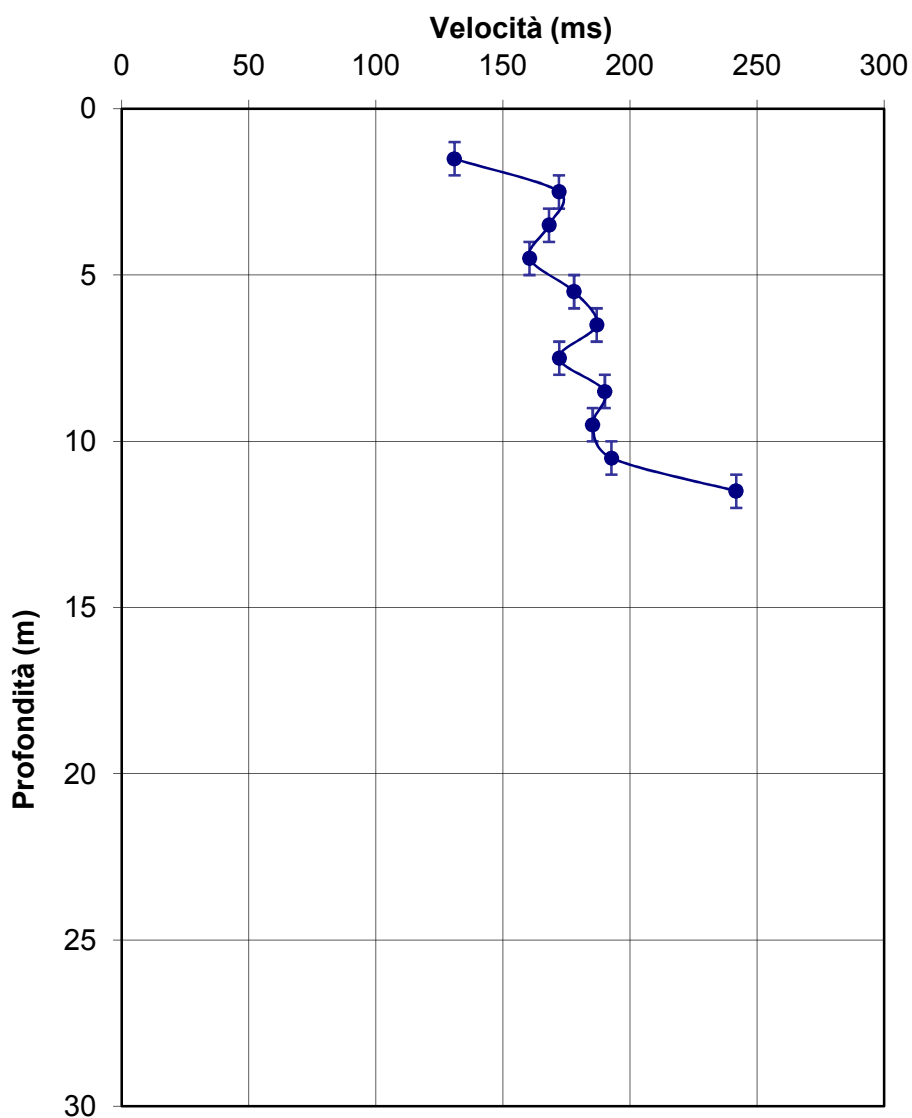


Studio ARKIGEO

Zona industriale La Graziosa - San Cesario sul Panaro (MO)

PREFORO: 1,35 m

GRAFICO ONDE S



COMMITTENTE: Studio ARKIGEO

LOCALITA': S. Anna - centro sportivo - San Cesario sul Panaro (MO)

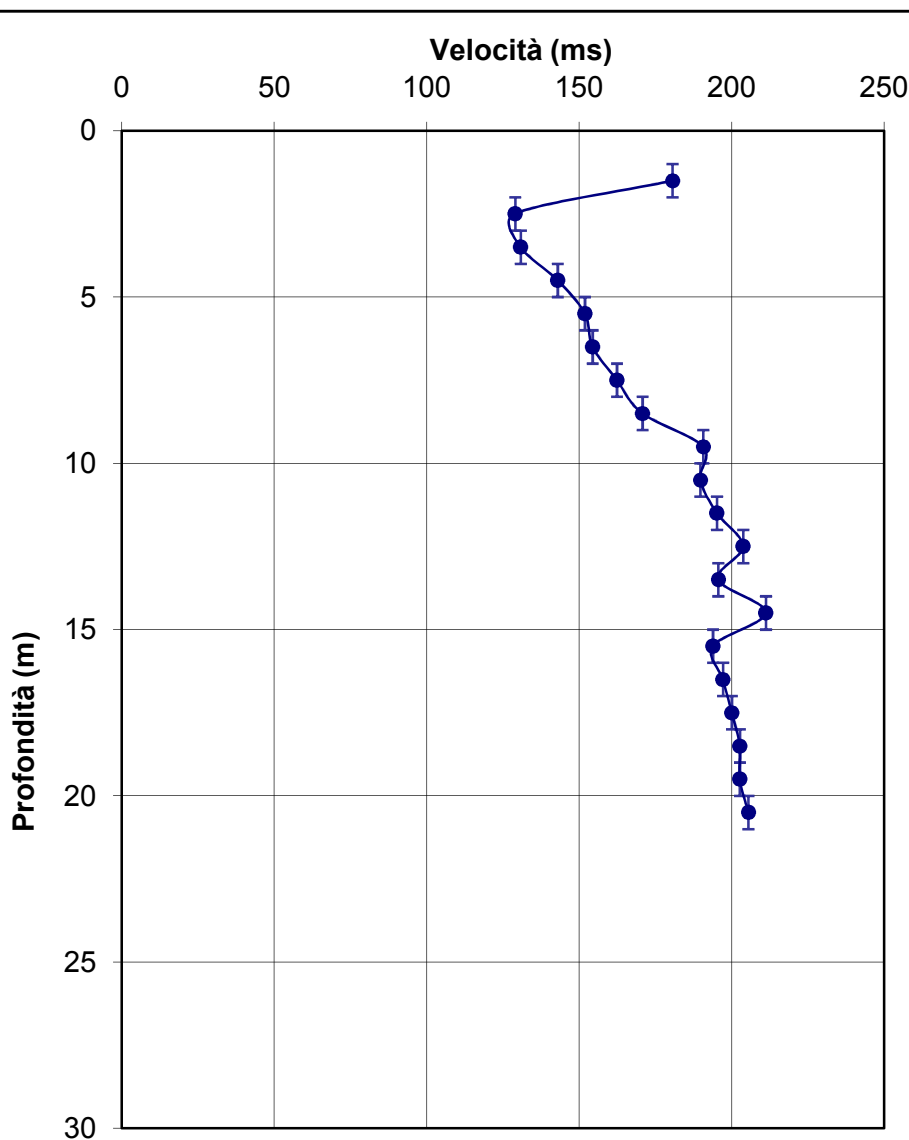
PROFONDITA' DELLA PROVA: 20,00 m

PROFONDITA' DELLA FALDA: 1,50 m

PREFORO: 0,15 m

Profondità (m)	Velocità (m/sec)
1,50	180,56
2,50	128,99
3,50	130,78
4,50	142,92
5,50	151,83
6,50	154,38
7,50	162,33
8,50	170,72
9,50	190,62
10,50	189,69
11,50	195,13
12,50	203,73
13,50	195,58
14,50	211,18
15,50	193,81
16,50	197,12
17,50	200,03
18,50	202,64
19,50	202,65
20,50	205,43

GRAFICO ONDE S



COMMITTENTE:

Studio ARKIGEO

LOCALITA':

Zona industriale La Graziosa - San Cesario sul Panaro (MO)

PROFONDITA' DELLA PROVA:

9,50 m

PROFONDITA' DELLA FALDA:

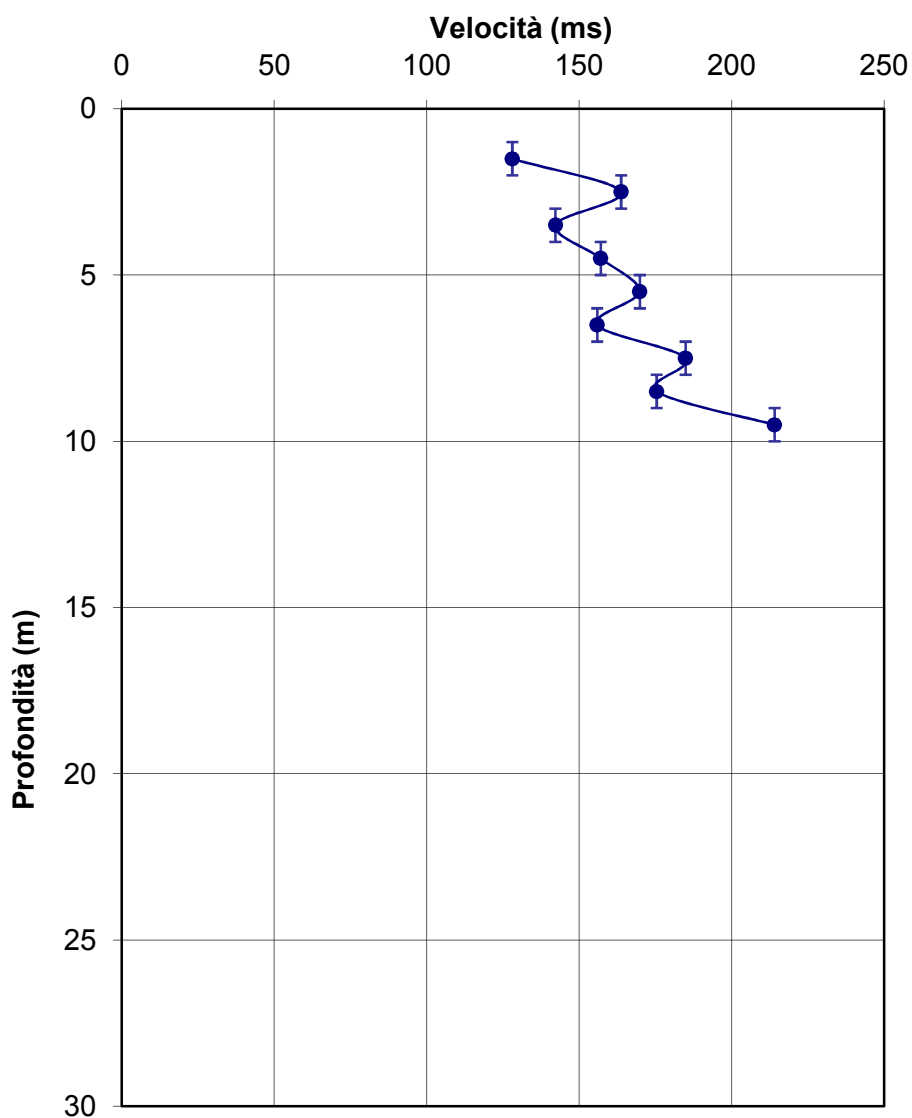
0,80 m

PREFORO:

0,10 m

[illegible]

GRAFICO ONDE S



SCPTU N° 1 PIAZZAMENTO



SCPTU N° 2 PIAZZAMENTO



SCPTU N° 3 PIAZZAMENTO



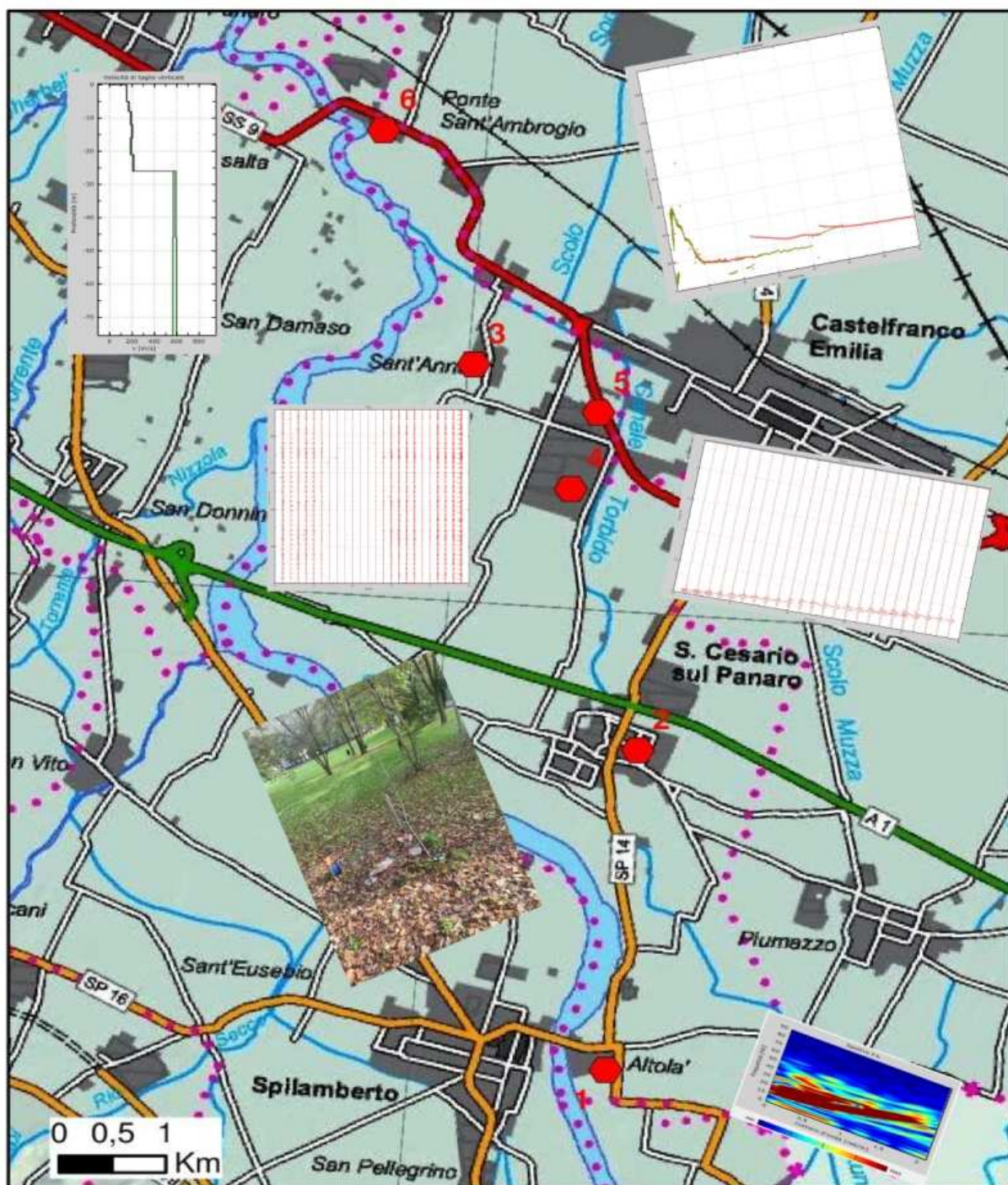
SCPTU N° 4 PIAZZAMENTO



Allegato n. 2

Report indagini in array sismico attive/Passive (MASW/ESAC)

Indagini sismiche in onde di superficie a supporto della Microzonazione Sismica del Comune di S. Cesario sul Panaro (MO)



Premessa

Nell'ambito degli studi per la Microzonazione Sismica, su incarico del Dott. Geol. Giorgio Gasparini, dello Studio Geologico Ambientale Arkigeo di Bastiglia (MO), sono state eseguite indagini sismiche in onde di superficie al fine di definire il modello di profilo verticale di velocità, in sei siti individuati all'interno del territorio del Comune di San Cesario sul Panaro, rispettivamente denominati (Figura 1):

- 1- Altolà, parco comunale di via S. Pertini;
- 2- Capoluogo, parco comunale di via A. De Gasperi;
- 3- Sant'Anna, Centro Sportivo di via del volontariato;
- 4- La Graziosa sud in via dell'elettronica;
- 5- La Graziosa nord in via del commercio;
- 6- Sant'Ambrogio in via Emilia.

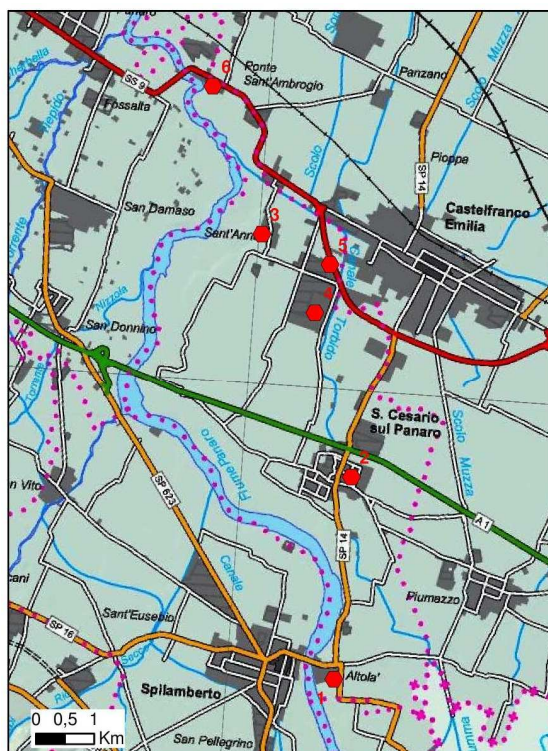


Figura 1-Inquadramento geografico con ubicazione dei siti nei quali sono state eseguite le indagini sismiche in onde di superficie.

Tipologia di indagini eseguite

In ognuno dei sei siti, identificati con i numeri 1, 2, 3, 4, 5 e 6 nella Figura 1, sono state effettuate:

- un'acquisizione di sismica attiva (componente verticale *delle onde di Rayleigh*) mediante stendimento lineare, con registrazioni elaborate secondo la metodologia comunemente denominata MASW (*Multichannell Analysis of Surface Waves*)¹
- un'acquisizione di sismica passiva (componente verticale delle onde di *Rayleigh*) mediante antenna sismica 2D, con registrazioni elaborate secondo la metodologia ESAC-*Extended Spatial Autocorrelation*.

Scopo delle indagini era di definire, per ciascuno dei siti indagati, un modello verticale di velocità per la determinazione del quale è stata effettuata la così detta "modellazione diretta" della curva di dispersione apparente, ricavata combinando i dati della omonima curva attiva (MASW), per le "alte frequenze (indicativamente maggiori di 5-15 Hz), e i dati della omonima curva passiva (ESAC), per le "basse frequenze" (indicativamente sotto i 5-15 Hz).

I rilievi sono stati eseguiti:

- il giorno 6 novembre 2024, nei siti identificati con i numeri 2 e 3 nella Figura 1;
- il giorno 8 novembre 2024, nel sito identificato con il numero 1 nella Figura 1;
- il giorno 22 novembre 2024, nei siti identificati con i numeri 4 e 6 nella Figura 1;
- il giorno 26 novembre 2024, nel sito identificato con il numero 5 nella Figura 1.

Strumentazione e parametri di acquisizione

Per effettuare le acquisizioni attive (MASW) e passive (ESAC) è stato impiegato un sismografo digitale della ditta Dolang di Genova, modello DBS280 a 24 canali, munito di cavi di 60 metri (lunghezza massima) e di geofoni con frequenza di taglio a 4,5 Hz. Per le indagini attive (MASW), i geofoni sono stati collocati sul terreno secondo un allineamento lineare di 34.5 m di lunghezza totale con un'equidistanza tra sensori adiacenti di 1.5 m. Come sistema di energizzazione si è utilizzata una mazza da dieci Kg battente su piastra, posta a 4.5 m di distanza dal geofono più vicino (*offset* minimo). Il sistema di acquisizione è stato attivato per chiusura del circuito (*trigger*) al contatto tra mazza battente e piastra, registrando per ogni colpo 4096 campioni con

¹ Sebbene l'acronimo possa essere utilizzato per indicare una qualsiasi metodologia multicanale, qui verrà inteso nel suo utilizzo "più comune", cioè ad indicare l'indagine attiva secondo uno stendimento lineare che considera l'acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh.

un passo di campionamento di 0,6 ms.

Per le acquisizioni di sismica passiva con antenna sismica (ESAC) i geofoni sono stati disposti secondo una geometria a L, con lati di lunghezza variabile in base alle condizioni logistiche locali: dai 3 ai 5 geofoni sul lato corto e i restanti sul lato lungo (lo spazio tra un geofono e quelli adiacenti non è risultato costante lungo ciascuno dei lati degli stendimenti, ma variabile tra 1.5 e 5 m). Sono state eseguite più registrazioni con un passo di campionamento di 2.4 ms, per una durata totale delle registrazioni su ogni sito compresa tra 13.5 e 20 minuti.

Le indagini multicanale attive e passive sono state elaborate e modellizzate in maniera combinata, utilizzando i software *MASW* (di Roma e associati) e, per alcune pre-elaborazioni (pulizia, filtraggio, ecc.), il software di libero utilizzo *Geopsy* (www.geopsy.org).

Nella procedura di modellazione diretta si è fatto riferimento, per condizionare il modello, anche ai dati disponibili di natura pregressa, sia di natura stratigrafica che geotecnica che geofisica.

Sito n. 1 – Altolà, parco comunale di via S. Pertini

Ubicazione: Il sito si colloca nel parco di via Sandro Pertini, nella frazione di Altolà (Figure 1/1 e 1/2).

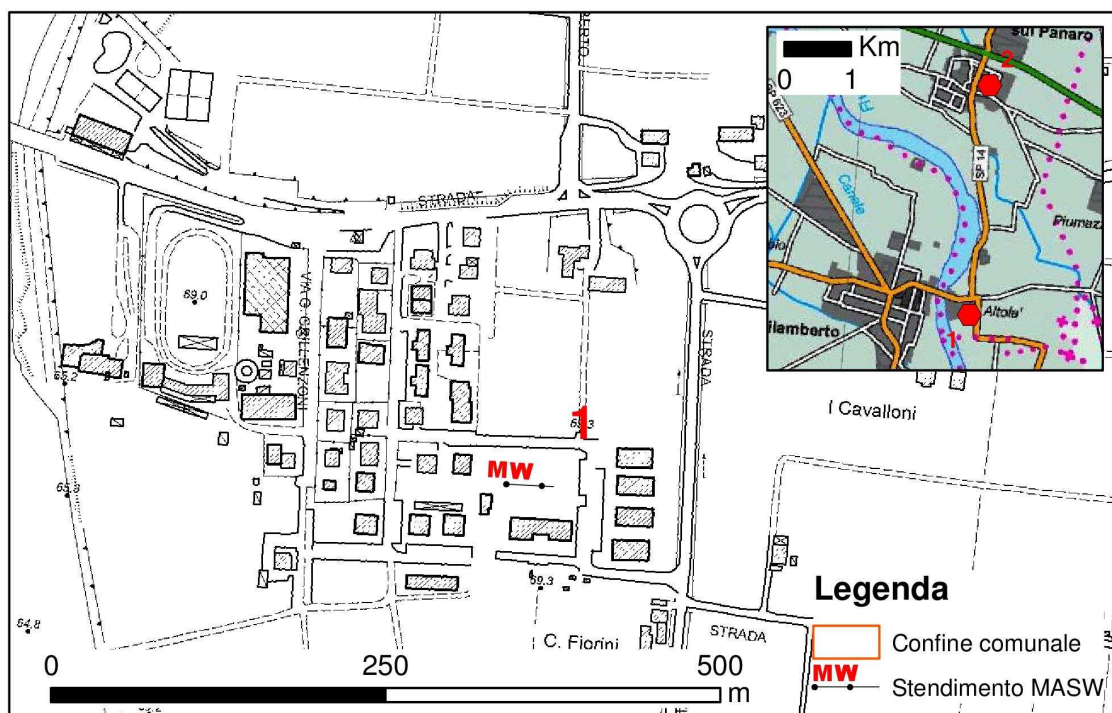


Figura 1/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW n. 1 nella frazione di Altolà di San Cesario sul Panaro (parco pubblico di via Sandro Pertini).



Figura 1/2. Stendimento sismico attivo nella frazione di Altolà di San Cesario sul Panaro (parco pubblico di via Sandro Pertini) – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da ovest).

Sismogrammi (Figura 1/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 1/4)

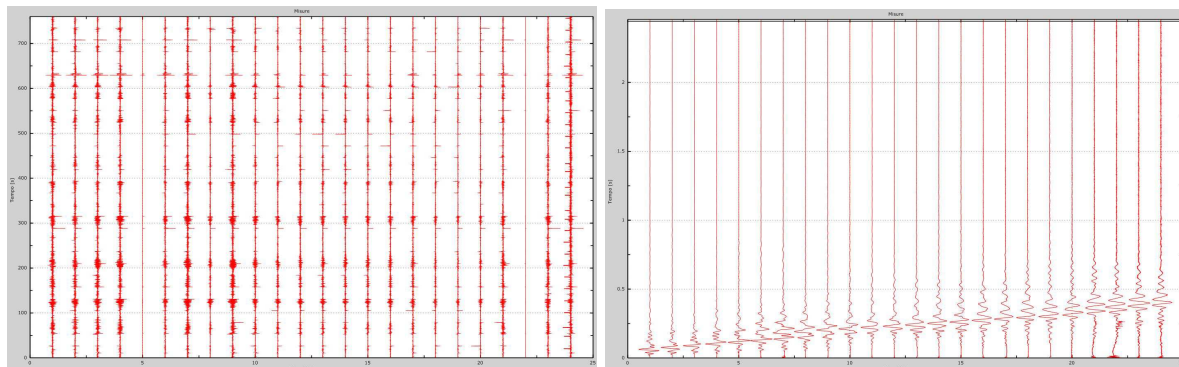


Figura 1/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

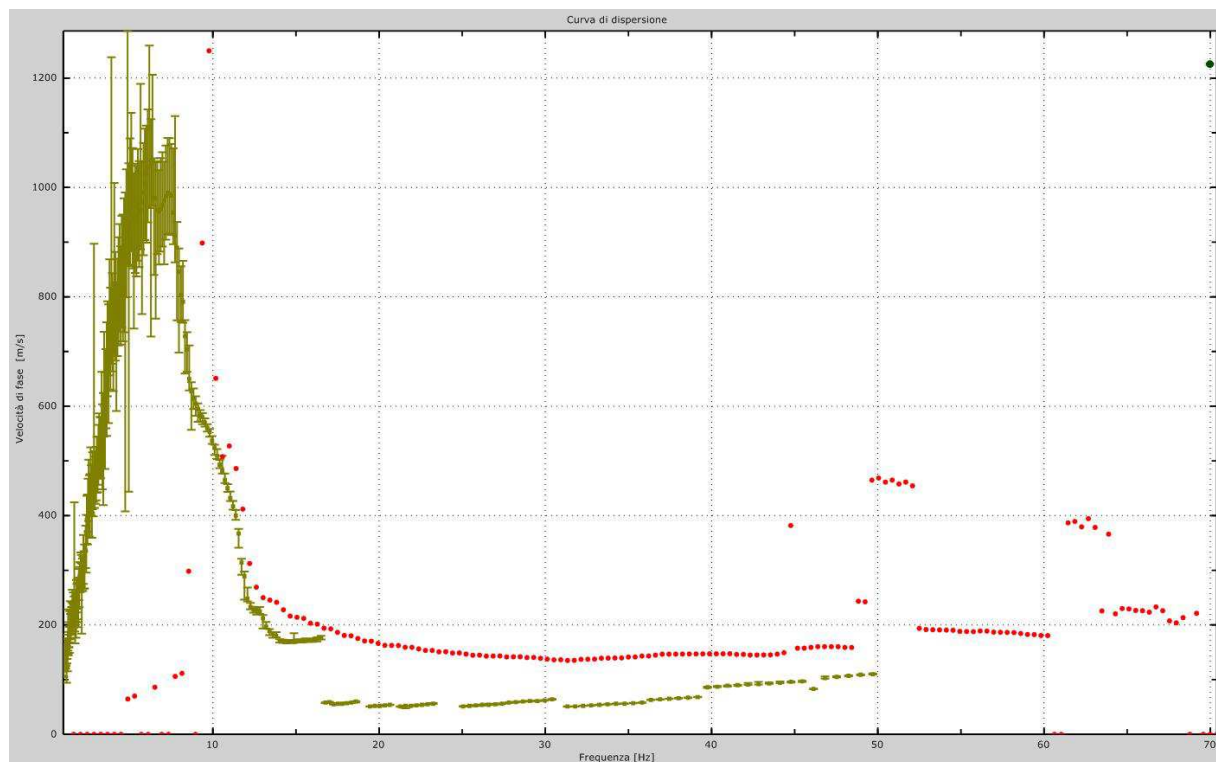


Figura 1/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 1/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 1/6)

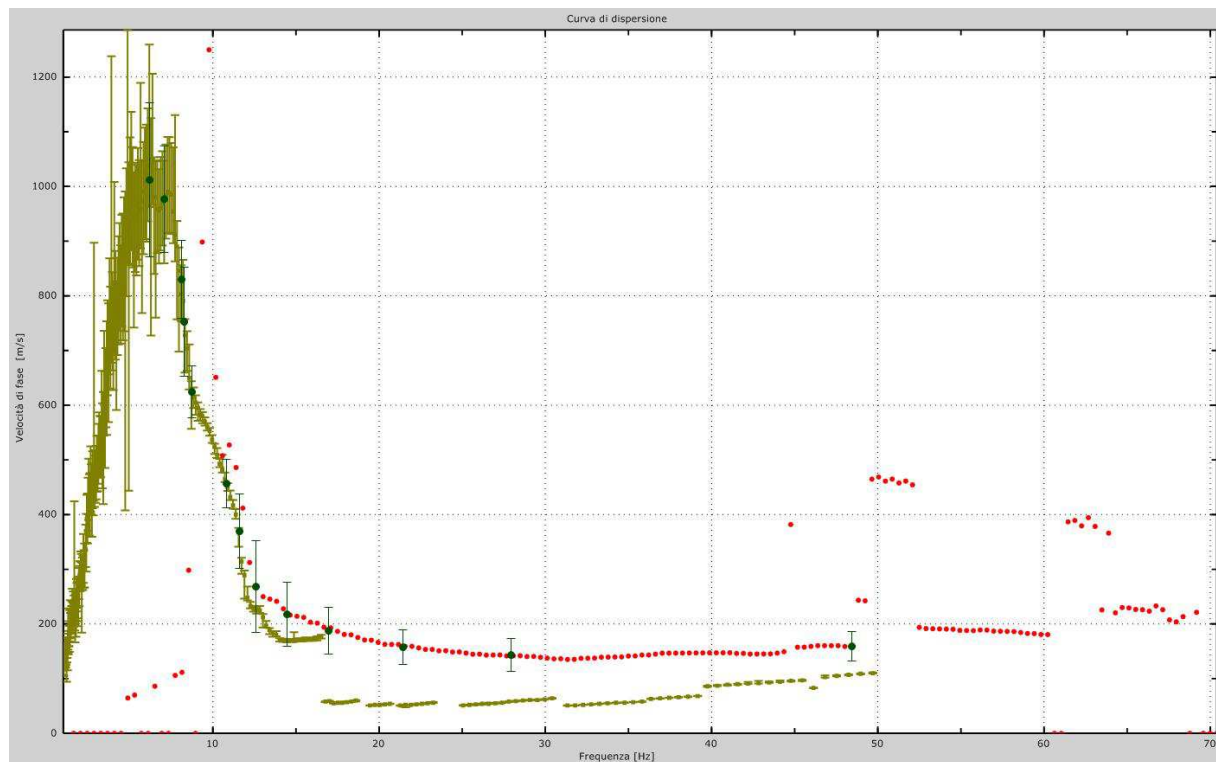


Figura 1/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 12 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 12 HZ.

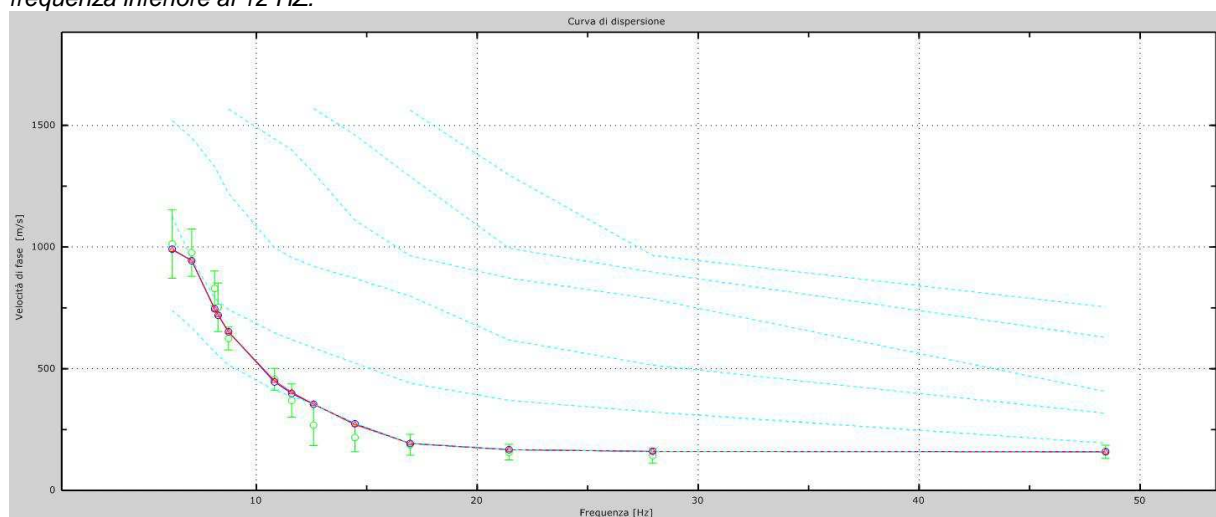


Figura 1/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 7%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 1/7 e 1/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 1/7 e 1/8)

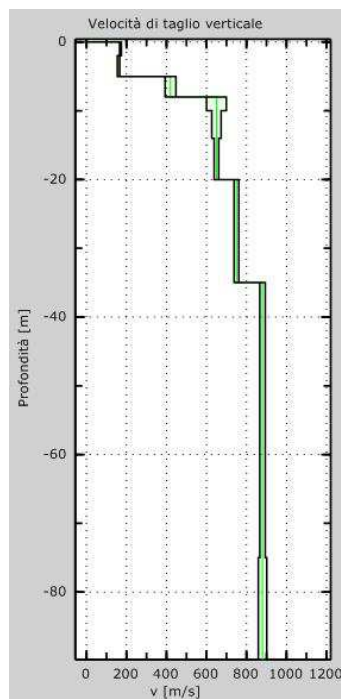


Figura 1/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	2	-2	1900	0,46	170	564
Suolo frammisto a ciottoli sparsi	3	-5	1900	0,45	160	531
Ciottoli e ghiaie prevalenti	3	-8	1900	0,38	420	955
	12	-20	2000	0,38	650	1477
Ciottoli e ghiaie prevalenti con interstrati compatti di argille e argille miste a ghiaie	15	-35	2100	0,45	750	2487
	40	-75	2100	0,45	880	2919
	15	-90	2200	0,48	880	2919

Figura 1/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 1/7.

VS30=431 m/s; Vseq(5 m) = 163 m/s. La Vseq a 5 m è stata calcolata tenendo conto dell'evidente contrasto di velocità tra strati superficiali e quelli sottostanti (ghiaie e ciottoli) che, nel modello di velocità, non sono comunque caratterizzati da valori di VS>800 m/s.

Sito n. 2 – Capoluogo, parco comunale di via A. De Gasperi

Ubicazione: Il sito è posto nel parco comunale di via A. De Gasperi, nel centro capoluogo (Figure 2/1 e 2/2).

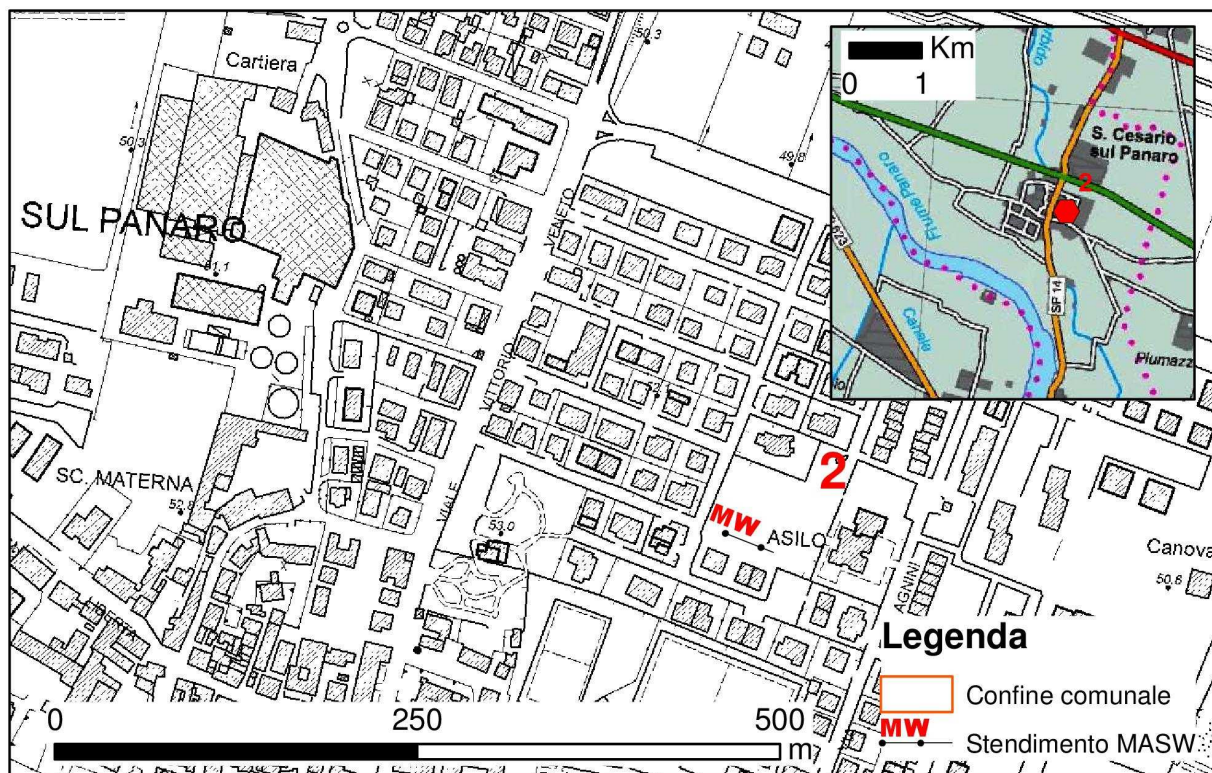


Figura 2/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW nel parco di via A De Gasperi, nel centro capoluogo.



Figura 2/2. Stendimento sismico nel centro capoluogo di San Cesario sul Panaro (parco pubblico di via A. De Gasperi) – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da ovest).

Sismogrammi (Figura 2/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 2/4)

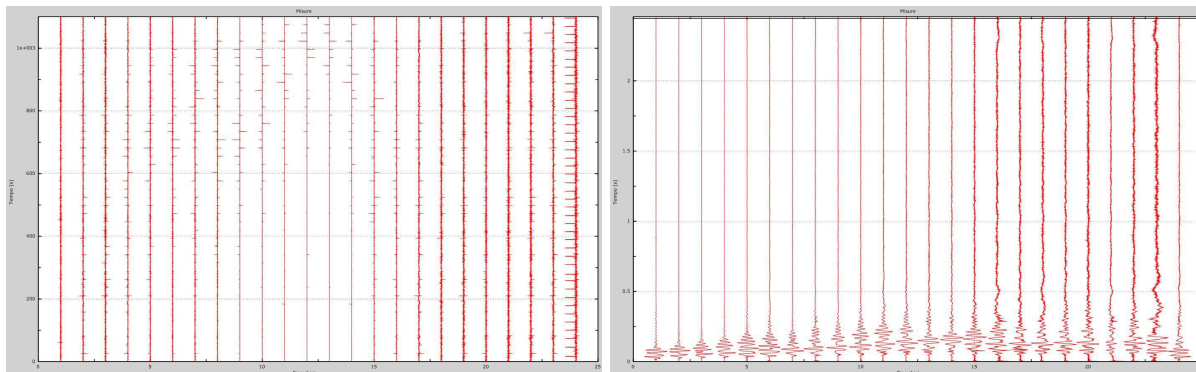


Figura 2/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

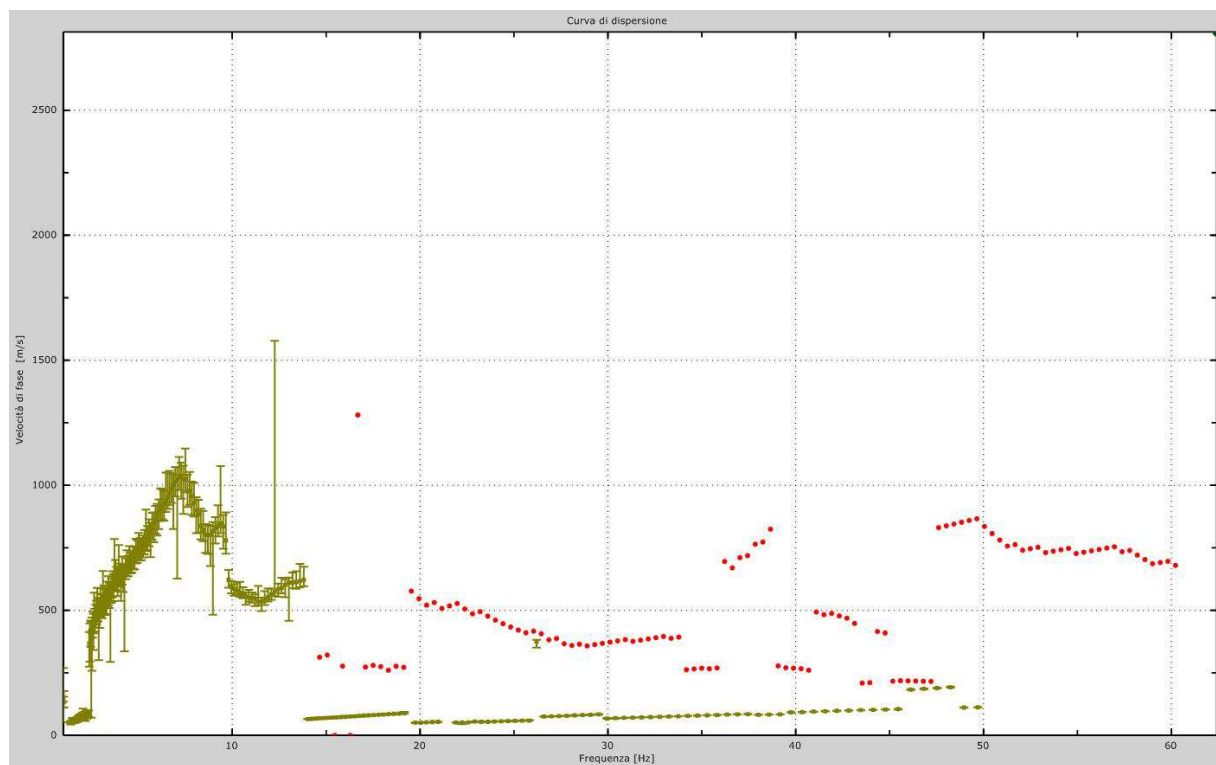


Figura 2/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 2/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 2/6)

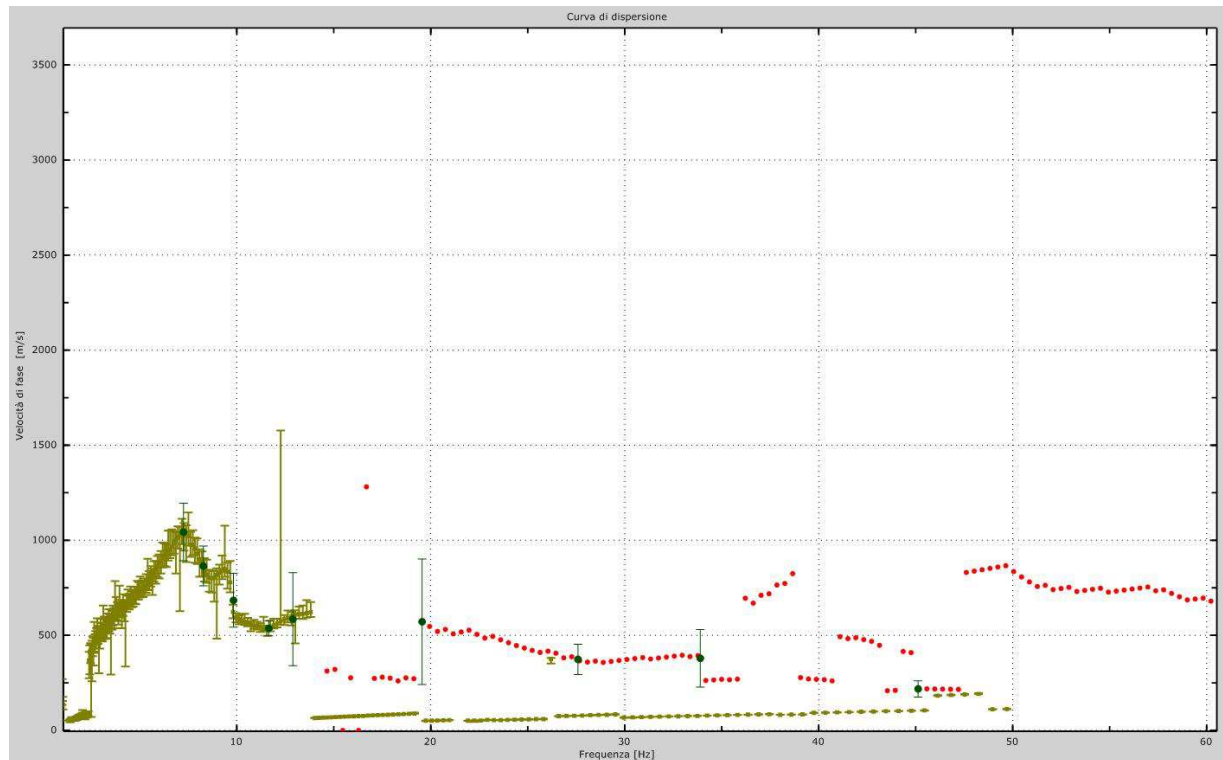


Figura 2/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 20 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 14 Hz. L'andamento tra 14 e 20 Hz non risulta chiaro.

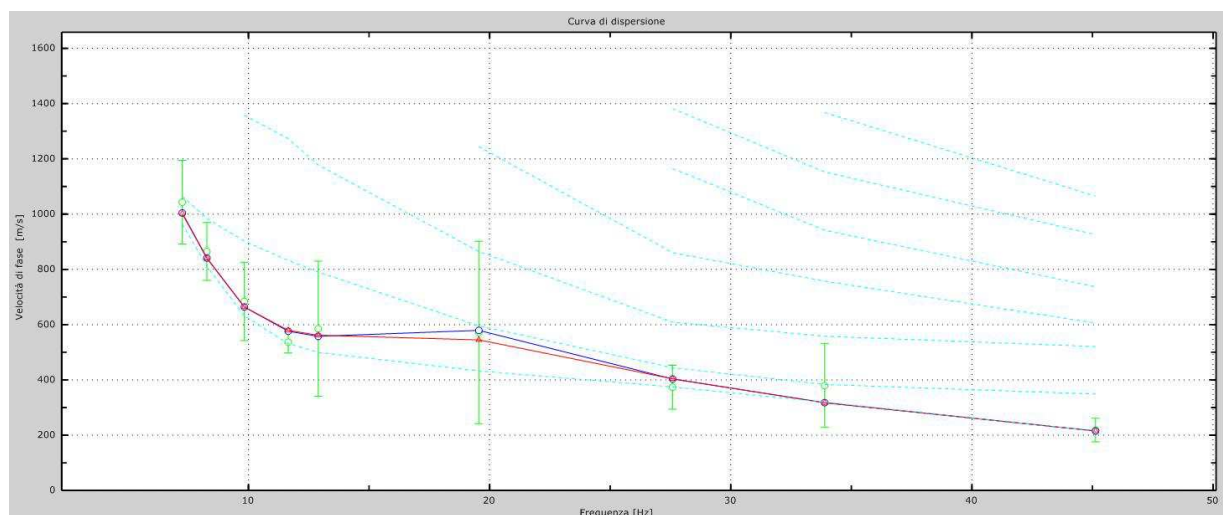


Figura 2/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 5%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 2/7 e 2/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 2/7 e 2/8)

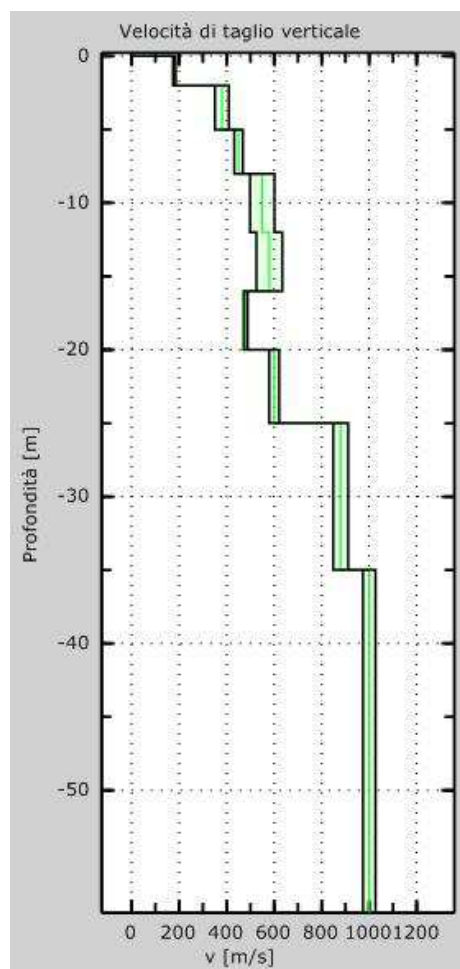


Figura 2/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	2	-2	1800	0,46	180	597
Ciottoli e ghiaie frammisti a suolo	3	-5	1800	0,38	380	864
Ciottoli e ghiaie prevalenti	3	-8	1900	0,38	450	1023
	4	-12	1900	0,38	550	1250
Ciottoli e ghiaie prevalenti con interstrati compatti di argille e argille miste a ghiaie	4	-16	1900	0,45	580	1924
	4	-20	2000	0,45	480	1592
	5	-25	2000	0,45	600	1990
Ghiaie prevalenti con strati a matrice argillosa, compatte	10	-35	2000	0,45	880	2919
	25	-60	2100	0,45	1000	3317

Figura 2/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 2/7.

$V_{s30} = 482$ m/s; $V_{seq}(25\text{ m}) = 450$ m/s. La V_{seq} a 25 m è stata calcolata per tenere conto del fatto che il modello presenta terreni con $V_S > 800$ m/s a partire da tale profondità.

Sito n. 3 – Sant’Anna, Centro Sportivo di via del volontariato

Ubicazione: Il sito coincide con parco comunale adiacente il centro sportivo della frazione di Sant’Anna, in via del volontariato (Figure 3/1 e 3/2).

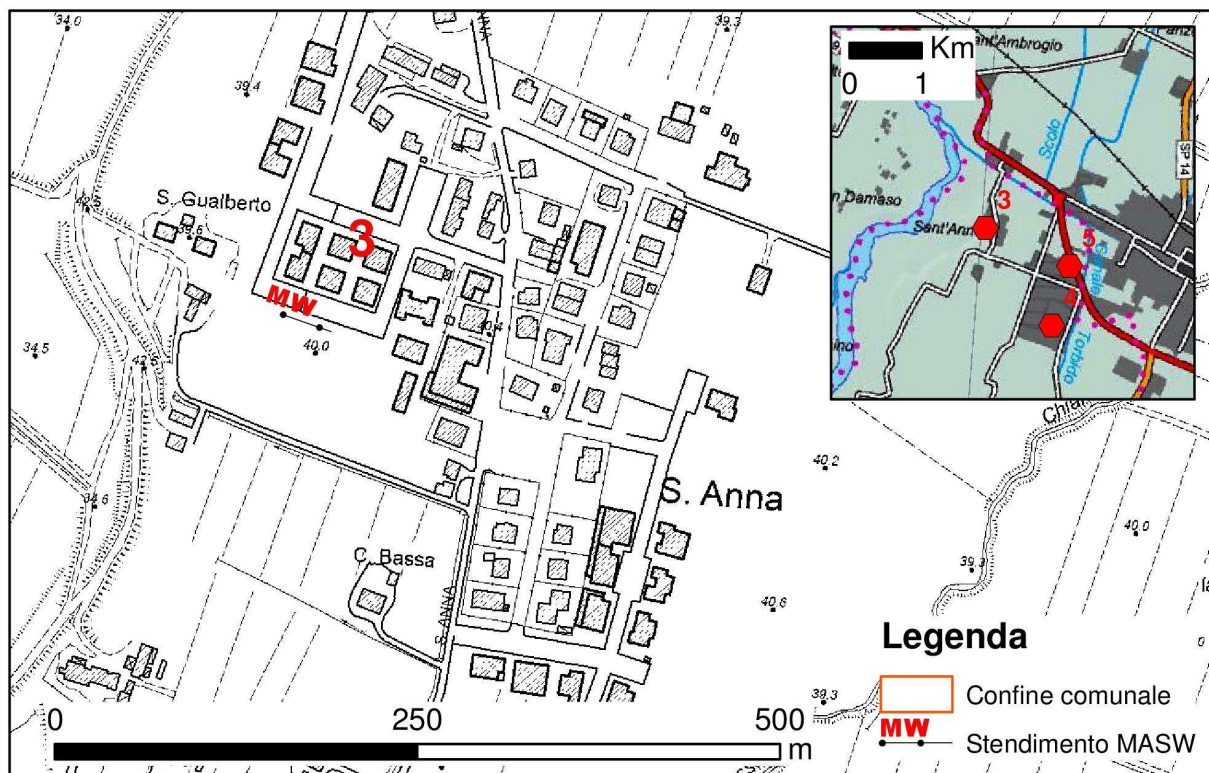


Figura 3/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW nel parco della frazione di Sant’Anna in via del volontariato.



Figura 3/2. Stendimento sismico nella frazione di Sant’Anna (parco pubblico di via del volontariato) – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da ovest).

Sismogrammi (Figura 3/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 3/4)

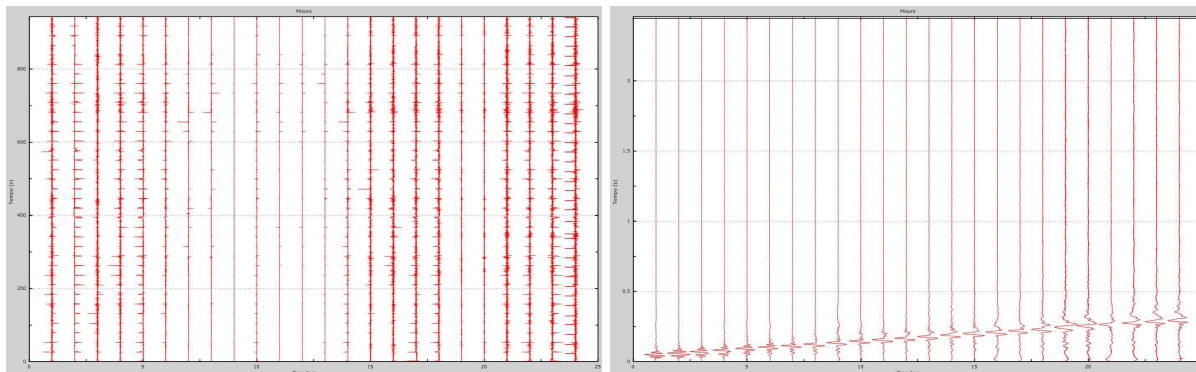


Figura 3/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

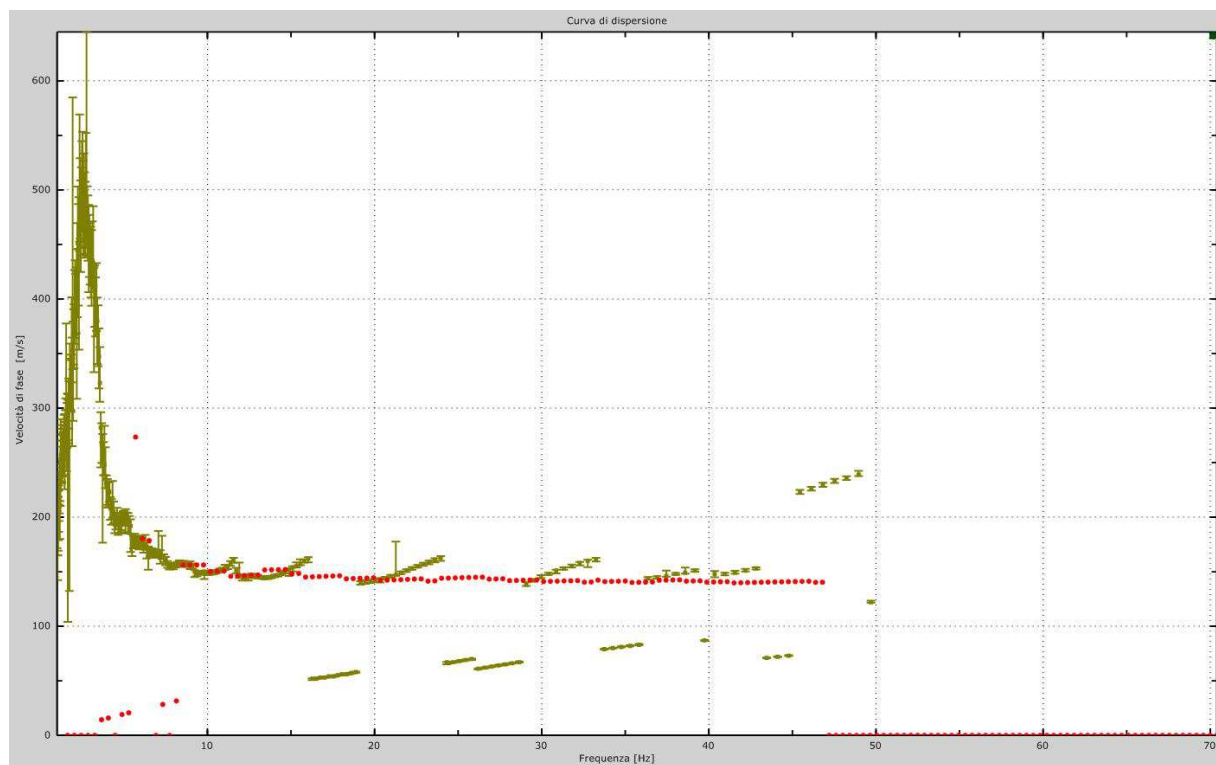


Figura 3/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 3/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 3/6)

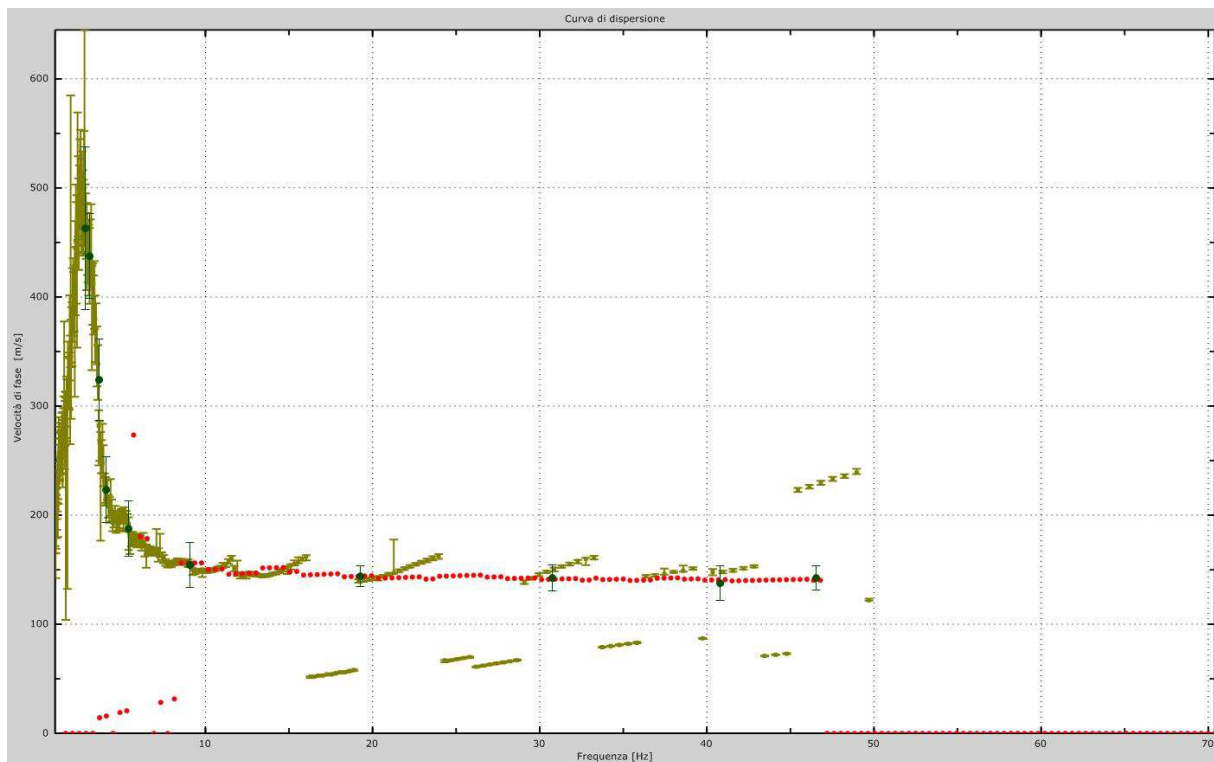


Figura 3/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 15 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 15 Hz. Si nota comunque sovrapposizione tra curva attiva e curva passiva tra 8 Hz e 15 Hz. Tale sovrapposizione si manifesta anche a frequenze maggiori dove però la forma della curva passiva risulta alterata a causa del fenomeno di spatial aliasing.

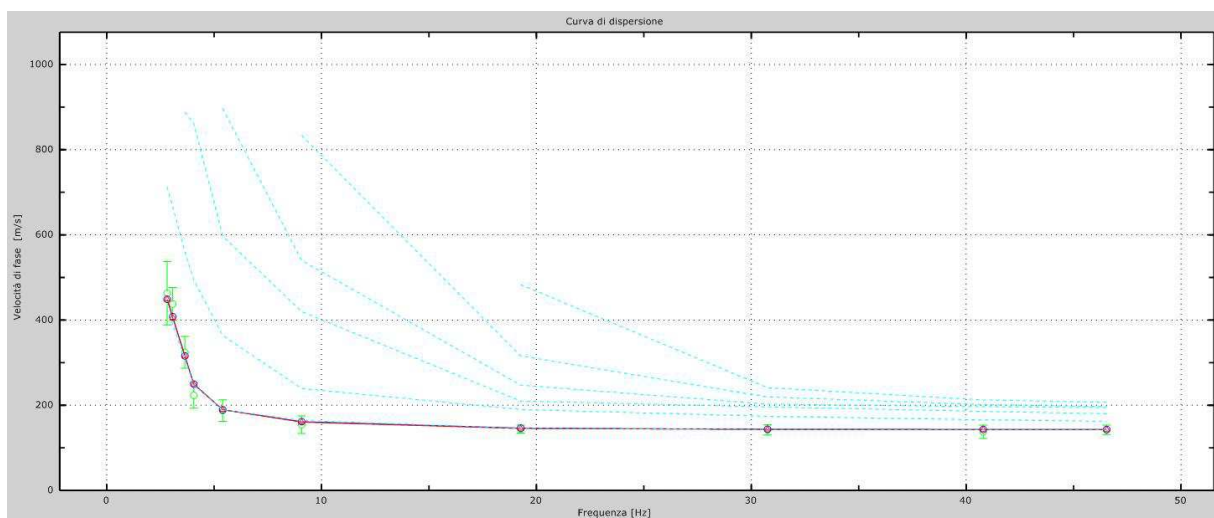


Figura 3/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 5%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 3/7 e 3/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 3/7 e 3/8)

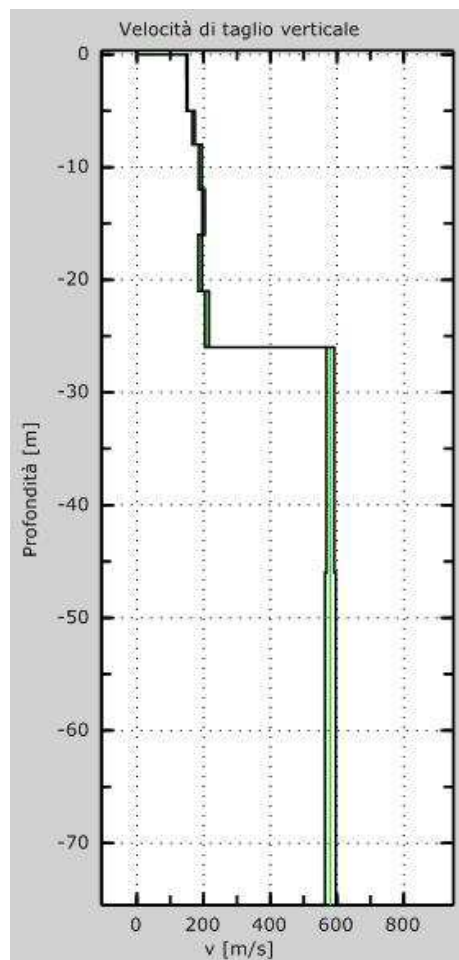


Figura 3/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	5	-5	1800	0,48	150	597
Argille e limi	3	-8	1800	0,48	170	864
	4	-12	1800	0,48	190	1023
Sabbia prevalenti	4	-16	1800	0,48	200	1250
Argille e limi	5	-21	2000	0,48	190	1924
	5	-26	2000	0,48	210	1592
Ciottoli e ghiaie con banchi argillosi	54	-80	2100	0,48	580	1990

Figura 3/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 3/7. VS30=201 m/s; Vseq(26 m) = 183 m/s. La Vseq a 26 m è stata calcolata per tenere conto dell'evidente contrasto di velocità tra strati superficiali e quelli sottostanti che, nel modello di velocità, non sono tuttavia caratterizzati da valori di VS>800 m/s).

Sito n. 4 – La Graziosa sud in via dell’elettronica

Ubicazione: Il sito coincide con un’ampia area privata posta in via dell’elettronica nella zona produttiva in località La Graziosa (Figure 4/1 e 4/2).

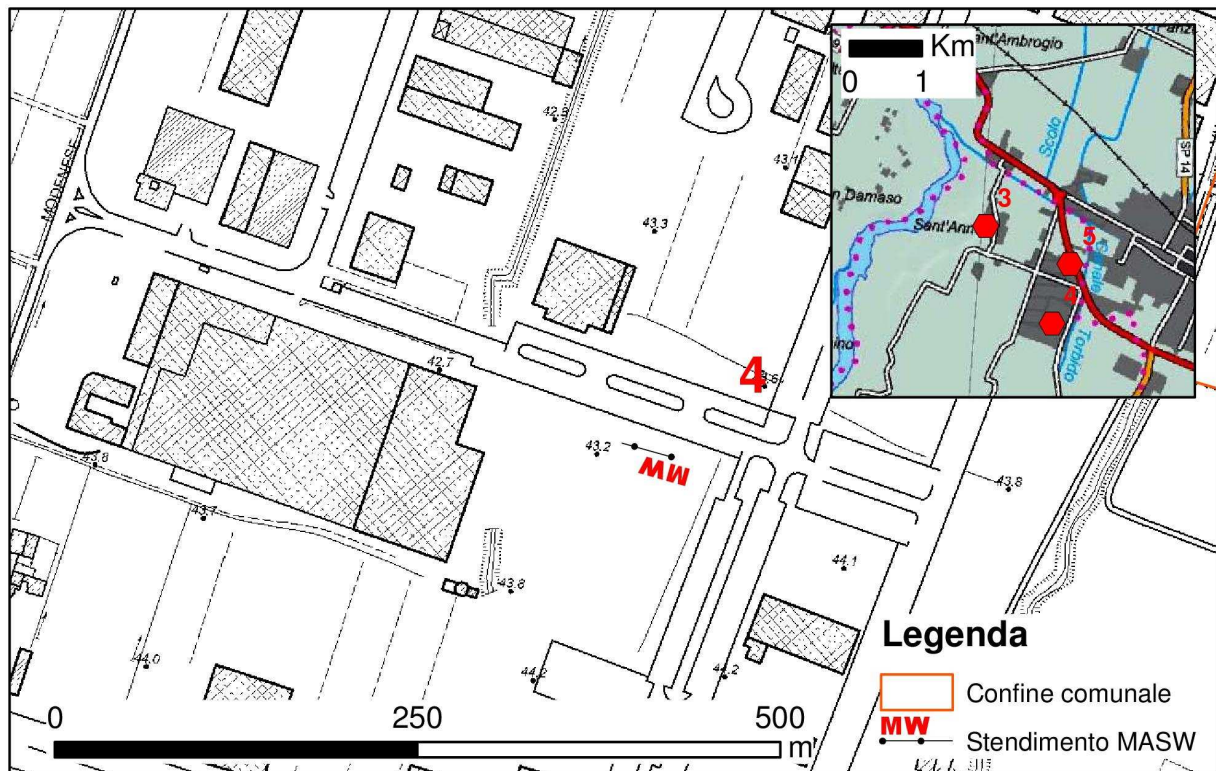


Figura 4/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW di via dell’elettronica, località La Graziosa.



Figura 4/2. Stendimento sismico attivo di via dell’elettronica (località La Graziosa) – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da est).

Sismogrammi (Figura 4/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 4/4)

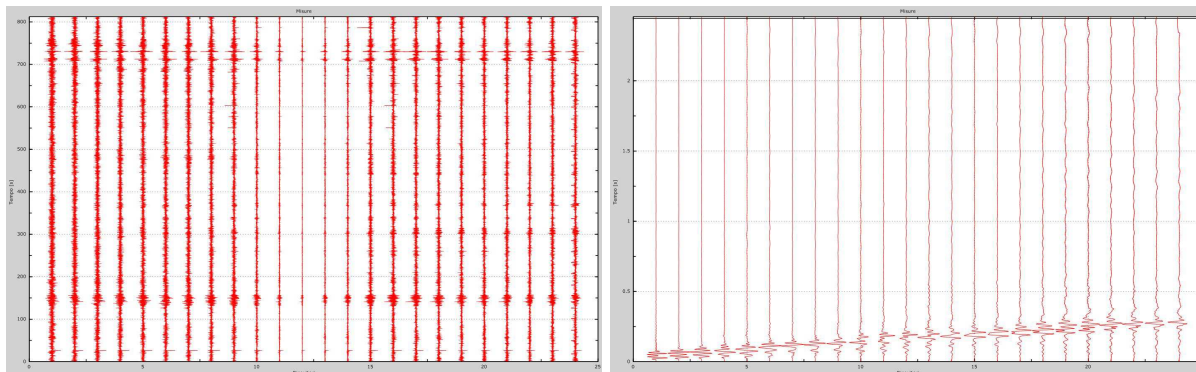


Figura 4/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

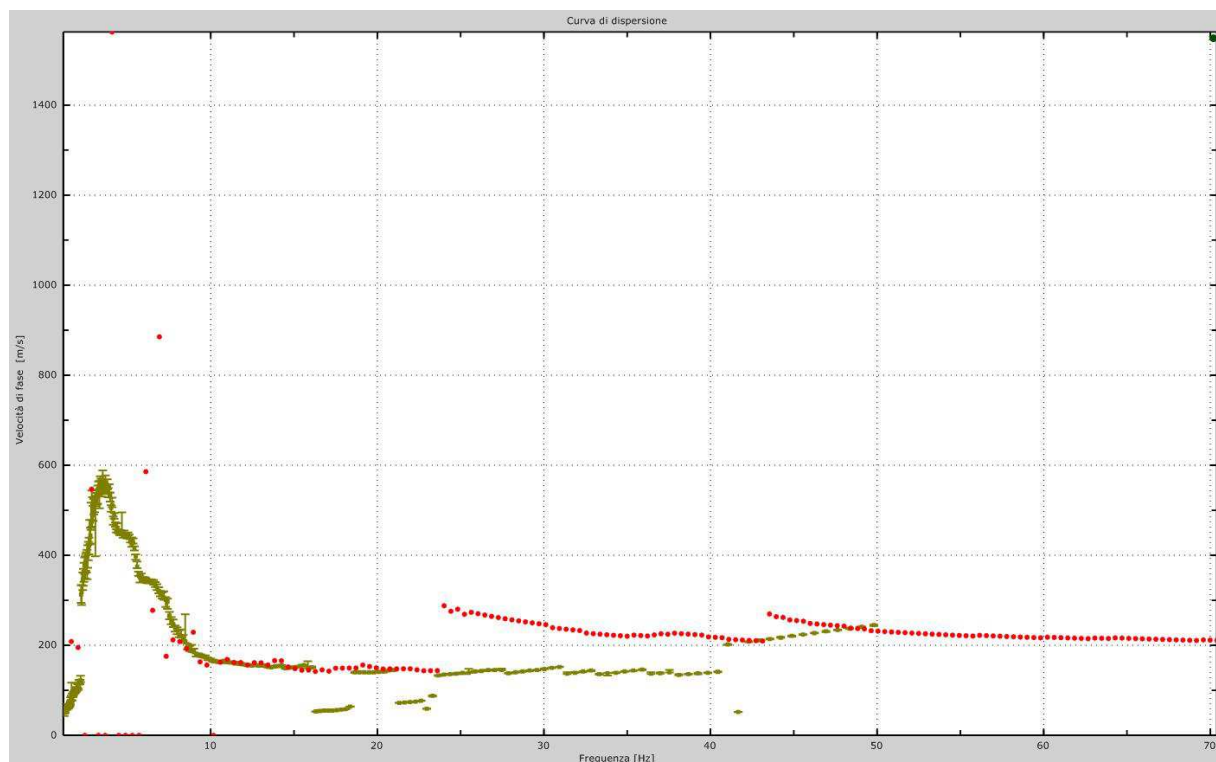


Figura 4/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 4/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 4/6)

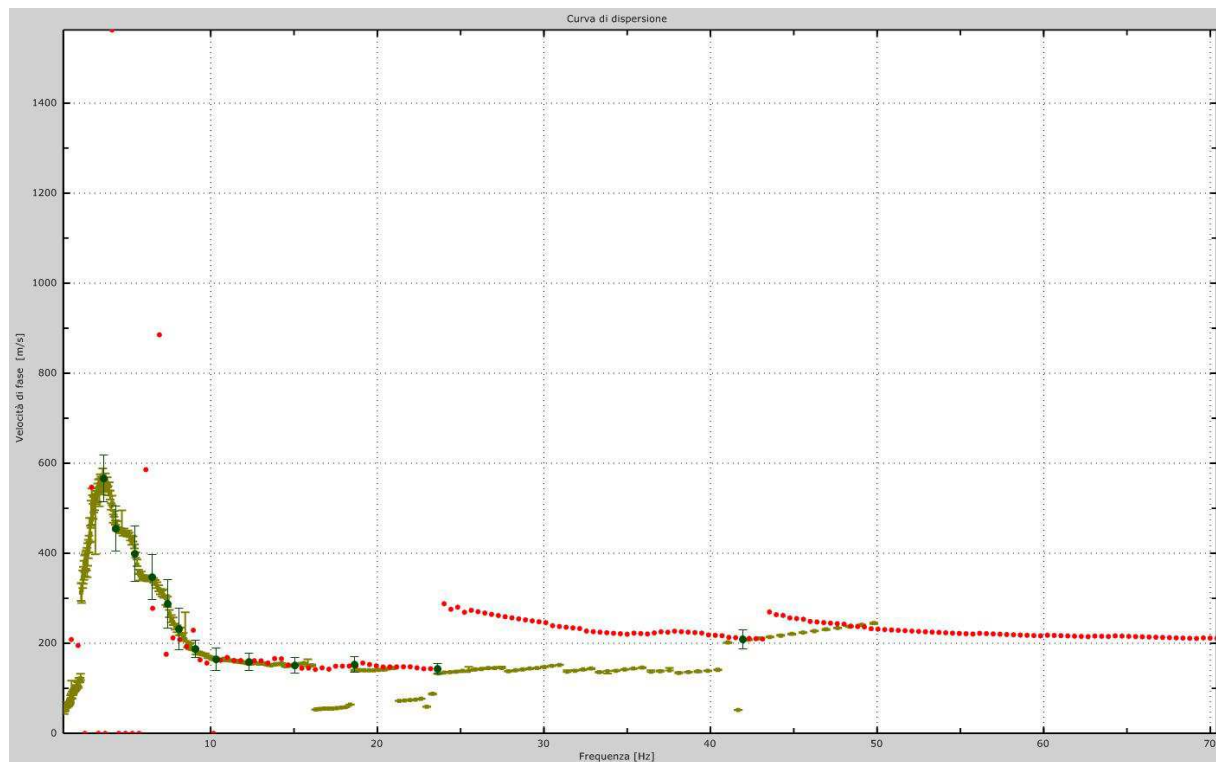


Figura 4/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 10 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 10 Hz. Si nota comunque sovrapposizione tra curva attiva e curva passiva tra circa 8 Hz e 25 Hz intervallo nel quale sarebbe possibile seguire una o l'altra curva indifferentemente.

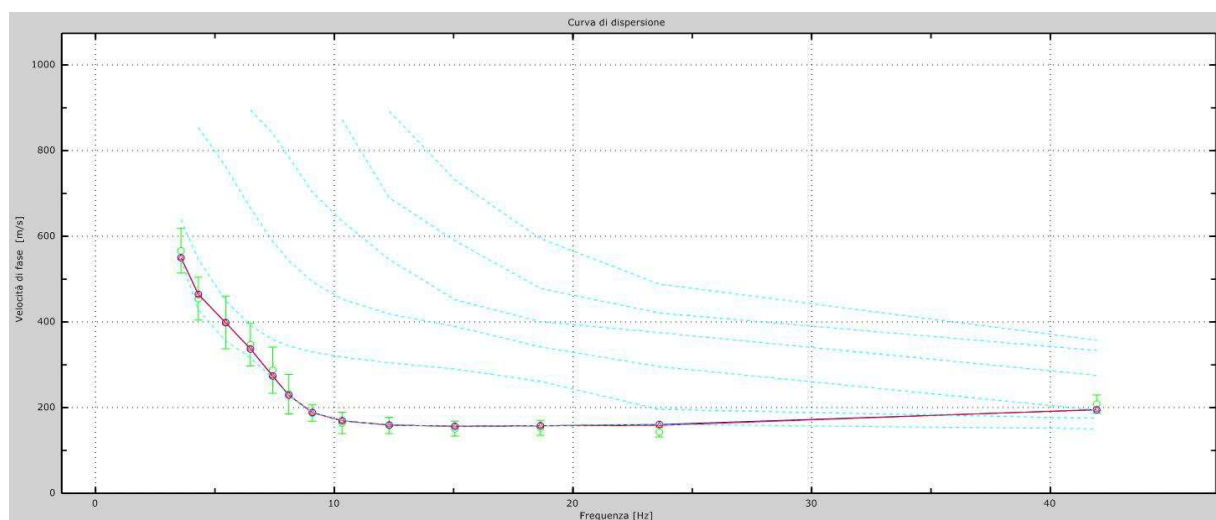


Figura 4/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 3%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 4/7 e 4/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 4/7 e 4/8)

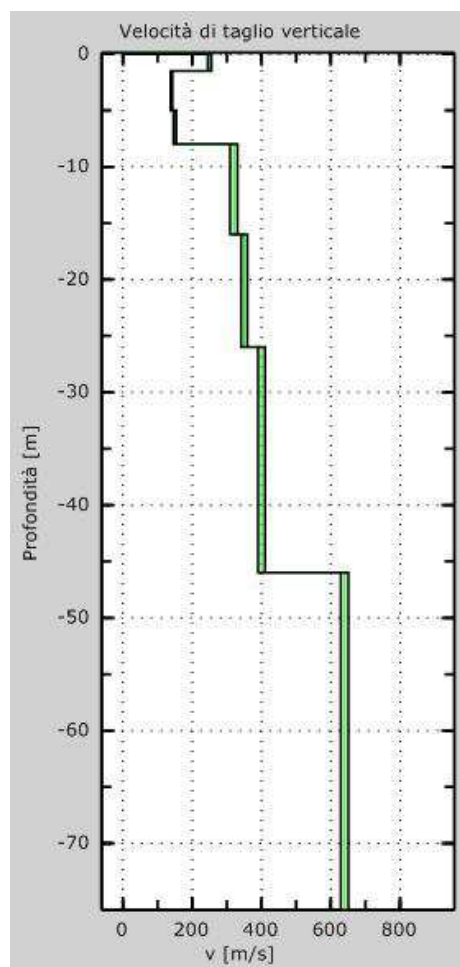


Figura 4/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	1,5	-1,5	1800	0,48	250	1275
Argille e limi	3,5	-5	1800	0,48	140	714
	3	-8	1800	0,48	150	765
Ciottoli e ghiaie con banchi argillosi compatti	8	-16	1900	0,48	320	1632
	10	-26	2000	0,48	350	1785
	20	-46	210	0,48	400	2040
	30	-76	2100	0,48	640	3263

Figura 4/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 4/7. VS30=261 m/s; Vseq(8 m) = 157 m/s. La Vseq a 8 m è stata calcolata per tenere conto dell'evidente contrasto di velocità tra strati superficiali e quelli sottostanti che, nel modello di velocità, non sono comunque caratterizzati da valori di VS>800 m/s).

Sito n. 5 – La Graziosa nord in via del commercio

Ubicazione: Il sito coincide con un campo (proprietà privata) a ridosso della tangenziale di Castelfranco Emilia raggiungibile da via del commercio, al margine nord della zona produttiva in località La Graziosa (Figure 5/1 e 5/2).

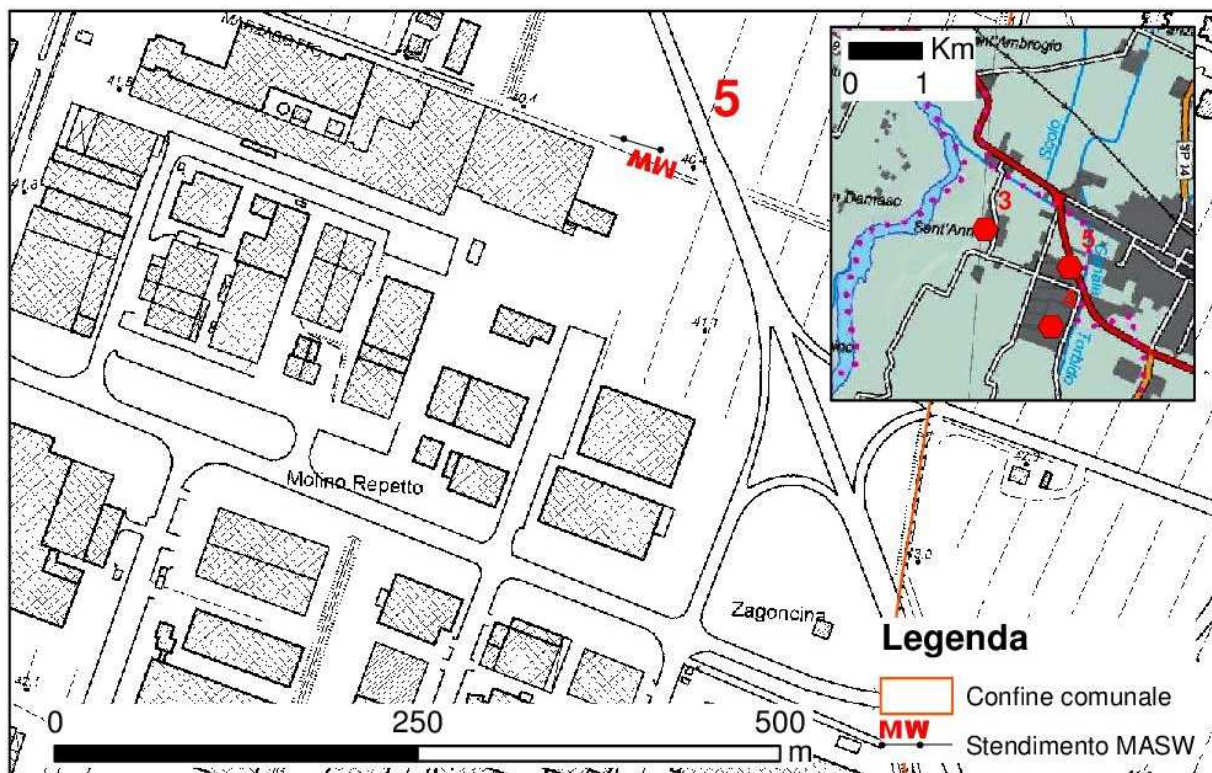


Figura 5/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW di via del commercio, località La Graziosa.



Figura 5/2. Stendimento sismico attivo di via del commercio (località La Graziosa) – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da est).

Sismogrammi (Figura 5/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 5/4)

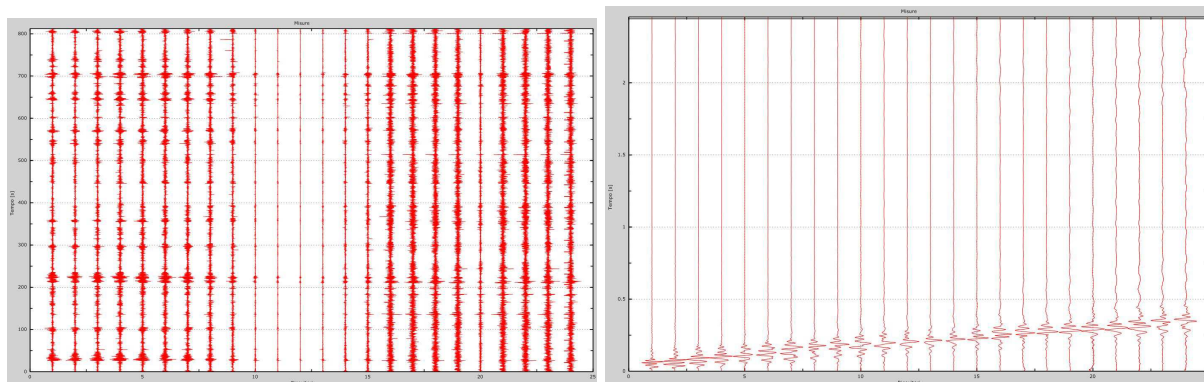


Figura 5/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

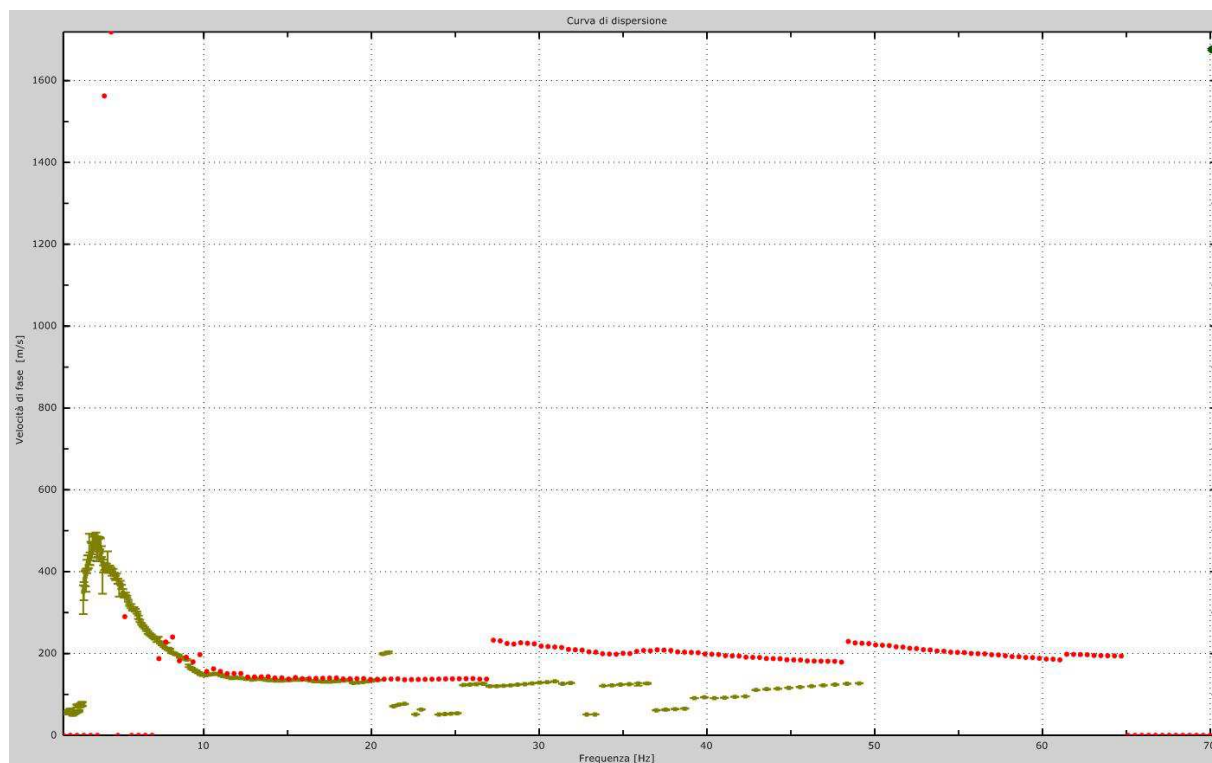


Figura 5/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 5/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 5/6)

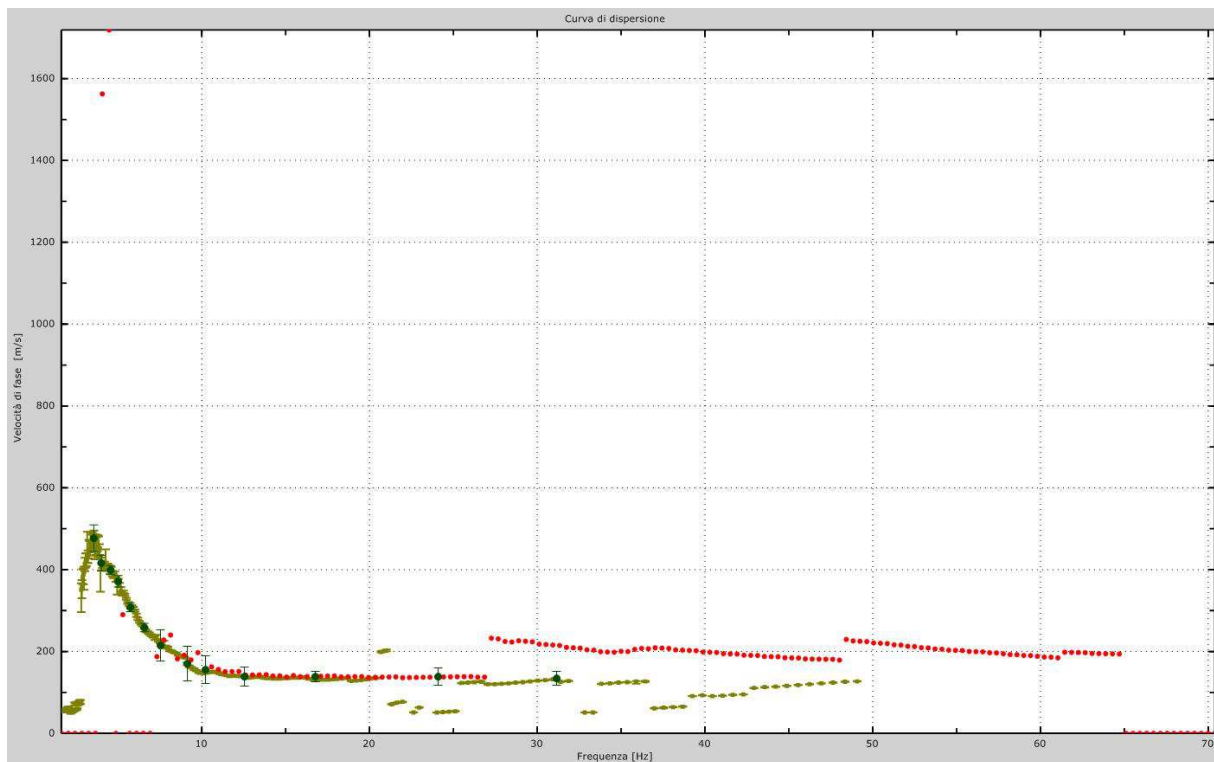


Figura 5/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 10 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 10 Hz. Si nota comunque sovrapposizione tra curva attiva e curva passiva tra circa 10 Hz e 20 Hz intervallo nel quale sarebbe possibile seguire una o l'altra curva indifferentemente.

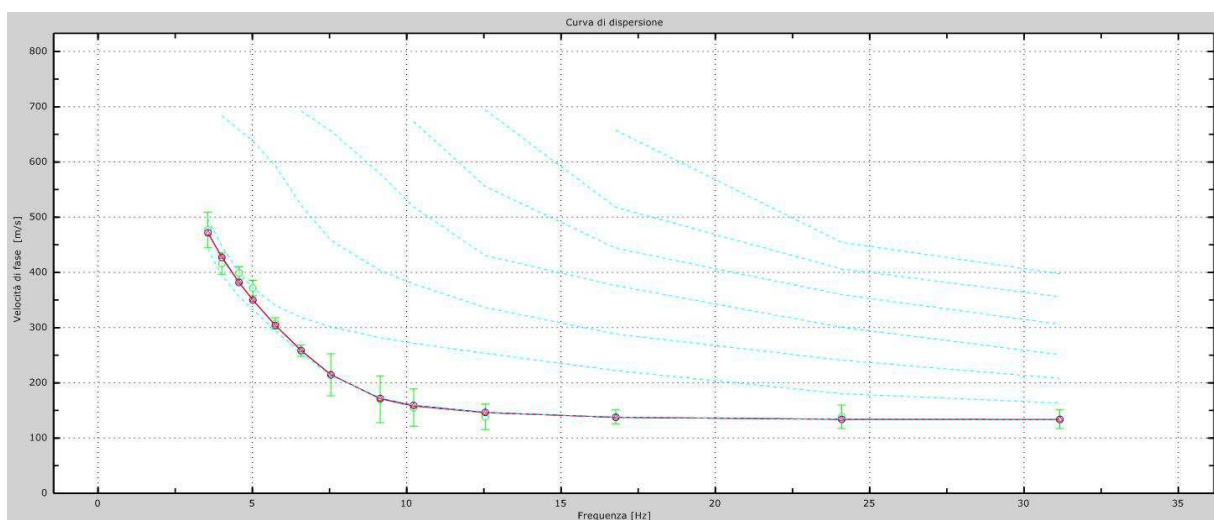


Figura 5/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 3%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 5/7 e 5/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 5/7 e 5/8)

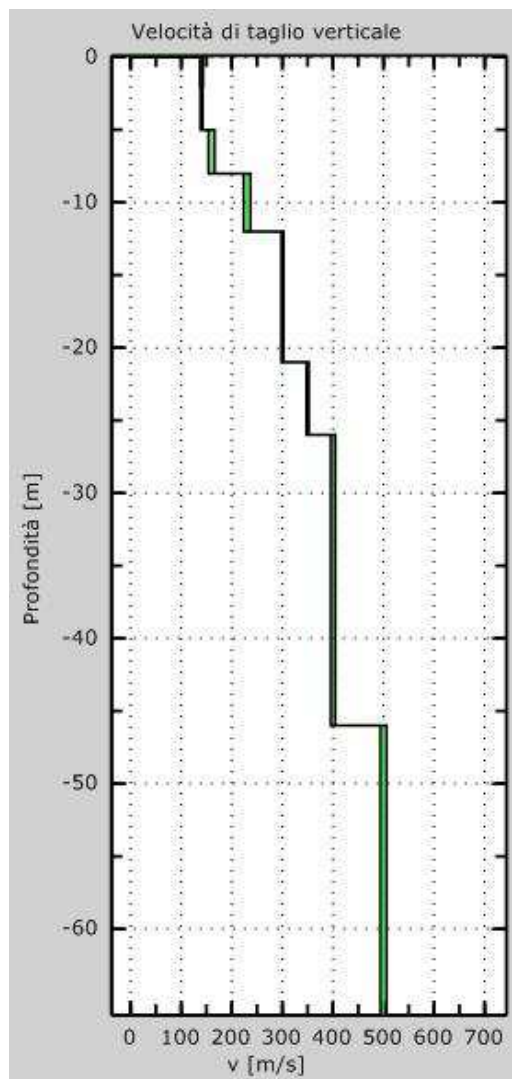


Figura 5/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	5	-5	1800	0,48	140	714
Argille e limi	3	-8	1800	0,48	160	816
	4	-12	1800	0,48	230	1173
Ciottoli e ghiaie con banchi argillosi compatti	9	-21	1900	0,48	300	1530
	5	-26	2000	0,48	350	1785
	20	-46	2000	0,48	400	2040
	20	-66	2100	0,48	500	2550

Figura 5/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 5/7.

VS30=237 m/s. L'attribuzione litologica tra 12 e 21 m è dubbia. Probabilmente si hanno commistioni tra strati argillosi e ghiaie o anche strati di ghiaie a matrice argillosa (matrix suspended).

Sito n. 6 - Sant'Ambrogio in via Emilia

Ubicazione: Il sito coincide con un terreno privato in un'area commerciale in via Emilia nei pressi della località Sant'Ambrogio (Figure 6/1 e 6/2).

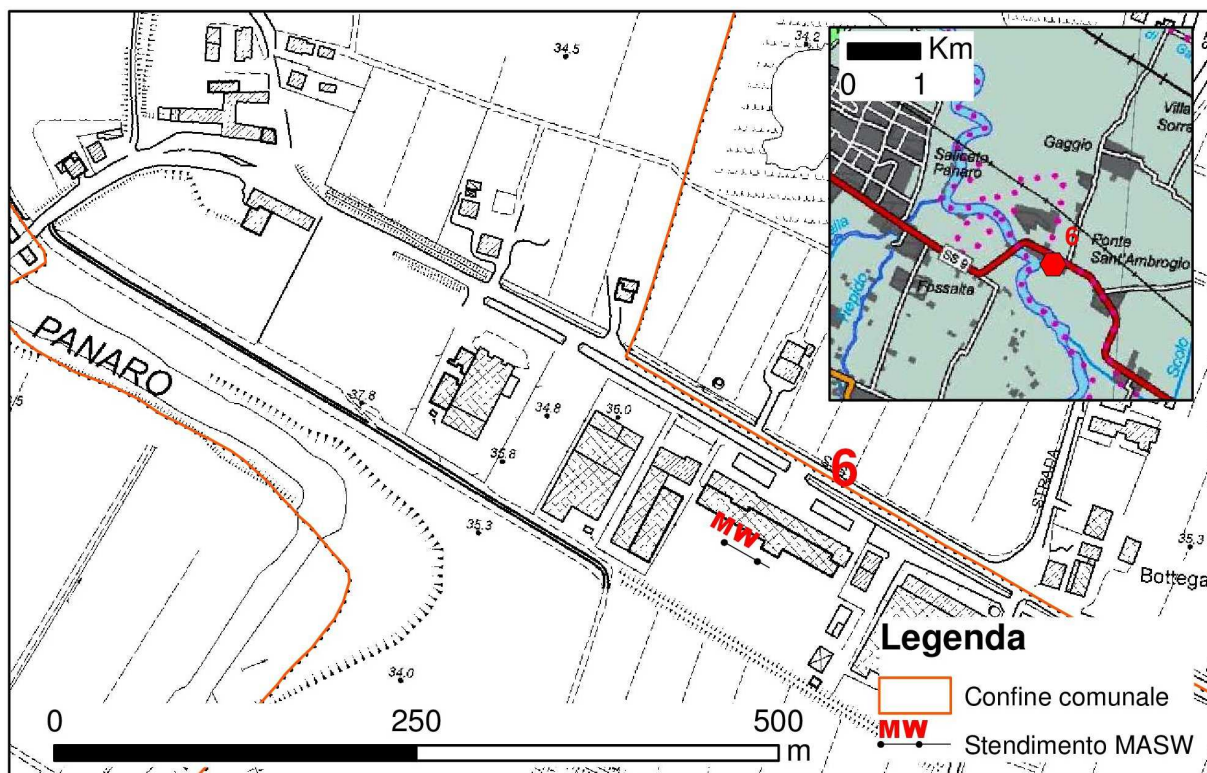


Figura 6/1 Individuazione dello stendimento sismico attivo in onde di superficie MASW di Sant'Ambrogio in via Emilia.



Figura 6/2. Stendimento sismico attivo di Sant'Ambrogio – Punto di vista dal lato del geofono n. 1 (vista da ovest).

Sismogrammi (Figura 6/3) e Curva di dispersione apparente combinata (Figura 6/4)

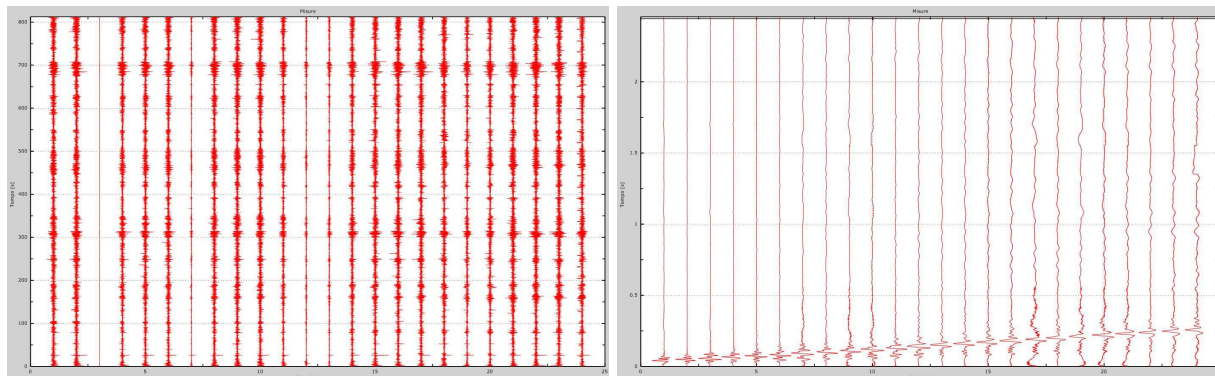


Figura 6/3. Sismogrammi acquisizione passiva ESAC (a sinistra). Sismogrammi acquisizione attiva MASW (a destra).

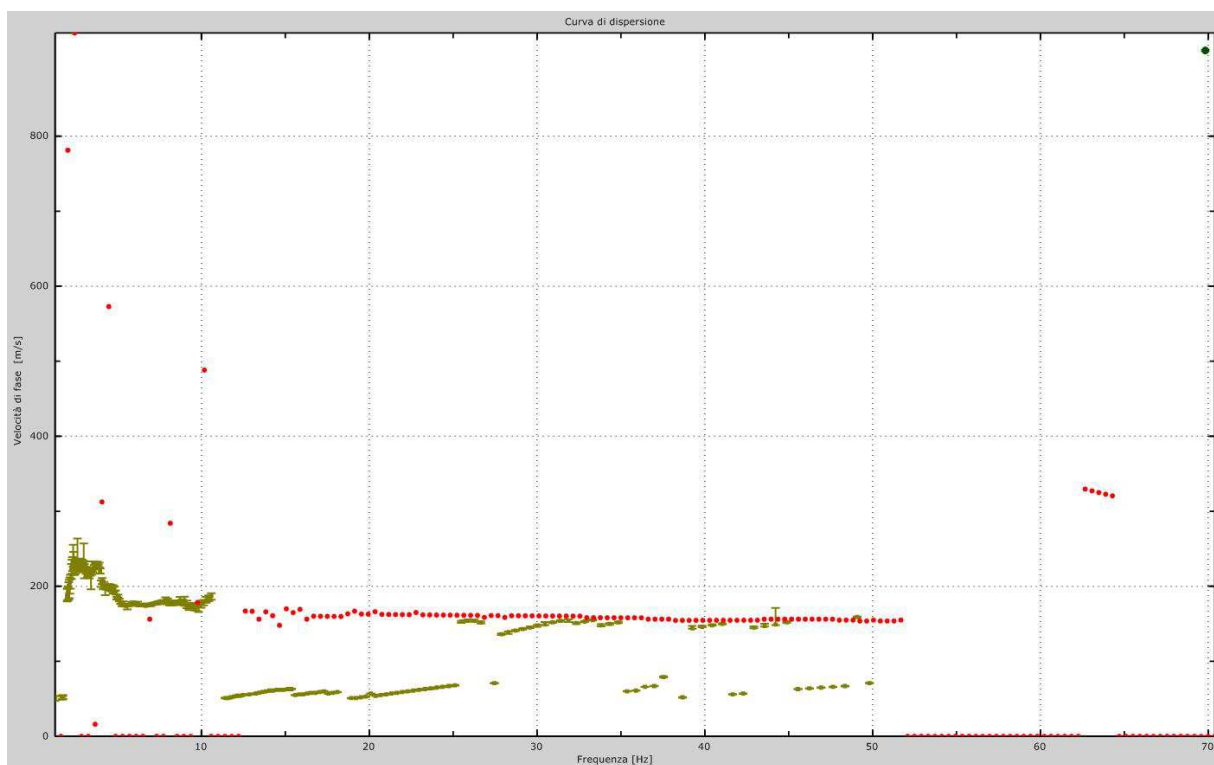


Figura 6/4. Curva di dispersione apparente (pre-picking) ottenuta combinando le curve relative all'acquisizione attiva (punti rossi) e all'acquisizione passiva (punti in verde).

Picking interpretativo della curva di dispersione apparente sperimentale (Figura 6/5) e Comparazione tra il picking interpretativo della curva di dispersione sperimentale apparente e la curva di dispersione apparente relativa al modello di velocità (Figura 6/6)

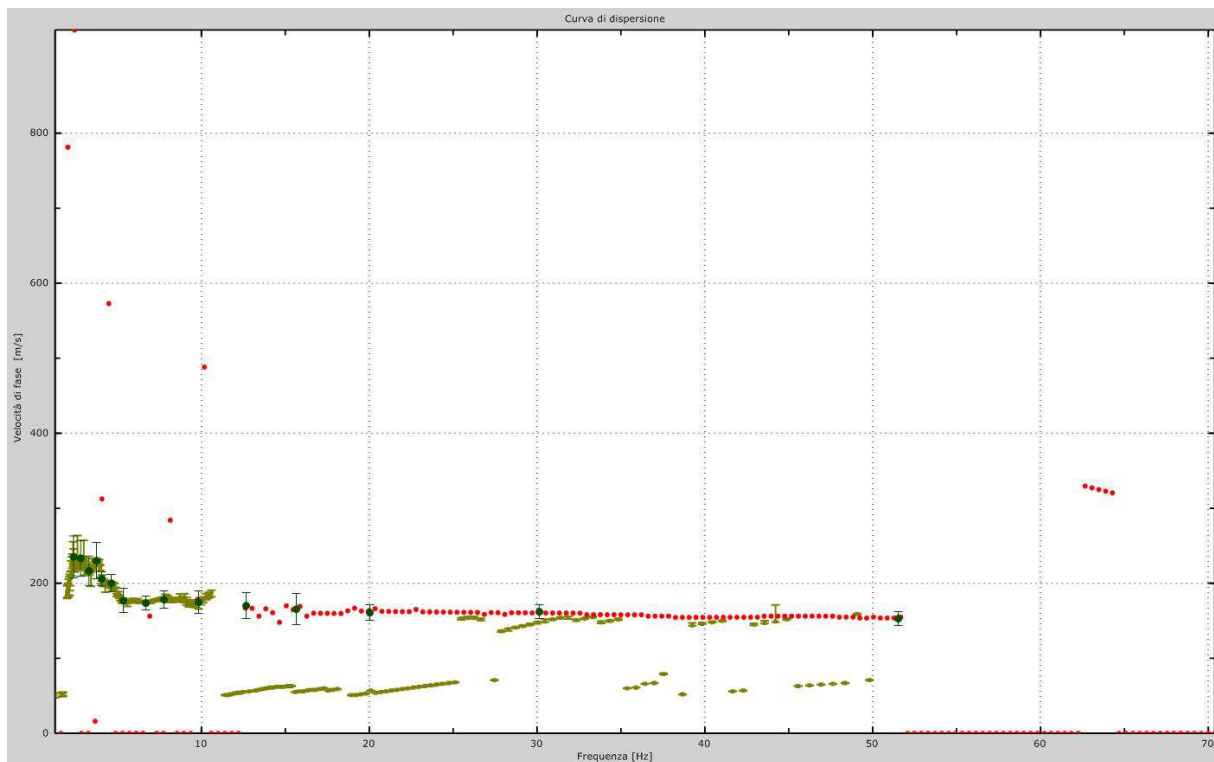


Figura 6/5. Picking interpretativo (punti in verde scuro) della curva di dispersione apparente combinata. Si è seguito il dato relativo al rilievo attivo per i punti a frequenza maggiore a circa 12 Hz, a quello passivo per i punti a frequenza inferiore ai 11 HZ.

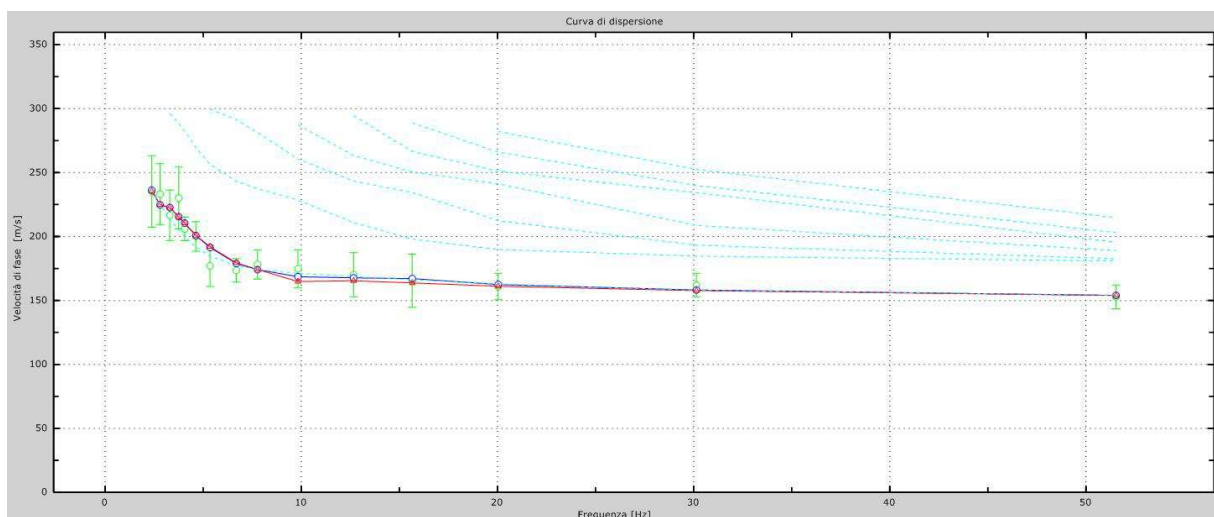


Figura 6/6. Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari rispettivamente al 3% e 4%) e modi vibrazionali (curve a tratteggio celeste) riferibili al modello di profilo verticale di velocità di cui alle Figure 6/7 e 6/8.

Modello di profilo verticale di velocità (Figure 6/7 e 6/8)

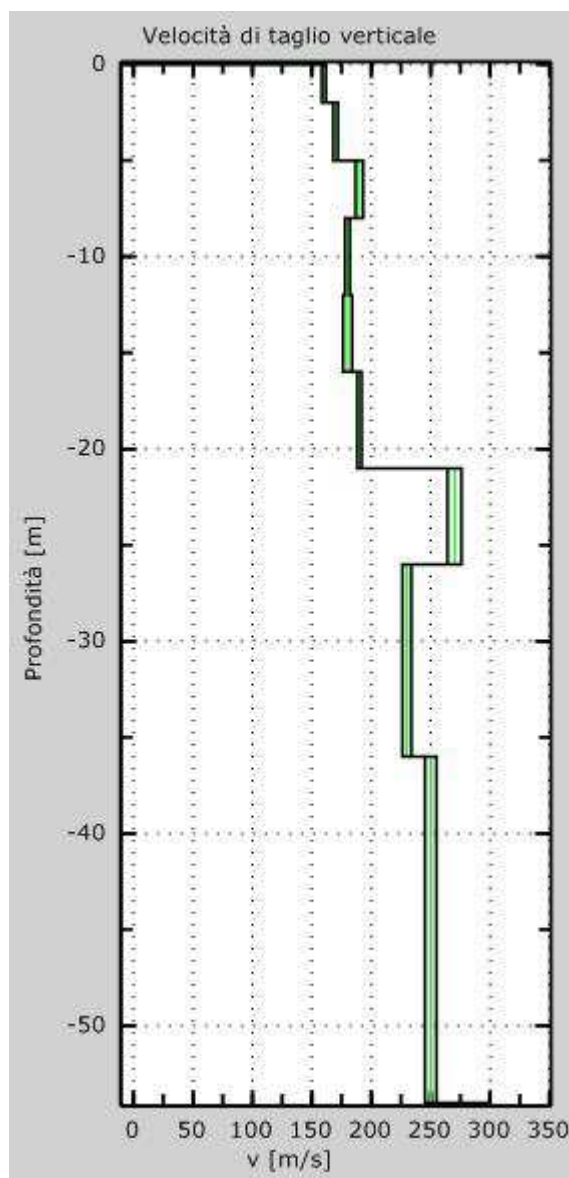


Figura 6/7. Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta del picking della curva di dispersione effettiva sperimentale MASW-ESAC.

Strato	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Suolo e materiali di riporto	2	-2	1800	0,48	160	816
Argille e limi prevalenti con intercalazioni sabbiose e/o ghiaiose anche di spessore plurimetrico	3	-5	1800	0,48	170	867
	3	-8	1800	0,48	190	969
	8	-16	1900	0,48	180	918
	5	-21	1900	0,48	190	969
	5	-26	1900	0,48	270	1377
	10	-36	2000	0,48	230	1173
	18	-54	2000	0,48	250	1275

Figura 6/8. – Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità di cui alla Figura 6/7.
VS30=196 m/s.

Conclusioni

A supporto degli studi di microzonazione sismica, su incarico del Dott. Geol. Giorgio Gasparini, dello Studio Geologico Ambientale Arkigeo di Bastiglia (MO), sono state eseguite indagini sismiche in onde di superficie, al fine di definire il modello di profilo verticale di velocità, nel Comune di San Cesario sul Panaro (MO), in sei siti rispettivamente denominati (Figura 1):

- 1- . Altolà, parco comunale di via S. Pertini;
- 2- Capoluogo, parco comunale di via A. De Gasperi;
- 3- Sant'Anna, Centro Sportivo di via del volontariato;
- 4- La Graziosa sud in via dell'elettronica;
- 5- La Graziosa nord in via del commercio;
- 6- Sant'Ambrogio in via Emilia.

In ciascun sito è stata eseguita un'acquisizione attiva per mezzo di uno stendimento lineare e geofoni verticali (MASW attiva, componente verticale), unitamente a un'acquisizione passiva utilizzando la medesima strumentazione e con una disposizione bidimensionale dei geofoni (ESAC).

Vignola, 19 dicembre 2024

Il tecnico
Dott. Geol. Marco Capitani



Allegato n. 3

Report indagini passive a stazione singola (HVSR)

MS_S_CESARIO, VIA EMILIA HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 30/12/24 08:15:00 Fine registrazione: 30/12/24 08:35:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 92% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

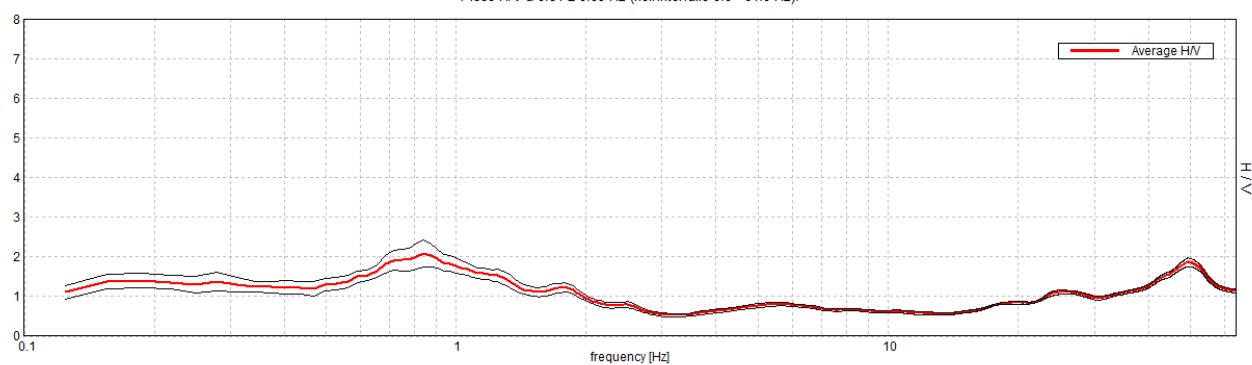
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

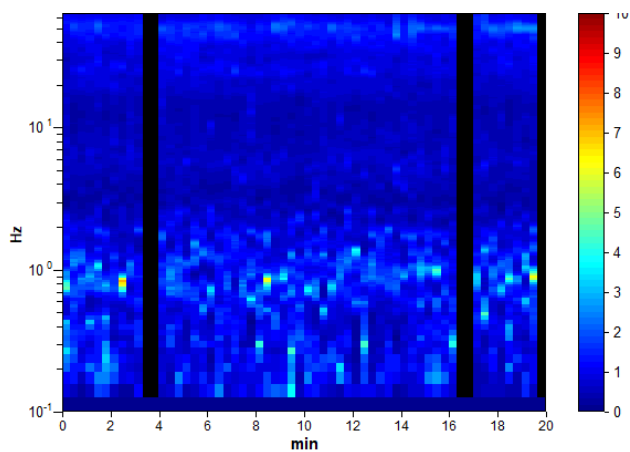
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

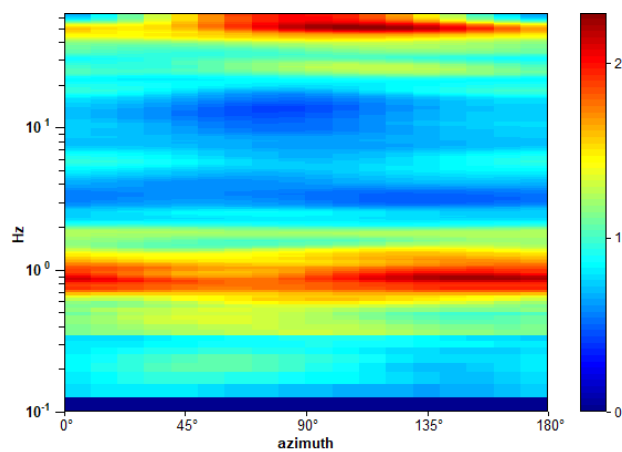
Picco H/V a 0.84 ± 0.09 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



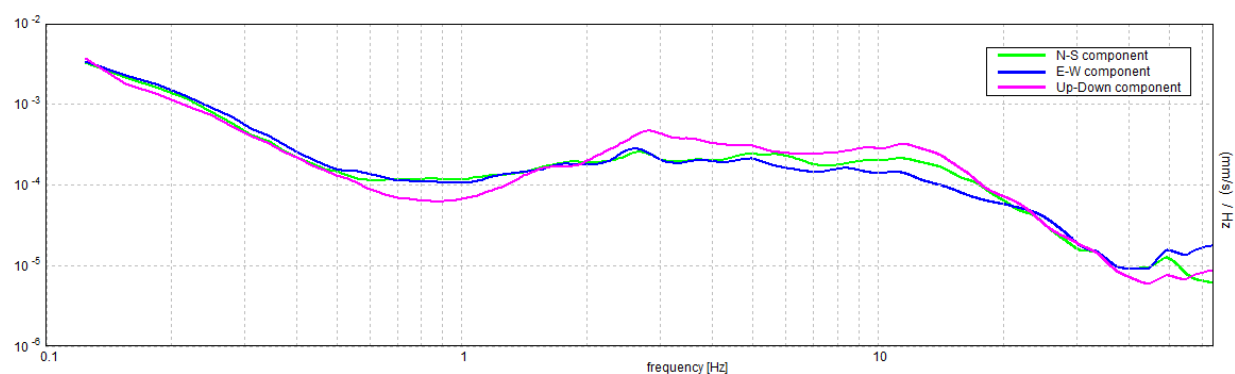
SERIE TEMPORALE H/V



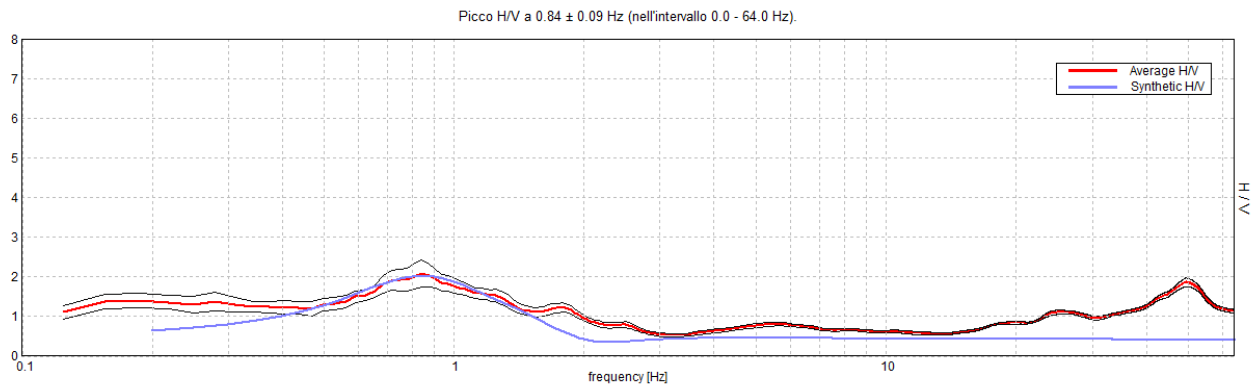
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

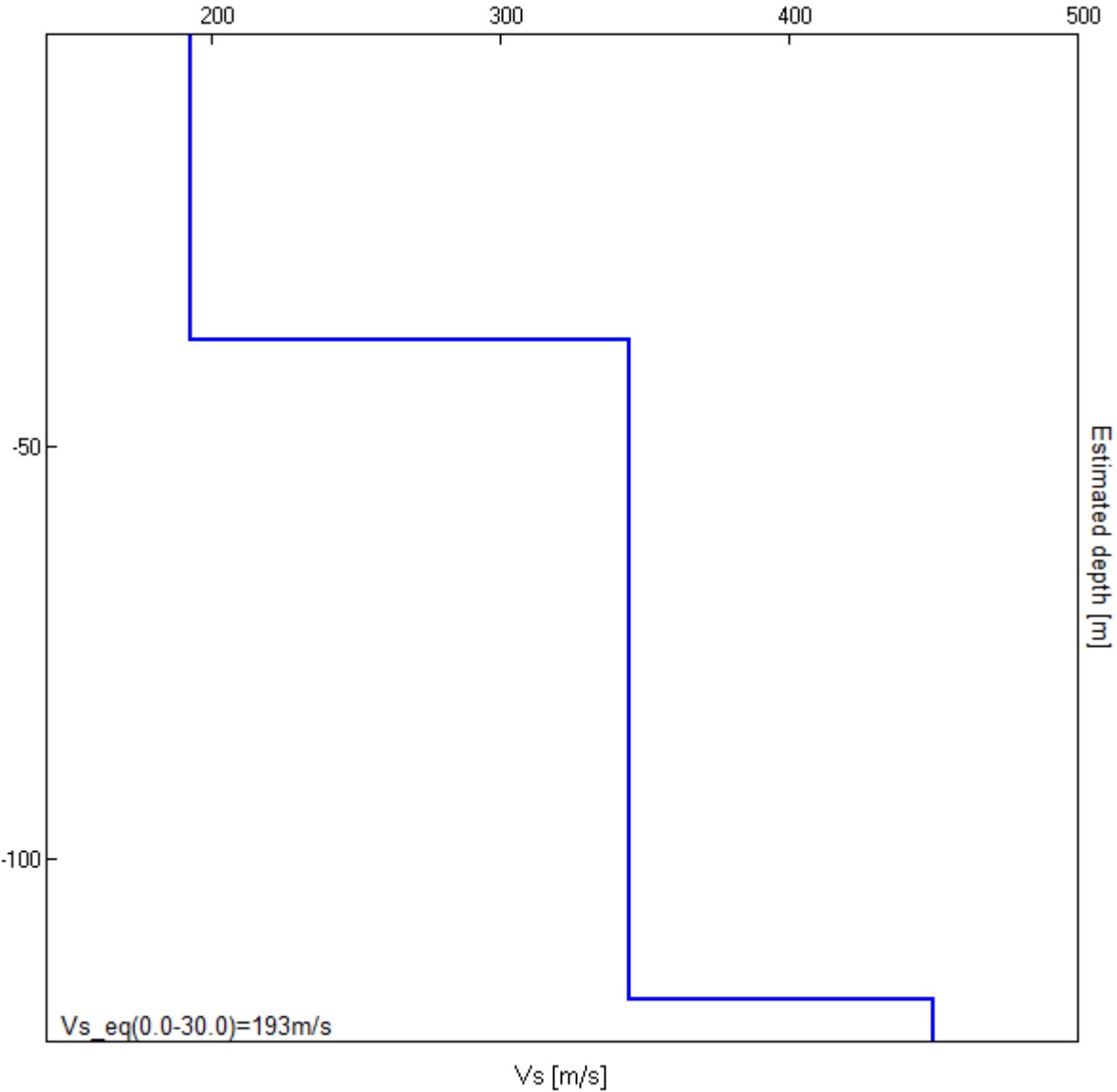


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
37.00	37.00	193	0.42
117.00	80.00	345	0.42
inf.	inf.	450	0.42

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=193\text{m/s}$



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

Picco H/V a 0.84 ± 0.09 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.84 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$928.1 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 42	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.969 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.08 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.10815 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.09125 < 0.12656$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3406 < 2.0$	OK	

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

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

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

MS_S_CESARIO, S_ANNA HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 19/12/24 11:34:00 Fine registrazione: 19/12/24 11:54:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 88% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

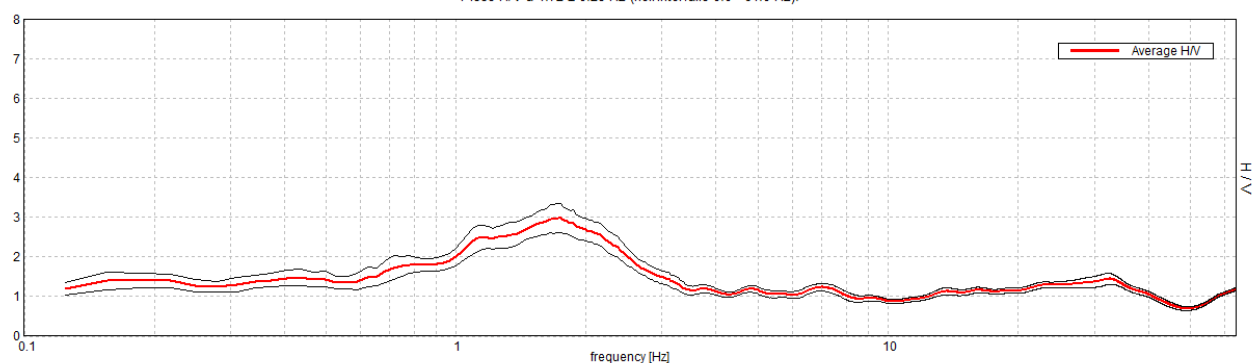
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

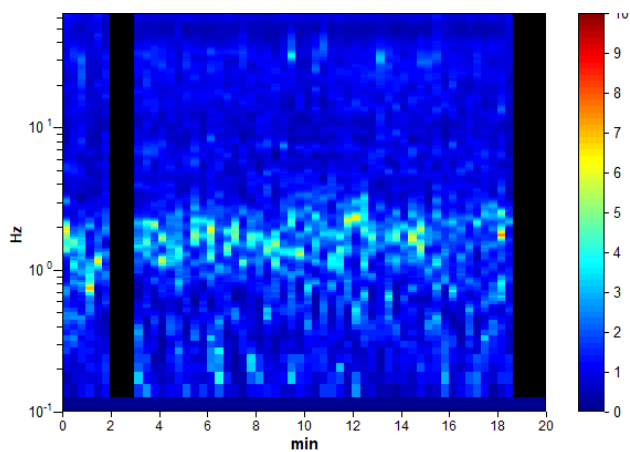
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

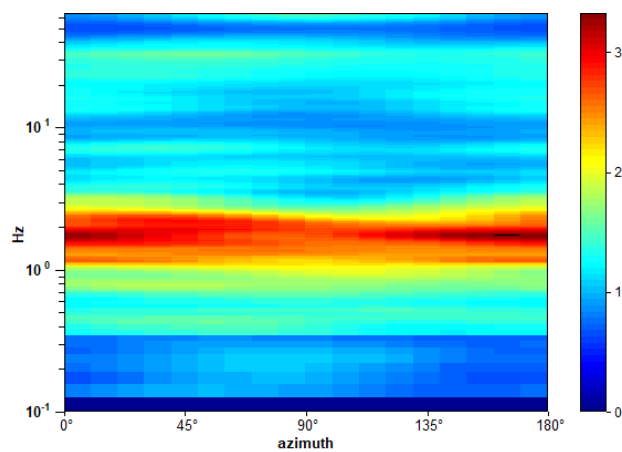
Picco H/V a 1.72 ± 0.28 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



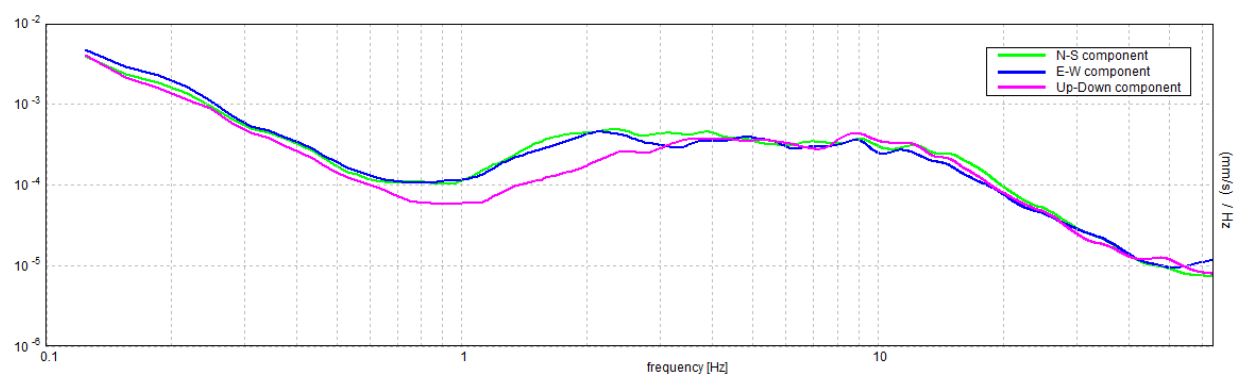
SERIE TEMPORALE H/V



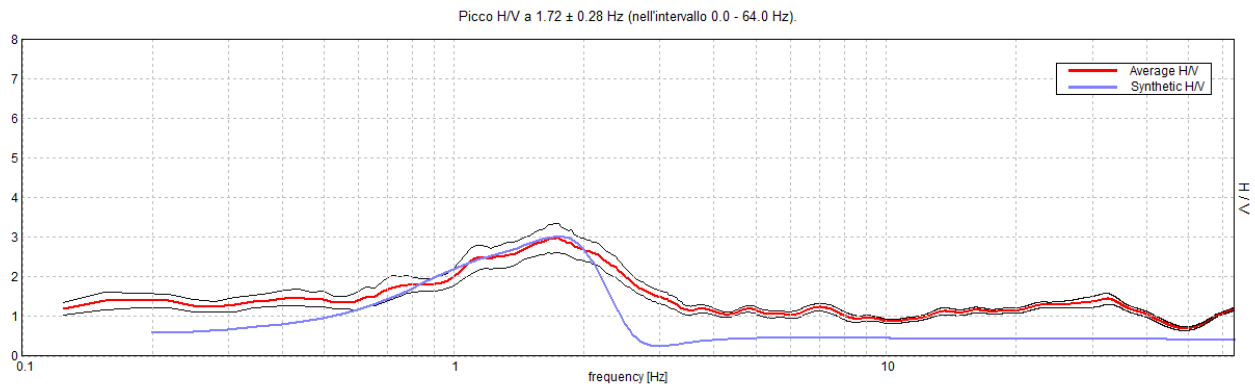
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

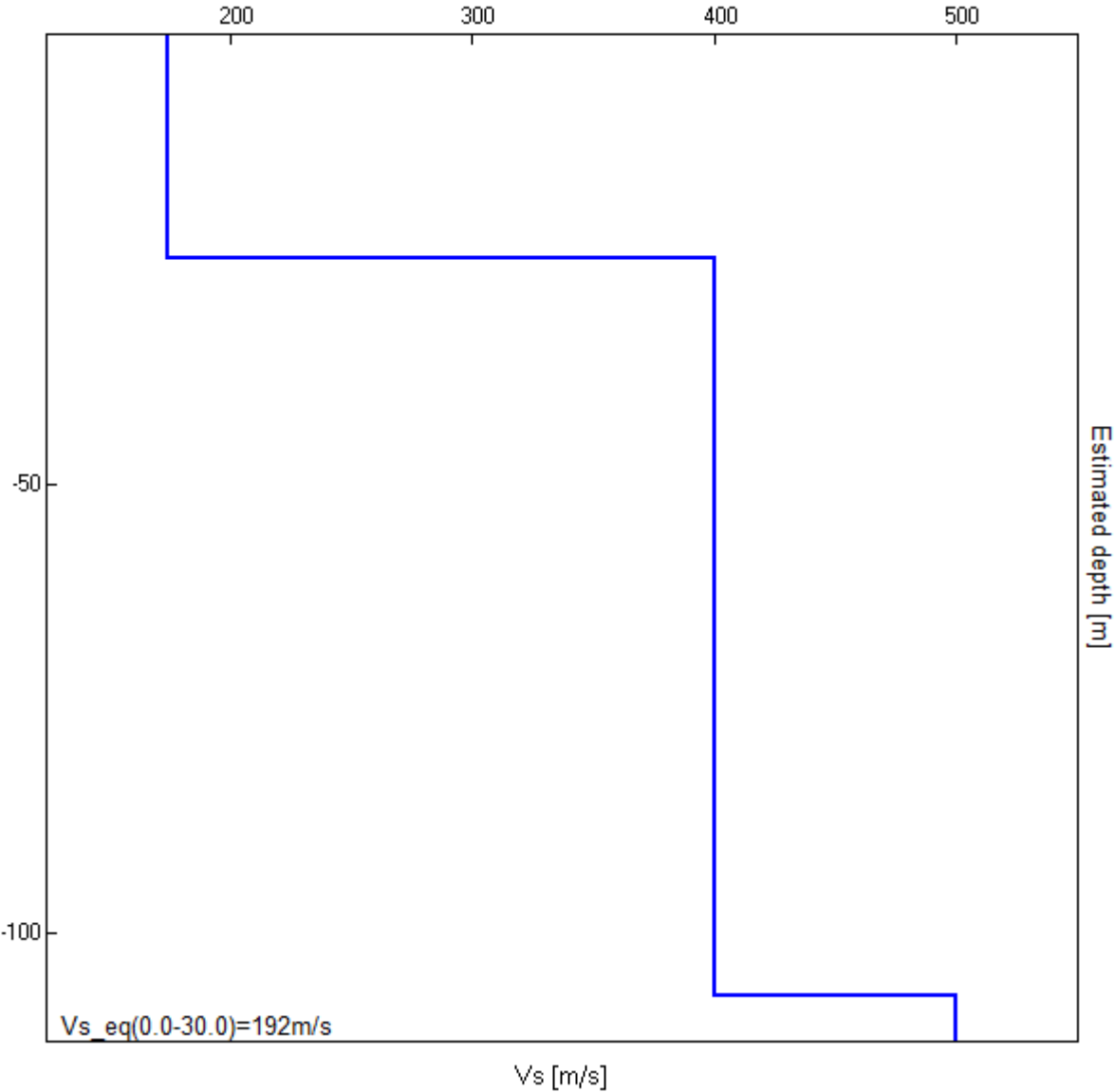


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
25.00	25.00	174	0.42
107.00	82.00	400	0.42
inf.	inf.	500	0.42

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=192\text{m/s}$



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

Picco H/V a 1.72 ± 0.28 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.72 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1821.9 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 84	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.625 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.0 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.98 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16095 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.27663 < 0.17188$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3742 < 1.78$	OK	

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

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

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

MS_S_CESARIO, GRAZIOSA_NORD HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 19/12/24 12:09:00 Fine registrazione: 19/12/24 12:29:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 88% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

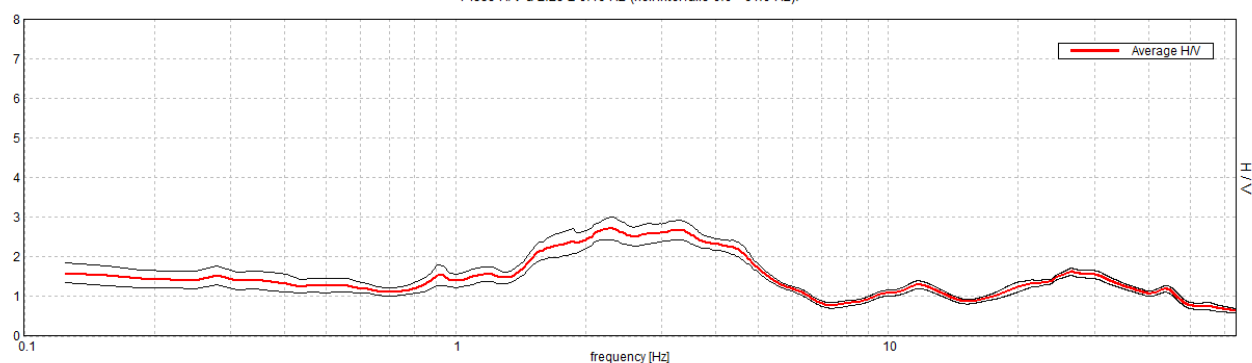
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

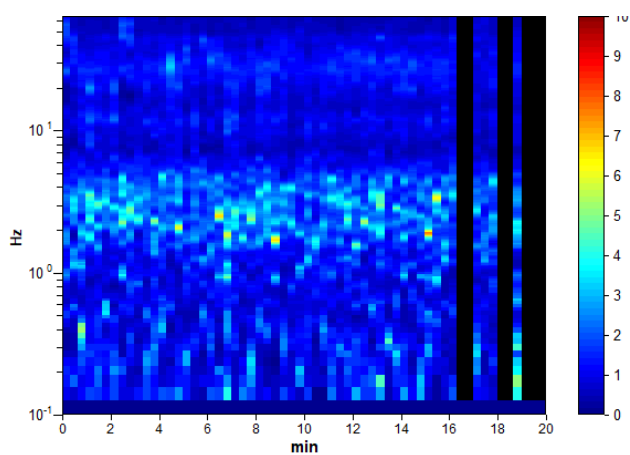
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

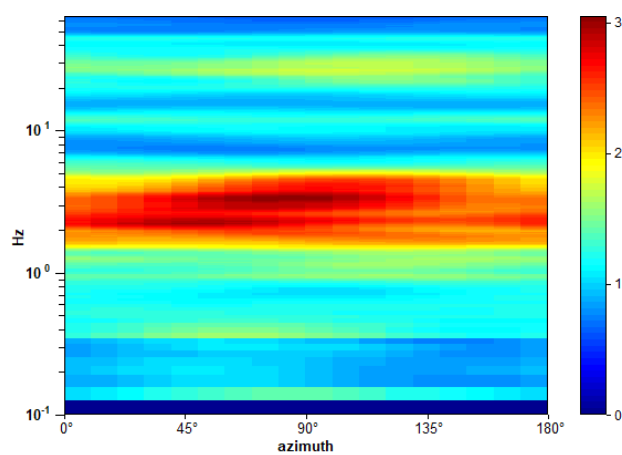
Picco H/V a 2.28 ± 0.46 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



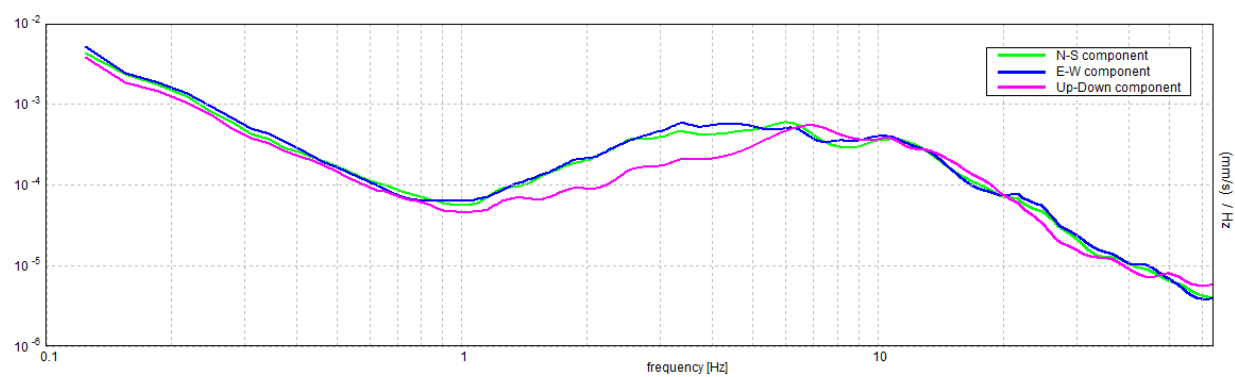
SERIE TEMPORALE H/V



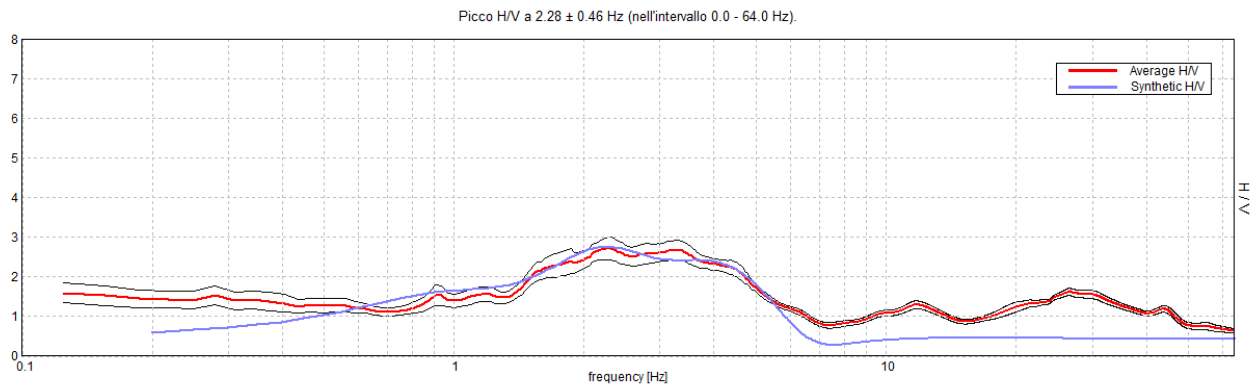
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

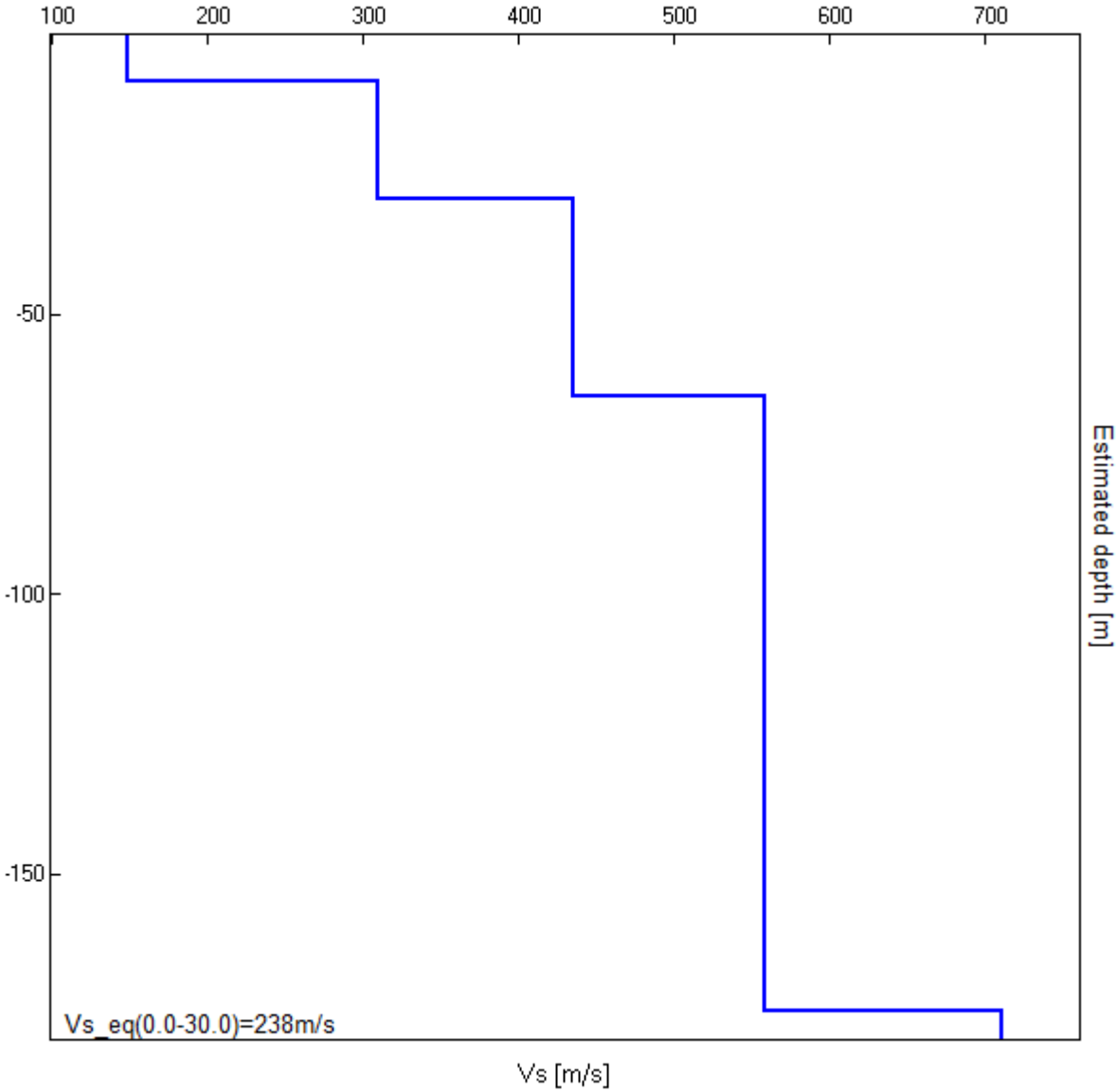


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
8.50	8.50	149	0.42
29.50	21.00	310	0.42
64.50	35.00	435	0.42
174.50	110.00	558	0.42
inf.	inf.	710	0.42

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=238\text{m/s}$



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

Picco H/V a 2.28 ± 0.46 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$2.28 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2418.1 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 110	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.844 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.563 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.71 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.20146 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.45958 < 0.11406$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2832 < 1.58$	OK	

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

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

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

MS_S_CESARIO, GRZIOSA_SUD HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 19/12/24 10:50:00 Fine registrazione: 19/12/24 11:10:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 95% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

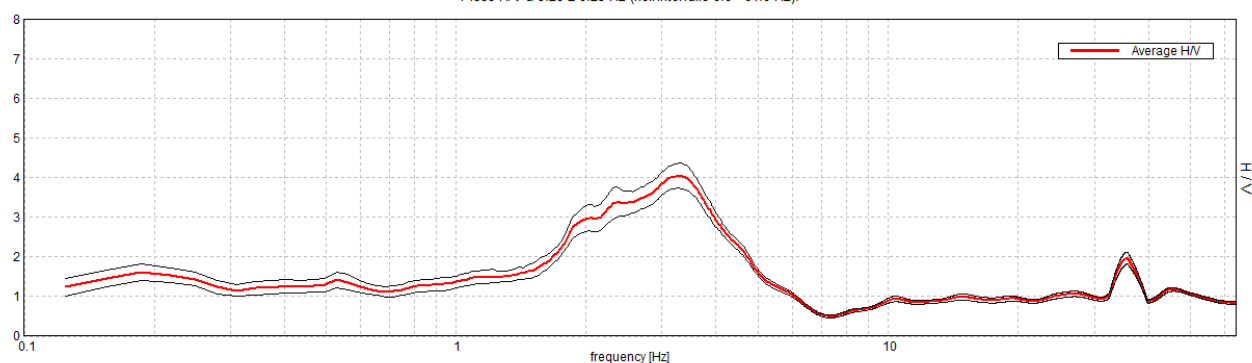
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

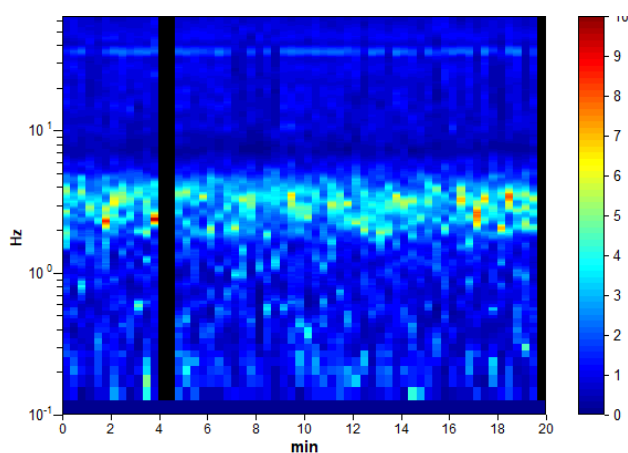
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

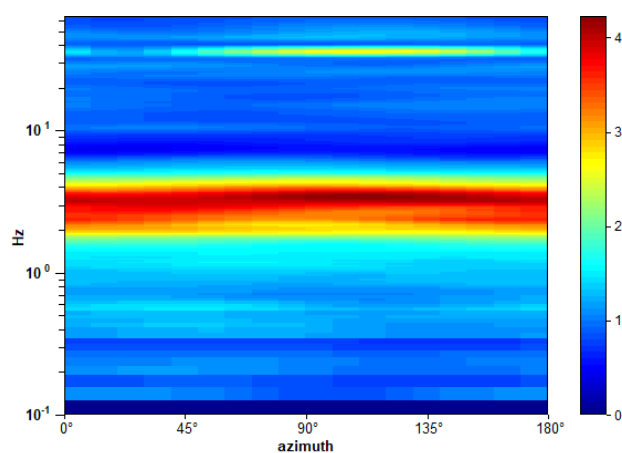
Picco H/V a 3.28 ± 0.25 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



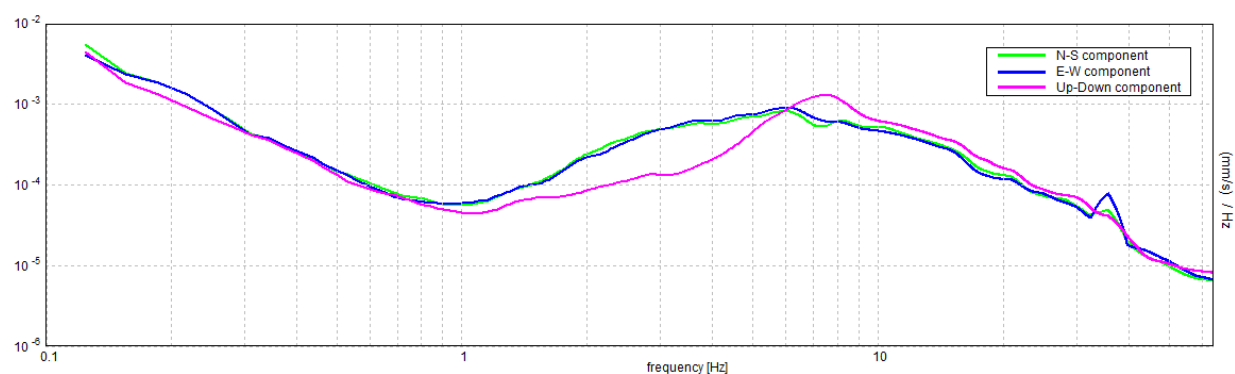
SERIE TEMPORALE H/V



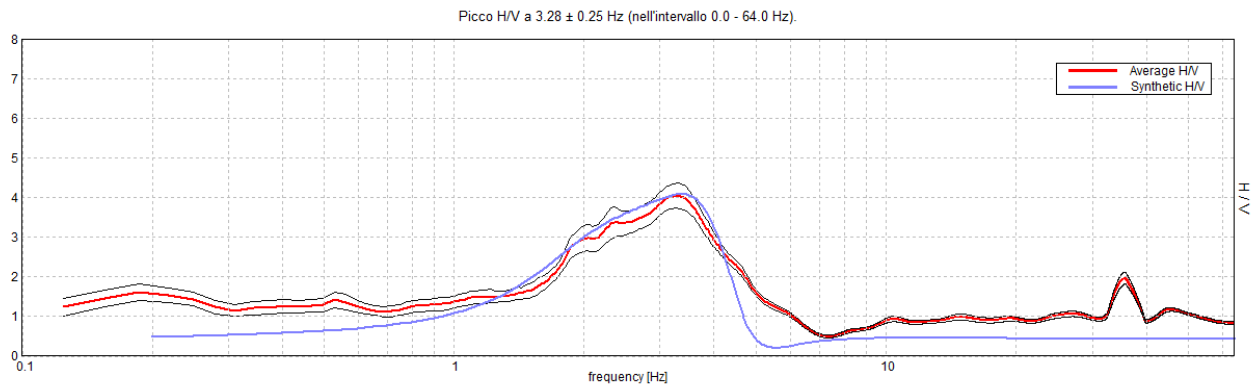
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

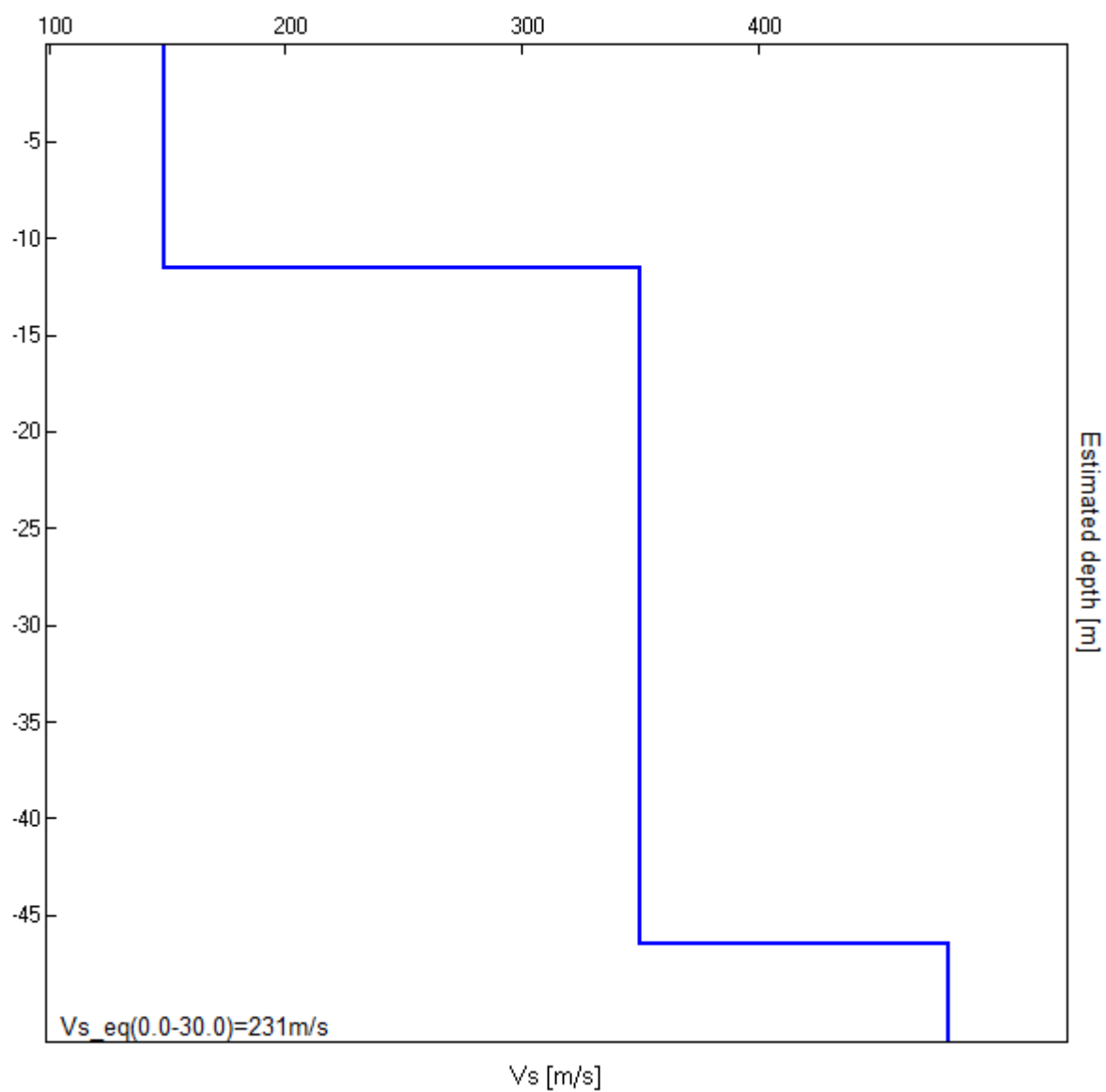


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
11.50	11.50	149	0.42
46.50	35.00	350	0.42
inf.	inf.	480	0.42

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=231\text{m/s}$



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

Picco H/V a 3.28 ± 0.25 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.28 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$3740.6 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 158	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.688 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	4.719 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.05 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.07669 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.25164 < 0.16406$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3197 < 1.58$	OK	

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

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

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

MS_S_CESARIO, PARCOCAPOLUOGO HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 19/12/24 10:15:00 Fine registrazione: 19/12/24 10:35:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 95% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

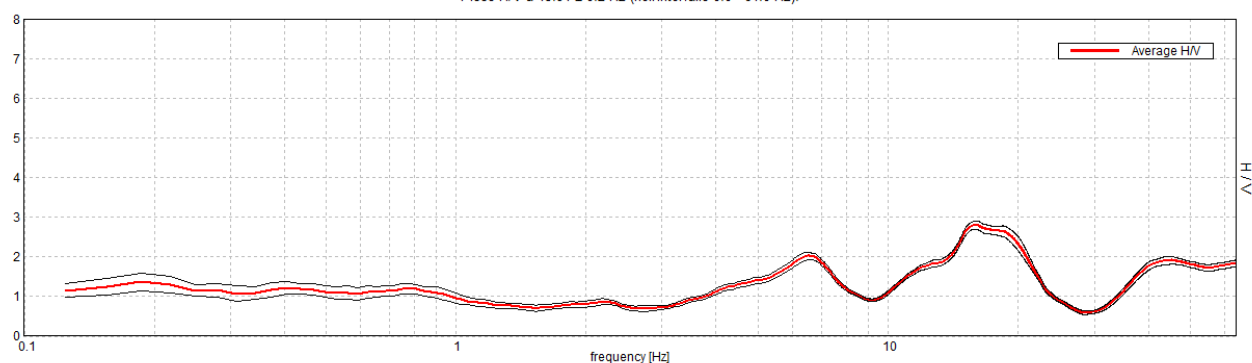
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

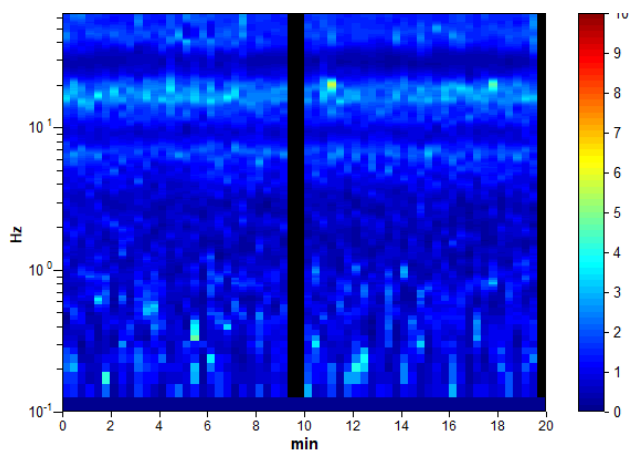
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

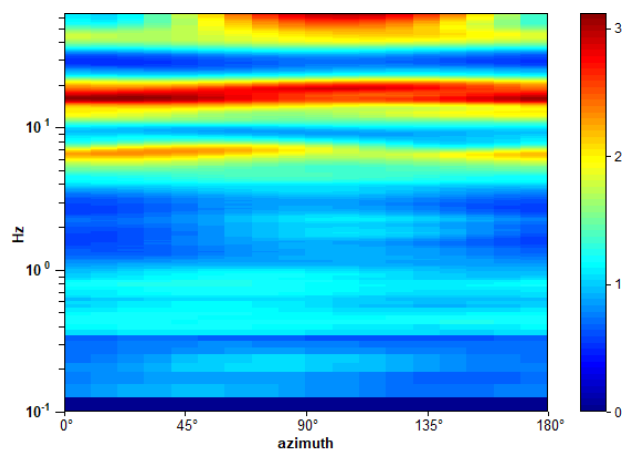
Picco H/V a 15.94 ± 0.2 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



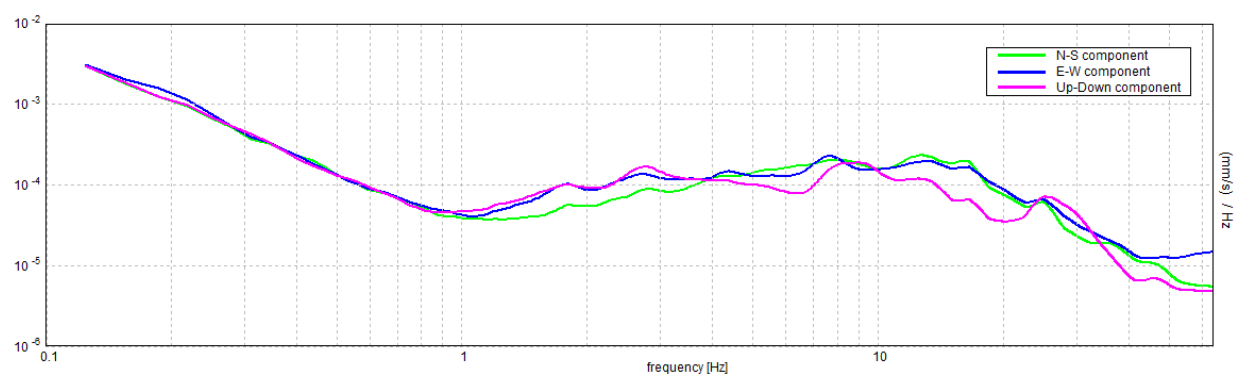
SERIE TEMPORALE H/V



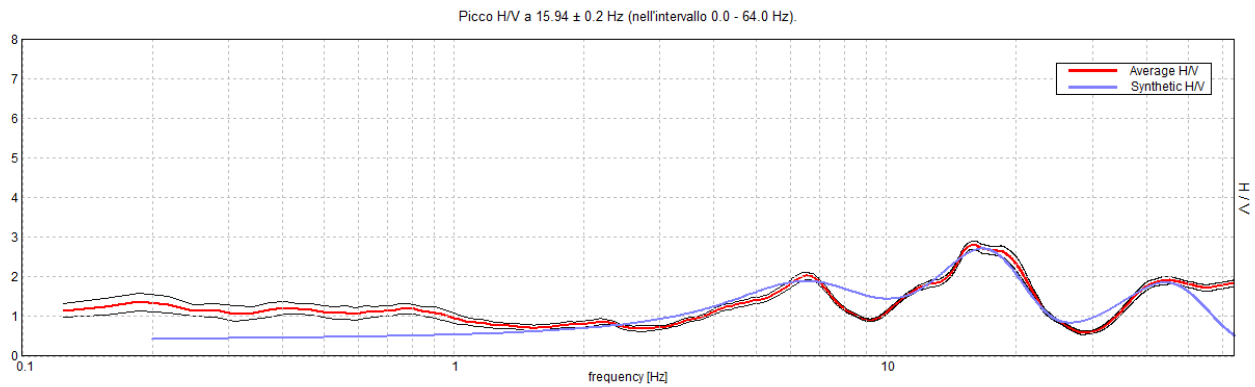
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

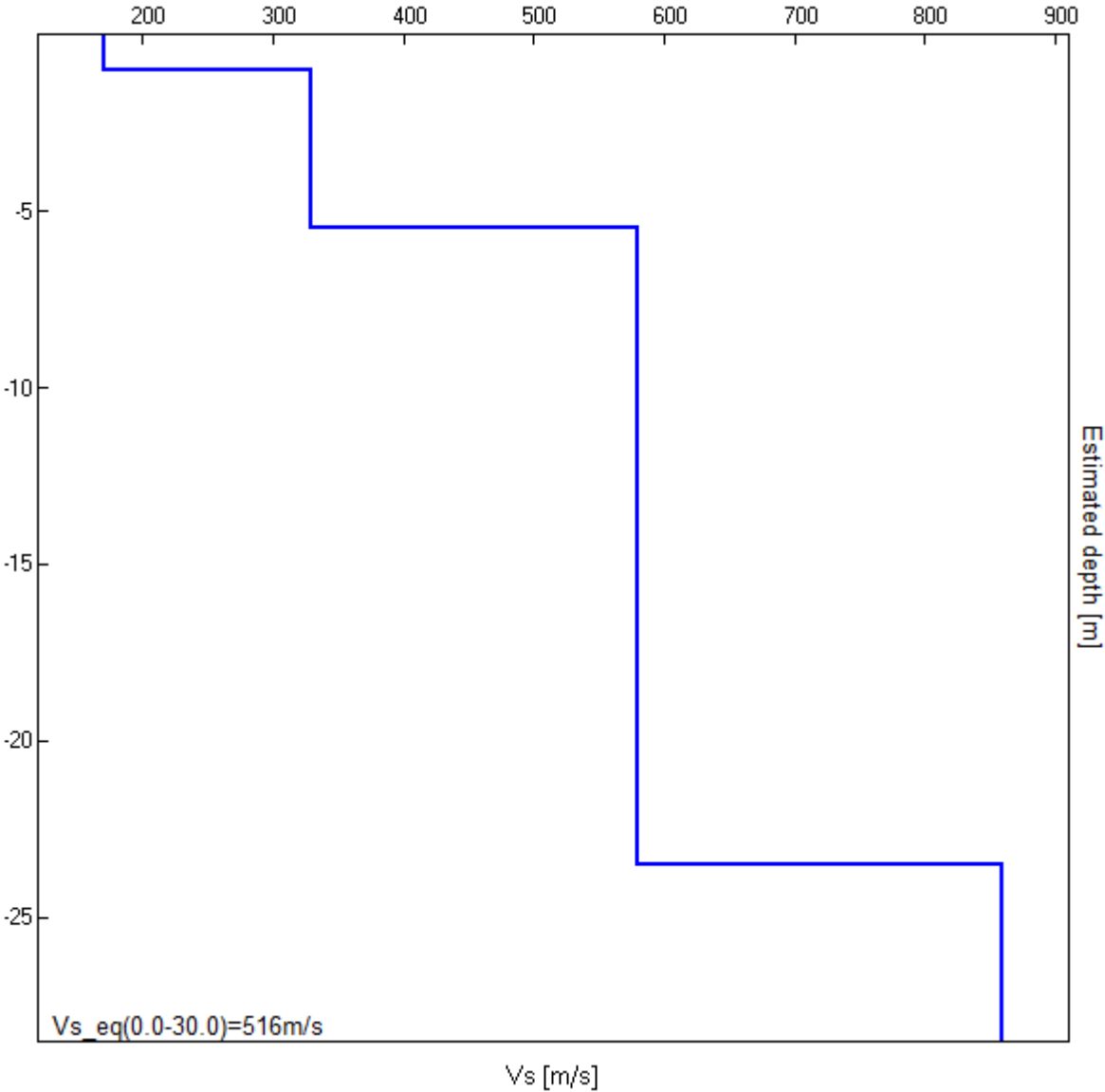


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.00	1.00	170	0.42
5.50	4.50	330	0.42
23.50	18.00	580	0.42
inf.	inf.	860	0.42

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=516\text{m/s}$



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

Picco H/V a 15.94 ± 0.2 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$15.94 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$18168.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 766	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	10.75 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	22.531 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.80 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0126 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.20087 < 0.79688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.104 < 1.58$	OK	

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

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

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

MS_S_CESARIO, ALTOLÀ HVSR

Strumento: TRZ-0187/01-12

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 19/12/24 09:32:00 Fine registrazione: 19/12/24 09:52:00

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 83% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

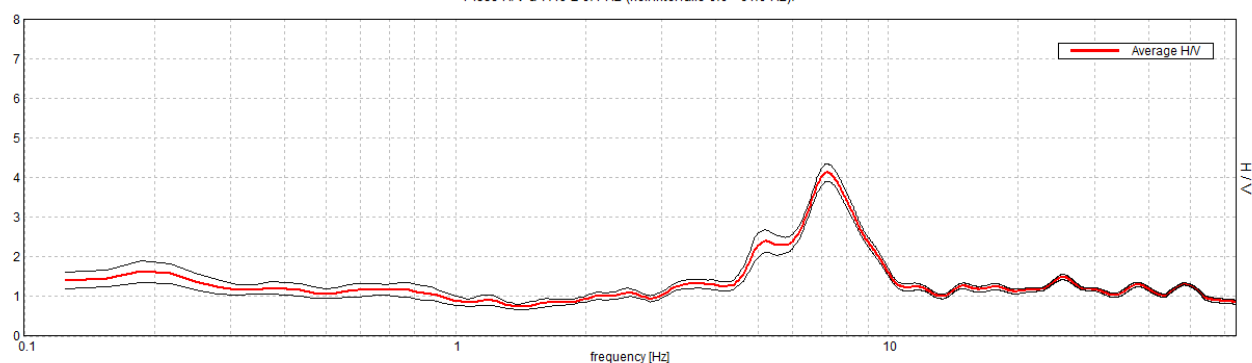
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

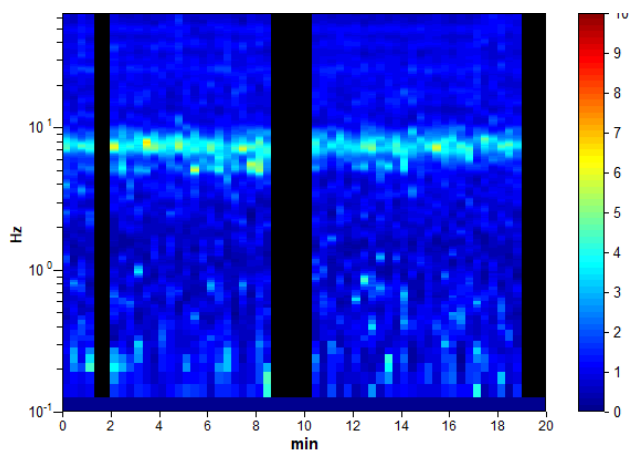
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

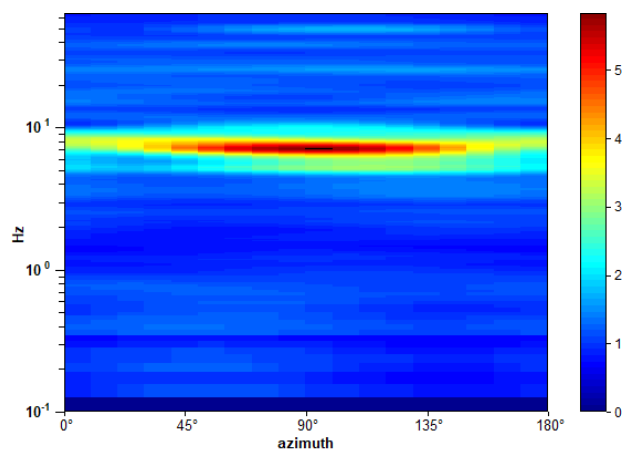
Picco H/V a 7.19 ± 0.1 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



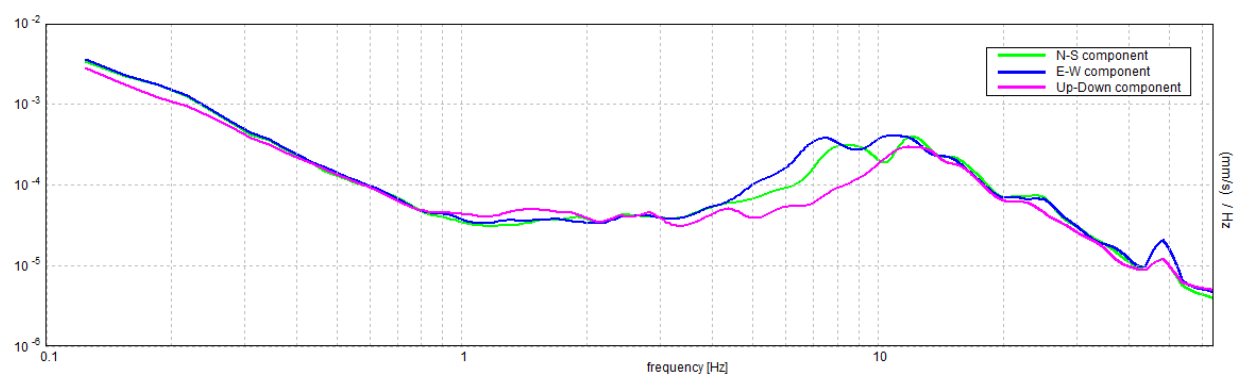
SERIE TEMPORALE H/V



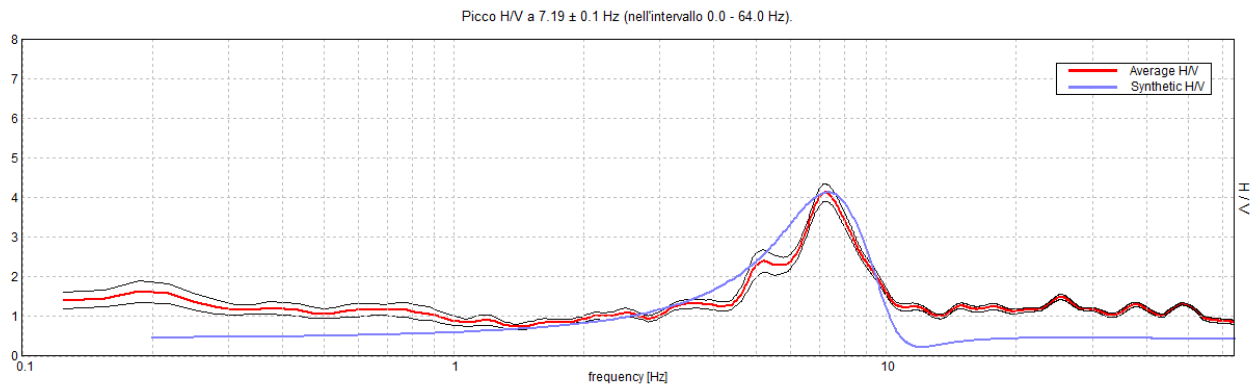
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

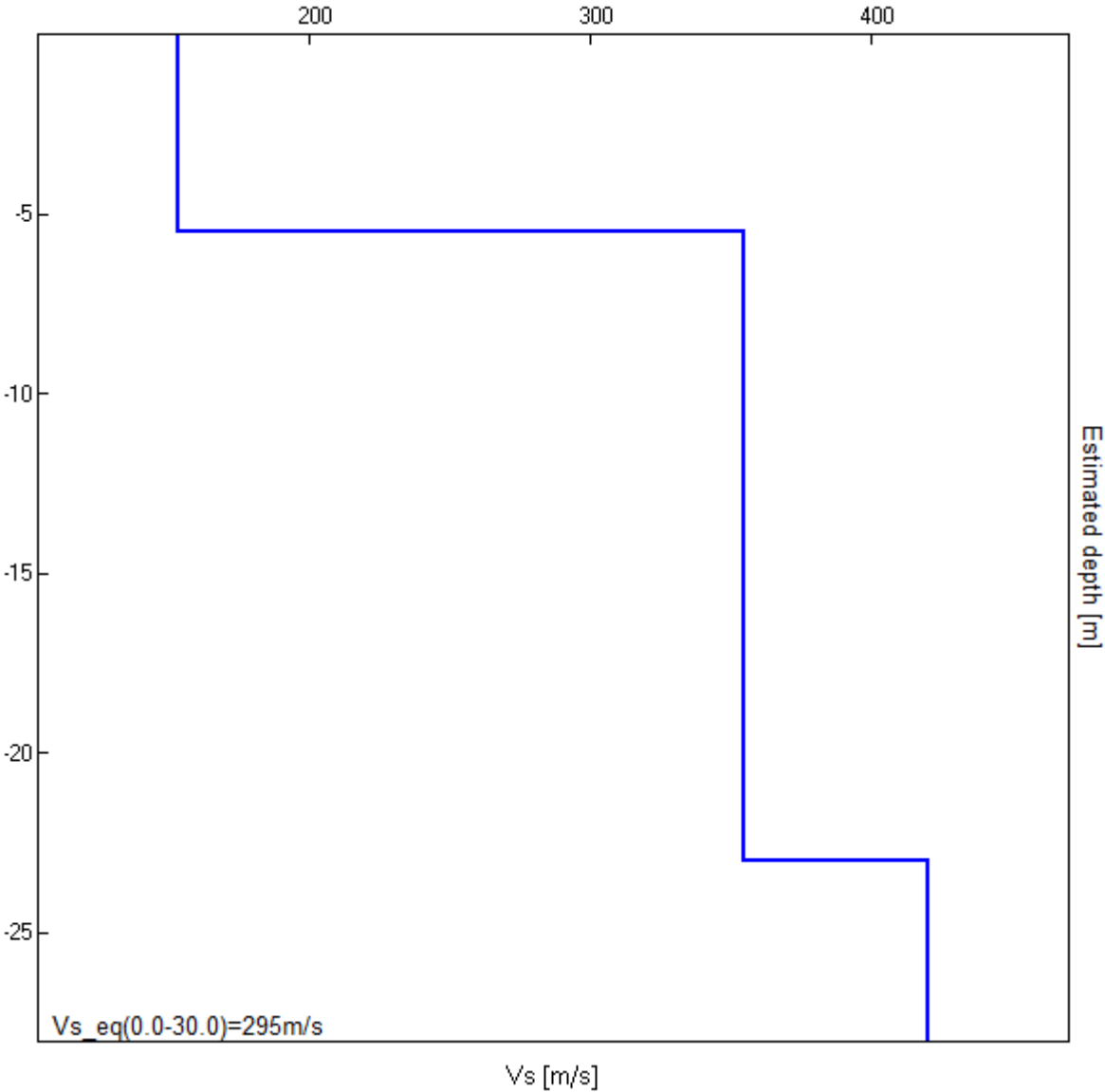


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
5.50	5.50	154	0.42
23.00	17.50	355	0.38
inf.	inf.	420	0.38

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=295m/s$



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

Picco H/V a 7.19 ± 0.1 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$7.19 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$7187.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 346	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	4.844 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	9.469 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.13 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01349 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.09693 < 0.35938$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2216 < 1.58$	OK	

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

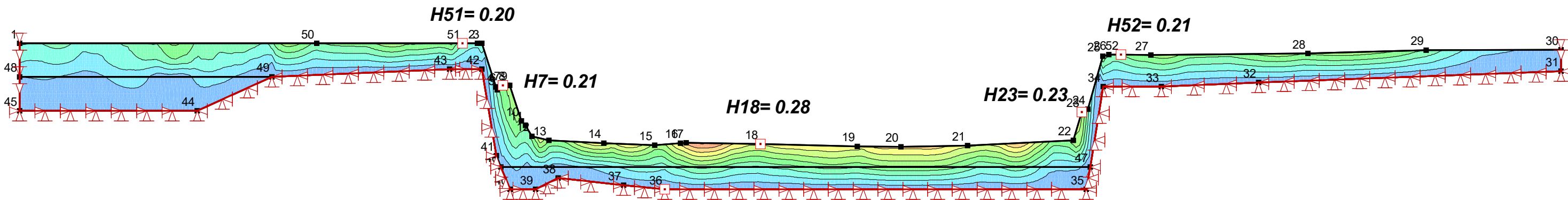
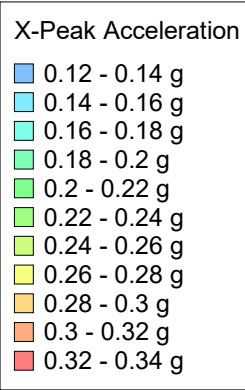
Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

Allegato n. 4

Risposta Sismica Locale (RSL) 2D – Cava Ghiarella

"Analisi Ghiarella 2D"



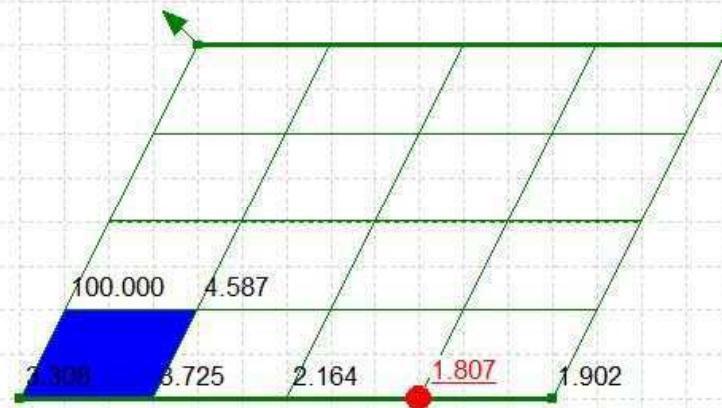
	<i>H51</i>	<i>H7</i>	<i>H18</i>	<i>H23</i>	<i>H52</i>
FA (PGA) in accell. T=0	1.20	1.26	1.66	1.38	1.24
FA in accell. vari range di T					
SA1 (0,1÷0,5 s)	0.99	1.18	1.03	1.06	1.00
SA2 (0,4÷0,8 s)	1.09	1.12	1.09	1.1	1.09
SA3 (0,7÷1,1 s)	1.18	1.19	1.18	1.19	1.18
SA4 (0,5÷1,5 s)	1.18	1.20	1.19	1.19	1.19
FH in velocità vari range di T (intensità di Housner)					
SI1 (0,1÷0,5 s)	1.02	1.14	1.05	1.07	1.03
SI2 (0,5÷1 s)	1.13	1.15	1.13	1.14	1.13
SI3 (0,5÷1,5 s)	1.22	1.23	1.22	1.22	1.22

Allegato n. 5

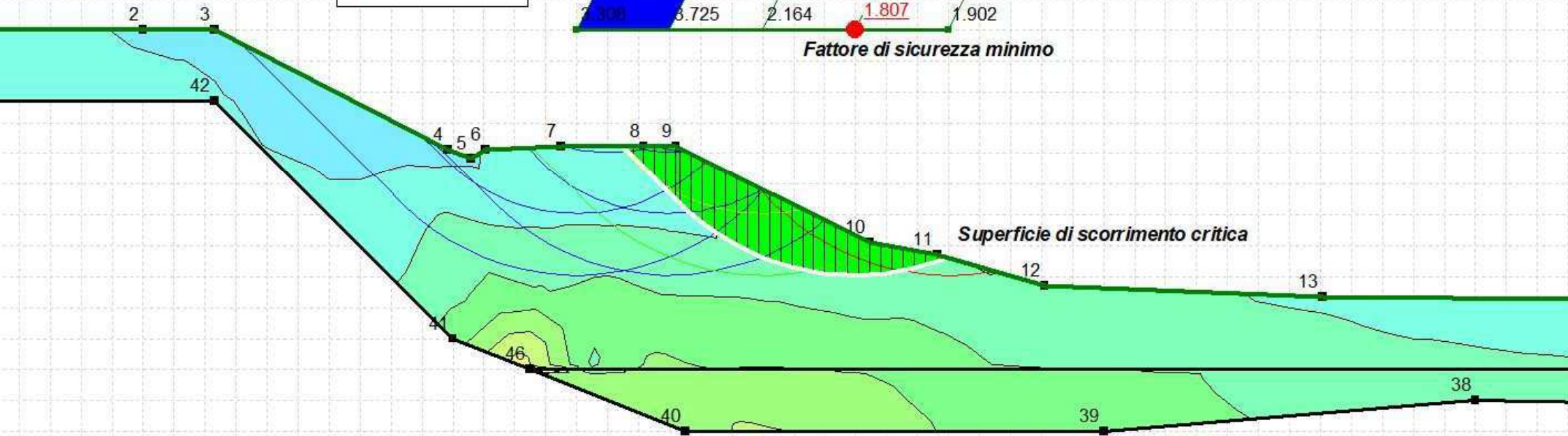
Verifica di stabilità “Scarpata Cava Ghiarella”

X-Total Stress

- 40 - -20 kPa
- 20 - 0 kPa
- 0 - 20 kPa
- 20 - 40 kPa
- 40 - 60 kPa
- 60 - 80 kPa
- 80 - 100 kPa
- 100 - 120 kPa
- 120 - 140 kPa
- 140 - 160 kPa
- 160 - 180 kPa



Fattore di sicurezza minimo



Stabilità dei pendii agli elementi finiti

Impostazioni progetto

Sistema di unità: [Sistema internazionale di unità di misura \(SI\)](#)

Data di inizio: [domenica 24 marzo 2025](#)

Impostazioni di analisi

Stabilità dei pendii agli elementi finiti

Descrizione: [Scarpata pista di accesso](#)

Tipo: [SLOPE/W](#)

Genitore: [Dynamic QUAKE/W](#)

Metodo: [QUAKE/W Stress](#)

Impostazioni

Condizioni di stress da: [Analisi padre](#)

Condizioni PWP da: [\(nessuna\)](#)

Peso unitario dell'acqua: [9.807 kN/m³](#)

Superficie di scivolamento

Direzione di movimento: [da sinistra a destra](#)

Usa la modalità passiva: [No](#)

Opzione superficie di scorrimento: [Griglia e Raggio](#)

Superfici critiche di scivolamento salvate: [1](#)

Ottimizza la posizione critica della superficie di scorrimento: [No](#)

Opzione crepa da tensione: [\(nessuna\)](#)

Distribuzione

F di S Opzione di calcolo: [Costante](#)

Avanzato

Impostazioni geometriche

Profondità minima della superficie di scivolamento: [0,1 m](#)

Numero di fette: [30](#)

Materiali

Copertura

Modello: [Mohr-Coulomb](#)

Peso unitario: [19 kN/m³](#)

Coesione': [5 kPa](#)

Phi': [20°](#)

Phi-B: [0 °](#)

Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica: [19 kN/m³](#)

Base

Modello: [Mohr-Coulomb](#)

Peso unitario: [19 kN/m³](#)

Coesione': [5 kPa](#)

Phi': [25 °](#)

Phi-B: 0 °

Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica: 19 kN/m³

Base Ovest

Modello: Mohr-Coulomb

Peso unitario: 19 kN/m³

Coesione': 5 kPa

Phi': 25 °

Phi-B: 0 °

Peso costante dell'unità di misura sopra la falda freatica: 19 kN/m³

Griglia superficie di scivolamento

In alto a sinistra: (258.99734, 50.024) m

In basso a sinistra: (270.98534, 50.024) m

In basso a destra: (274.98134, 58.024) m

Incremento orizzontale della griglia: 4

Incremento verticale della griglia: 4

Raggio superficie di scorrimento

Coordinate in alto a sinistra: (263, 58) m

Coordinate in alto a destra: (275, 58) m

Coordinate in basso a sinistra: (259, 50) m

Coordinate in basso a destra: (271, 50) m

Numero di incrementi: 4

Usa proiezione sinistra: Sì

Angolo di proiezione sinistro: 135 °

Usa la giusta proiezione: No

Angolo di proiezione retto: 45 °

Limiti della superficie di scivolamento

Coordinate Sinistra: (0, 50) m

Coordinata destra: (824.4, 49.41) m

Scambio ferroviario

	X	Y
Punto 1	0 metri	50 m sopra il livello del mare
Punto 2	245 m sopra il livello del mare	50 m sopra il livello del mare
Punto 3	247,3 m sopra il livello del mare	50 m sopra il livello del mare
Punto 4	254,83 m sopra il livello del mare	46,11 m sopra il livello del mare
Punto 5	255,58 m sopra il livello del mare	45,84 m sopra il livello del mare
Punto 6	256,05 m sopra il livello del mare	46,11 m sopra il livello del mare
Punto 7	258,47 m sopra il livello del mare	46,24 m sopra il livello del mare
Punto 8	261,15 m sopra il livello del mare	46,24 m sopra il livello del mare
Punto 9	262,2 miometri	46,24 m sopra il livello del mare
Punto 10	268,44 m sopra il livello del mare	43,1 miometri

Punto 11	270,63 m sopra il livello del mare	42,7 m sopra il livello del mare
Punto 12	274,1 m sopra il livello del mare	41,72 m sopra il livello del mare
Punto 13	283,07 m sopra il livello del mare	41,35 m sopra il livello del mare
Punto 14	312,43 m sopra il livello del mare	41,1 milioni
Punto 15	339,8 miometri	40,91 m sopra il livello del mare
Punto 16	353,6 m sopra il livello del mare	41,11 m sopra il livello del mare
Punto 17	356,6 m sopra il livello del mare	41,14 m sopra il livello del mare
Punto 18	396,25 m sopra il livello del mare	41,04 m sopra il livello del mare
Punto 19	448 m sopra il livello del mare	40,83 m sopra il livello del mare
Punto 20	471,5 miometri	40,8 milioni
Punto 21	507 m sopra il livello del mare	40,89 m sopra il livello del mare
Punto 22	563,49 m sopra il livello del mare	41,37 m sopra il livello del mare
Punto 23	568,1 m sopra il livello del mare	43,89 m sopra il livello del mare
Punto 24	571,3 miometri	44,13 m sopra il livello del mare
Punto 25	579,3 miometri	48,84 m sopra il livello del mare
Punto 26	582,6 m sopra il livello del mare	49 metri sopra il livello del mare
Punto 27	605,1 m sopra il livello del mare	48,95 m sopra il livello del mare
Punto 28	689 m sopra il livello del mare	49,1 milioni
Punto 29	752,2 miometri	49,37 m sopra il livello del mare
Punto 30	824,4 miometri	49,41 m sopra il livello del mare
Punto 31	824,4 miometri	47,5 m sopra il livello del mare
Punto 32	662,6 m sopra il livello del mare	46,5 m sopra il livello del mare
Punto 33	610,6 m sopra il livello del mare	46,15 m sopra il livello del mare
Punto 34	579,6 m sopra il livello del mare	46,15 m sopra il livello del mare
Punto 35	570,6 m sopra il livello del mare	37 m sopra il livello del mare
Punto 36	345 m sopra il livello del mare	37 m sopra il livello del mare
Punto 37	323 m sopra il livello del mare	37,35 m sopra il livello del mare
Punto 38	288 m sopra il livello del mare	38 m sopra il livello del mare
Punto 39	276 m sopra il livello del mare	37 m sopra il livello del mare
Punto 40	262,5 m sopra il livello del mare	37 m sopra il livello del mare
Punto 41	255 m sopra il livello del mare	40 m sopra il livello del mare
Punto 42	247,3 m sopra il livello del mare	47,7 miometri
Punto 43	230 m sopra il livello del mare	47,7 miometri
Punto 44	95 m sopra il livello del mare	44 metri sopra il livello del mare
Punto 45	0 metri	44 metri sopra il livello del mare
Punto 46	257,5 m sopra il livello del mare	39 m sopra il livello del mare
Punto 47	572.56721 m sopra il livello del mare	38.999998 m sopra il livello del mare
Punto 48	0 metri	47 m sopra il livello del mare
Punto 49	135 m sopra il livello del mare	47 m sopra il livello del mare
Punto 50	159 m sopra il livello del mare	50 m sopra il livello del mare
Punto 51	237 m sopra il livello del mare	50 m sopra il livello del mare
Punto 52	589 m sopra il livello del mare	48.985778 m sopra il livello del mare

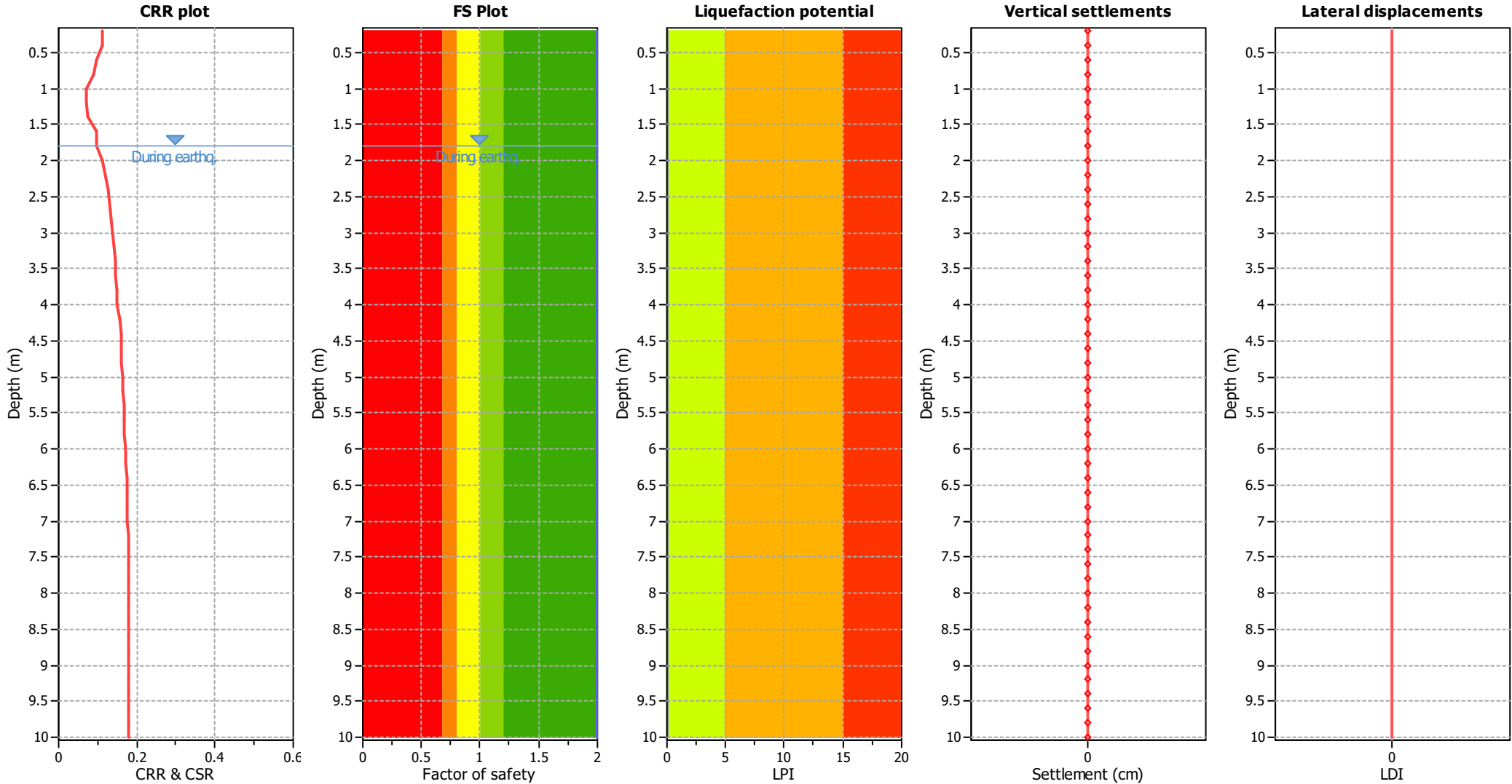
Regioni

	Mate riale	Scambio ferroviario	Area
Regi one 1	Coper tura	1,50,51,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26 ,52,27,28,29,30,31,32,33,34,47,46,41,42,43,49,48	2088 ,4 Metr i quad rati
Regi one 2	Base	46,47,35,36,37,38,39,40	589, 69 Metr i quad rati
Regi one 3	Base Ovest	48,49,44,45	345 Metr i quad rati

Allegato n. 6

Elaborazione dei valori dell'indice di potenziale liquefazione (IPL)

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

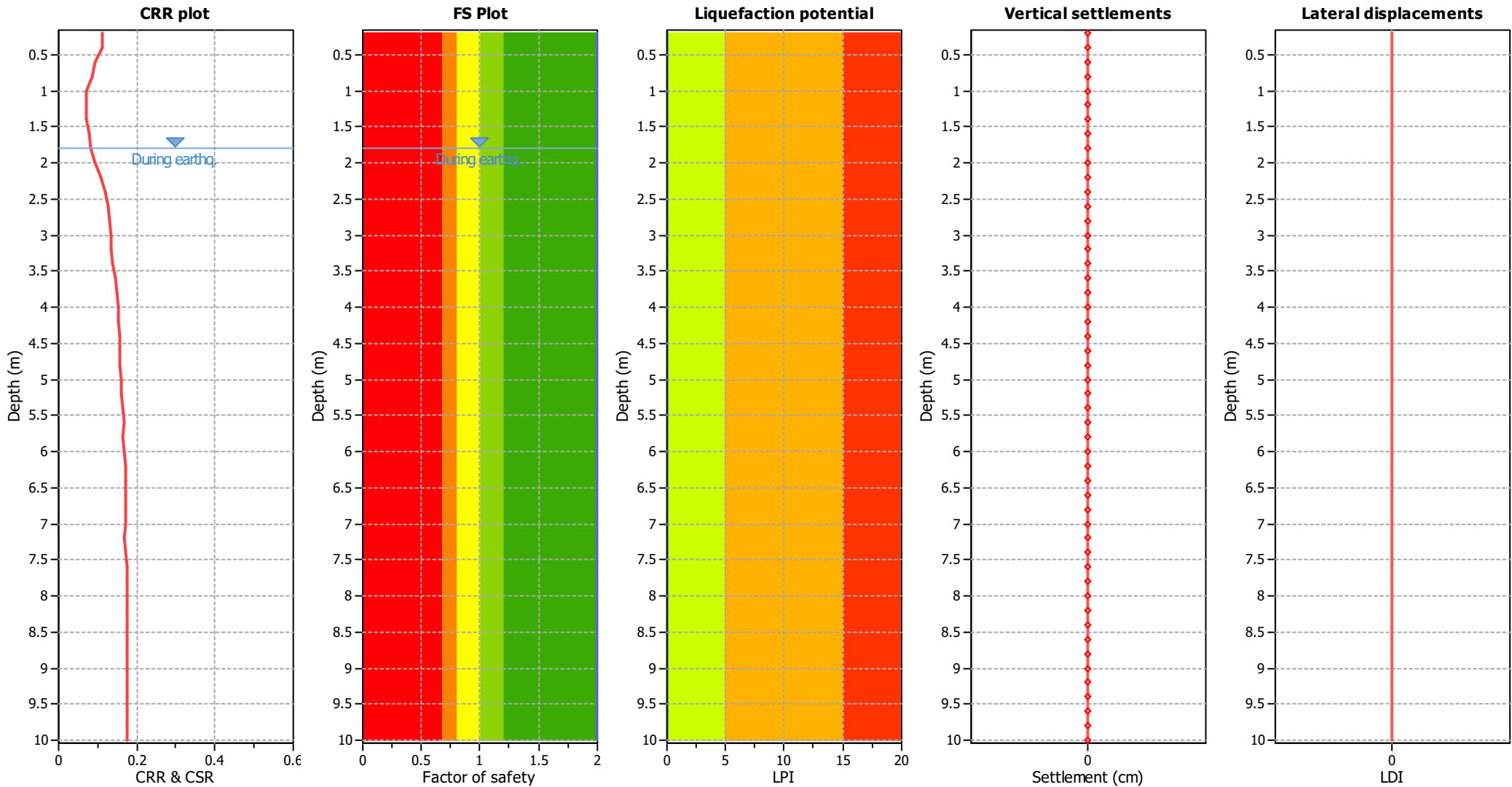
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

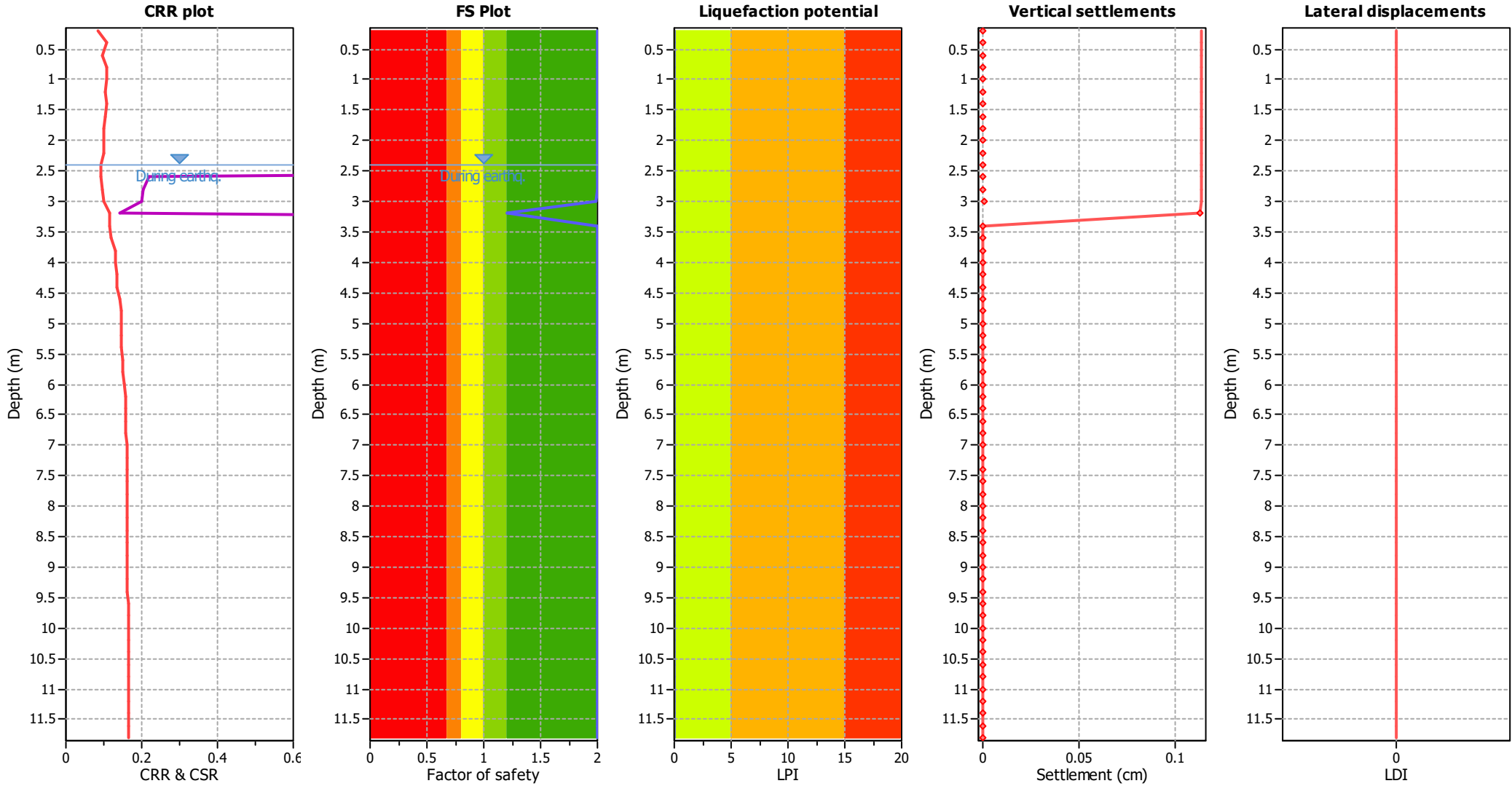
F.S. color scheme

Very high risk	Almost certain it will liquefy
High risk	Very likely to liquefy
Low risk	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

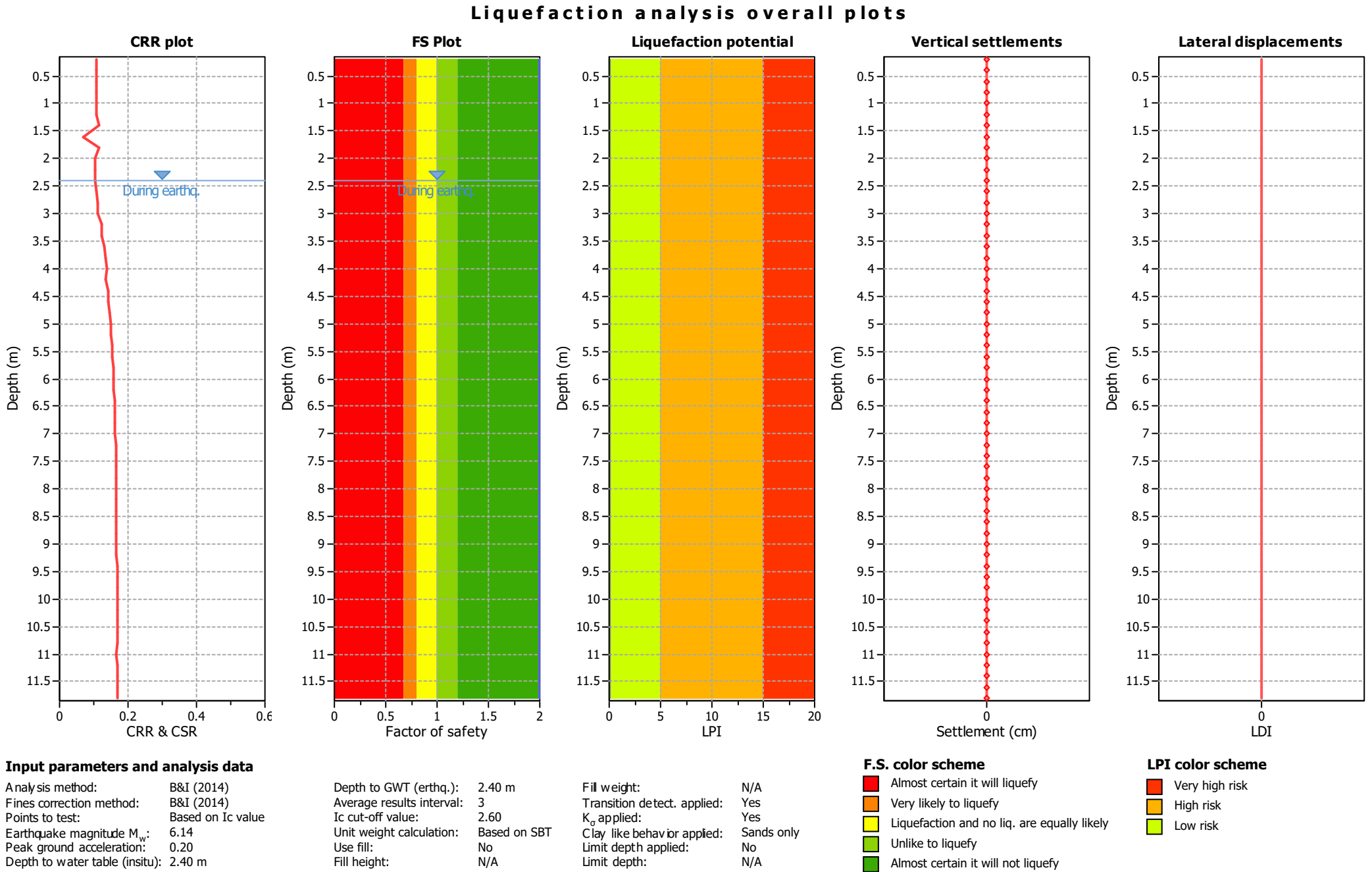
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

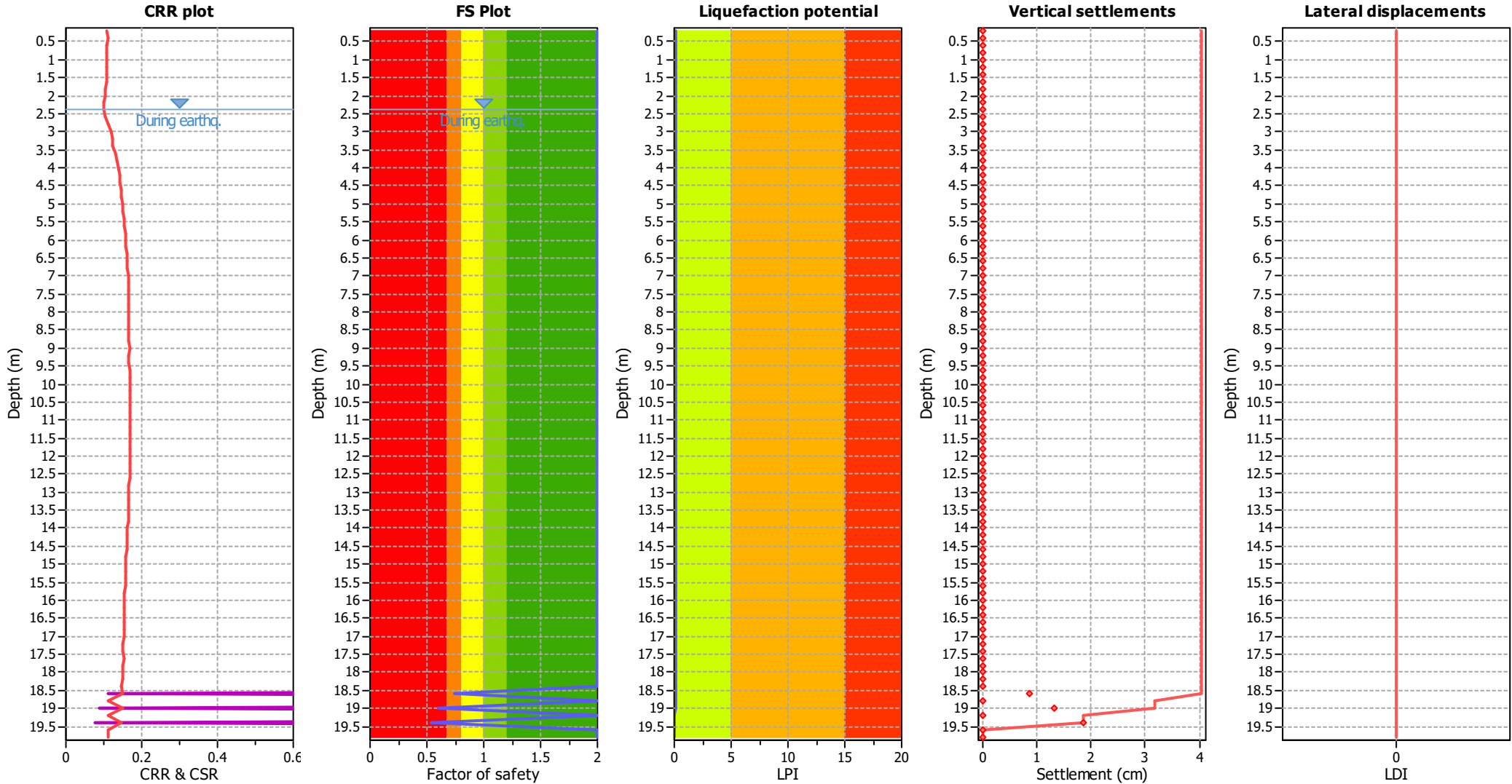
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

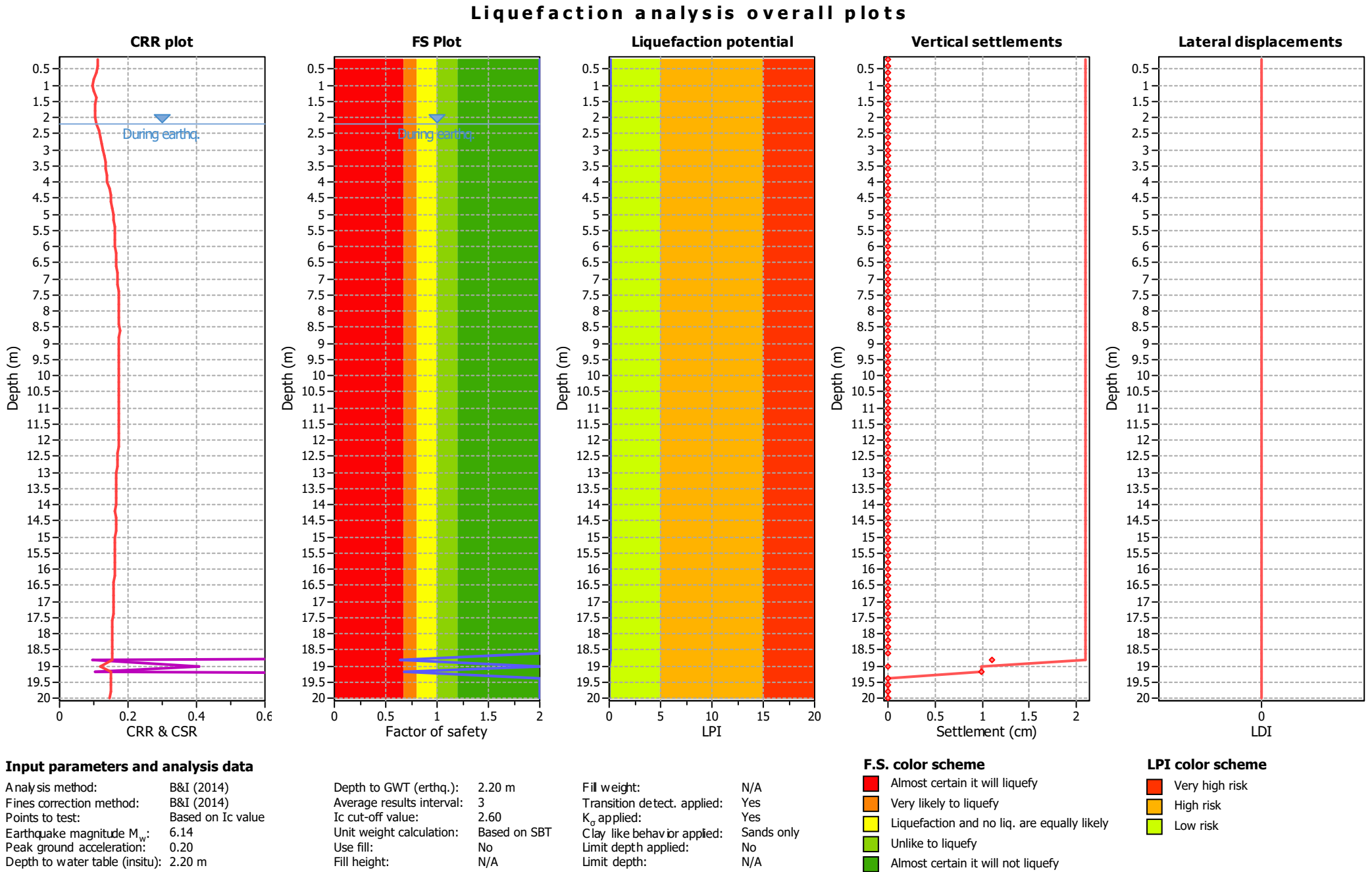
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

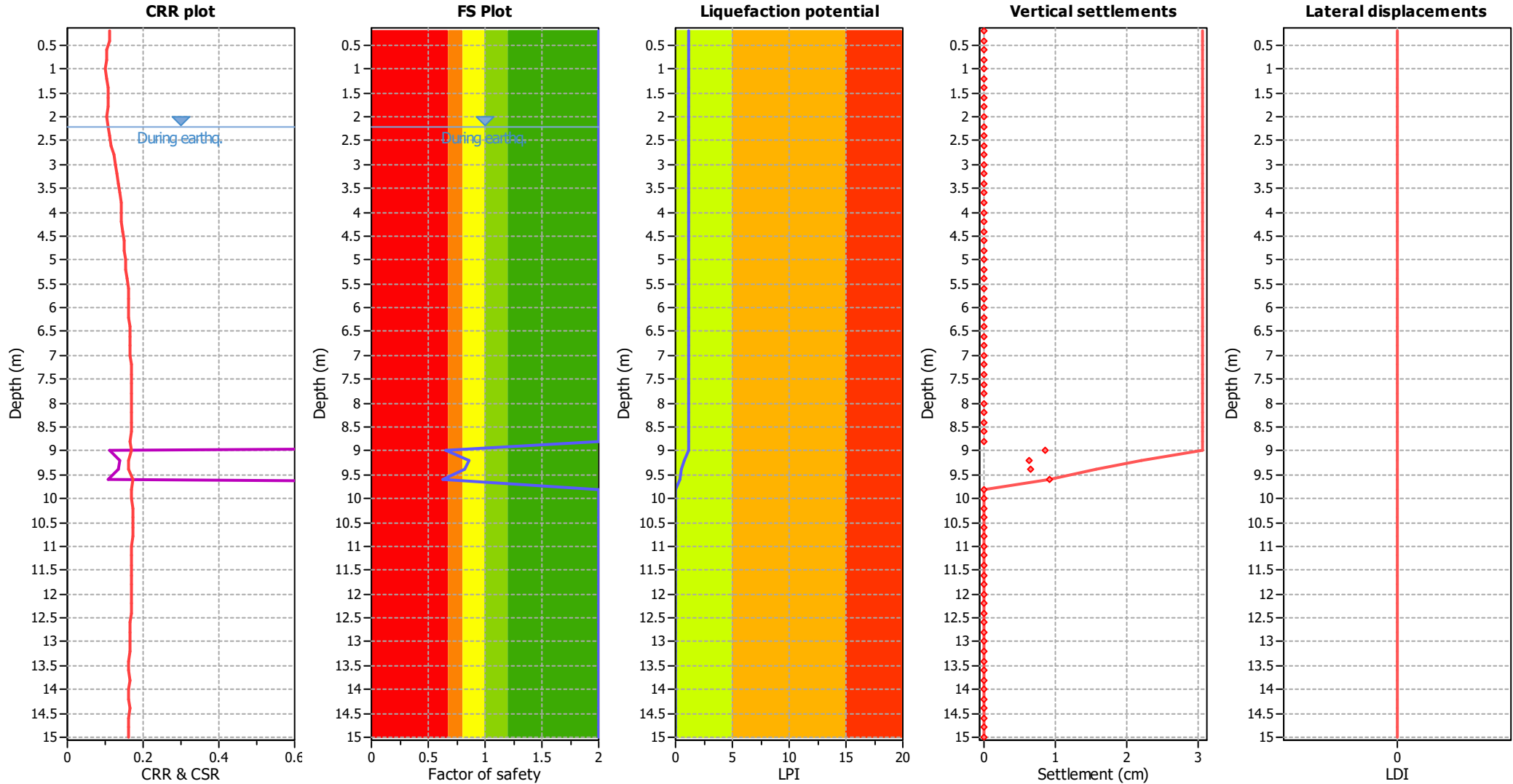
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

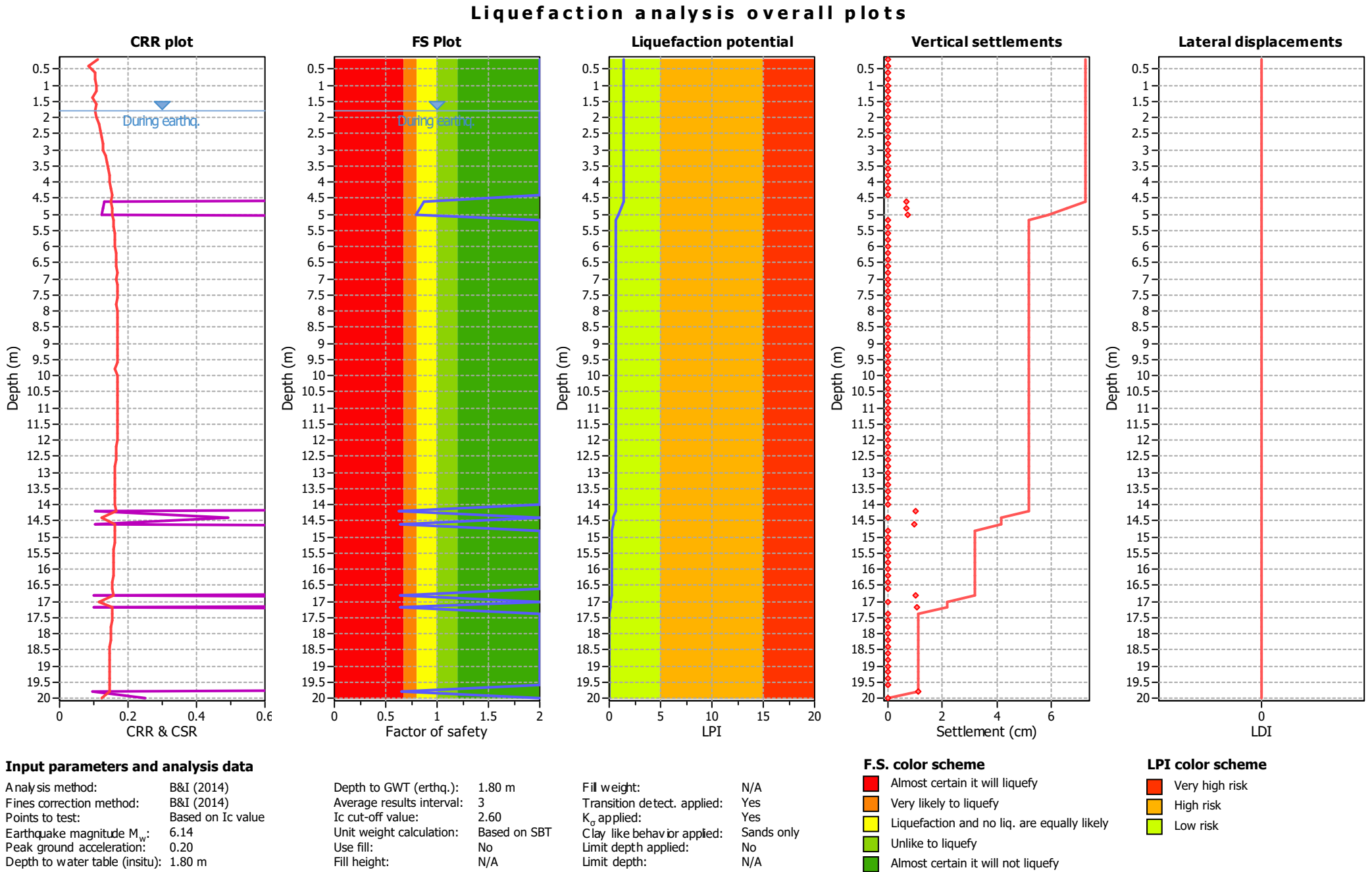
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

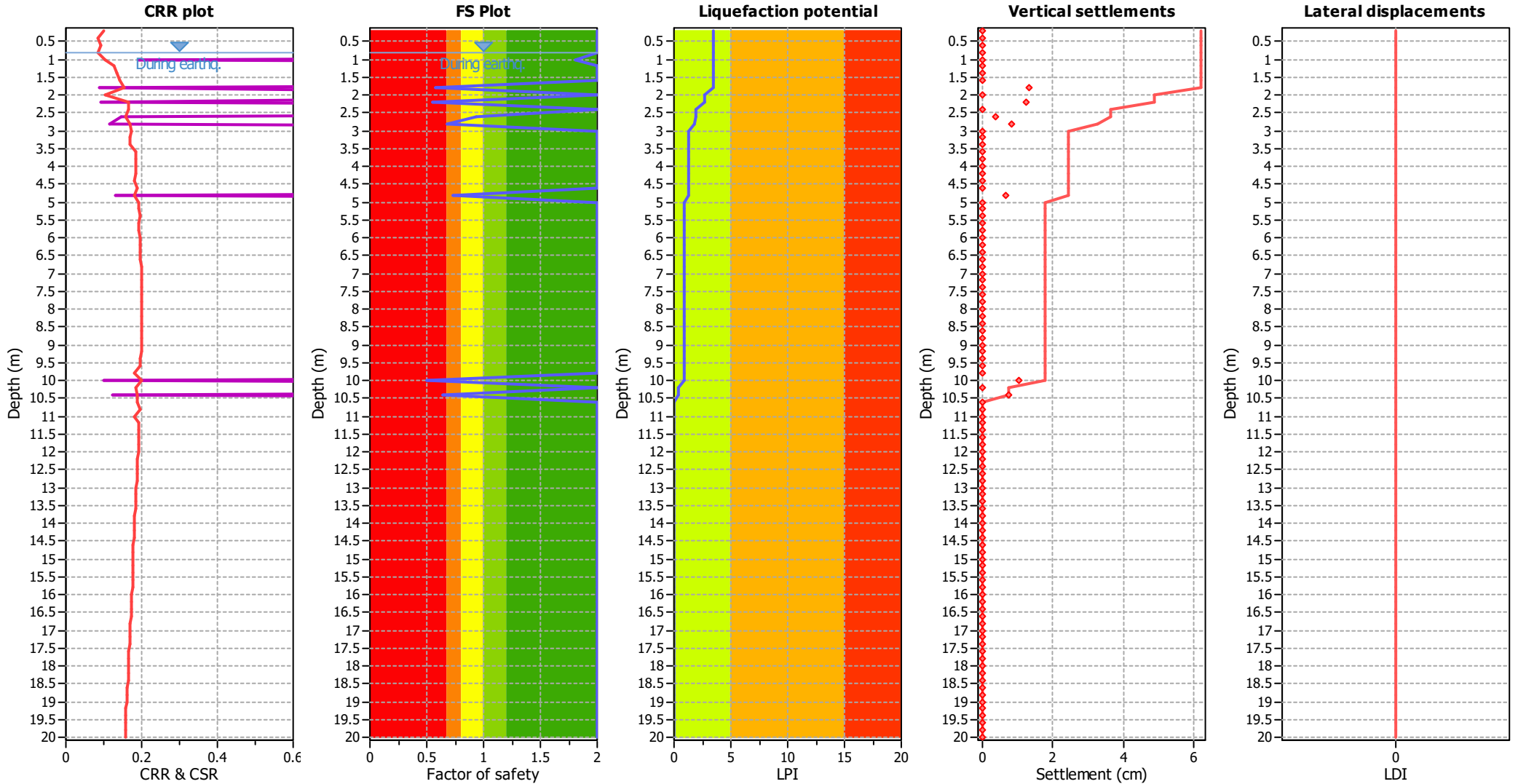
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

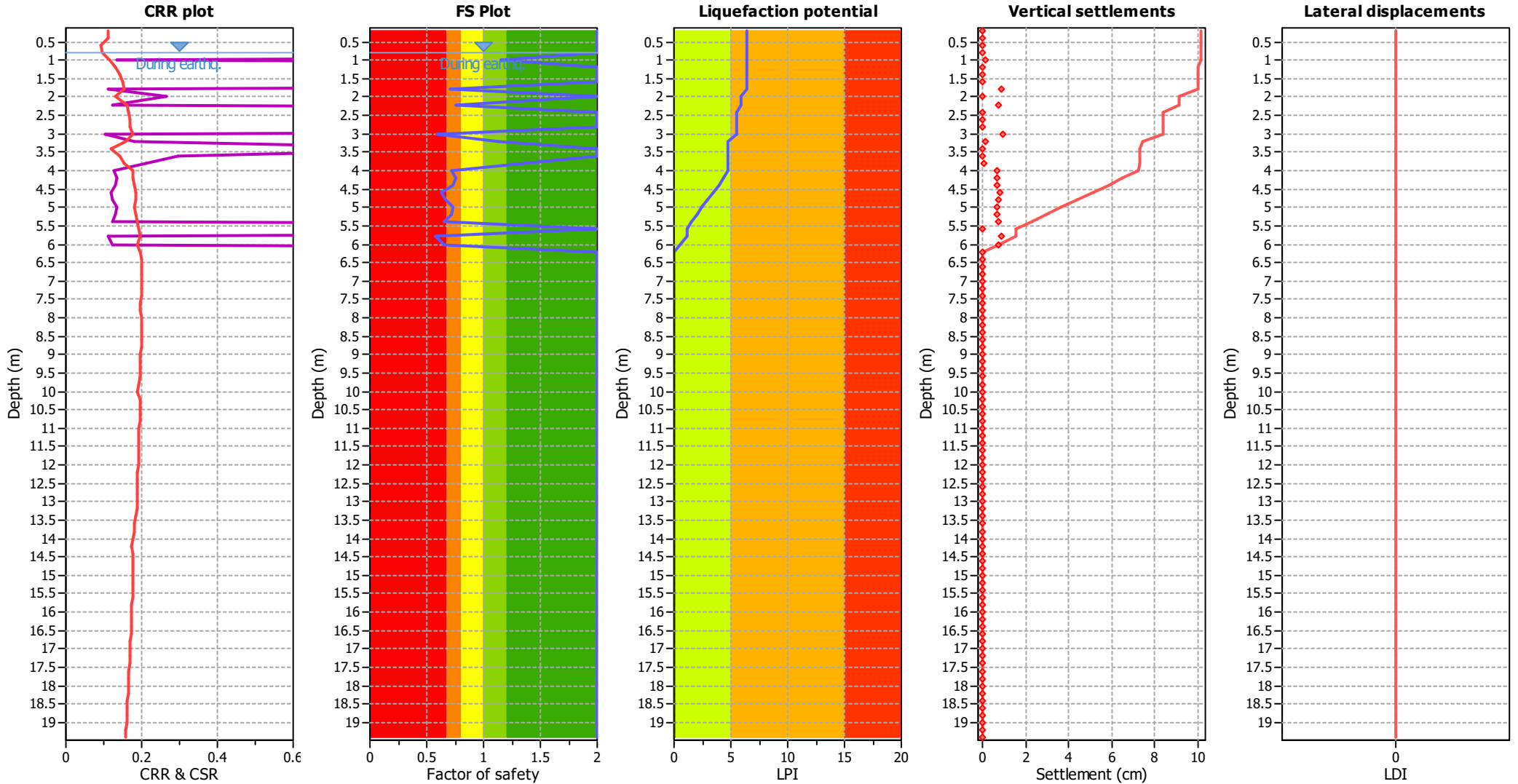
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

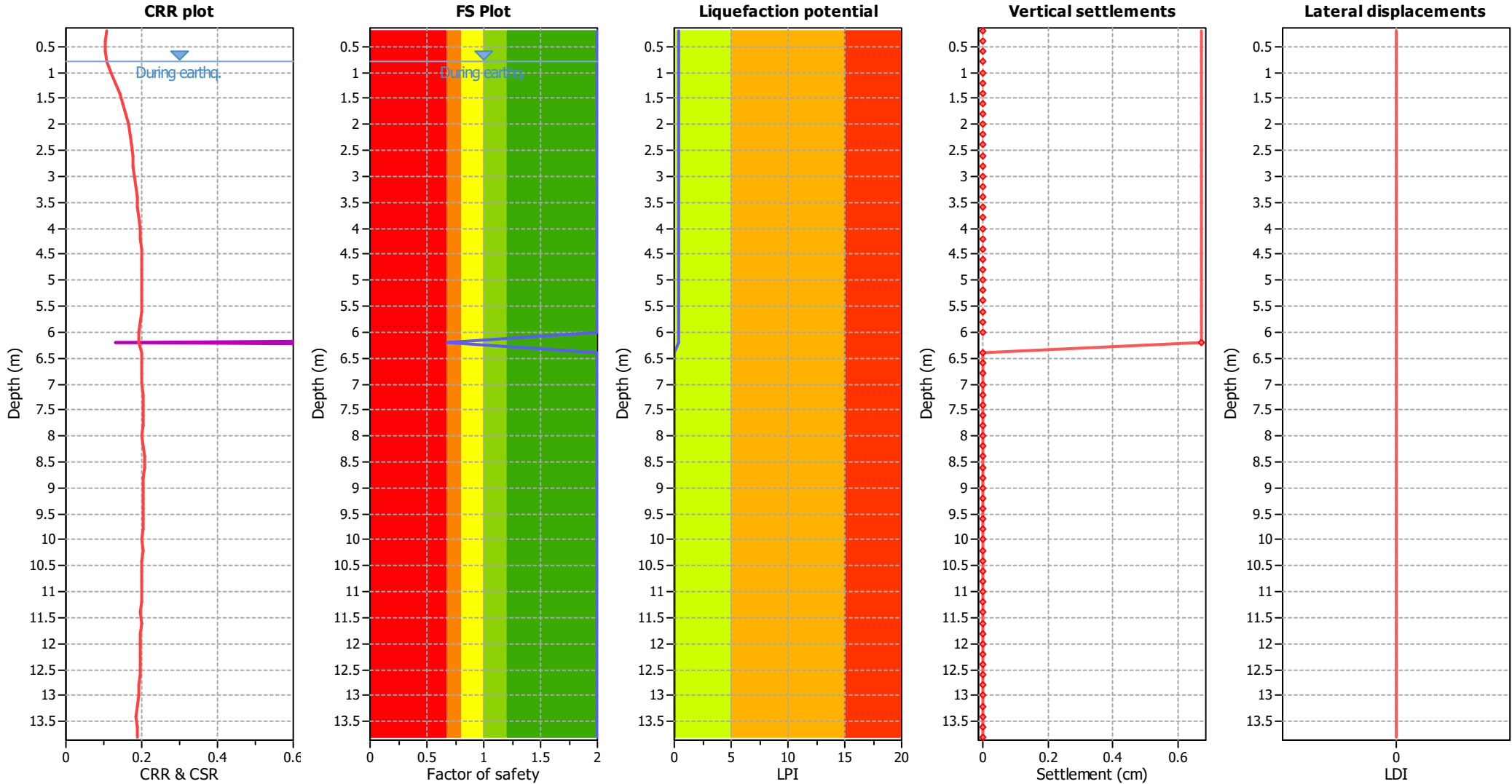
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

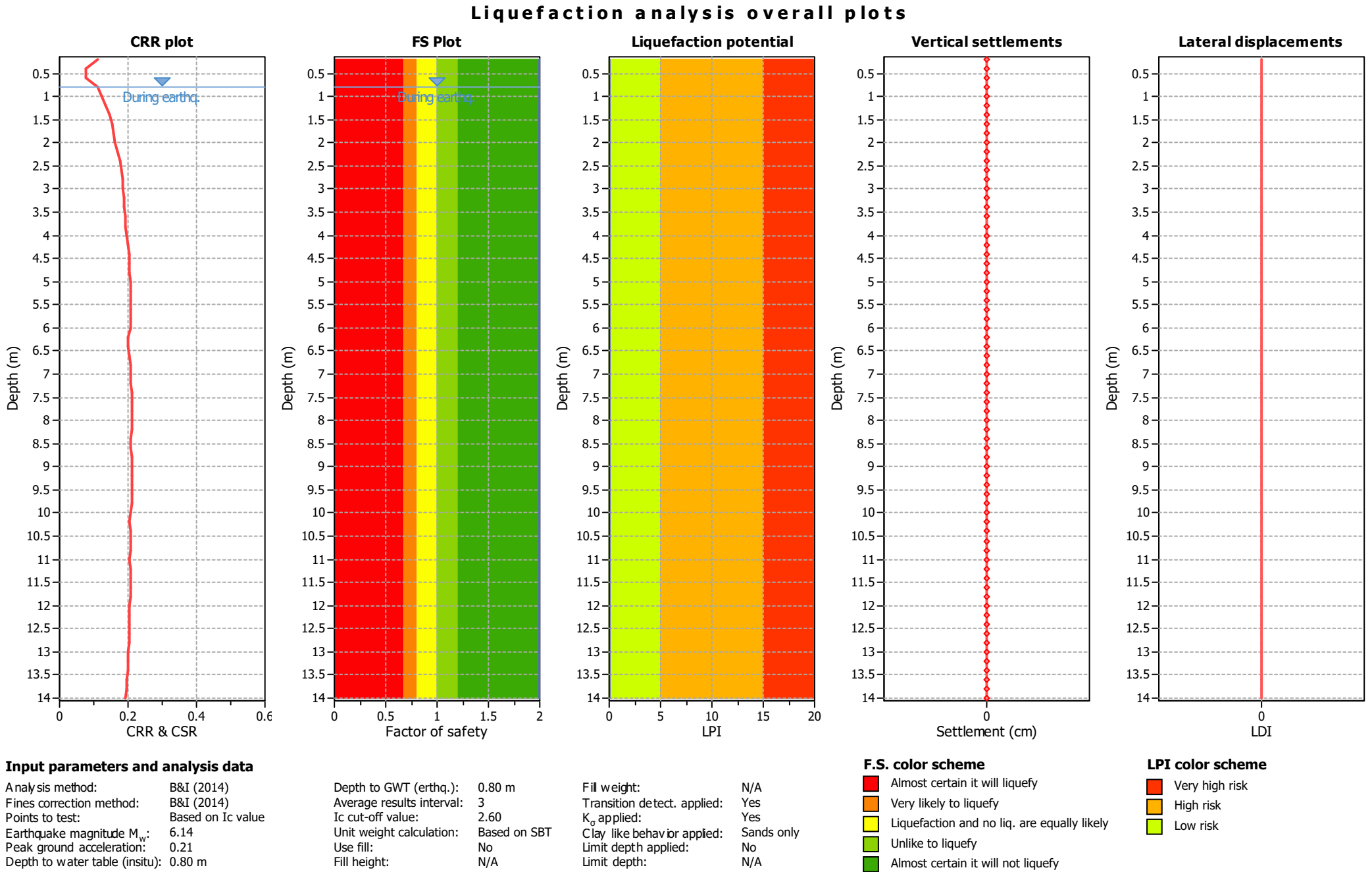
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

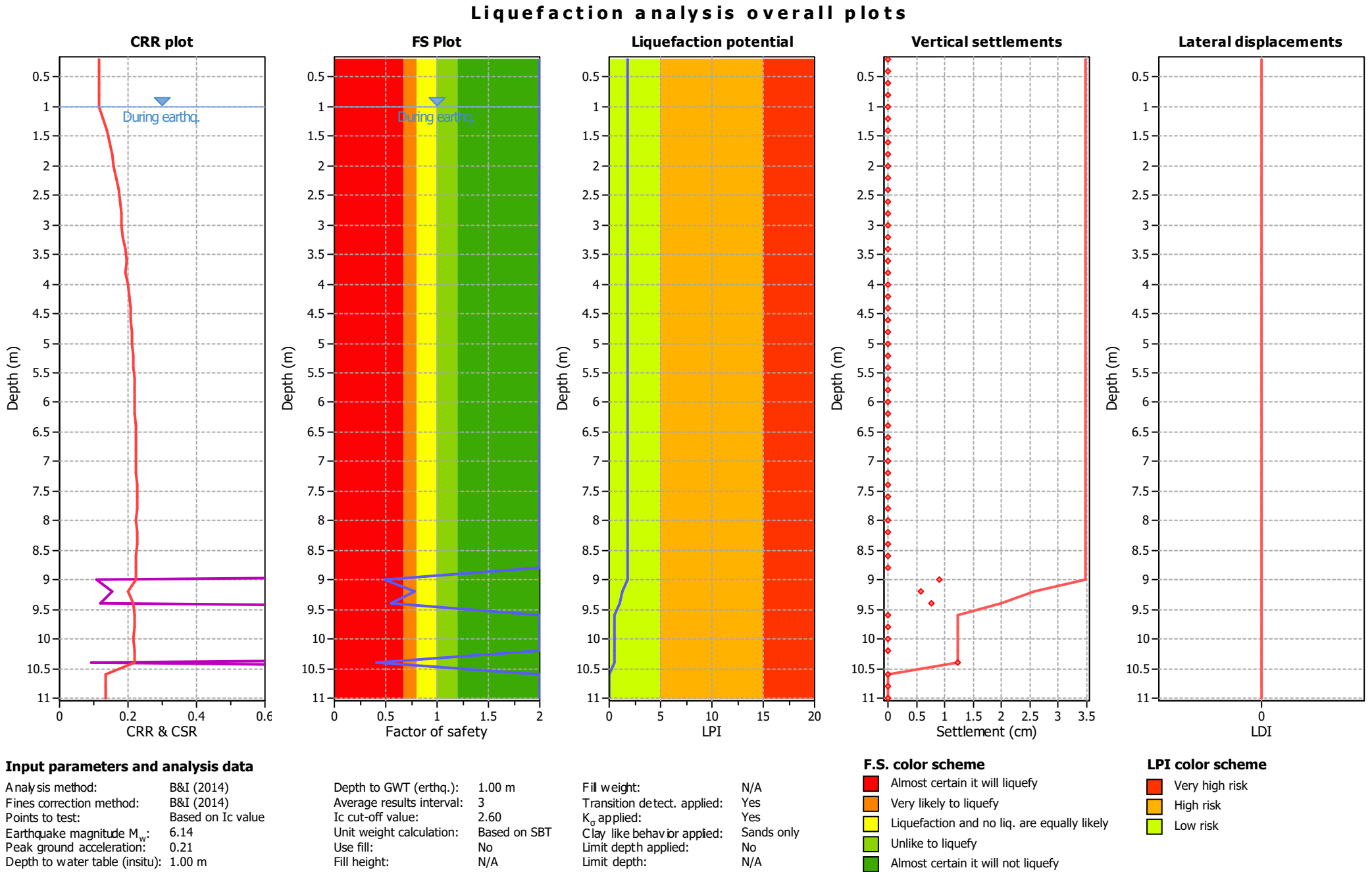
F.S. color scheme

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

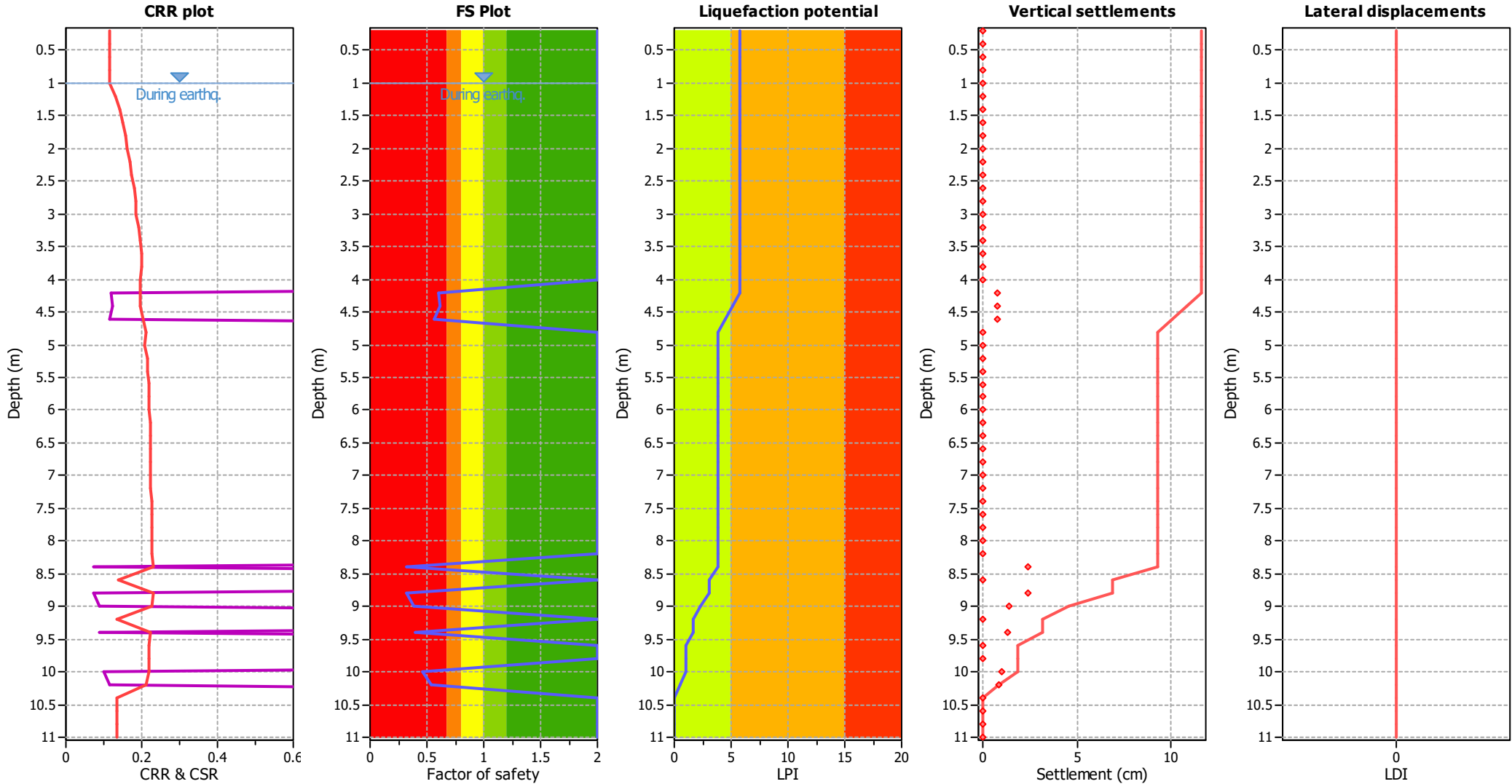
LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk





Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

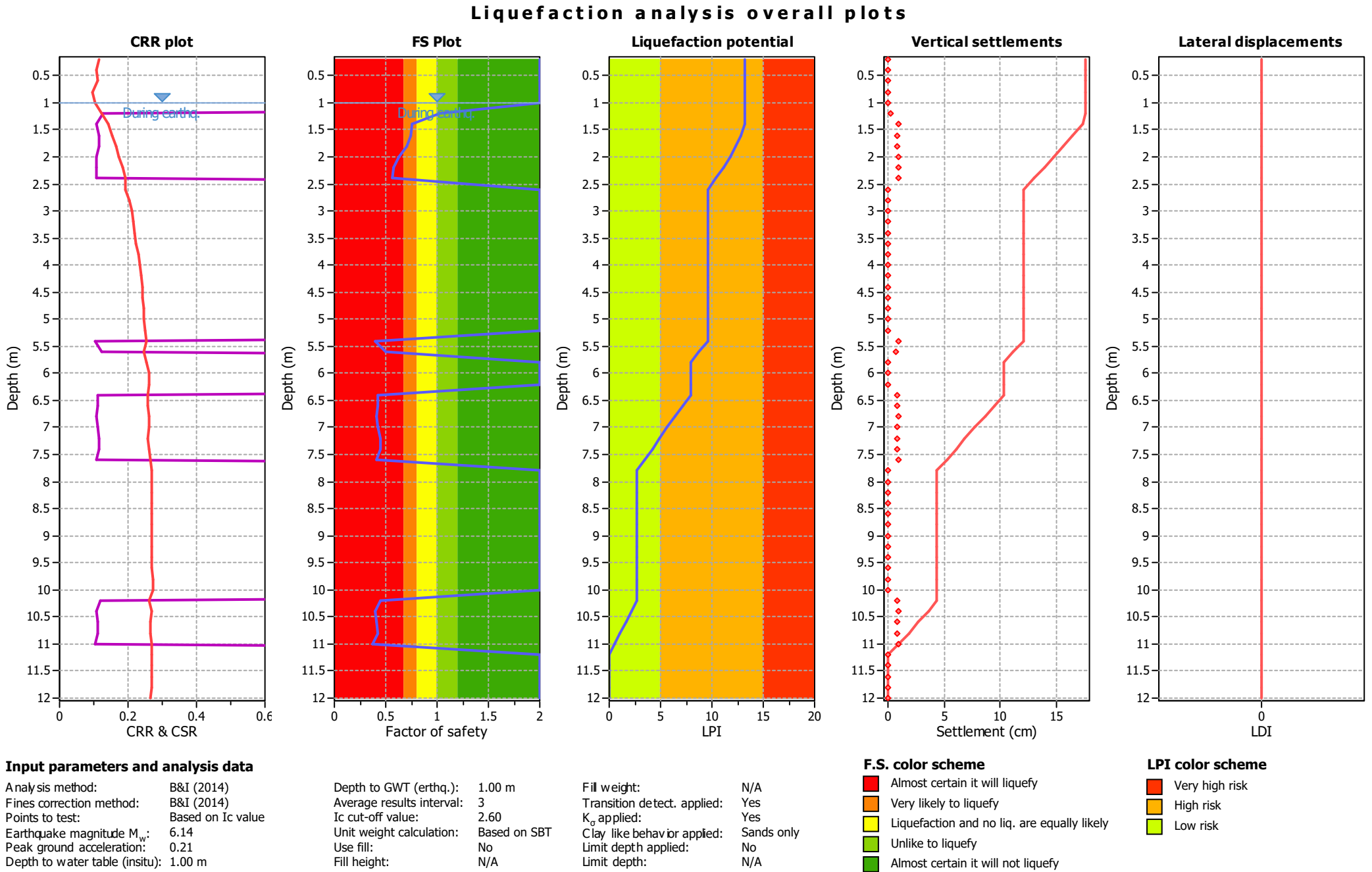
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

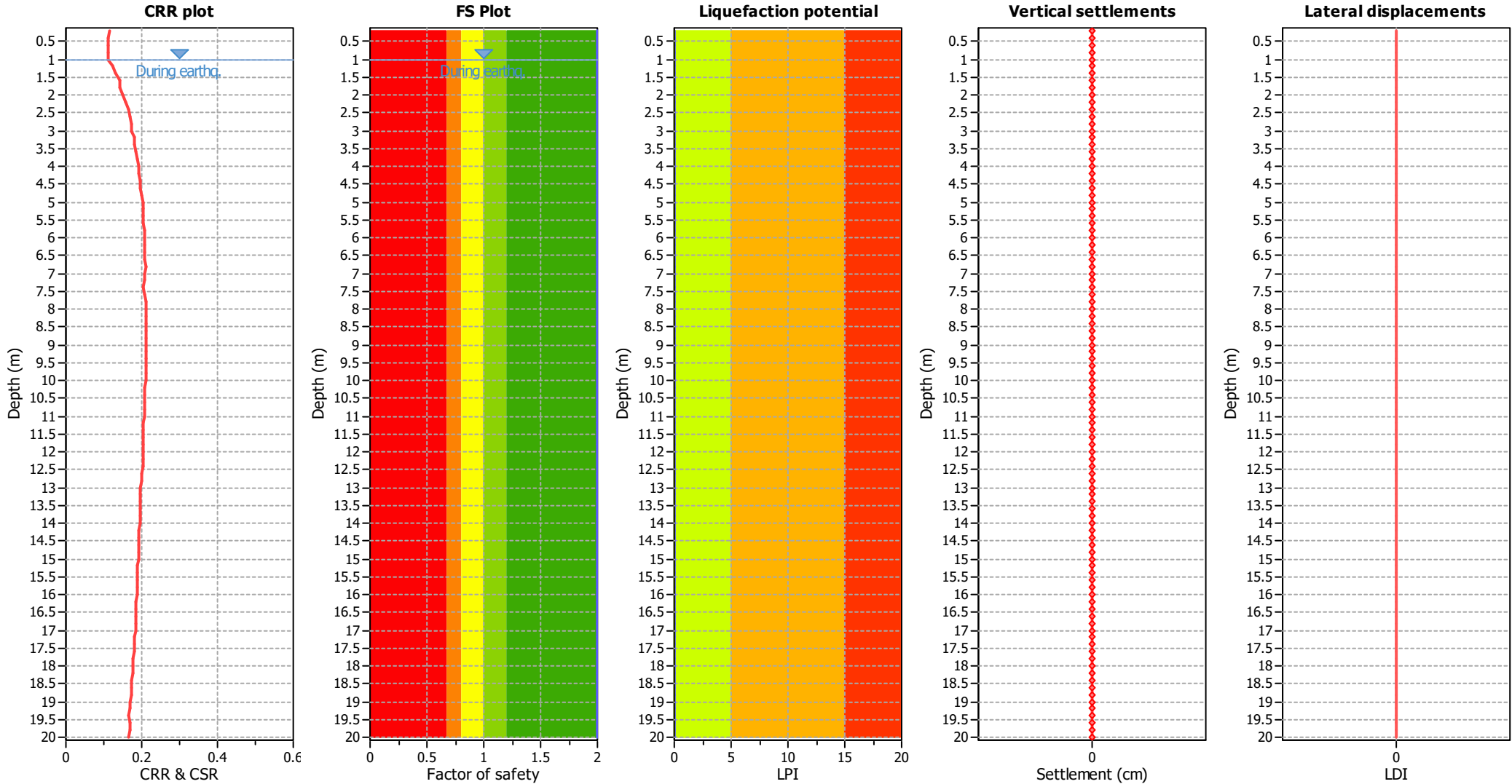
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

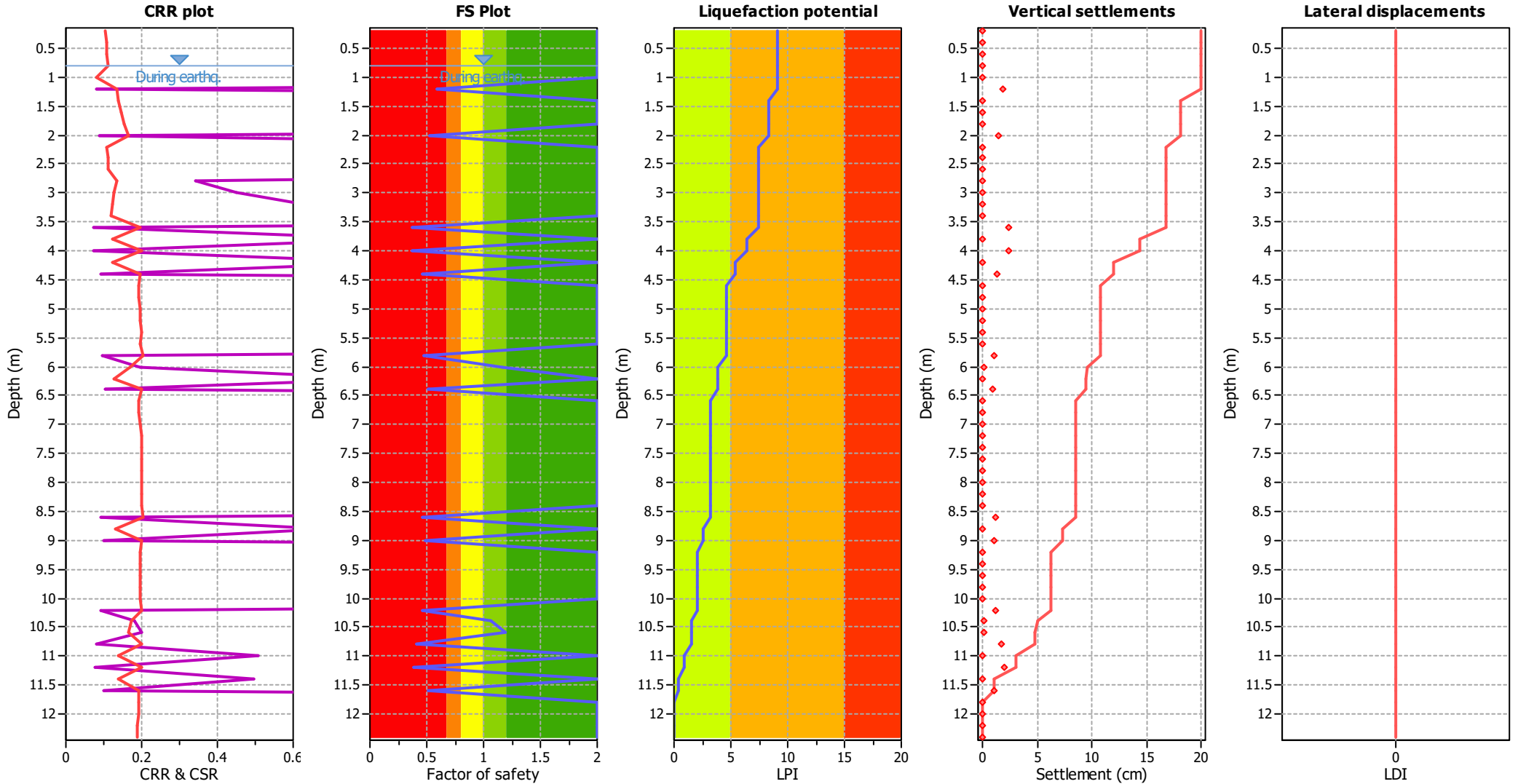
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

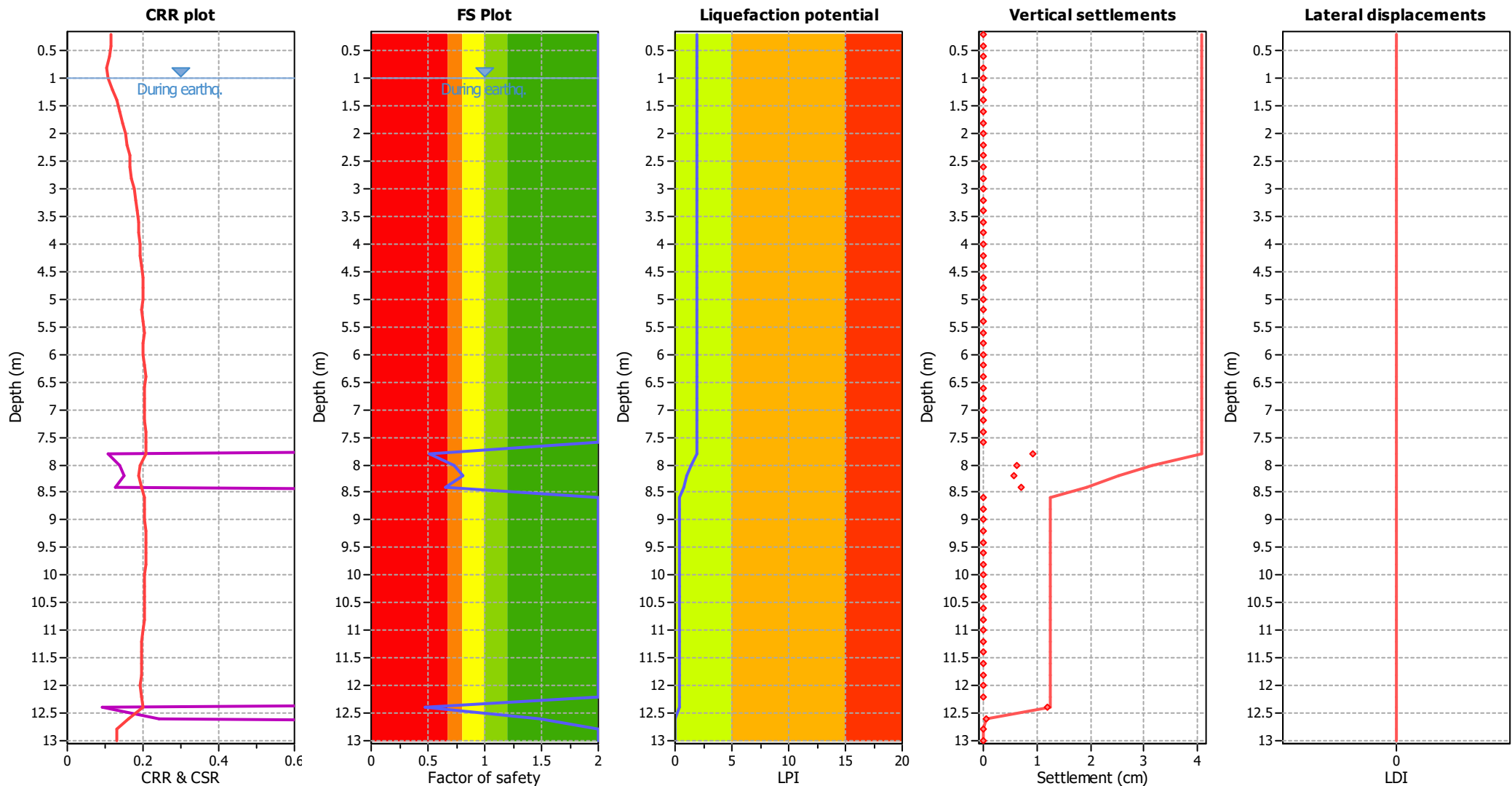
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

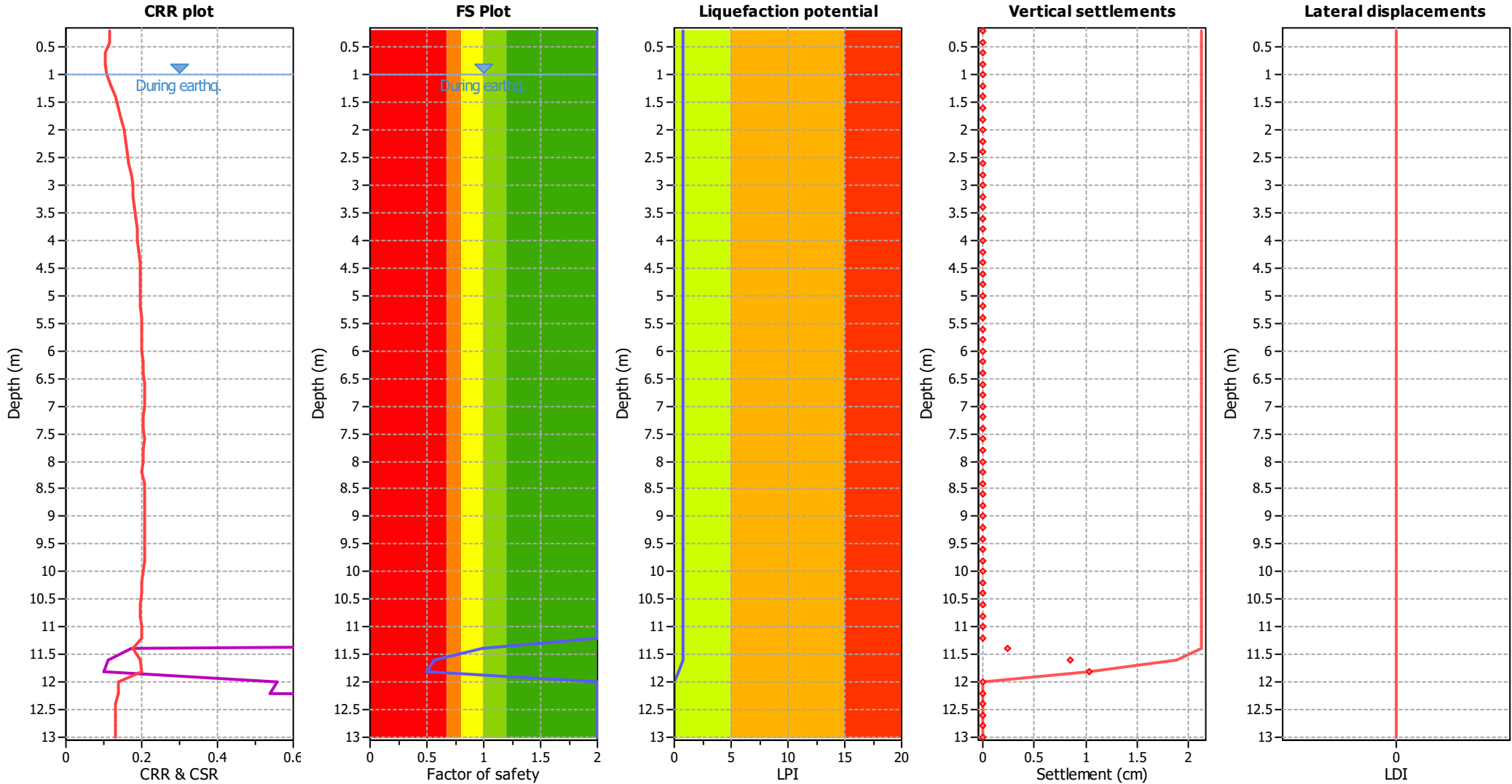
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

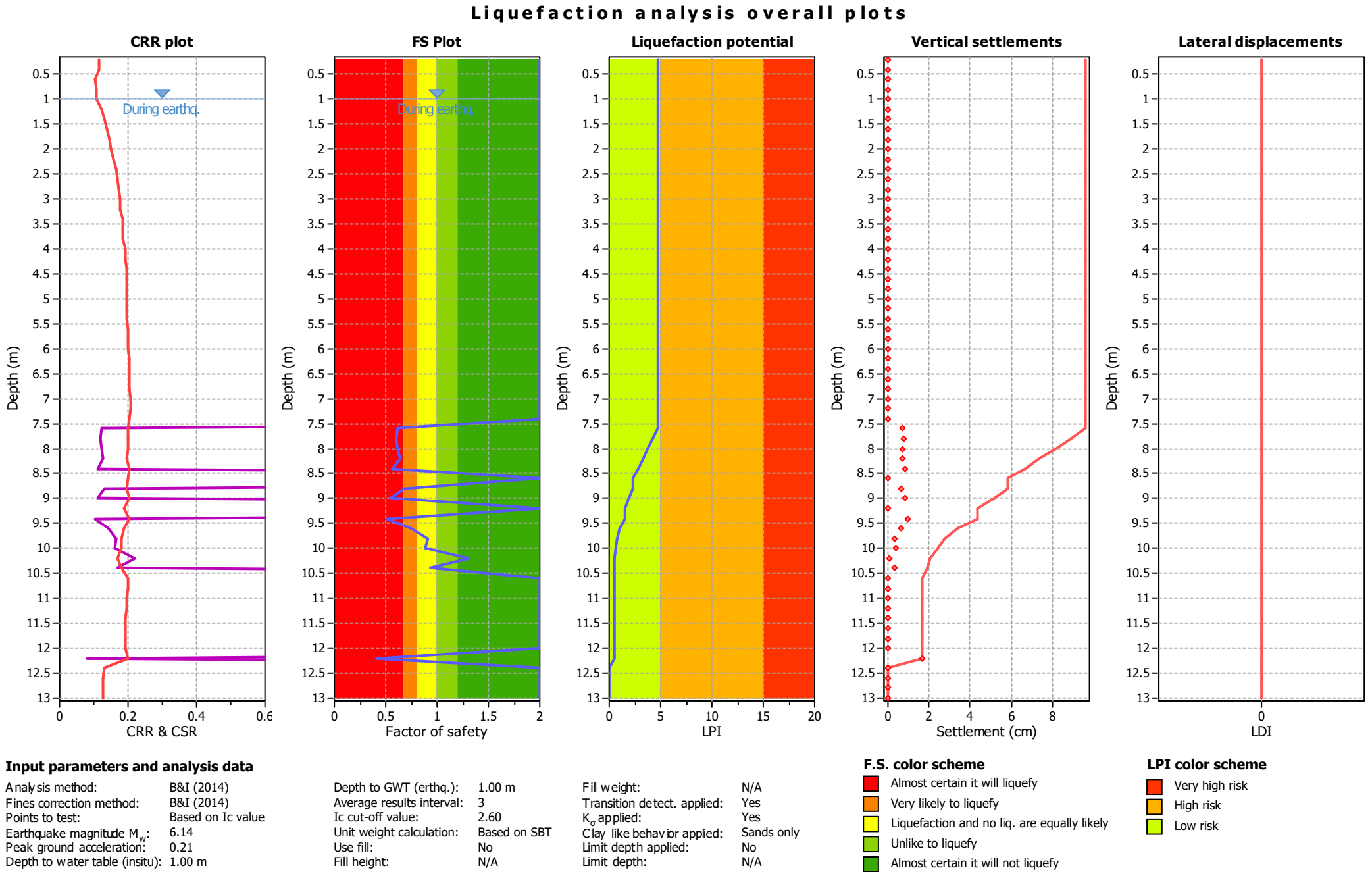
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

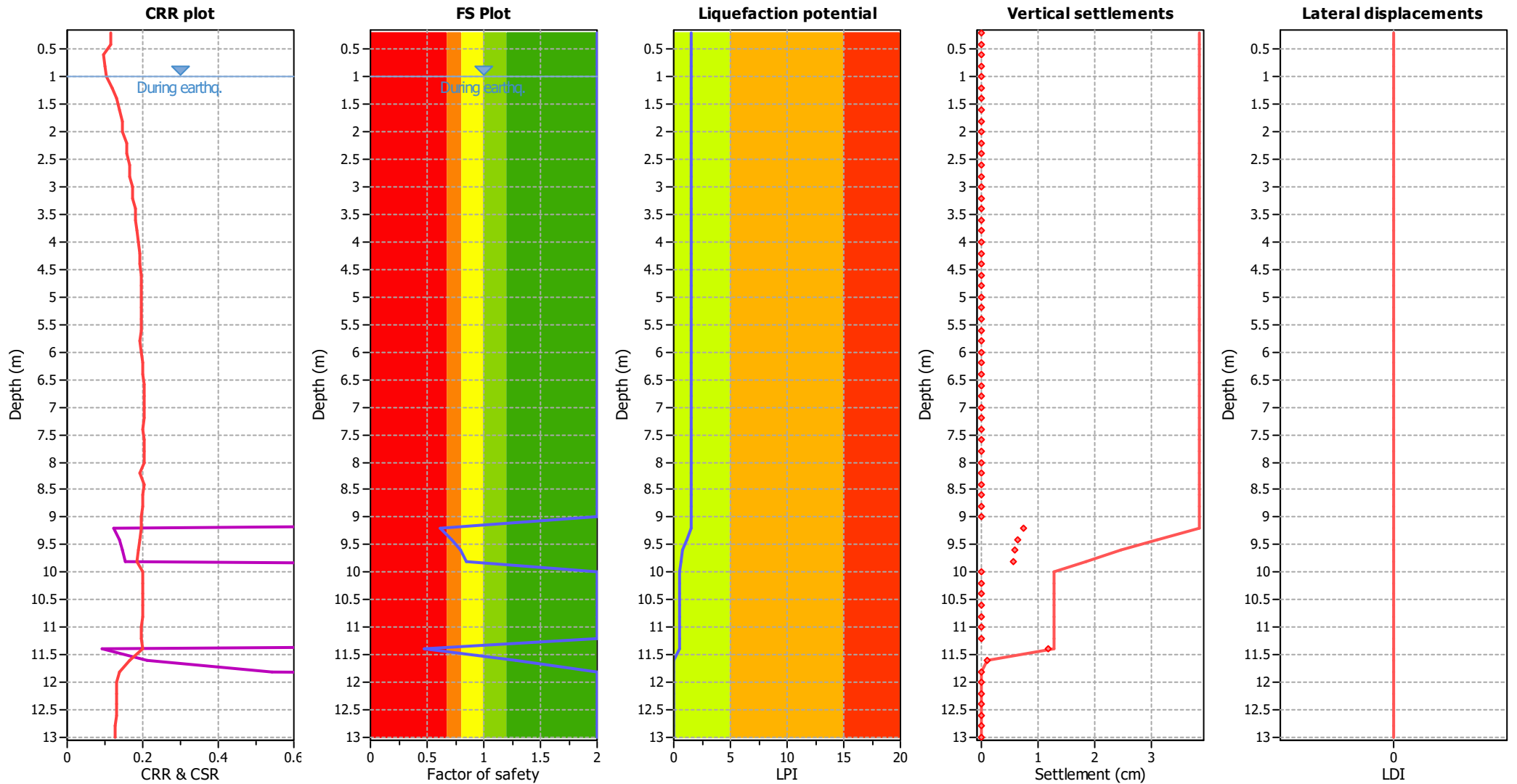
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

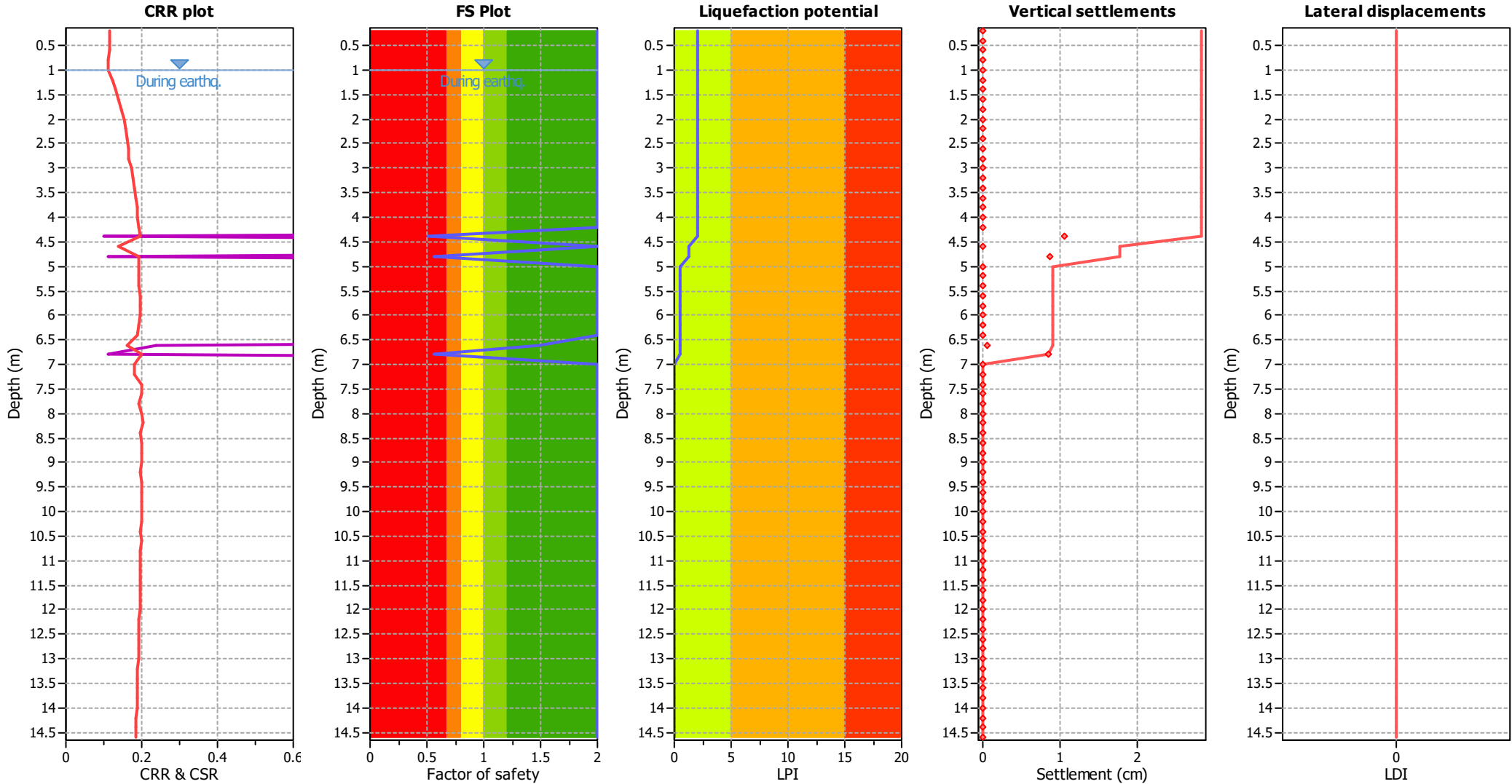
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

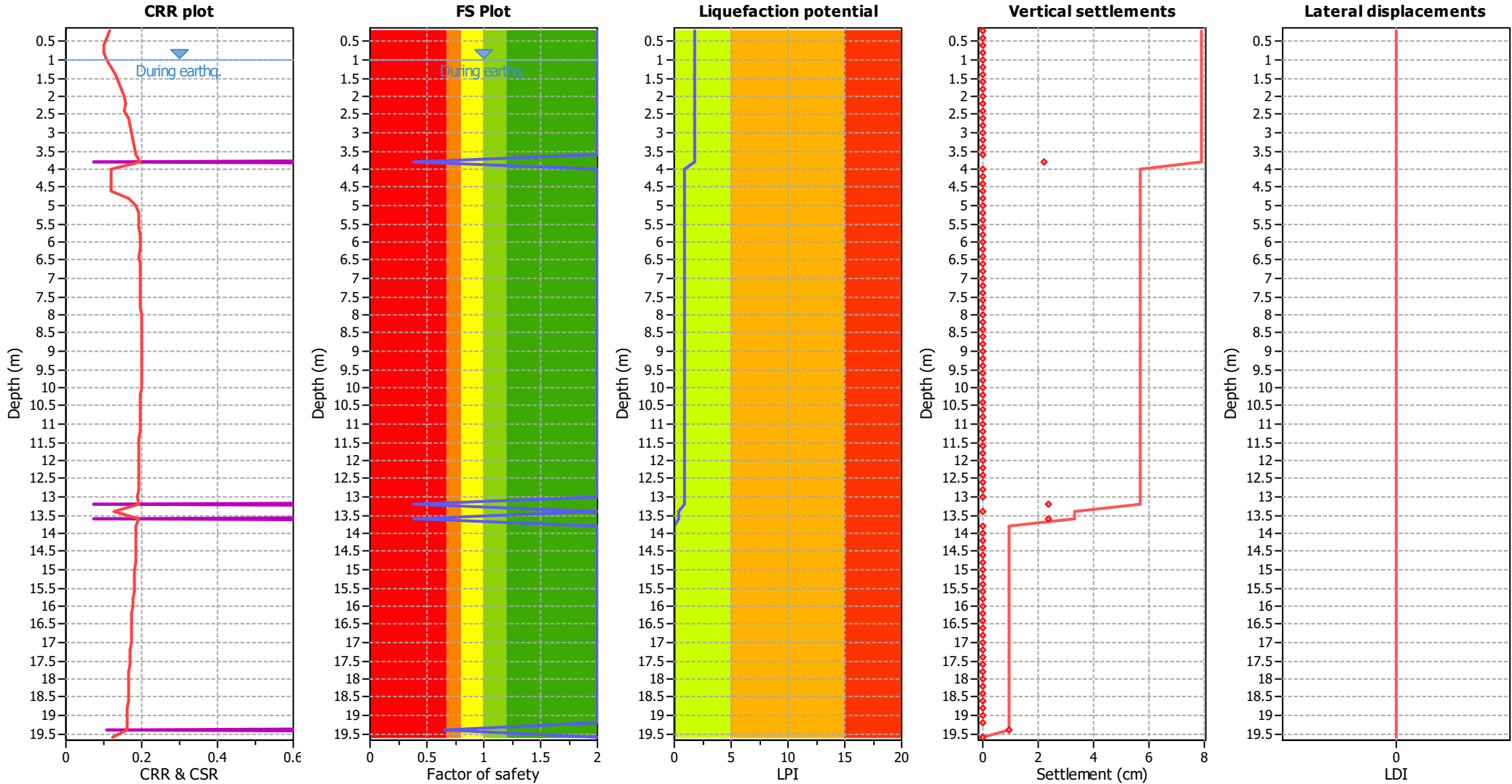
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

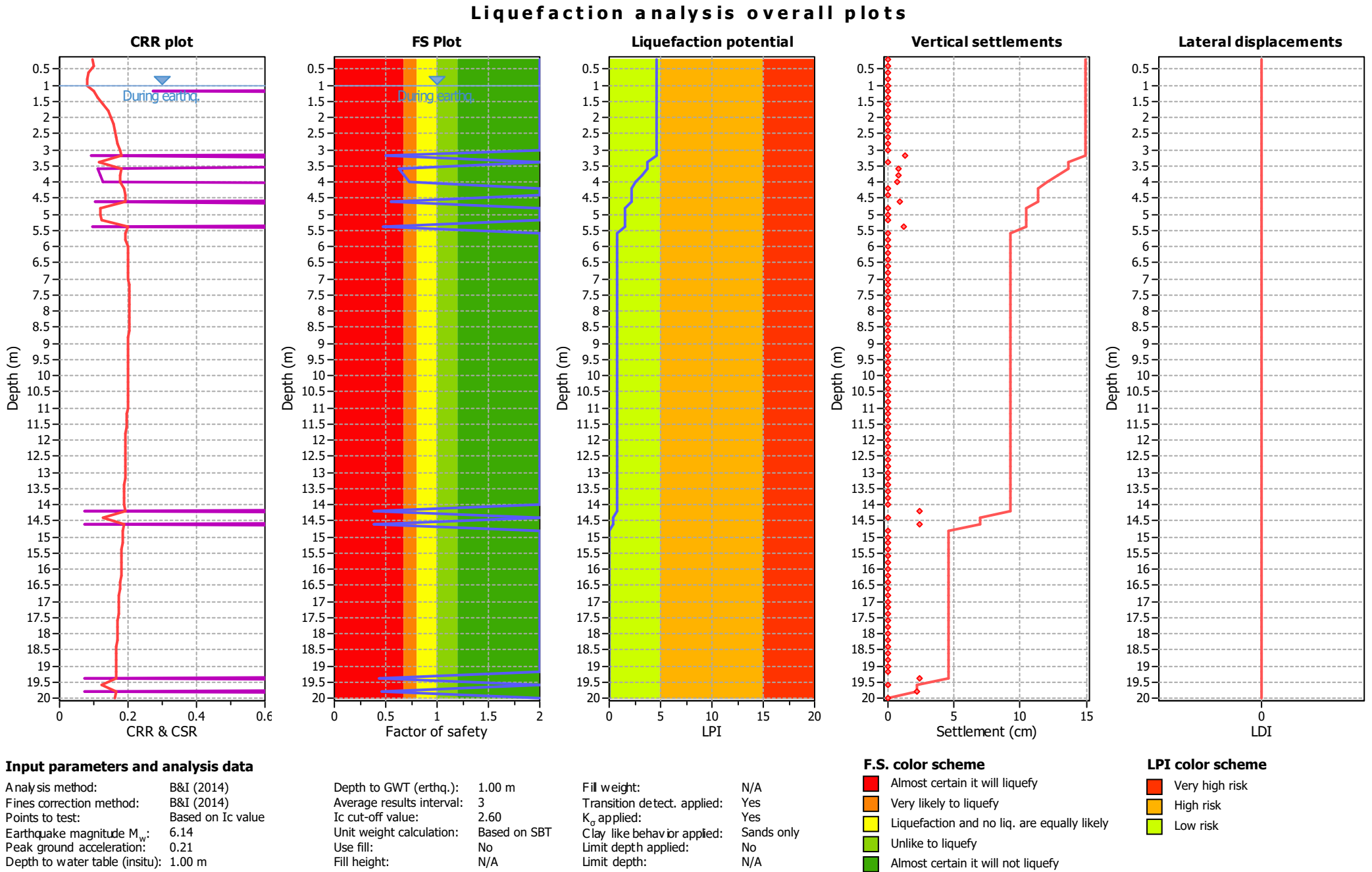
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

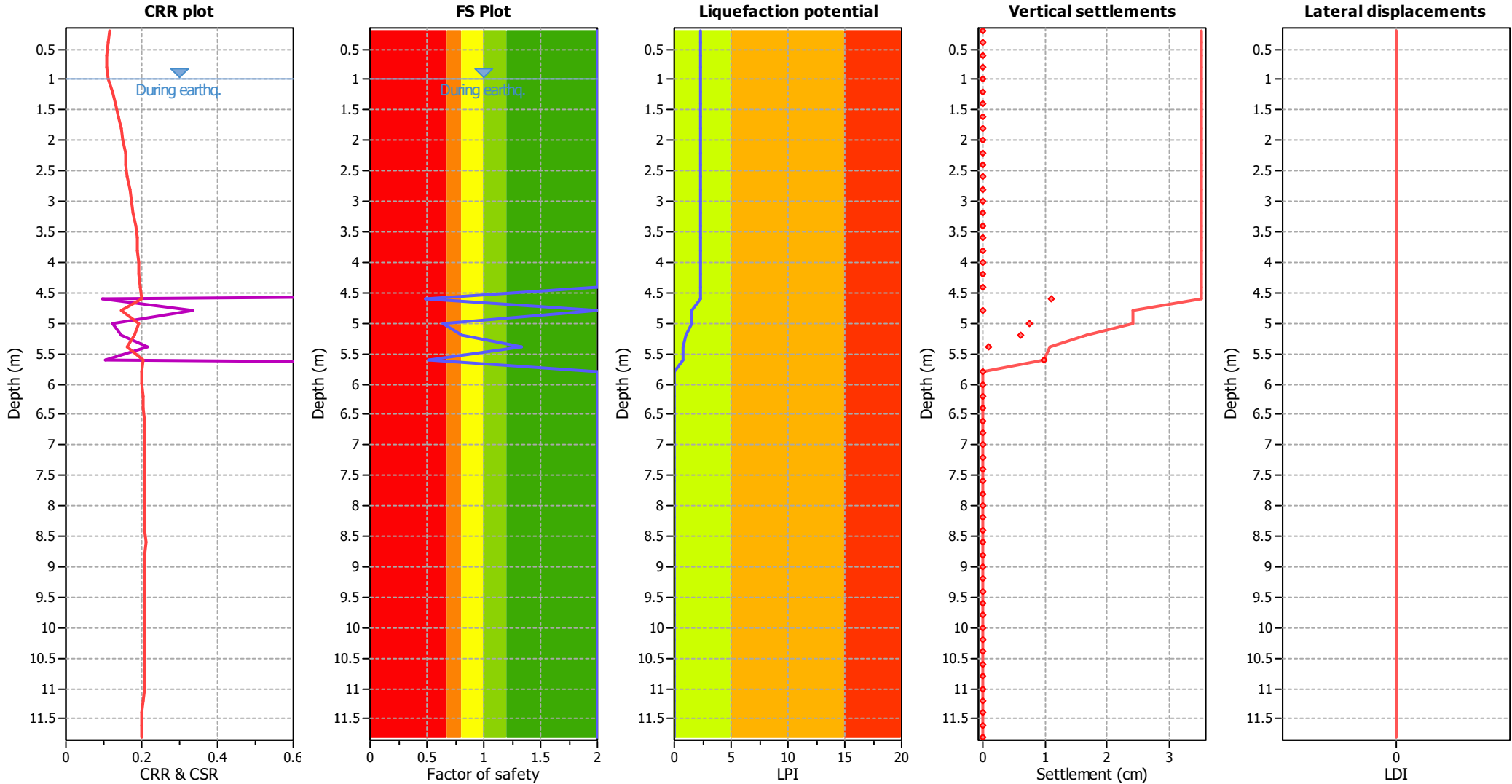
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

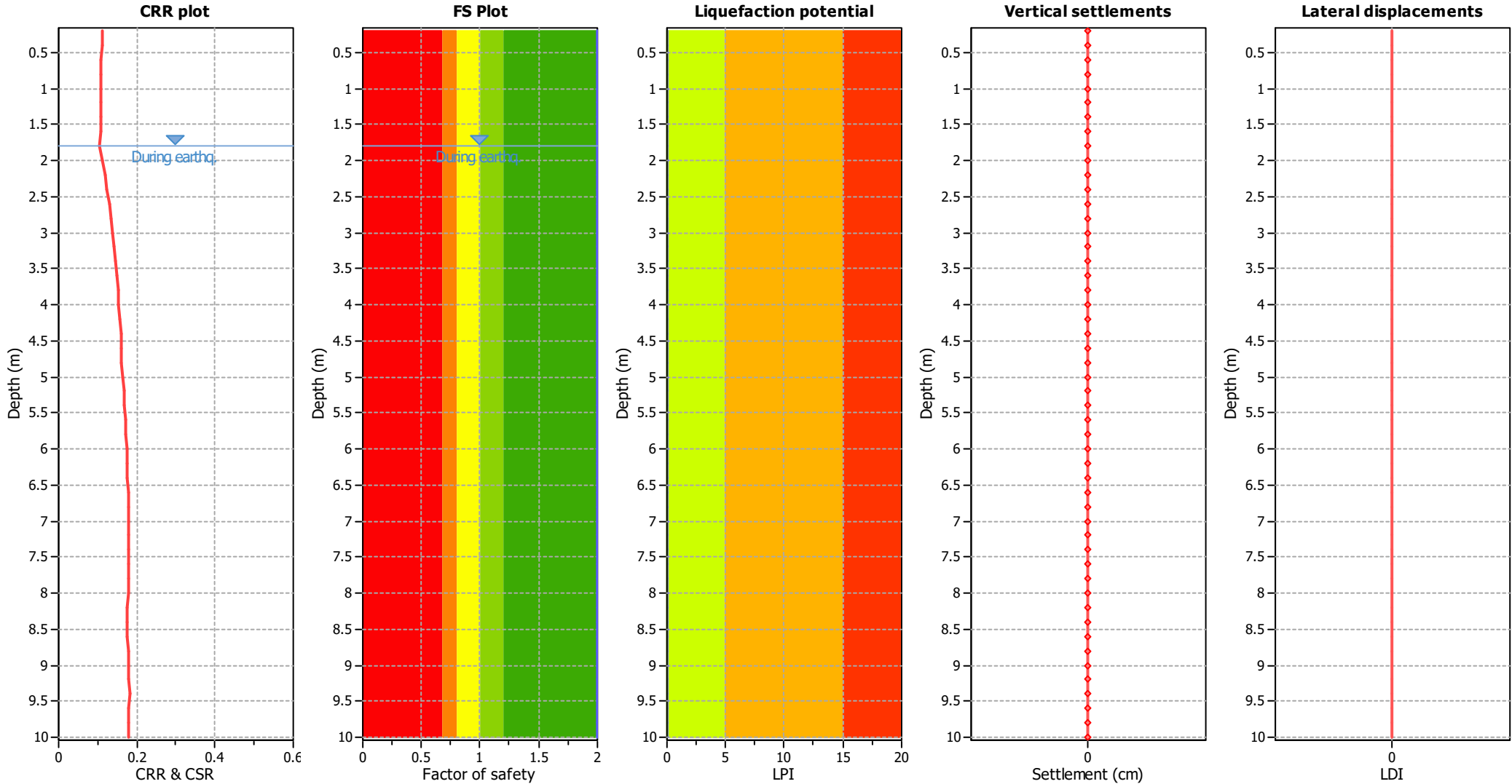
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

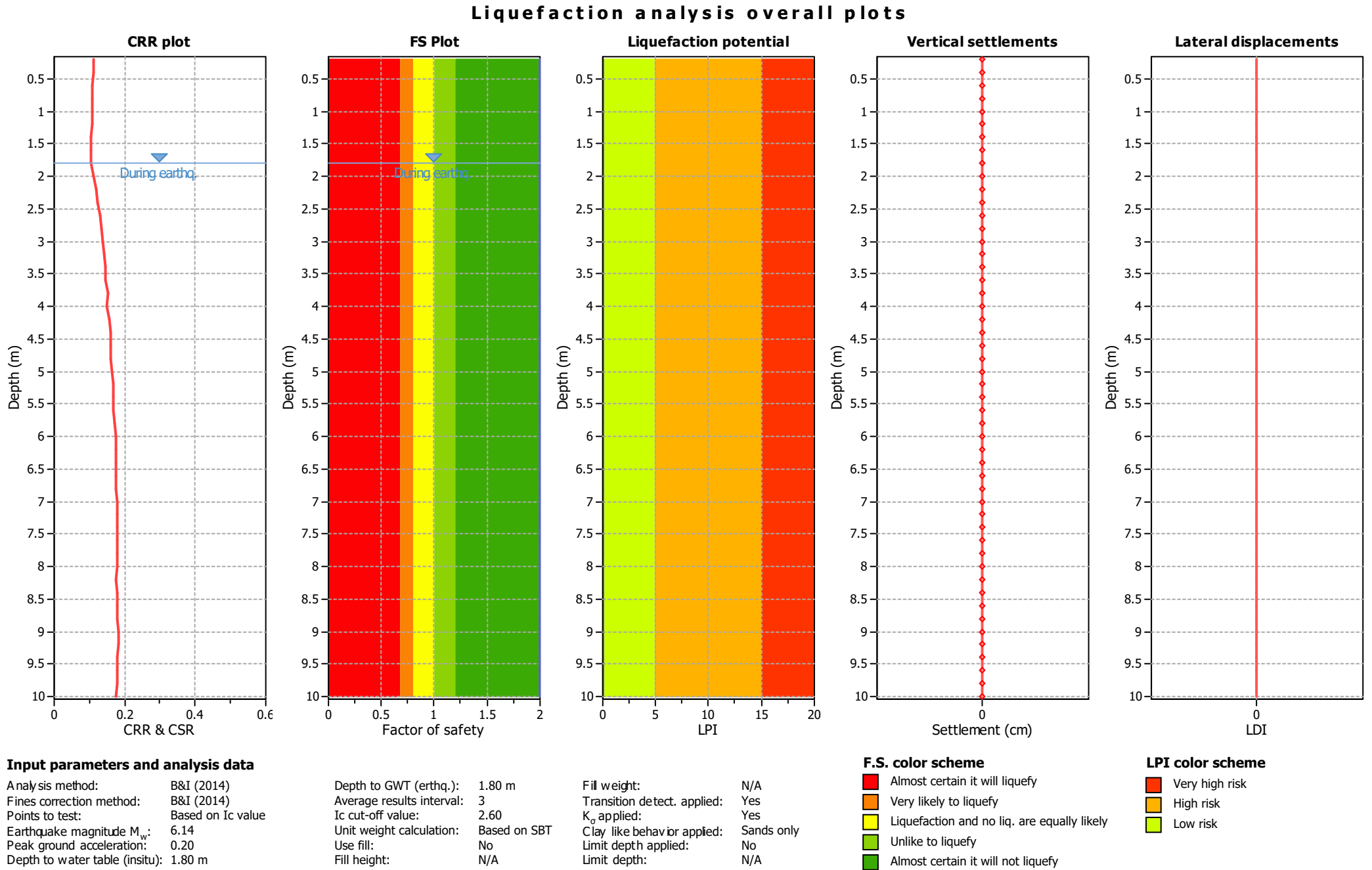
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

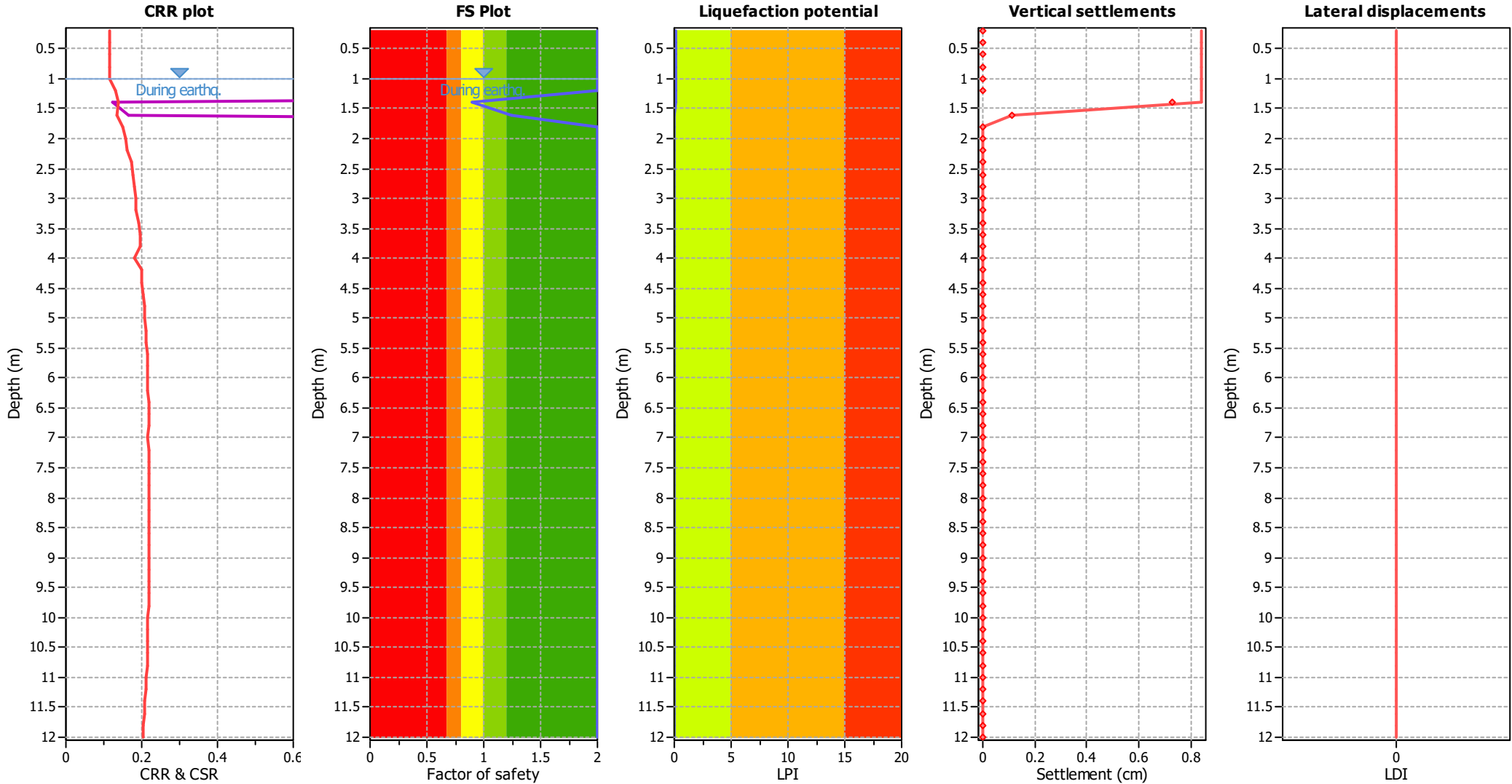
Very high risk	Almost certain it will liquefy
High risk	Very likely to liquefy
Low risk	Liquefaction and no liq. are equally likely
	Unlike to liquefy
	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

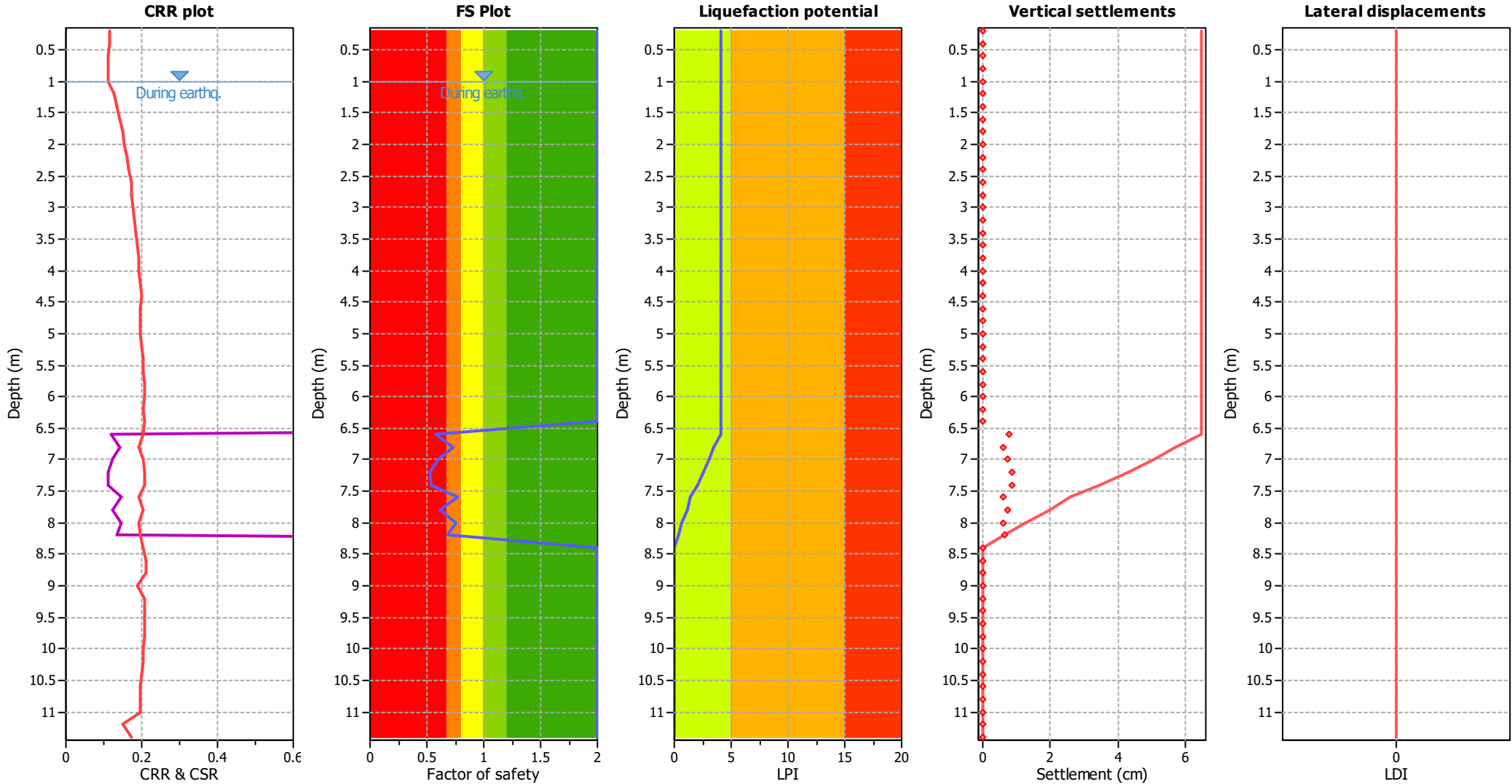
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

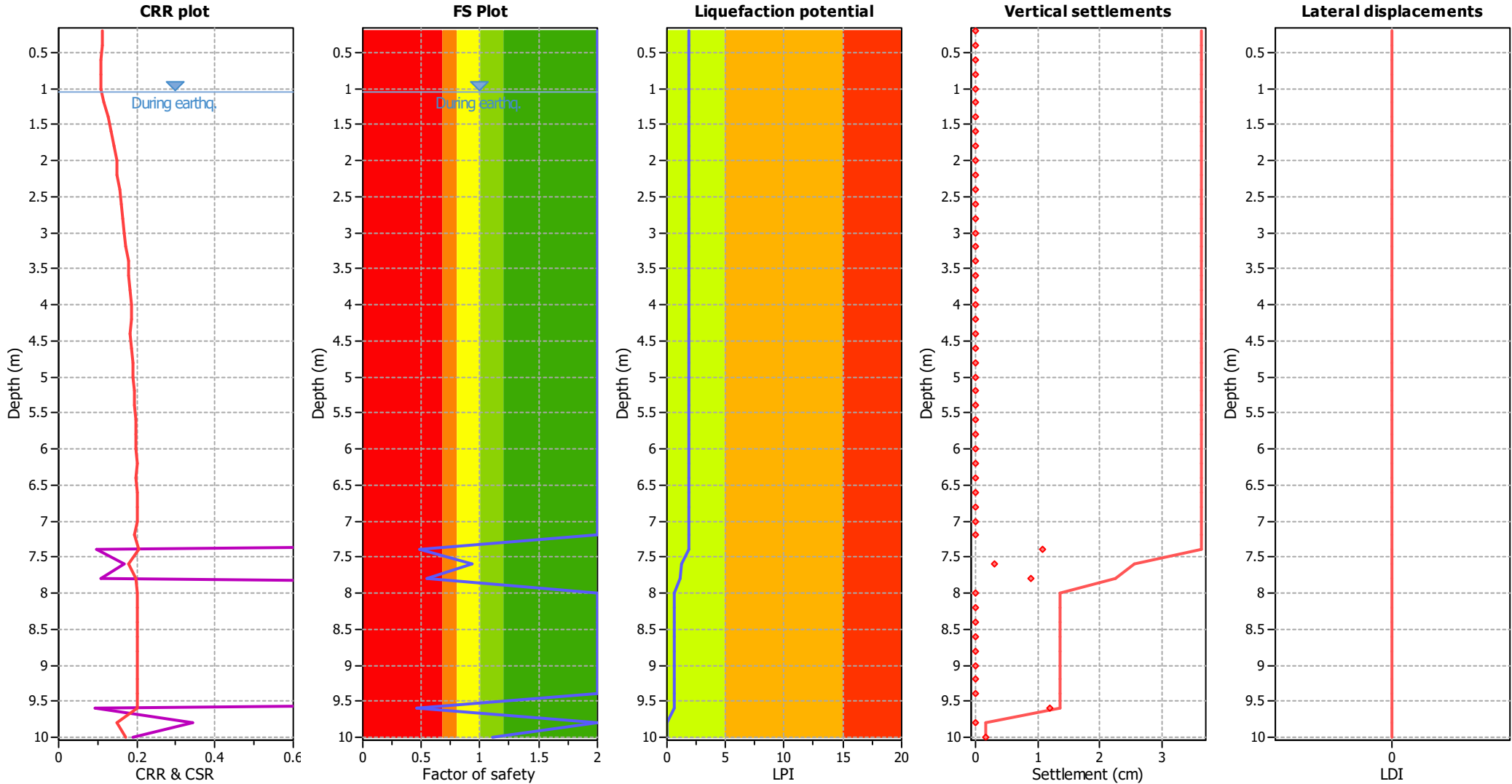
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.05 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.05 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

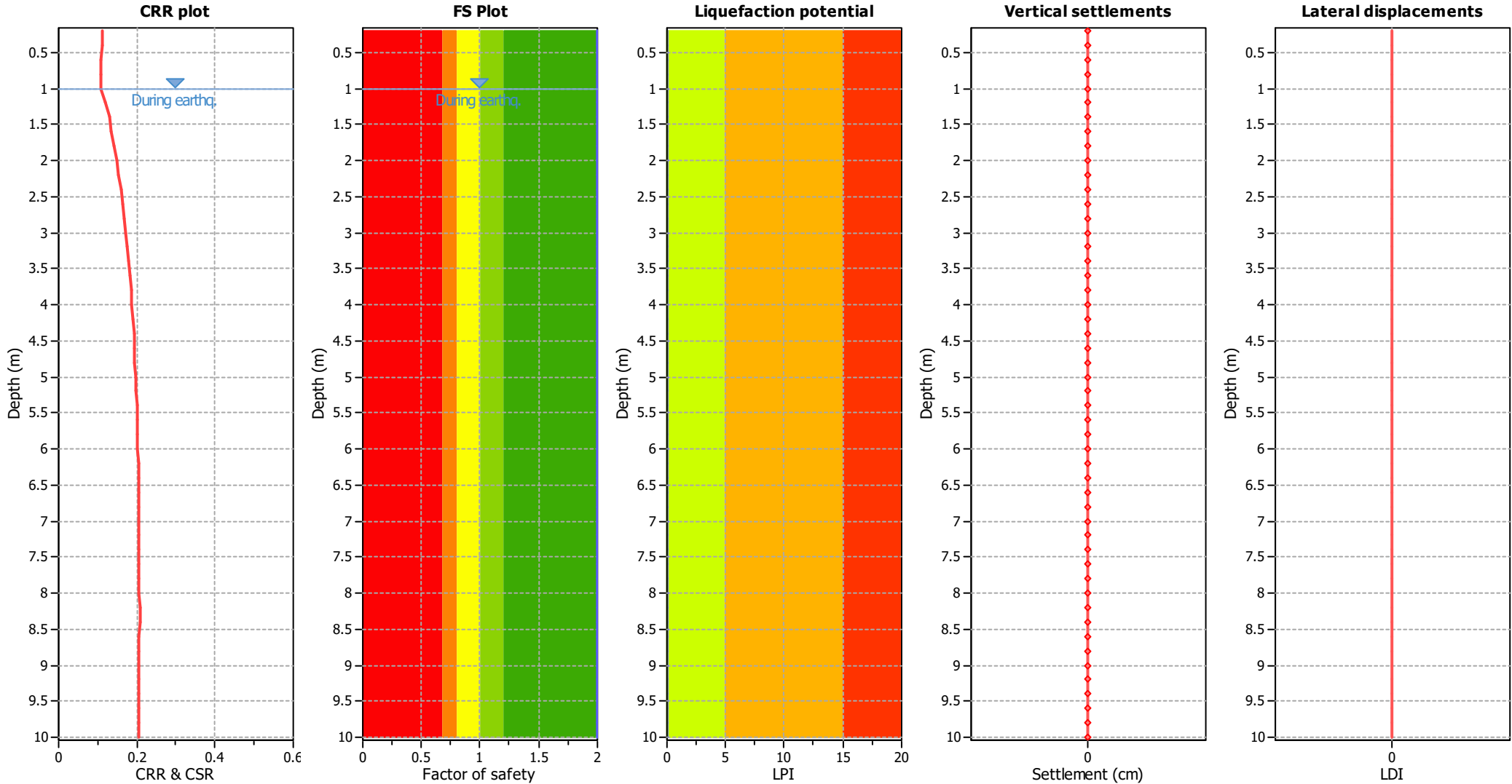
F.S. color scheme

Very high risk	Almost certain it will liquefy
High risk	Very likely to liquefy
Low risk	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)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

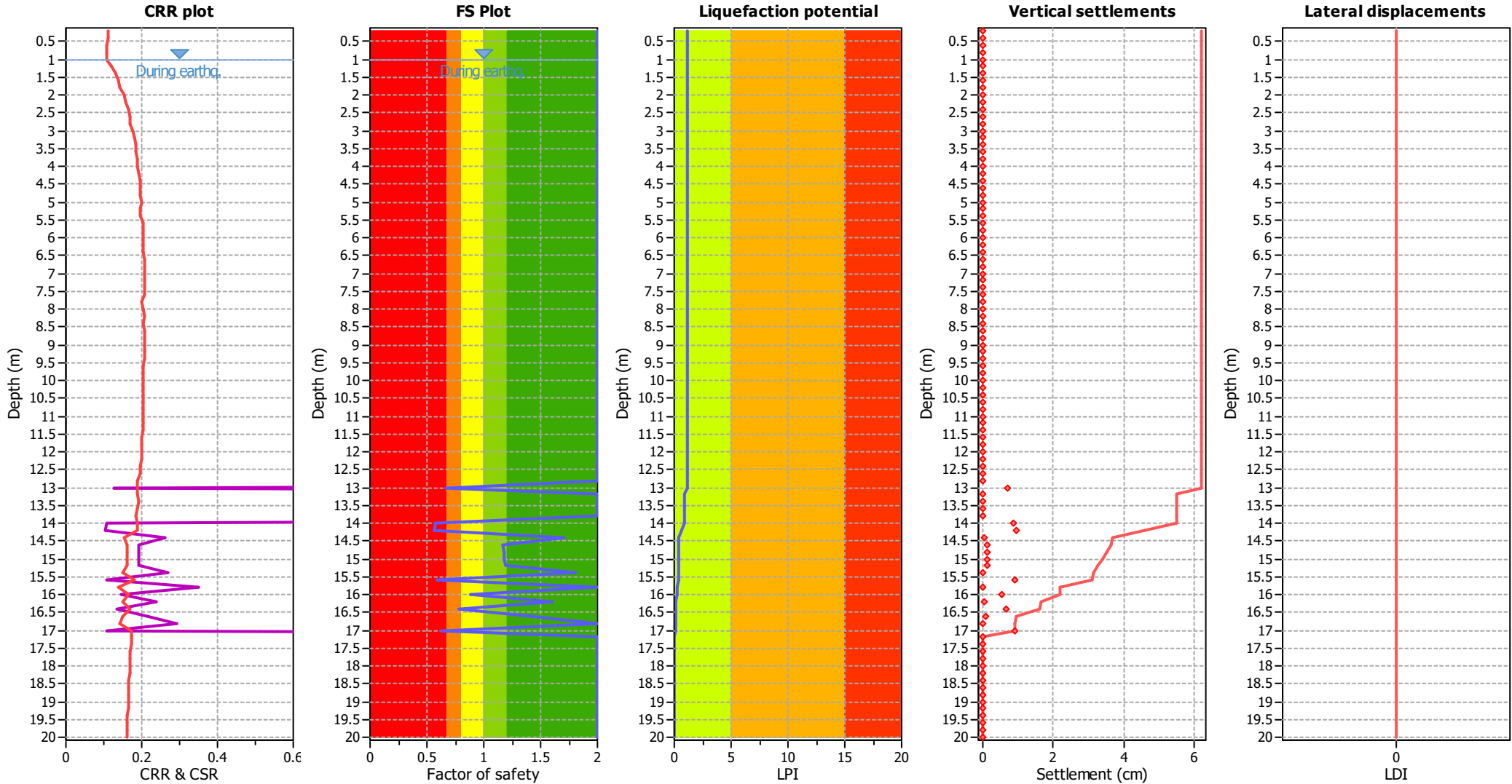
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

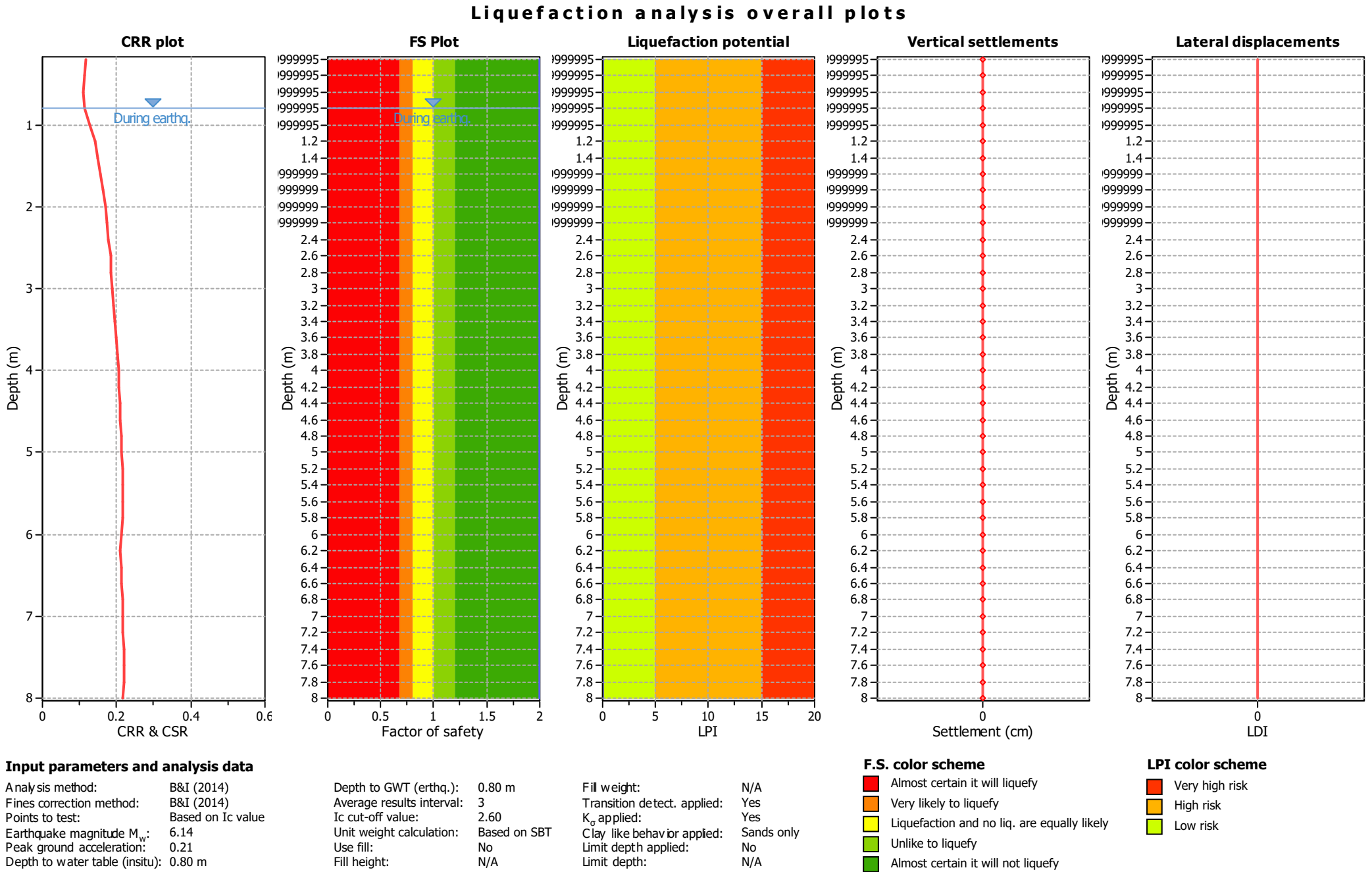
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

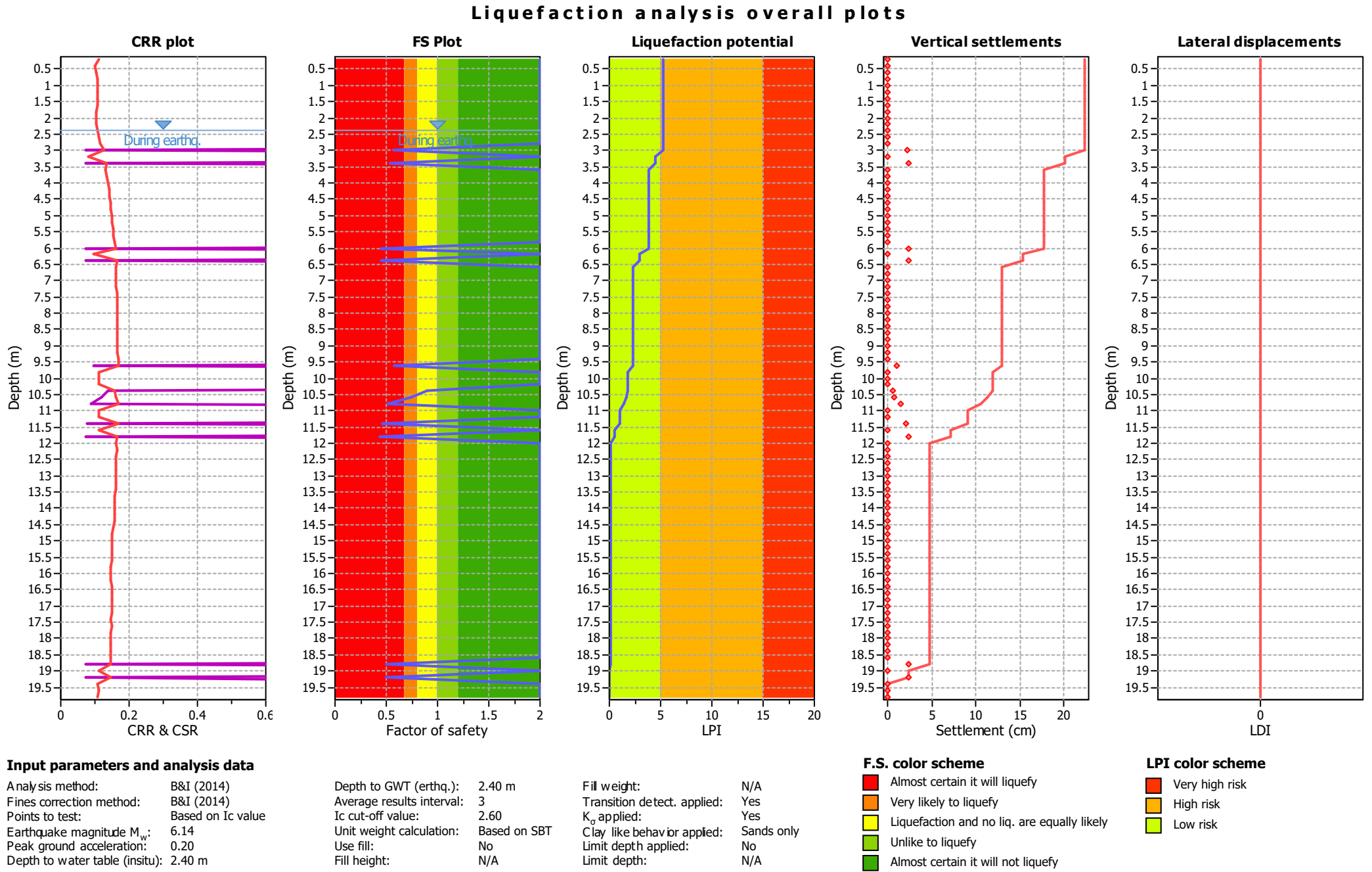
F.S. color scheme

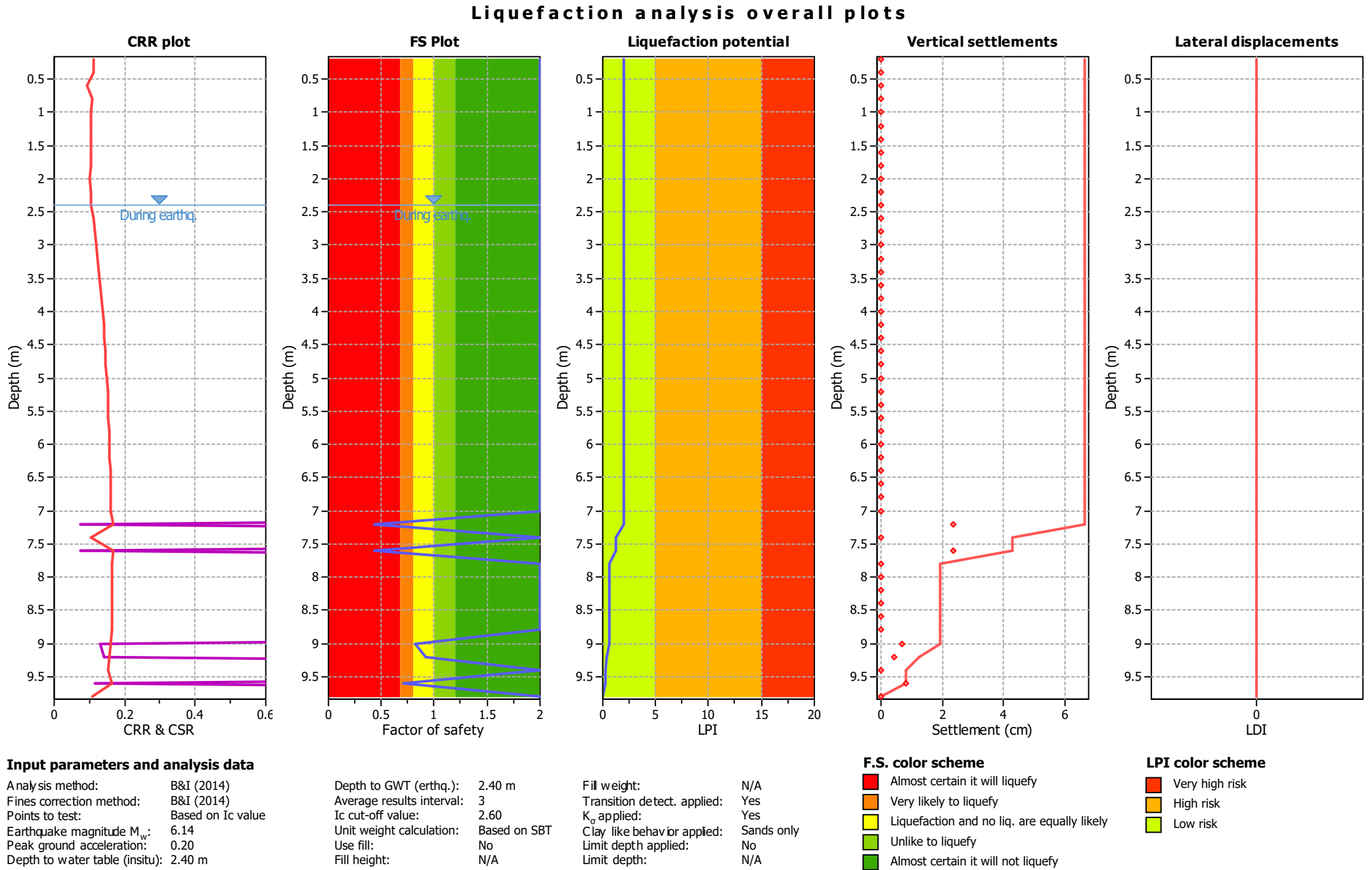
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

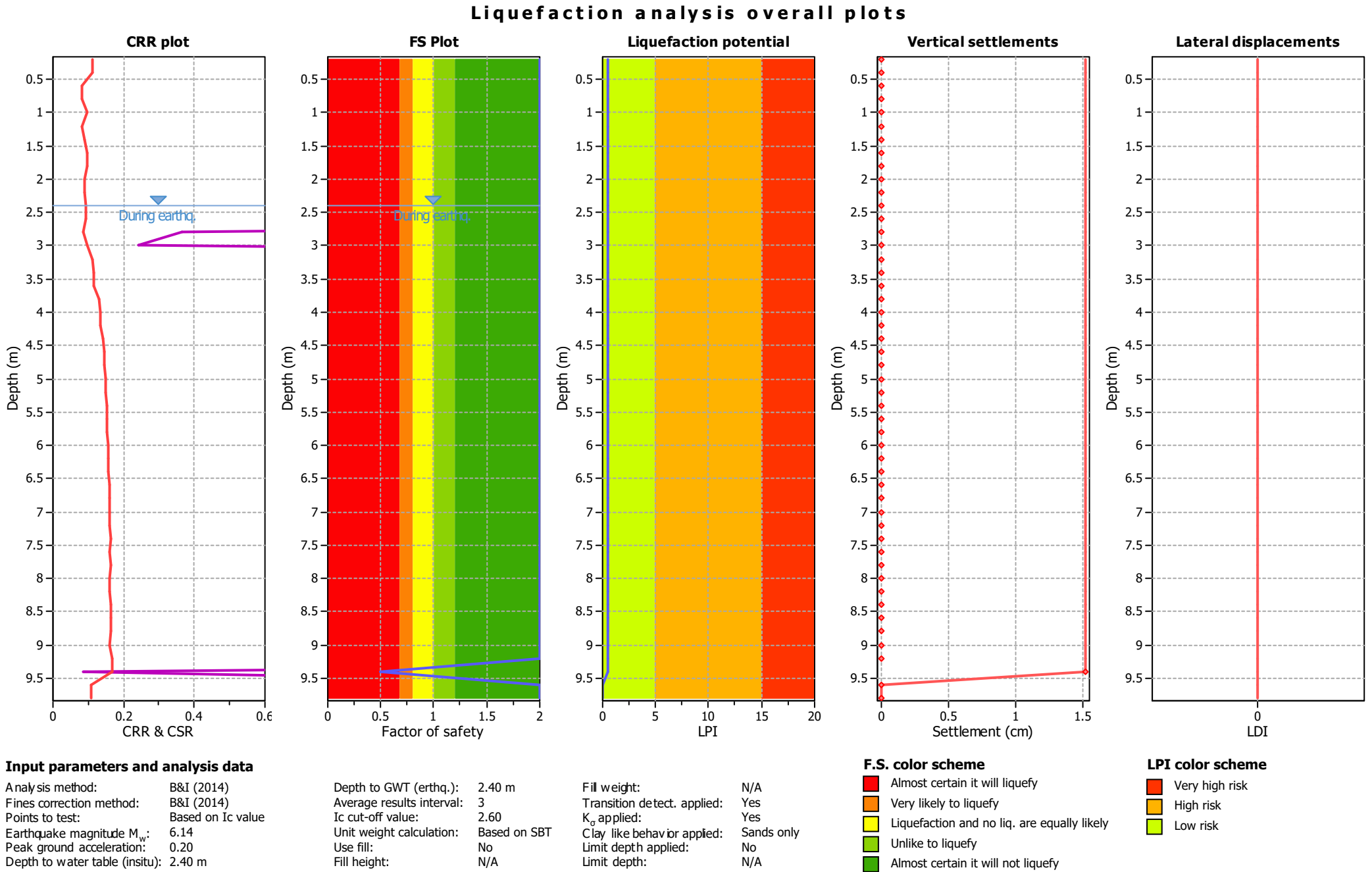
LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

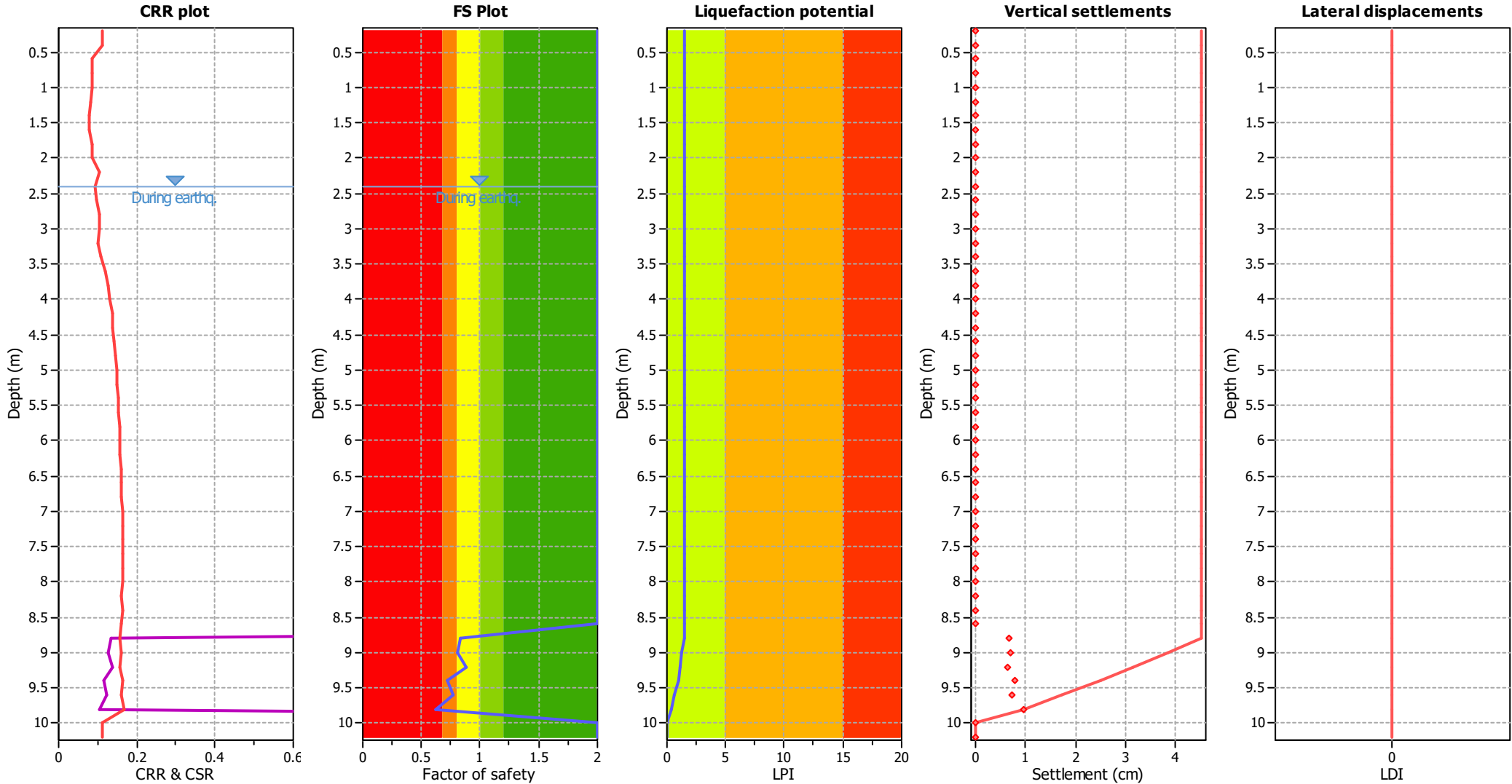








Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

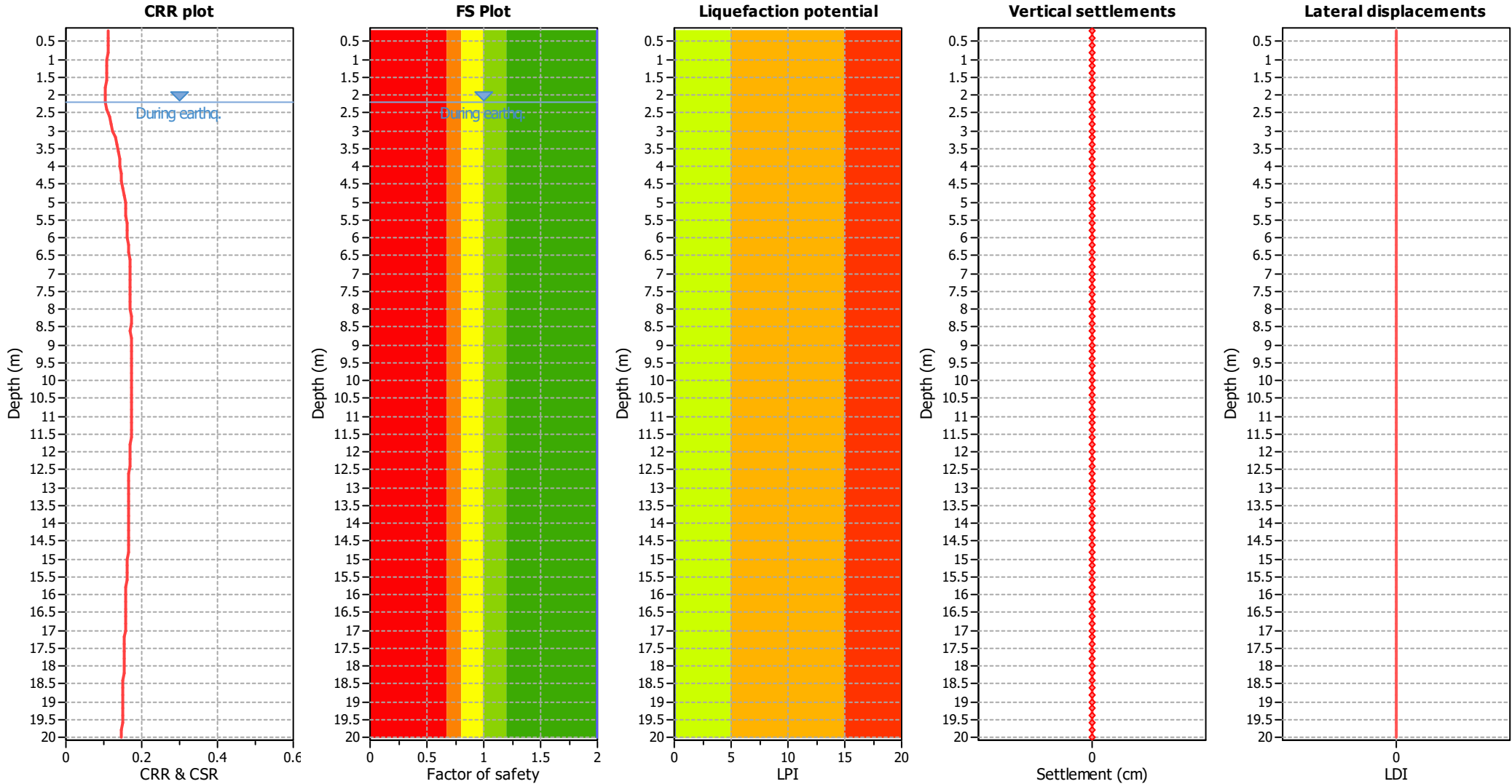
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

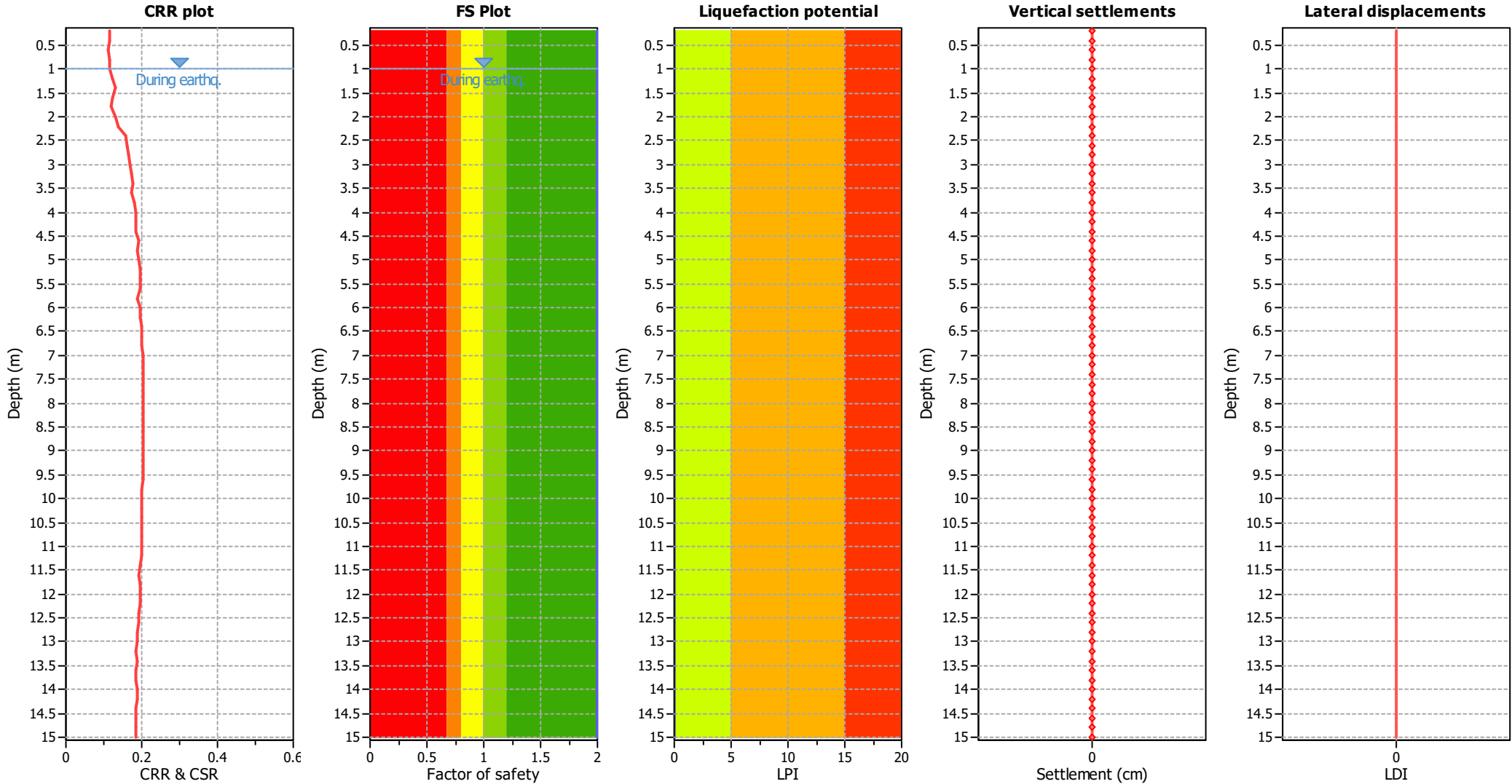
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

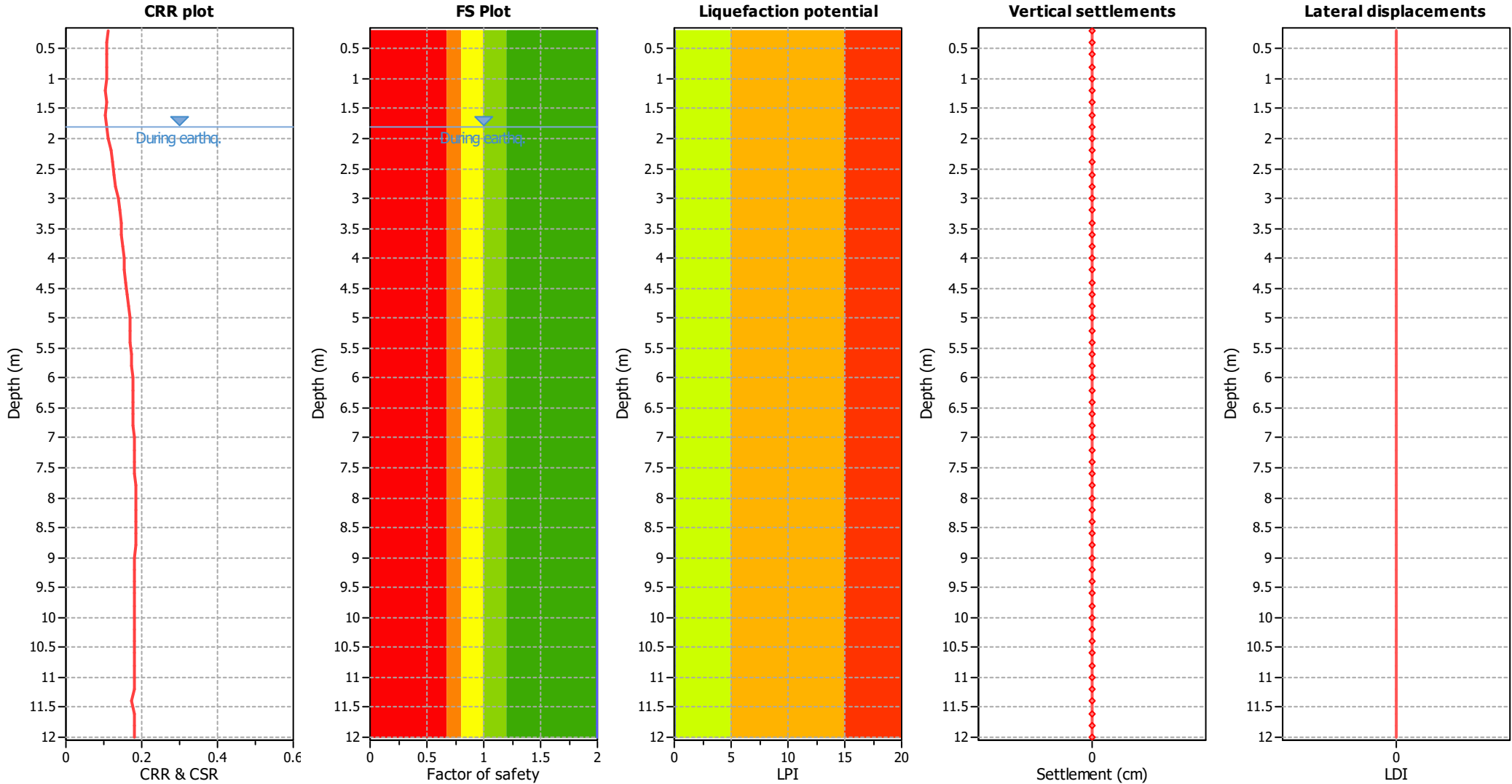
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

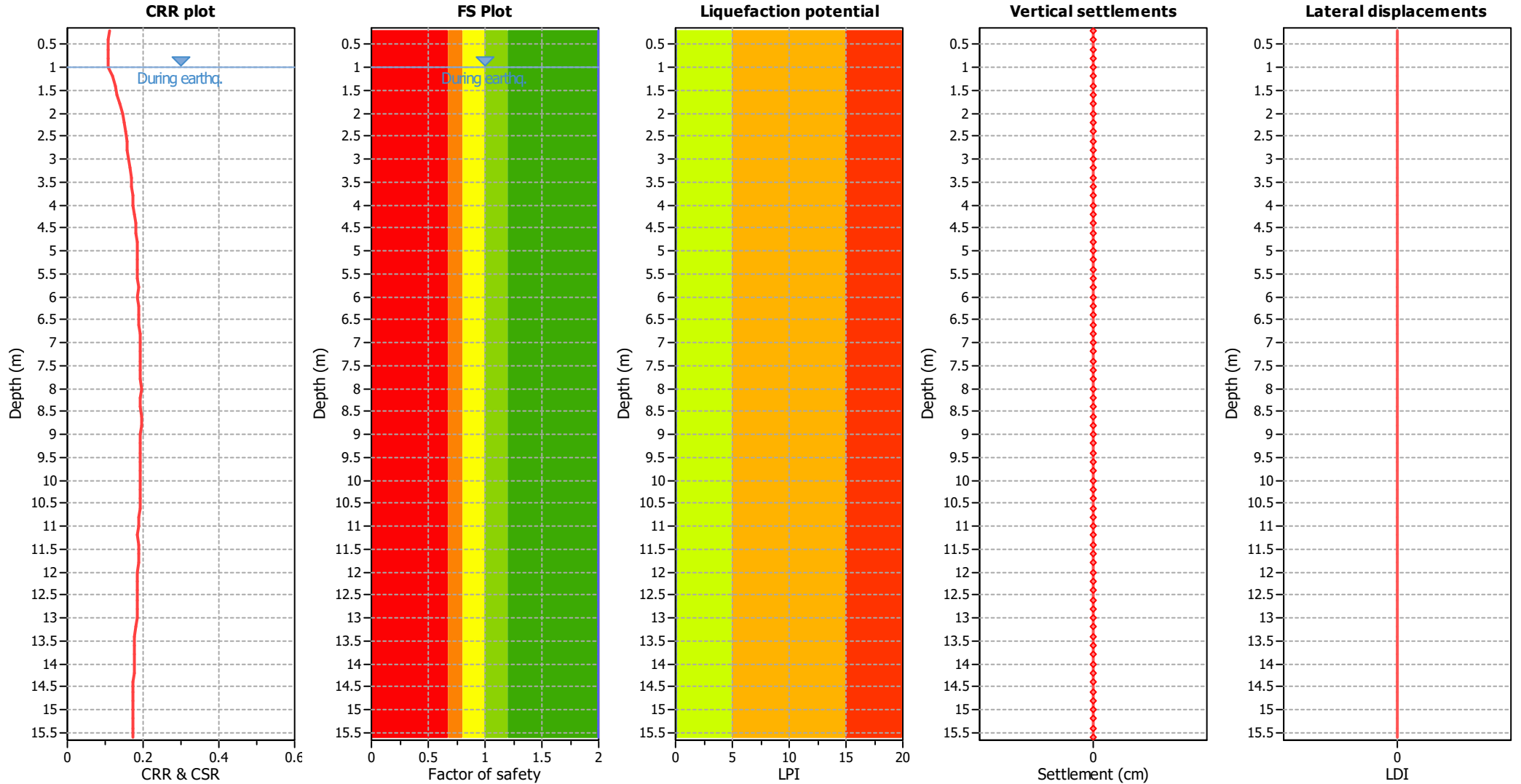
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

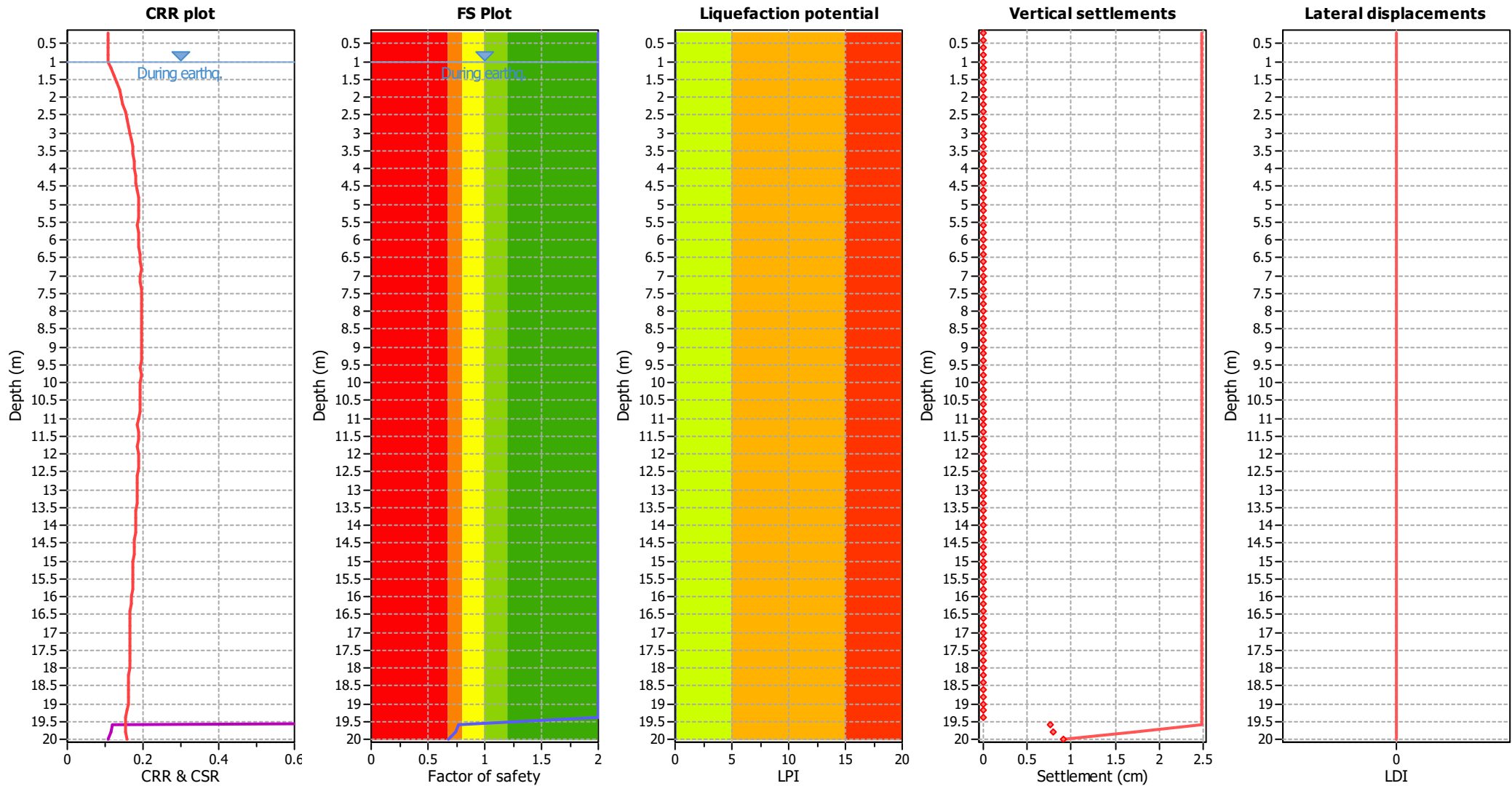
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

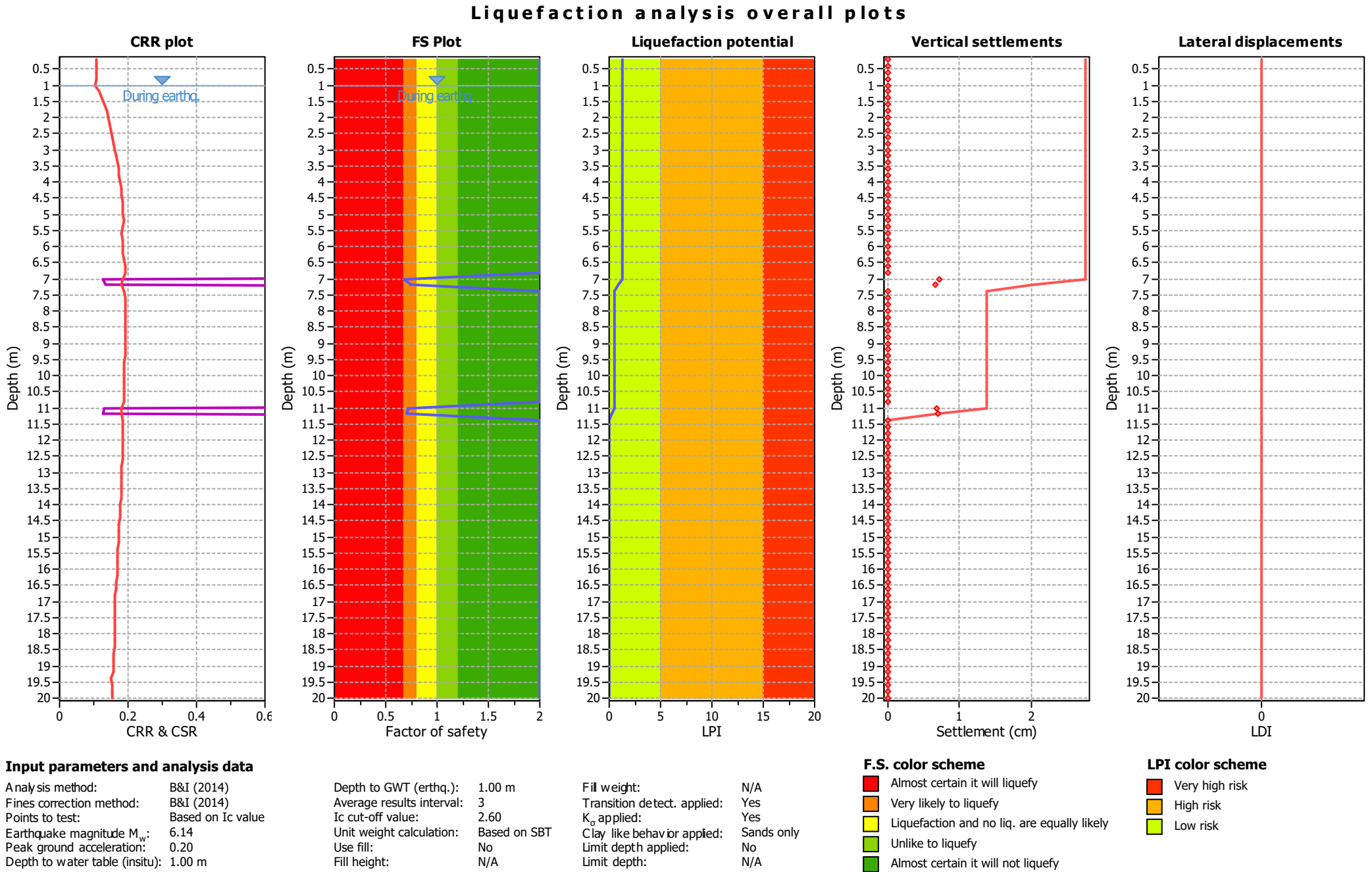
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

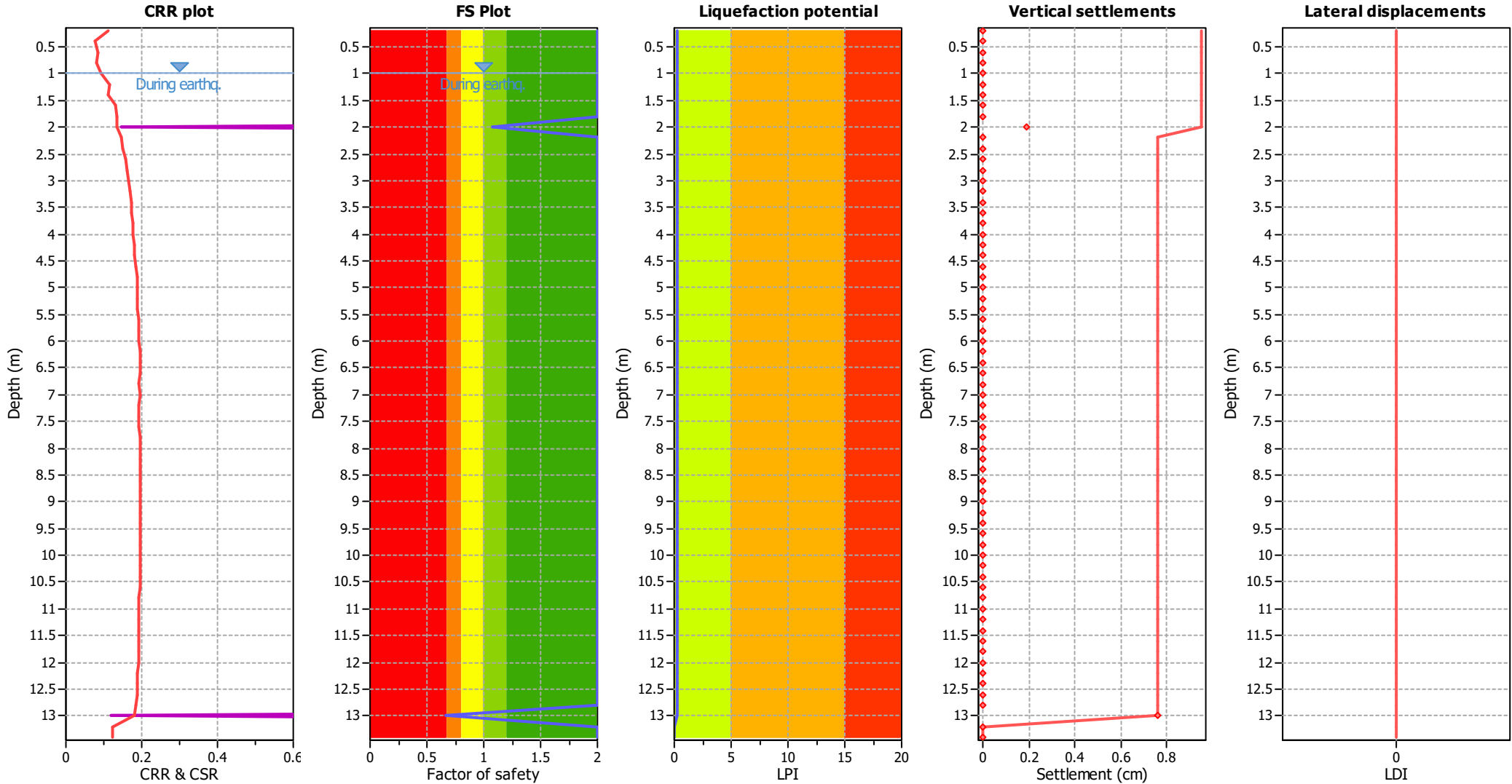
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

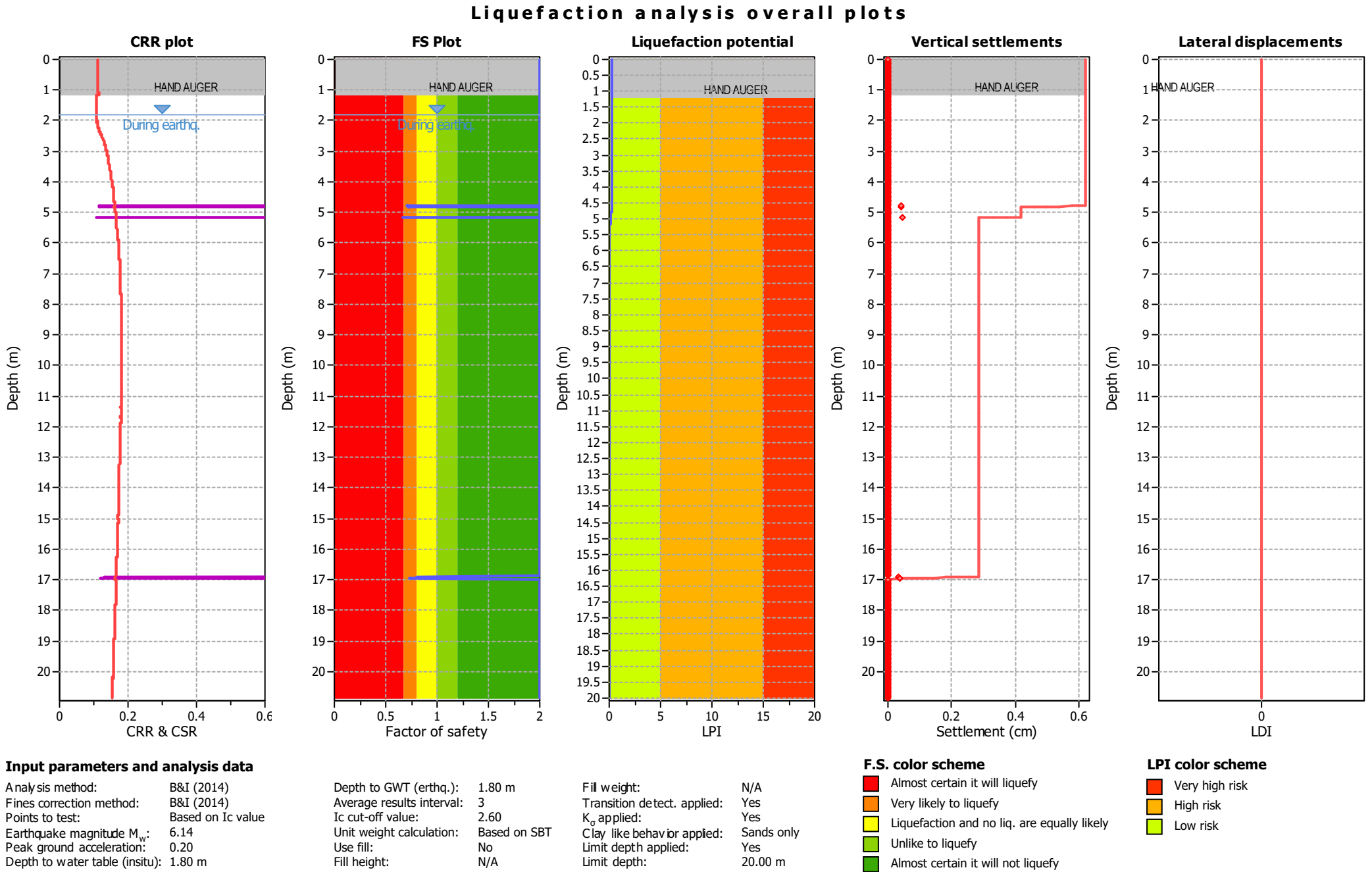
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

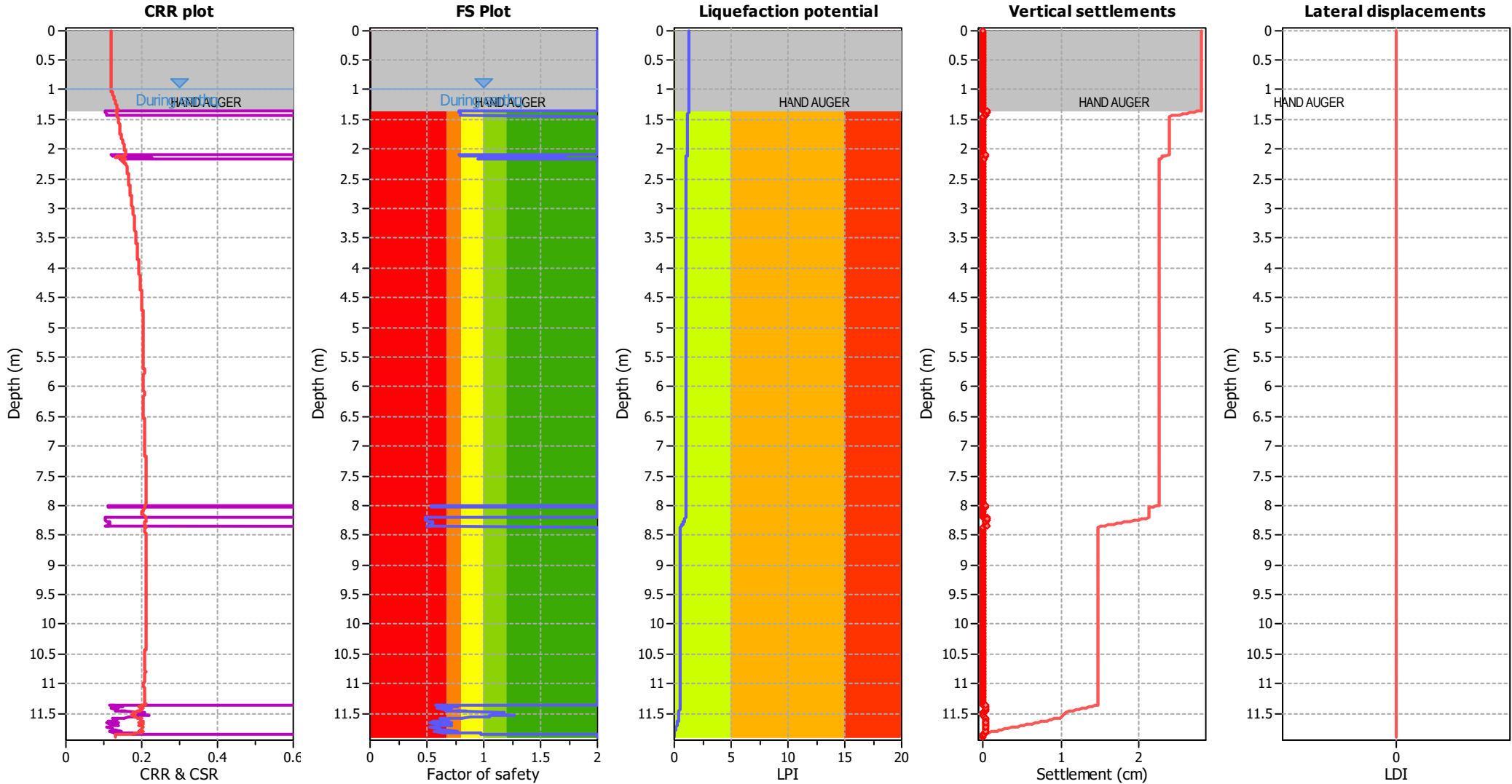
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light green	Unlike to liquefy
Dark green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

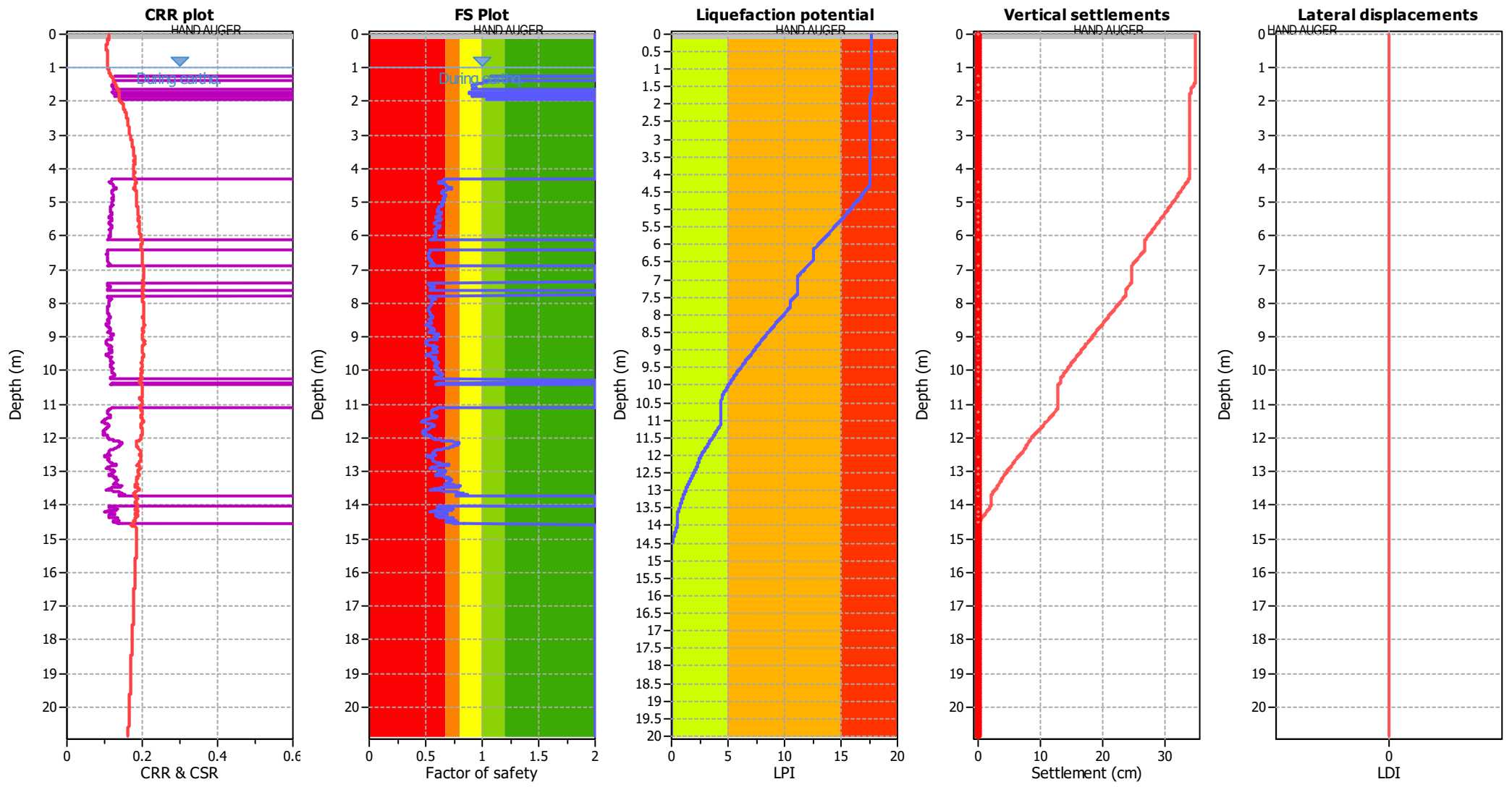
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

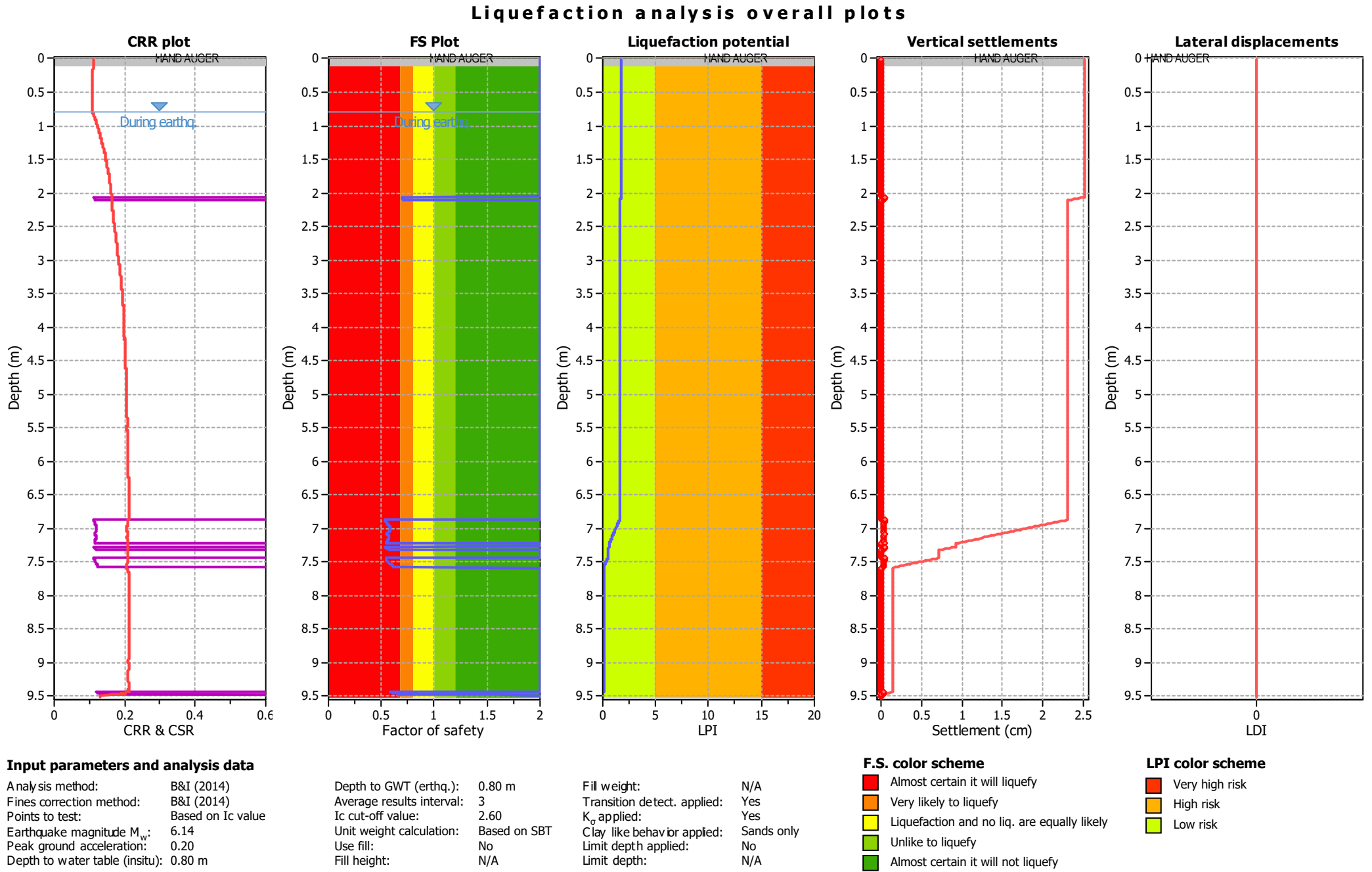
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _s applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

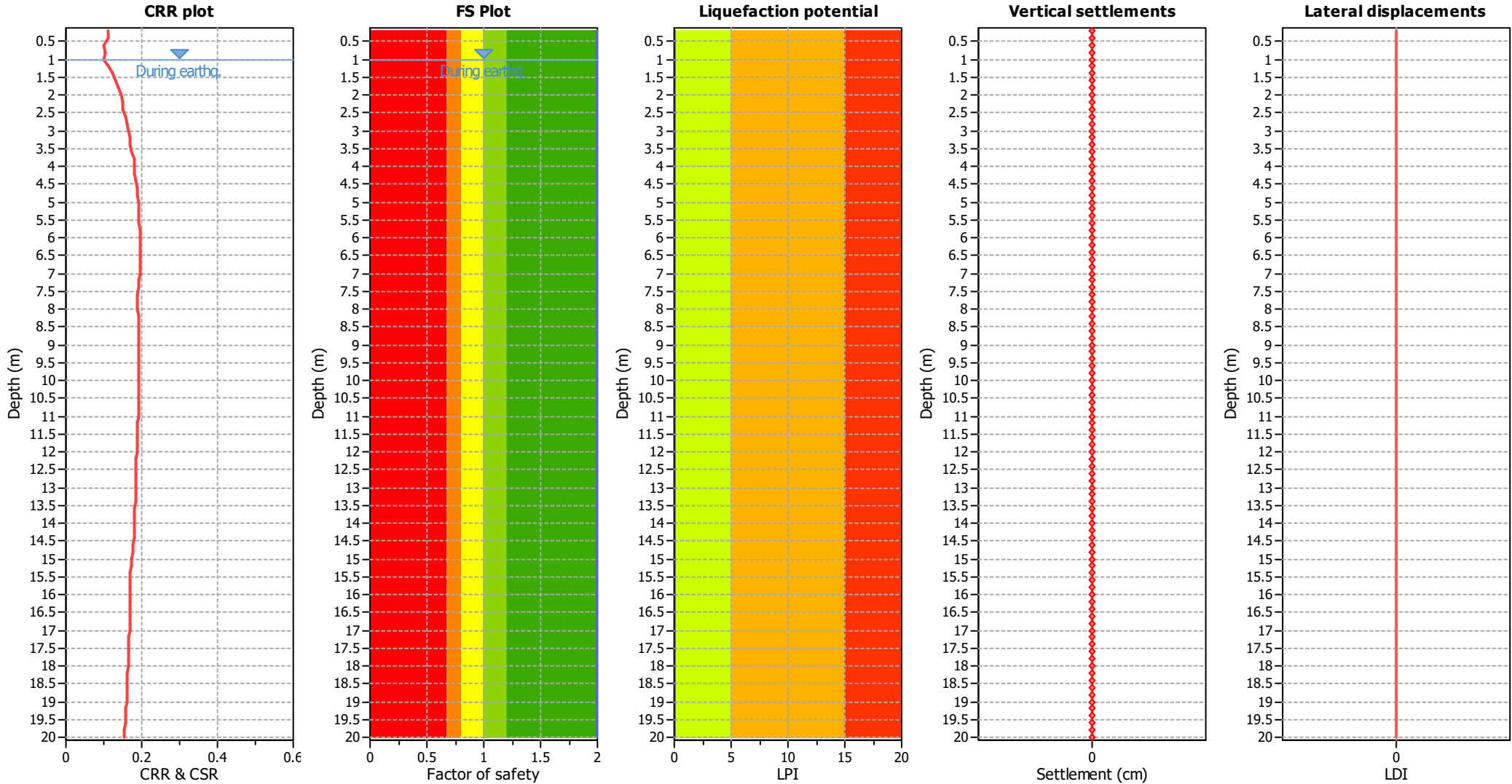
- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

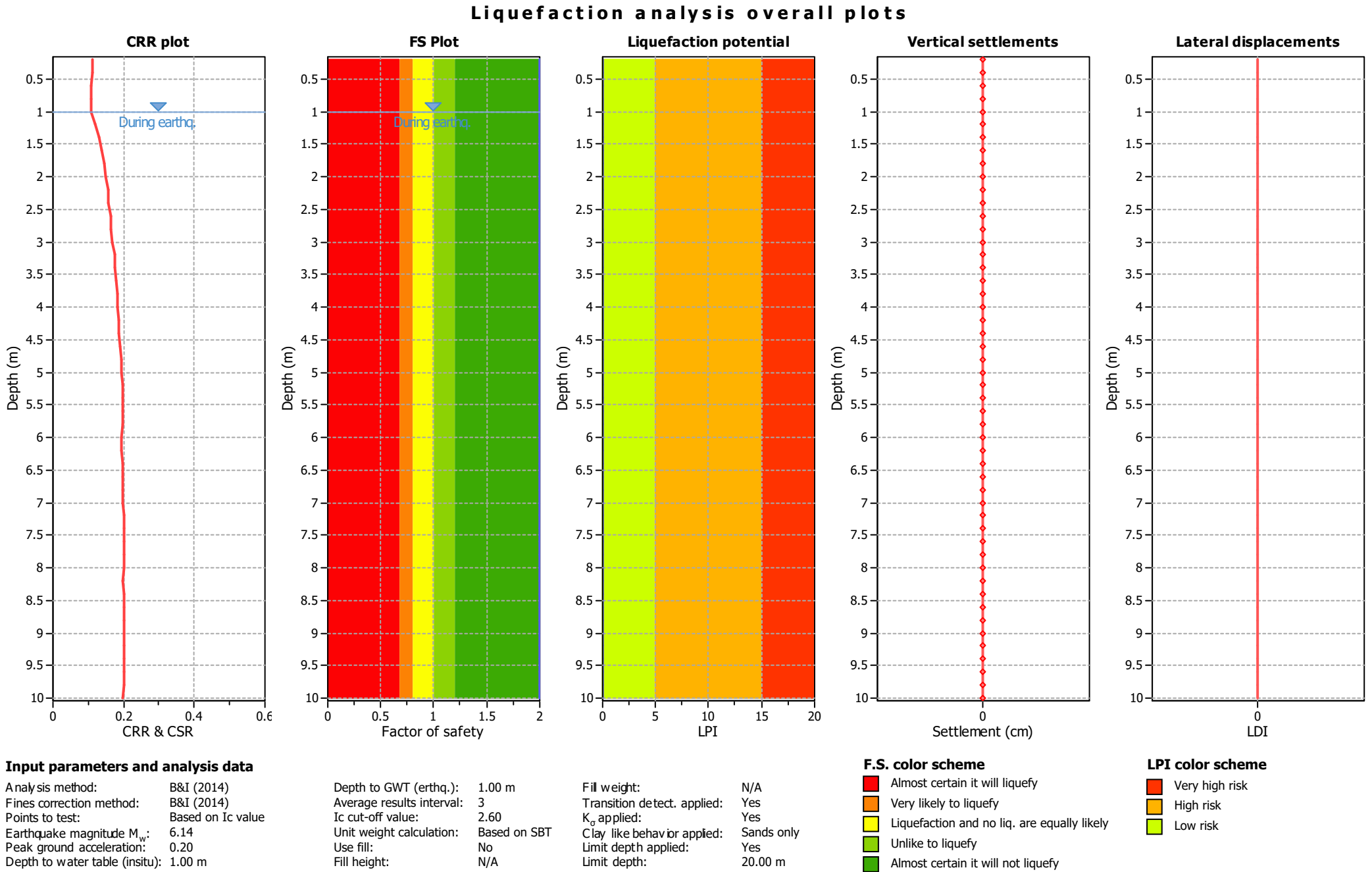
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

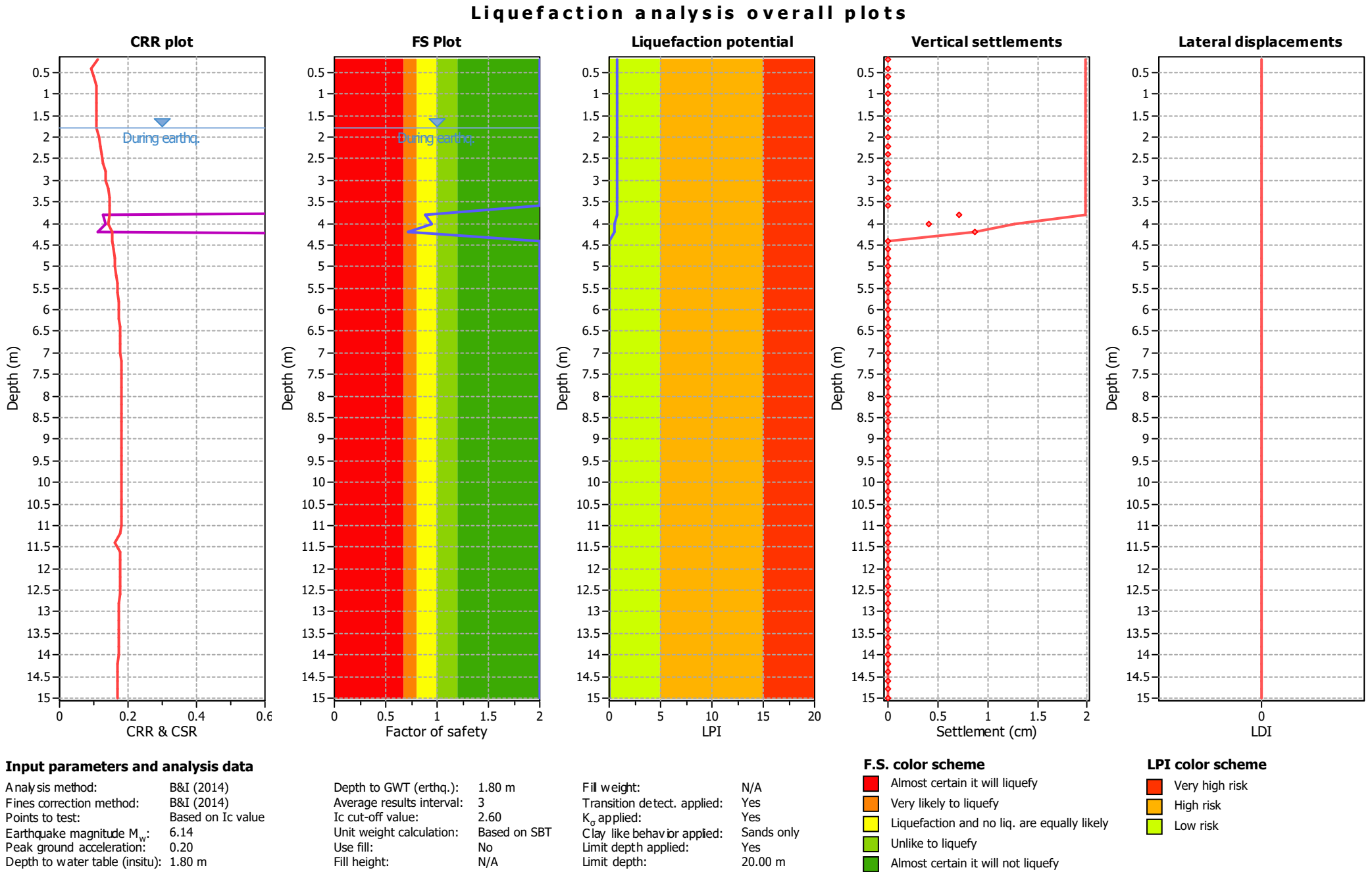
F.S. color scheme

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

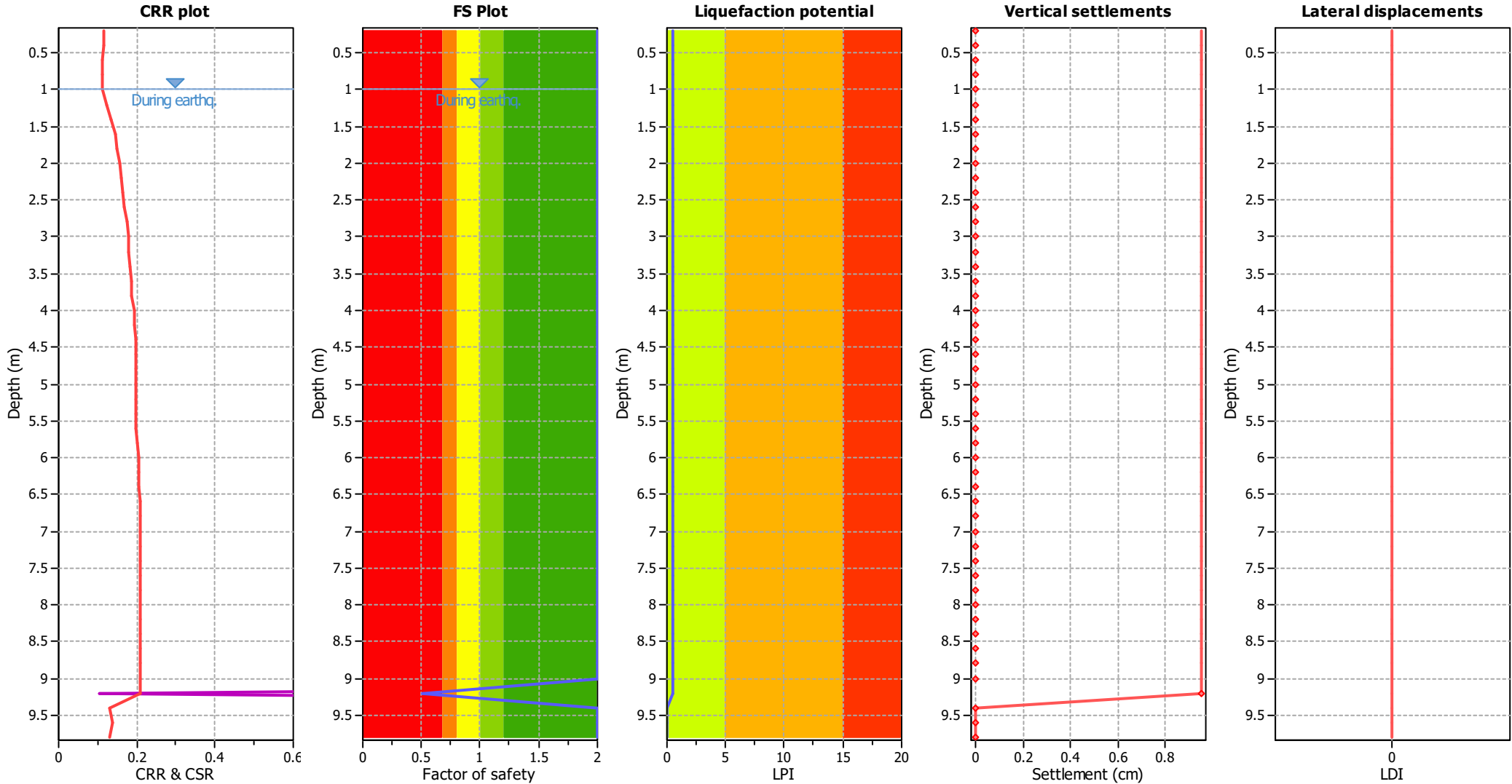
LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk





Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

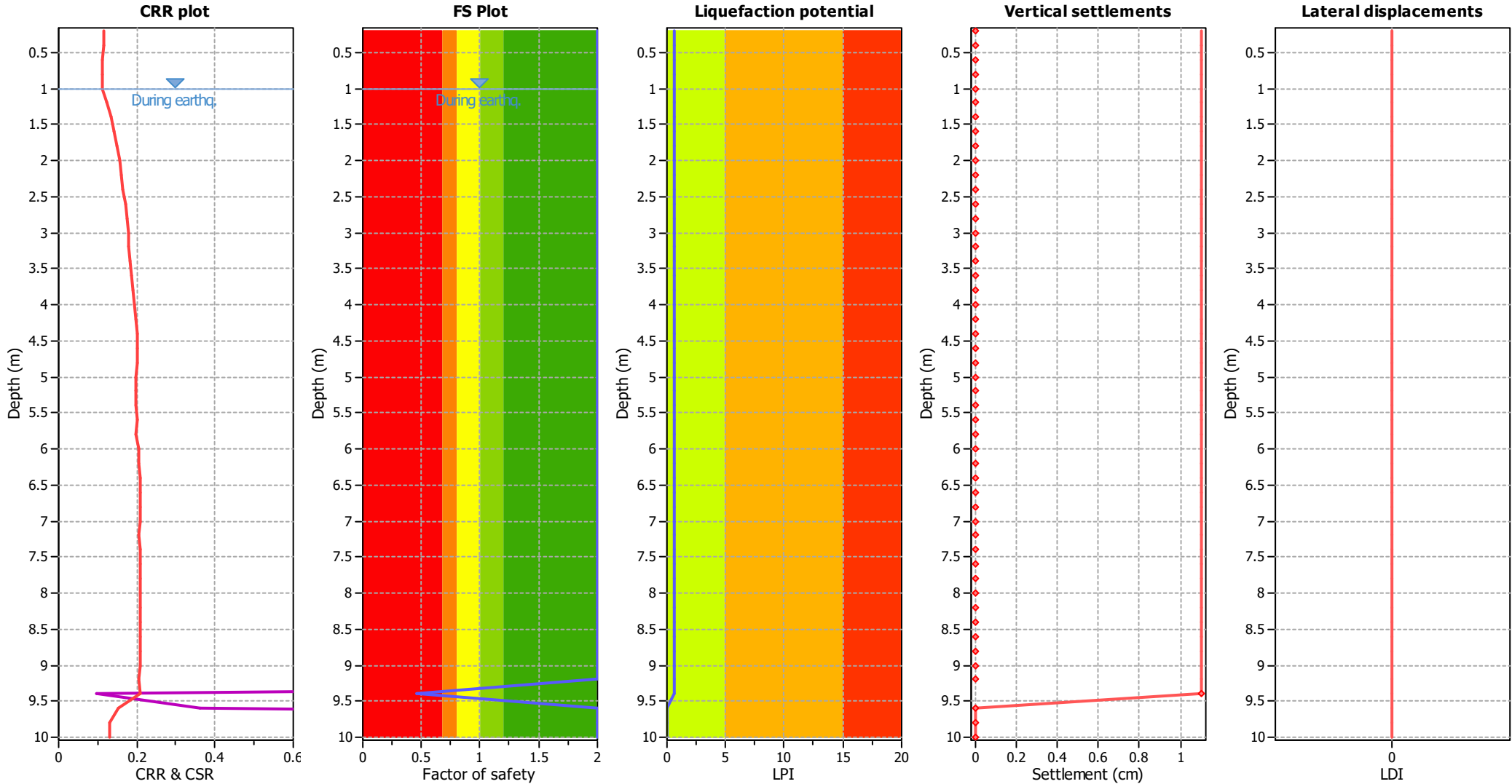
F.S. color scheme

- 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)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

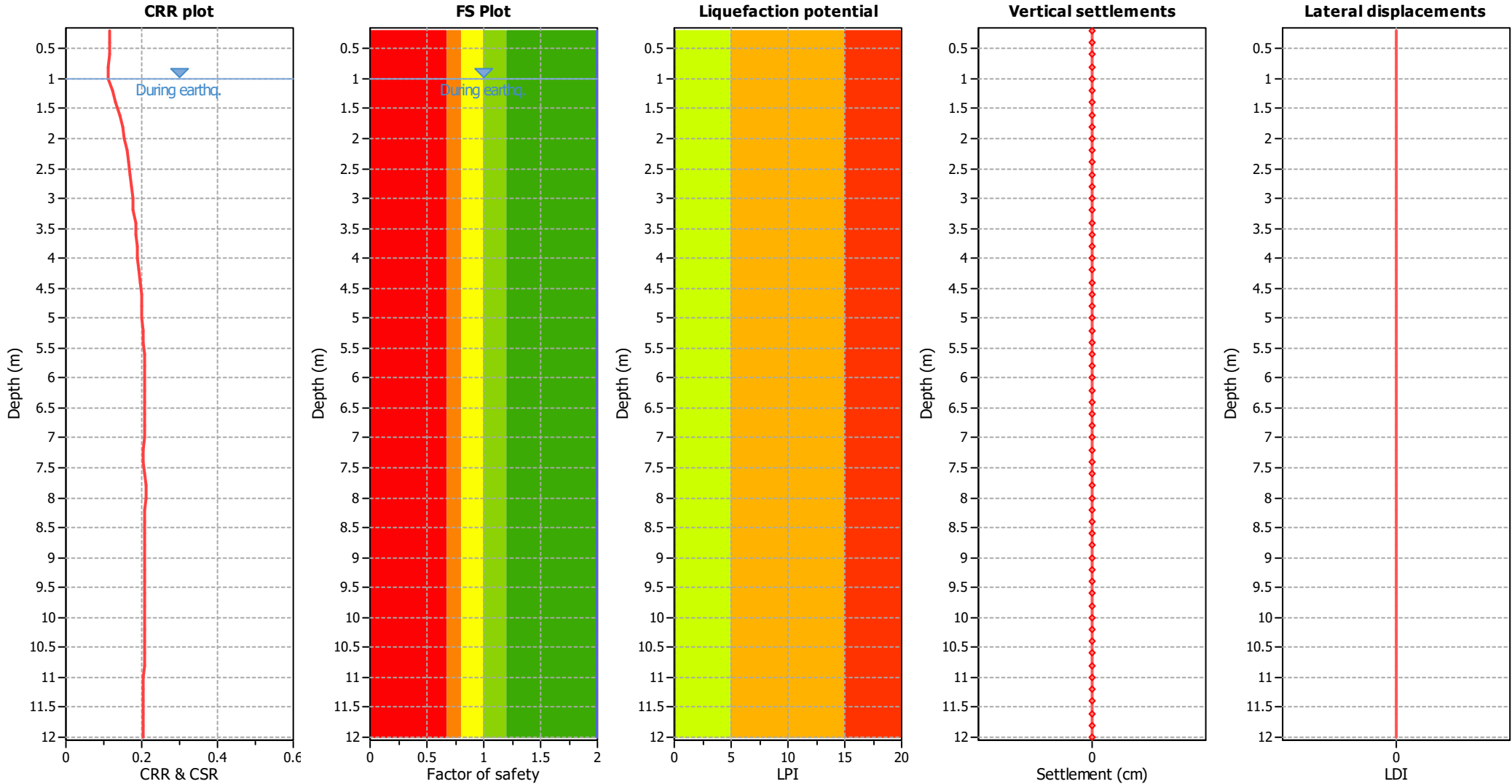
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

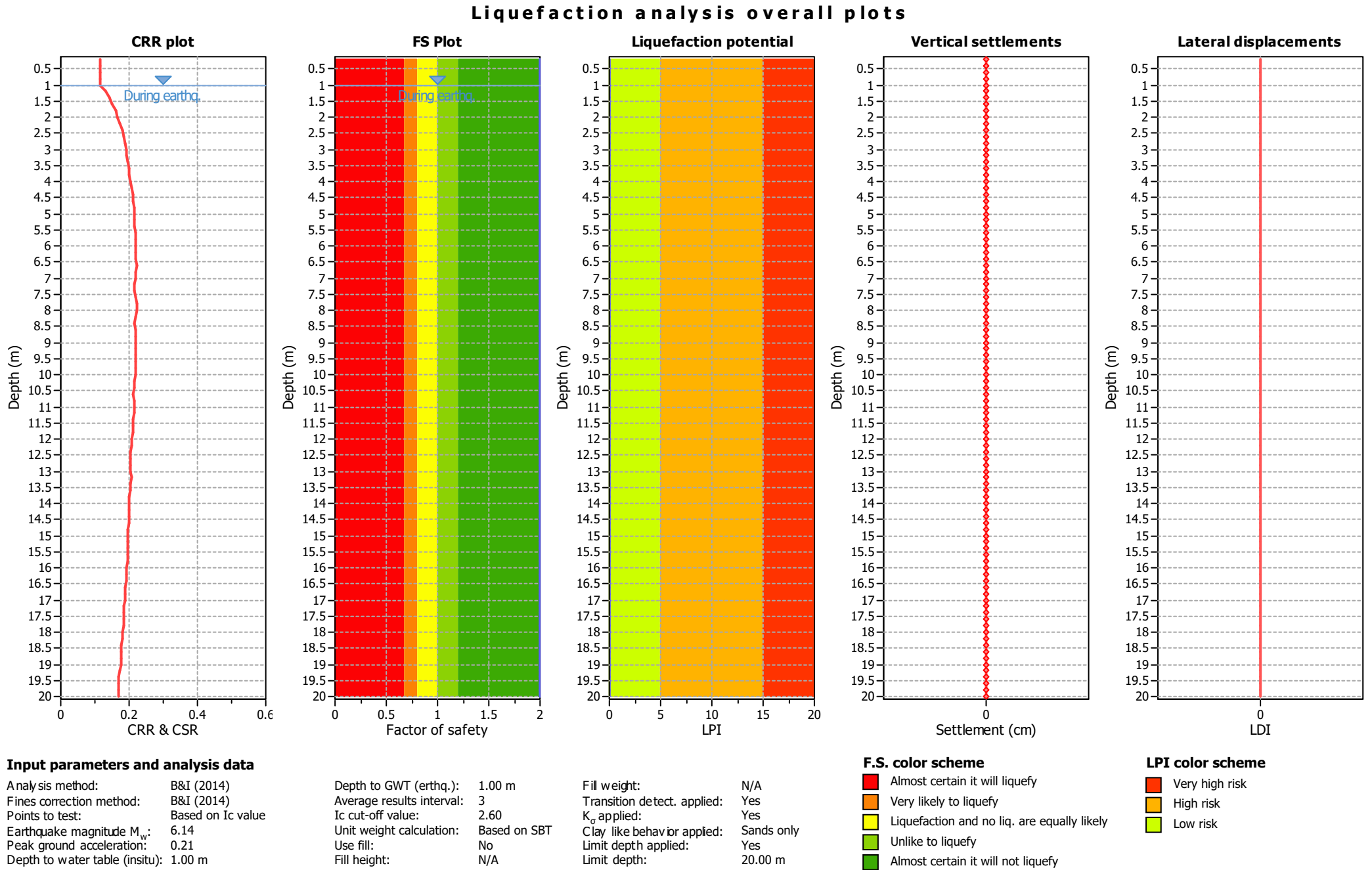
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

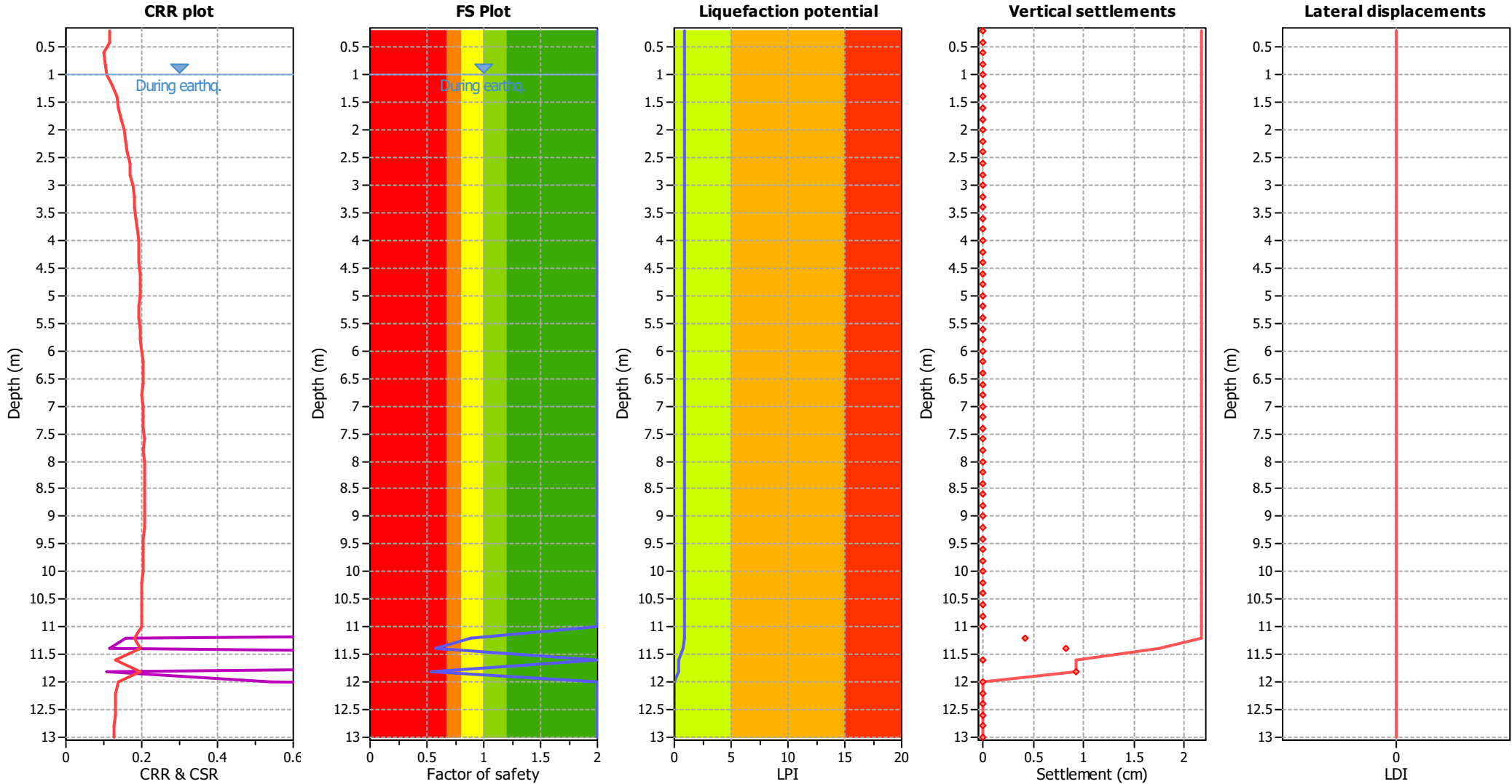
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

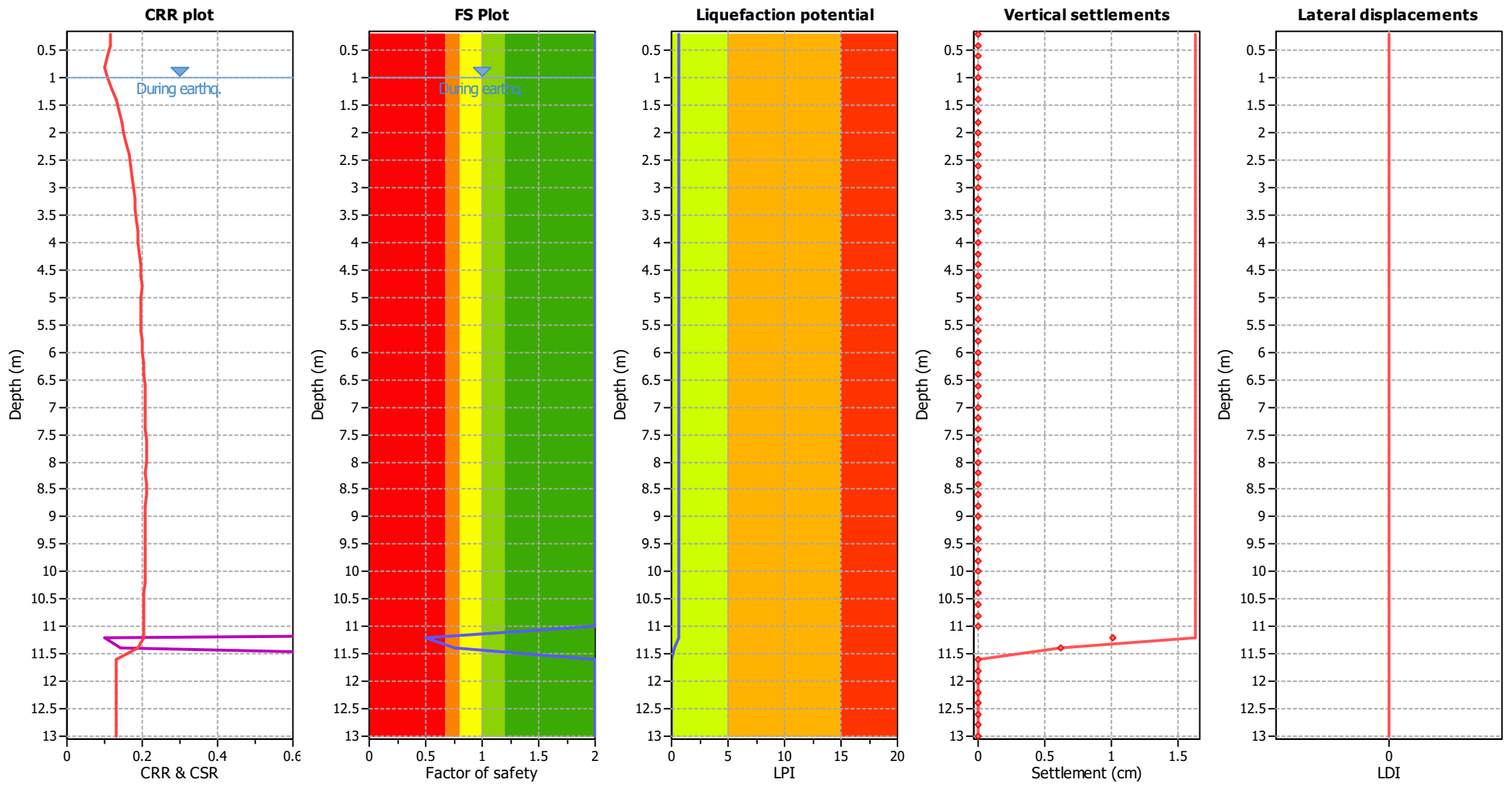
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

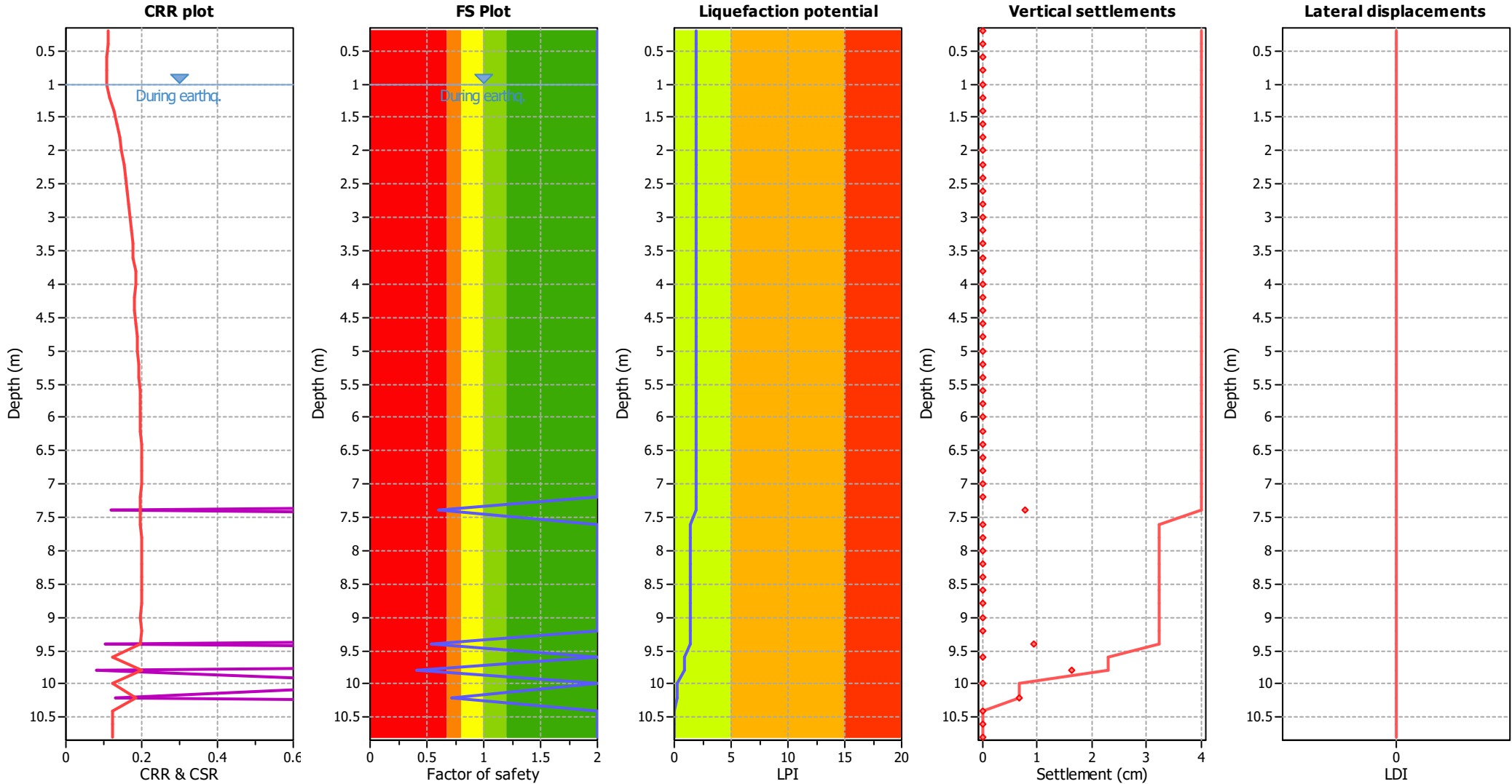
F.S. color scheme

- 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)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

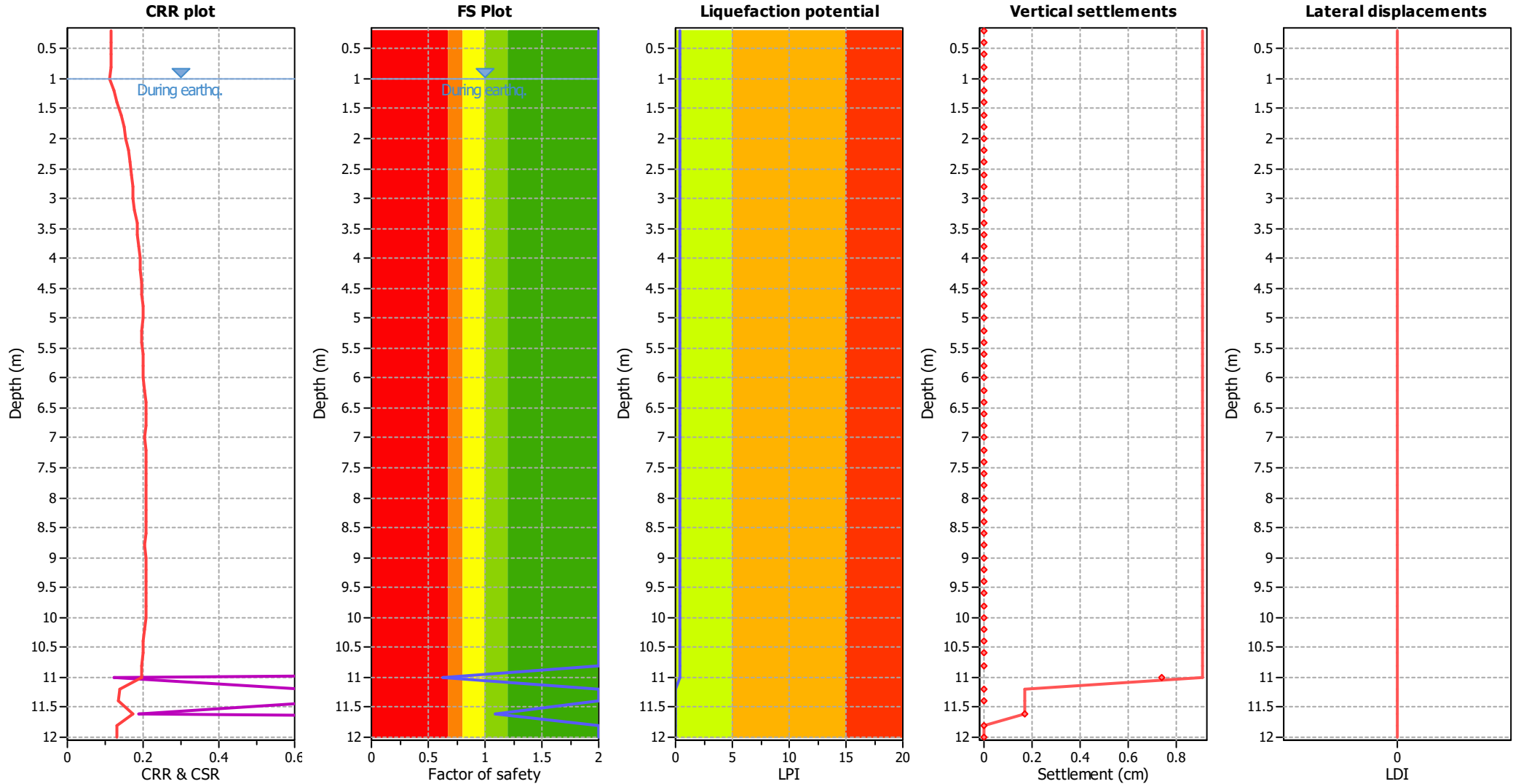
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

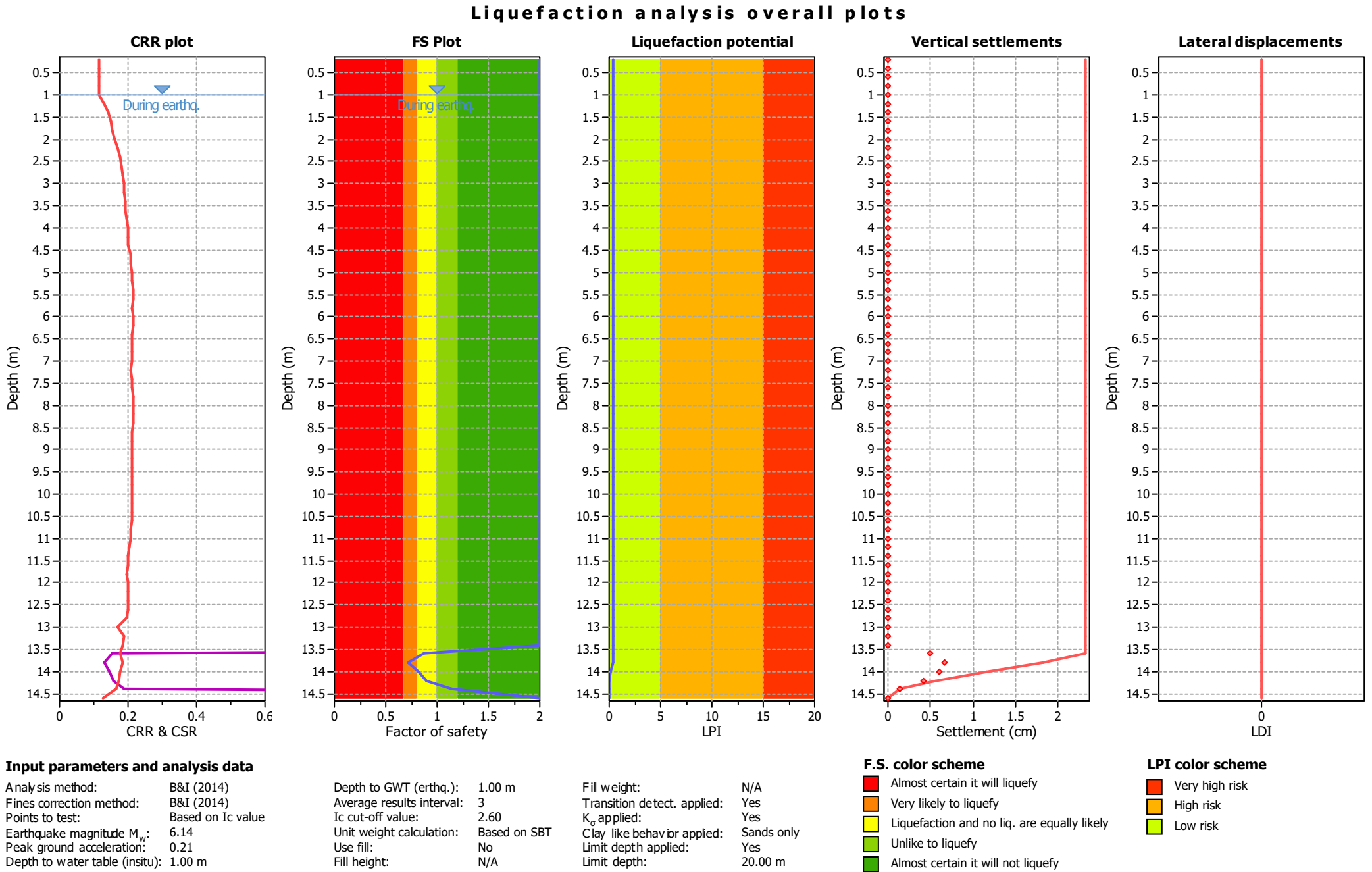
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

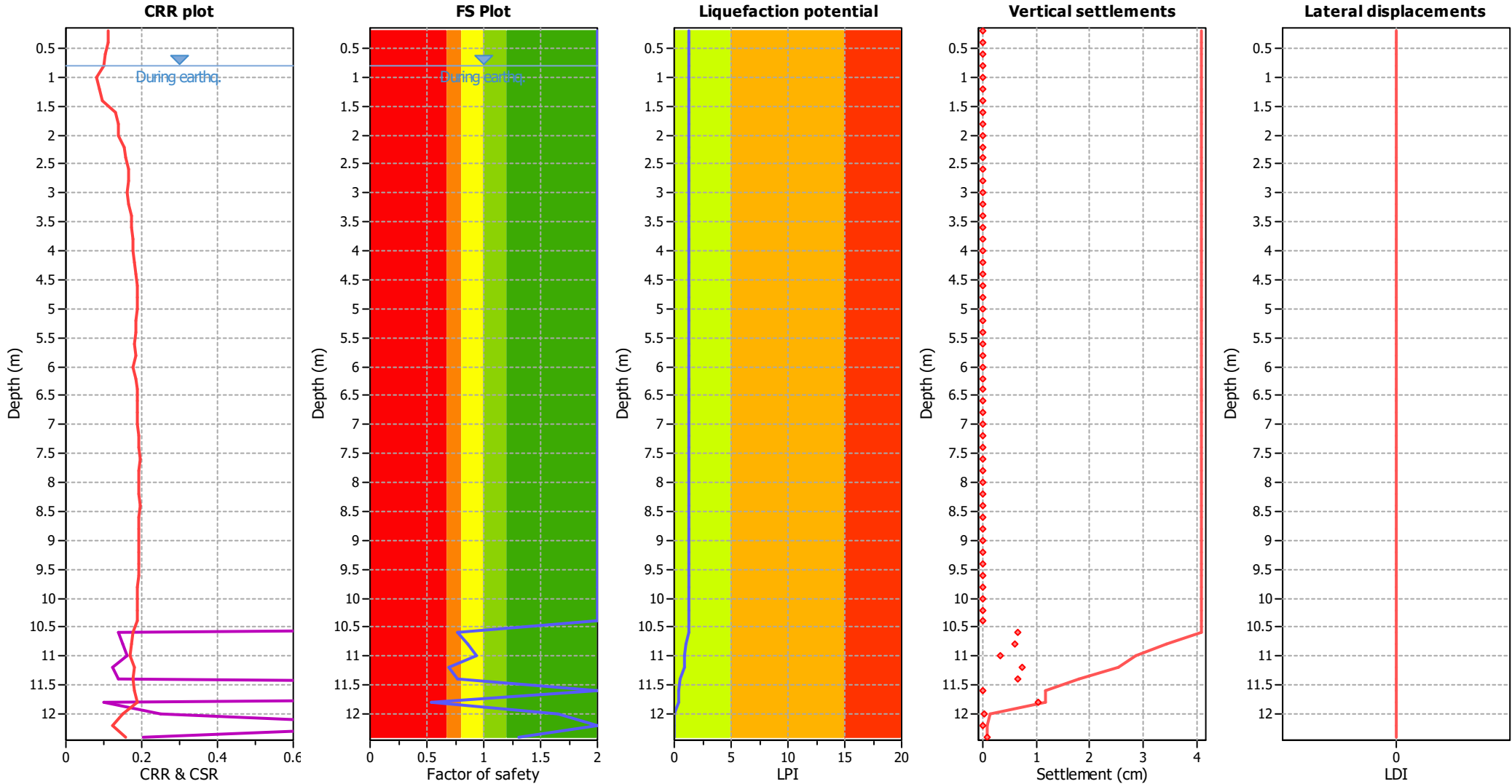
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

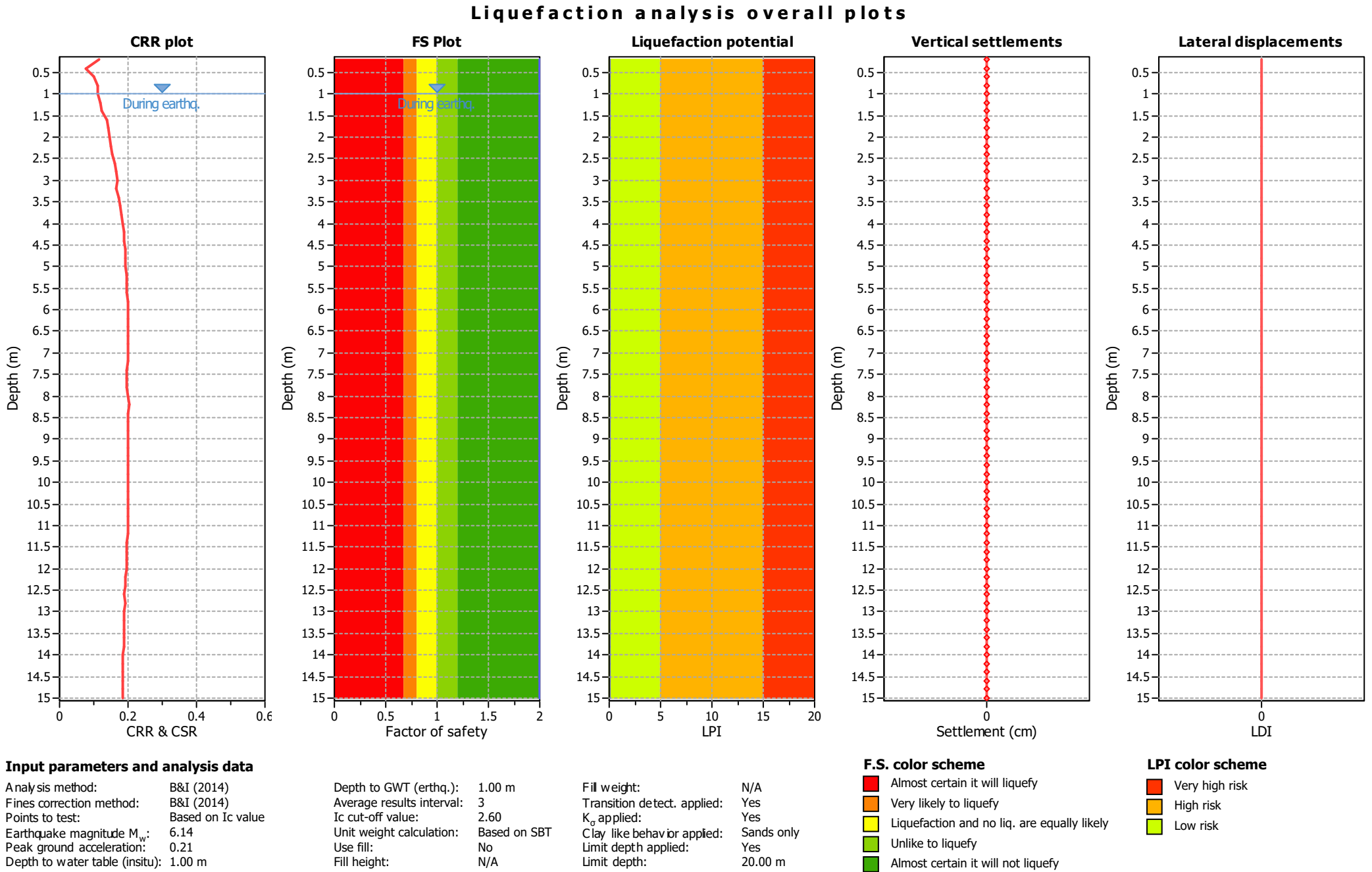
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

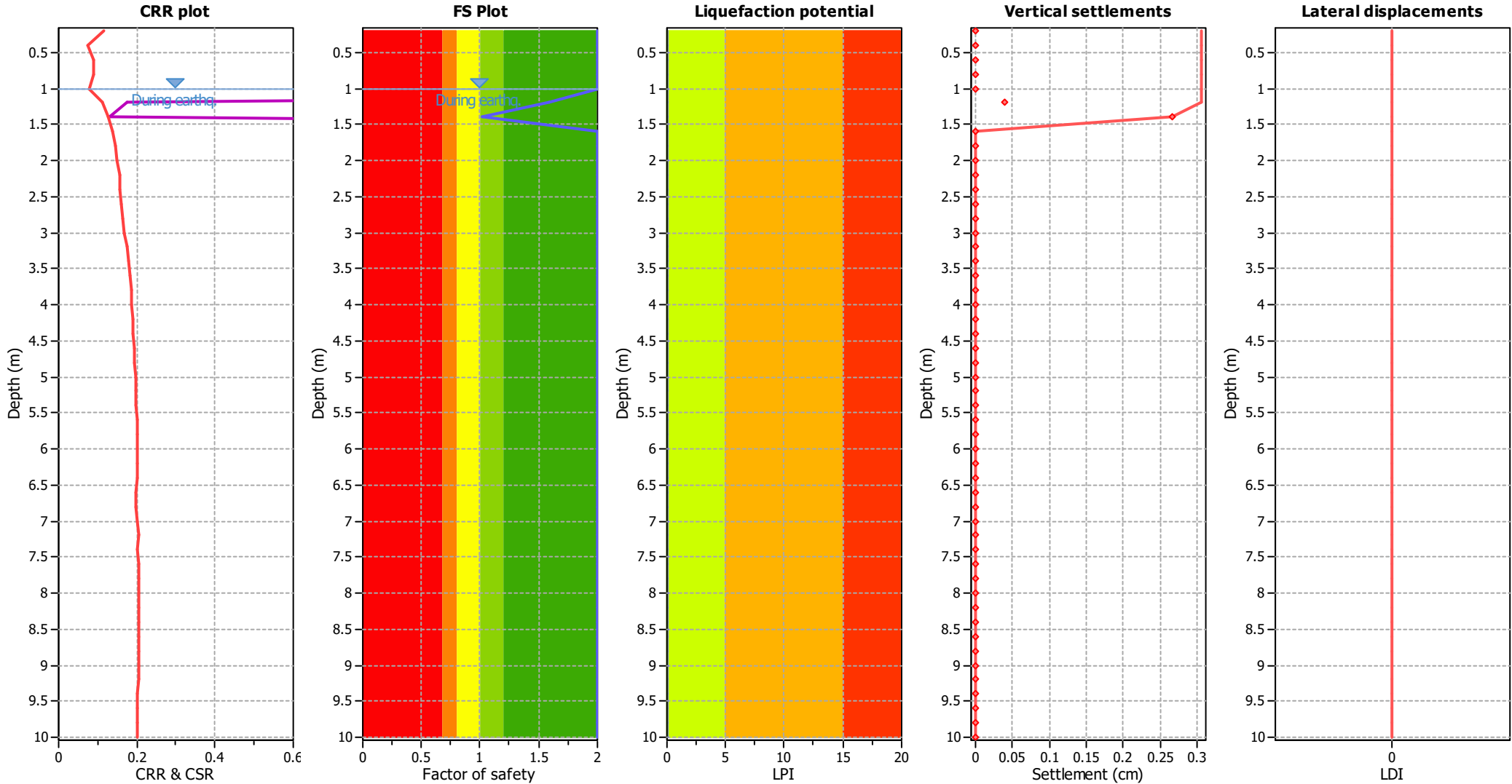
Almost certain it will liquefy
Very likely to liquefy
Liquefaction and no liq. are equally likely
Unlike to liquefy
Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

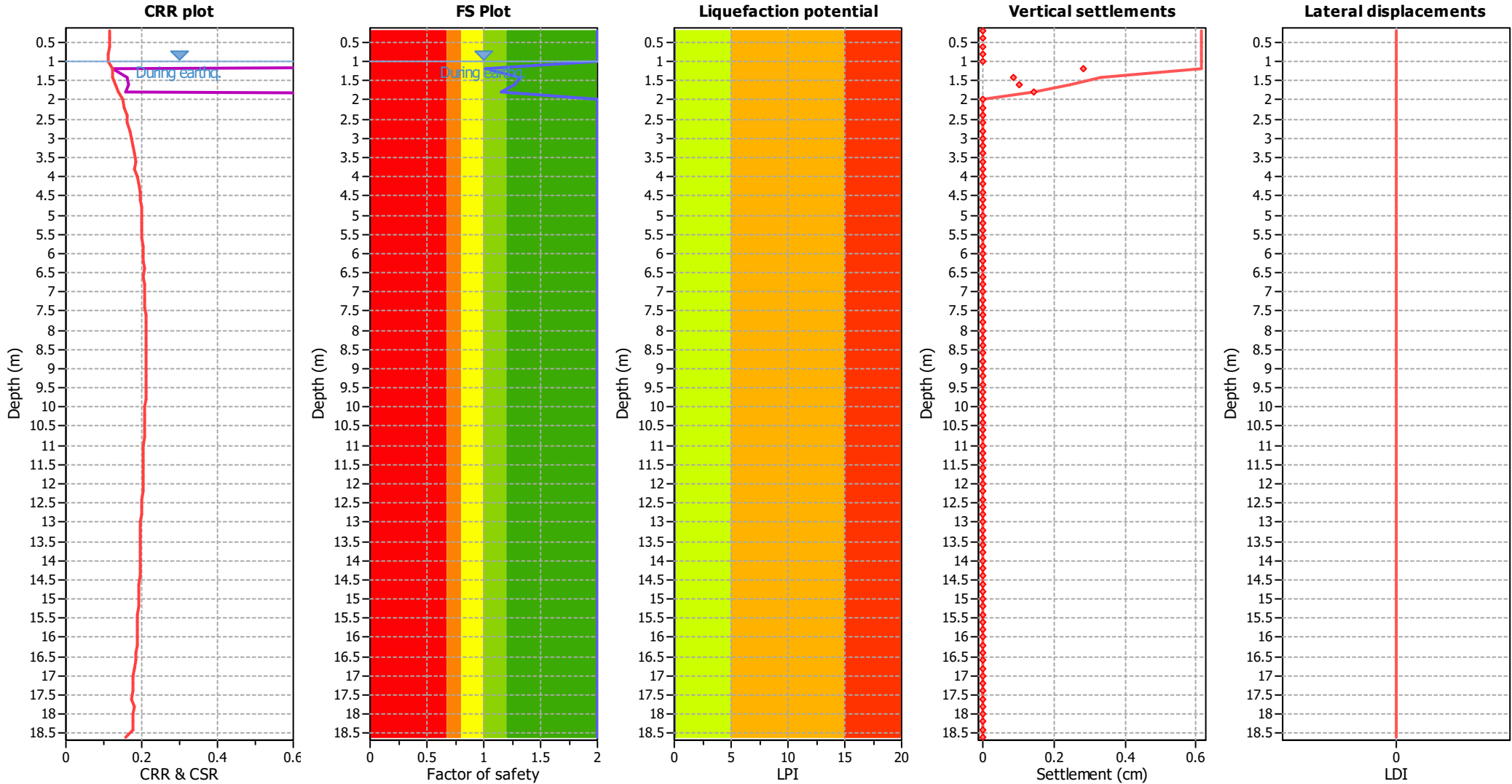
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

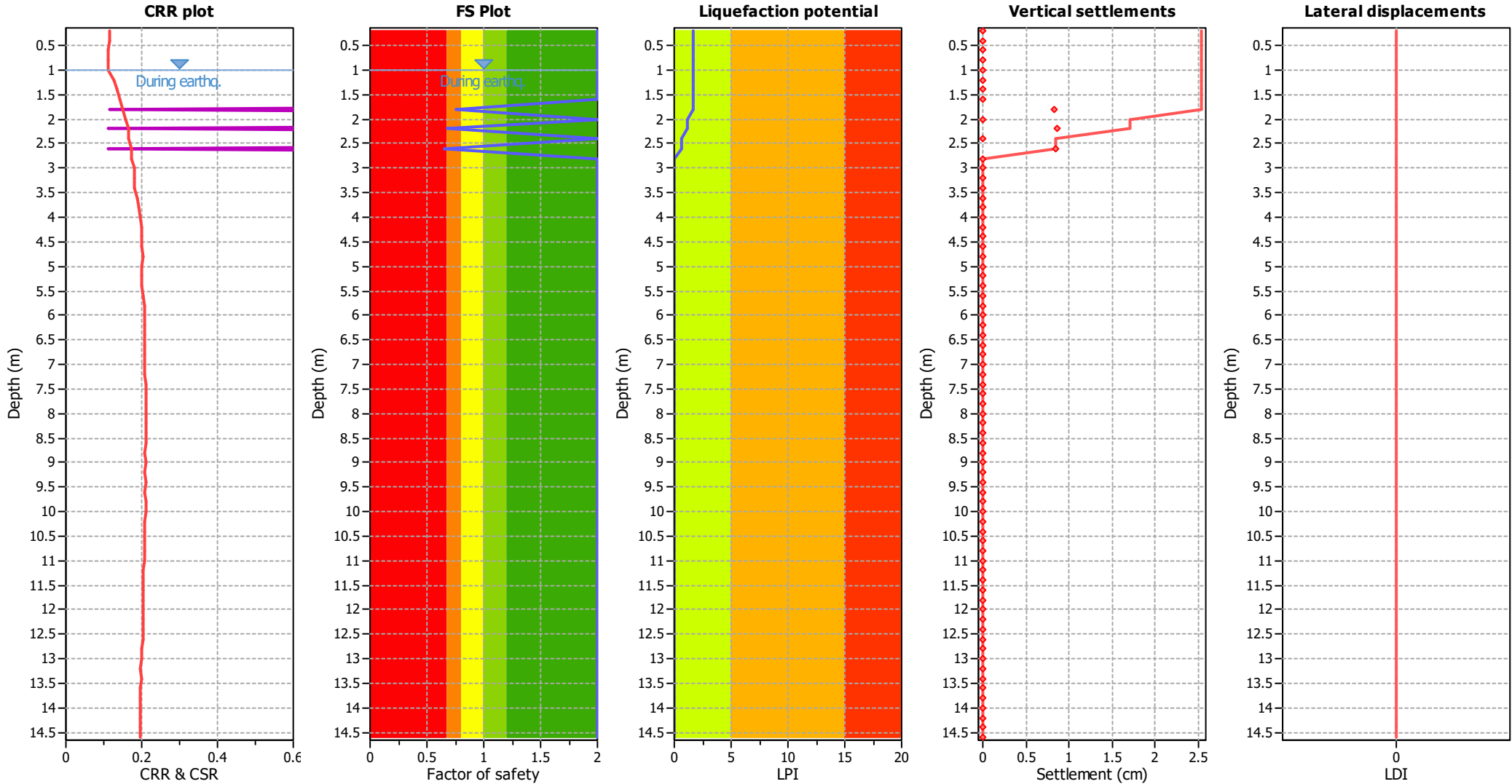
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

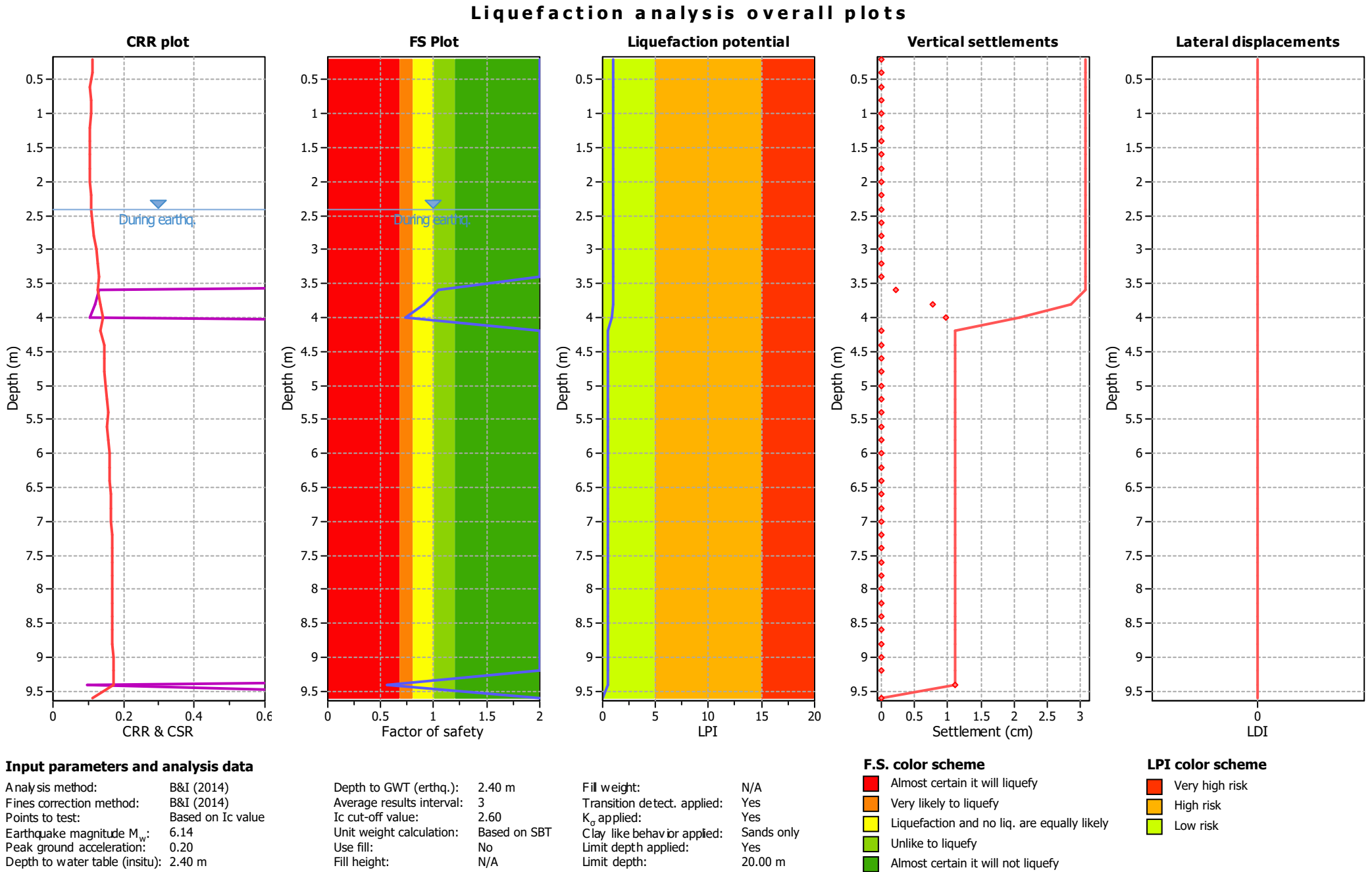
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

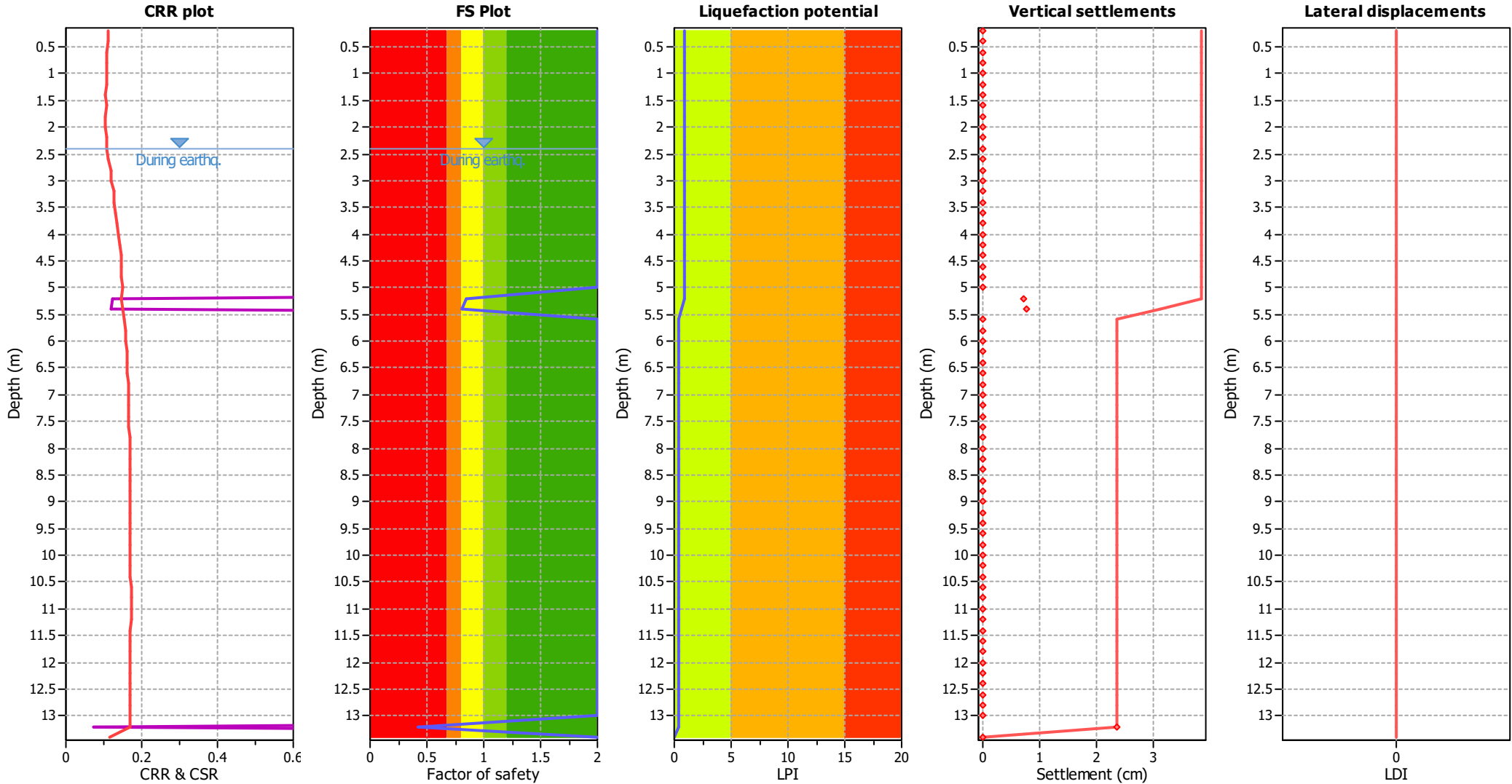
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

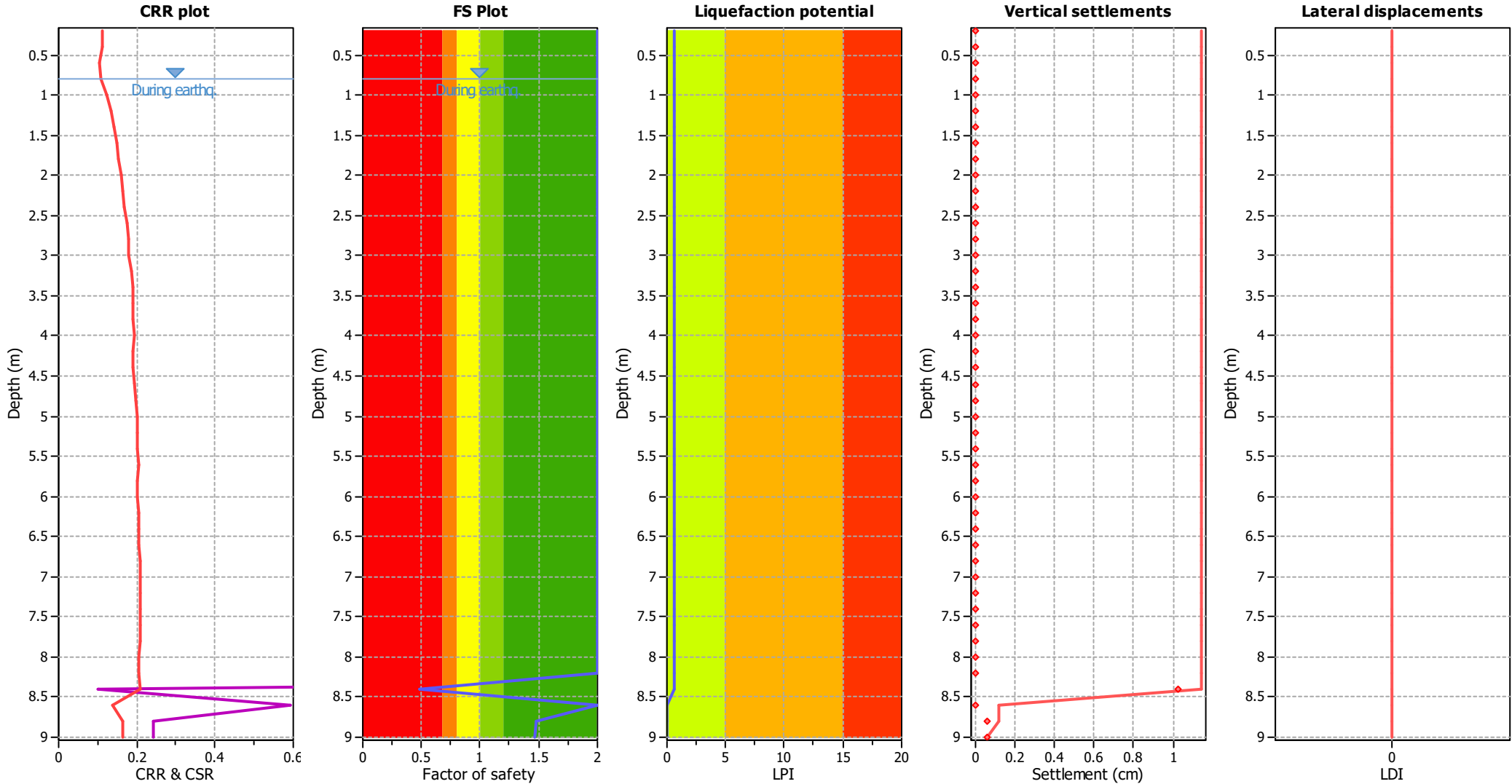
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

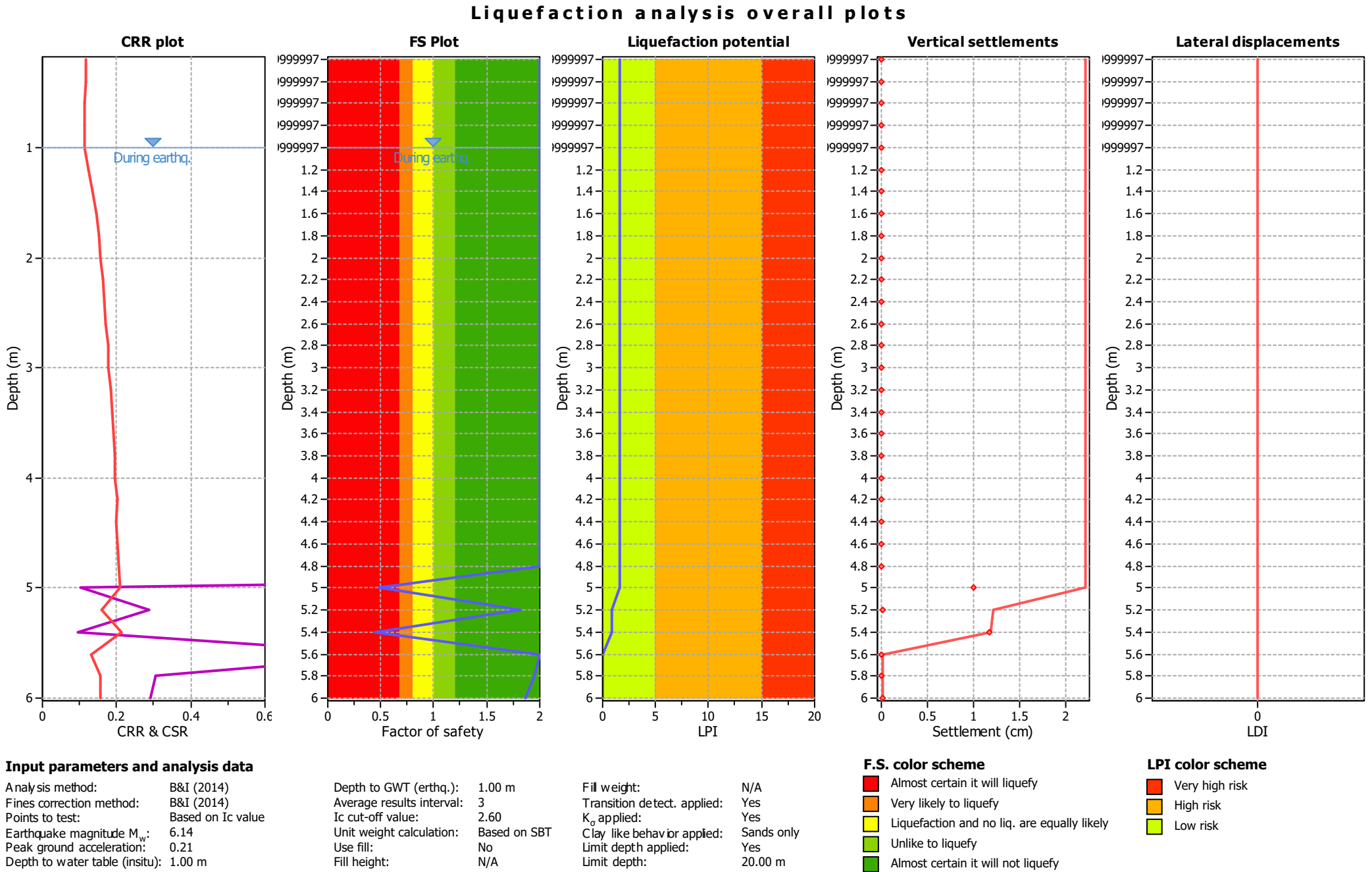
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

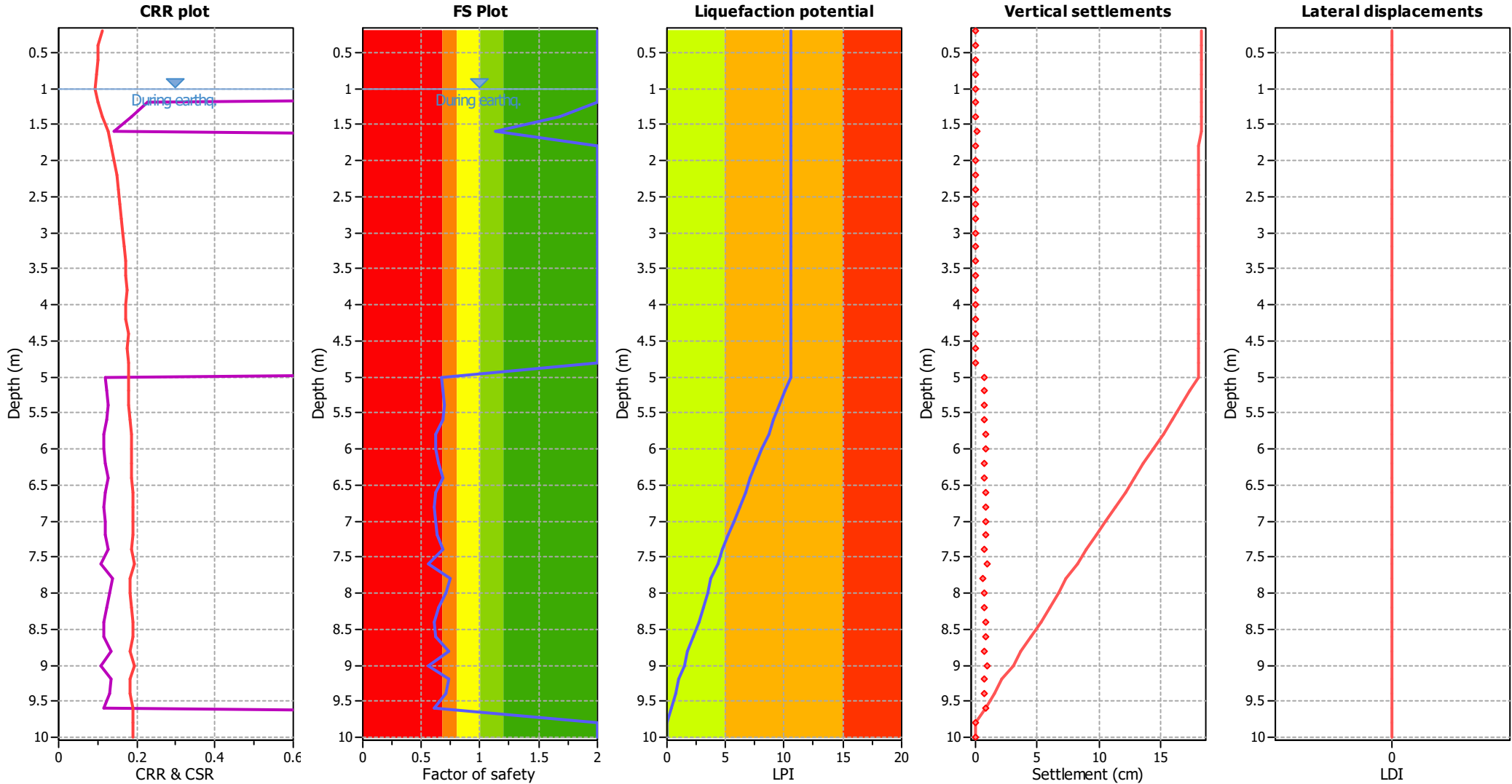
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

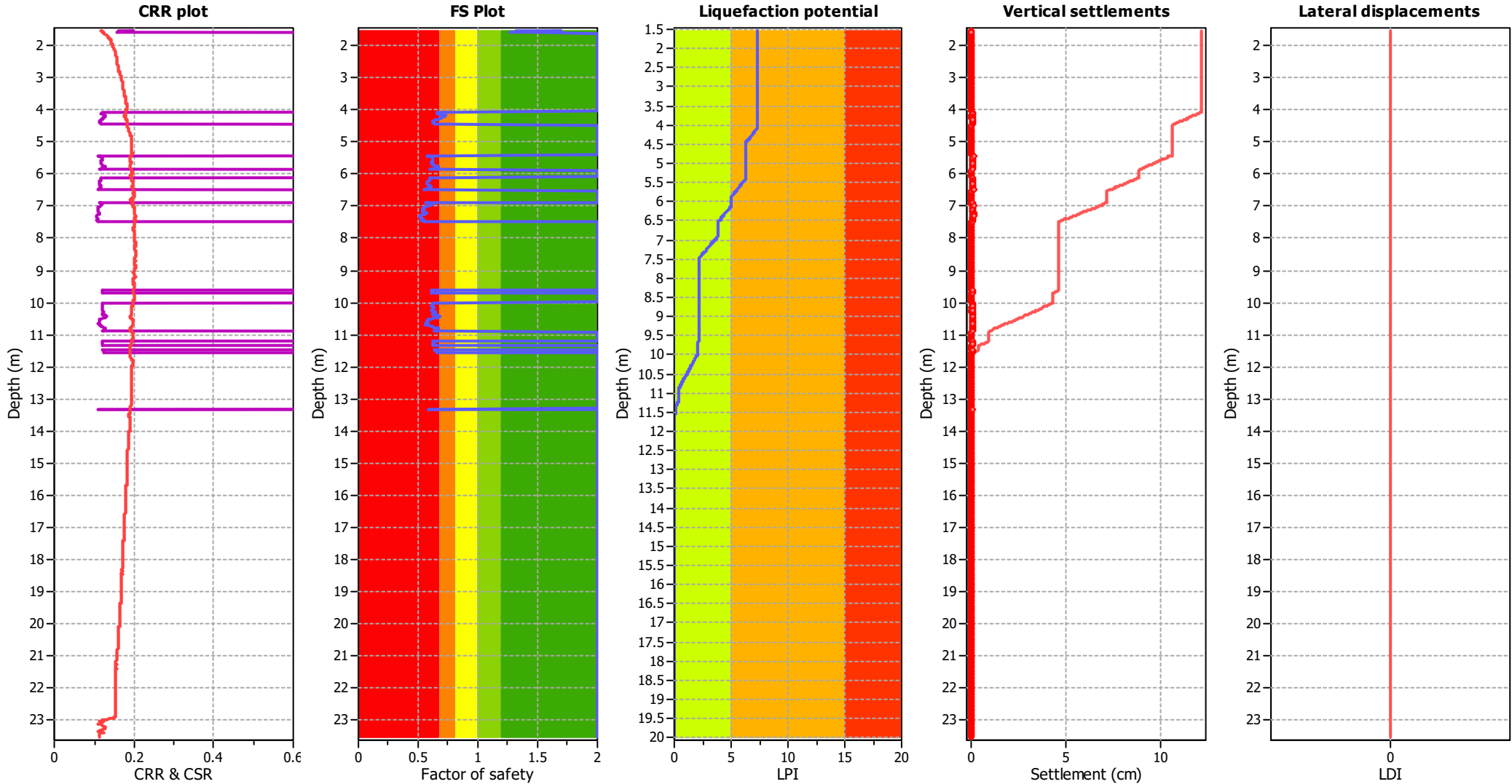
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

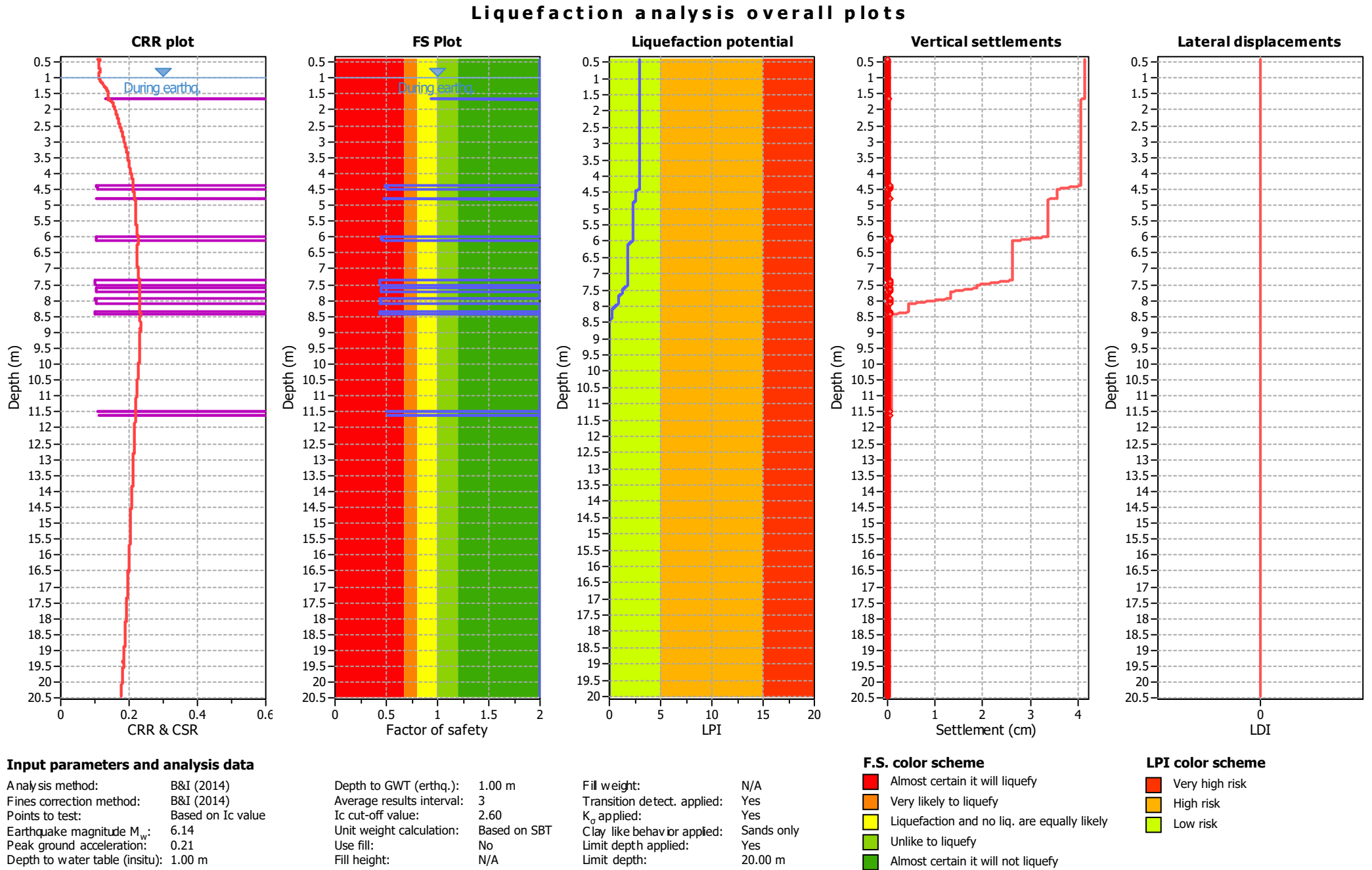
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

F.S. color scheme

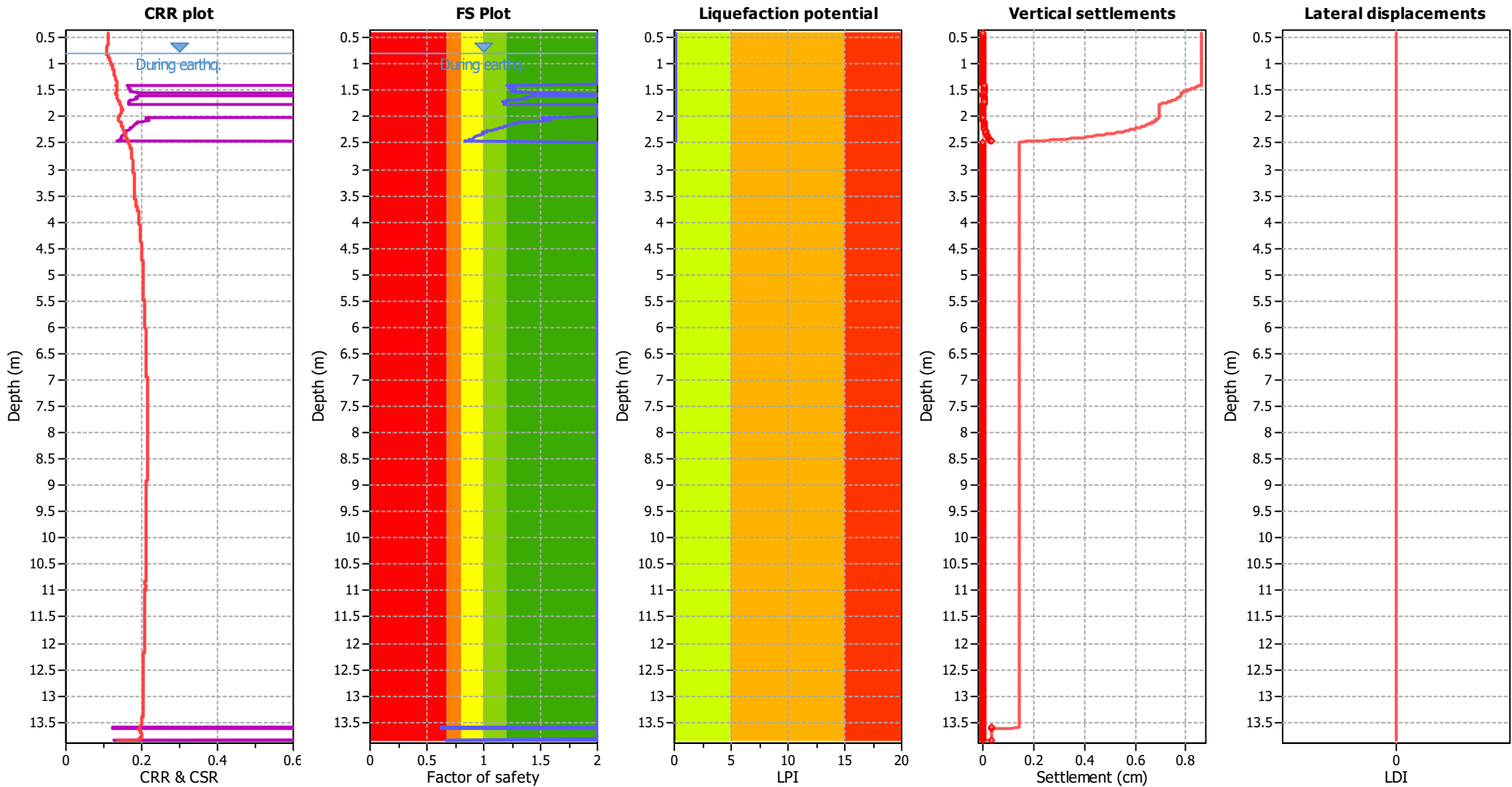
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light green	Unlike to liquefy
Dark green	Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	0.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_{σ} applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	0.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

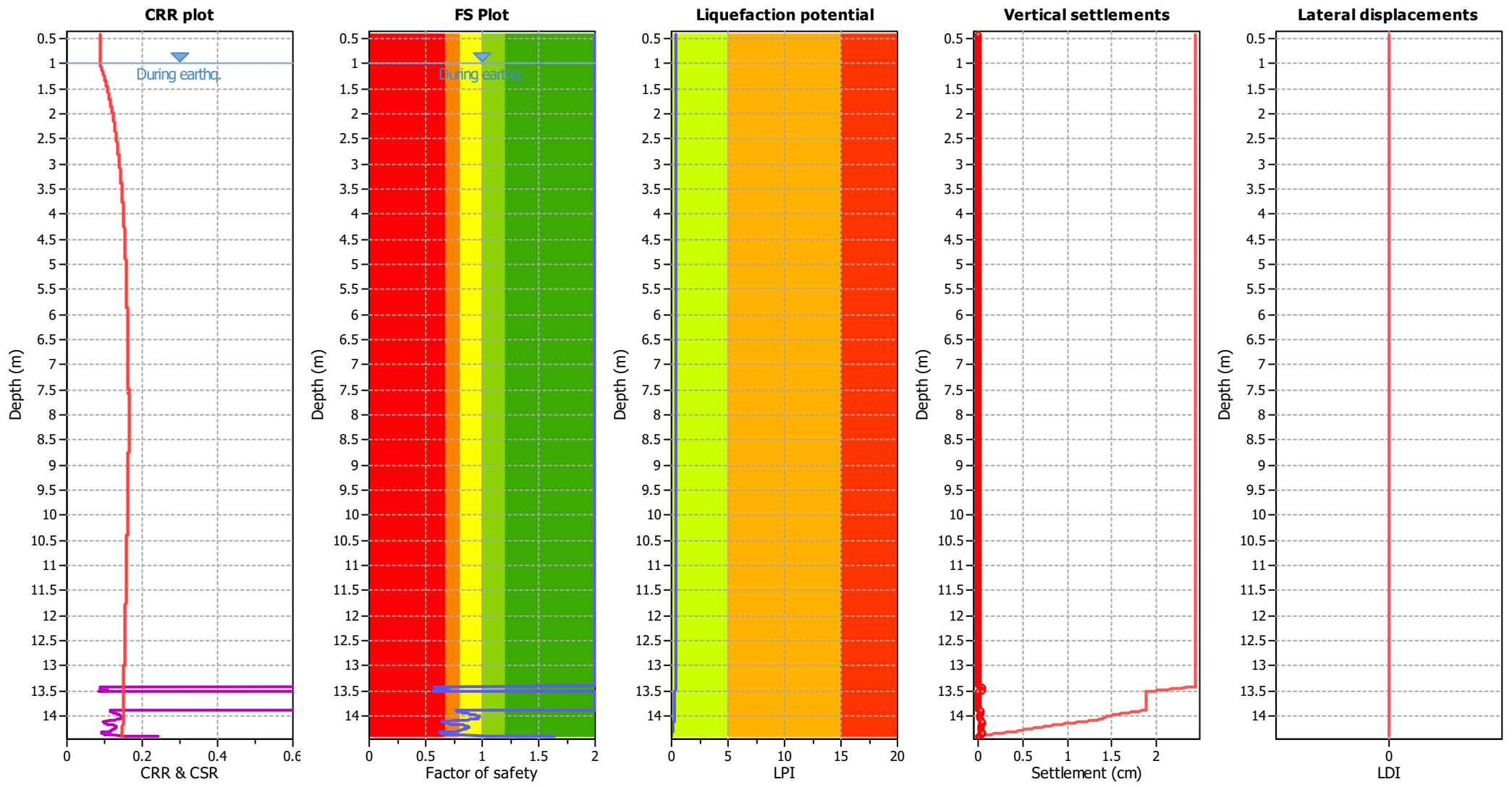
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	Depth to GWT (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	R&W (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	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