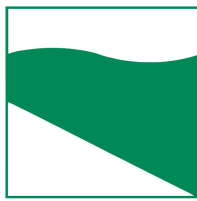




PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Anzola dell'Emilia



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA	Raggruppamento temporaneo di imprese e professionisti Capogruppo: dott. geol. Samuel Sangiorgi Mandanti: dott. geol. Tiziano Righini, dott. geol. Antonio Milioto, ing. Marco Soglia	Febbraio 2019

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	3
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	8
2.1	Riferimenti bibliografici.....	8
2.2	Sismicità storica.....	9
2.3	Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	12
2.4	Sorgenti sismogeniche.....	13
2.5	Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015).....	14
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO.....	17
3.1	Inquadramento geologico-strutturale.....	17
3.2	Inquadramento geologico.....	19
3.3	Paleogeografia e inquadramento geomorfologico e litologico.....	21
3.4	Subsidenza.....	23
3.5	Idrogeologia.....	25
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	27
4.1	Dati pregressi.....	27
4.2	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica 2014 (livello 2).....	28
4.3	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica 2019 (livello 3).....	31
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	36
5.1	Litologie sub-affioranti.....	36
5.1.1	<i>Area Capoluogo e Lavino di Mezzo</i>	36
5.1.2	<i>Palazzina di Sopra</i>	37
5.1.3	<i>Area ex Euroceramica</i>	38
5.1.4	<i>Ponte Samoggia</i>	38
5.1.5	<i>Santa Maria in Strada</i>	38
5.1.6	<i>San Giacomo del Martignone</i>	38
5.2	Sottosuolo profondo.....	39
5.3	Nuove sezioni litotecniche di sintesi elaborate per questo studio.....	44
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	45
6.1	Substrato rigido e la modellazione di RSL.....	45
6.2	Distribuzione dei livelli limoso sabbiosi e liquefacibilità.....	46
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	49
7.1	Cenni introduttivi.....	49

7.2	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	50
7.3	Gli approfondimenti sulla risposta sismica locale (amplificazioni) mediante simulazioni numeriche.....	50
	A) ACCELERAZIONI DI PICCO AL SUOLO E VALORI DI FA PGA.....	54
	B) RAPPORTI SPETTRALI DI AMPLIFICAZIONE (FUNZIONE DI TRASFERIMENTO).....	55
	C) INTENSITA' SPETTRALE DI HOUSNER.....	55
7.4	Gli approfondimenti nelle “zone di attenzione” per liquefazioni.....	57
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	63
8.1	Carta delle Indagini (Tavola 1).....	63
8.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2).....	63
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	64
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4).....	64
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	66
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 3 (Tavole 6, 7, 8, 9).....	66
9	BIBLIOGRAFIA.....	68

APPENDICE:
SCHEDE MODELLI NUMERICI RSL
PLOT VERIFICHE NUMERICHE LIQ

1 INTRODUZIONE

1.1 Contenuti dello studio

L'Amministrazione comunale di Anzola dell'Emilia è risultata destinataria di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi di MS e di analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009.

Occorre rammentare che il Comune di Anzola dell'Emilia già dispone di uno studio di microzonazione sismica comunale elaborato fino al “livello 2”, redatto nel 2014 dal dr. Geol. G. Tarabusi sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1919/2013 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo “Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 52/13 a favore degli Enti locali”.

L'Amministrazione comunale ha affidato al Raggruppamento Temporaneo formato dai liberi professionisti geol. Samuel Sangiorgi, geol. Tiziano Righini, geol. Antonio Milioto e ing. Marco Soglia l'elaborazione di ulteriori e locali approfondimenti di “livello 3” della microzonazione sismica nelle aree urbanizzate/urbanizzabili e il relativo aggiornamento della CLE, ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014 (OCDPC 171/2014), recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1227/2015. Sono state dunque espletate le seguenti ulteriori attività:

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

La figura 1.1 propone un inquadramento del limite comunale di Anzola dell'Emilia: si tratta di un territorio amministrativo situato nel contesto di pianura, di estensione areale complessiva pari a 36,6 Km² e con una popolazione residente di circa 12.300 abitanti.

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

1.2 Riferimenti normativi

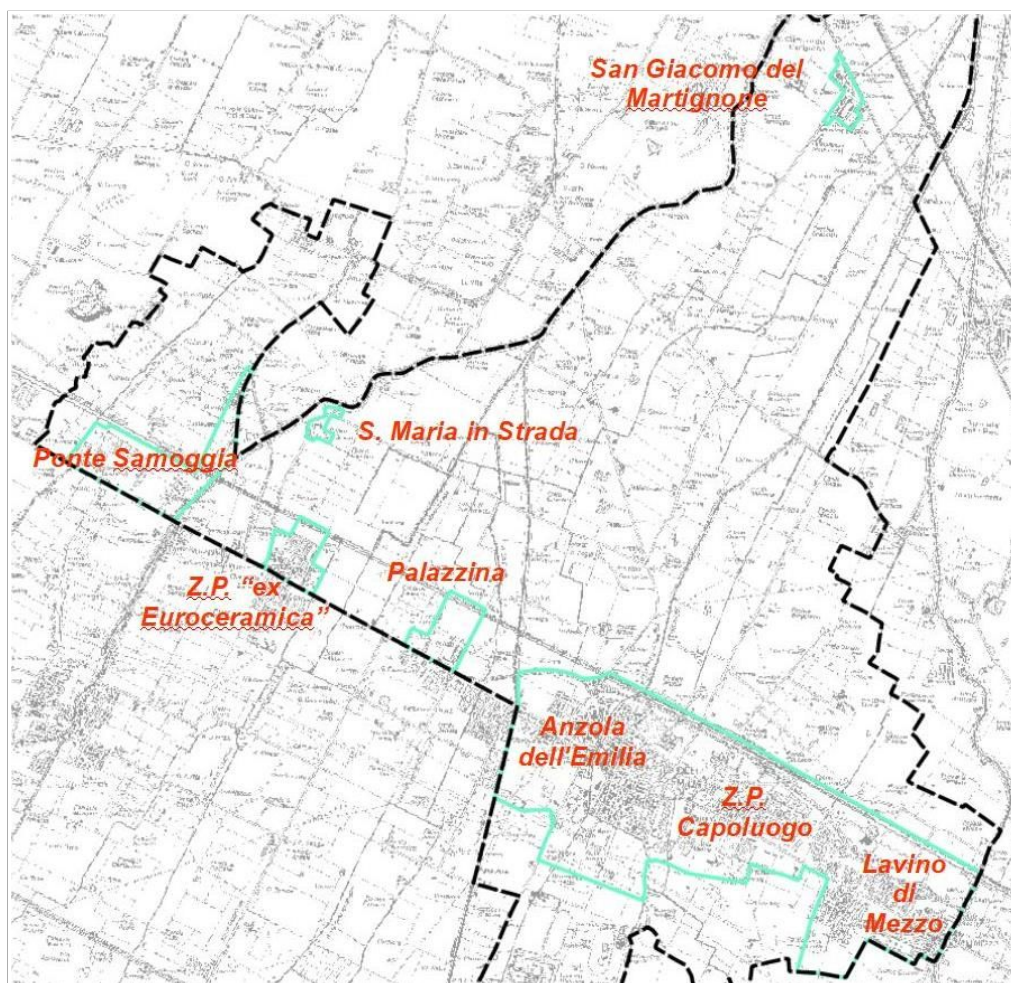
Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo “Approvazione dei criteri

per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 171/2014 a favore degli Enti locali”.

Figura 1.1 -
Localizzazione
del territorio
amministrativo
del Comune di
Anzola
dell'Emilia (da:
“Google Earth”)



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



Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, ottobre 2015), da qui in avanti “Standard MS 4.1”;
- ✓ “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti “ICMS”.

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

- ✓ Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007 Art. 16 c.1 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 2193/2015 “Art. 16 della LR n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n.112;
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- ✓ DM del 14/01/2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”.
- ✓ DM del 17/01/2018 aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”.

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

Come precedentemente scritto, l'Amministrazione di Anzola dell'Emilia già dispone di uno studio di MS di “livello 2” elaborato dal dr. Geol. G. Tarabusi¹, conforme alla DAL 112/2007, agli indirizzi nazionali di microzonazione sismica (ICMS 2008) e agli standard di rappresentazione e archiviazione informativa indicati dalla CTMS 2013 (standard v.3.0).

1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati aggiornati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Anzola dell'Emilia sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato *.pdf) oltre a caratterizzare e

¹ Microzonazione sismica di “livello 2” del Comune di Anzola dell'Emilia (OCDPC n. 52/2013), già certificato dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica.

inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;

- le nove tavole cartografiche (riprodotte in formato *.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato *.shp – shapefile);
- le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato *.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (riprodotti in formato *.pdf), contenuti nell'Allegato 2.

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

Tabella 1.1 – Elaborati cartografici aggiornati per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Anzola dell'Emilia

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

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

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster

tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000), aggiornata al 2013. Per questo lavoro, la base topografica vettoriale è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS_1984_UTM_Zone_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015).

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

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

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

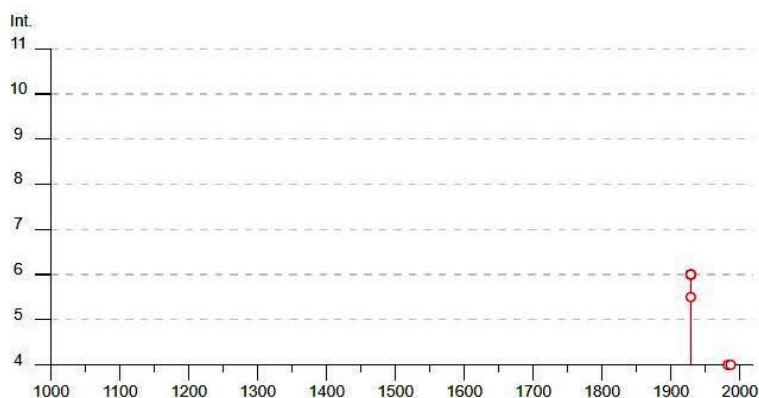
- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015* (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse nella finestra temporale 1000–2014
- il *DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il *CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismoindotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo (a_g) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>)), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0* (DISS Working Group, 2015 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- il *Catalogo della Sismicità Italiana* (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il *Database ISIDe* (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta 15 eventi (figura 2.1), con risentimenti tuttavia moderati nel territorio di Anzola dell'Emilia (risultano associate intensità massime fino al grado 6) e imputabili alla sequenza sismica del 1929.

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1892	08	09	07	58		Valle d'Alpone	160	6-7	4.91
NF	1892	12	29	13	47	4	Castel del Rio	36	5-6	4.37
6	1929	04	10	05	44		Bolognese	87	6	5.05
6	1929	04	19	04	16		Bolognese	82	6-7	5.13
6	1929	04	22	08	26		Bolognese	41	6-7	5.10
6	1929	04	28	19	40		Bolognese	20	6	4.73
5-6	1929	05	11	19	23		Bolognese	64	6-7	5.29
3	1931	04	11	01	26		Faentino	19	4-5	4.81
3	1931	06	10	17	02		Modenese	14	4	4.59
NF	1967	04	03	16	36	1	Reggiano	45	5	4.44
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
4	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
3-4	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
NF	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40

Figura 2.1- Terremoti significativi per il Comune di Anzola dell'Emilia e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)



Per la sequenza sismica del 1929 sono reperibili altre informazioni e in particolare si riprende qui di seguito quanto già quanto già riportato nella Relazione di MS di “livello 2” (G. Tarabusi, 2013) e cioè le informazioni contenute nel catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007):

Il comune aveva una popolazione di 5512 abitanti (dati del censimento ISTAT del 1931).

La scossa del 10 aprile delle ore 5:43 GMT ebbe una durata di 7 secondi e fu preceduta da rombo: fece cadere qualche comignolo e causò l'apertura di leggere fenditure nelle case meno solide.

La scossa delle ore 4:15 GMT del 19 aprile causò la caduta di numerosi comignoli e alcune lesioni in vecchi edifici. La durata e l'intensità della scossa allarmarono particolarmente la popolazione.

La scossa del 22 aprile delle ore 8:26 GMT causò ulteriori danni e panico tra la popolazione; alcune case risultarono fortemente lesionate e furono fatte sgomberare. Per l'alloggio dei

senz'altro alle autorità comunali furono consegnate 53 tende.

La mancanza di risentimenti precedenti il XX secolo evidenzia come tale storia sismica (figura 1) risulti incompleta in ragione della mancanza o del non reperimento di fonti storiche relative all'area di Anzola dell'Emilia. Per un quadro di riferimento degli effetti dei terremoti storici è comunque possibile riferirsi a quanto disponibile per le località più vicine.

Il terremoto più forte e più prossimo all'area in esame, secondo quanto riportato nel CPT111 (Rovida et al., 2011), che cita come fonte il CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), risulta essere quello del 3 gennaio 1505, il secondo di una sequenza con 3 scosse principali, con intensità epicentrale valutata del grado VIII della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.6. In figura 2 è rappresentata la mappa degli effetti del terremoto dai dati CFTI4Med in rapporto al perimetro comunale di Anzola dell'Emilia, che si colloca in un'area con effetti compresi tra i gradi VII e VIII della scala MCS.

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

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

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

La scossa più forte della sequenza avvenne il 3 gennaio 1505 alle ore 2:00 GMT circa (le 9 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna ci furono gravi danni alle abitazioni e agli edifici pubblici, civili e religiosi. Le case crollate totalmente furono poche, ma molte abitazioni subirono danni diffusi. La parte dell'area urbana più colpita fu quella verso la pianura, compresa tra porta S.Donato e porta S. Isaia. Risultarono danneggiati soprattutto gli edifici "a volta" (come le chiese e i palazzi), e la parte più alta di numerose torri, tanto che alcune dovettero essere abbattute o abbassate per evitarne il crollo sugli edifici vicini. Nel palazzo Bentivoglio, uno dei più danneggiati, crollarono la facciata, la sala grande, cinque volte del portico e il "torresino" della vicina torre collegata al palazzo; varie stanze risultarono inoltre lesionate e tutto l'edificio sconnesso e indebolito. Più in ombra, dal punto di vista degli effetti, rimane l'area extraurbana, a cui le fonti dedicano scarsa attenzione: a Confortino, Bentivoglio e Rigosa subirono gravi danni gli edifici di proprietà della famiglia Bentivoglio; a San Lorenzo in Collina e Zola Predosa il terremoto causò lesioni nelle case e il crollo di colombaie. Ci furono danni leggeri a Ferrara, Modena, Reggio nell'Emilia. La scossa fu sentita a Firenze, Forlì, Venezia, Verona, Vicenza, e in molte altre località. Un'altra scossa molto forte avvenne il 20 gennaio, alle ore 23:50 GMT circa (le 7 della notte in orario "all'italiana"). A Bologna si aggravarono i danni alle volte di alcuni edifici, fra cui la cattedrale di S.Pietro, le chiese di S.Petronio e S.Martino, la torre del palazzo del Podestà e l'ospedale di S.Maria della Vita.

Questa scossa fu sentita in un'area estesa da Forlì e Faenza, a Venezia e Verona.

Alla località "Confortino", toponimo oggi in comune di Crespellano, ma molto prossimo al confine con quello di Anzola dell'Emilia è stato attribuito un grado VIII della scala MCS (figura 2.2) e il catalogo CFTI4Med riporta la seguente sintesi degli effetti principali:

La scossa del 3 gennaio 1505 causò molti danni. Gli edifici di proprietà dei Bentivoglio, signori feudali del luogo, crollarono pressoché totalmente; poco prima del terremoto erano stati spesi per la loro manutenzione circa 2.000 ducati.



Figura 2.2- Effetti della scossa del 3 gennaio 1505 da dati CFTI4Med. Con la linea rossa è rappresentato il perimetro del comune di Anzola dell'Emilia.

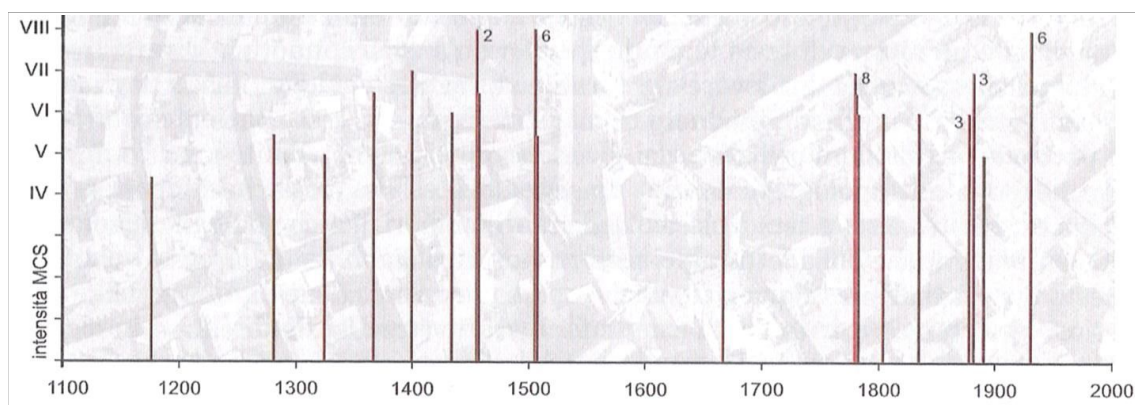


Figura 2.3- Cronologia e intensità epicentrale dei 38 terremoti noti per l'area di Bologna tra il XII e il XX secolo con effetti locali superiori o uguali al grado V-VI MCS (da Boschi e Guidoboni, 2003)

In generale, per uno studio approfondito degli effetti degli eventi sismici nel territorio bolognese è opportuno riferirsi al volume I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo (Boschi e Guidoboni, 2003), dal cui studio sono stati in seguito sintetizzati i dati del CFTI4Med. In figura 2.3 è riportato il grafico della cronologia dei terremoti noti con effetti di danno nell'area di Bologna.

Alla luce dei dati storici sopra riportati, una caratteristica ricorrente della sismicità dell'area in esame pare essere quella di manifestarsi in sequenze della durata di diversi mesi, in cui la scossa più forte non è necessariamente la prima che si verifica e in cui sono diverse le scosse con magnitudo maggiore di 5. Quanto alla frequenza e ai tempi di ritorno dei singoli eventi, la finestra di osservazione disponibile pare limitata per trarre conclusioni.

2.3 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana² è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale ML=5.9), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di ML =4,8 e la seconda di ML =5,1, con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse (ML >5), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa (ML =5.8) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO).

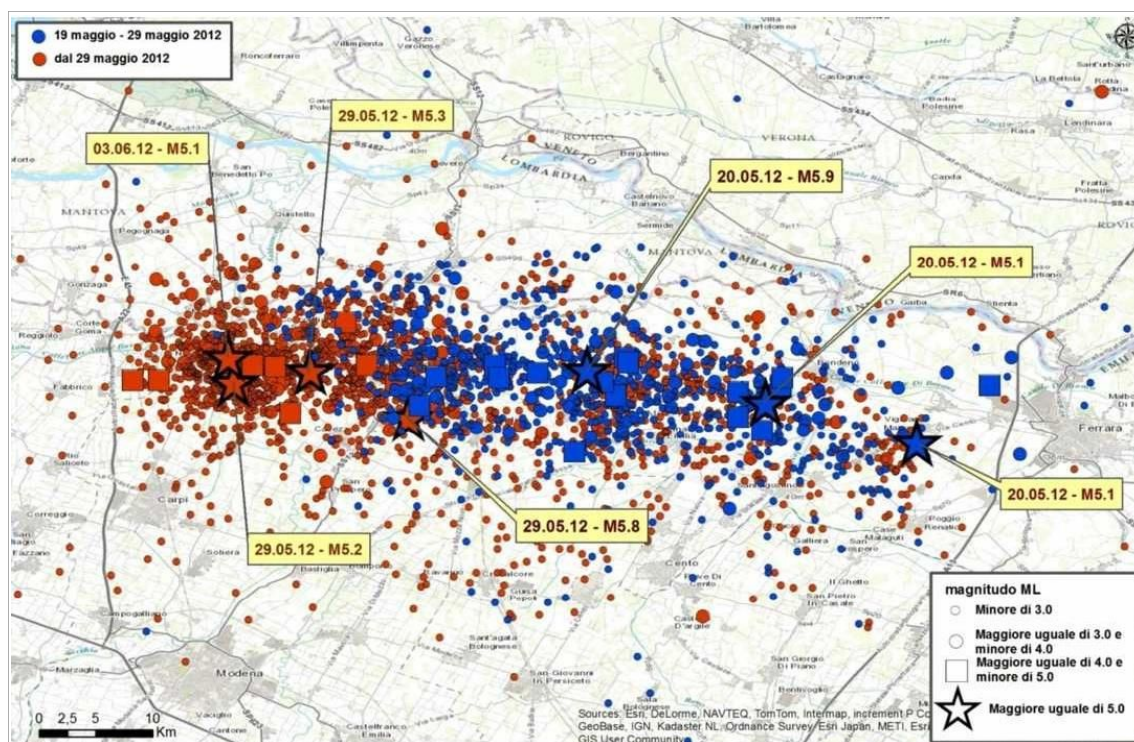


Figura 2.4 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

² Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

I maggiori effetti locali riscontrati sono risultati amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po³. In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g.

La figura 2.4 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

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

2.4 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade quasi interamente entro la Zona 912 e solo in parte nella Zona 913, entrambe caratterizzate da un valore di M_{wmax} pari a 6.14.

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

Il database DISS v.3.2 (DISS Working Group, 2010) indica la presenza, poco a sud dell'area in esame (figura 4), di due sorgenti sismogenetiche individuali, ITIS091 e ITIS103, associate rispettivamente alla scossa del 3 gennaio 1505 e a quella del 20 aprile 1929. Entrambe rientrano nella fascia delimitata dalla sorgente composita ITCS047, lungo la quale paiono essersi concentrati i maggiori eventi dell'area bolognese. Si tratta di una porzione del fronte compressivo pedeappenninico, un sistema di faglie con vergenza nord-est, a cui è associata una magnitudo massima pari a 6, in analogia con quella presunta del massimo terremoto storico dell'area (3 gennaio 1505). La profondità è indicata tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

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

Come già scritto nello studio di MS 2014, l'area di Anzola dell'Emilia può anche risentire degli eventi associati a strutture sismogenetiche più distanti rispetto a quelle appena citate (figura 2.5) e più a nord, come i terremoti del maggio 2012, originati dalle sorgenti composite ITCS050 ("Carpi-Poggio Renatico") e ITCS103 ("Finale Emilia-Mirabello").

³ Fonte: "Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012" – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e "Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale" a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

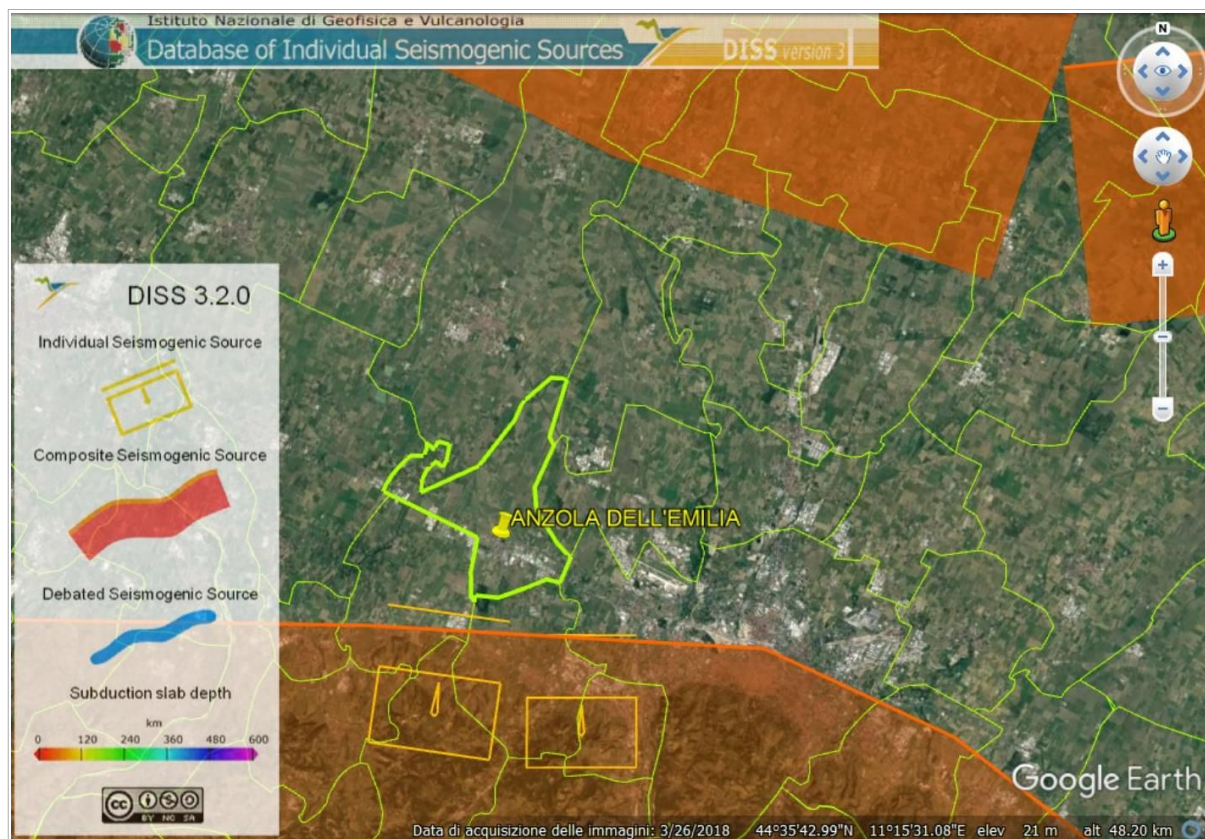


Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2). Foto aerea: Google Earth

2.5 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015)

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

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

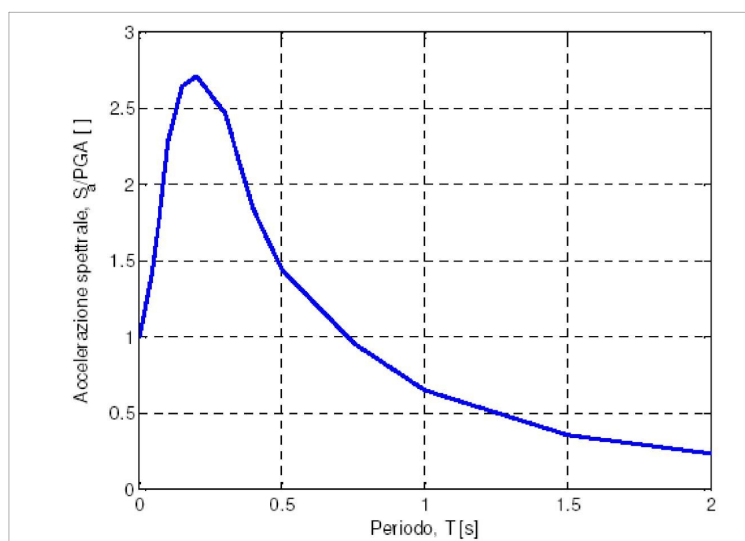
- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);

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

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

Gli indirizzi forniscono anche i dati fondamentali per le valutazioni più accurate della risposta sismica di terzo livello: lo spettro di risposta normalizzato di riferimento per l'Emilia-Romagna (per $T_r = 475$ anni cioè con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni), riportato in figura 2.6, e i valori di P_{ga} anch'essi normalizzati (riferiti al suolo rigido) per ogni sito nella Regione Emilia-Romagna (basato sul reticolo INGV). Tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti.

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



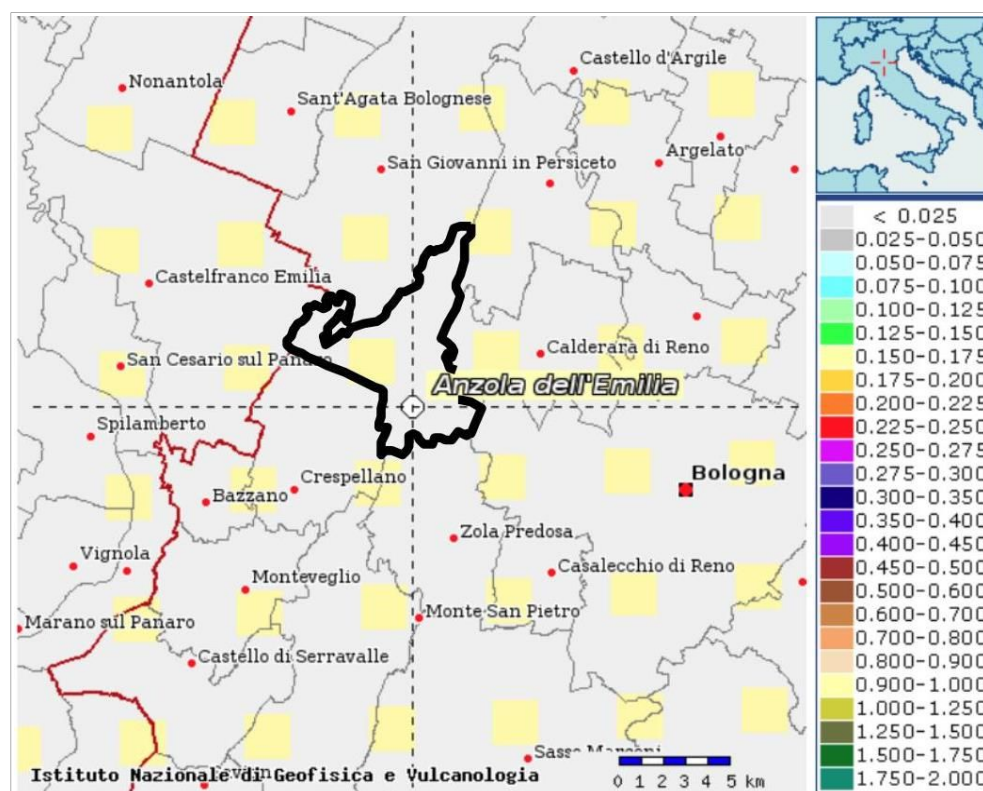
Gli indirizzi regionali di MS indicano anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale: sono input selezionati dalla Banca dati ISESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri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

È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro di figura 2.6 con la a_{refg} attribuita al sito di studio.

In questo senso, occorre rammentare che la pericolosità sismica locale di riferimento sia per la pianificazione territoriale dell'Emilia-Romagna, sia per normativa riferita alla progettazione di costruzioni, viene inoltre definita mediante un approccio “sito dipendente” e basato su una “griglia di riferimento” di punti, costruito per l'intero territorio nazionale (mappe di pericolosità sismica previste dall'Ordinanza PCM 3274/2003). Ad ogni punto del reticolo, vengono attribuiti, valori di a_g di riferimento al “bedrock rigido” (a_{refg}) e dei principali parametri “spettrali” da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica, calcolati con approccio statistico probabilistico (per differenti periodi di ritorno attesi del terremoto di “progetto”). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica sono forniti dall'INGV e pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

La figura 2.7 riporta per il territorio comunale di Anzola dell'Emilia i punti della griglia INGV. I valori di a_{refg} si riferiscono al reticolo INGV (mappa MPS04) che attribuisce la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni: i valori sono attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km). La mappa MPS04 è diventata ufficialmente il riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006). I valori di a_{refg} per il territorio urbano/urbanizzabile di Anzola dell'Emilia risultano di scarsa variabilità ($0,163g \div 0,164g$).

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



3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

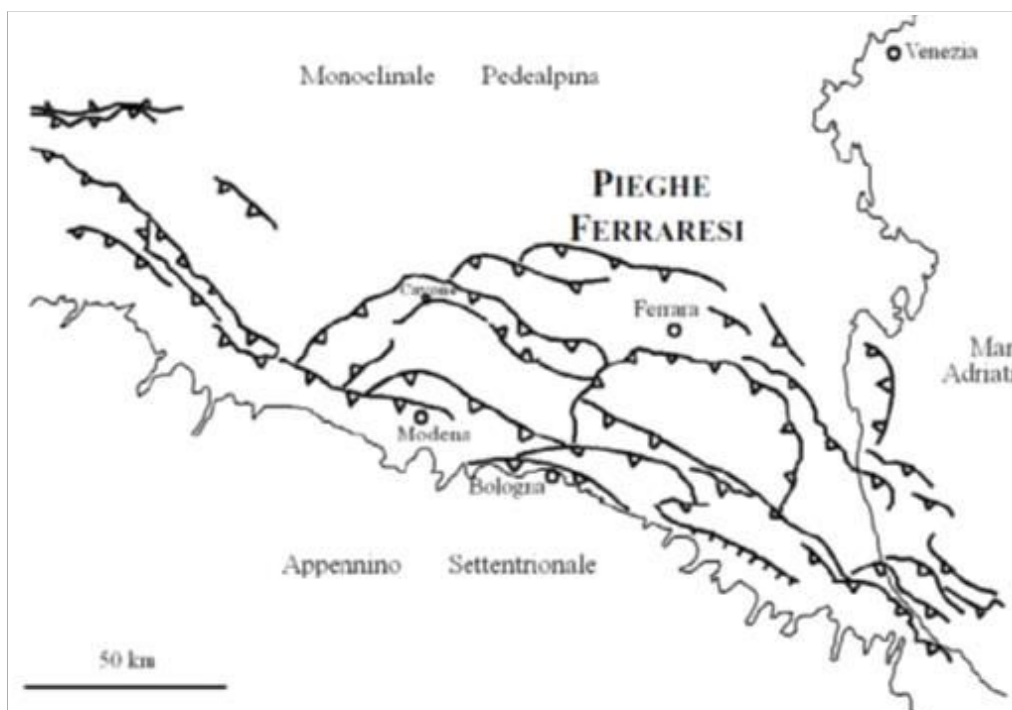
3.1 Inquadramento geologico-strutturale

Riprendendo quanto già scritto per lo studio di MS 2014, il territorio del comune di Anzola dell'Emilia si posiziona nella parte centro-meridionale della Pianura Padana, che costituisce dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-quadernario di tipo sedimentario, che comincia a delinearsi sin dall'inizio del Triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo che nello spazio, in diversi periodi (Mesozoico, Cenozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario), con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali presenti in profondità.

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

L'area oggetto dello studio di microzonazione sismica si posiziona lungo il margine esterno del fronte emerso della catena appenninica settentrionale, strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore, nella fascia di alta pianura padana dove si rinvengono spessi depositi alluvionali e in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene superiore e del Quaternario.

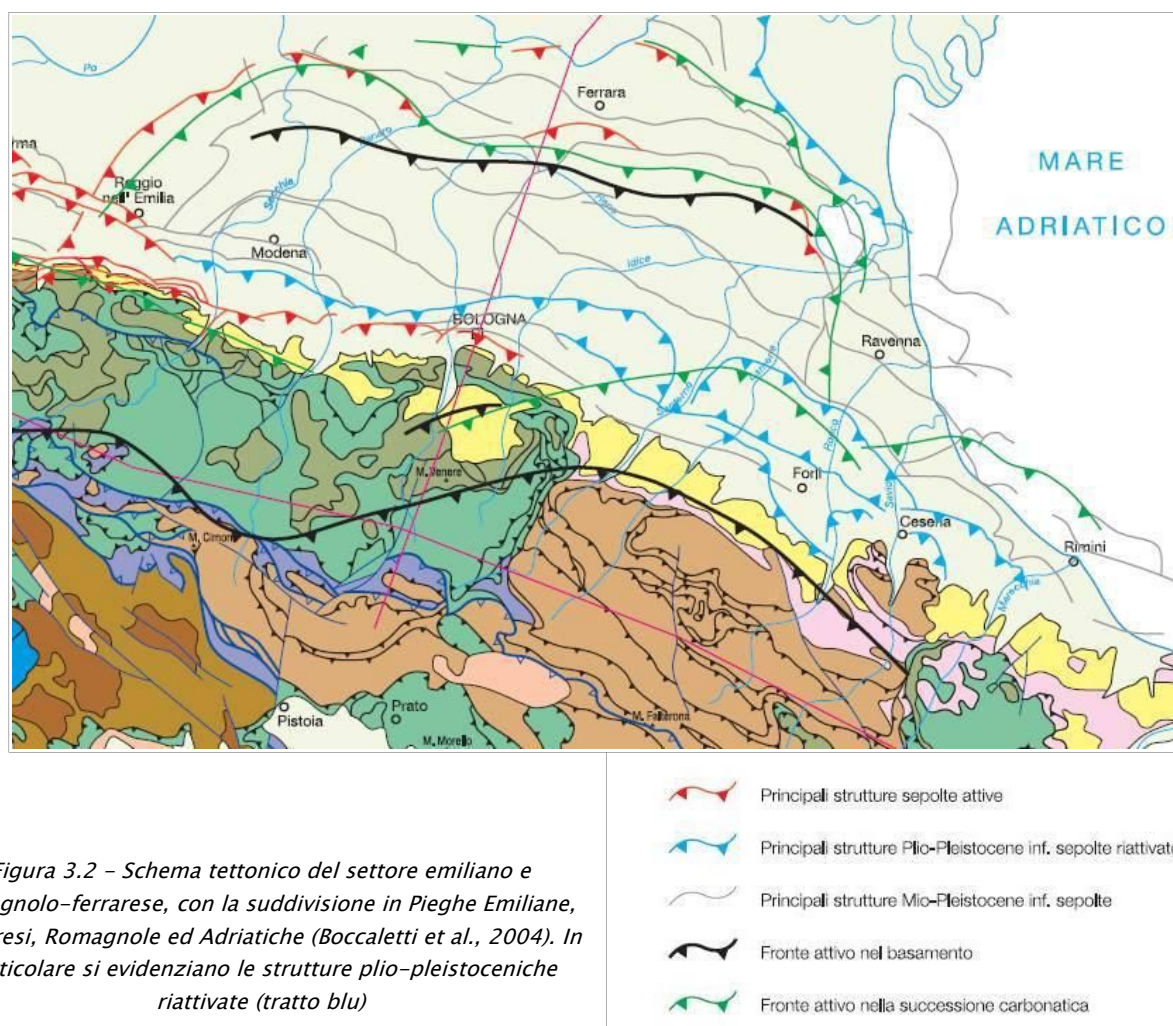
Figura 3.1 - Schema tettonico del settore emiliano e romagnolo-ferrarese, con la suddivisione in Pieghe Emiliane, Ferraresi, Romagnole ed Adriatiche (da Dondi et al., 1982). In particolare si evidenziano le strutture sepolte che interessano la pianura emiliana



Tali deformazioni sepolte, presenti a nord del territorio comunale di Anzola dell'Emilia, rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi (figura 3.1) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (Pieri e Groppi, 1981).

Dal punto di vista strutturale l'assetto del margine appenninico-padano è modellato secondo

blande sinclinali ed anticlinali nord-vergenti, con asse parallelo alla catena (WNW-ESE); la porzione esterna della catena appenninica si spinge a nord oltre Ferrara (pieghe ferraresi) e ad est in mare Adriatico (pieghe romagnole e adriatiche) e rappresenta una sequenza di grandi pieghe e sovrascorrimenti (Pieri e Groppi, 1981) che, seppur sepolte ed occultate dalla copertura continentale alluvionale, costituiscono un elemento tettonico di rilievo, con ripercussioni dirette anche per il territorio in esame. Queste strutture sono poi dislocate da faglie con componente trascorrente ed andamento antiappenninico NE-SW, trasversale quindi all'asse della catena (figura 3.2).



Tale porzione di bacino padano è stato nel tempo riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative plicative sottostanti; il territorio comunale dal punto di vista strutturale rappresenta pertanto una sinclinale subsidente riempita dai depositi alluvionali portati dai corsi d'acqua appenninici collocata tra la porzione più esterna dell'Appennino settentrionale (Zona delle pieghe pedeappenniniche) a sud e la "Dorsale di Ferrara" a nord.

In particolare la fase pliocenica viene denominata di flysch nella quale divenne dominante l'input di materiale erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993). Con il Pleistocene si instaura un nuovo ciclo sedimentario (Qm) (Ricci Lucchi et al., 1982), che porta al colmamento del Bacino Padano in un regime di subsidenza

generalizzata. Gran parte delle aree precedentemente emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa che prosegue poi, ininterrottamente, fino all'Attuale. Successivamente, la sedimentazione diviene esclusivamente continentale, e prosegue con i depositi fluvio-lacustri delle alluvioni Padane (Qc) (Ricci Lucchi et al., 1982). I sedimenti sabbiosi, limosi ed argillosi, che riempiono la parte più superficiale del bacino, sono stati depositi dal Fiume Po e dagli altri fiumi tributari che provengono dalla catena Appenninica, compreso il Fiume Reno (Dondi et al., 1982) (Pieri, 1984) (Dondi e D'Andrea, 1986) (Ori, 1993) (Vittori e Ventura, 1995) (Amorosi et al., 1999).

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

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

3.2 Inquadramento geologico

Come riportato nella Relazione geologica a corredo del quadro conoscitivo per il PSC associato Terre d'acqua (Franchi, 2008) e ripreso anche nella Relazione di MS 2014, l'area di studio ha una complessa evoluzione paleogeografica, in particolare l'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali è stato fortemente condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana, da fenomeni climatici e da interventi antropici di deviazione, regimazione e bonifica (figura 3.3).

I dati geologici di seguito riportati sono derivati dalle relazioni geologiche redatte per il PRG e il PSC del comune di Anzola dell'Emilia, dall'analisi della Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna 1: 50.000 redatta dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli e dalla Relazione di MS di "livello 2" (G. Tarabusi, 2014). Le descrizioni delle unità geologiche sono desunte e sintetizzate dal documento Progetto CARG "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" per la Regione Emilia-Romagna (Martelli et al., 2009).

Tutte le informazioni analizzate circa la geologia riguardante l'area di interesse sono contenute nell'analisi del Foglio 220 e per la porzione settentrionale del territorio comunale del Foglio 202. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla consultazione dell'analisi dei fogli sopracitati, consultabili nel sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (<http://geo.regione.emilia-romagna.it/>), di cui è riportato un estratto in figura 3.3.

Dal punto di vista geologico la Pianura Padana è un bacino sedimentario compreso tra l'Appennino settentrionale e le Alpi meridionali in cui i sedimenti più recenti, in prevalenza olocenici, ricoprono successioni stratigrafiche complesse sia dal punto di vista stratigrafico stesso che strutturale; nello specifico l'area di progetto ricade nel dominio strutturale denominato "Piege Adriatiche".

In particolare, il territorio del comune di Anzola dell'Emilia risulta essere caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali attribuibili alle unità oloceniche più superficiali della potente successione quaternaria di riempimento del bacino padano legato all'orogenesi dell'Appennino

Settentrionale, depositi geneticamente correlati all'evoluzione geomorfologica dominata dai processi di divagazione dei corsi d'acqua e dalle oscillazioni climatico-eustatiche sovrainposte agli eventi tettonici di sollevamento regionale.

I depositi alluvionali possono essere raggruppati all'interno del Sistema Emiliano-romagnolo (pleistocene medio-olocene) che è stato suddiviso a sua volta in 5 subsistemi sulla base delle caratteristiche morfo-pedostratigrafiche. Le due unità presenti sono essenzialmente composte da argille, limi e sabbie di piana alluvionale. Tali depositi quaternari continentali come premesso, geneticamente correlati agli apporti alluvionali, appaiono distribuiti in architetture nastriformi e lentiformi/tabulari; sono costituiti da clasti poligenici e con granulometria variabile in funzione della variabilità degli stati energetico-dinamici delle torbide in ambiente di sedimentazione di tipo fluvio-palustre.



Sulla base della Carta Geologica Regionale le unità geologiche affioranti sono essenzialmente caratterizzate da sedimenti di origine fluviale e marina distribuiti secondo alternanze di litotipi a diversa granulometria, organizzati in strati a geometria variabile, spesso lenticolare, e quindi arealmente discontinui, in cui i rapporti tra le diverse litologie sono da ricondurre all'evolversi di un ambiente caratterizzato da energie di trasporto e da modalità deposizionali variabili nel tempo.

In particolare come riportato nelle note illustrative del progetto CARG – Foglio 220 e 202 (Martelli et al., 2009) sono presenti:

AES8 – Subsistema di Ravenna (Pleistocene superiore–Olocene; post circa 20.000 anni fa)

Tale unità affiora nella maggior parte del Foglio 256, si sviluppa in condizioni di piana inondabile e rappresenta l'intero spessore dei sedimenti, prevalentemente fini, depositi nell'ultimo postglaciale, in parte al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso attribuito all'unità di Vignola.

I depositi affioranti estesamente sono fini e vanno dalla sabbia media all'argilla e ai limi, depositi in ambiente di piana alluvionale sviluppata a valle dei conoidi; solo nelle aree a sud dell'autostrada A1 sono presenti depositi ghiaiosi di conoide. A valle dei conoidi il territorio presenta una inclinazione verso NNE, interrotta solo da blande ondulazioni positive allungate in senso N-S e NNE-SSO. Gli affioramenti sono praticamente inesistenti e le osservazioni sono basate essenzialmente dai sondaggi (si veda la banca dati disponibile sul sito web della Regione).

I depositi sono il prodotto della sedimentazione prevalentemente verticale dovuta a processi di tracimazione di corsi d'acqua sinuosi che si sviluppano a valle dei corsi braided caratteristici delle conoidi pedemontane. I processi di deposizione hanno portato alla formazione di argini naturali prevalentemente sabbiosi e piane inondabili limose argillose, mentre la migrazione dei meandri ha condotto alla deposizione di corpi sabbiosi nastriformi allungati nel senso di scorrimento delle acque. Lo spessore massimo dell'unità è di circa 20 metri; l'età è pleistocenica superiore–olocenica, le datazioni con il metodo C14 della base dell'unità oscillano tra 15.000 e 9.000 anni fa. Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsistemi e sulle unità più antiche.

Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica viene distinta, all'interno del Subsistema di Ravenna, l'Unità di Modena (AES8a).

AES8a – Unità di Modena (Olocene; post IV–VII sec. d.C.)

Unità di rango inferiore che costituisce la parte sommitale del Subsistema di Ravenna, definita sulla base della presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione con profilo potente meno di 100 cm, calcareo, di colore grigio-giallastro.

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua: depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, e di conoide. Lo spessore massimo dell'unità è di circa 8 metri; il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di cm) e di tipo A/C, localmente A/Bw/C.

3.3 Paleogeografia e inquadramento geomorfologico e litologico

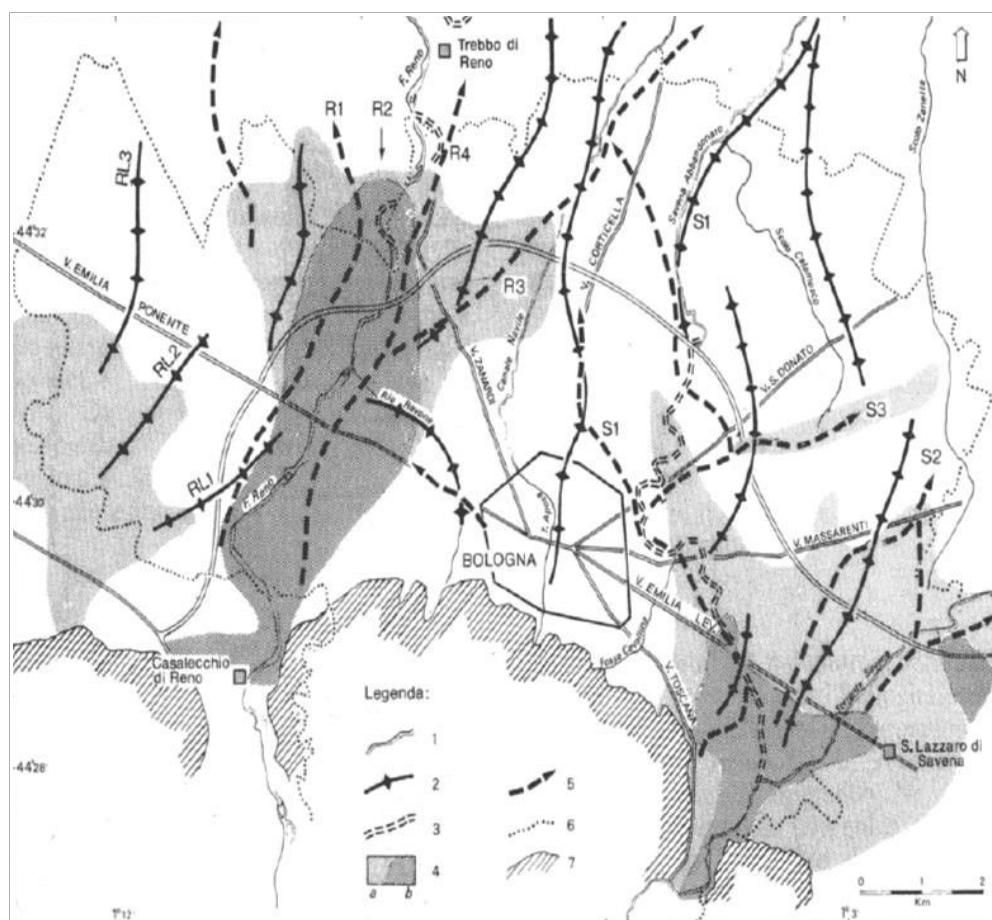
Come riportato nella Relazione geologica a corredo del quadro conoscitivo per il PSC associato Terre d'acqua (Franchi, 2008) e ripreso anche nella Relazione di MS 2013, l'area di studio ha una complessa evoluzione paleogeografica, in particolare l'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali è stato fortemente condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana, da fenomeni climatici e da interventi antropici di deviazione, regimazione e bonifica (figura 3.4).

In particolare si evidenzia la presenza di paleo alvei del Torrente Samoggia e del Torrente Lavino anche nel territorio del comune di Anzola dell'Emilia, che trova conferma dalla presenza

di dorsali morfologiche e dalle litostratigrafie sia delle indagini eseguite sia di quelle recuperate nell'archivio comunale. Il Torrente Samoggia si posiziona alla estremità occidentale del territorio comunale mentre il Torrente Lavino all'estremità est.

Procedendo verso monte dalla confluenza del Torrente Samoggia in Reno, il pertinente bacino deposizionale si suddivide nel bacino del Torrente Samoggia e nel bacino del Torrente Lavino, suo maggior affluente in sponda destra, che confluisce nel Samoggia nel tratto arginato in località Forcelli; nella medesima località si immettono in Samoggia, il Torrente Ghironda ed il Collettore Consorziale Acque Basse Forcelli, entrambi regolati da chiaviche con porte vinciane e paratoie che impediscono lo scolo naturale delle acque in presenza di eventi di piena nei torrenti Samoggia e Lavino (Franchi, 2008).

*Figura 3.4 - Reticolo idrografico attuale e ricostruzione del reticolo idrografico antico del fiume Reno.
Legenda: 1) Alvei attuali; 2) Posizioni di paleoalvei dedotti dalla presenza di dorsali morfologiche; 3) percorsi storici individuati in base a documenti o indicazioni storiche; 4) lobi sabbiosi (a) o ghiaiosi (b) della litologia superficiale; 5) assi di dorsali o di lobi ghiaiosi profondi; 6,7) limiti Comunali e del rilievo collinare (Elmi et al., 1984)*



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

In sintesi, considerando l'evoluzione strutturale e geomorfologica deposizionale, si evidenzia che la litologia di superficie della zona di Alta pianura è costituita in prevalenza da depositi fluviali continentali a matrice sabbiosa-ghiaiosa con alvei e canali frequenti e con tendenza allo sviluppo di meandri.

Sinteticamente, nel territorio del comune di Anzola dell'Emilia si evidenzia una predominanza di

depositi coesivi (argillosi e limosi) con caratteristiche fisico-meccaniche localmente plastiche e scadenti, con locali livelli decimetrici e raramente metrici sabbiosi e limoso-sabbiosi entro i primi 5–6 metri di profondità; non paiono essere presenti depositi ghiaiosi relativi alla dinamica del Fiume Reno che scorre alcuni chilometri ad est.

Dal punto di vista litologico le unità che compongono la successione quaternaria continentale più profonda sono formate essenzialmente da una successione di ghiaie e peliti (queste ultime subordinate alle prime). Le sabbie sono sempre in quantità estremamente ridotta.

Tale situazione testimonia un processo di sedimentazione complesso, regolato da diversi fattori, quali le condizioni climatiche e morfologiche, le loro variazioni di percorso e le litologie disponibili nei loro bacini di alimentazione, l'incostante regime e capacità di trasporto dei fiumi e torrenti appenninici.

In particolare per l'area in esame la presenza di litologie prevalentemente argillose nei terreni che compongono i bacini di alimentazione dei torrenti Samoggia e Lavino determina una erosione e trasporto di prevalenti litotipi fini da parte dei corsi d'acqua con conseguente deposito nei territori di questa porzione di pianura bolognese.

3.4 Subsidenza

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

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

All'abbassamento del suolo per cause naturali, nel periodo tra gli anni '60 e '70, si è andata a sovrapporre, sino a divenire causa dominante, una componente "artificiale" di tipo antropico imputabile principalmente all'estrazione di fluidi dal sottosuolo ed in particolare al forte prelievo idrico industriale e agricolo dalle falde, in tutta la zona della conoide del Fiume Reno, che ha persino provocato problemi nel corretto funzionamento della rete scolante gestita dai Consorzi di Bonifica.

La campagna di monitoraggio della subsidenza del 2000–2006 (Arpa Ingegneria Ambientale, 2007), eseguita da Arpa, ha affiancato al metodo classico della livellazione geometrica di alta precisione, utilizzato nei precedenti monitoraggi eseguiti negli anni '80 e '90, la tecnica dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari. Nel corso degli anni 2011 e 2012 Arpa Emilia-Romagna, attraverso il progetto "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola", ha aggiornato le conoscenze sui movimenti verticali del suolo rispetto al precedente rilievo effettuato nel 2006 (Arpa Ingegneria Ambientale, 2013), utilizzando il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari supportato dall'elaborazione di 17 stazioni permanenti GPS (figure 3.5 e 3.6).

In base alle analisi presenti nel QC del PSC associato Terre d'Acqua (Franchi, 2008), nel periodo 2002–2006 si nota una generale riduzione rispetto al periodo precedente sebbene siano ancora

presenti alcuni picchi localizzati nei pressi di Sala Bolognese e di Anzola dell'Emilia con circa 30 mm/anno.

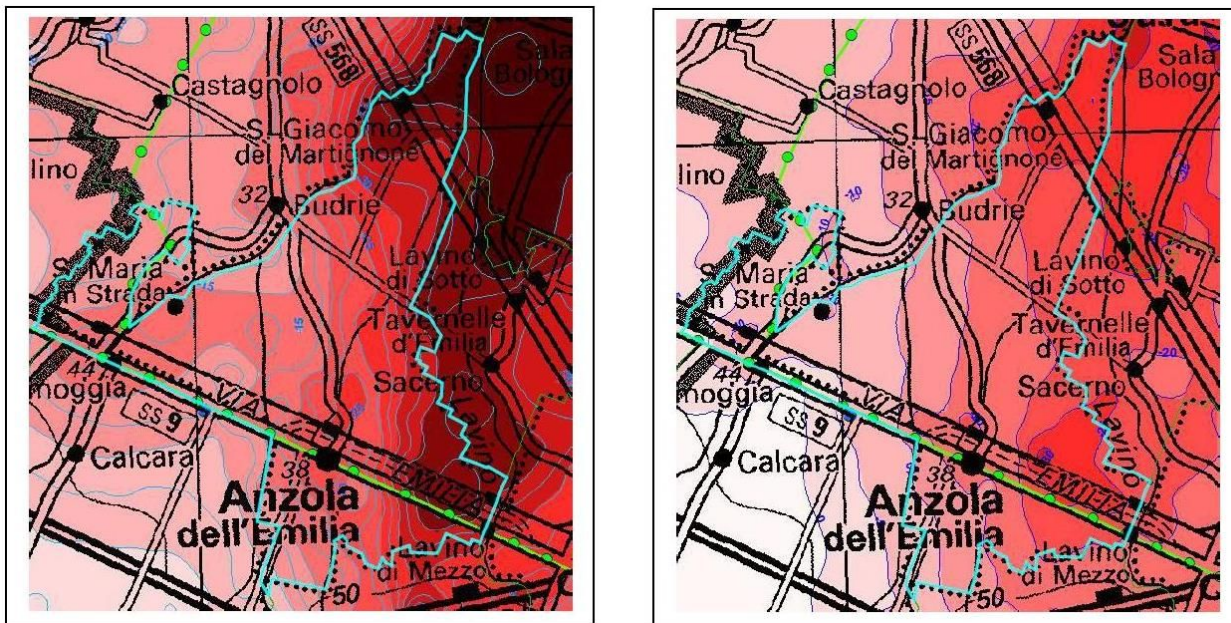


Figura 3.5 - Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 1990-2000 a sinistra e 2002-2006 a destra (Arpa Ingegneria Ambientale, 2007)

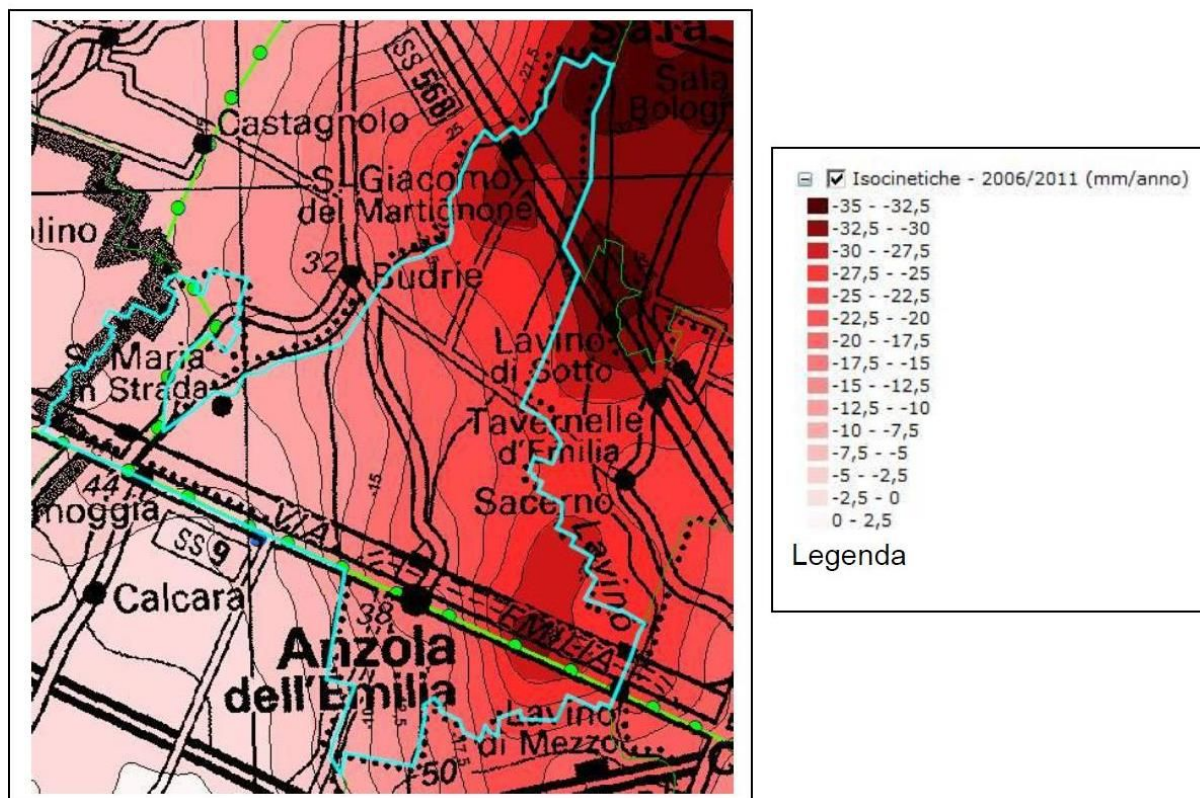


Figura 3.6 - Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 2006-2011 (Arpa Ingegneria Ambientale, 2007) (Arpa Ingegneria Ambientale, 2013)

Dall'esame complessivo degli elaborati relativi alla subsidenza prodotti da Arpa tra il 1990 e il 2011, si evince che la gran parte del territorio di pianura della regione non presenta nel periodo 2006-11 variazioni di tendenza rispetto al periodo 2002-06.

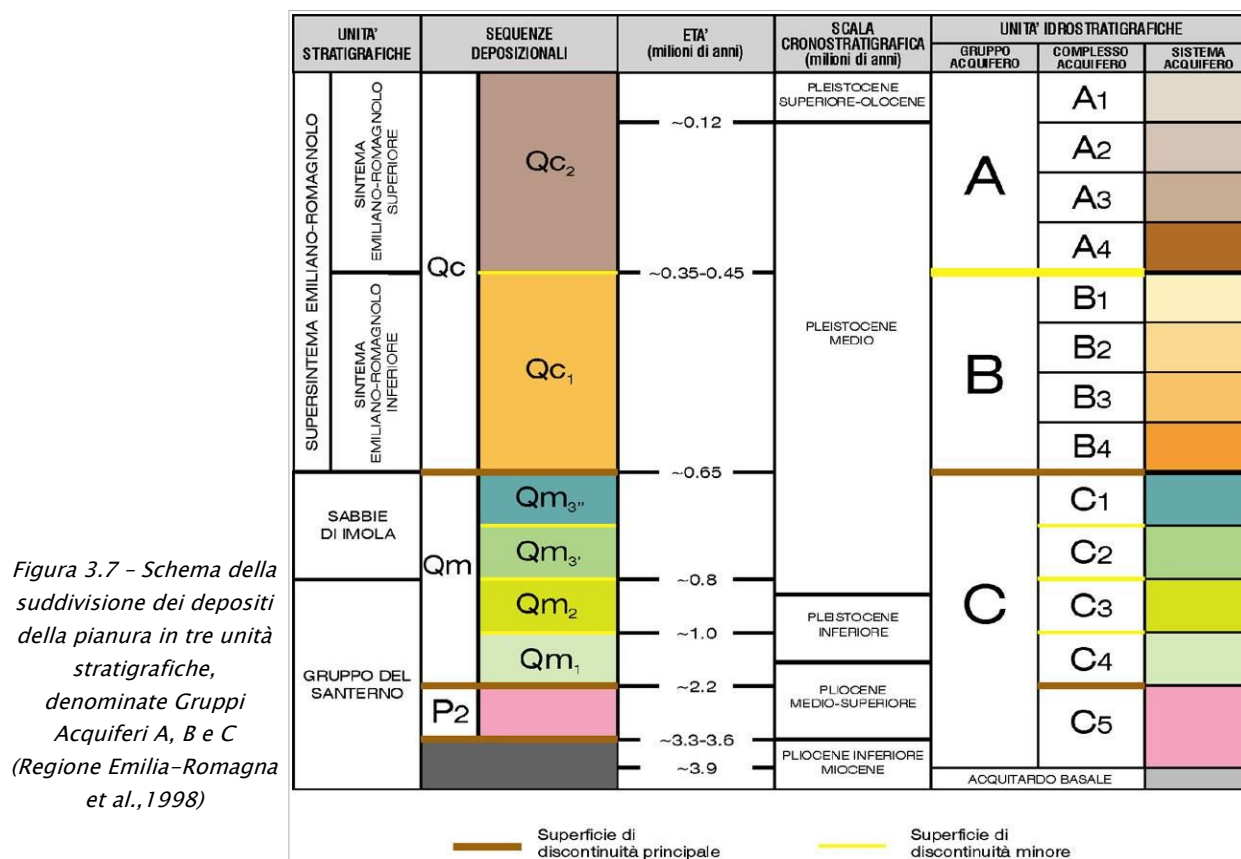
La porzione occidentale della provincia di Bologna si conferma come il territorio più subsidente, nonostante continui la tendenza, già in atto da alcuni decenni, verso una progressiva riduzione degli abbassamenti. Persiste, infatti, un'ampia area a ridosso della città di Bologna, con una superficie di oltre 500 km², con un abbassamento medio di circa 15 mm/anno e punte massime di oltre 30 mm/anno in corrispondenza di Sala Bolognese, Lavino di Sotto e dell'area tra Lavino di Mezzo e Anzola dell'Emilia; di oltre 35 mm/anno in corrispondenza della cassa di espansione a ridosso del Fiume Reno nei pressi di Malacappa.

Come risulta evidente dagli stralci cartografici sopra riportati, nel territorio comunale di Anzola le due zone più critiche sono posizionate nella estremità settentrionale (S. Giacomo del Martignone) con tassi di subsidenza maggiori di 30 mm/anno ed anche oltre 40 mm/anno nel periodo 1992–2000, e la zona sud-est nei pressi della via Emilia con valori compresi tra 25 e 30 mm/anno.

Nella porzione occidentale del territorio comunale si evidenzia un miglioramento rispetto alla situazione del periodo 1992–2000.

3.5 Idrogeologia

Riprendendo quanto scritto nella Relazione di MS 2014, per la corretta interpretazione e descrizione idrogeologica dell'area si può fare riferimento alla figura 3.7 che fornisce uno schema di comparazione tra la nomenclatura utilizzata in letteratura nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute classicamente, le sequenze deposizionali e la denominazione delle unità idrostratigrafiche proposta più recentemente.



I rilievi piezometrici eseguiti nell'area per il presente studio di microzonazione sismica e i numerosi dati estratti dalle relazioni geologiche consultate presso l'archivio comunale, confermano l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un complesso di falde superficiali ed un complesso di falde profonde come evidenziato nella sezione idrogeologica 31 riportata nell'allegato 1, tratta dal Progetto Riserve idriche sotterranee con l'individuazione dei Gruppi acquiferi A, B e C.

In particolare, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale i dati desunti dal Quadro Conoscitivo del PSC di Anzola dell'Emilia indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1,00 m e 3,00 m di profondità dal piano di campagna ed una alimentazione che avviene tramite l'infiltrazione delle acque meteoriche dalla superficie (Tav. 9a/b/c del Quadro conoscitivo del PSC associato) (Franchi, 2008). Occorre inoltre rammentare che l'alveo del torrente Samoggia nei pressi delle frazioni Ponte Samoggia e S. Maria in Strada risulta inforato nelle sue alluvioni più recenti fino a circa 4÷6 metri, costituendo un asse di drenaggio della falda e dunque modificando localmente il campo di moto sotterraneo.

Gli esiti di soggiacenza della prima falda, opportunamente controllati anche con le indagini eseguite per lo studio di MS, sono stati implementati, come vedremo, nelle simulazioni numeriche di verifica della liquefacibilità (cfr. Capitolo 7).

Per quanto riguarda l'acquifero profondo, dalle misure effettuate nell'ambito del Quadro conoscitivo del PSC associato (Franchi, 2008) si rileva un livello statico che si attesta a profondità variabili mediamente comprese tra 15,00 m ed i 30,00 m dal piano campagna. Le curve isopiezometriche presentano andamento decrescente da sud verso nord, con valori massimi nella zona di Anzola Emilia (40,0 m s.l.m.) e valori minimi nella zona nord del territorio comunale di Crevalcore (11.0 m s.l.m.). Come evidenziato dalla sezione idrogeologica 31 riportata nell'allegato 1, il territorio di Anzola è caratterizzato da una predominanza di acquitardi in accordo con i dati stratigrafici disponibili.

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Dati pregressi

La fase iniziale di questo lavoro è stata agevolata dalla disponibilità della banca dati georeferenziata già elaborata per lo studio di MS 2014 (livello 2). L'archivio già disponibile comprende un vasto archivio di indagini geognostiche/geofisiche pregresse, i cui dati sono stati messi a disposizione da diversi soggetti:

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

In particolare, per lo studio di MS 2014 è stato effettuato un approfondito lavoro di ricerca presso l'archivio cartaceo presente presso la sede del Comune di Anzola dell'Emilia, contenente pratiche urbanistiche, edilizie e di deposito del cemento armato; sono pertanto state estratte tutte le relazioni geologiche e le relative indagini geognostiche dal 2009 fino all'epoca dello studio e, in maniera mirata, alcune relazioni geologiche antecedenti, relative ad aree rivelatesi, nel corso dello studio, di particolare interesse per la caratterizzazione geologica del sottosuolo.

TIPOLOGIA	QUANTITA'
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	252
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	9
Prove penetrometriche statiche con piezocono	41
Prove penetrometriche dinamiche leggere	22
Prove penetrometriche dinamiche pesanti	1
Prove penetrometriche in foro (SPT)	1
Sondaggi a carotaggio continuo	42
Sondaggi a distruzione di nucleo	12
Pozzi per acqua	73
Misure di microtremore a stazione singola	78
Extended Spatial AutoCorrelation (ESAC)	2
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	12
Refraction microtremor (REMI)	1

Tabella 4.1 - Numero di indagini pregresse per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio di MS 2014 (livello 2)

Nella tabella 4.1 è riportata una sintesi dei dati delle indagini pregresse utilizzate nello studio di microzonazione 2014 (livello 2) e archiviate nella banca dati. Il numero totale delle indagini pregresse disponibili è 546, di cui 186 provenienti dalla banca dati geognostica regionale e 378 raccolte e informatizzate per il presente studio. Sono state inoltre consultati i risultati di indagini realizzate nei comuni limitrofi a breve distanza dal confine. Alcune di queste, sebbene non siano riportate nella carta delle indagini, sono risultate utili per integrare i dati presenti nell'area di Anzola dell'Emilia.

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

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto quindi osservare che buona parte del territorio comunale, ed in particolare la sua porzione urbanizzata, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro litostratigrafico tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale, come dettagliato al capitolo 5.

Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte ad accertare la profondità del bedrock sismico dell'area e a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio almeno nei primi trenta metri di profondità (V_{s30}).

Relativamente alla qualità dei dati, è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile è stata quindi fatta una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio.

4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica 2014 (livello 2)

Al fine di caratterizzare le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche previste dal Piano Strutturale Comunale e le zone dell'urbanizzato che risultavano meno conosciute dal punto di vista geomeccanico e geofisico, sono stati integrati i dati pregressi con specifiche campagne di indagini.

In particolare sono state eseguite:

- n. 7 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU) → le prove

penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) sono state eseguite con punta conica con apertura di 60° e superficie di 10 cmq per la misurazione della resistenza di punta (Q_c) e da manicotto di frizione (friction jacket), con superficie di 150 cmq per la misurazione dell'attrito laterale locale (F_s); le letture sono eseguite ogni centimetro di avanzamento. Le prove sono state realizzate utilizzando uno strumento penetrometrico montato su di un mezzo cingolato leggero del tipo PAGANI TG63-200 autoancorante, con cella di carico elettrica da 20t con sistema di acquisizione dati "PAGANI".

I risultati delle penetrometrie statiche sono elaborati e rappresentati in forma di grafico (allegato 2), dove sono riportati gli andamenti dei valori di Q_c (resistenza alla punta), F_s (resistenza attrito laterale locale) e U (pressione nei pori).

Le prove sono state ubicate in corrispondenza dei centri abitati presenti nel territorio comunale tenendo conto delle trasformazioni urbanistiche previste. In particolare 4 prove sono state realizzate presso l'abitato di Anzola dell'Emilia, una in località Ponte Samoggia, una in località Santa Maria in Strada e una in località San Giacomo del Martignone.

- n. 5 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) → ciascuna da uno stendimento sismico di superficie composto da 24 geofoni da 4.5 Hz (linee 1 e 2) e da 21 geofoni (linea 3) interdistanti 2.5 m, per una lunghezza complessiva di 57.5 m. Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare da 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0.5 millisecc. e il tempo di registrazione è stato fissato in 8 secondi.

La fase di processing è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza del segnale sismico (curva di dispersione sperimentale).

Dall'analisi della curva di dispersione ottenuta, si può poi risalire alla determinazione delle caratteristiche dei terreni investigati, individuando una crescita della velocità delle onde di Rayleigh al diminuire della frequenza (e dunque all'aumentare della profondità).

L'elaborazione della prova ha fornito un log sismico posizionato al centro della sezione dal quale sono stati poi ricavati i vari orizzonti sismo-stratigrafici a cui è stato associato il valore della velocità V_s direttamente misurata, consentendo di ottenere la V_{s30} , cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo.

- n.2 Extended Spatial AutoCorrelation (ESAC) → Per poter disporre di punti di misura delle velocità delle onde di taglio a profondità superiori a 30 metri nell'area comunale, sono state eseguite 2 indagini geofisiche con tecnica ESAC.

L'antenna sismica (seismic array) è una configurazione di sensori sismici distribuiti secondo geometrie variabili sull'area di indagine. Le registrazioni di rumore effettuate dai singoli sensori vengono combinate mediante una tecnica ESAC che mette in evidenza la coerenza di fase delle varie registrazioni. Se si utilizzano solo sensori verticali, la componente del segnale identificata da questo sistema di acquisizione risulta essenzialmente costituita dalla combinazione dei diversi modi di vibrazione delle onde di Rayleigh. Sebbene non esistano limitazioni alla profondità di esplorazione di questo metodo di analisi, in realtà si può assumere che la massima profondità di esplorazione, anche in condizioni ottimali, sia dell'ordine di grandezza del diametro dell'array (da D a $2D$ circa).

Nello specifico alcune caratteristiche strumentali e ambientali possono limitare e condizionare tale metodologia di indagine come la frequenza propria dei sensori utilizzati e

la struttura di velocità del sottosuolo indagato. Infatti, in presenza di forti variazioni di impedenza sismica in corrispondenza della transizione fra i sedimenti soffici superficiali e il basamento rigido, l'energia associata alle onde superficiali tende concentrarsi nella parte più superficiale del terreno rendendo la curva di dispersione sostanzialmente insensibile alle caratteristiche del basamento.

La metodologia di indagine prevede che i sensori registrino il rumore di fondo (detto anche "microtremore") prodotto da sorgenti naturali e antropiche. Per l'acquisizione del rumore ambientale con l'Antenna Sismica sono stati utilizzati 24 geofoni da 4.5 hz posti con una configurazione a croce con 12 ricevitori per braccio interspaziati di 5 metri. Per l'analisi ed interpretazione dei dati sismici acquisiti è stato utilizzato il codice di calcolo ESAC del software Geopsy.

Le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo vengono ottenute a partire da una analisi di correlazione fra i segnali registrati dai diversi sensori alle diverse frequenze (funzione di coerenza). Utilizzando opportune procedure di analisi è possibile ricavare da queste misure più curve di dispersione delle onde di Rayleigh presenti nel rumore sismico ambientale.

Dato che la forma delle curve di dispersione dipende dalle variazioni delle velocità delle onde S con la profondità, risulta quindi possibile stabilire una relazione fra la forma delle curve di dispersione e la velocità delle onde S nel sottosuolo. Questa relazione è individuata da un processo di inversione delle curve di dispersione ottenute con l'obiettivo di ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio. Tale operazione è stata svolta in maniera iterativa fino a raggiungere il fitting migliore fra curve sperimentali e curve calcolate. L'inversione delle curve di dispersione è stata inoltre effettuata in maniera congiunta ai rapporti spettrali H/V realizzati nella medesima area in modo da avere un maggiore controllo sul fitting e quindi un dato sperimentale più efficiente.

- n. 63 misure di microtremore a stazione singola (HVSR) → le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale Tromino e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarellò e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole (10-15 m/s²), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSR – horizontal to vertical spectral ratio). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

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

A supporto dello studio di MS 2014 sono state eseguite 63 misure, di cui 7 realizzate da Progeo s.r.l., in associazione alle indagini MASW e ESAC, e 56 dallo Studio Tarabusi.

Progeo s.r.l. ha utilizzato un tromografo digitale SARA modello SL07. L'acquisizione dati è stata fatta con frequenza di campionamento di 200Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti per tutte le registrazioni. Lo Studio Tarabusi ha invece utilizzato due tromografi digitali TROMINO, modelli Studio e Engy. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti.

Questa campagna di indagine geofisica, proprio perché così estesa sul territorio comunale, è risultata molto importante ai fini della caratterizzazione sismica dei terreni, in quanto ha permesso verificare l'eventuale presenza di aree soggette possibili fenomeni di risonanza, anche significativi, originati da contrasti di impedenza all'interno dei depositi, di mapparne in dettaglio l'andamento e di stimarne con buona precisione la profondità. In particolare, come dettagliato nel capitolo 5, le misure eseguite non hanno evidenziato aree a forte contrasto di impedenza: infatti in tutte le misure l'ampiezza dei picchi di H/V è risultata inferiore a 2,5 e frequentemente inferiore a 2.

4.3 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica 2019 (livello 3)

Per espletare gli approfondimenti di “livello 3”, si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico e di laboratorio. Si è cercato di concentrare le indagini soprattutto nelle aree urbanizzate/urbanizzabili e più in particolare nelle “zone di attenzione” per instabilità (per liquefazioni) definite con il precedente studio di MS 2014, come riportato nella figura 4.1.

Nel Capoluogo è stato inoltre eseguito un sondaggio a carotaggio continuo, con recupero di campioni anche indisturbati (utilizzati anche per speciali prove di laboratorio dinamiche di “colonna risonante”). Il foro è stato inoltre predisposto per la misura diretta delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_s e V_p) spinto fino a -40 metri.

Nelle zone “liquefacibili” individuate dallo studio di MS 2014 sono state infine eseguite 13 ulteriori prove penetrometriche CPTU finalizzate a verifiche quantitative della liquefacibilità. Ai fini delle elaborazioni delle RSL si sono eseguiti 4 ulteriori stendimenti ESAC-SPAC (con array più ampio rispetto ai precedenti) e 10 acquisizioni HVSR con lunghi tempi di registrazione di 60 minuti. Si riportano qui di seguito descrizioni più dettagliate sulle indagini eseguite:

- ✓ *n. 1 sondaggio a carotaggio continuo* → spinto fino a 40 metri di profondità, è stato eseguito nel Capoluogo, nell'area verde di via Pertini. Si è utilizzata una sonda cingolata. (foto 4.1). La terebrazione è proceduta con l'utilizzo di carotieri di diametro pari a 101 mm di tipo semplice T1 e a corona normale, e hanno consentito il campionamento in continuo per la conseguente ricostruzione stratigrafica del terreno. Sono state effettuate manovre di carotaggio di lunghezza <1,5 m per consentire il miglior recupero dei sedimenti in termini

di quantità e di minor disturbo. Il carotaggio estratto è stato sistemato in cassette catalogatrici in PVC per la successiva conservazione in luogo riparato.

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



Foto 4.1 - Esecuzione del sondaggio nel Capoluogo (area verde via Pertini)

- ✓ n. 13 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU) → realizzate dallo Studio scrivente con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su semovente cingolato “Pagani”, quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.2). Le penetrometrie sono state spinte fino a -20 metri di profondità per definire le caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma.



Foto 4.2 - Prova CPTU eseguita nel Capoluogo (area verde via Pertini)

Le prove elettriche consentono una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).

- ✓ *n. 4 prove sismiche in array bidimensionale ESAC (foto 4.3)* → il metodo ESAC (Auto Correlazione Spaziale Migliorato) è un'estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957 ed è utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10–15Hz), la velocità di fase apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. L'utilizzo delle tecniche passive sull'analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione V_s può essere ricavata indirettamente dall'analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere i profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio "S" più profonde. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D (foto 4.3), impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz).

La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuata secondo un array bidimensionale, disposti a "L" secondo lo schemi riportati nelle schede delle prove e tuttavia con una spaziatura di 5 metri.



*Foto 4.3 - Prova ESAC
eseguita nella frazione S.
Giacomo del Martignone*

- ✓ *n. 10 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola* → per queste prove, già descritte in precedenza, i tempi di registrazione sono stati prolungati fino a 60' per un ulteriore controllo degli spettri di amplificazione, in particolare alle basse frequenze.

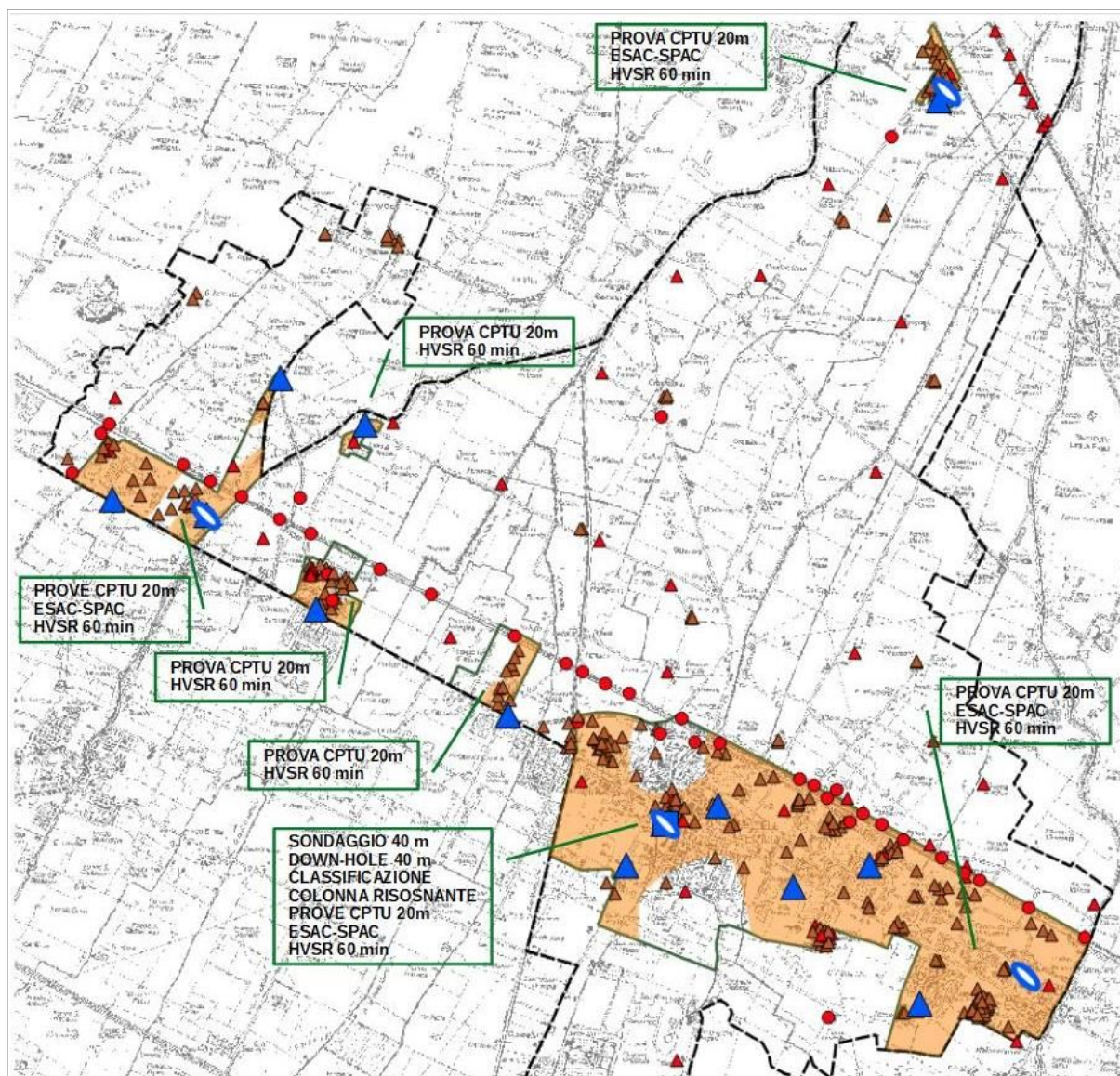


Figura 4.1 – Localizzazione schematica delle indagini eseguite per la MS 2019 (approfondimenti di “livello 3”). le aree in arancio corrispondono alle “zone di attenzione” per liquefazioni

- ✓ n. 3 prove di colonna risonante (RC) → Eseguite dal laboratorio ISMGEO su campioni rappresentativi dei sedimenti fini riscontrabili nell'area del Capoluogo. La prova di colonna risonante consente di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a 10–5%) fino a circa 10–2%. Viene largamente impiegata in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche (sisma), per le analisi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Sono prove particolarmente utili per le analisi numeriche di risposta sismica locale. Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X–Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza (figura 4.2). I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono

utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.

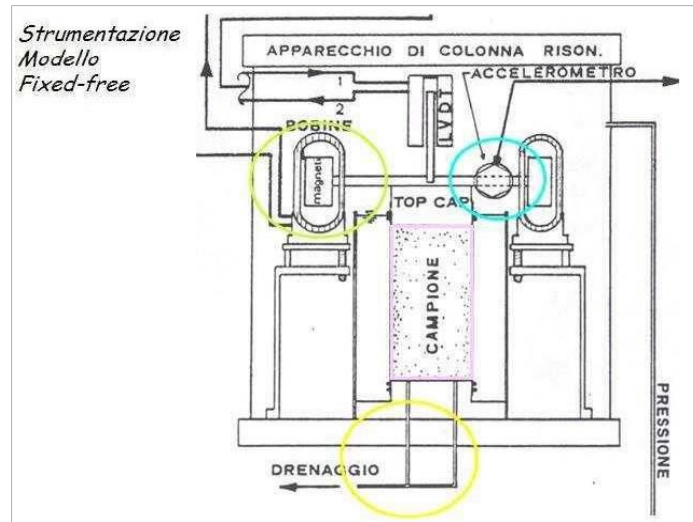


Figura 4.2 - Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO)

- ✓ *n. 6 prove di classificazione* → sono state effettuate prove di classificazione dei sedimenti, prelevati dai campioni indisturbati e dai campioni disturbati del sondaggio. Le prove di classificazione sono state eseguite secondo gli usuali standard di procedura per campioni di terreni: AGI (Associazione Geotecnica Italiana), UNI e ASTM (Volume 04.08 Soil and Rock). Le prove hanno stimato contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo.

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Per lo studio di microzonazione sismica di Anzola dell'Emilia si è potuto disporre di molti punti di controllo, pur con evidenti concentrazioni in alcune aree, anche tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere una attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20–30 metri di sottosuolo nelle aree urbanizzate.

In generale, la litostratigrafia del sottosuolo desunta dalle indagini conferma il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3, con la presenza, a partire dal piano di campagna, di prevalenti spessori di terreni limo–argillosi, con locali livelli di sabbie limose e limi sabbiosi, più frequenti nei primi 10 metri. In genere, al di sotto dei 10 metri si assiste ad un aumento della frazione argillosa dei depositi. Sono localmente presenti orizzonti ghiaioso–sabbiosi ad addensamento medio, in genere di spessore limitato e al di sotto dei 20 metri di profondità. Tale stratigrafia generale è stata ulteriormente confermata, tuttavia le nuove indagini e gli approfondimenti espletati hanno consentito una più accurata classificazione modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

Nei paragrafi seguenti, vengono sintetizzate le principali informazioni relative al sottosuolo meno profondo e al sottosuolo più profondo, riprendendo e integrando quanto già riportato nella Relazione descrittiva redatta per lo studio di MS 2011 (geol. G. Tarabusi).

5.1 Litologie sub–affioranti

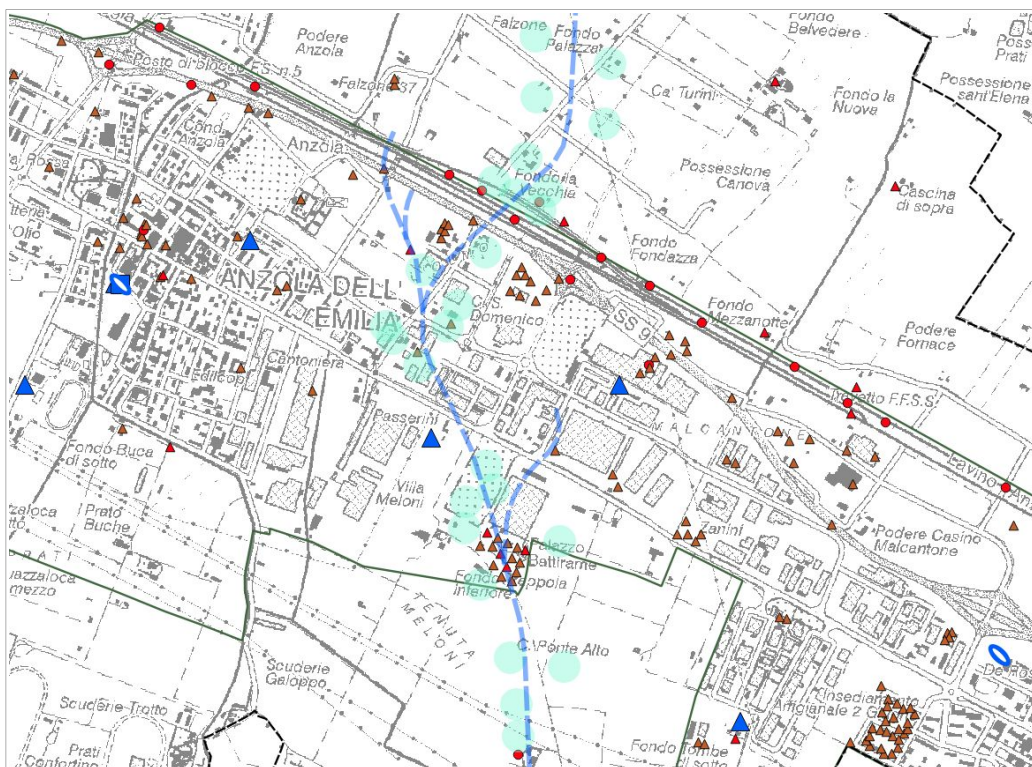
5.1.1 Area Capoluogo e Lavino di Mezzo

Sulla base dei numerosi dati geognostici disponibili, confermati dai risultati delle prove CPTU realizzate per il presente lavoro (CPTU1 e CPTU2), la porzione orientale dell'area del Capoluogo e la frazione di Lavino di Mezzo risultano caratterizzate dalla presenza, nei primi 6–10 metri di profondità, di facies di canale e argine attribuibili al Torrente Lavino e caratterizzati da alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose ("SM es" nella tavola 2), alternati a limi argillosi (generalmente prevalenti). Al di sotto dei primi 6–10 metri si osserva un generale aumento della frazione argillosa dei depositi con più rari livelli limo–sabbiosi. Oltre i 20 metri si possono rinvenire, localmente, orizzonti ghiaioso–sabbiosi ad addensamento medio, di spessore in genere comunque limitato.

Questa porzione di territorio è stata attribuita alla zona MOPS 2005 (tavola 4 e paragrafo 8.4) ed è inclusa nelle "Zone di attenzione per liquefazioni" (tavole 4, 6, 7 e 8), tuttavia sulla base degli esiti delle ulteriori indagini CPTU e delle verifiche quantitative della liquefacibilità si è potuto escludere tale criticità in un ampio settore compreso tra Lavino di Sotto e il Capoluogo, per l'assenza di intervalli sabbiosi superficiali significativi e per esiti in termini di LPI (Indice del Potenziale di Liquefazione) pressochè "nulli" o "bassi" (MOPS 2002).

Procedendo verso ovest, gli ulteriori approfondimenti hanno consentito di delimitare un settore caratterizzato nei primi metri (fino a 4÷5 metri) da limi sabbiosi e sabbie sciolte prevalenti saturate e pertanto localmente caratterizzate rischio di liquefazione “elevato” (MOPS 2004). Questi depositi sabbiosi superficiali e sciolti sono attribuibili a tracimazioni relativamente recenti del Rio Cavanella, il cui corso risulta ora ben regimato e tombato. Il controllo delle quote topografiche ha evidenziato la presenza di un blando “alto” morfologico (0,60÷100 cm) rispetto alle quote circostanti che potrebbe corrispondere a una sorta di lieve dosso fluviale attribuibile a questo corso d'acqua (figura 5.1).

Figura 5.1 – Ricostruzione dell'alveo abbandonato del Rio Cavanella basata sulla morfologia. In azzurro sono evidenziate le quote topografiche CTR più elevate



Tutto il settore occidentale del Capoluogo è invece caratterizzato da sedimenti limi argillosi prevalenti, debolmente sabbiosi, con un generale aumento della frazione argillosa dei depositi all'aumento della profondità. Le ulteriori penetrometrie CPTU eseguite per questo studio non hanno riscontrato livelli sabbiosi significativi (con indici di potenziale liquefazioni pressochè “nulli”). Oltre i 20 metri, le terebrazioni evidenziano la presenza di orizzonti ghiaioso-sabbiosi: ciò è stato confermato dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito per questo studio nell'area verde adiacente alla via Pertini, con spessore di ghiaie potente circa 8 metri e attraversato da circa -25,5 metri dal p.c. tutto il settore occidentale del Capoluogo è stato attribuito alla MOPS 2001.

5.1.2 Palazzina di Sopra

I dati geognostici pregressi, più abbondanti nella porzione orientale, indicano la presenza, in quest'area, di prevalenti limi argillosi (“ML pi” nella tavola 2) debolmente sabbiosi, con un generale aumento della frazione argillosa dei depositi all'aumento della profondità. Il contesto deposizionale più recente è dunque correlabile alla successione litotecnica del Capoluogo.

L'ulteriore prova CPTU eseguita per questo studio nel settore orientale conferma l'assenza di livelli sabbiosi significativi (LPI "nullo"), pertanto tutto il comparto è stato attribuito alla MOPS 2002 non liquefacibile.

5.1.3 Area ex Euroceramica

I dati geognostici pregressi indicano la presenza, in quest'area, di prevalenti livelli limo-argillosi ("ML pi" nella tavola 2) con locali livelli limo-sabbiosi di spessore variabile, con un generale aumento della frazione argillosa dei depositi all'aumento della profondità. Oltre i 18-20 metri si possono rinvenire, localmente, orizzonti ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio, di spessore in genere comunque limitato. Nella porzione meridionale, l'ulteriore prova CPTU esclude la presenza di livelli sabbiosi liquefacibili (LPI "nullo") pertanto tutto il comparto è stato attribuito alla MOPS 2002 non liquefacibile.

5.1.4 Ponte Samoggia

Gli ulteriori controlli e le nuove penetrometrie CPTU eseguite per questo lavoro hanno evidenziato la prevalenza dei sedimenti limoso argillosi con esiti di potenziale liquefacibilità "nullo". Al di sotto dei primi 6-10 metri si osserva un generale aumento della frazione argillosa dei depositi con più rari livelli limo-sabbiosi. Oltre i 20 metri si possono rinvenire, localmente (più diffusi nella porzione occidentale dell'ambito), orizzonti ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio, di spessore in genere comunque limitato.

È stata tuttavia confermata una zona adiacente al Torrente Samoggia (MOPS 2003), caratterizzata da limi sabbiosi nei primi 4÷5 metri di profondità, di facies di canale e argine attribuibili al Torrente Samoggia. Si tratta di depositi granulari recenti insaturi in quanto l'alveo del torrente risulta incassato nelle sue alluvioni per oltre 4÷5 metri di profondità e funge da asse di drenaggio ormai definitivo della tavola d'acqua sotterranea.

5.1.5 Santa Maria in Strada

In questo ambito di estensione ridotta e con a bassa densità abitativa, sono pochi i dati geognostici disponibili, tuttavia sono state eseguite due prove CPTU per gli studi di MS di livello 2 e 3. Gli approfondimenti e in particolare la nuova CPTU eseguita per questo studio nella porzione nord-occidentale ha confermato, nei primi 4 metri di profondità, alternanze di limi sabbiosi e sabbie di facies di canale e argine attribuibili al Torrente Samoggia ("SM es" nella tavola 2), alternati a limi argillosi (MOPS 2003). Questi sedimenti granulari risultano tuttavia insaturi in quanto la falda risulta depressa dall'azione denante del torrente, incassato nelle sue alluvioni fino a 4÷5 metri di profondità. Anche in questo caso le verifiche di liquefacibilità hanno evidenziato in potenziale di liquefazione "nullo".

5.1.6 San Giacomo del Martignone

Tale ambito, il più settentrionale del territorio indagato e distante dai restanti ambiti, che si concentrano sostanzialmente tutti lungo la via Emilia o a breve distanza da essa, risulta ben

caratterizzato da dati geognostici pregressi ed è stato indagato da prove CPTU per gli studi di MS di livello 2 e 3. Le terebrazioni evidenziano una netta prevalenza di sedimenti limoso argillosi ("ML pi" nella tavola 2) tuttavia con locali livelli limo-sabbiosi di spessore variabile. Oltre i 20 metri si possono rinvenire, localmente, orizzonti ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio, di spessore in genere comunque limitato. Come vedremo, gli approfondimenti e le verifiche di liquefazione hanno tuttavia escluso possibilità di liquefazioni significative (LPI "basso") e pertanto l'areale è stato incluso nella zona MOPS 2002.

5.2 Sottosuolo profondo

Per quanto riguarda il sottosuolo più profondo, i fondamentali dati di riferimento sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale. In tal senso, sono disponibili numerose sezioni geologiche, le cui stratigrafie sono state incluse nella B/D geognostica regionale.

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

- n. 13 (di riferimento per l'area produttiva "ex Euroceramica" e San Giacomo del Martignone);
- n. 31 (di riferimento per il Capoluogo e per le località Ponte Samoggia, "ex Euroceramica" e Lavino di Mezzo);
- n. 44 (di riferimento per il Capoluogo);
- n.50 (di riferimento per la località San Giacomo del Martignone).

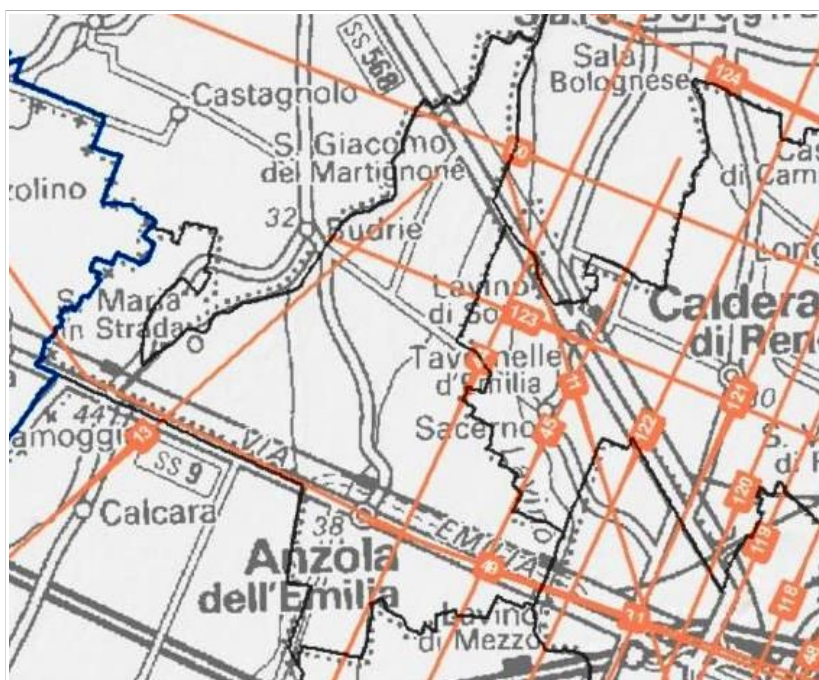
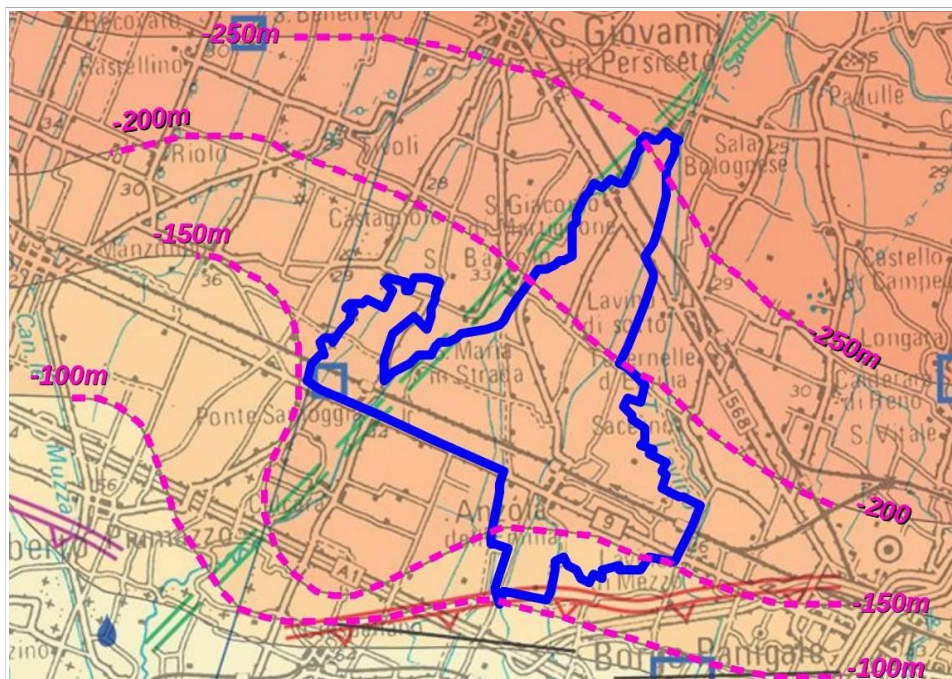


Figura 5.1 - Tracce delle sezioni geologiche che attraversano il territorio comunale di Anzola dell'Emilia (sezioni pubblicate nel sito del SGSS regionale)

Un importante supporto alla modellazione geologico – sismica profonda è inoltre fornito dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000). Lo stralcio di tale cartografia, riprodotto in figura 5.2, evidenzia la profondità della base del Sintema Emiliano – Romagnolo Superiore AES (cfr. capitolo 3). Nel territorio di Anzola dell'Emilia gli spessori stimati del Sintema AES (considerando le quote del piano campagna) variano da circa 190 metri nel settore sud a circa 280 metri nel settore settentrionale.

Figura 5.2 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe (RER, 2016). È sovrapposto il confine comunale di Anzola dell'Emilia e vengono rimarcate le isobate della base del Sintema AES (m s.l.m.)



Dal punto di vista più propriamente sismostratigrafico, le registrazioni dei microtremiti sismici (HVSr) eseguite per lo studio di MS 2014 e le ulteriori registrazioni eseguite per questo studio hanno evidenziato l'assenza di significativi contrasti di impedenza e i bassi valori di F_0 (<1 Hz) riscontrati in tutte le misure di microtremiti eseguite indicano che nell'intera area di studio non sono presenti orizzonti ghiaiosi importanti almeno entro i primi 90–100 metri di profondità. La stratigrafia, pertanto, può essere assimilata a quelle che risultano da diversi sondaggi profondi (tavola 2), che indicano un'alternanza di depositi limo-argillosi, prevalenti, e limo-sabbiosi, con locali livelli ghiaioso-sabbiosi di spessore comunque limitato.

Occorre precisare che il sondaggio eseguito in via Pertini ha attraversato uno spessore ghiaioso potente circa 8 metri: questo spessore granulare, sembra costituire un blando riflettore sismico come dimostrato dalle registrazioni HVSr (figura 5.3) eseguite sia nell'area verde (registrazione di 60'), sia nelle prove limitrofe (settore occidentale del Capoluogo), con una tenue amplificazione spettrale a circa 2,2 Hz non percepibile nelle registrazioni effettuate a maggior distanza (es. Lavino di Mezzo, figura 5.4). Questo spessore ghiaioso pare inoltre indurre un lieve smorzamento del picco H/V relativo al primo contrasto significativo riscontrato in numerose registrazioni ($0,90 \div 0,95$ Hz) e presumibilmente riconducibile ai depositi granulari (ghiaie e sabbie) situati al tetto dell'unità alluvionale AES6. Per questo motivo, tutto il settore occidentale del Capoluogo è stato incluso nella MOPS 2001

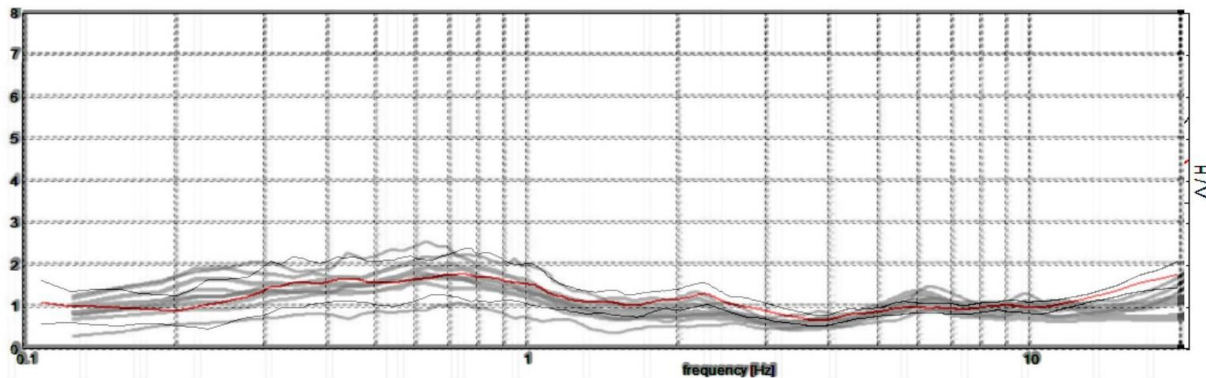


Figura 5.3 - Confronto spettri H/V ricavati da prove tomografiche eseguite nel settore occidentale del Capoluogo. La traccia in rosso corrisponde alla registrazione HVSR di 60' effettuata nell'area verde di via Pertini in prossimità del sondaggio/Down-Hole

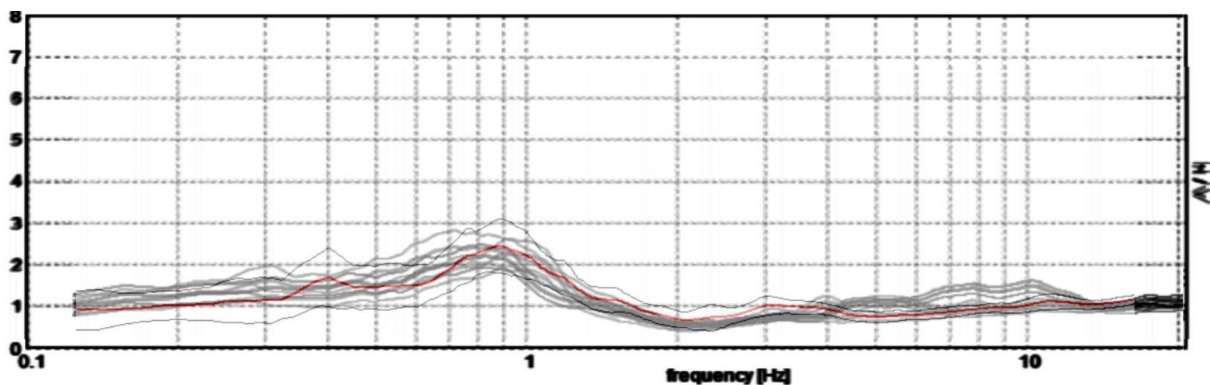


Figura 5.4 - Confronto spettri H/V ricavati da prove tomografiche eseguite presso Lavino di Mezzo. La traccia in rosso corrisponde alla registrazione HVSR di 60' effettuata nell'area verde adiacente alla via Dante Alighieri e in prossimità dello stendimento ESAC/SPAC eseguito nella stessa frazione

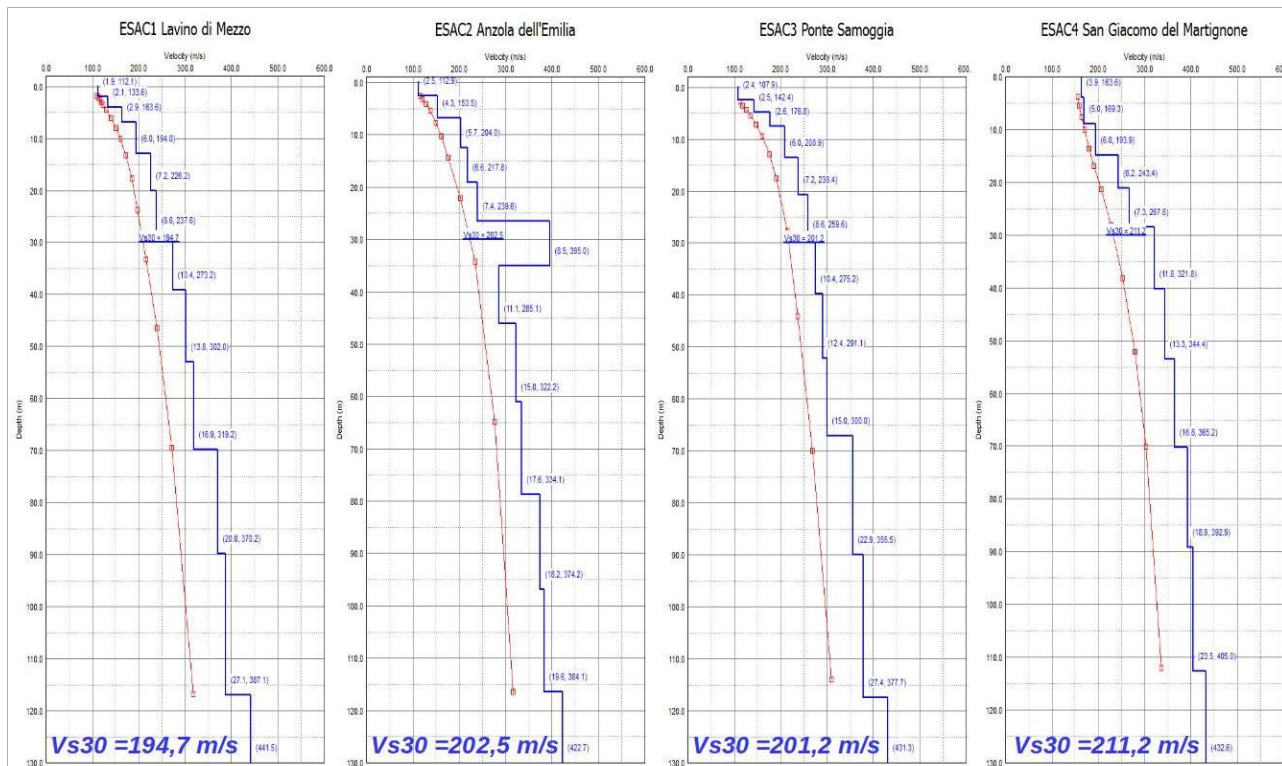


Figura 5.5 - Confronto delle sismostratigrafie ricavate dagli stendimenti ESAC/SPAC eseguiti per questo studio

La velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri risulta sostanzialmente analoga su tutte le aree indagate, sulla base delle indagini MASW e ESAC realizzate sia per gli studi di MS sia per quelle di repertorio, con valori prossimi ai 200 m/s (tavola 5). Per questo studio, sono stati eseguiti quattro ulteriori array sismici bidimensionali ESAC/SPAC con ampiezza delle antenne sufficienti alla ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo fino a profondità di circa 100÷120 metri (figura 5.5). Occorre inoltre rammentare che gli esiti della prova ESAC eseguita nel Capoluogo sono stati ulteriormente controllati e tarati rispetto ai risultati della prova sismica in foro “Down Hole” (DH), eseguita nel sondaggio (area verde via Pertini). La misura diretta DH ha ricavata una V_{s30} pari a 202 m/s.

Il sondaggio a carotaggio continuo e la prova DH sono stati approfonditi fino a -40 metri consentendo di caratterizzare dal punto di vista sismico lo spessore ghiaioso (circa 8 metri) attraversato da -25,5 metri, con V_s media attribuibile a tale spessore pari a circa 340÷350 m/s. Per i sottostanti sedimenti limoso argillosi si sono inoltre ricavati esiti di V_s pari a circa 275 m/s (figura 5.6).

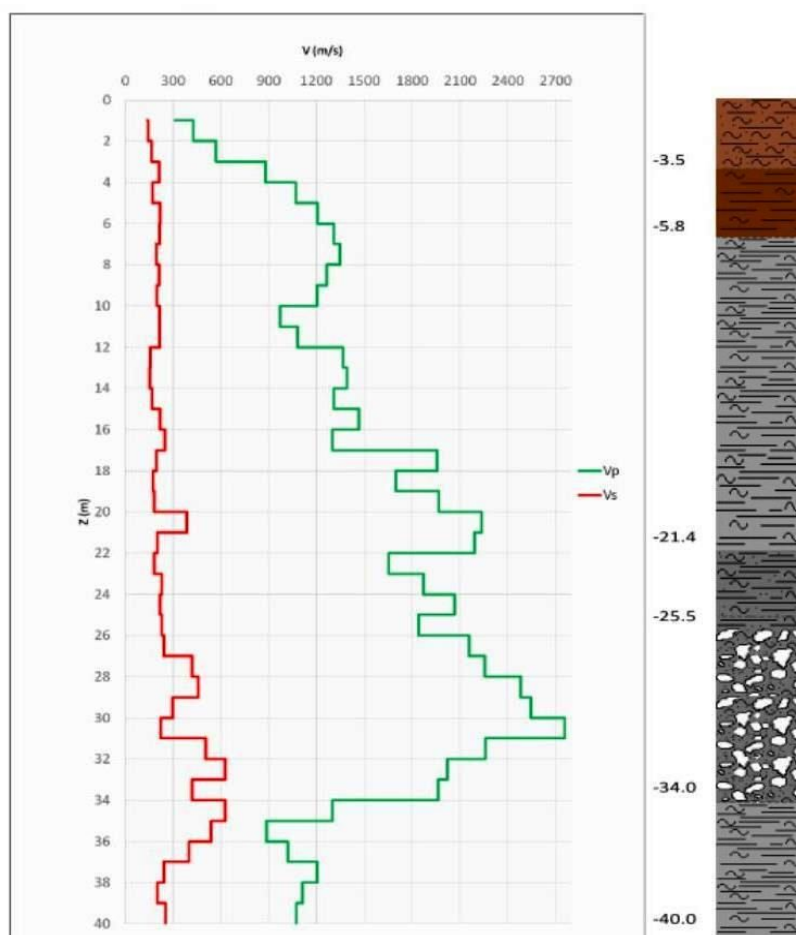


Figura 5.6 - Esiti della prova “DOWN-HOLE” eseguita per questo studio nel Capoluogo (area verde presso via Pertini)

Alle numerose registrazioni HVSR eseguite nel territorio comunale per lo studio di MS 2014 si aggiungono le 10 registrazioni HVSR eseguite con lunghi tempi di acquisizione (60'). Queste prove sono risultate utili per la definizione delle zone omogenee di RSL, inoltre per questo studio sono state analizzate come ulteriore dato di controllo e/o confronto per l'elaborazione dei modelli sismostratigrafici relativi alle simulazioni numeriche della RSL. In tal senso, si

rimanda al Capitolo 7 per ulteriori e elementi descrittivi degli esiti di HVSR e per gli esiti di RSL. Il sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo ha inoltre consentito sia una migliore caratterizzazione tessiturale dei sedimenti attraversati. In particolare la possibilità di ottenere campioni disturbati e indisturbati ha consentito di effettuare prove di laboratorio di caratterizzazione geotecnica (es. tessiture e limiti di Atterberg) e speciali prove di "colonna risonante" (RC), di fondamentale importanza per l'elaborazione dei modelli numerici di RSL del Capoluogo e degli areali limitrofi (cfr. Capitolo 7). Gli esiti di plasticità ottenuti dai campioni argillosi/limosi e gli esiti di CR hanno infatti permesso di ricavare una casistica sito specifica delle proprietà dinamiche dei sedimenti fini (figura 5.7).

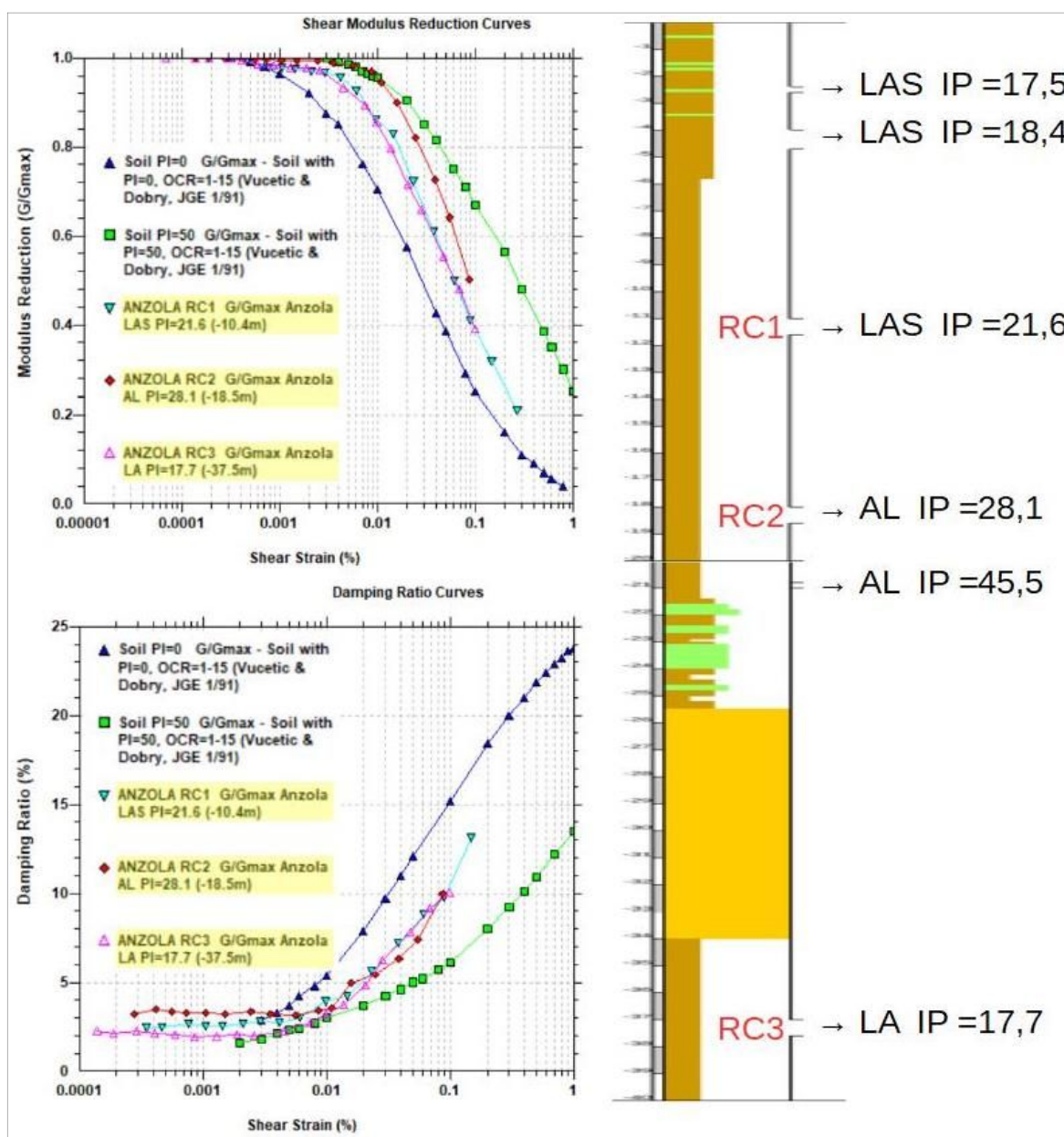


Figura 5.7- A dx: colonna stratigrafica del sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo. Si riportano gli esiti delle prove di laboratorio (caratterizzazione geotecnica) e i punti di prelievo dei campioni indisturbati oggetto di prove di "colonna risonante". A sx: le curve di decadimento dei sedimenti argillosi/limosi di riferimento per le modellazioni numeriche della RSL di Anzola dell'Emilia. (in evidenza le curve sito specifiche)

5.3 Nuove sezioni litotecniche di sintesi elaborate per questo studio

Per questo studio sono state elaborate sezioni litotecniche di sintesi relative al Capoluogo e Lavino di Mezzo (figura 5.8). Le nuove sezioni forniscono la ricostruzione schematica del sottosuolo fino a circa 30÷40 metri sulla base dei dati litostratigrafici desunti dai sondaggi e dalle prove penetrometriche disponibili.

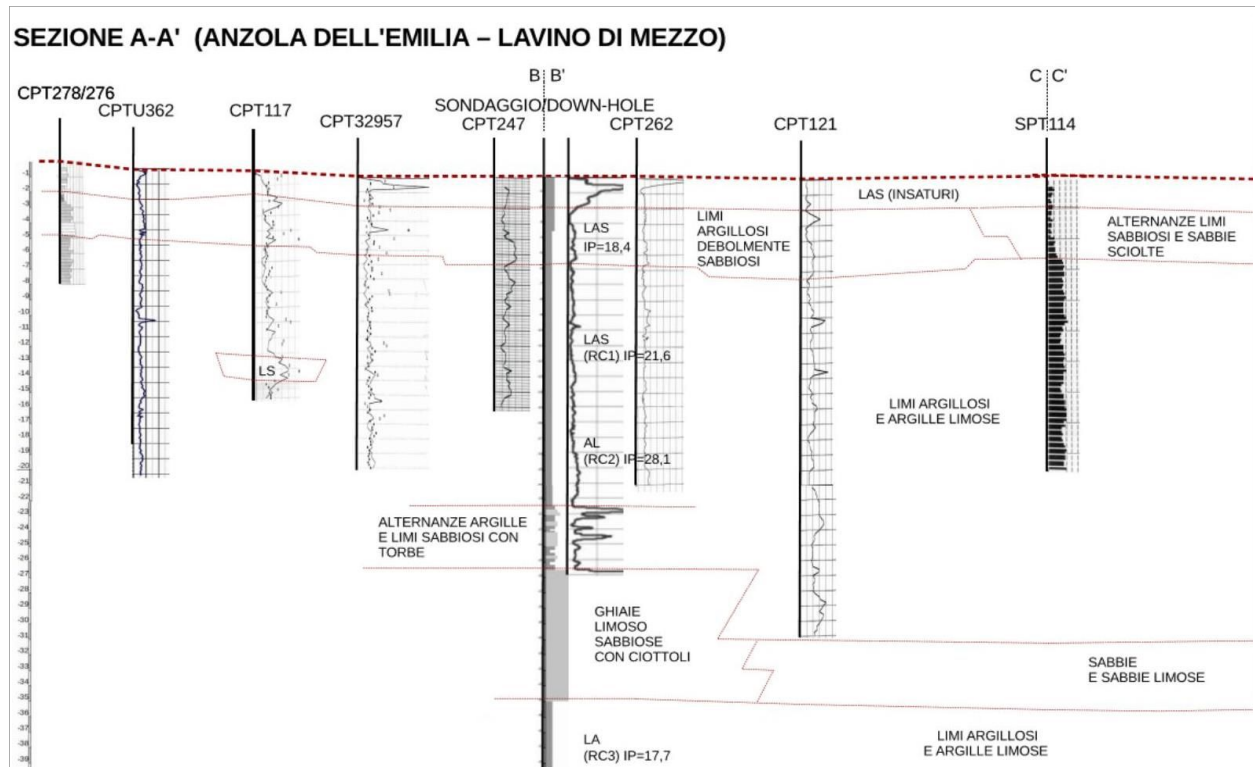


Figura 5.8- Stralcio della sezione A-A' (Settore capoluogo occidentale)

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

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

Si rammenta che la Relazione redatta per lo studio di MS di “livello 2” (G. Tarabusi, 2014) descrive i principali elementi di incertezza riscontrati nell'elaborazione del lavoro: questi argomenti vengono nuovamente ripresi nei successivi paragrafi, in quanto trattasi di elementi essenziali per gli approfondimenti sulla pericolosità sismica espletati con questo ulteriore studio.

6.1 Substrato rigido e la modellazione di RSL

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

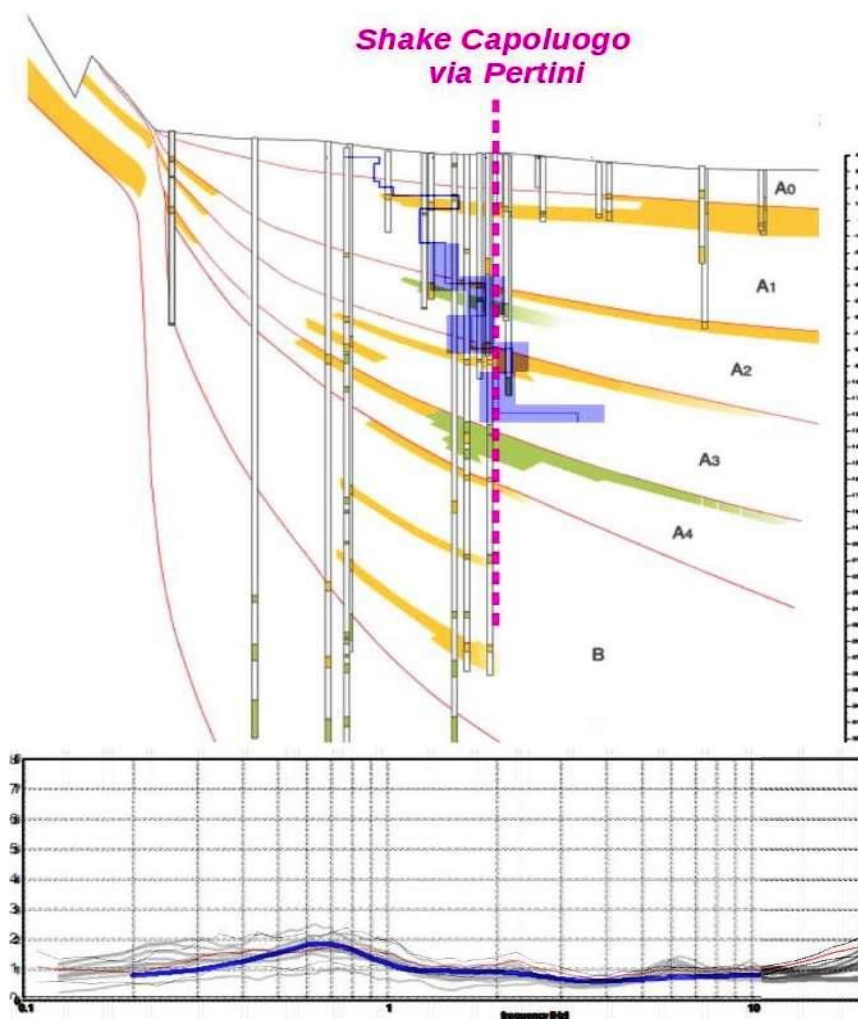
Riprendendo e aggiornando quanto già spiegato nello studio di MS 2014, per la porzione di pianura in esame non risulta semplice identificare univocamente una o più superfici che possano corrispondere al substrato rigido.

Come descritto nel capitolo 5, gli orizzonti ghiaiosi presenti a diverse profondità entro i primi 100 metri, non danno origine a significativi contrasti di impedenza rilevabili con le misure di microtremore eseguite in tutto il territorio comunale.

Tutte le misure di microtremore hanno evidenziato picchi H/V, quasi sempre molto poco pronunciati, a volte anche fusi tra loro, a frequenze comprese tra 0,6 Hz e 0,9 Hz, che possono essere probabilmente correlati con gli spessori ghiaioso sabbiosi indifferenziati alla base del sistema AES (associabili alle frequenze di picco H/V più basse). In alcuni casi, i picchi a frequenze più elevate potrebbero essere associati agli spessori ghiaiosi situati al tetto del "Subsistema di Bazzano (AES6)" di età Pleistocene medio. Il tetto dell'unità AES6 si rinviene a profondità variabili tra circa 75 metri (settore sud orientale) e circa 110 metri (settore nord) e risulta tutttavia caratterizzato da modesta rigidità sismostratigrafica (con V_s comprese tra 400 m/s e 450 m/s).

Per la modellazione numerica della risposta sismica locale, pertanto, il substrato sismico è stato collocato negli spessori ghiaioso sabbiosi della porzione inferiore del sistema AES (alluvioni indifferenziate), sebbene sia ipotizzabile che risulti caratterizzato da valori di V_s che non raggiungono gli 800 m/s (figura 6.1). Nella modellazione di RSL sono stati tutttavia considerati cautelativamente rigidi per definizione dal programma di calcolo Shake 2000 ($V_s > 720$ m/s). La profondità dei modelli elaborati è risultata pertanto variabile da -155 m (es. Lavino di Mezzo) a -170÷175 m (San Giacomo del Martignone; Santa Maria in Strada; ex Euroceramica).

Figura 6.1 – Stralcio sezione geologica RER n. 44 sviluppata in direzione S-N e modello sismostratigrafico rappresentativo del Capoluogo (via Pertini)



6.2 Distribuzione dei livelli limoso sabbiosi e liquefacibilità

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

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

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e della sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);

- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15–20 metri).

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

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

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati durante gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni⁴. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di MS di livello 2 ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove penetrometriche). Lo studio di MS di livello 2 ha cautelativamente individuato ampie zone potenzialmente liquefacibili e per questo motivo le indagini espletate per questo ulteriore approfondimento ha previsto l'esecuzione di 13 ulteriori prove CPTU (oltre al sondaggio eseguito nel Capoluogo, in via Pertini) nelle zone classificate potenzialmente liquefacibili. Si è potuto così disporre di 22 prove CPTU con dati numerici disponibili.

Gli ulteriori approfondimenti hanno pertanto consentito di aggiornare le "zone di attenzione" per liquefazioni già delimitate con lo studio di MS di livello 2, in considerazione del fatto che solamente due punti di controllo hanno effettivamente riscontrato indici di potenziale liquefacibilità significativi. Per quanto già descritto nel paragrafo 5.1, si sono tuttavia conservate ampie due seguenti ampie aree potenzialmente liquefacibili:

- 1) a est del Capoluogo (es. via Carpanelli) per la presenza nei primi metri di limi sabbiosi e sabbie sciolte riconducibili a tracimazioni recenti del rio Cavanella;
- 2) il settore corrispondente alla frazione Lavino di Mezzo per la presenza diffusa nei primi metri di alternanze di limi sabbiosi e limi argillosi e più in profondità (entro i primi 15÷20

⁴ Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

metri) di locali intervalli sabbiosi poco addensati attribuiti a paleocanali e depositi di rotta del limitrofo torrente Lavino.

Si tratta di una delimitazione presumibilmente cautelativa in termini di estensione in ragione della variabilità nella distribuzione dei depositi granulari saturi anche su verticali di indagine molto ravvicinate, il cui reale potenziale di liquefazione dovrebbe essere puntualmente valutato con specifiche indagini geognostiche nelle successive fasi di pianificazione e nella progettazione esecutiva degli interventi.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

7.1 Cenni introduttivi

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

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

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.1), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

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

Per il Comune di Anzola dell'Emilia, lo studio sismico di “Livello 3” ha permesso un ulteriore approfondimento della microzonazione sismica già elaborata nel 2014. Lo studio di MS 2014 aveva infatti consentito l'elaborazione della cartografia delle MOPS, individuando “zone stabili suscettibili di amplificazioni locali” e “zone suscettibili di instabilità” sulla base di approfondimenti di tipo qualitativo (zone potenzialmente liquefacibili). Non sono state invece individuate “zone stabili”. Lo studio espletato nel 2014 ha inoltre consentito l'elaborazione della cartografia di MS di “livello 2”, con una quantificazione semplificata della risposta sismica locale attraverso l'utilizzo degli abachi regionali (cfr. DAL RER 112/2012, alleg. A2).

Gli approfondimenti di “livello 3” sono stati espletati negli areali urbanizzati/urbanizzabili, e in particolare negli areali classificati come “zone suscettibili di instabilità”. Gli ulteriori studi di “livello 3” hanno tuttavia permesso di aggiornare la cartografia MOPS come prevedono gli Standard di MS, v.4.1. Lo studio di MS 2016 ha inoltre consentito, come vedremo, di elaborare le cartografie di microzonazione sismica di “livello3”, attribuendo alle zone i fattori di amplificazione locali calcolati sulla base di modellazioni numeriche di RSL (cfr. DGR 1227/2015).

Le carte di MS di “livello 3” del Comune di Anzola dell'Emilia sintetizzano, infine, gli esiti delle ulteriori verifiche di liquefacibilità (espletate nelle aree classificate potenzialmente liquefacibili, definite nella cartografia MOPS), riportando le “zone di suscettibilità” con indicata la pericolosità di liquefazione attribuita a tale zona (Indice del potenziale di liquefazione).

I successivi paragrafi illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate

per determinare i diversi fattori di amplificazione rappresentativi del territorio studiato e le metodologie utilizzate per determinare quantitativamente la pericolosità delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni individuate nel territorio studiato di Anzola dell'Emilia.

7.2 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo e terzo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. Per lo studio di MS di Anzola dell'Emilia i fattori di amplificazione scelti sono quelli indicati nella DGR regionale n. 2193/2015.

In sintesi, i fattori di amplificazione di riferimento sono i seguenti:

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

7.3 Gli approfondimenti sulla risposta sismica locale (amplificazioni) mediante simulazioni numeriche

Come già scritto, gli approfondimenti di “livello 3” hanno consentito l'elaborazione delle cartografie dei fattori amplificazione delle aree urbane/urbanizzabili, questi ultimi calcolati in parte sulla base di esiti di modellazione numerica della RSL (cfr. DGR 1227/2015).

Sono stati elaborati otto modelli rappresentativi delle zone studiate, con sismostratigrafie definite sulla base delle zone MOPS aggiornate e sulla base delle caratteristiche litotecniche del sottosuolo locale. La figura 7.1 localizza le aree oggetto di specifiche modellazioni numeriche di RSL.

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

I dati di output ricavati dalle analisi numeriche sono schematizzati nella figura 7.2.

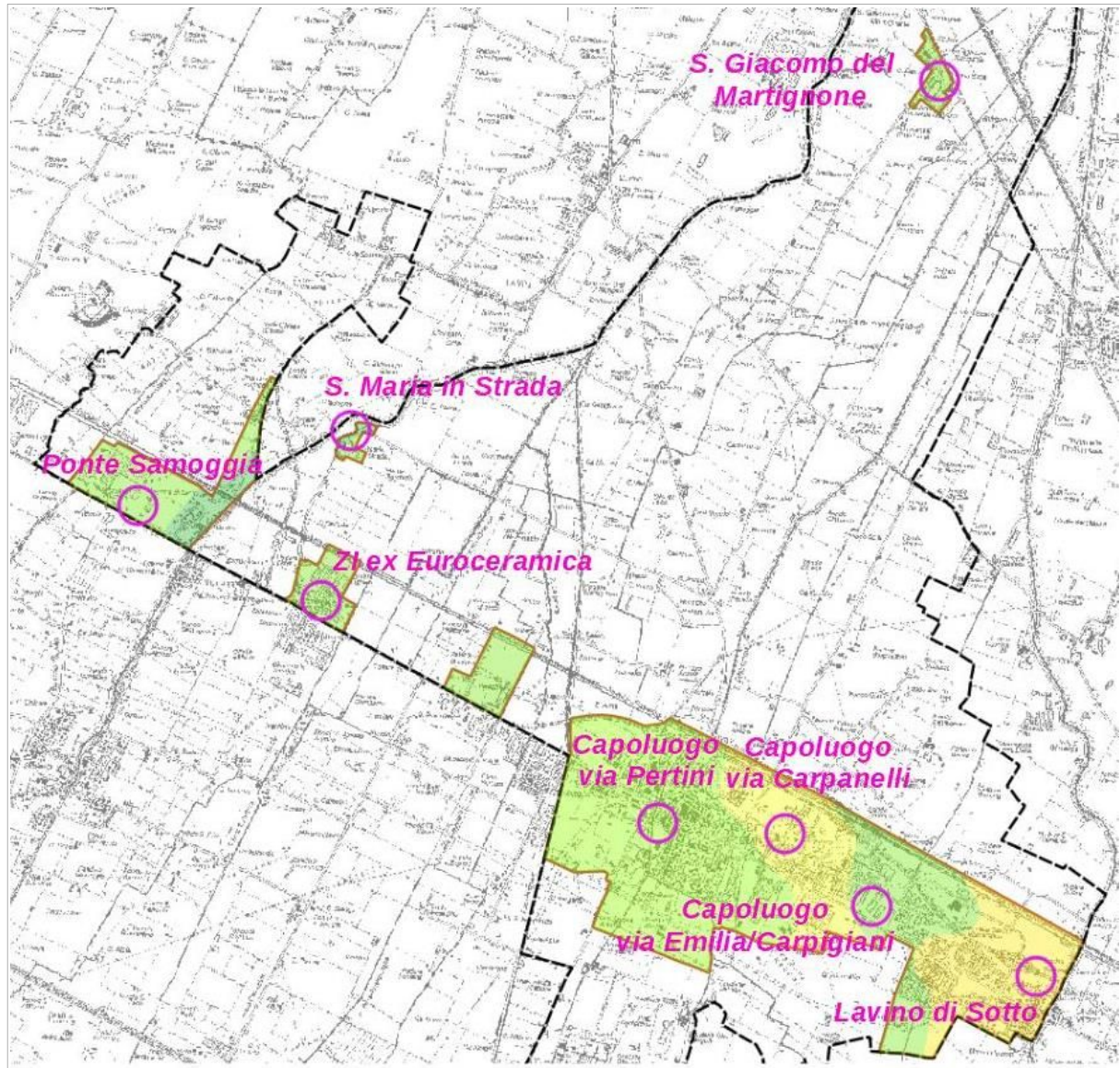
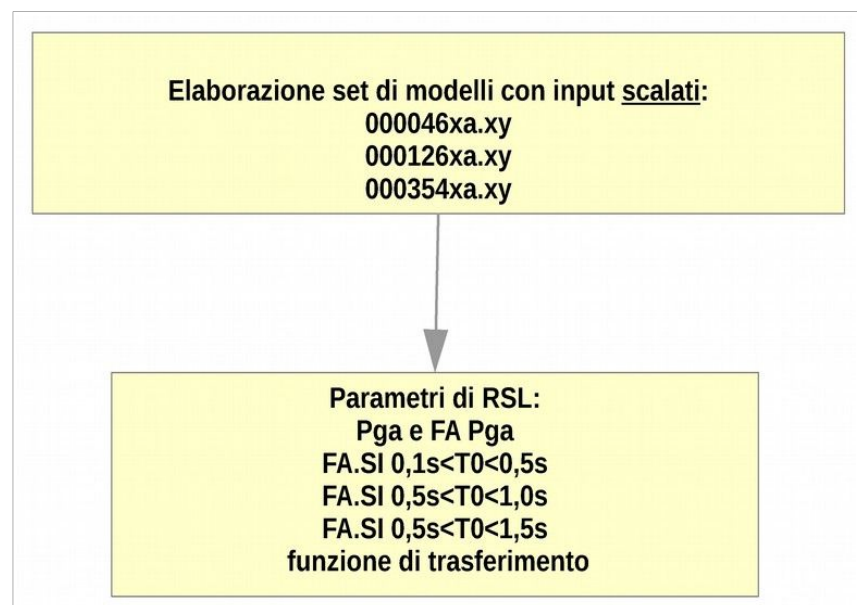


Figura 7.1 - Localizzazione dei modelli numerici di RSL elaborati sulla cartografia MOPS aggiornata

Figura 7.2 - Dati di output ottenuti dalle analisi numeriche di RSL effettuate per questo studio



Le elaborazioni numeriche hanno implementato i tre accelerogrammi di riferimento per la Regione Emilia-Romagna: si tratta di input selezionati dalla Banca Dati accelerometrica IESD compatibili con la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali, rappresentativi di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.3):

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

Gli accelerogrammi sono stati scalati in base ai valori di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale sui punti della griglia (passo 0.05°), ovvero rappresentativi di scuotimenti attesi con un periodo di riferimento $TR = 475$ anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), sul suolo di riferimento atteso relativo alla “categoria di sottosuolo A” (cfr. tab. 3,2,II NTC 2008). Ciò detto, per tutti gli areali di Anzola dell'Emilia la a_{refg} ricavabile dal reticolo INGV è risultata piuttosto omogenea ($0,163 \div 0,164g$). La tabella 7.1 riporta i valori di a_{ref} considerati per le modellazioni:

Tabella 7.1

MODELLI RSL RAPPRESENTATIVI	a_{ref}
CAPOLUOGO VIA PERTINI (“DOWN-HOLE”) CAPOLUOGO VIA CARPANELLI CAPOLUOGO VIA EMILIA/CARPIGIANI LAVINO DI MEZZO ZI EX EUROCERAMICA SANTA MARIA IN STRADA	0,163g
PONTE SAMOGGIA SAN GIACOMO DEL MARTIGNONE	0,164g

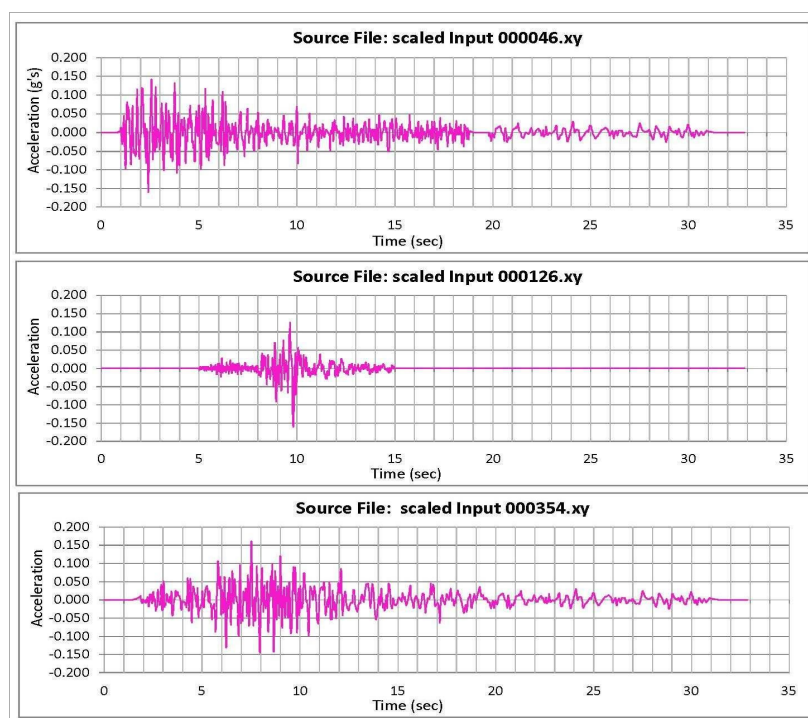


Figura 7.3 - Accelerogrammi di riferimento per la modellazione numerica di RSL (DGR 2193/2015)

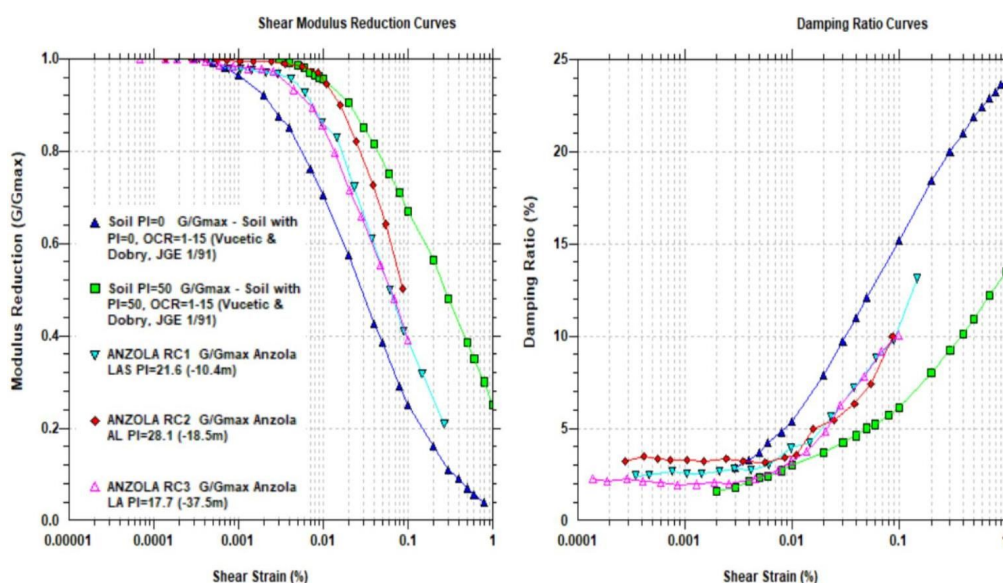
Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo SHAKE 2000 richiede l'inserimento dei modelli sismostratigrafici rappresentativi dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

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

Il successivo passo è dunque quello di definire il bedrock sismico, la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Come già scritto, il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio. Si rimanda anche ai precedenti capitoli e ai successivi paragrafi per una più dettagliata spiegazione delle singole modellazioni sismostratigrafiche.

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione implementato in SHAKE 2000, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento D e dal modulo di rigidezza a taglio G . Mentre i valori di rigidezza iniziale G_0 sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle V_s), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti delle prove effettuate su campioni di sedimenti fini prelevati nel sondaggio del Capoluogo (indici di plasticità; colonna risonante). Per altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati dal programma SHAKE 2000. In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di decadimento di Seed & Idriss (1970) per sabbie, Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi rispettivamente e ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (figure 7.4 e 7.5).

Figura 7.4- Curve di decadimento ottenute dalle tre prove di colonna risonante sui campioni di Anzola dell'Emilia (sondaggio eseguito in via Pertini). Le tre curve sito specifiche sono confrontate con le curve di bibliografia per sedimenti fini con $IP=0$ e $IP=50$ (Vucetic & Dobry, 1991)



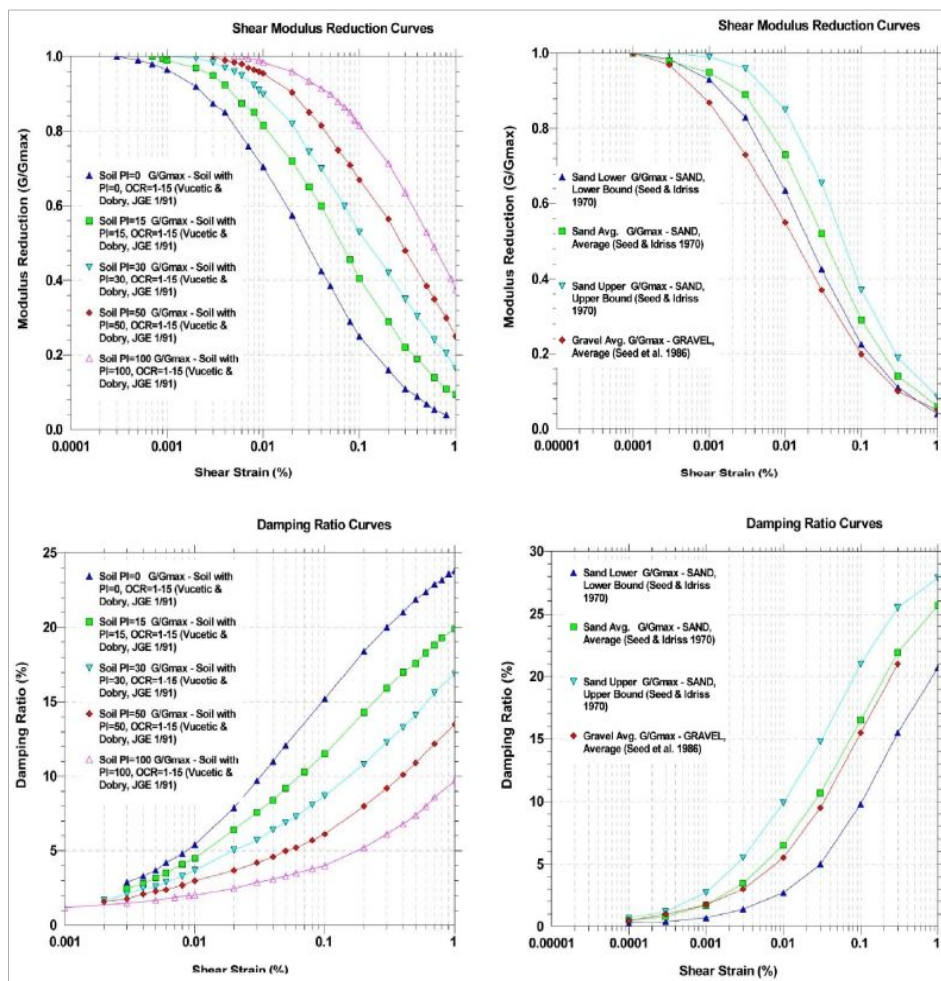


Figura 7.5- Curve di decadimento da fonte bibliografica utilizzate per le modellazioni numeriche di RSL di Anzola dell'Emilia

Le simulazioni numeriche della RSL sono state elaborate secondo un approccio per iterazione, in conseguenza della variabilità del modello di sottosuolo, fino a raggiungere una convergenza degli esiti di amplificazione ritenuti il più possibile compatibili con le reali caratteristiche sismostratigrafiche del sito studiato. Tutte le simulazioni hanno considerato un modello sismostratigrafico di riferimento medio/rappresentativo per la porzione di areale considerato.

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

- le accelerazioni di picco al suolo e i valori di $F_a P_{ga}$
- i rapporti spettrali di amplificazione (funzione di trasferimento)
- l'intensità spettrale di Housner e i valori di $F_A S_{I(0,1-0,5s)}$, $F_A S_{I(0,5-1,0s)}$ e $F_A S_{I(0,5-1,5s)}$

A) ACCELERAZIONI DI PICCO AL SUOLO E VALORI DI $F_A P_{GA}$

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale $F_A P_{ga}$ intesa come rapporto dell'accelerazione massima calcolata nello strato più superficiale o di interesse (in questo caso calcolata al suolo) rispetto all'accelerazione di riferimento al bedrock "rigido". Il software SHAKE 2000 consente di calcolare la variabilità dell'accelerazione attraverso le colonne sismostratigrafiche. In questo senso, le schede di sintesi dei modelli numerici allegate in calce

alla Relazione riportano graficamente l'andamento delle accelerazioni orizzontali per i tre input sismici di riferimento e la tabella con i valori rappresentativi di Pga e di FA Pga. Il valori di Pga e FA Pga al suolo assunti come rappresentativi per la RSL sono ricavati come valore medio ricavato dai tre input sismici.

B) RAPPORTI SPETTRALI DI AMPLIFICAZIONE (FUNZIONE DI TRASFERIMENTO)

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

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

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

C) INTENSITA' SPETTRALE DI HOUSNER

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

In questo senso, la DGR 1227/2015 richiede la determinazione del fattore di amplificazione FA SI (rapporto di intensità spettrale di Housner) quale ulteriore indicatore della pericolosità sismica. L'intensità di Housner è definita come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità. Nello specifico, la Deliberazione regionale richiede di quantificare i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s (FA SI_{0,1-0,5s}) e

da $0.5 < T_0 < 1$ s (FA SI_{0,5-1,0s}). Si è inoltre calcolato il FA SI relativo all'intervallo da $0.5 < T_0 < 1,5$ s (FA SI_{0,5-1,5s}) come richiesto dalla successiva DGR regionale 2193/2015.

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

La tabella 7.2 e la figura 7.6 riassumono gli esiti delle simulazioni numeriche eseguite per gli areali di studio. Nella tabella 7.2 vengono riportati in ultima colonna i codici d'archiviazione degli spettri in pseudovelocità in output salvati nella cartella <<MS23/Spettri>>.

Tabella 7.2

MOPS	MODELLI SHAKE RAPPRESENTATIVI	PGA	FA PGA	FA SI 0,1_0,5s	FA SI 0,5_1,0s	FA SI 0,5_1,5s	SPETTRI PSV
2001	CAPOLUOGO VIA PERTINI (DOWN-HOLE)	0,220g	1,4	1,5	2,9	2,8	PSV001 PSV002 PSV003
2002	CAPOLUOGO VIA EMILIA/CARPIGIANI	0,220g	1,4	1,6	2,9	2,7	PSV004 PSV005 PSV006
	ZI EX EUROCERAMICA	0,212g	1,3	1,5	2,9	2,7	PSV007 PSV008 PSV009
	PONTE SAMOGGIA	0,236g	1,4	1,8	2,9	2,8	PSV0010 PSV0011 PSV0012
	SAN GIACOMO DEL MARTIGNONE	0,248g	1,5	1,7	2,9	2,8	PSV0013 PSV0014 PSV0015
2003	S. MARIA IN STRADA	0,221g	1,4	1,6	2,8	2,7	PSV0016 PSV0017 PSV0018
30502004	CAPOLUOGO VIA CARPANELLI	0,230g	1,4	1,6	3,0	2,8	PSV0019 PSV0020 PSV0021
30502005	LAVINO DI MEZZO	0,230g	1,4	1,6	2,9	2,7	PSV0022 PSV0023 PSV0024

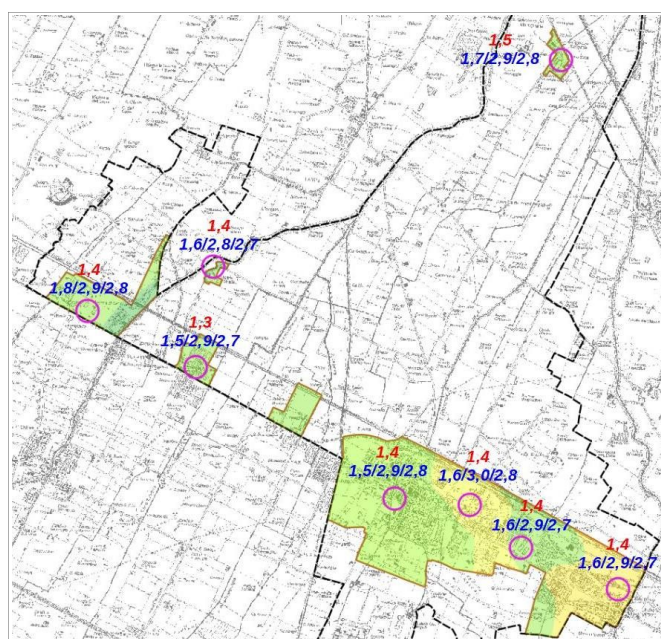


Figura 7.6 – Fattori di amplificazione ricavati dalle modellazioni numeriche di RSL

7.4 Gli approfondimenti nelle “zone di attenzione” per liquefazioni

Le 13 penetrometrie CPTU eseguite per per questi ulteriori approfondimenti consentono di calcolare il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro IL definito anche come LPI (Liquefaction Potential Index). La stima di IL offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale.

Si è potuto inoltre disporre di altre 9 prove CPTU con dati numerici, già disponibili per lo studio di MS di “livello 2”. Nel complesso, si è potuto disporre di 22 punti di controllo utili a caratterizzare ulteriormente le “zone di attenzione” riportate nella cartografia MOPS (Tavola 4). Su questi punti si è proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente relazione:

$$FSL = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

con:

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

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

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

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

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

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software “Cliq”, sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers. Per questo lavoro, FSL è stato calcolato sulla base della nota procedura di P. K. Robertson (2009)⁵, di comprovata sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico. Per la descrizione dettagliata del metodo si rimanda alla letteratura scientifica originaria,. Tuttavia si rammenta che il metodo di P.K. Robertson (2009) risulta valido per tutti i tipi di sedimenti e considera anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza

⁵ P.K. Robertson – *Performance based earthquake design using the CPT – Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, 2009*

penetrometrica normalizzata. Per questo lavoro, il valore di FC viene stimato sulla base dei metodi di riferimento e in funzione dell'indice di comportamento I_c ricavato dalla classificazione dei terreni di P.K. Robertson (1990). Ciò è una scelta ineludibile per questa verifica che ha come finalità il confronto a scala territoriale delle condizioni di pericolosità, inoltre non si dispone diffusamente dati diretti sull'effettivo contenuto di fine nei sedimenti potenzialmente liquefacibili.

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

- si è utilizzata la a_{max} al suolo calcolata considerando la a_{ref} da reticolo INGV (pericolosità sismica locale di riferimento) moltiplicata per il valore del FA PGA attribuito alla microzona sismica in cui ricade la prova e ricavato dalle analisi di RSL numerica;
- si è considerata una soggiacenza della falda basata sulle quote d'acqua ricavate dalle prove penetrometriche (occorre infatti rammentare che resistenze penetrometriche ed esiti litotecnici dei sedimenti nell'intervallo insaturo risultano falsati da tale condizione)
- si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ come da zonizzazione macrosismica "ZS9" (vedi capitolo 2). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per il metodo di calcolo considerato.

L'Indice di Potenziale Liquefazione IL o LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato per una profondità "critica" fino a 20 metri di profondità oppure, in più casi, fino alla profondità di "rifiuto" strumentale della prova su ghiaie/sabbie molto addensate e impenetrabili. L'Indice di Potenziale Liquefazione è definito nel seguente modo:

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

con:

$W(z)$ fattore di peso della profondità = $10^{-0.5z}$

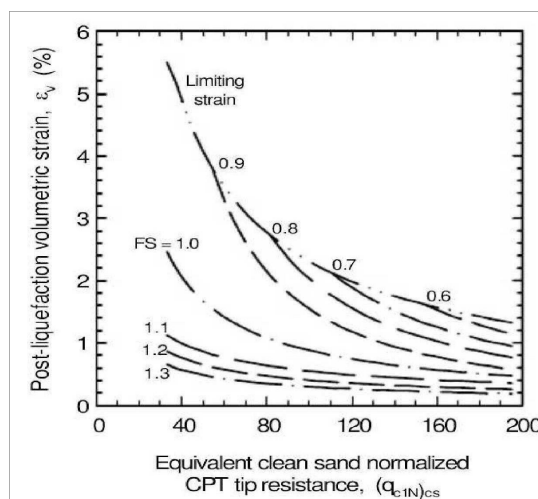
F_1 variabile = $1 - FSL$ (per $FSL < 1.2$) oppure $F_1 = 0$ per $FSL \geq 1.2$

z = profondità dello strato considerato

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

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

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



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

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

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

$$\epsilon_{vol} = [0,8 - 2,66 \log (FS)] / [0,33 A (Q_m)^3]$$

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

When $FS \leq 0,84$ set $r_u = 1,0$ & limit $\epsilon_{vol} \leq 1\%$

Tabella 7.3 - Confronto dei valori di LPI e cedimenti post sisma dalle verifiche (prove CPTU). Gli esiti di LPI sono attribuiti alle classi di pericolosità di liquefazione. In blu sono evidenziate le prove CPTU eseguite per questo lavoro. Sono inoltre evidenziati in rosso i cedimenti superiori al "pollice"

LOCALITA'	PROVA (SIGLA)	PROF. FALDA (m)	PGA (g)	(Limite FSL per calcolo LPI)	Stima LPI/IL	Stima cedimenti
					(ROBERTSON 2009)	(ROBERTSON 2009)
Capoluogo -Via Pertini	037001P230PCPTU230	2,40	0,22	FSL <1,2	0,0	0,0
Capoluogo -Via Pertini	037001P362PCPTU362	1,10	0,22	FSL <1,2	0,5	0,4
Capoluogo -Via Pertini	037001P367PCPTU367	2,60	0,22	FSL <1,2	0,2	0,0
Capoluogo -Via Pertini	037001P60003PCPTU59144	2,80	0,22	FSL <1,2	0,1	0,2
Capoluogo -Via Pertini	037001P60004PCPTU59145	2,30	0,22	FSL <1,2	1,2	0,9
Capoluogo -Via Pertini	037001P60005PCPTU59147	1,90	0,22	FSL <1,2	0,0	0,0
Capoluogo -Via Pertini	037001P60006PCPTU59163	2,35	0,22	FSL <1,2	0,1	0,1
Capoluogo -Via Pertini	037001P60007PCPTU59164	1,60	0,22	FSL <1,2	0,0	0,0
Ex Euroceramica	037001P60008PCPTU59165	3,30	0,21	FSL <1,2	0,0	0,1
Lavino di Mezzo	037001P366PCPTU366	2,00	0,23	FSL <1,2	4,1	2,9
Ponte Samoggia	037001P364PCPTU364	1,60	0,24	FSL <1,2	0,0	0,0
Ponte Samoggia	037001P60009PCPTU59167	3,90	0,24	FSL <1,2	0,0	0,1
Ponte Samoggia	037001P60011PCPTU59172	3,40	0,24	FSL <1,2	0,0	0,0
Ponte Samoggia	037001P60012PCPTU59174	3,20	0,24	FSL <1,2	0,0	0,0
S. Giacomo del Martignone	037001P365PCPTU365	2,20	0,25	FSL <1,2	0,7	0,5
S. Giacomo del Martignone	037001P60013PCPTU59176	2,50	0,25	FSL <1,2	0,7	0,3
Santa Maria in Strada	037001P363PCPTU363	3,00	0,22	FSL <1,2	0,1	0,0
Santa Maria in Strada	037001P60010PCPTU59170	5,10	0,22	FSL <1,2	0,0	0,0
Territorio extraurbano	037001P25612PCPTU32195	2,50	0,23	FSL <1,2	0,3	0,1
Via Carpanelli	037001P361PCPTU361	1,30	0,23	FSL <1,2	7,7	6,9
Via Emilia - Carpigiani	037001P60001PCPTU59141	2,35	0,22	FSL <1,2	0,9	0,6
Via Emilia - Carpigiani	037001P60002PCPTU59142	2,20	0,22	FSL <1,2	1,2	0,9

PERICOLOSITA' DI LIQUEFAZIONE:



La tabella 7.3 riporta la sintesi delle verifiche di liquefacibilità sui punti di controllo disponibili ed evidenzia anche gli esiti di cedimento superiori al “pollice”, generalmente più gravosi per le strutture/fondazioni di normale costruzione. Occorre tuttavia rammentare che il cedimento è cumulativo, riferito all'intero spessore di sedimenti investigati dalla prova; un'effettiva analisi del cedimento, in particolare della sua ammissibilità, dev'essere legata alle caratteristiche dei manufatti e all'effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.

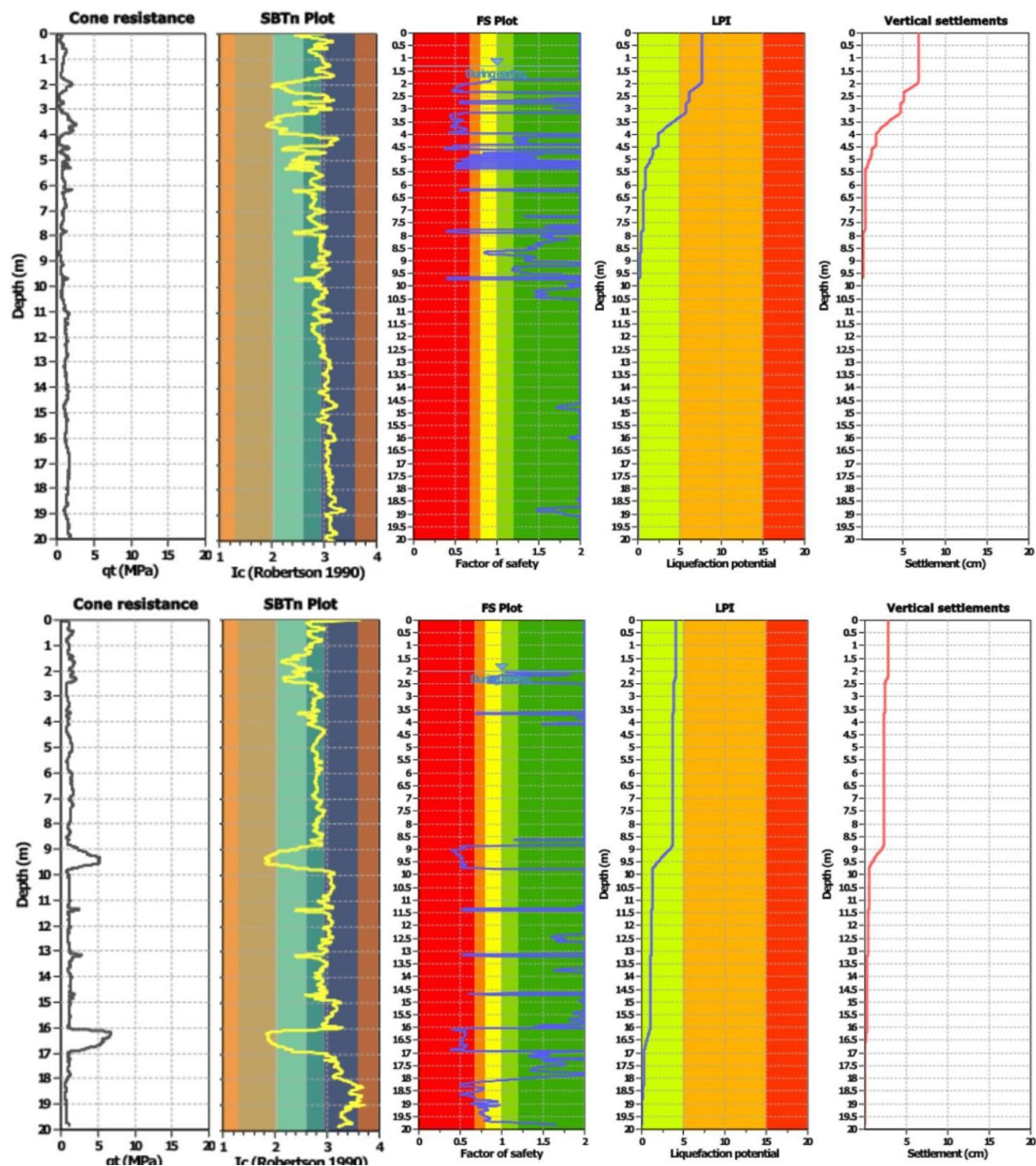


Figura 7.8– Plottaggio di sintesi delle verifiche di liquefazione relative alle due prove CPTU con esiti di LPI più critici. In alto: prova CPTU 361 eseguita a est del Capoluogo. In basso: prova CPTU 366 eseguita nella frazione Lavino di Mezzo.

Le verifiche hanno evidenziato in soli due casi esiti di LPI significativi (figura 7.8) e tuttavia riconducibili a due contesti deposizionali relativamente differenti. L'esito più critico (LPI = 7,7) è ottenuto dalla prova CPTU361 eseguita a est del Capoluogo: tale prova ha riscontrato livelli limoso sabbiosi sciolti e superficiali fino a circa –5,5 metri, riconducibili a traccimazioni recenti

del Rio Cavanella (cfr. paragrafo 5.1.1). In questo senso, la MOPS 2004 è caratterizzata da prove geognostiche (penetrometrie e sondaggi) che hanno evidenziato una diffusa presenza di limi sabbiosi e sabbie sciolte nei primi 5÷6 metri di profondità e attribuibili a tracimazioni di questo corso d'acqua.

La seconda terebrazione critica è risultata la prova CPTU366 eseguita presso la frazione Lavino di Mezzo (LPI =4,1): la verifica ha evidenziato locali intervalli più esplicitamente sabbiosi e di spessore metrico, tuttavia intercettati a maggiori profondità (-6÷15 metri). Queste lenti sabbiose sono state riscontrate in modo relativamente diffuso anche in altre indagini eseguite nella frazione e attribuite a paleocanali e depositi di rotta del Torrente Lavino (MOPS 2005).

Gli esiti ottenuti dalle verifiche, gli approfondimenti tessiturali e le ulteriori valutazioni del contesto deposizionale locale hanno dunque permesso la delimitazione delle “zone di suscettibilità” per liquefazioni riportata nella cartografia di livello 3 (Tavole 6-7-8-9) e presentate nella seguente figura 7.9.

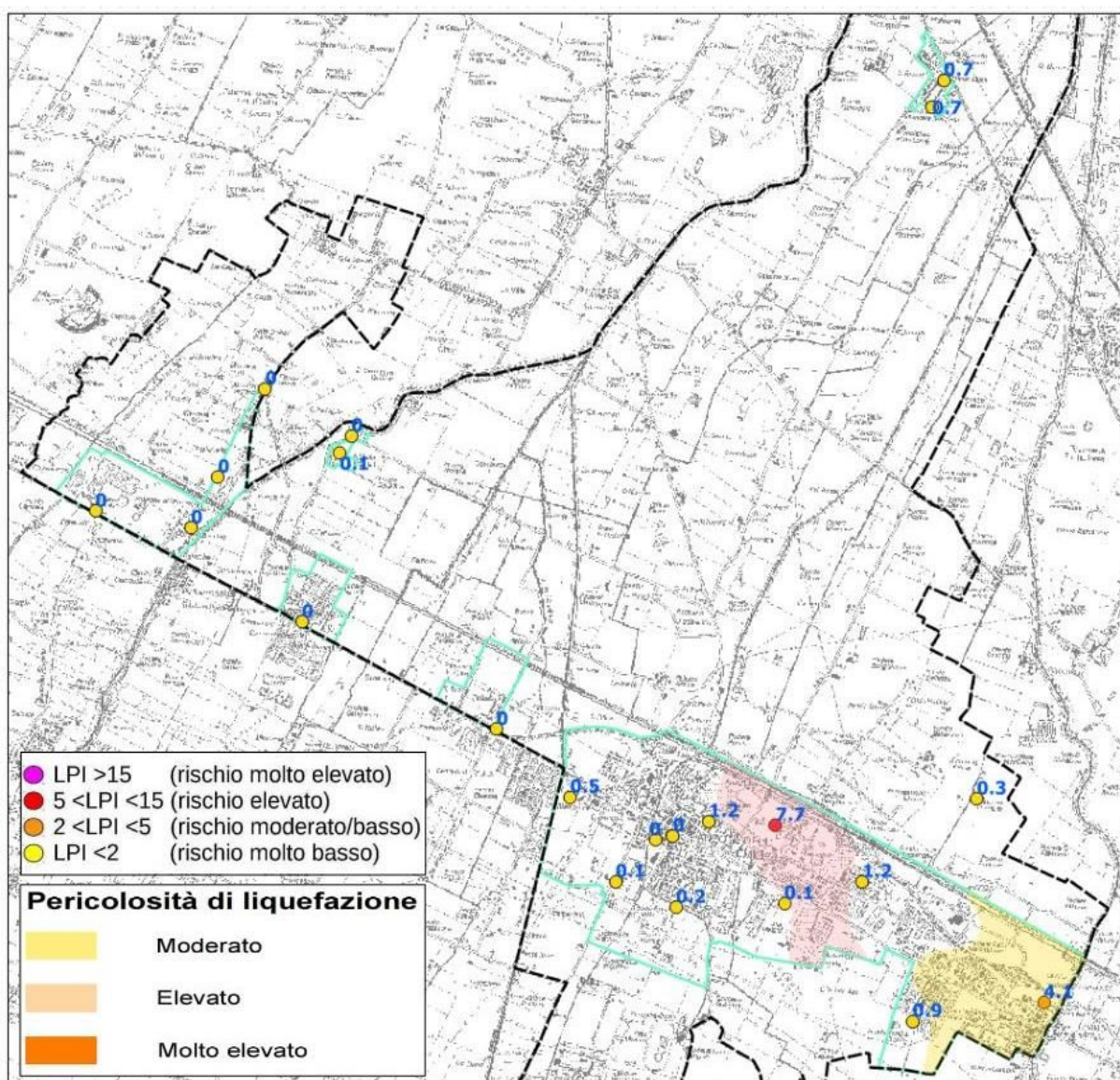


Figura 7.9 - Punti di controllo dell'Indice di Potenziale Liquefazione IL/LPI e zone di suscettibilità perimetrate nel territorio di Anzola dell'Emilia

La figura 7.9 riporta per ogni punto di controllo gli esiti di LPI e la delimitazione delle “zone di suscettibilità” per le liquefazioni, basata sulle seguenti classi di pericolosità (Sonmez, 2003) :

IL =0	Potenziale “Nullo/Non liquefacibile”
0 <IL ≤2	Potenziale “basso”
2 <IL ≤5	Potenziale “medio”
5 <IL ≤15	Potenziale “elevato”
IL >15	Potenziale “molto elevato”

Dalle simulazioni sopra descritte, emergerebbe un quadro di “suscettibilità” di liquefazione relativamente complesso da “nullo” a “basso” per tutto il territorio urbanizzato/urbanizzabile, ad esclusione delle due zone MOPS 2004 e 2005 rispettivamente classificate a rischio “elevato” e “moderato”.

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

Per il contesto litostratigrafico che caratterizza il territorio comunale di Anzola dell'Emilia, si ritiene che, nelle “zone di attenzione” per liquefazioni perimetrare nella cartografia delle MOPS (Tavola 4), siano consigliabili indagini geotecniche che prevedano anche prove penetrometriche di tipo elettrico (possibilmente con piezocono) rispetto a penetrometrie con punta meccanica. Le penetrometrie elettriche sono infatti in grado di fornire una migliore definizione tessiturale e meccanica degli intervalli che potrebbero risultare liquefacibili in condizioni sismiche.

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle Indagini (Tavola 1)

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Anzola dell'Emilia, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio. Per una descrizione dettagliata sulla tipologia delle indagini disponibili e in particolare di quelle eseguite per gli studi di MS si rimanda al Capitolo 4.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.1), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

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

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:10.00, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (analisi tessiturali; classificazione dei campioni prelevati) e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici. L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.1);

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

ML pi	Limi argillosi – piana inondabile
SM es	Sabbie limose e limi sabbiosi prevalenti – argine e canale fluviale

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ “forme di superficie”, riconducibili paleoalvei;
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro;
- ✓ la localizzazione dei sondaggi o pozzi, con l'indicazione della profondità raggiunta per quelli che non raggiungono il substrato e con l'indicazione della profondità del substrato, per i 9 che lo raggiungono. La profondità del substrato indicata, che non è rappresentato da

un bedrock rigido, ma da un contrasto di impedenza tra unità diverse, è dedotta dalle sezioni geologiche (allegato 1).

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna: $f_0 \leq 1$ hz, $1 < f_0 \leq 2$ hz, $2 < f_0 \leq 8$ hz, $f_0 > 8$ hz. In realtà in carta è rappresentata un'unica classe di frequenza per tutto il territorio comunale, poiché tutte le misure hanno restituito $f_0 \leq 1$.

L'impianto della cartografia è la medesima già considerata per lo studio di MS di "livello 2" e pertanto sono riportati i punti di misura, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata. Poiché non sono mai state registrate ampiezze di picco H/V maggiori di 2,5 tali punti di misura non sono stati tematizzati con colori per valore di ampiezza massima del picco. La cartografia, tuttavia, distingue le nuove registrazioni eseguite per questi ulteriori approfondimenti (registrazioni di 60').

I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno permesso di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito il substrato rigido (cfr. paragrafo 6.1) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei modelli sismostratigrafici implementati nelle analisi numeriche di RSL (cfr. capitolo 7).

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

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:10.000, è stata aggiornata sulla base degli approfondimenti espletati e rivista graficamente per risultare coerente con i più recenti standard di rappresentazione indicati nelle linee guida ICMS (v.4.1). La carta riporta la suddivisione del territorio comunale studiato in "Zone suscettibili di amplificazione" e in "Zone di attenzione per instabilità". Questa cartografia rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

Per quanto riguarda le "Zone stabili suscettibili di amplificazioni", l'aggiornamento della MS permette di distinguere tre zone, così descritte in legenda:

2001

Zona 1 – Terreni di copertura costituiti da depositi in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media. Con l'aumento della profondità si riscontra un aumento della frazione argillosa che diviene in genere prevalente oltre i 10 metri. Oltre i 20 metri si rinvergono localmente intervalli ghiaioso-sabbiosi di spessore metrico (fino a 8 metri).

Substrato sismico nei depositi alluvionali "non rigidi" a profondità $>> 100$ metri.

2002

Zona 2 – Terreni di copertura costituiti da depositi in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media. Con l'aumento della profondità si riscontra un aumento della frazione argillosa che diviene in genere prevalente oltre i 10 metri. Oltre i 20 metri si rinvergono localmente intervalli sabbiosi ad addensamento medio.

Substrato sismico nei depositi alluvionali "non rigidi" a profondità $>> 100$ metri.

2003

Zona 3 – Terreni di copertura costituiti nei primi metri da limi sabbiosi e sabbie insature (depositi di rotta del Torrente Samoggia), seguiti da depositi in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media. Con l'aumento della profondità si riscontra un aumento della frazione argillosa che diviene in genere prevalente oltre i 10 metri. Oltre i 20 metri si rinvengono localmente intervalli sabbiosi ad addensamento medio. Substrato sismico nei depositi alluvionali "non rigidi" a profondità >>100 metri.

La presenza di strati limoso sabbiosi ha imposto di delimitare due differenti “Zone di attenzione” per liquefazione (codici “30502004” e 30502005), differenziate in funzione del contesto litostratigrafico riscontrato più superficiale e fino a 20 metri, così descritte nella legenda:

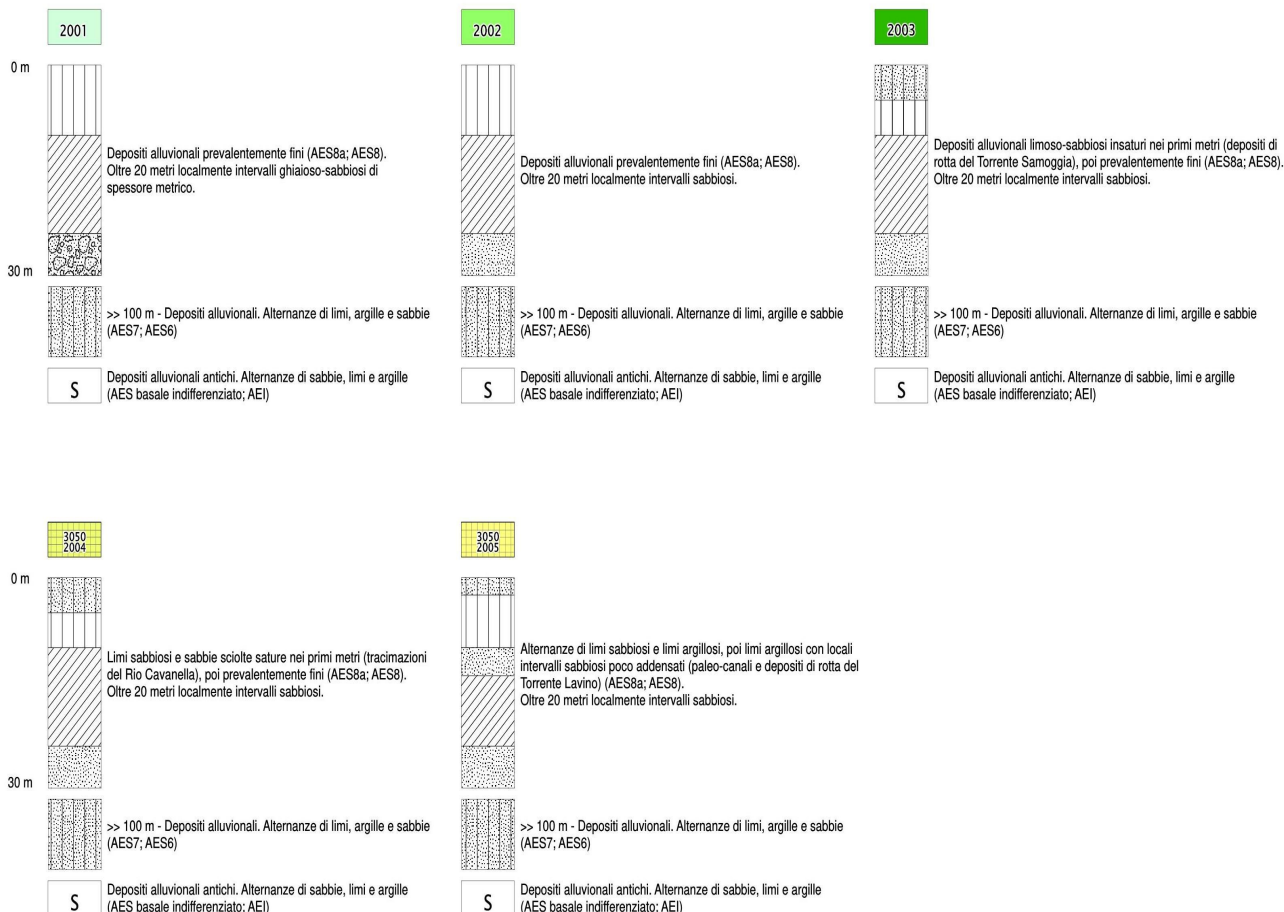
30502004

ZA_LQ 4 – Terreni di copertura costituiti nei primi metri da limi sabbiosi e sabbie sciolte sature (tracimazioni recenti del Rio Cavanella), seguiti da depositi in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media. Con l'aumento della profondità si riscontra un aumento della frazione argillosa che diviene in genere prevalente oltre i 10 metri. Oltre i 20 metri si rinvengono localmente intervalli sabbiosi ad addensamento medio. Substrato sismico nei depositi alluvionali "non rigidi" a profondità >>100 metri.

30502005

ZA_LQ 5 – Terreni di copertura costituiti nei primi metri da alternanze di limi sabbiosi e limi argillosi, seguiti da depositi in prevalenza limoso-argillosi a consistenza media, con locali intervalli sabbiosi poco addensati (paleo-canali e depositi di rotta del Torrente Lavino). Oltre i 20 metri si rinvengono localmente intervalli sabbiosi ad addensamento medio. Substrato sismico nei depositi alluvionali "non rigidi" a profondità >>100 metri.

Per le cinque classi individuate vengono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (fino a -30 m), così come richiesto nelle linee guida ICMS:



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

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

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

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

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

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 3>> sono elaborate alla scala 1:5.000 e riportano le “zone stabili suscettibili di amplificazioni” e le “zone suscettibili di instabilità” per le liquefazioni riscontrate nel territorio studiato di Anzola dell'Emilia. Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

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

- alle “zone stabili suscettibili di amplificazioni” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SI) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.1). Si rammenta che agli areali studiati i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base di modellazioni numeriche della RSL (approfondimenti di “livello 3”), come specificato nel Capitolo 7.
- le “zone suscettibili di instabilità” per le liquefazioni rappresentano la sintesi degli ulteriori approfondimenti di “livello 3” effettuati nelle “zone di attenzione” riportate nella cartografia MOPS. Attraverso la quantificazione dell'Indice di liquefazione, sono state perimetrate zone di suscettibilità per le liquefazioni, discriminate secondo classi di pericolosità, come previsto dagli Indirizzi della CTMS, come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.1) e come specificato nel Capitolo 7.

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

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

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

- ✓ Tavola 9 → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,5 e 1,5secondi).

Occorre precisare che il fattore di amplificazione FA SI relativo a periodi compresi tra 0,5 s e 1,5 s (Tavola 9) non viene incluso negli Standard di rappresentazione della MS (v. 4.1), ma tuttavia richiesto dagli indirizzi regionali (cfr. DGR 2193/2015). Per questo motivo, negli shape file poligonali “stab” e “istab” è stato creato il nuovo campo <<FH0515>> ove riportare numericamente il valore di quest'ultimo fattore di amplificazione.

9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Basili R., G. Valensise P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008) – The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) – Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) – CSI Catalogo della sismicità italiana 1981–2002 versione 1.1. INGV-CNT, Roma, [Online], Available: <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- CTMS – Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (2018) – Microzonazione sismica –

Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, versione 4.1.

CTMS – Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (2017) – Microzonazione sismica – Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ), versione 1.0.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2011. *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.

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

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

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

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

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

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse – Università degli Studi di Firenze – INGV – *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (2017) – scala 1:250.000*.

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

Regione Emilia Romagna – *Legge Regionale n.24/2017 – “Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio”*

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

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 – “Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112”*.

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

- Robertson P.K., Lisheng S. (2010). Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT. *FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, San diego, CA.*
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.*
- Robertson P.K. (2009). Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach., *Canadian Geotechnical Journal* 46(11): 1337-1355.
- Robertson P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136, 842 (2010).
- Robertson P.K. and, Wride CE . (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test". *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, Vol. 35, No. 3 : pp. 442-459.
- Tarabusi G. (2014). Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Anzola dell'Emilia – Livello 2 – in attuazione dell'art. 11 della Legge n.77/2009.
- Youd, T.L., and Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4), 297-313.
- Zhang, Robertson, Brachman (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(5) : 1168-1180, 10.1139/t02-047.

APPENDICE:

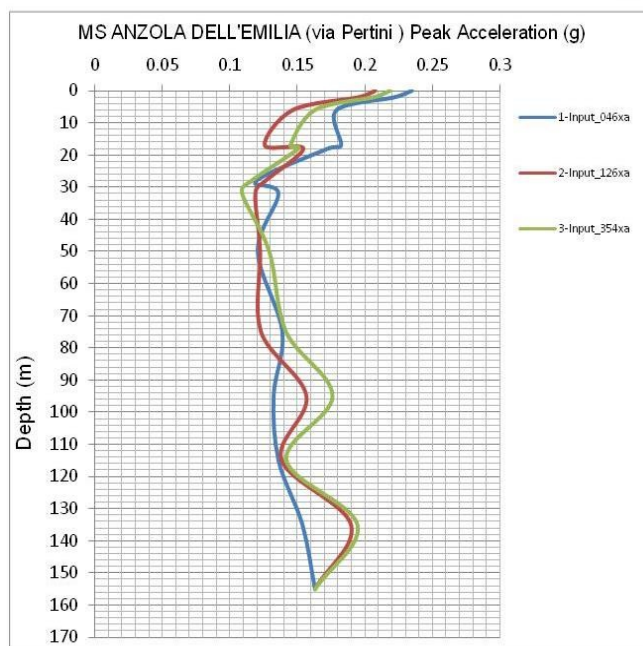
SCHEDE MODELLI NUMERICI RSL
PLOT VERIFICHE NUMERICHE LIQUEFAZIONE

MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – CAPOLUOGO VIA PERTINI (DOWN-HOLE)

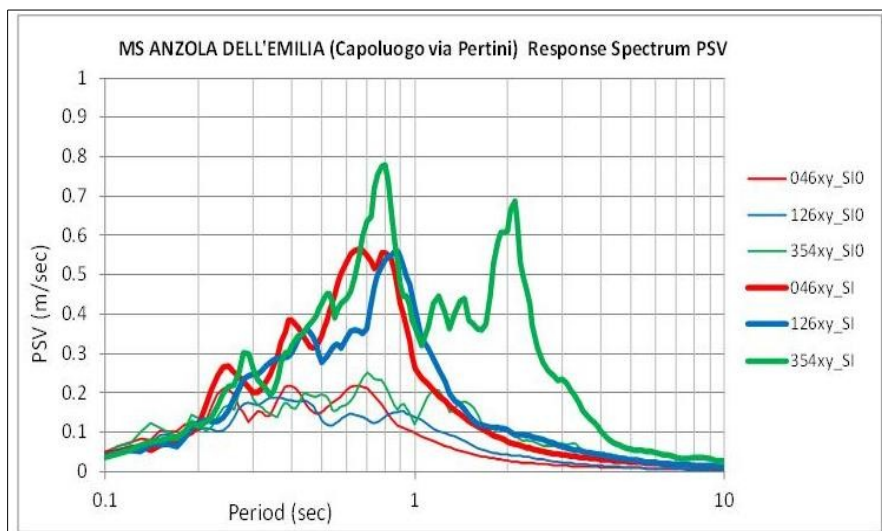
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	135	LAS Soil PI=15
2	4,0	6,0	17,5	0,05	200	LAS Soil PI=15
3	11,0	17,0	17,0	0,05	190	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	4,0	21,0	17,5	0,05	200	AL RC2 PI=28,1 (-18,5m)
5	5,0	26,0	18,0	0,05	225	LAS Soil PI=15
6	8,0	34,0	20,0	0,05	350	GhS Gravel
7	21,0	55,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
8	25,0	80,0	19,0	0,05	325	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
9	20,0	100,0	20,0	0,05	400	GhS Gravel
10	20,0	120,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
11	15,0	135,0	21,0	0,05	450	GhS Gravel
12	25,0	160,0	21,0	0,05	425	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -160 m						

	Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN	
DGR 2193/2015	Max ag (g)	0.235	0.208	0.219	0.220
	FA Pga	1.4	1.3	1.3	1.4



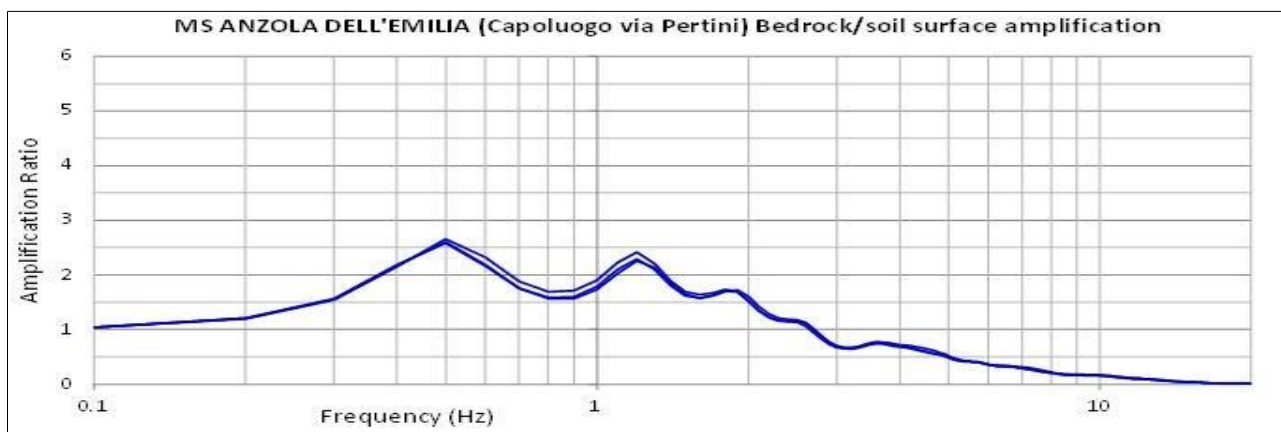
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.5	2.9	2.9
Input_000126xy	1.5	3.1	2.8
Input_000354xy	1.5	2.8	2.6
MEAN	1.5	2.9	2.8

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

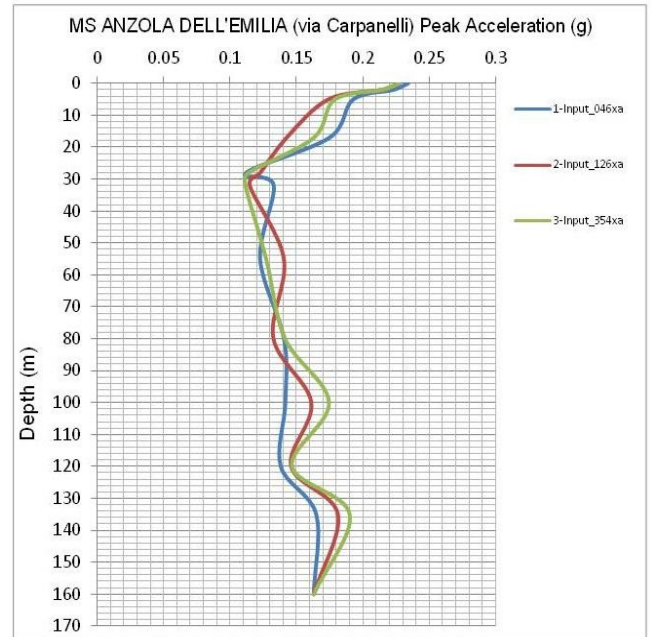


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – CAPOLUOGO VIA CARPANELLI

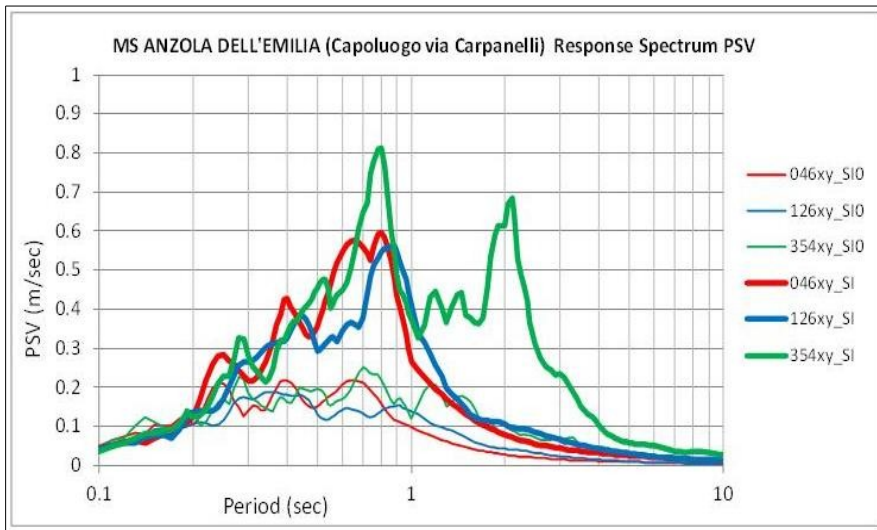
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	135	LAS Soil PI=15
2	3,0	5,0	18,0	0,05	200	LS Soil PI=0
3	12,0	17,0	17,0	0,05	190	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	11,0	28,0	17,5	0,05	225	AL RC2 PI=28,1 (-18,5m)
5	4,0	32,0	19,5	0,05	300	SL Sand Avg
6	23,0	55,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
7	25,0	80,0	19,0	0,05	325	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
8	20,0	100,0	20,0	0,05	400	GhS Gravel
9	20,0	120,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
10	15,0	135,0	21,0	0,05	450	GhS Gravel
11	25,0	160,0	21,0	0,05	425	LA LS Soil PI=15
14						
Profondità media pseudobedrock: -160 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR 2193/2015	Max ag (g)	0.234	0.227	0.228	0.230
	FA Pga	1.4	1.4	1.4	1.4



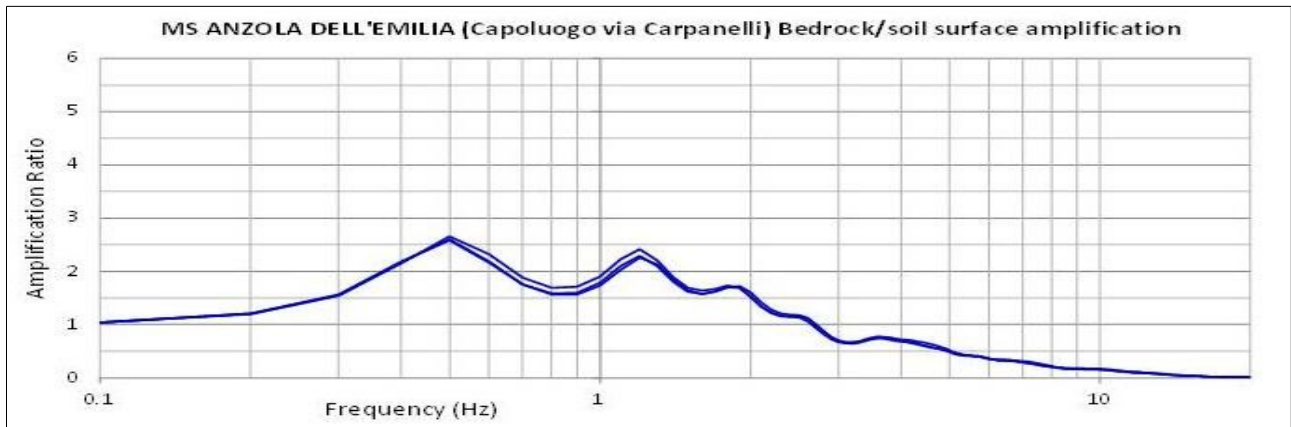
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.6	3.0	2.9
Input_000126xy	1.6	3.2	2.8
Input_000354xy	1.6	2.9	2.6
MEAN	1.6	3.0	2.8

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

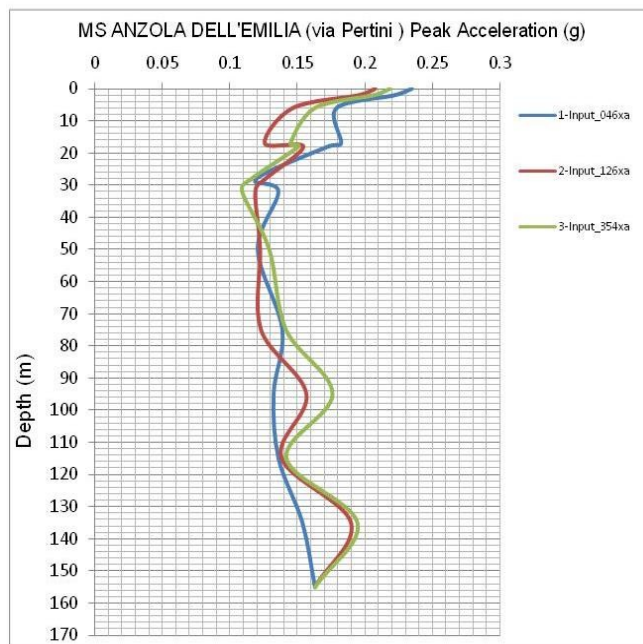


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – CAPOLUOGO VIA EMILIA/CARPIGIANI

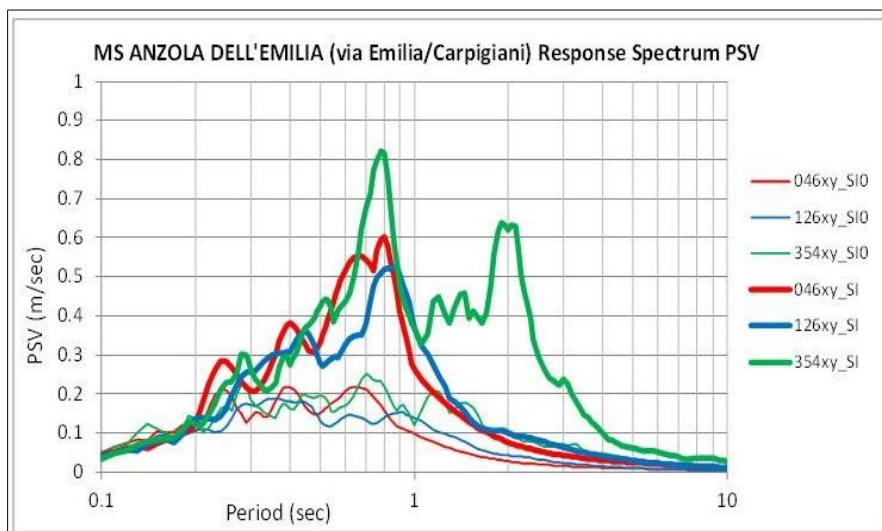
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	135	LAS Soil PI=15
2	4,0	6,0	17,5	0,05	190	LAS Soil PI=15
3	11,0	17,0	17,0	0,05	190	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	1,0	18,0	18,0	0,05	200	LS SL Sand Upper
5	10,0	28,0	17,5	0,05	225	AL RC2 PI=28,1 (-18,5m)
6	4,0	32,0	19,5	0,05	300	SL Sand Avg
7	18,0	50,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
8	25,0	75,0	19,0	0,05	325	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
9	20,0	95,0	20,0	0,05	400	GhS Gravel
10	20,0	115,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
11	20,0	135,0	21,0	0,05	450	GhS Gravel
12	20,0	155,0	21,0	0,05	425	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -155 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.235	0.208	0.219	0.220
2193/2015	FA Pga	1.4	1.3	1.3	1.4



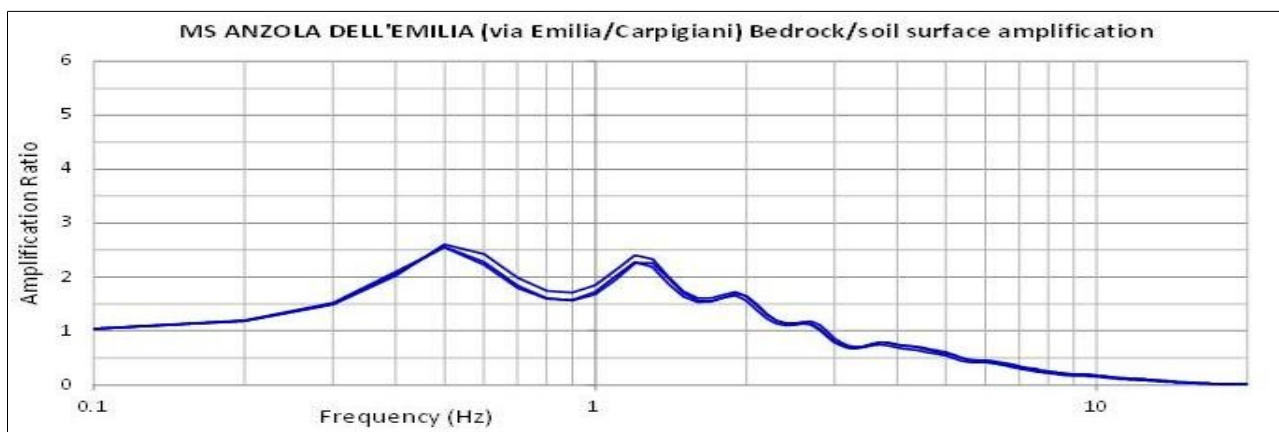
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.6	2.9	2.8
Input_000126xy	1.6	3.0	2.7
Input_000354xy	1.5	2.9	2.6
MEAN	1.6	2.9	2.7

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

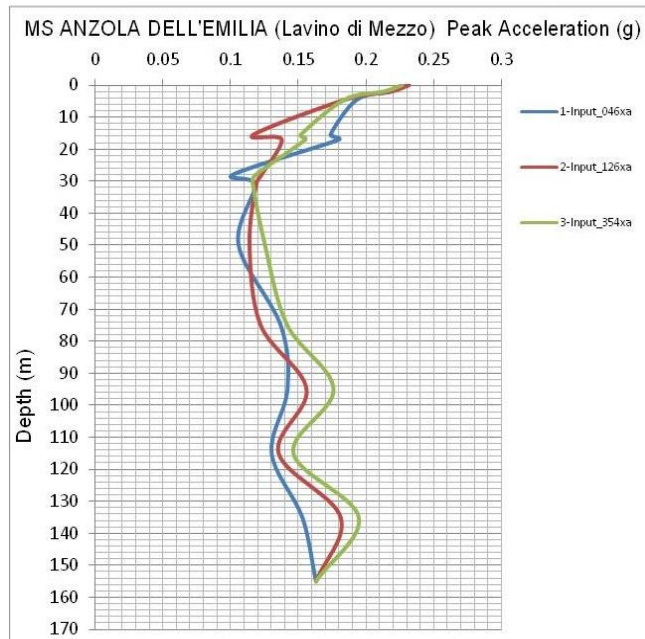


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – LAVINO DI MEZZO

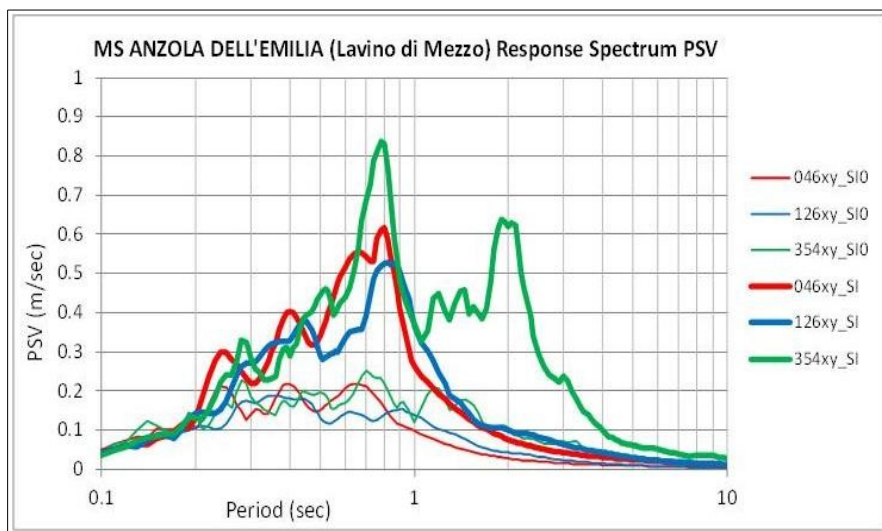
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	135	LAS Soil PI=15
2	2,5	4,5	17,5	0,05	180	LAS Soil PI=15
3	11,0	15,5	17,0	0,05	190	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	1,5	17,0	18,5	0,05	225	SL Sand Avg
5	11,0	28,0	17,5	0,05	225	AL RC2 PI=28,1 (-18,5m)
6	3,0	31,0	19,0	0,05	300	SL Sand Avg
7	19,0	50,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
8	25,0	75,0	19,0	0,05	400	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
9	20,0	95,0	20,0	0,05	375	GhS Gravel
10	20,0	115,0	19,5	0,05	450	LA Soil PI=30
11	20,0	135,0	21,5	0,05	425	GhS Gravel
12	20,0	155,0	21,0	0,05	720	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -155 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR 2193/2015	Max ag (g)	0.231	0.232	0.227	0.230
	FA Pga	1.4	1.4	1.4	1.4



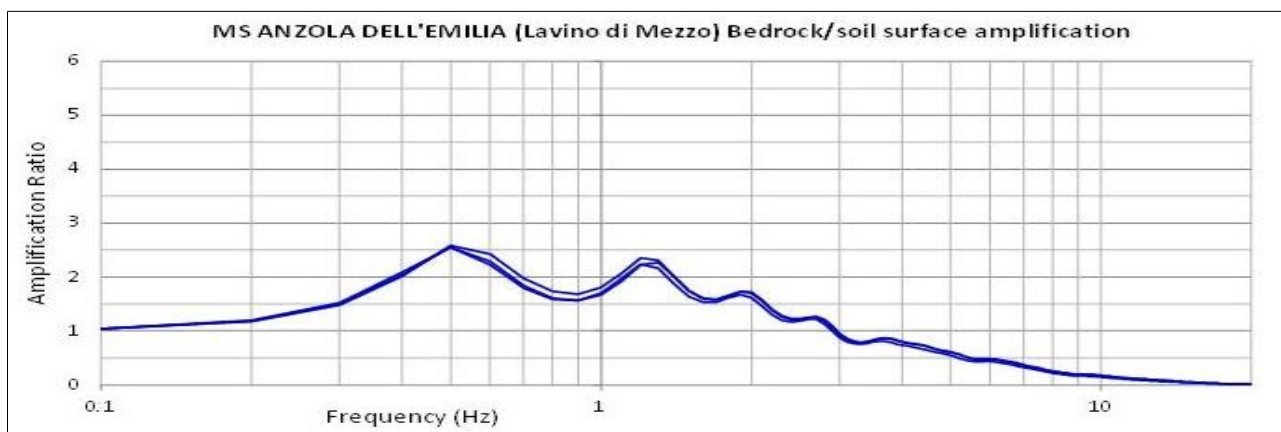
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.6	2.9	2.8
Input_000126xy	1.7	3.0	2.7
Input_000354xy	1.6	2.9	2.6
MEAN	1.6	2.9	2.7

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

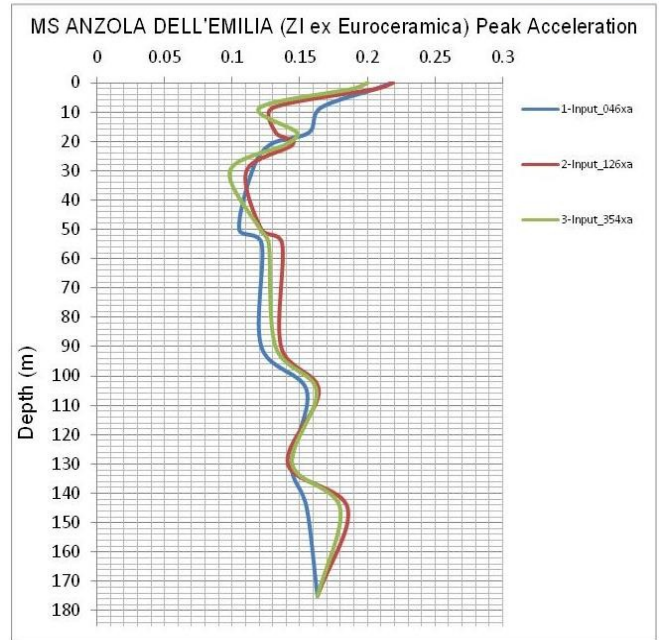


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – ZI EX EUROCERAMICA

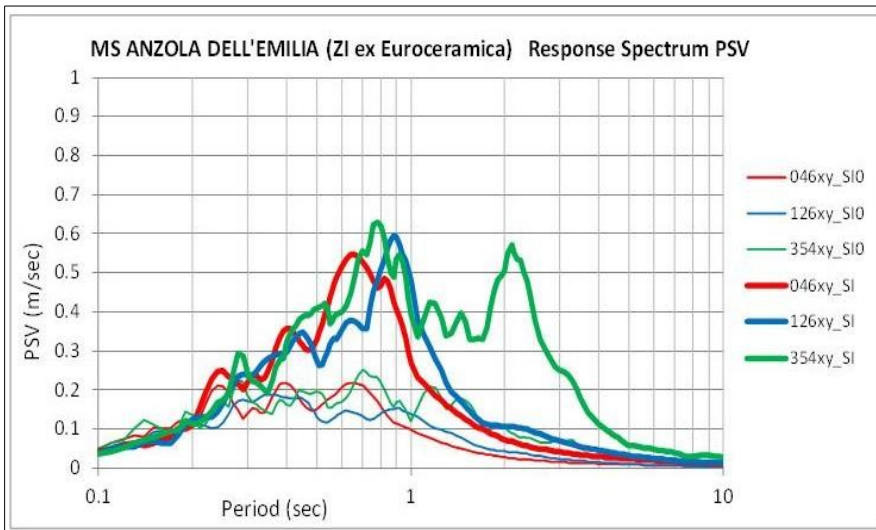
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	135	LAS Soil PI=15
2	6,5	8,5	17,5	0,05	175	LAS Soil PI=15
3	8,5	17,0	17,0	0,05	190	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	4,0	21,0	19,0	0,05	225	SL Sand Avg
5	9,0	30,0	18,5	0,05	250	LAS Soil PI=15
6	20,0	50,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
7	5,0	55,0	20,0	0,05	350	GhS Gravel
8	35,0	90,0	19,5	0,05	350	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
9	15,0	105,0	20,0	0,05	400	GhS Gravel
10	25,0	130,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
11	15,0	145,0	21,0	0,05	450	GhS Gravel
12	30,0	175,0	21,0	0,05	425	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -175 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.218	0.219	0.200	0.212
2193/2015	FA Pga	1.3	1.3	1.2	1.3



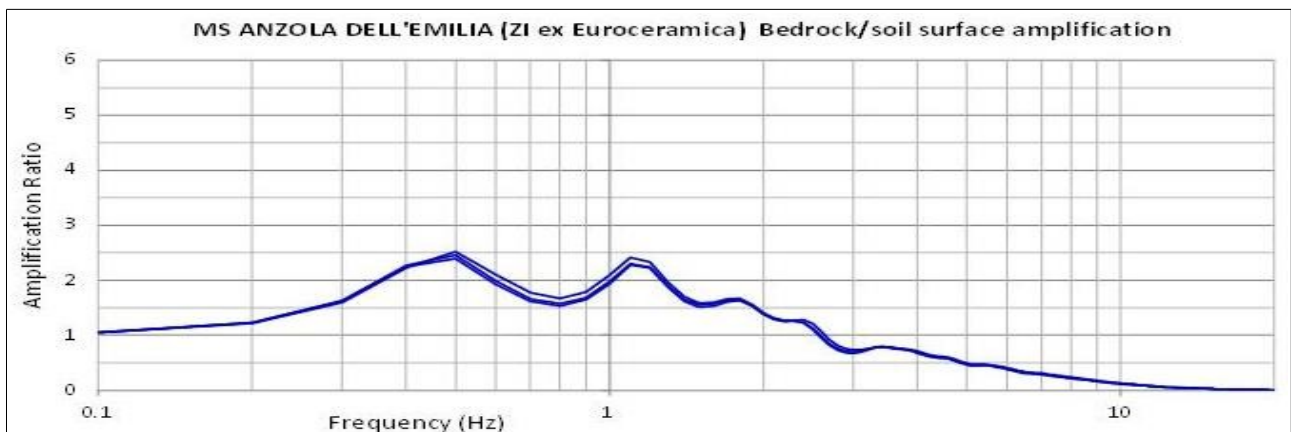
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.5	2.8	2.7
Input_000126xy	1.5	3.2	2.9
Input_000354xy	1.5	2.6	2.4
MEAN	1.5	2.9	2.7

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

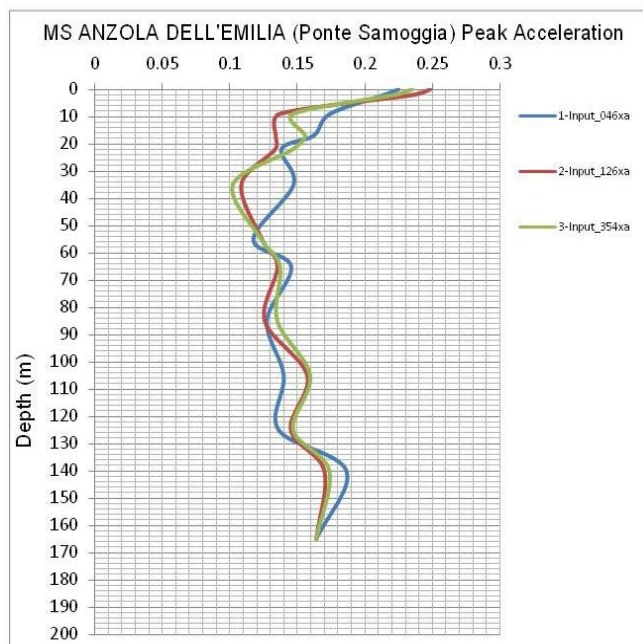


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – PONTE SAMOGGIA

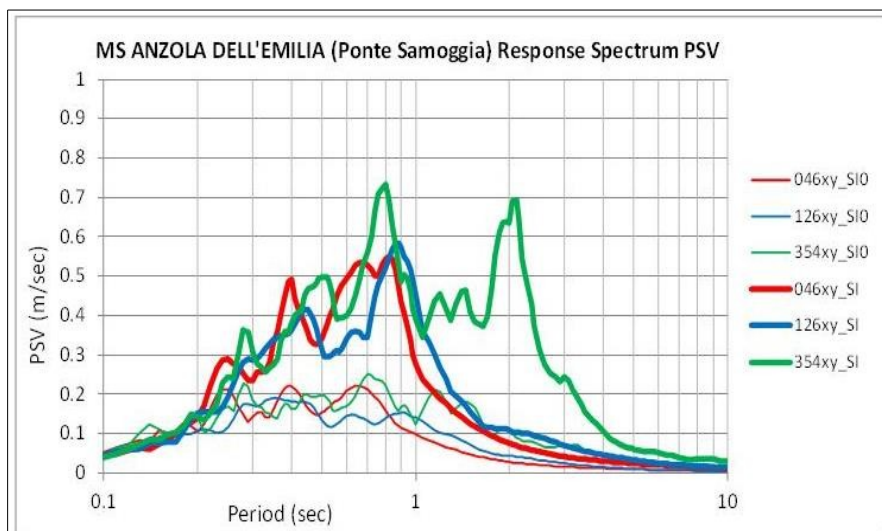
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	18,0	0,05	140	LAS Soil PI=15
2	7,0	9,0	16,5	0,05	170	LAS Soil PI=15
3	8,0	17,0	17,0	0,05	200	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
4	5,0	22,0	17,5	0,05	225	AL RC2 PI=28,1 (-18,5m)
5	13,0	35,0	18,0	0,05	250	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
6	20,0	55,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
7	10,0	65,0	20,0	0,05	375	GhS Gravel
8	20,0	85,0	19,0	0,05	350	LA Soil PI=30
9	20,0	105,0	20,5	0,05	425	GhS Gravel
10	20,0	125,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
11	15,0	140,0	21,5	0,05	450	GhS Gravel
12	25,0	165,0	21,0	0,05	425	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -165 m						

	Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN	
DGR 2193/2015	Max ag (g)	0.225	0.248	0.235	0.236
	FA Pga	1.4	1.5	1.4	1.4



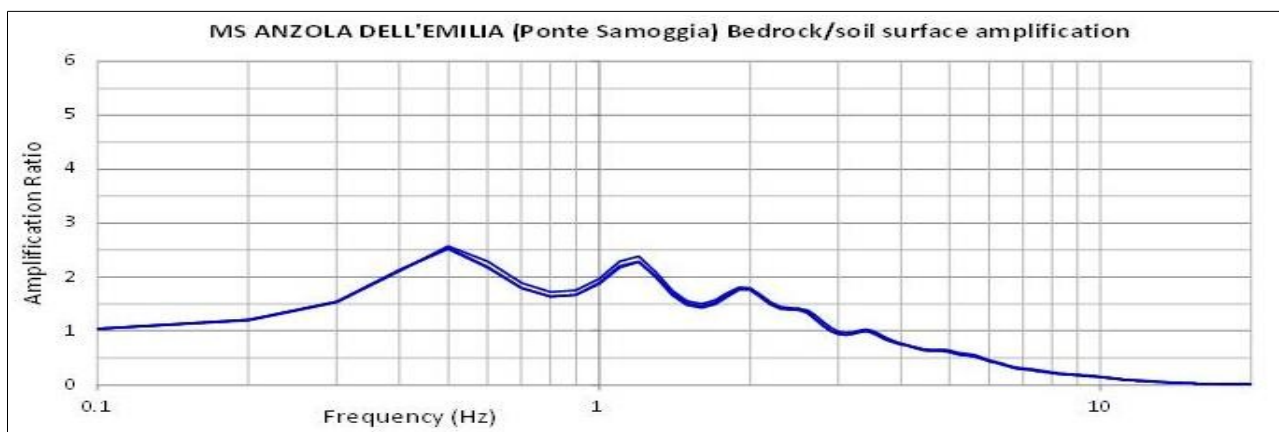
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E VALORI NUMERICI →



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.7	2.8	2.8
Input_000126xy	1.8	3.1	2.9
Input_000354xy	1.8	2.8	2.6
MEAN	1.8	2.9	2.8

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

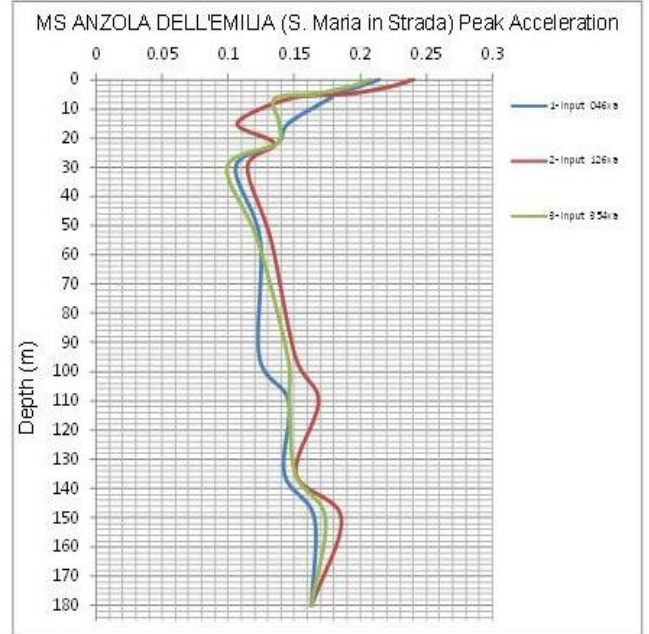


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – SANTA MARIA IN STRADA

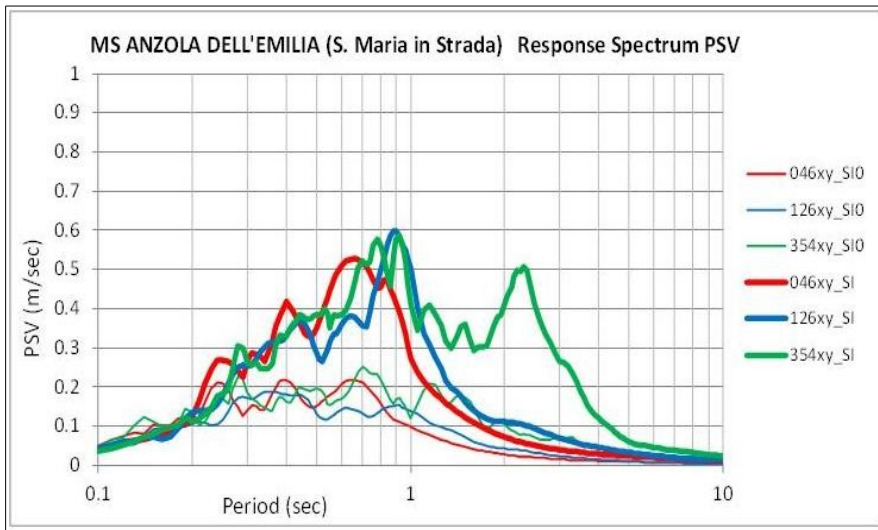
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,5	2,5	18,0	0,05	140	LAS Soil PI=15
2	2,5	5,0	18,5	0,05	180	LS SAND UPPER
3	1,5	6,5	16,5	0,05	170	LAS Soil PI=15
4	8,5	15,0	17,0	0,05	200	LA RC1 PI=21,6 (-11,5m)
5	7,0	22,0	18,0	0,05	225	LAS Soil PI=15
6	8,0	30,0	19,0	0,05	250	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
7	25,0	55,0	18,5	0,05	275	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
8	40,0	95,0	19,0	0,05	325	LA RC3 PI=17,7 (-37,5m)
9	15,0	110,0	20,5	0,05	400	GhS Gravel
10	25,0	135,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
11	15,0	150,0	21,0	0,05	450	GhS Gravel
12	25,0	175,0	21,0	0,05	425	LAS Soil PI=15
13						
Profondità media pseudobedrock: -175 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.214	0.240	0.208	0.227
2193/2015	FA Pga	1.3	1.5	1.3	1.4



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



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.6	2.7	2.7
Input_000126xy	1.6	3.2	3.0
Input_000354xy	1.5	2.6	2.3
MEAN	1.6	2.8	2.7

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL

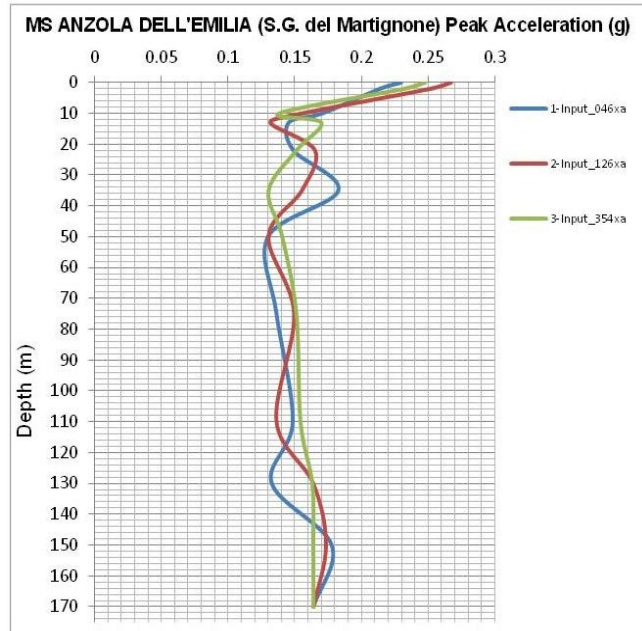


MODELLO SHAKE MS ANZOLA DELL'EMILIA (BO) – SAN GIACOMO DEL MARTIGNONE

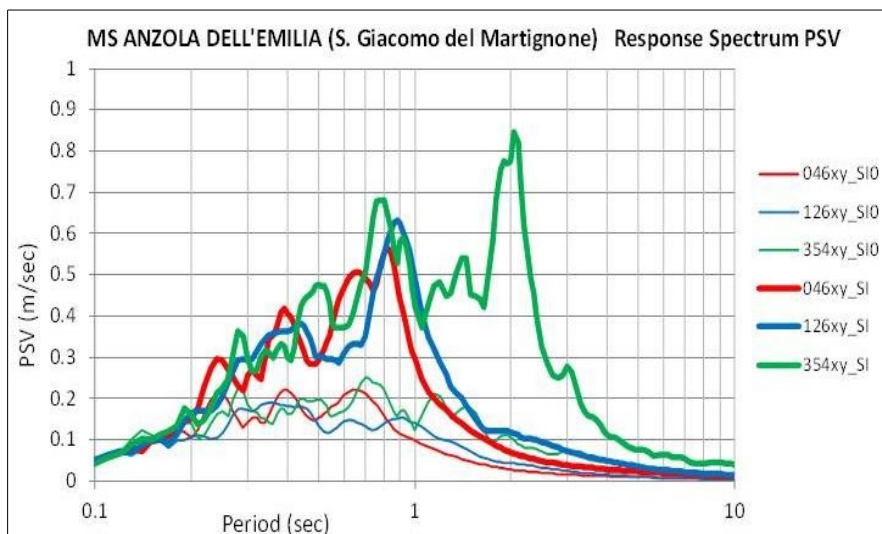
↓ DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI

Layer	Thickness (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	2,0	2,0	17,5	0,05	135	LA Soil PI=30
2	8,0	10,0	17,5	0,05	175	LA Soil PI=30
3	3,0	13,0	18,0	0,05	190	LS-LA Sand Upper
4	9,0	22,0	18,0	0,05	200	LA Soil PI=30
5	13,0	35,0	19,0	0,05	275	S-SGH Sand Lower
6	15,0	50,0	19,0	0,05	275	LA Soil PI=30
7	25,0	75,0	19,5	0,05	325	LA Soil PI=30
8	35,0	110,0	19,5	0,05	375	LA Soil PI=30
9	20,0	130,0	20,5	0,05	450	S-SGH Sand Lower
10	20,0	150,0	20,0	0,05	400	LA Soil PI=30
11	20,0	170,0	20,0	0,05	425	LA Soil PI=30
12						
13						
14						
Profondità media pseudobedrock: -170 m						

		Input_046xa	Input_126xa	Input_354xa	MEAN
DGR	Max ag (g)	0.230	0.267	0.248	0.248
2193/2015	FA Pga	1.4	1.6	1.5	1.5



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



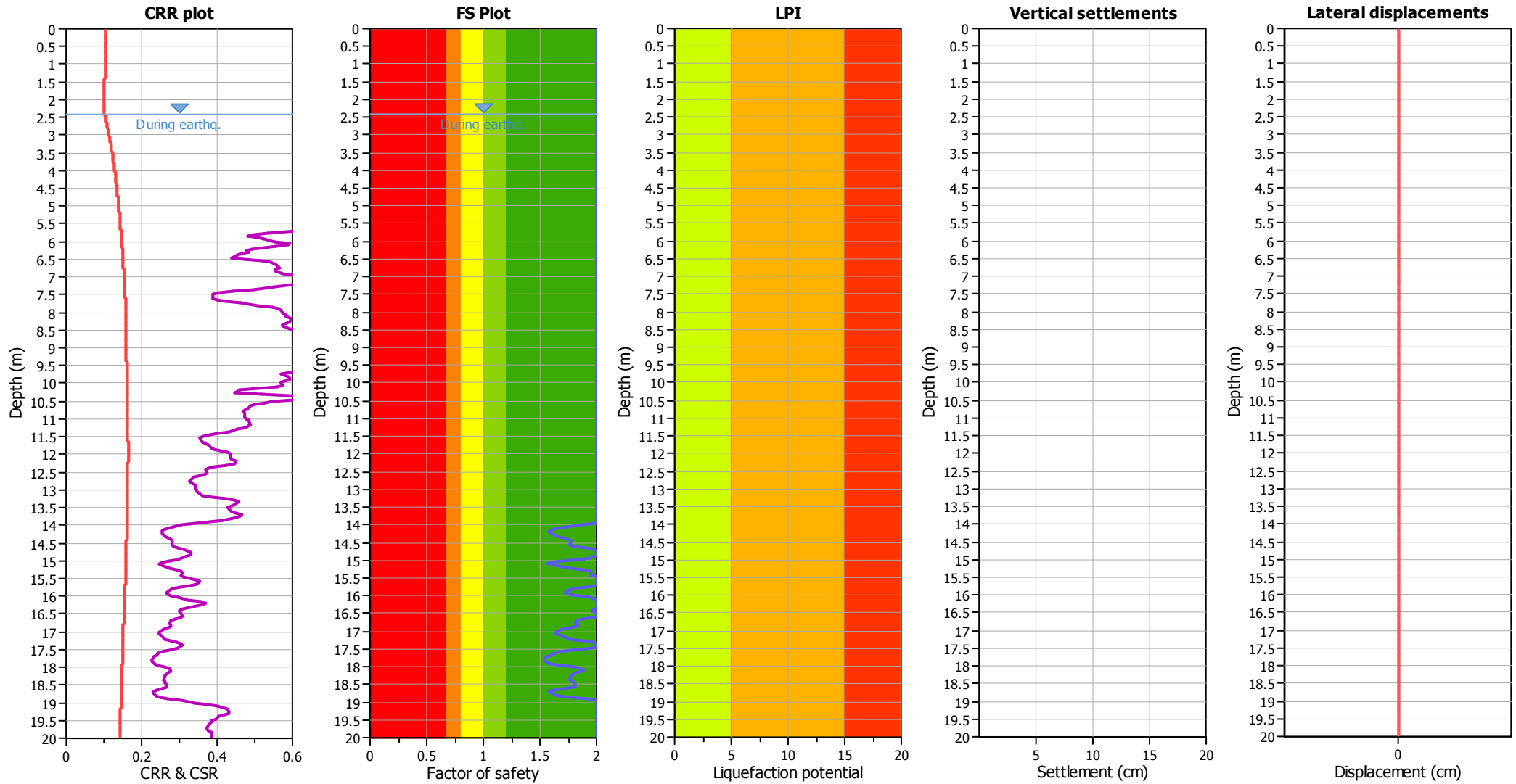
SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀) PER I TRE INPUT DI RIFERIMENTO E FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ↓

DGR 2193/2015	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
Input_000046xy	1.6	2.7	2.7
Input_000126xy	1.8	3.3	3.0
Input_000354xy	1.7	2.7	2.7
MEAN	1.7	2.9	2.8

FUNZIONE DI TRASFERIMENTO RICAVATA DALLA MODELLAZIONE DI RSL



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (erthq.):	2.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

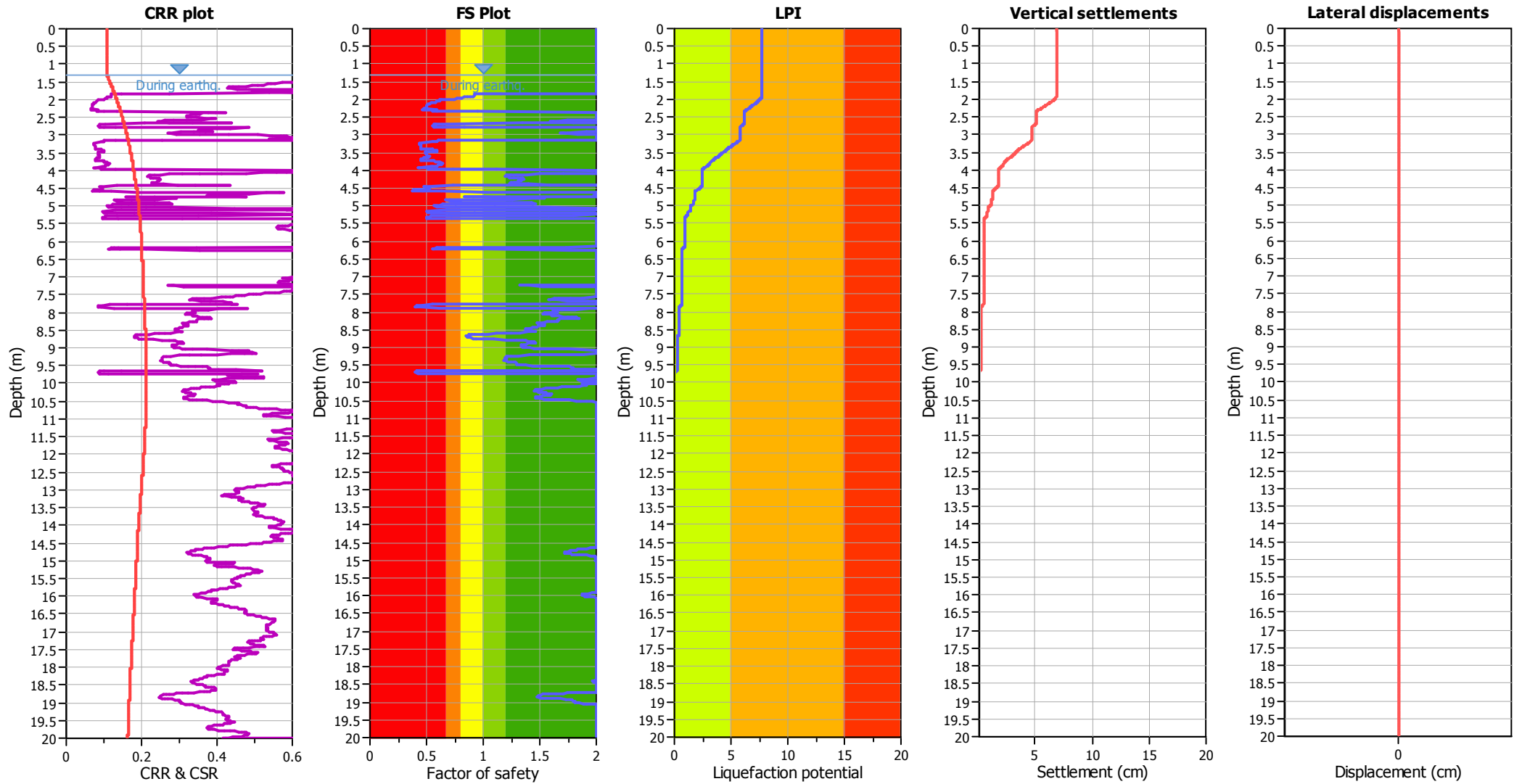
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (erthq.):	1.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

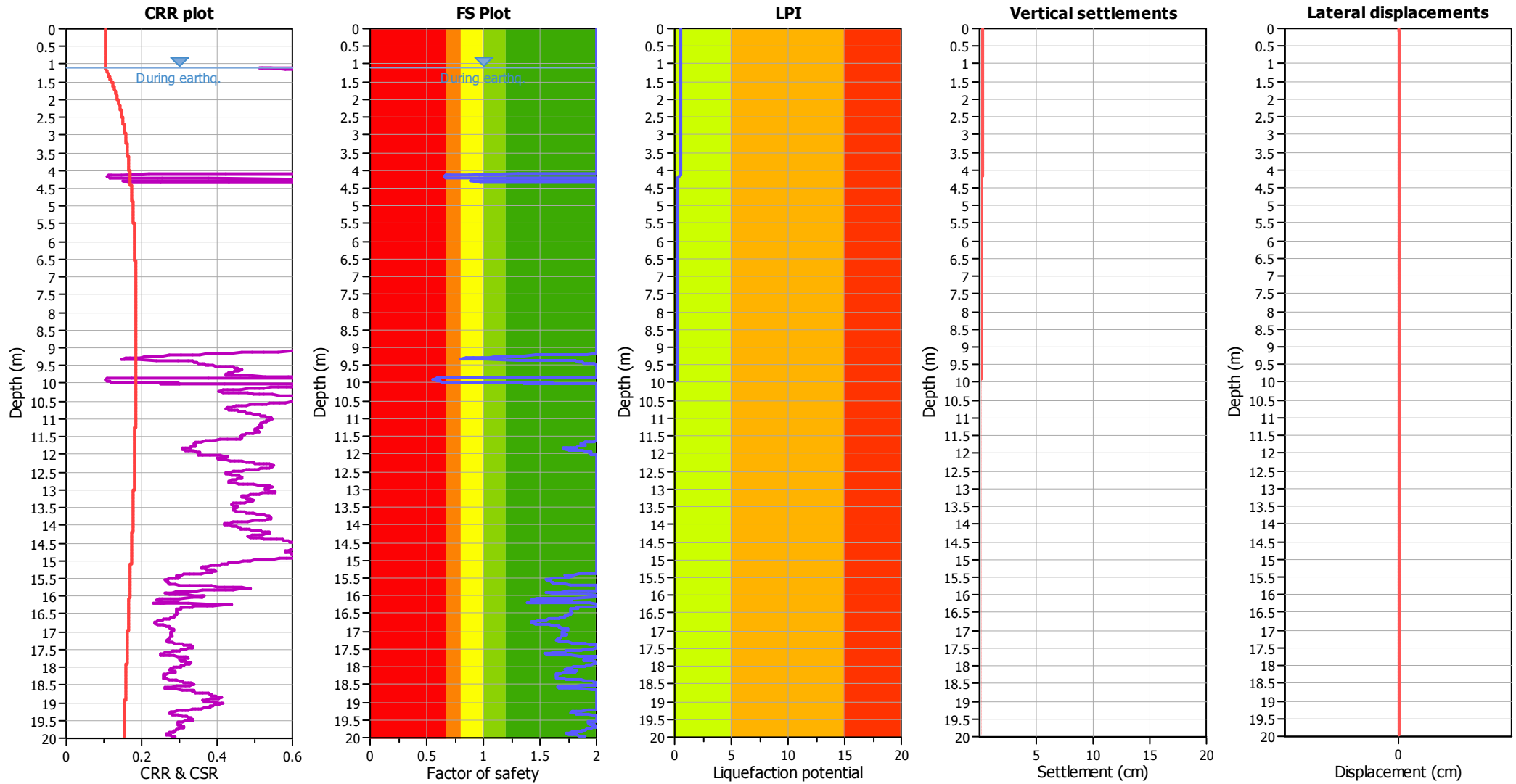
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.10 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.10 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

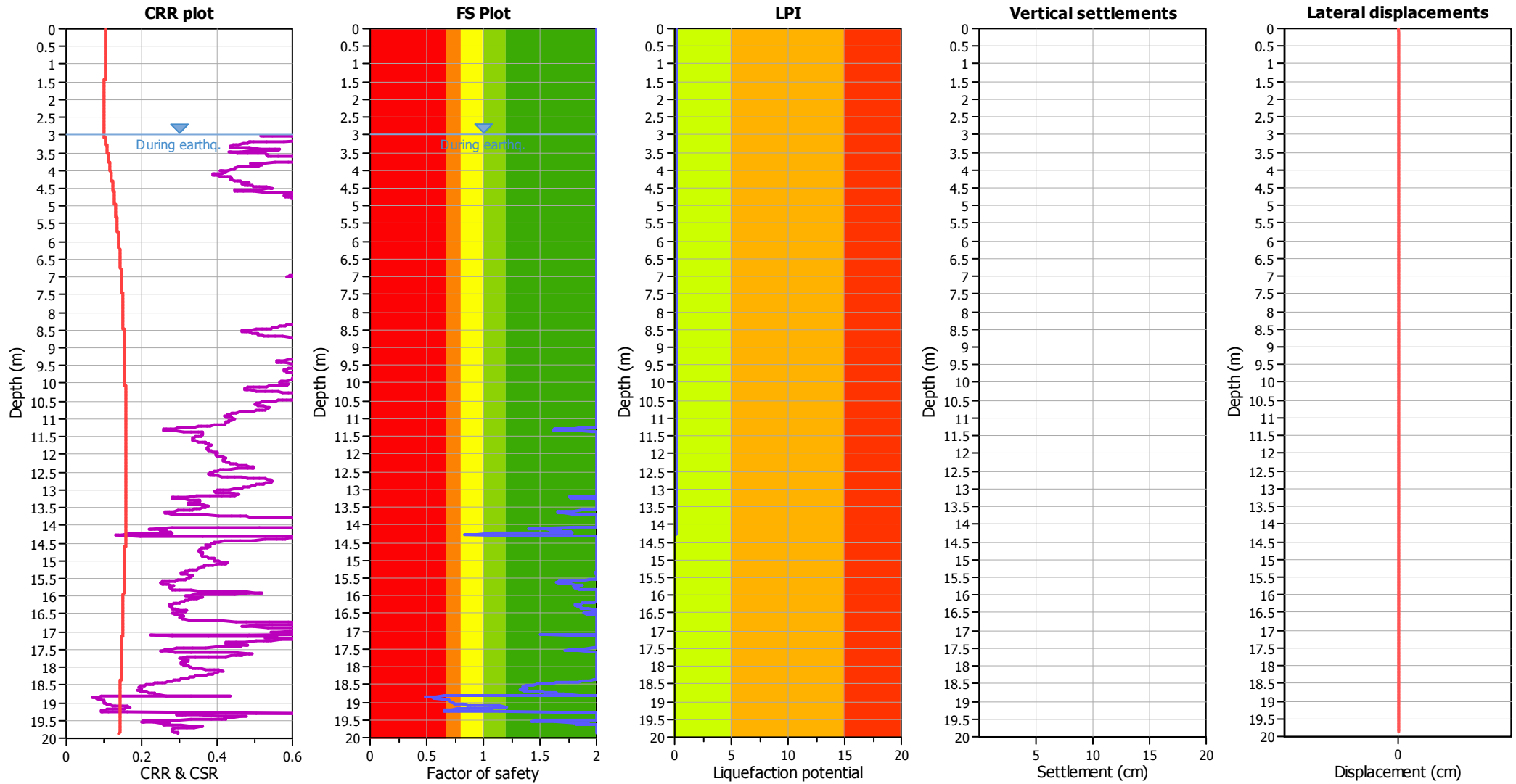
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	3.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

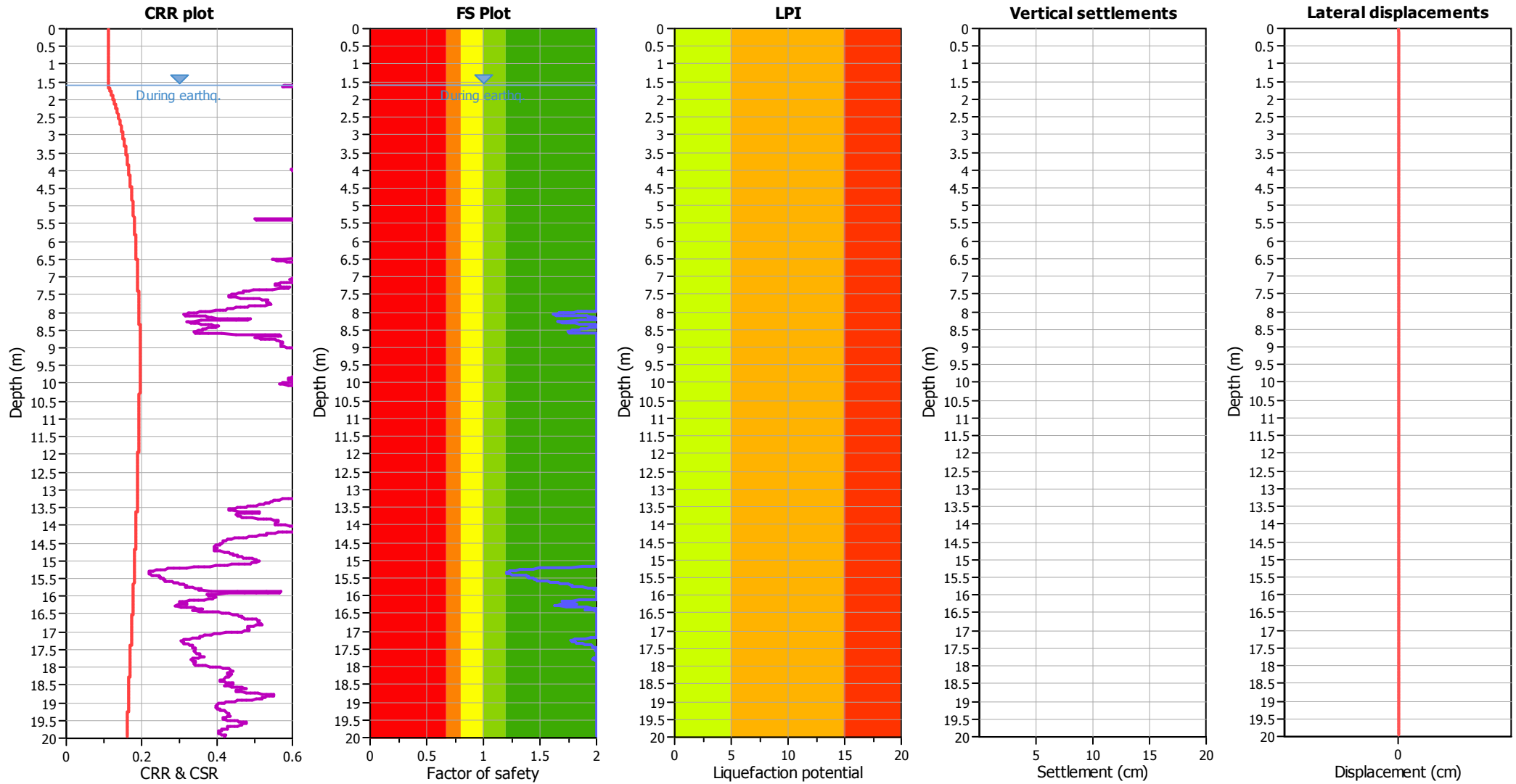
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

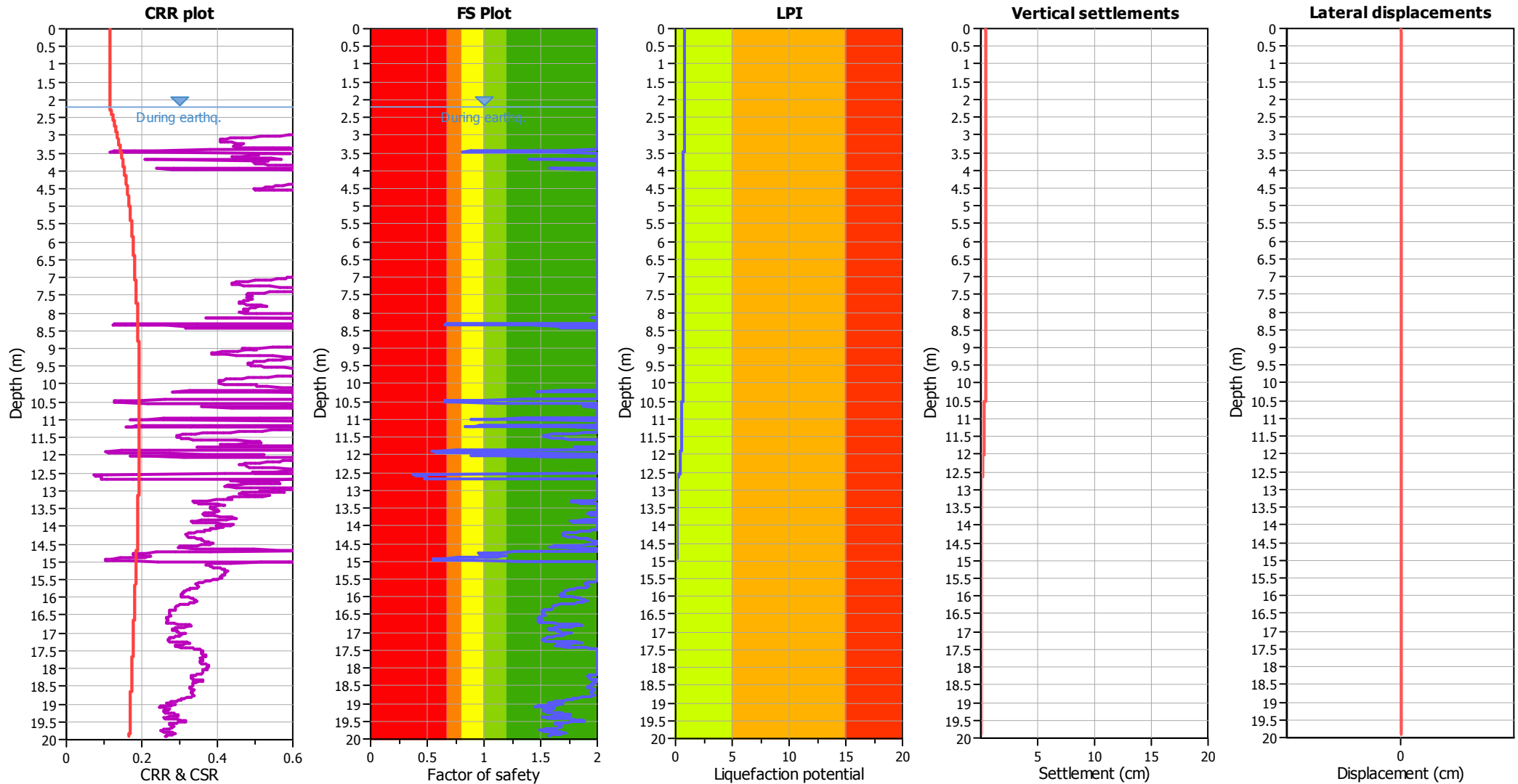
F.S. color scheme

■	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:	Robertson (2009)	Depth to water table (erthq.):	2.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

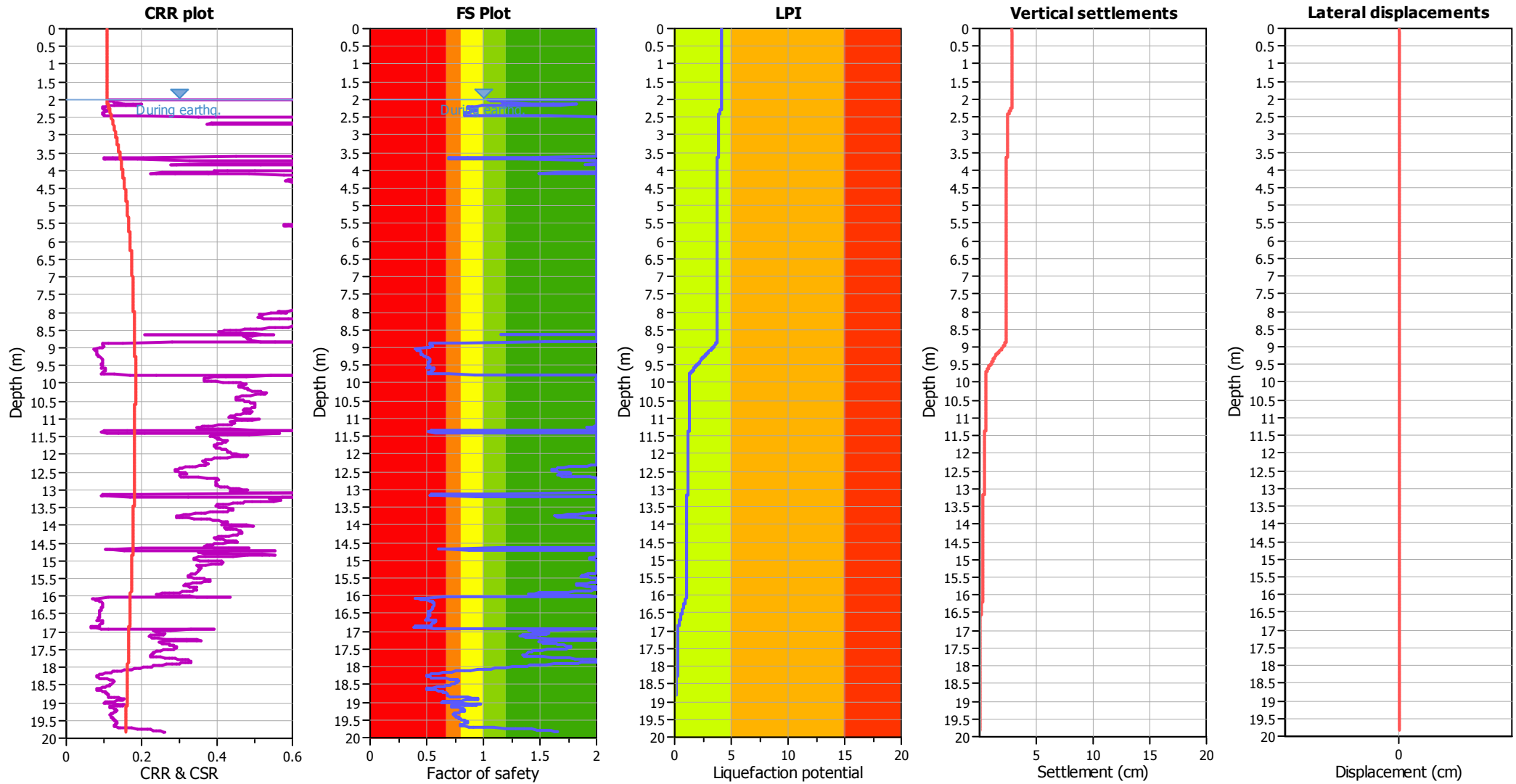
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

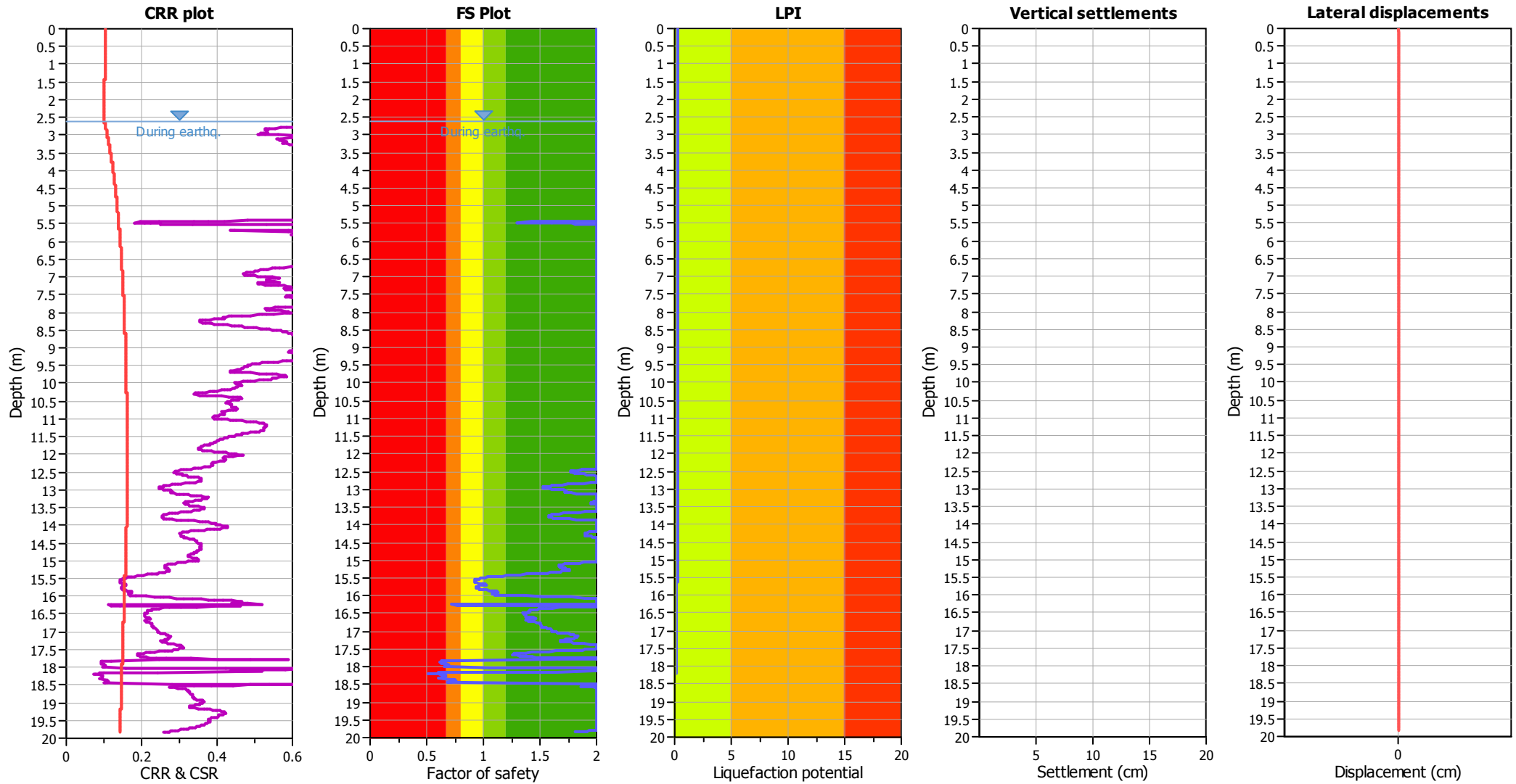
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

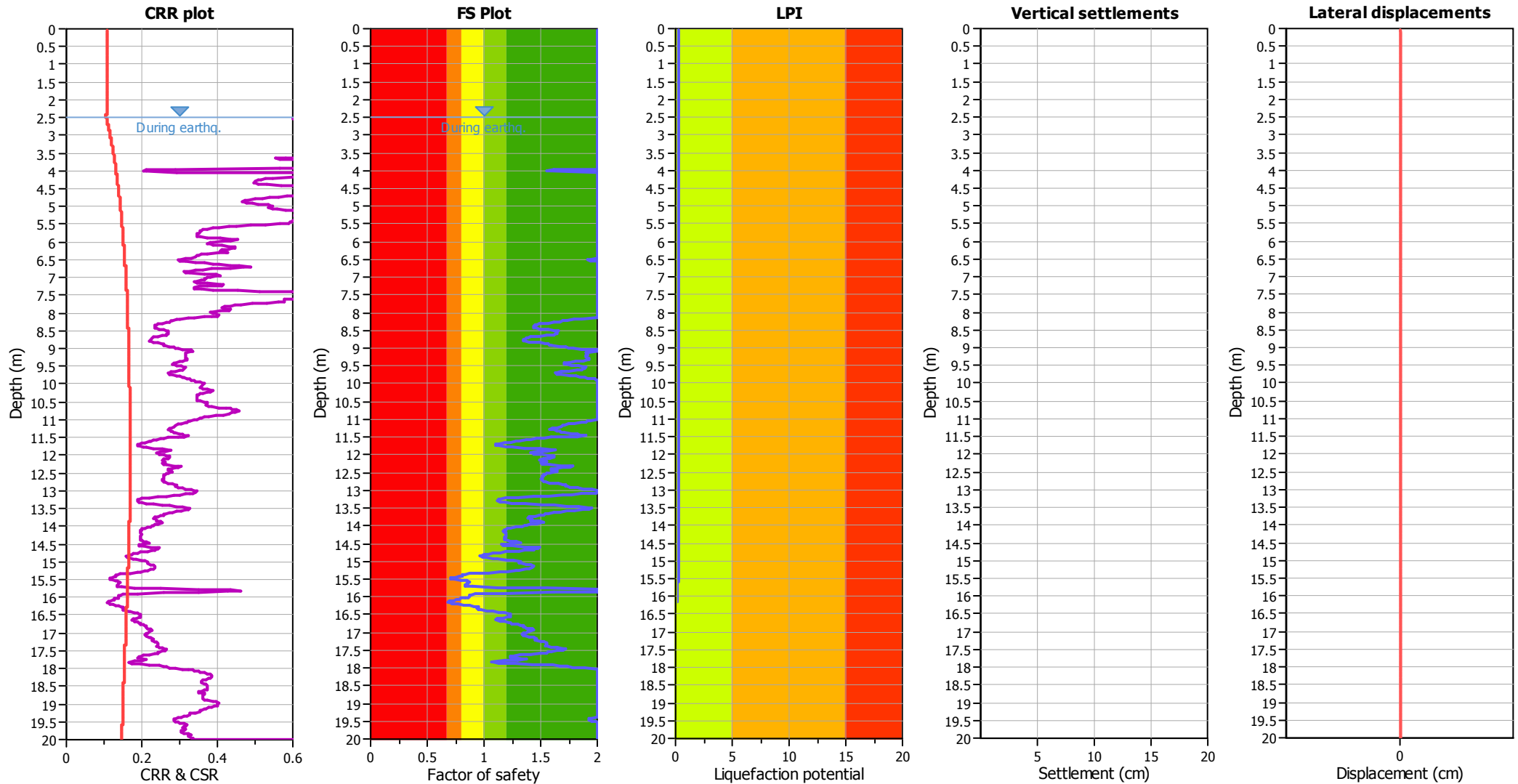
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.23	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

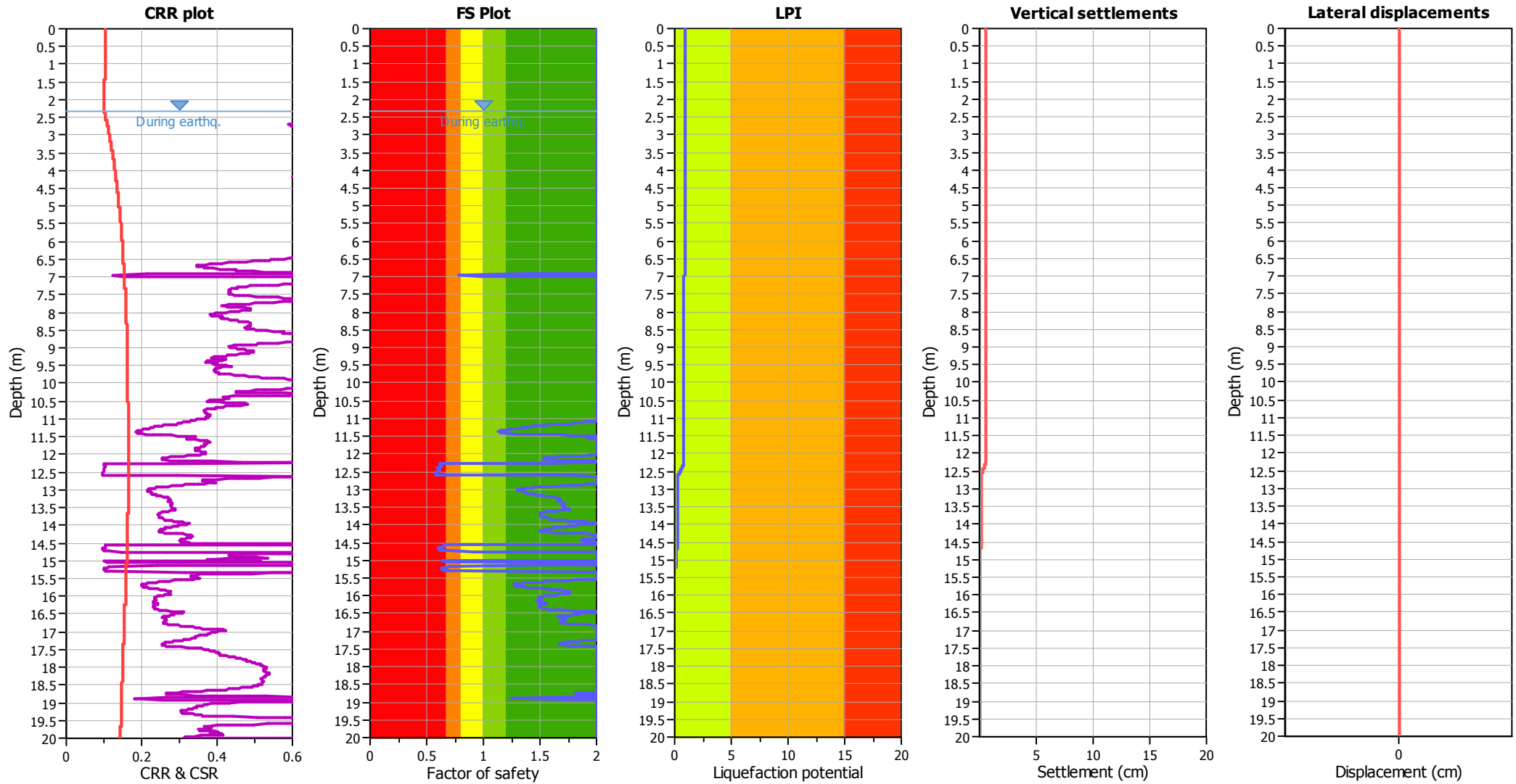
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.35 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.35 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

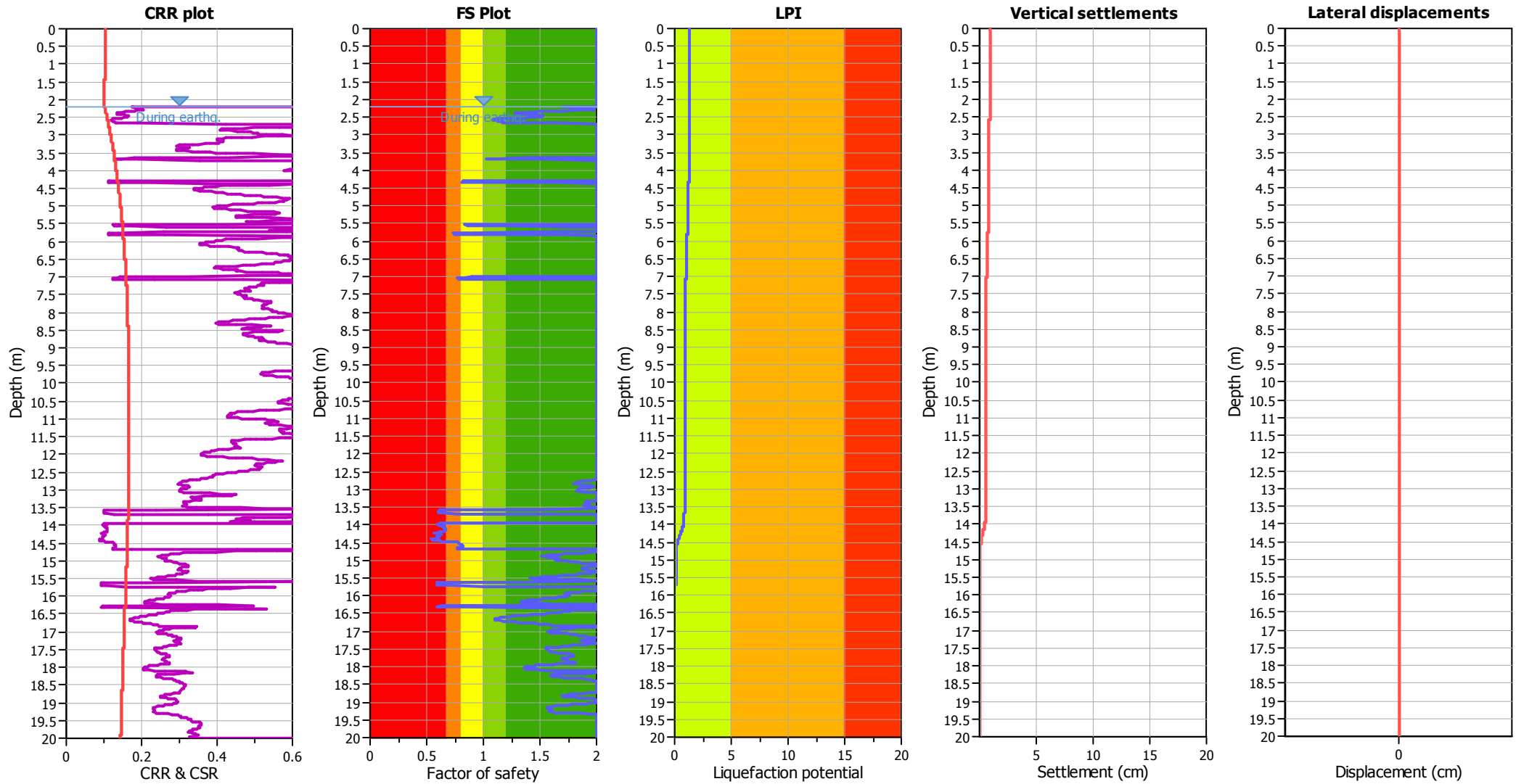
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

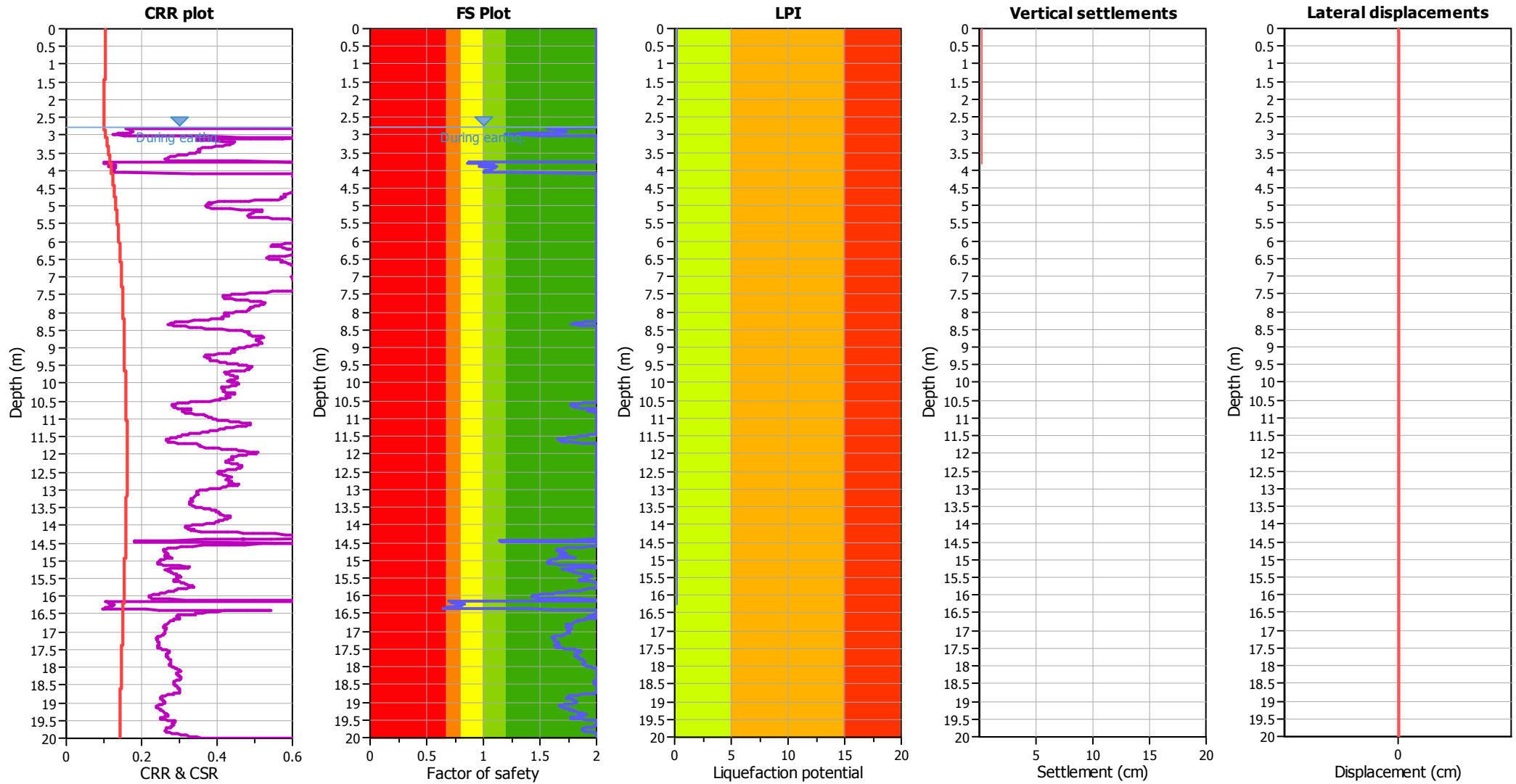
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.80 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

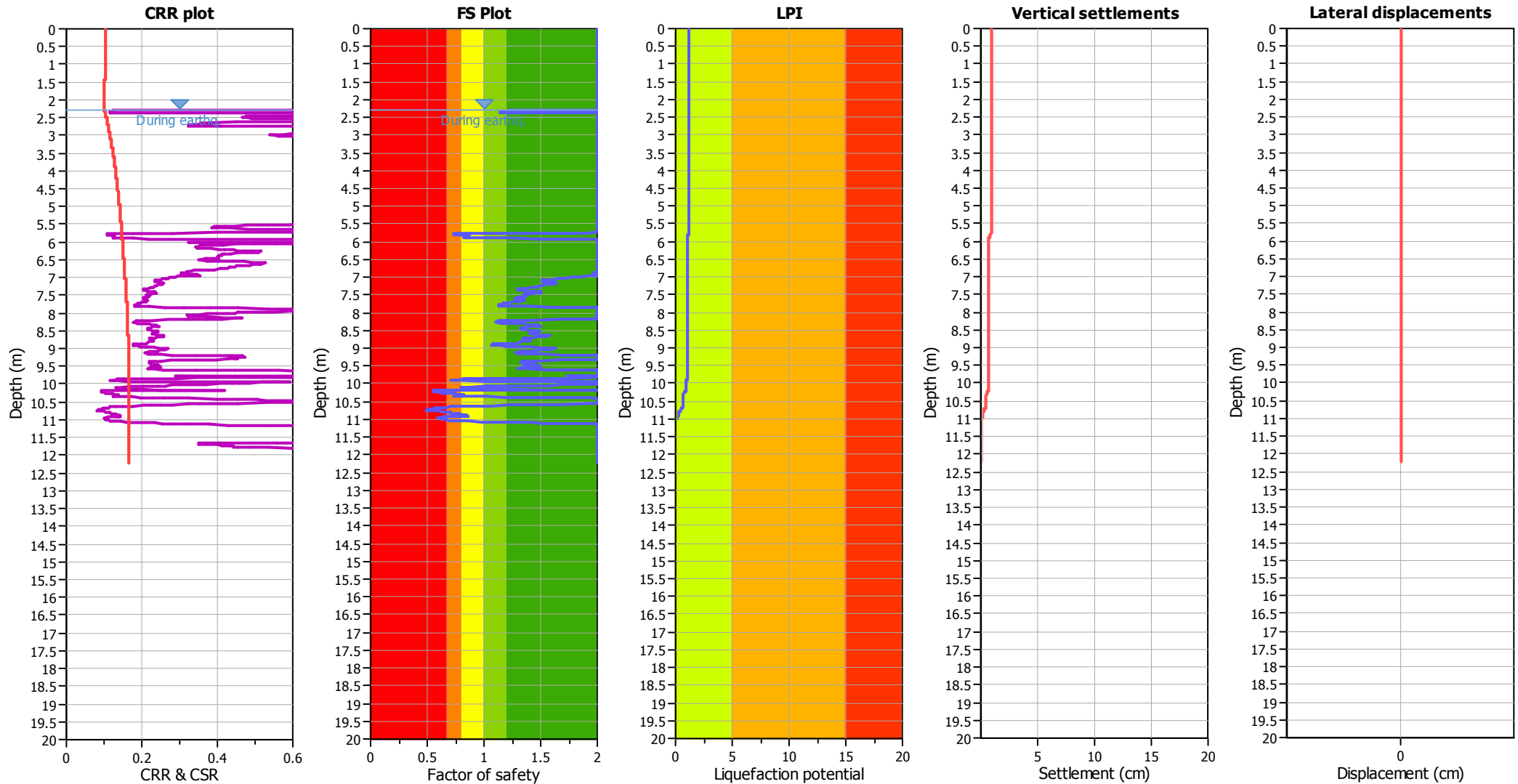
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

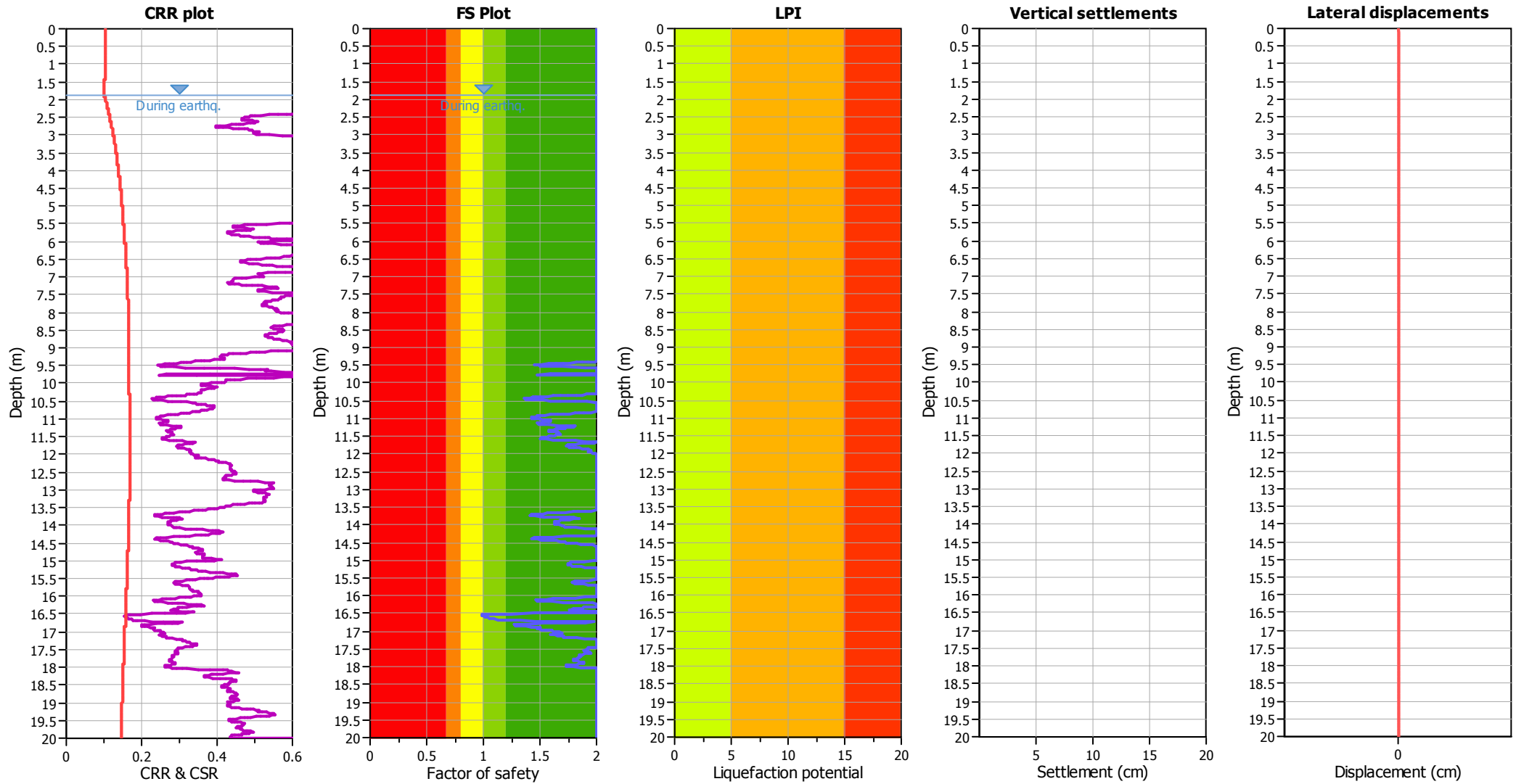
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.90 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.90 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

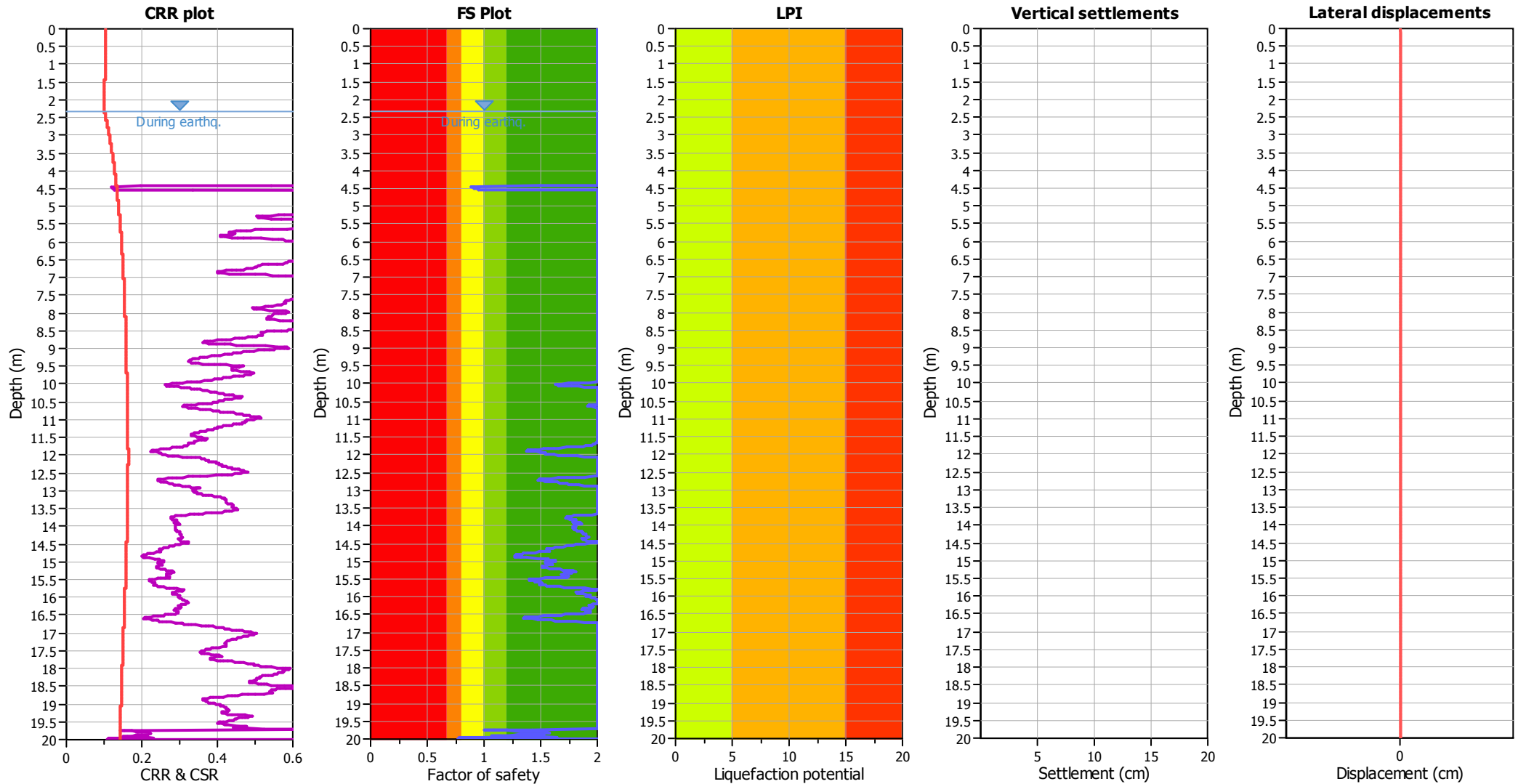
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.35 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.35 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

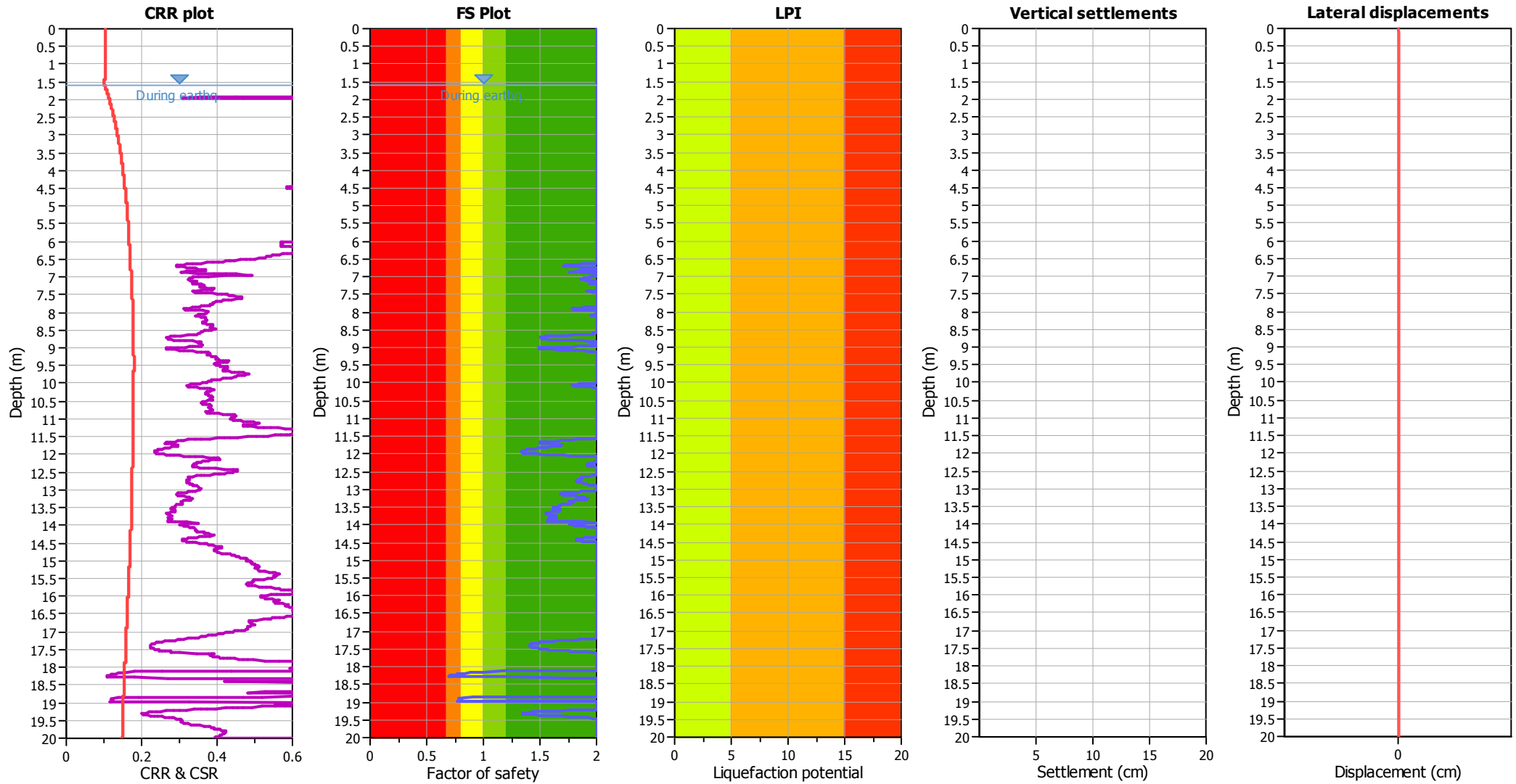
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

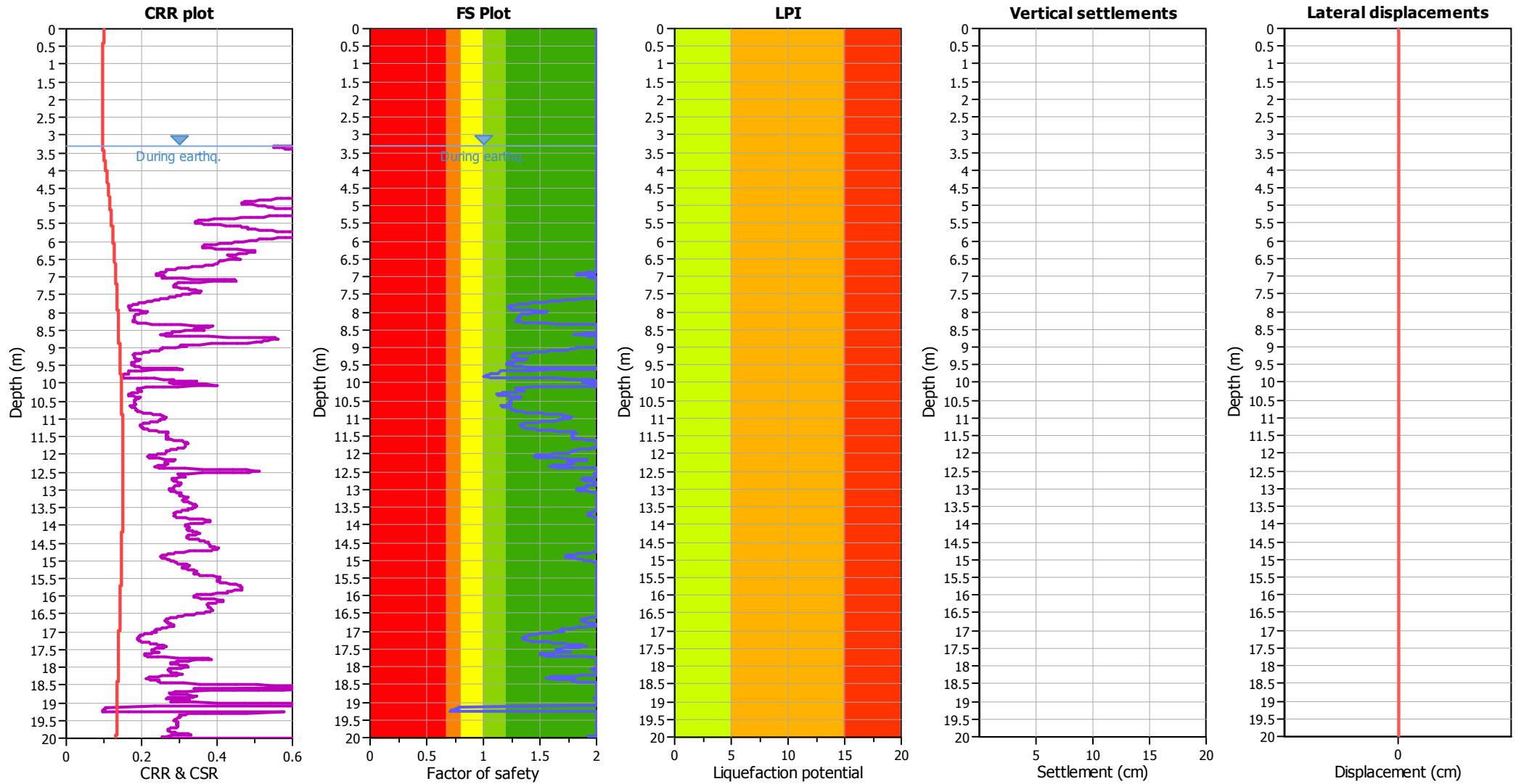
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	3.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

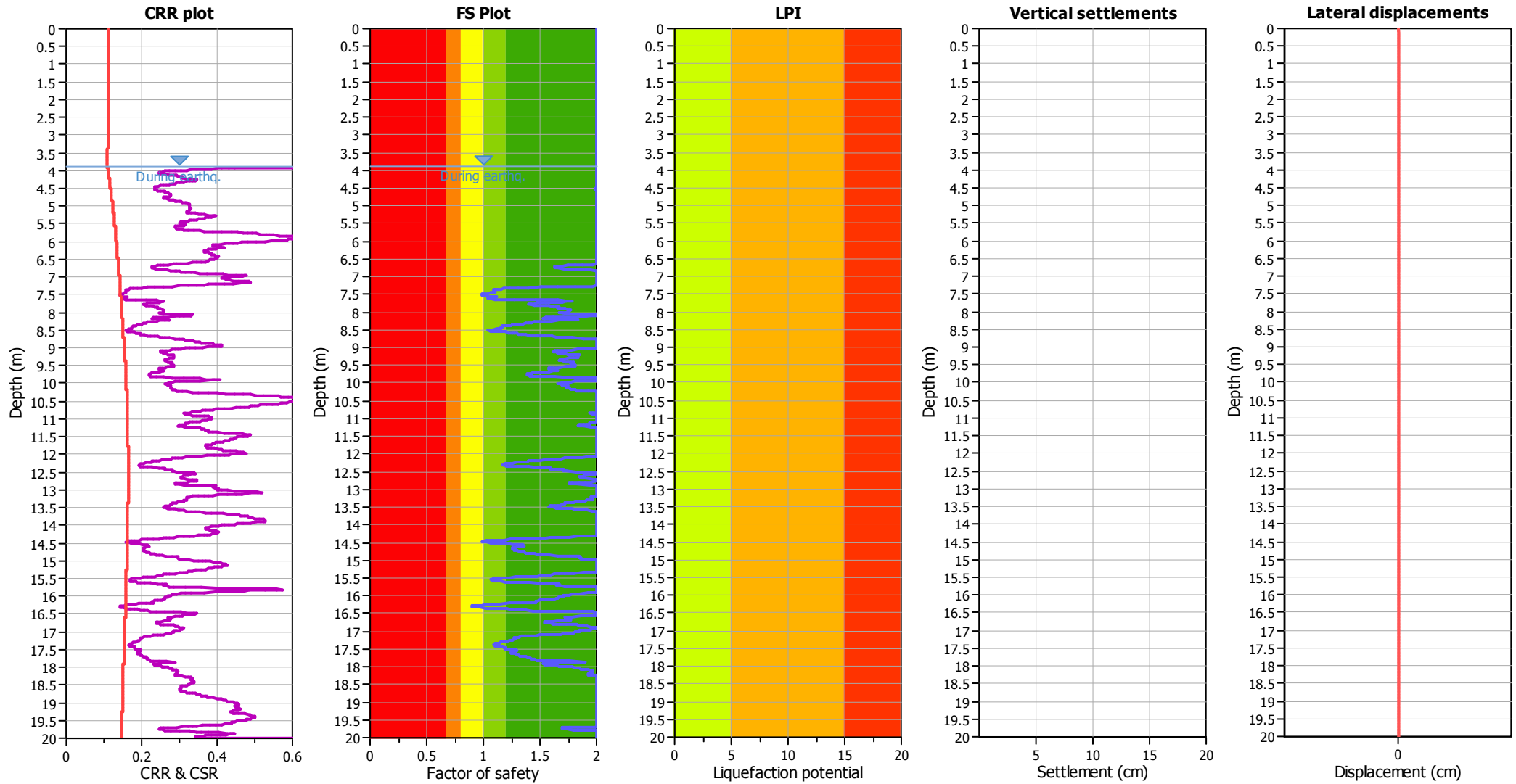
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (erthq.):	3.90 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.90 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

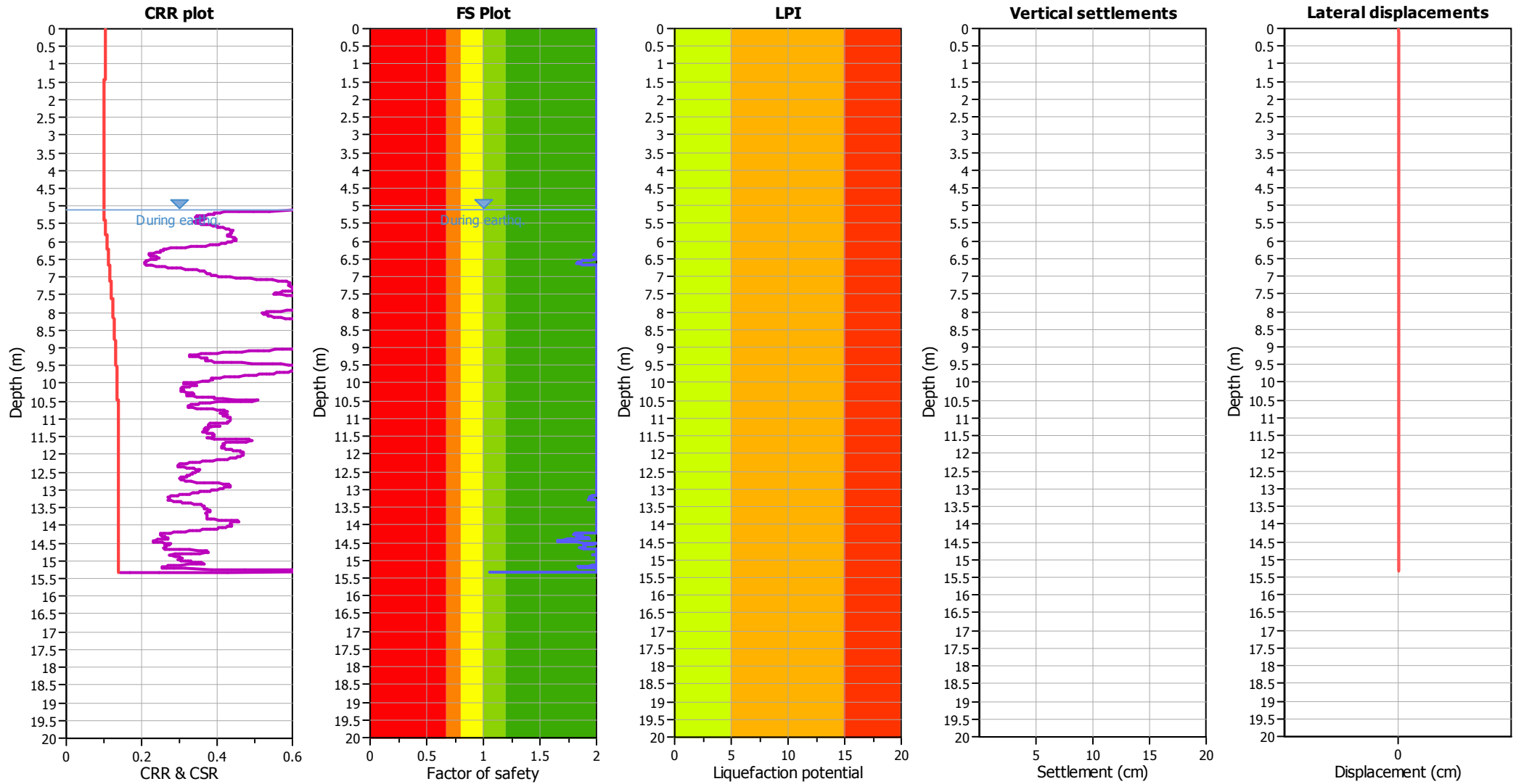
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	5.10 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.22	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	5.10 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

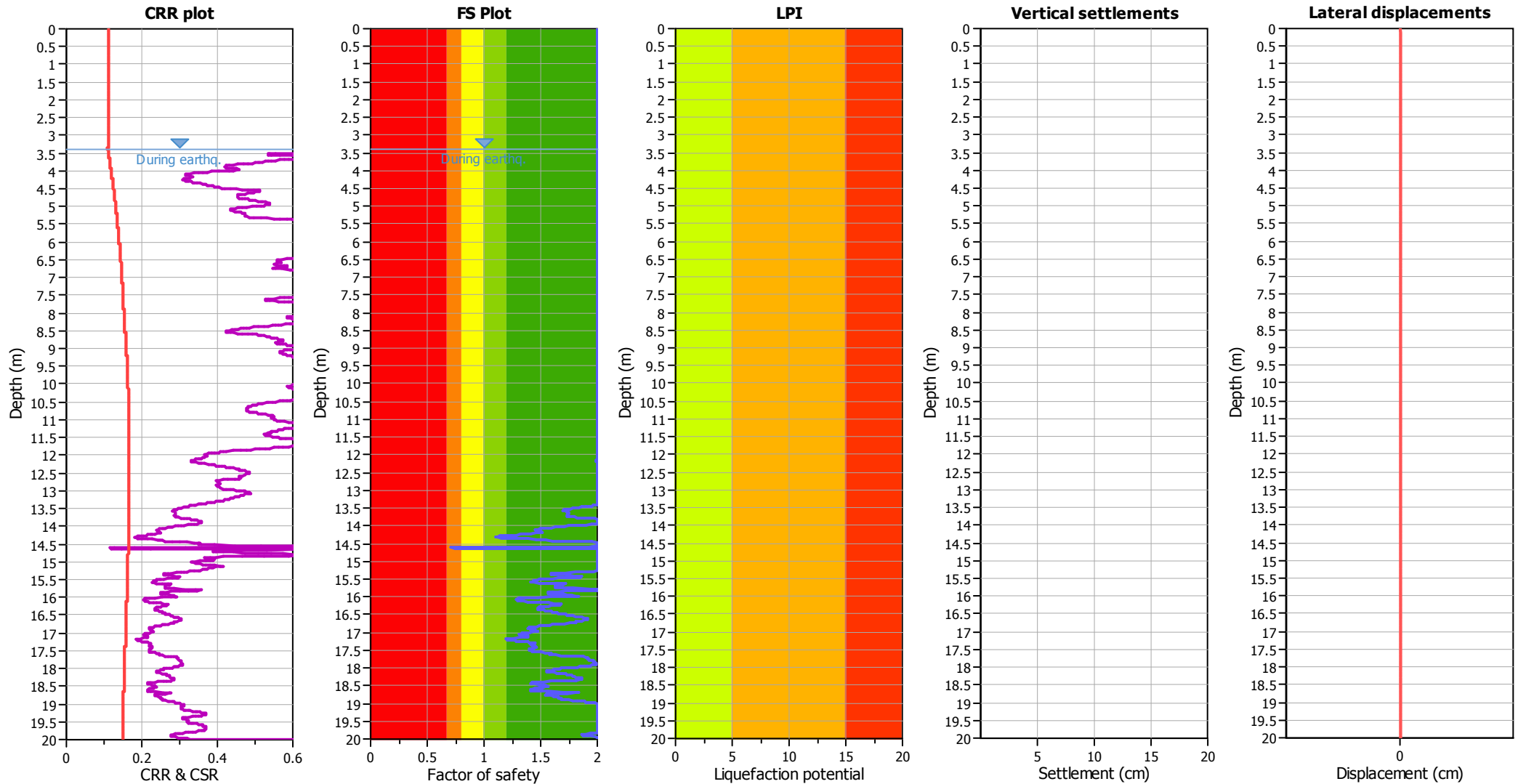
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	3.40 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.40 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

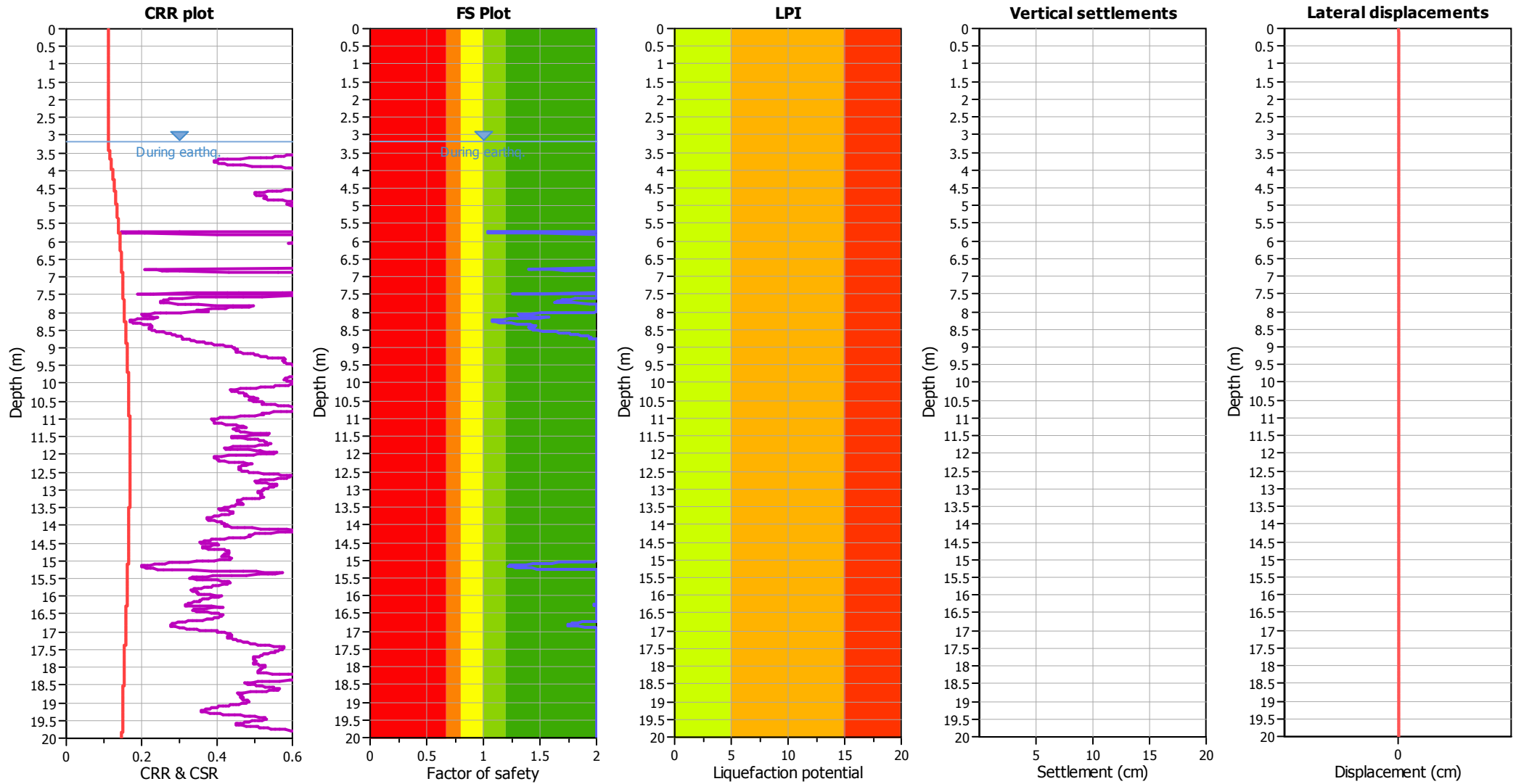
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	3.20 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

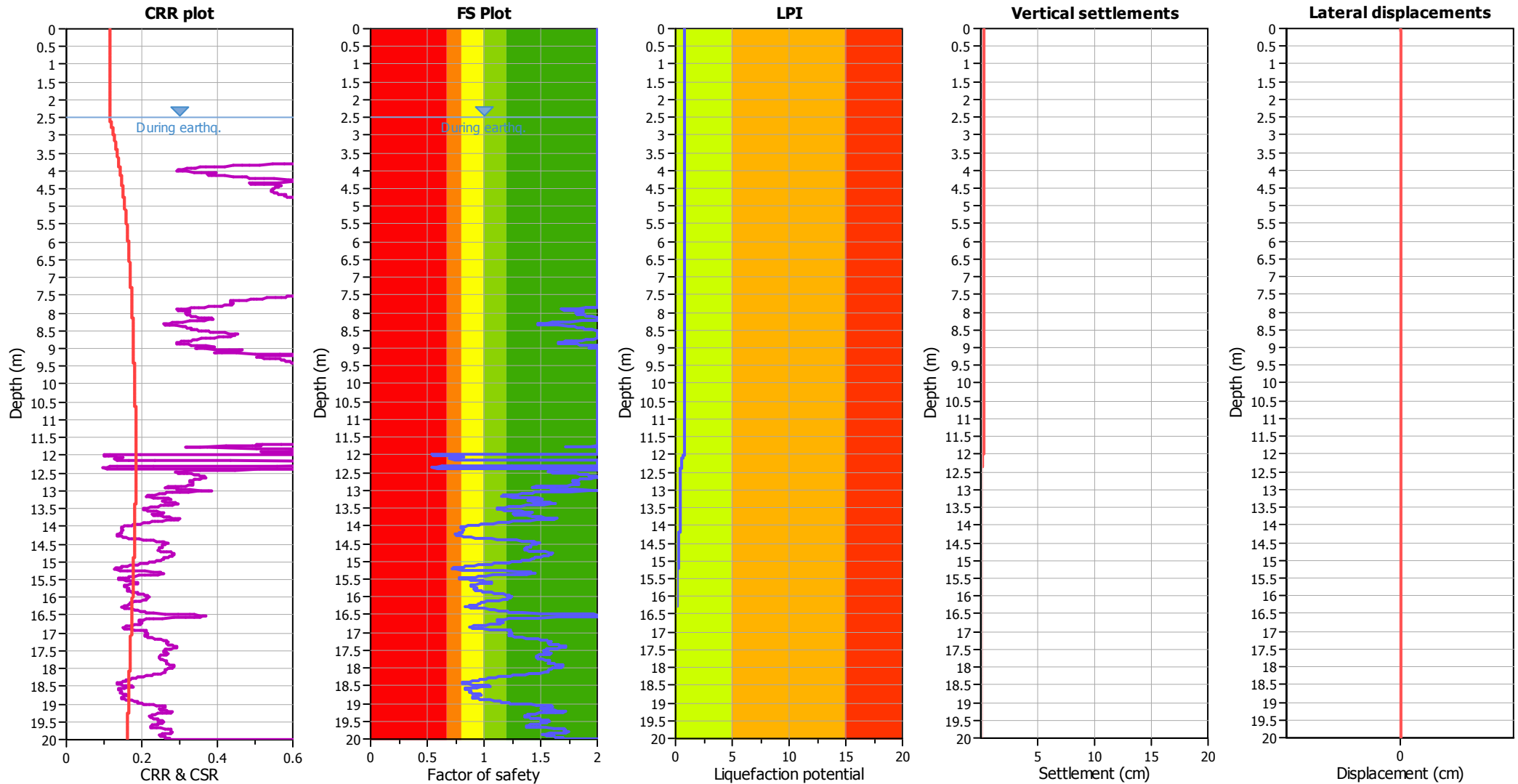
F.S. color scheme

- 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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
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:	All soils
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 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