

COMUNE DI FORLIMPOPOLI

PROVINCIA DI FORLI' CESENA

**ACCORDO OPERATIVO AI SENSI DELL'ATTO DI INDIRIZZO
APPROVATO CON DELIBERA DI CONSIGLIO COMUNALE N°72
DEL 18/11/2018 - AREA EX ORBAT**

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Committente: S.F.I.R. - Società Fondiaria Industriale Romagnola S.r.l. IN LIQUIDAZIONE

Redazione: Dott. Geol. Alberto Filelfi

Spazio per ufficio tecnico



Dott. Geol. Alberto Filelfi

Studio di Geologia Applicata ed Ambientale

Ordine dei Geologi dell'Emilia-Romagna A.P. n°1115

Data

Dicembre 2021

Prot. Int.: RG180612211

INDICE

1 - INTRODUZIONE.....	1
2 - INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO.....	1
3 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO E GEOLOGICO.....	2
4 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	2
5 - INQUADRAMENTO NORMATIVO E VINCOLI SOVRAORDINATI.....	3
6 - MODELLO GEOLOGICO.....	7
7 - MODELLO SISMICO.....	9
8 - CONCLUSIONI.....	17

In allegato:

Tavola 1 - Corografia, scala 1:25.000

Tavola 2 - Inquadramento Territoriale, scala 1:5.000

Tavola 3 - Inquadramento Geologico, scala 1:3.000

Tavola 4 - Ubicazione Indagini, scala 1:500

Allegato A – Indagini Geognostiche: tabulati e grafici

Allegato B – Indagini Geognostiche Regione Emilia-Romagna

Allegato C – Studio Geofisico: relazione tecnica

Allegato D – Verifiche rischio di liquefazione del terreno

1 - **INTRODUZIONE**

Nella relazione seguente sono presentati i risultati dello studio geologico e sismico realizzato nell'area Ex Orbat, tra Via Roma e Via Palmiro Togliatti, a Forlimpopoli (FC). Il lotto è identificato come Ambito A11.1 nel PSC vigente.

Scopo del lavoro è quello di ricostruire il *modello geologico* e il *modello sismico* generale del sottosuolo del intero comparto per valutare l'edificabilità dell'area.

Lo studio è stato impostato nel seguente modo:

- Consultazione cartografia tematica dell'area:
 - *Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:10.000.*
 - *Indagini geognostiche contenute nel database della Regione Emilia-Romagna.*
 - *Cartografia allegata al PSC del Comune di Forlimpopoli.*
 - *Cartografia allegata al PTCP Provincia Forlì Cesena.*
 - *Cartografia allegata al PSAI Autorità dei Bacini Romagnoli.*
 - *Studio di Micorzonazione Sismica del Comune di Forlimpopoli.*
- Rilievo di dettaglio dell'area e di un suo significativo intorno per accertare il quadro geologico e geomorfologico generale.
- Consultazione delle sezioni litostratigrafiche di alcuni pozzi acqua, realizzati nel lotto dalla Ditta ORBAT, visibili nel Database on-line del Servizio Geologico, sismico e dei Suoli della Regione-Emilia Romagna.
- Esecuzione di n°3 prove penetrometriche statiche con punta meccanica elettrica dotata di piezocono allo scopo di definire in maniera più puntuale la successione litostratigrafica del primo sottosuolo e ottenere indicazioni sulle caratteristiche geotecniche ed idrogeologiche dei depositi presenti.
- Consultazione dello studio geofisico contenuto nella relazione geologica allegata al PSC del Comune di Forlimpopoli (MASW+HVSR).
- Realizzazione di uno studio geofisico mediante n°2 registrazioni sismiche a stazione singola (Tromino-HVSR).
- Ricostruzione del modello geologico e del modello sismico del comparto A11-1.
- Conclusioni finali

2 - **INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO**

Il comparto è identificato nella seguente cartografia:

- Tavoletta 255-NE della Carta Tecnica Regionale a scala 1:25.000 (Vedi tav. 1).
- Elementi n° 255021 e 255024 della Carta Tecnica Regionale a scala 1:5.000 (Vedi tav. 2).

3 - **INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO E GEOLOGICO**

L'area in esame si trova nell'alta pianura Forlivese, nel settore centro settentrionale dell'abitato di Forlimpopoli . Il comparto è delimitato a est da Via Roma, a ovest da via Palmiro Togliatti e a nord dalla tratta ferroviaria Bologna-Rimini. In passato l'area era interamente occupata dagli stabilimenti delle distillerie ORBAT, attualmente quasi tutti gli edifici sono stati demoliti, anche se in molti settori sono ancora presenti i solai e le fondazioni delle strutture.

Dal punto di vista geomorfologico il comparto si presenta per la maggior parte sub-pianeggiante, con un leggero gradiente in direzione nord-est, e si sviluppa tra le quote topografiche di 30 e 28 m s.l.m.

Il profilo topografico non è regolare a causa delle lavorazioni effettuate durante la demolizione dello stabilimento e rimozione delle macerie. In passato nel settore NW del comparto era presente anche un macero e/o laghetto che attualmente non è più visibile.

4 - **INQUADRAMENTO GEOLOGICO**

Come illustrato nella Carta Geologica della Regione Emilia Romagna (vedi Tavola 3) e nello stralcio della sezione geologica tratta dal sito del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna (vedi figura 1), la litologia di superficie, entro i primi 20 ÷ 25 metri di profondità è costituita da depositi alluvionali del Pleistocene Superiore che si presentano prevalentemente come alternanze lentiformi di argille e limi con inglobate rare lenti di terreni sabbiosi e limoso sabbiosi. Più in profondità compaiono i depositi alluvionali riferibili al conoide del Fiume Ronco e costituiti da una potente serie di strati ghiaioso sabbiosi alternati a livelli più argillosi.

La situazione stratigrafica generale è stata ricostruita sulla base dei dati storici e bibliografici ed anche da quelli forniti dai numerosi pozzi artesiani perforati sia all'interno del centro abitato che nelle immediate vicinanze (vedi figura 1).

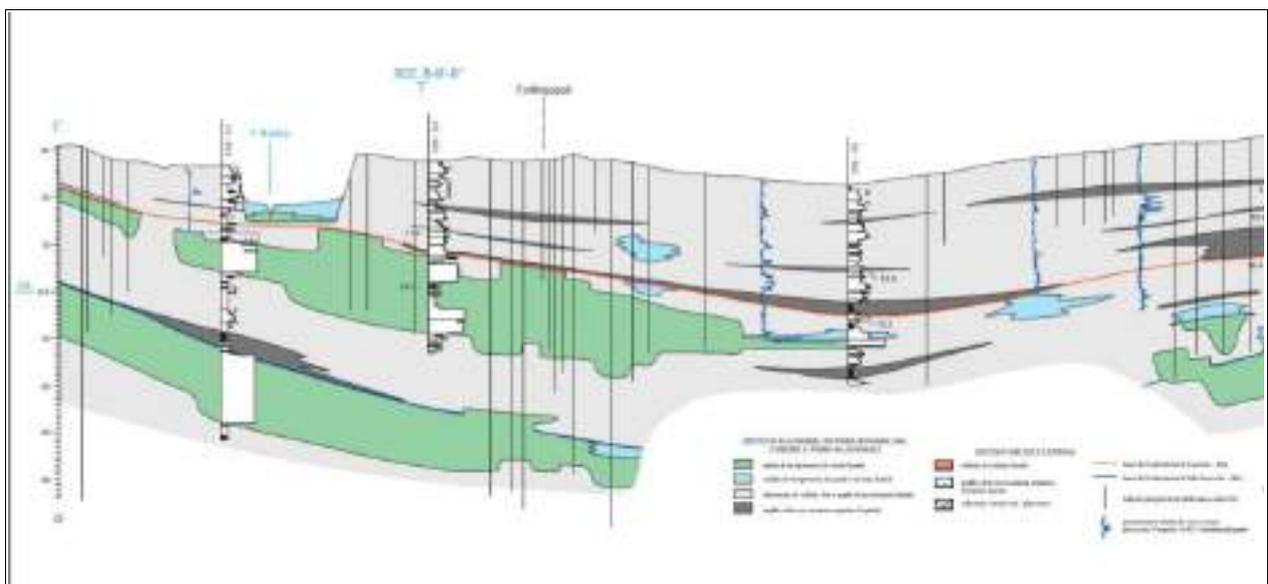


Figura 1: Stralcio sezione litostratigrafica 083 - Regione Emilia-Romagna.

In particolare la Carta Geologica (vedi tavola 3 in allegato) indica come nel settore centrale e settentrionale del comparto siano presenti depositi quaternari appartenenti al Subsistema di Ravenna – Unità di Modena (AES8a) costituito in prevalenza da sabbia limoso argillosa, mentre nel settore orientale e meridionale i terreni siano prevalentemente limoso argillosi (Subsistema di Ravenna - AES8).

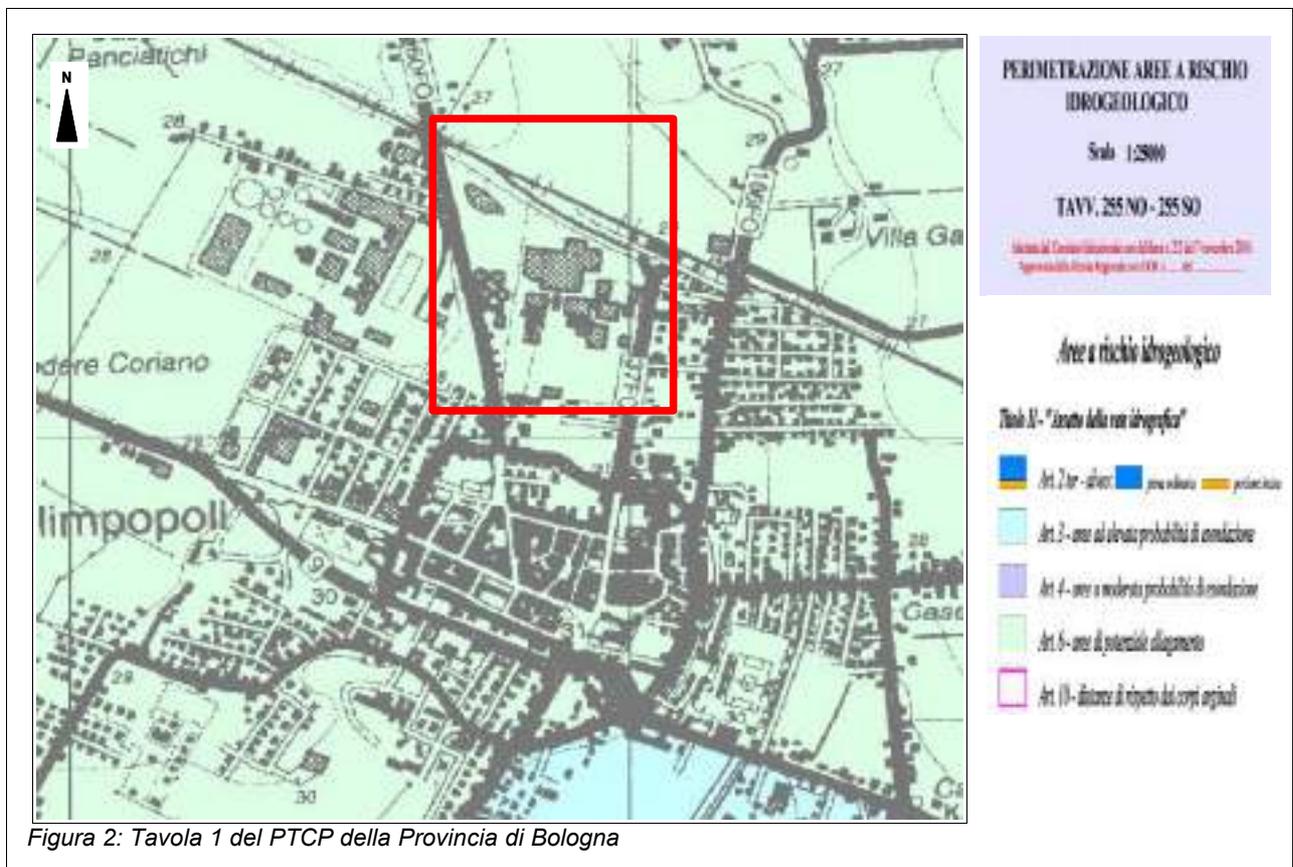
5 - **INQUADRAMENTO NORMATIVO E VINCOLI SOVRAORDINATI**

In fase di progettazione sono stati valutati i vincoli esistenti nell'area di intervento e la conformità delle opere con la seguente normativa di riferimento:

- 1) Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico - *Autorità dei Bacini Romagnoli*.
- 2) Piano di gestione del rischio alluvionale della Regione Emilia-Romagna.
- 3) P.T.C.P. Provincia di Forlì Cesena.
- 4) Regione Emilia Romagna - D.G.R. n°1117 del 11/04/2000 procedure amministrative e norme tecniche relative alla gestione del vincolo idrogeologico.

PIANO STRALCIO PER IL RISCHIO IDROGEOLOGICO

Nella figura 2 è riportato un estratto della “Perimetrazione delle Aree a Rischio Idrogeologico” del Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli – Variante di coordinamento PAI-PGRA.



Il comparto ricade in un "Aree di potenziale allagamento – Art. 6". Le aree di cui al presente articolo sono quelle nelle quali si riconosce la possibilità di allagamenti a seguito di piene del reticolo minore e di bonifica, nonché di sormonto degli argini da parte di piene dei corsi d'acqua principali di pianura, in corrispondenza di piene con tempo di ritorno non superiore ai 200 anni, senza apprezzabili effetti dinamici. Tali aree, individuate in conformità con il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni di cui alla Direttiva 2007/60/CE, sono indicate nelle tavole della Perimetrazione Aree a Rischio Idrogeologico relative al territorio di pianura del bacino idrografico oggetto del presente piano.

RISCHIO DI ALLUVIONI

Nella cartografia allegata al piano di Gestione del Rischio Alluvioni della Regione Emilia Romagna a scala 1:25.000 ed in particolare nella Mappa della Pericolosità e degli Elementi potenzialmente esposti (Art. 6 della Direttiva 2007/60/CE a art. 6 del D.Lgs. 49/2010) l'area studiata presenta uno scenario di pericolosità del solo reticolo secondario di pianura: PUOM - Alluvioni poco frequenti – M.P2. Il tempo di ritorno è tra 100 e 200 anni con media probabilità.

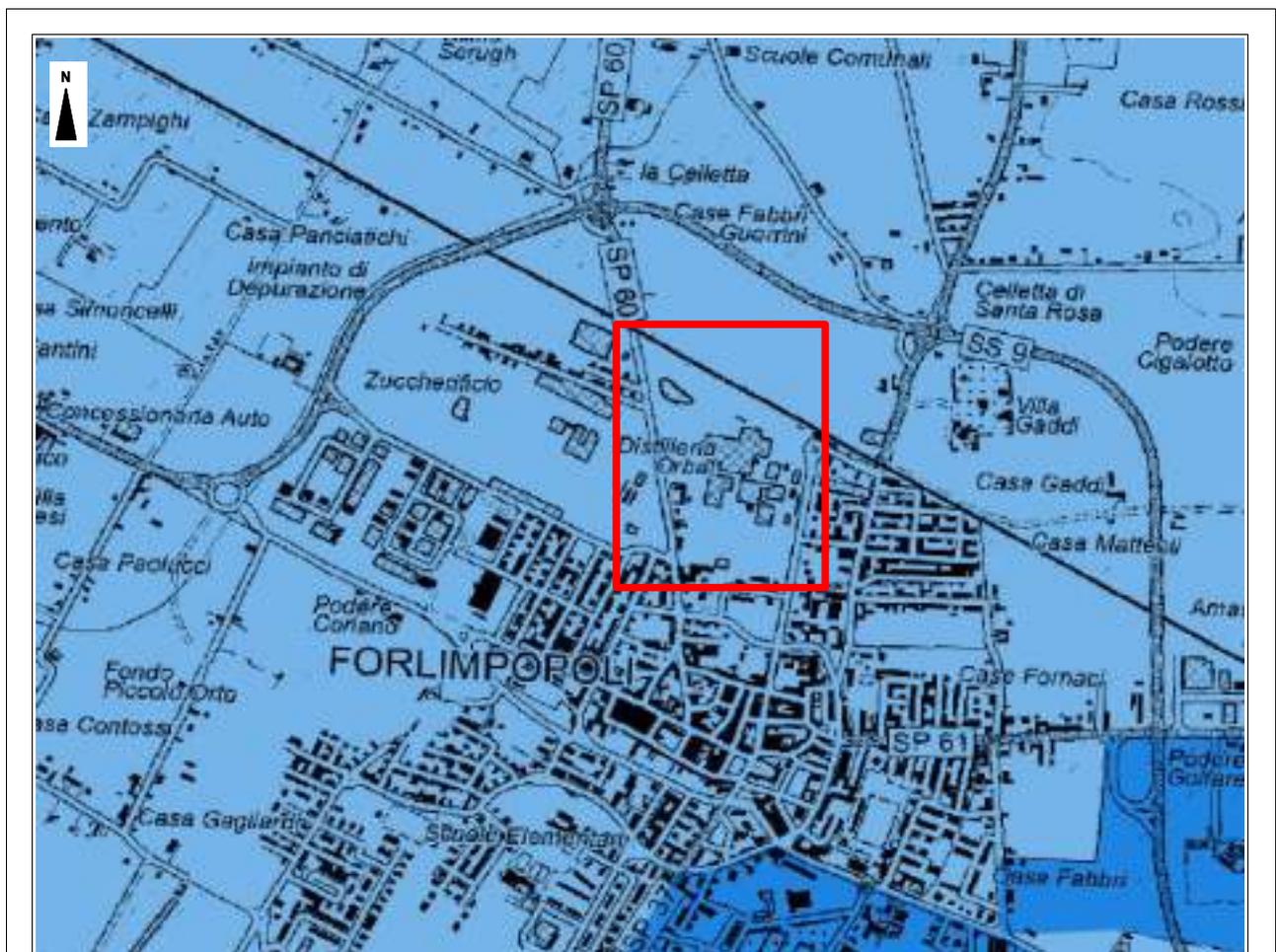


Figura 3: Mappa della pericolosità – Direttiva Alluvioni – Regione Emilia Romagna.

PIANO DI COORDINAMENTO PROVINCIALE - FORLÌ CESENA

La cartografia di carattere geologico con i vincoli del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale è riportata di seguito.

Carta del Dissesto e della Vulnerabilità territoriale (Scala 1:25.000)

Il comparto studiato ricade in una zona caratterizzata da:

- 1) ricchezza di falde idriche;
- 2) subsidenza.

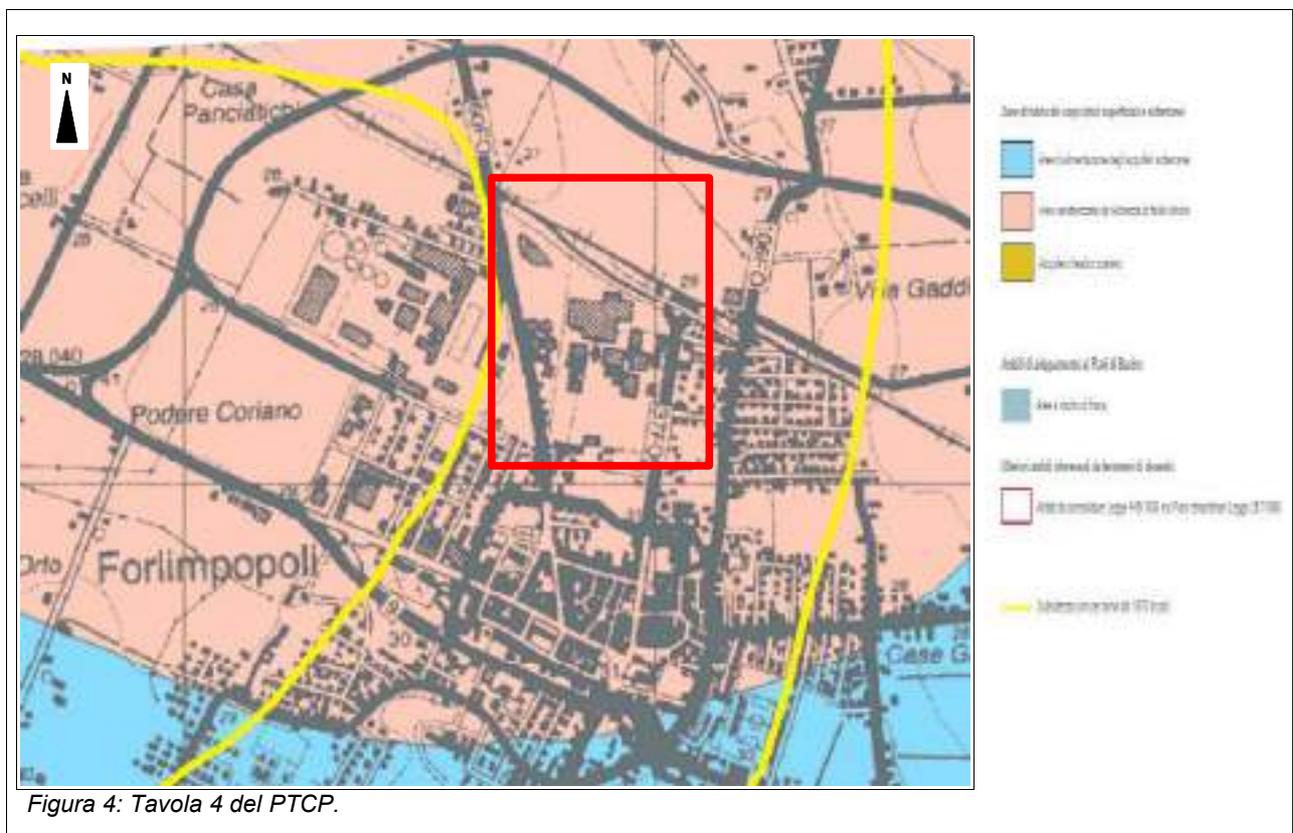


Figura 4: Tavola 4 del PTCP.

La ricchezza di falde idriche di particolare importanza si riferisce alle acque artesiane, confinate in profondità nel sottosuolo della pianura padana e separate da tra loro e dalla superficie da potenti coltri prevalente argilloso limose, quindi sicuramente protette dall'inquinamento superficiale. La falda superficiale a pelo libero, appartenente al Gruppo Acquifero A1 (Servizio Geologico, Sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna) è di modesta importanza e viene utilizzato al massimo per uso domestico mediante e emungimento diretto da pozzi di grande diametro (circa 1 m) profondi al massimo 8÷10 m.

La subsidenza, conseguente all'estrazione di gas e fluidi dal sottosuolo, è tipico della pianura romagnola. Nella zona in esame risulta di massimo 2 cm all'anno anche se gli ultimi studi dimostrano un rallentamento del trend di abbassamento.

Rischio Sismico (Scala 1:25.000)

Nella Carta del Rischio Sismico, Tavola 6 del PTCP, il settore centrale e settentrionale del comparto ricadono in un' "Area suscettibile a liquefazione per caratteristiche stratigrafiche", mentre il settore orientale e meridionale del comparto ricadono in un' "Area suscettibile a liquefazione per caratteristiche stratigrafiche e topografiche".

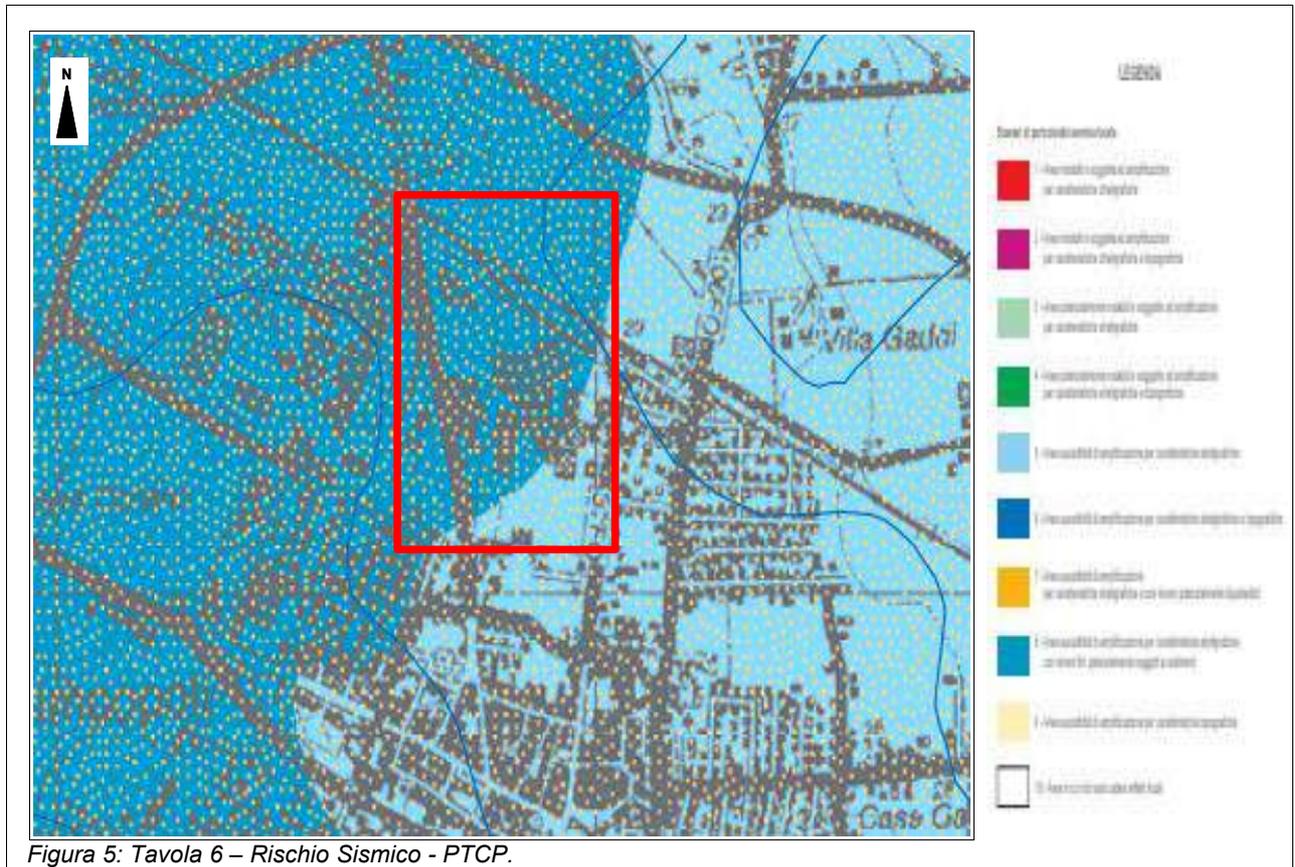


Figura 5: Tavola 6 – Rischio Sismico - PTCP.

Vincolo idrogeologico

In merito al Regio decreto 30/12/1923 n. 3267 " Riordinamento e riforma in materia di boschi e terreni montani" l'area non è sottoposta a vincolo idrogeologico.

6 - **MODELLO GEOLOGICO**

INDAGINI GEOGNOSTICHE

Allo scopo di definire puntualmente le caratteristiche, stratigrafiche, geomeccaniche e idrogeologiche dell'area si sono consultate le stratigrafie di n°2 pozzi per acqua realizzati nel lotto dalla ditta ORBAT e contenuti nel Database on-line del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione-Emilia Romagna.

Successivamente, allo scopo di definire in maniera più puntuale la successione litostratigrafica del primo sottosuolo sono state eseguite n°3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU).

Stratigrafie sondaggi per pozzi acquiferi

Le stratigrafie dei due sondaggi utilizzate provengono dal data base on-line del Servizio Geologico, Sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna e sono ad uso pubblico. Le stratigrafie utilizzate sono allegate anche alla relazione geologica del PSC del comune di Forlimpopoli. In particolare si è utilizzata a la sezione litostratigrafica del pozzo 68 ORBAT (255020P009) profondo circa 68 m e la sezione litostratigrafica del pozzo 69 ORBAT profondo circa 71 (vedi allegato B).

Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU)

Le prove sono state eseguite il giorno 29/11/2021 con un penetrometro Paganti TG-200 dotato di punta elettrica con piezocono marca Tecnopenta.

La prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU) consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($v = 2 \text{ cm/sec}$). La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta idraulica, che agisce su una batteria di aste alla cui estremità inferiore è collegata una punta elettrica conica dotata di un dispositivo di registrazione delle resistenze di punta e laterali alla penetrazione, tramite trasduttori. Nei pressi della punta è presente anche un setto poroso riempito di grasso che consente la misura in continuo della pressione idrostatica dei terreni indagati. I dati vengono registrati con intervalli regolari di 1 cm e trasmessi ad una centralina posta in superficie, tramite un cavo elettrico passante all'interno delle aste.

Una prova è stata spinta fino a circa 25 m mentre le altre due prove sono state spinte fino a -20 m dal p.c.. La profondità delle prove risulta significativa per le verificare del rischio di liquefazione del terreno in aree con sismi massimi attesi attorno a 6 Mw.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le indagini geognostiche evidenziano una situazione litostratigrafica abbastanza omogenea dove in superficie si incontra circa 0,8÷2 m di terreno di riporto costituito da frammenti litoidi di varia natura a comportamento prevalentemente incoerente (unità litostratigrafica TR).

Da circa -0,8÷-2,0 m a circa -8÷-9 m di profondità si incontrano terreni costituiti prevalentemente da argille e limi argillosi con valori di Q_t variabili da 1,6 a e 2,4 MPa (unità litostratigrafica A).

Da circa -8÷-9 m a circa -12÷-15 m dal p.c. si incontrano terreni sempre prevalentemente coesivi con intercalati rari livelli di limi sabbiosi e sabbie limose (unità litostratigrafica B). L'unità B presenta valori di Q_t variabili da 2 a 6 MPa.

Oltre i -12÷-15 m e fino a circa -24÷-25 m dal p.c. i terreni tornano prevalentemente argillosi con valori di Q_t variabili da 1 a 2,5 MPa (unità litostratigrafica C). A -24÷-25 m dal p.c. si incontra una lente di ghiaia sabbiosa spessa alcuni metri con valori di $Q_t > 13$ MPa (unità litostratigrafica D).

Osservando le stratigrafie dei due sondaggi oltre i -25 m dal p.c. le ghiaie si alternano a lenti di sabbia fino a circa -40÷-43 m dal p.c.. Oltre i 40÷43 m e fino a circa 60 m di profondità i terreni tornano prevalentemente coesivi. A 60 m si incontra una nuova lente di ghiaia.

IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA

Il lotto si trova ad una quota topografica variabile da 30 m s.l.m. a 28 m s.l.m., circa 2,4 Km a est del Fiume Ronco. La zona attualmente è incolta e ospita i resti e le fondazioni delle vecchie strutture delle distillerie ORBAT per cui non ha una rete di raccolta delle acque superficiali. La maggior parte delle acque piovane viene drenata dallo strato di riporto superficiale di natura incoerente.

Dalla consultazione della Relazione Geologica allegata al PSC di Forlimpopoli si evince che la prima falda superficiale è l'acquifero A1 e si attesta a quote variabili da -2 ai -4 m dal p.c. con oscillazioni variabili, anche dell'ordine di $\pm 1,5$ m.

Durante le terebrazioni si è rinvenuta la presenza d'acqua nei fori delle tre prove penetrometriche. In estrazione le aste del penetrometro statico risultavano bagnate a partire da circa -3÷-3,5 m dal p.c..

A fine prova si è tentato di misurare la quota della falda nei fori di sondaggio con un freatometro elettronico, ma solo nella prova CPTU3 il foro è rimasto aperto in superficie, nelle altre due prove il foro è franato a -0,5 m dal p.c. a causa della presenza di circa 1 m di riporto a comportamento incoerente.

Nella prova CPTU3 il foro si è chiuso a circa -3,3 m da p.c.. Tale quota è verosimilmente la quota del pelo libero della falda superficiale alla data delle prove.

Si deve tenere conto che le falde superficiali sono condizionate dalla superficie topografica del suolo e soprattutto, sono soggette ad ampie oscillazioni stagionali date dagli eventi meteorologici.

I dati provenienti dalle stazioni idrologiche sul territorio, confermano che il livello di massima ricarica delle falde si ha generalmente nei mesi di Marzo – Aprile, il minimo livello si raggiunge tra Ottobre e Novembre; si può ritenere, pertanto, che i valori misurati, nel corso della presente indagine (novembre 2021) siano approssimativamente corrispondenti al minimo stagionale.

In sede di progettazione esecutiva delle opere, sarà indispensabile tenere conto del fatto che, tra massima ricarica e minimo stagionale il livello della superficie freatiche potrebbe avere oscillazioni anche rilevanti, ancora più accentuate in caso di periodi di intensa piovosità; nel caso di massimo ricarica deve essere presa in considerazione l'eventualità che il livello della falda potrebbe arrivare a quote prossime al piano di campagna.

7 - MODELLO SISMICO

CLASSIFICAZIONE SISMICA

In base alla classificazione sismica dei Comuni dell'Emilia Romagna, ai sensi dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 n° 3274, il Comune di Forlimpopoli è inserito in *Zona 2 - Comune a sismicità medio-alta*.

ZONA	Valori massimi di ag
2	1,5÷2,5

Tabella 1: Zona sismiche e massimi valori di ag

SISMI STORICI RELATIVI ALL'AREA (DAL 1000 D.C. AL 2019 D.C.)

Il Comune di Forlimpopoli è stato storicamente interessato solo da terremoti di moderata entità con intensità massime comprese tra il VII e VII-VIII grado scala Mercalli (MCS).

I terremoti più importanti di cui si ha testimonianza storica a Forlimpopoli sono avvenuti nei seguenti anni :

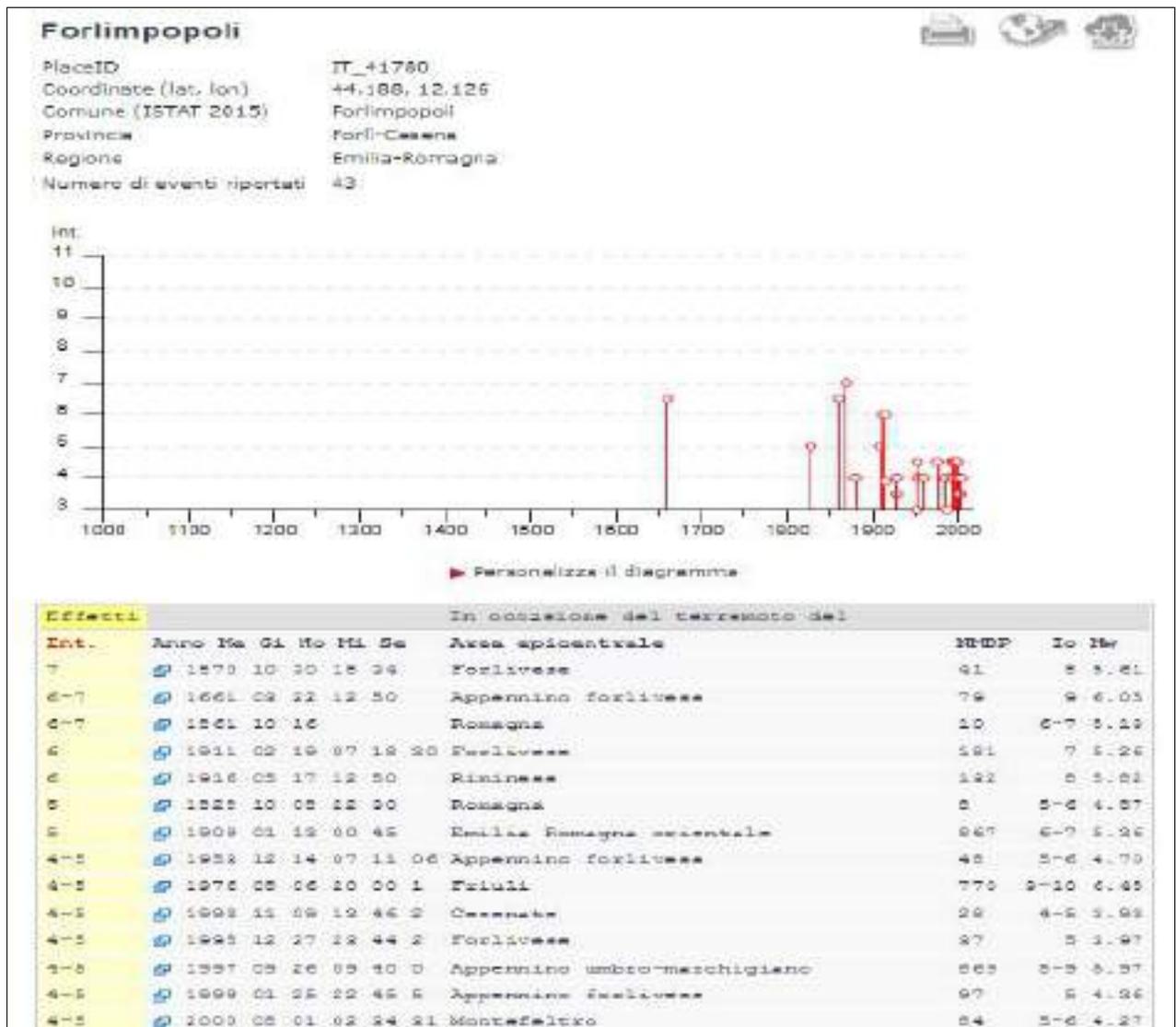


Fig. 6– Database terremoti storici avvenuti in provincia di Bologna dal 1000 d.C Al 2005 d.C..

Le date dei vari terremoti sono state ricavate dal Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) dell'Istituto Nazionale di Geofisica (INGV).

ZONE SISMOGENETICHE IN PROVINCIA DI FORLÌ CESENA

Nell'ambito della zonazione sismogenetica "ZS9" definita dal "Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV, l'area di intervento ricade entro la Zona 914. I terremoti storici avvenuti nella Zona 914 non hanno mai raggiunto valori molto elevati di magnitudo, per cui alla zona è stato associato un valore massimo di magnitudo pari a 6,4.

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha prodotto recentemente un Database con riportate tutte le zone sismogenetiche in Italia: Database DISS "Database of Individual Seismogenic Sources" 3.2.1 - INGV 2016. Nella figura 3 sono riportate le zone sismogenetiche individuate nella provincia di Forlì-Cesena con relative analisi di pericolosità sismica con approccio probabilistico.

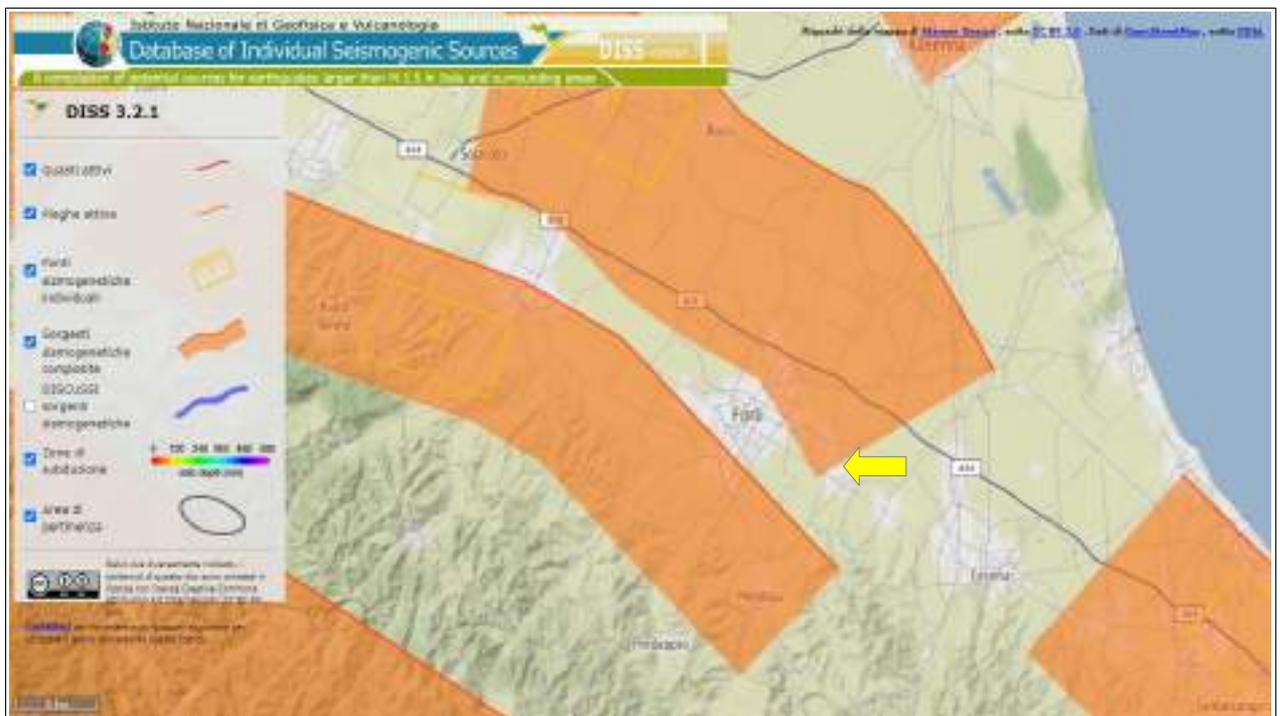


Fig. 7– Zone sismogenetiche pianura padana (Fonte: INGV)

Le zone sismogenetiche all'interno della Provincia di Forlì-Cesena sono:

- ITCS011: Ascensione-Armaia con magnitudo massima attesa di 6,0 Mw.
- ITCS001: Castel San Pietro Terme-Meldola con magnitudo massima attesa di 5,8 Mw.
- ITCS039: Onshore Riminese con magnitudo massima attesa di 5,9 Mw.

Il lotto analizzato ricade al margine orientale della nella zona sismogenetica ITCS011: Ascensione-Armania con magnitudo massima attesa di 6,0 Mw.

STUDI SISMICI E VINCOLI NORMATIVI PRESENTI SULL'AREA

Dalla consultazione delle carte allegate al PTCP della Provincia di Forlì-Cesena e del PSC del Comune di Forlimpopoli si sono ricavate le seguenti informazioni / vincoli di carattere sismico esistenti sull'area studiata:

Nome carta	Sigla carta	Scala	Legende carta
PTCP – Forlì Cesena <i>Rischio sismico</i>	Tav. 6	1:25.000	<ul style="list-style-type: none"> • Area suscettibile a liquefazione per caratteristiche stratigrafiche (Settore centrale e settentrionale del comparto) • Area suscettibile a liquefazione per caratteristiche stratigrafiche e topografiche - settore orientale e meridionale del comparto
PSC – Comune di Forlimpopoli Microzonazione sismica <i>Carta delle MOPS</i>	-	1:10.000	Zona 8 - successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi fini e grossolani, poggianti su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s), situato a profondità maggiori di 50 metri dal piano campagna. In superficie è presente un orizzonte limo-argilloso che ricopre un primo livello ghiaioso situato a profondità maggiori di 20 metri dal piano campagna.

Tabella 2 – Riassunto schematico studi sismici e vincoli normativi di carattere sismico presenti sull'area.

RICOSTRUZIONE DEL PROFILO SISMOSTRATIGRAFICO DEL SITO E CALCOLO V_{s_eq}

Per la ricostruzione del modello sismo stratigrafico dei primi trenta metri di profondità si è consultata l'indagine MASW contenuta nella Relazione Geologica allegata al PSC vigente e realizzata in un' area limitrofa a quella studiata (Area EX SFIR) integrandola con n° 2 registrazioni del rumore ambientale HVSR (vedi ubicazione di tutte le indagini sismiche in tavola 4). La consultazione dell'indagine MASW è servita a determinare la velocità delle onde VS negli strati coesivi presenti nei primi 20 m di profondità.

Il profilo sismo-stratigrafico è visibile nelle figure seguenti e nell'allegato C.

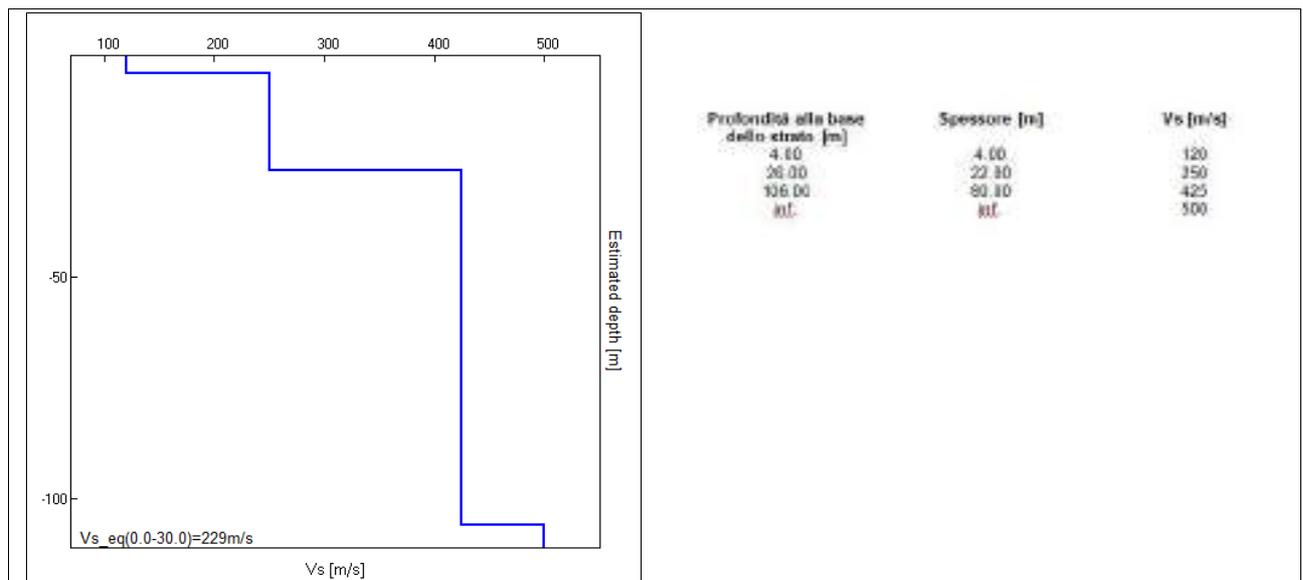


Fig. 8a – Profilo sismo-stratigrafico indagine TR1

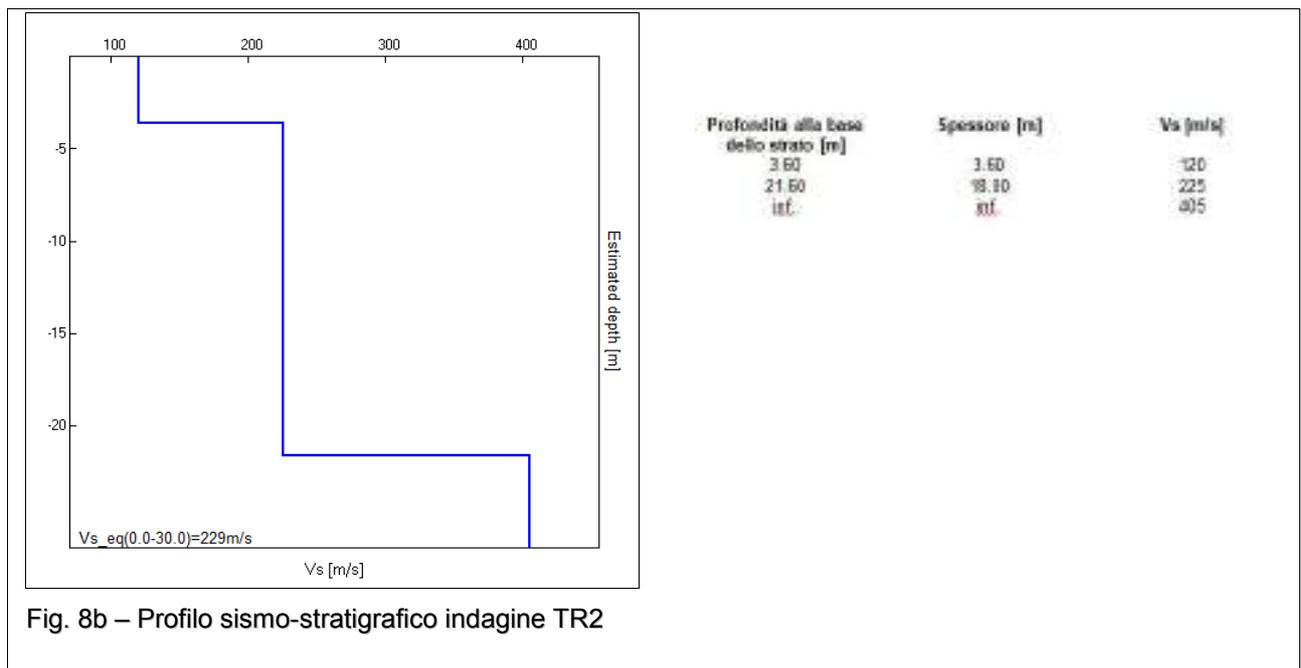


Fig. 8b – Profilo sismo-stratigrafico indagine TR2

Dall'elaborazione dei dati geofisici sono emersi anche i seguenti risultati :

■ TR1

- Il parametro Vs_{eq} (0÷30 m) del sito risulta pari a 229 m/s ($\pm 15\%$).
- Il picco principale del sito è posto a circa 7,7 Hz e presenta un rapporto H/V pari a 2,6.
- Nel profilo di velocità delle onde Vs non si notano inversione di velocità significative.
- Nel campo delle frequenze di interesse ingegneristico (0,7 Hz ÷ 11 Hz) si segnalano le frequenze comprese tra 2,2 e 2,6 Hz e le frequenze tra 7 e 8 Hz in grado di generare modesti effetti di risonanza nel terreno.

■ TR2

- Il parametro Vs_{eq} (0÷30 m) del sito risulta pari a 229 m/s ($\pm 15\%$).
- Il picco principale del sito è posto a circa 2,6 Hz e presenta un rapporto H/V pari a 2,8.
- Nel profilo di velocità delle onde Vs non si notano inversione di velocità significative.
- Nel campo delle frequenze di interesse ingegneristico (0,7 Hz ÷ 11 Hz) si segnalano le frequenze comprese tra 2,4 e 2,8 Hz e le frequenze tra 8 e 9 Hz in grado di generare modesti effetti di risonanza nel terreno.

VERIFICA DEL INDICE DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE DEL SITO (LPI)

La liquefazione di un terreno è dovuta alla diminuzione di resistenza a taglio e/o di rigidezza causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti cinque circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata ($N1$) $60 > 30$ oppure $qc1N > 180$ dove ($N1$) 60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e $qc1N$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 9 (a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in Fig. 9 (b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

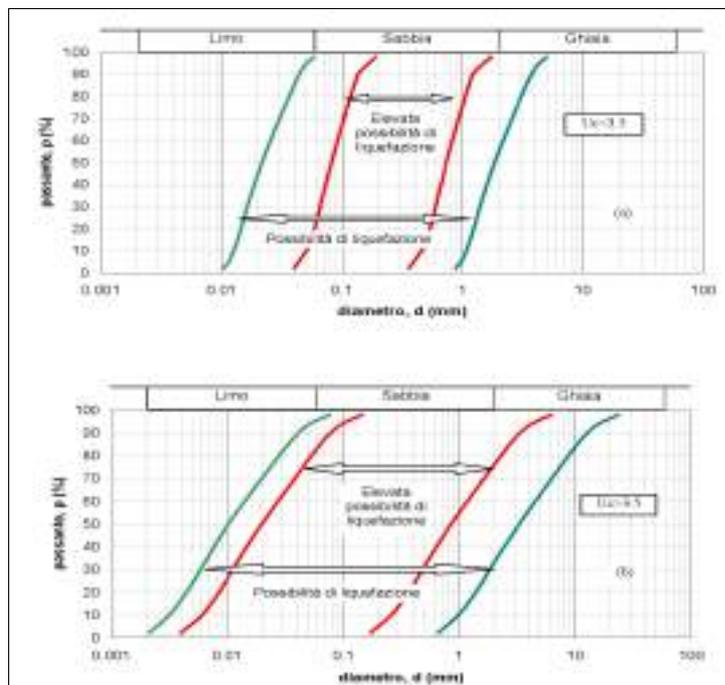


Figura 9 a/b:

Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione di un terreno per i terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (da AGI, 2005)

Per l'elaborazione dei dati si è utilizzato il programma C-Liq basato il metodo proposto da Robertson & Wride 1998 (aggiornato dal Dott. Robertson nel 2009) per la verifica semplificata del LPI da prove CPTU. Per ulteriore sicurezza il calcolo di LPI è stato effettuato utilizzando anche la metodologia proposta da Idriss & Boulanger (2008).

Le verifiche sono state realizzate considerando un sisma massimo atteso di magnitudo $M_w=6,14$, una accelerazione attesa $a_{max}=0,20$ (dato preso da Spettri-NTC vers.1.0.3, fornito dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici) e una soggiacenza della falda media a -2,5 m dal p.c..

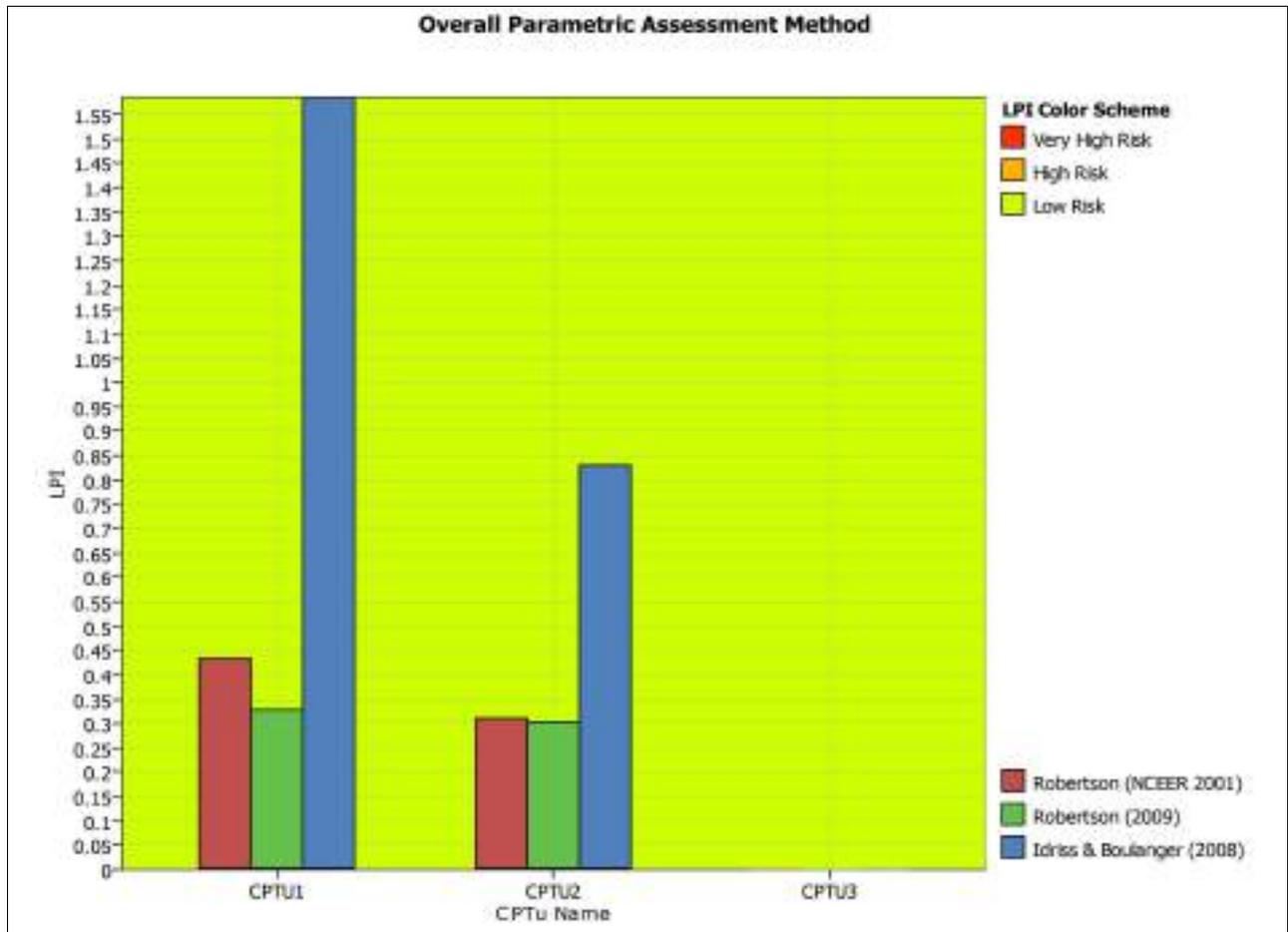


Fig. 10 – Risultati finali calcolo LPI .

Il calcolo, effettuato evidenzia un rischio di liquefazione basso, con valori di LPI attorno a 0,5 utilizzando la teoria proposta da Robertson e attorno a 1,6 utilizzando la teoria proposta da Idriss & Boulanger (vedi risultati in fig. 10 ed allegato D).

In ogni caso il rischio residuo di liquefazione del terreno dovrà essere rivalutato attentamente durante le successive fasi di progettazione (progetto definitivo e/o esecutivo) per ogni specifico fabbricato e, nel caso in cui questo risultasse non accettabile, si dovranno prevedere interventi volti alla mitigazione del rischio stesso.

APPROFONDIMENTI DI II o III LIVELLO

Nell'area non sono stati rinvenuti problemi di liquefazione del terreno o inversioni di velocità significative delle onde VS pertanto si ritiene che in questa fase per il lotto studiato siano sufficienti approfondimenti di II livello. Anche nel PTCP per la zona studiata e le zone limitrofe si ritengono sufficienti approfondimenti di II livello.

CARATTERIZZAZIONE DEL SITO SECONDO DGR 630/2019

Visto quanto sopra esposto si ritiene possibile procedere all'approccio semplificato per l'approfondimento di II livello ai sensi della DGR Emilia-ROMAGNA n°630 del 29 aprile 2019. La definizione dei fattori di amplificazione (F.A.) dell'azione sismica può essere effettuata servendosi degli abachi contenuti nell'ALLEGATO A2 alla DGR: "Tabelle e formule per la stima dei fattori di amplificazione sismica per la microzonazione sismica (II livello di approfondimento)".

I fattori di amplificazione riportati negli abachi rappresentano il rapporto fra i vari parametri dello scuotimento sismico valutato per una determinata/specifica situazione geo-litologica ed il corrispondente scuotimento atteso su suolo rigido orizzontale (suolo A) così come definito nell'ambito della tabella 3.2.11 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018.

I fattori di amplificazione dei parametri dello scuotimento che vengono considerati negli abachi sono stati valutati per tempi di ritorno $TR = 475$ anni con smorzamento del 5% e sono:

- il fattore di amplificazione in termini di accelerazione di picco orizzontale (PGA/PGA0),
- il fattore di amplificazione in termini di intensità spettrale in accelerazione SA/SA0 per differenti intervalli di periodo proprio:
 - F.A. S.A.1 ($0,1 \text{ s} \leq T \leq 0,5 \text{ s}$)
 - F.A. S.A.2 ($0,4 \text{ s} \leq T \leq 0,8 \text{ s}$)
 - F.A. S.A.3 ($0,7 \text{ s} \leq T \leq 1,1 \text{ s}$)
- il fattore di amplificazione in termini di intensità spettrale in velocità (o intensità di Housner) SI/SI0 per differenti intervalli di periodo proprio:
 - F.A. S.I.1 ($0,1 \text{ s} \leq T \leq 0,5 \text{ s}$)
 - F.A. S.I.2 ($0,5 \text{ s} \leq T \leq 1,0 \text{ s}$)
 - F.A. S.I.3 ($0,5 \text{ s} \leq T \leq 1,5 \text{ s}$)

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti sulle condizioni geologiche e geomorfologiche dell'ambito l'area dell'accordo di programma in esame può essere classificata come condizioni di "MARGINE" definito come "settore di transizione tra la zona collinare (Appennino) e la pianura, o la costa, caratterizzato da terreni alluvionali prevalentemente fini (argille, limi, sabbie) sovrastanti orizzonti grossolani (ghiaie, ghiaie sabbiose, sabbie ghiaiose); il substrato geologico è generalmente costituito da sabbie marine o transizionali pleistoceniche (Sabbie Gialle) o dalla successione pelitica plio-pleistocenica (Argille Azzurre); il tetto del substrato geologico è a profondità indicativamente comprese tra 50 e 100 m".

Nell'allegato è specificato che il MARGINE può essere:

- Tipo A: caratterizzato da terreni fini o grossolani poco consolidati, di spessore non superiore a 30 m, sovrastanti orizzonti prevalentemente grossolani a comportamento più rigido (indicativamente con valore di V_s media almeno doppio rispetto a quello dei sedimenti sovrastanti);

- Tipo B: caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini.”

Pertanto essendo per l'area in esame il bedrock (orizzonte con $V_s > 800$ m/s) a profondità comunque superiori a 30 m si dovranno considerare i Fattori di Amplificazione relativi agli abachi compilati per il MARGINE di tipo B contenuti nell'Allegato A2 della DGR 630/2019, considerando le velocità delle V_{s30} (in questo caso uguale alle V_{s_eq}) emerse dalle indagini geofisiche che si attestano attorno a 229 m/s ($\pm 15\%$).

Di seguito sono riportati i valori estratti dagli abachi sopracitati considerando però cautelativamente una V_{s30} di 200 m/s :

- F.A. PGA = 1,6
- F.A. S.A.1 ($0,1 \text{ s} \leq T \leq 0,5 \text{ s}$) = 1,8
- F.A. S.A.2 ($0,4 \text{ s} \leq T \leq 0,8 \text{ s}$) = 2,6
- F.A. S.A.3 ($0,7 \text{ s} \leq T \leq 1,1 \text{ s}$) = 2,9
- F.A. S.I.1 ($0,1 \text{ s} \leq T \leq 0,5 \text{ s}$) = 1,9
- F.A. S.I.2 ($0,5 \text{ s} \leq T \leq 1,0 \text{ s}$) = 2,8
- F.A. S.I.3 ($0,5 \text{ s} \leq T \leq 1,5 \text{ s}$) = 3,1

CARATTERIZZAZIONE SISIMICA DEL SITO SECONDO LE NTC 2018

Categoria sismica di sottosuolo con approccio semplificato

In seguito ai risultati del modello sismico del sito, dove la velocità delle onde V_s cresce gradualmente, non sono presenti inversioni di velocità significative, non sono presenti terreni potenzialmente liquefacibili, per alcune tipologie di opere si potrà utilizzare, per l'azione sismica di progetto, l'approccio semplificato proposto dalle NTC 2018.

Tenendo conto della natura dei terreni presenti nel sottosuolo e la velocità delle onde V_{s_eq} ($0 \text{ m} < z < 30 \text{ m}$) = 229 m/s ($\pm 15\%$), il sito in esame rientra nella categoria di sottosuolo sismico semplificato **C**:

C- Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Categoria Topografica

Visto il contesto geomorfologico sub pianeggiante dell'area, si possono escludere condizioni topografiche che possano amplificare l'azione di un eventuale sisma, per cui si potrà utilizzare una classe topografica T1.

8 - **CONCLUSIONI**

In conclusione, ferma restando la necessità di ulteriori verifiche ed indagini geologiche e geotecniche che dovranno accompagnare i livelli successivi di progettazione definitiva ed esecutiva degli interventi edilizi (ai sensi delle vigenti norme tecniche per le costruzioni), il comparto appare dal punto di vista geologico, geomorfologico, idrogeologico e sismico **idonea** alla realizzazione degli interventi edilizi in progetto.

Loiano, li 06 Dicembre 2021

Dott. Geol. Alberto Filelfi

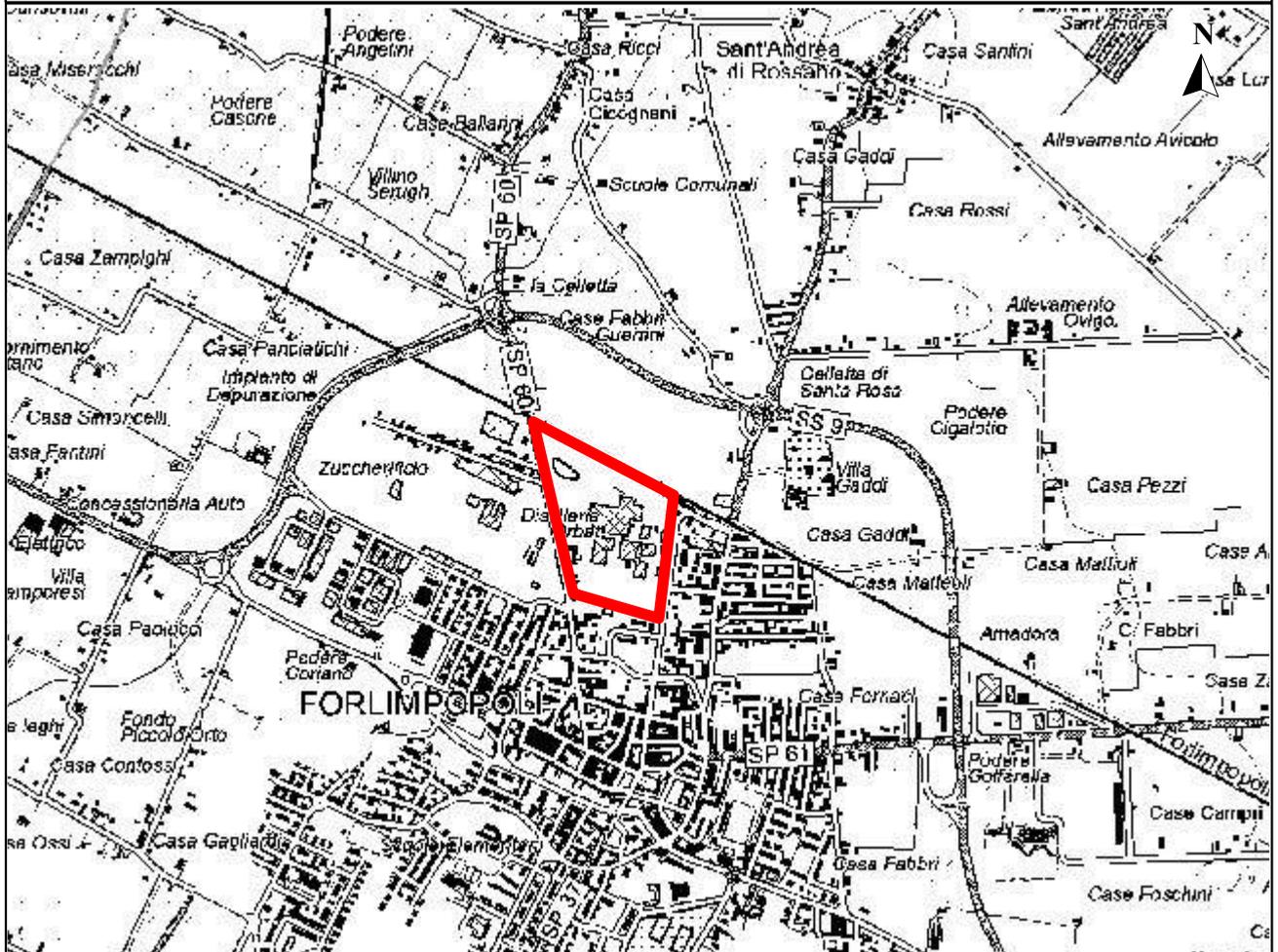
(O.G.E.R. - SEZ. A - A.P. n°1115)



COROGRAFIA

Stralcio carta CTR: Tavoletta 255-NO

Scala 1:25.000



Legenda

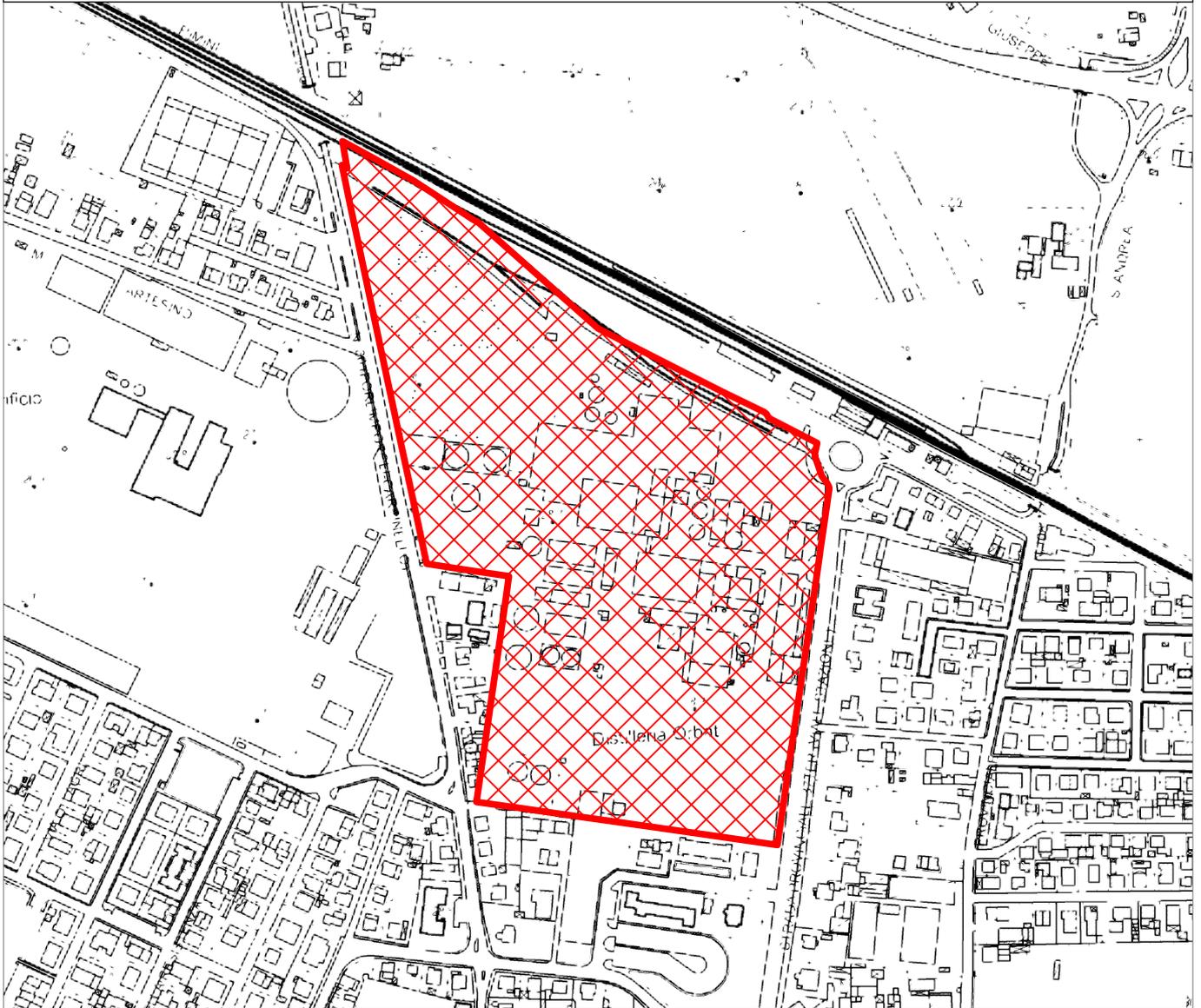


Area Ex-ORBAT

INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO

Stralcio Elemento CTR 255021 - 255024

Scala 1:5.000



Legenda

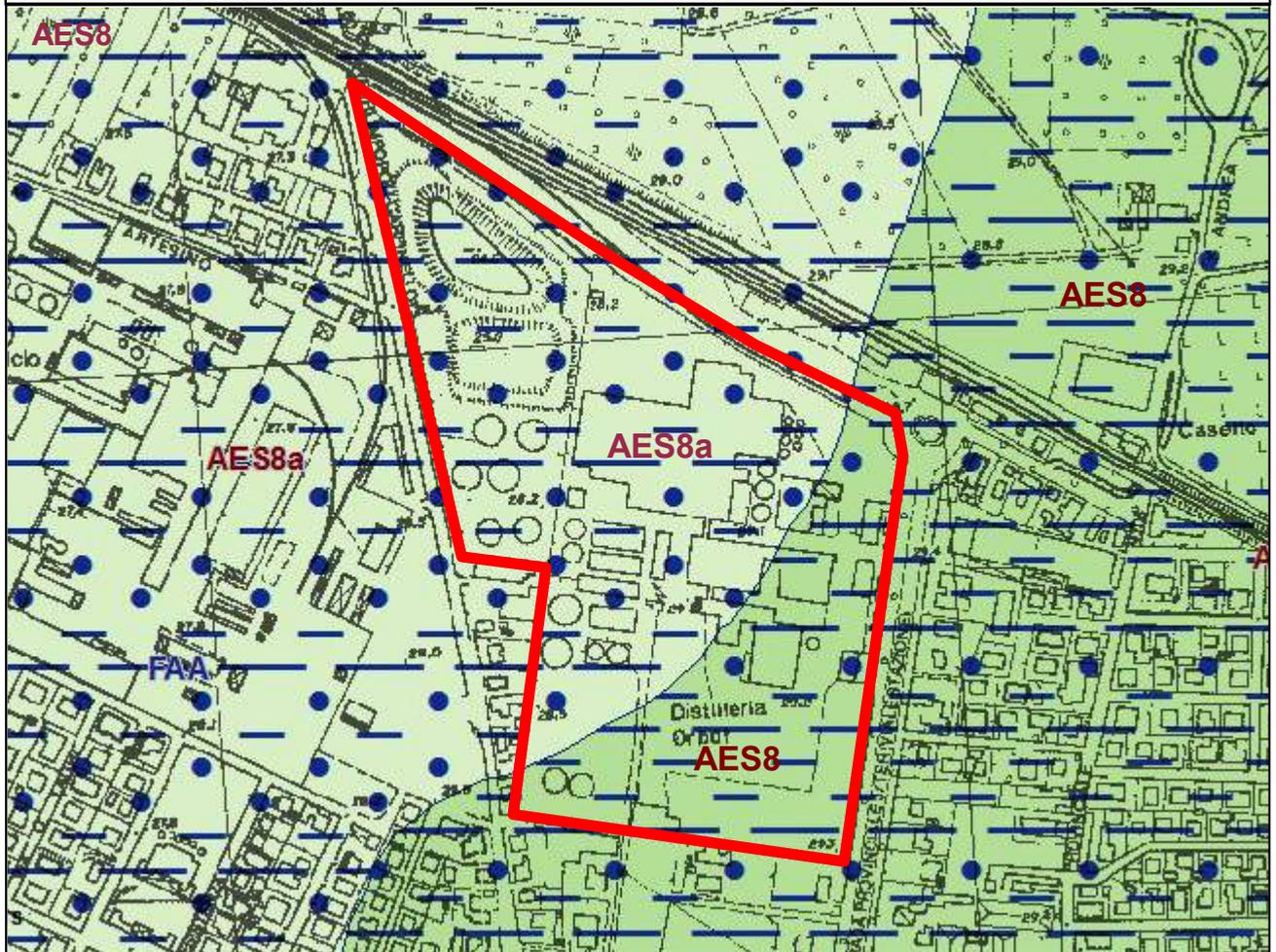


Area EX-ORBAT

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna

Ingrandimento a scala 1:5.000



Legenda



Comparto EX-ORBAT



Limo sabbioso argilloso

AES8

Subsistema di Ravenna



Sabbia limoso argillosa

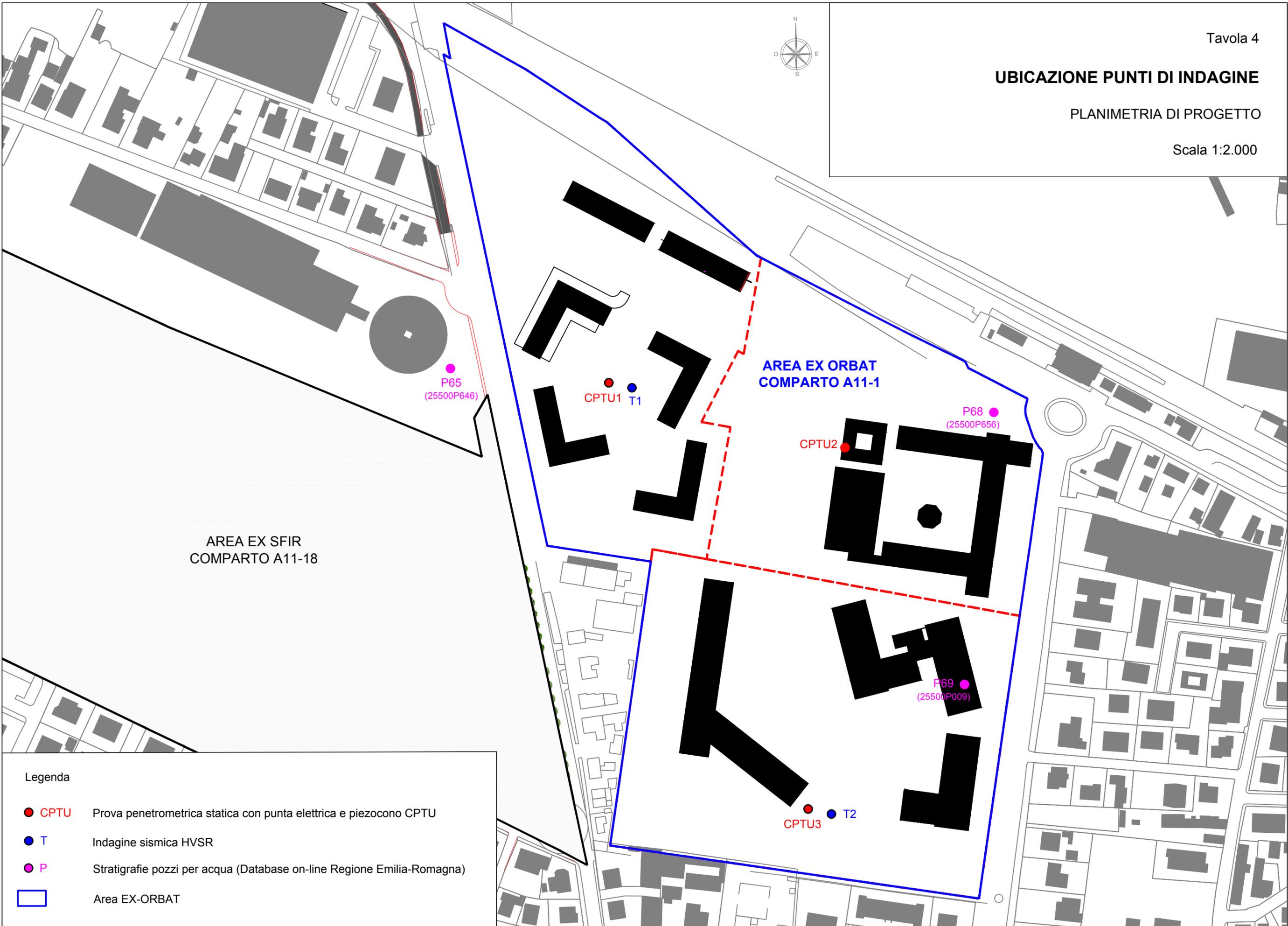
AES8a

Subsistema di Ravenna
Unità di Modena

UBICAZIONE PUNTI DI INDAGINE

PLANIMETRIA DI PROGETTO

Scala 1:2.000



AREA EX SFIR
COMPARTO A11-18

AREA EX ORBAT
COMPARTO A11-1

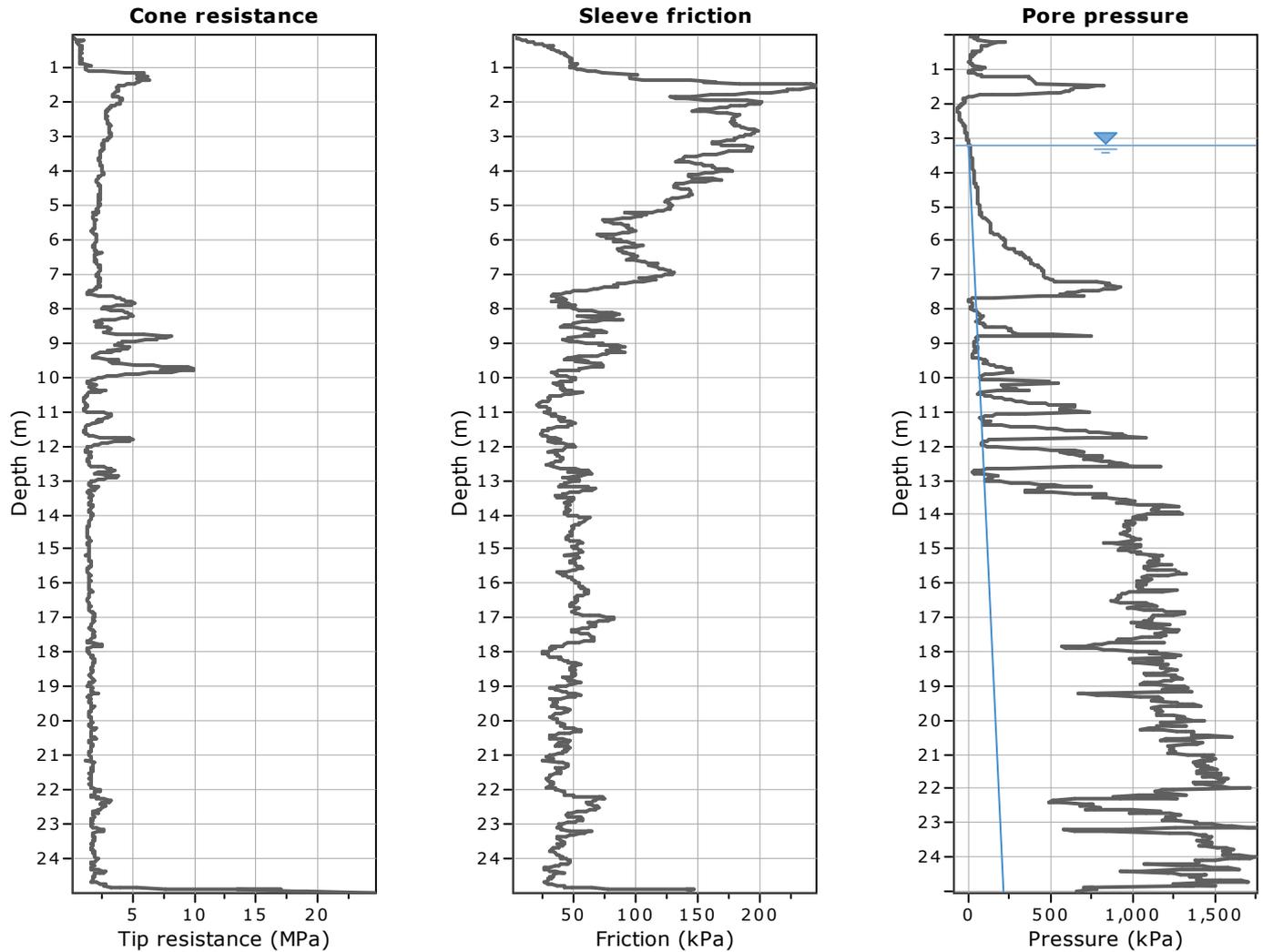
Legenda

- CPTU Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono CPTU
- T Indagine sismica HVSR
- P Stratigrafie pozzi per acqua (Database on-line Regione Emilia-Romagna)
- Area EX-ORBAT

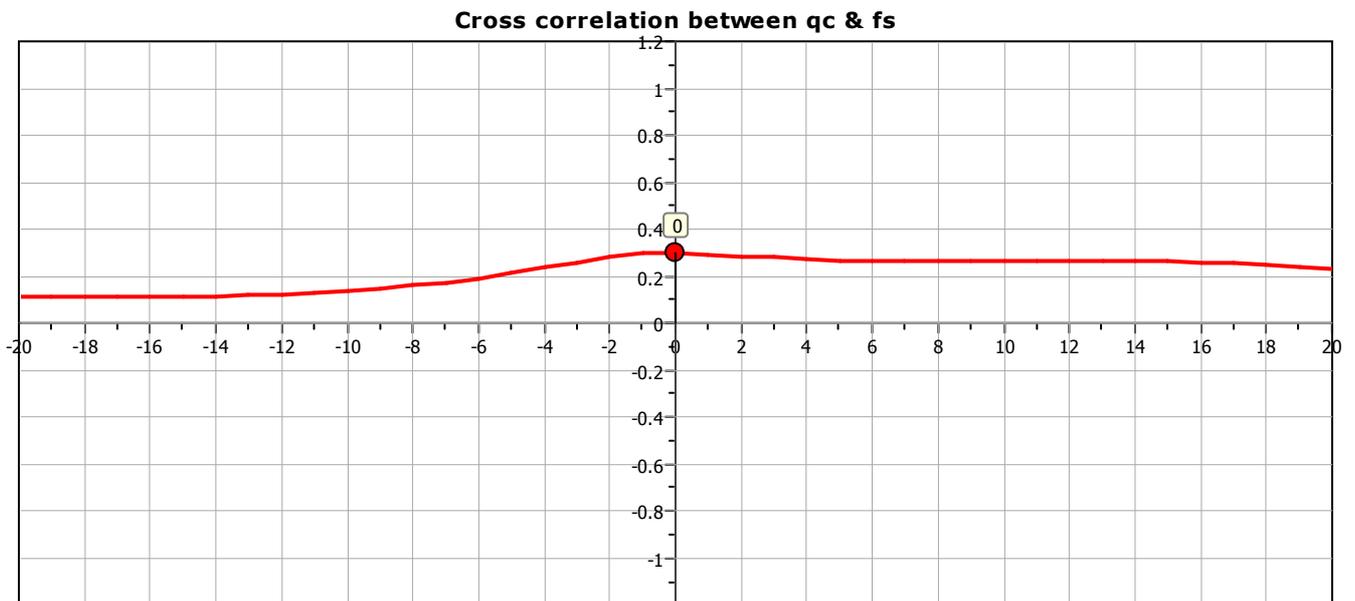
ALLEGATO A

INDAGINI GEOGNOSTICHE

**TABULATI E GRAFICI PROVE PENETROMETRICHE
STATICHE CON PUNTA ELETTRICA + PIEZOCONO (CPTU)**

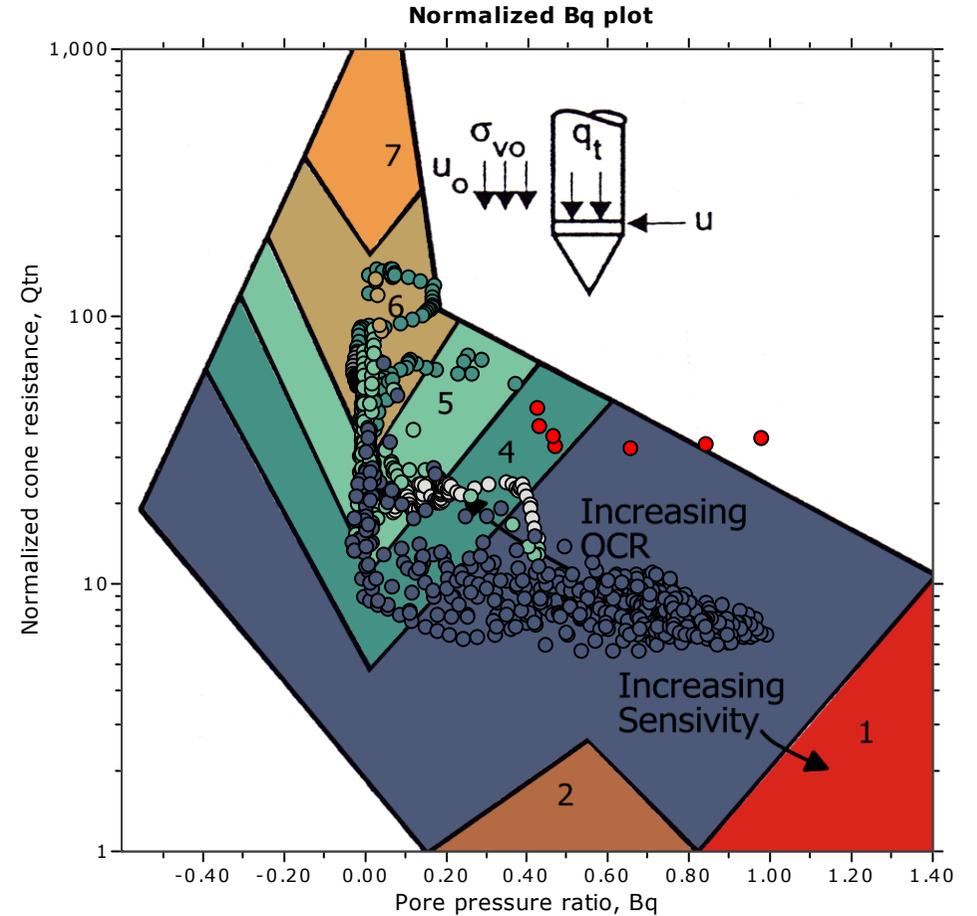
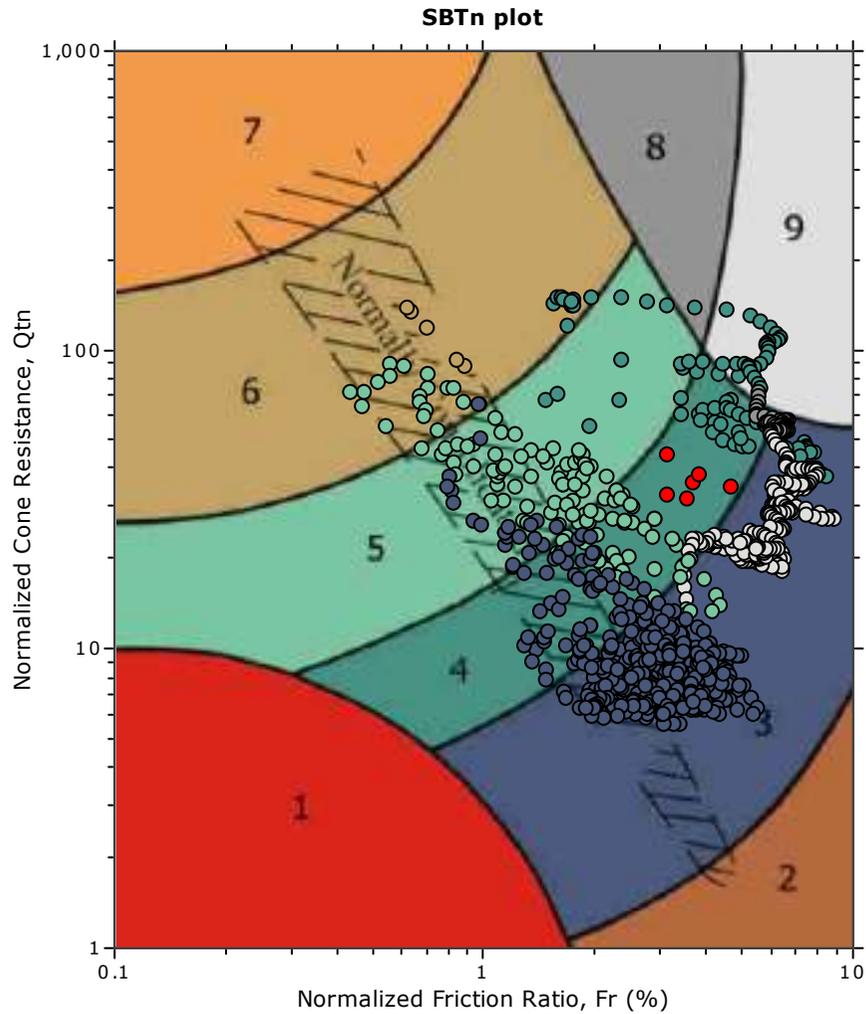


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).





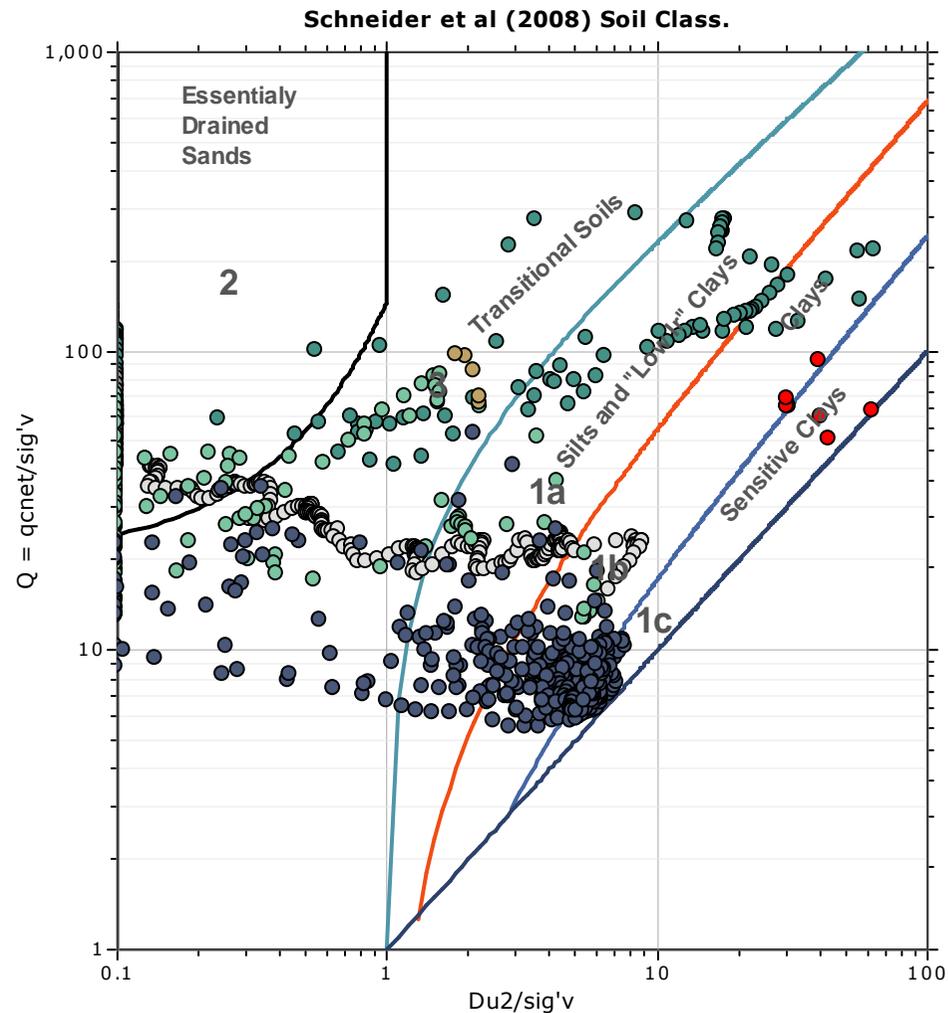
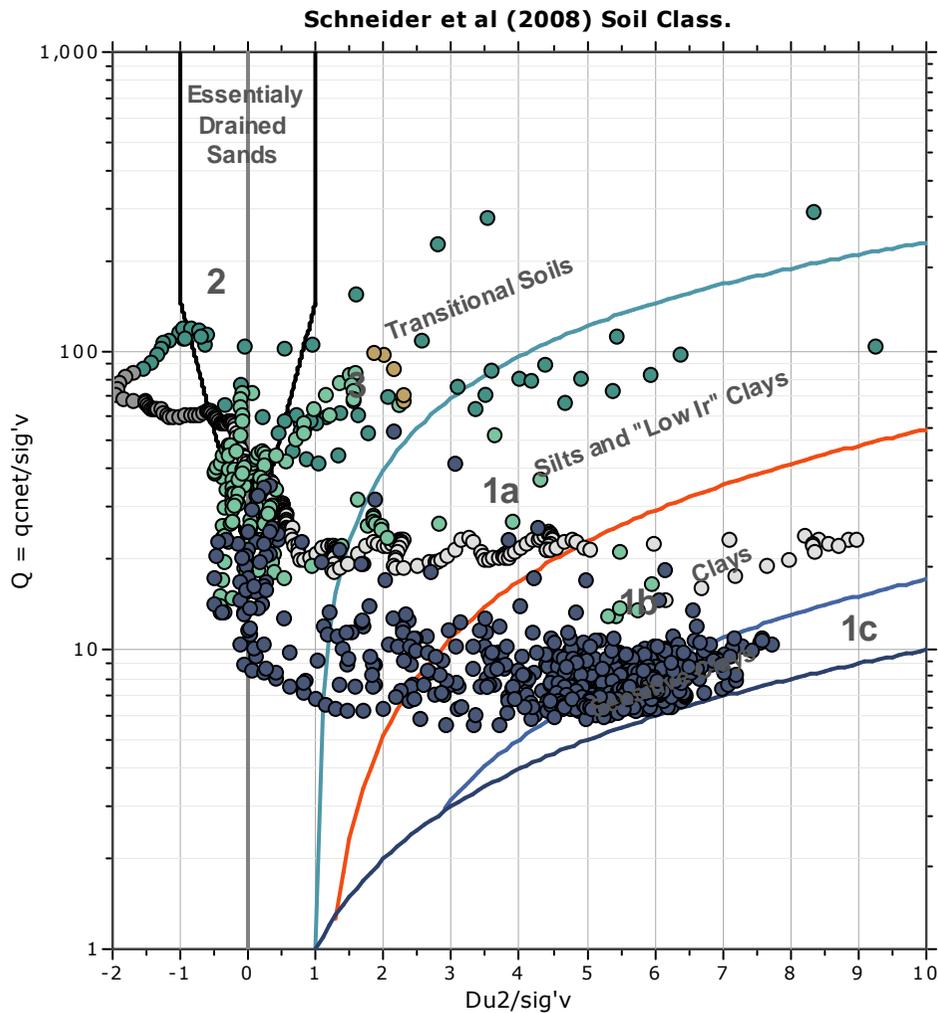
SBT - Bq plots (normalized)

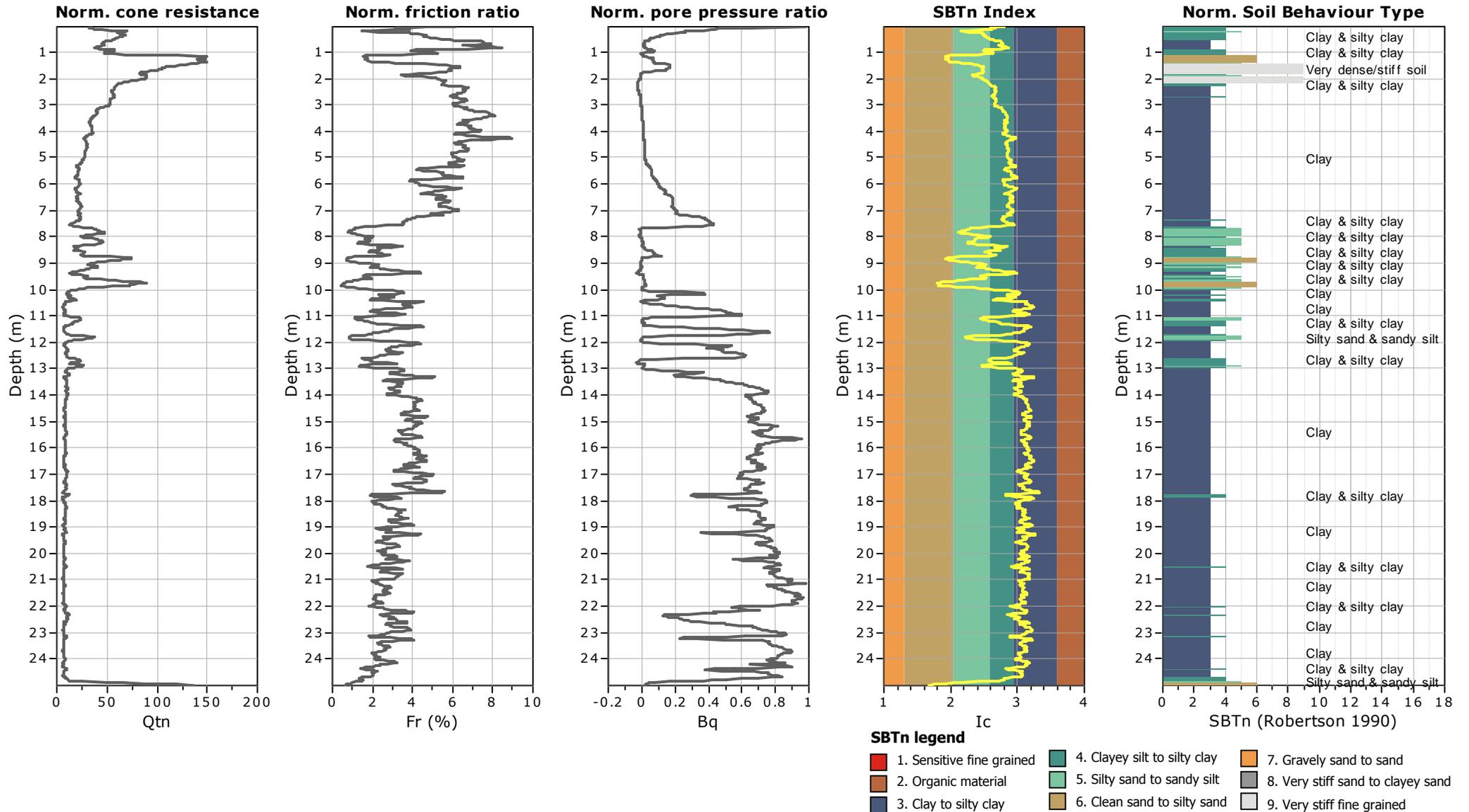


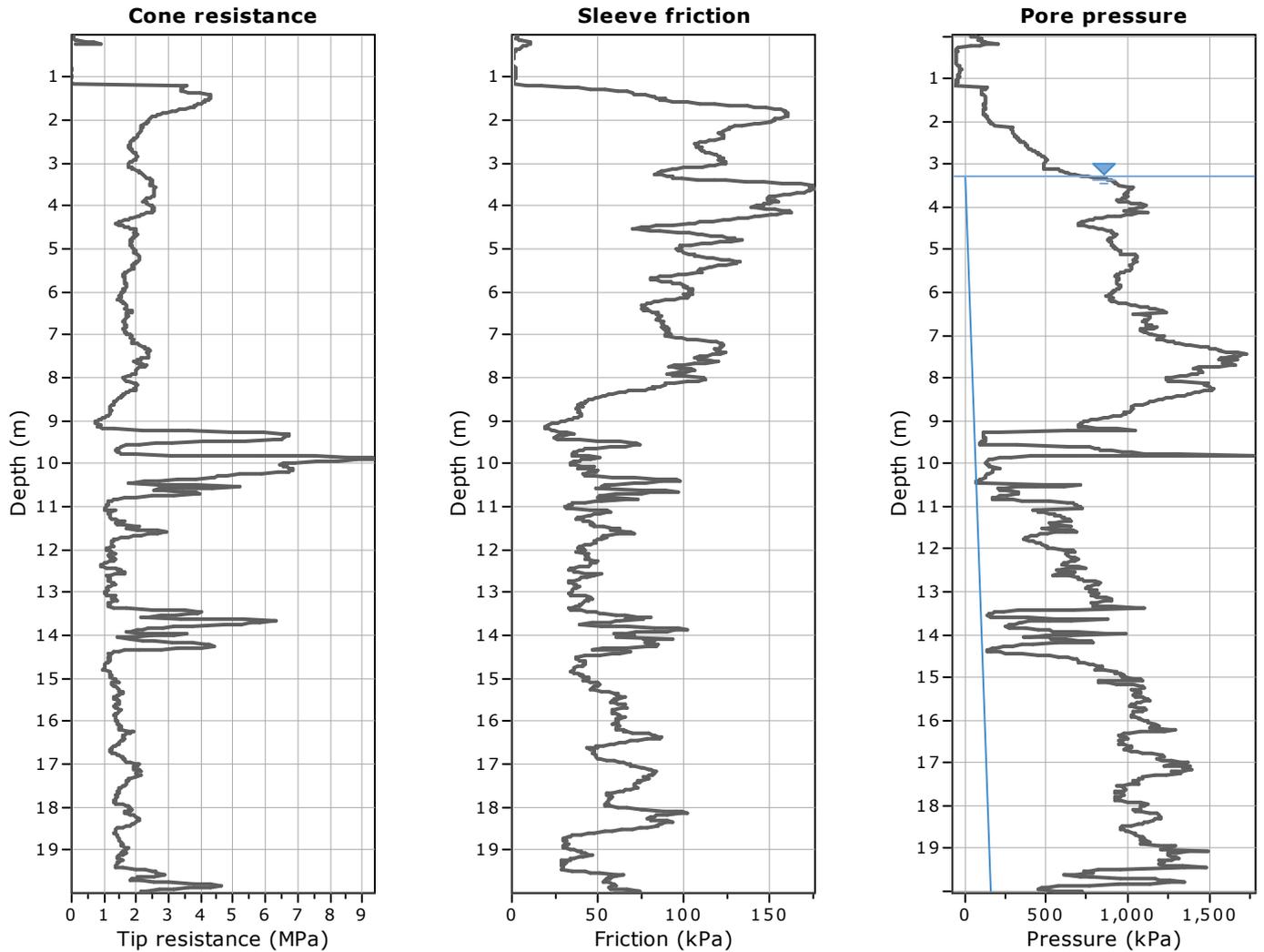
SBTn legend

- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |

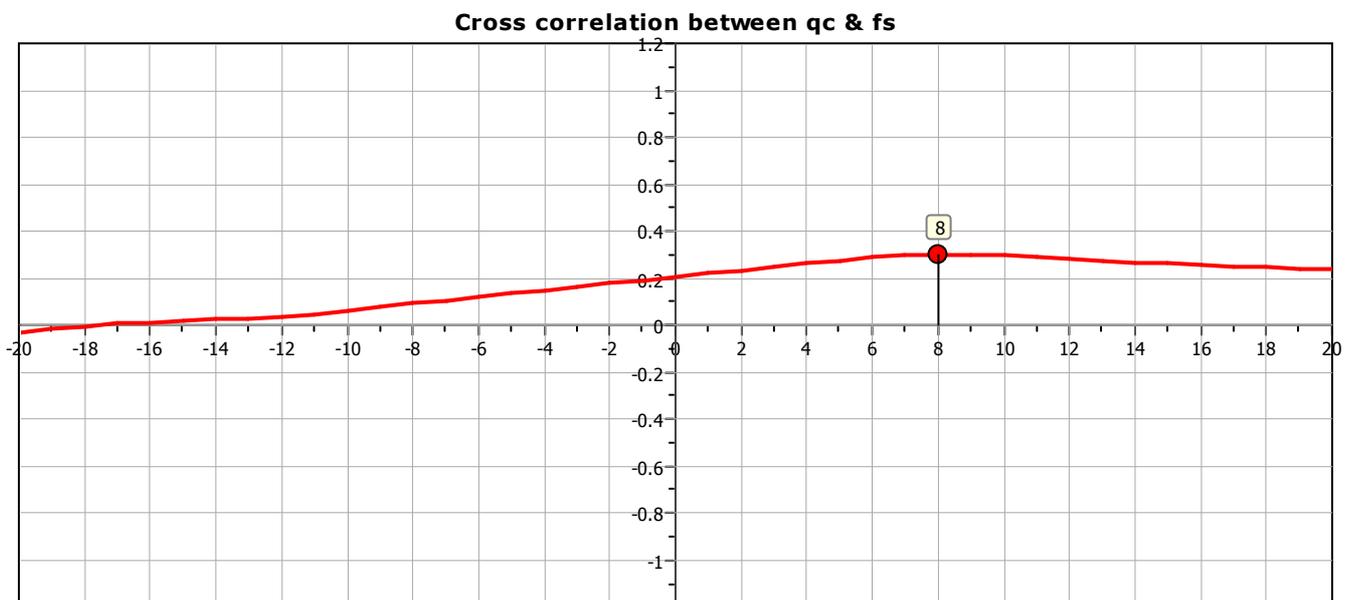
Bq plots (Schneider)





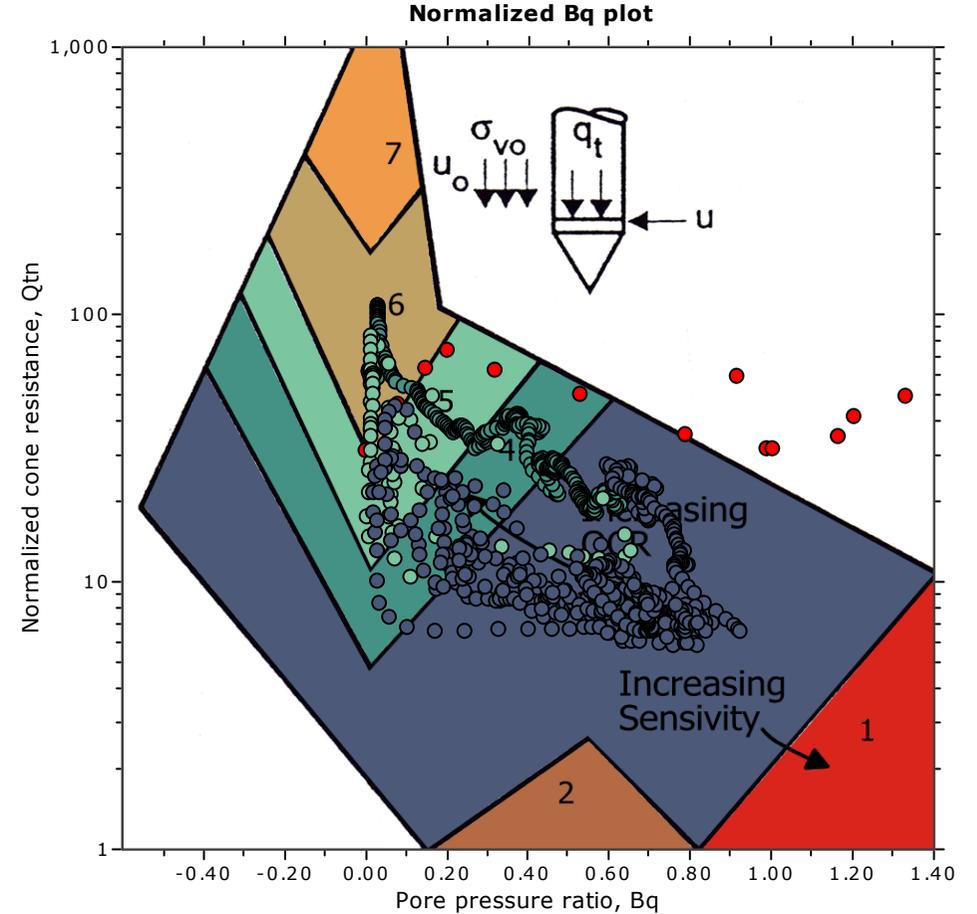
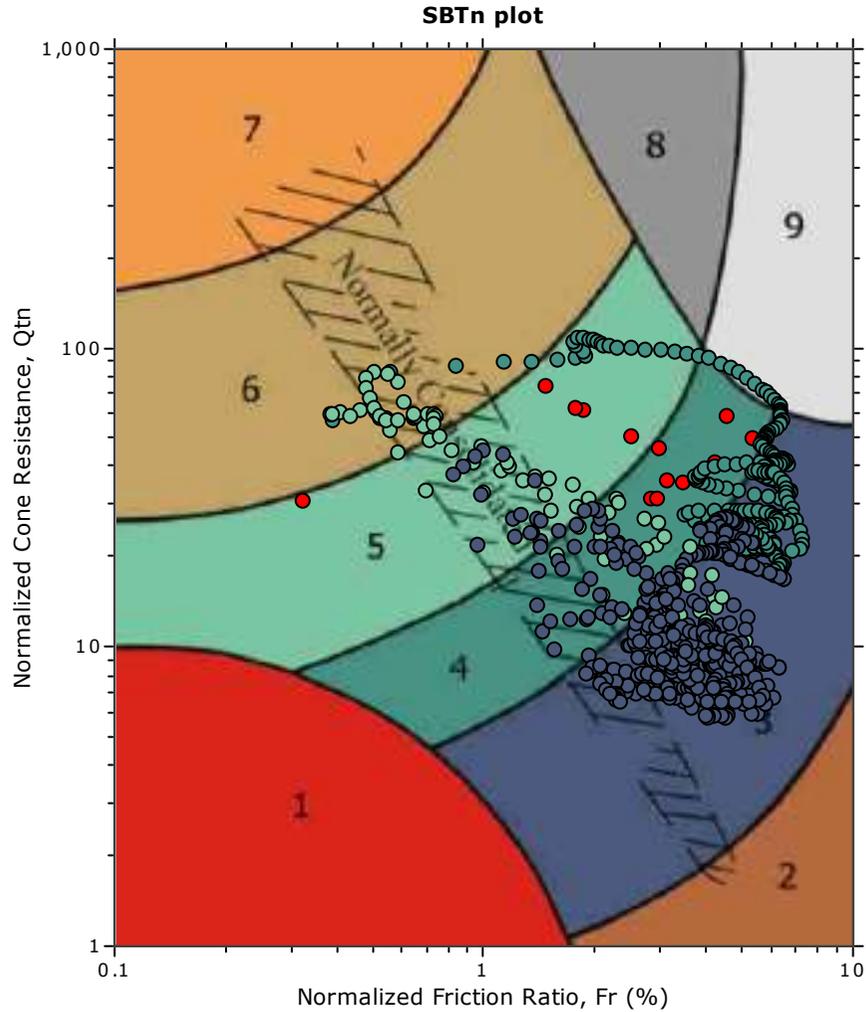


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).





SBT - Bq plots (normalized)

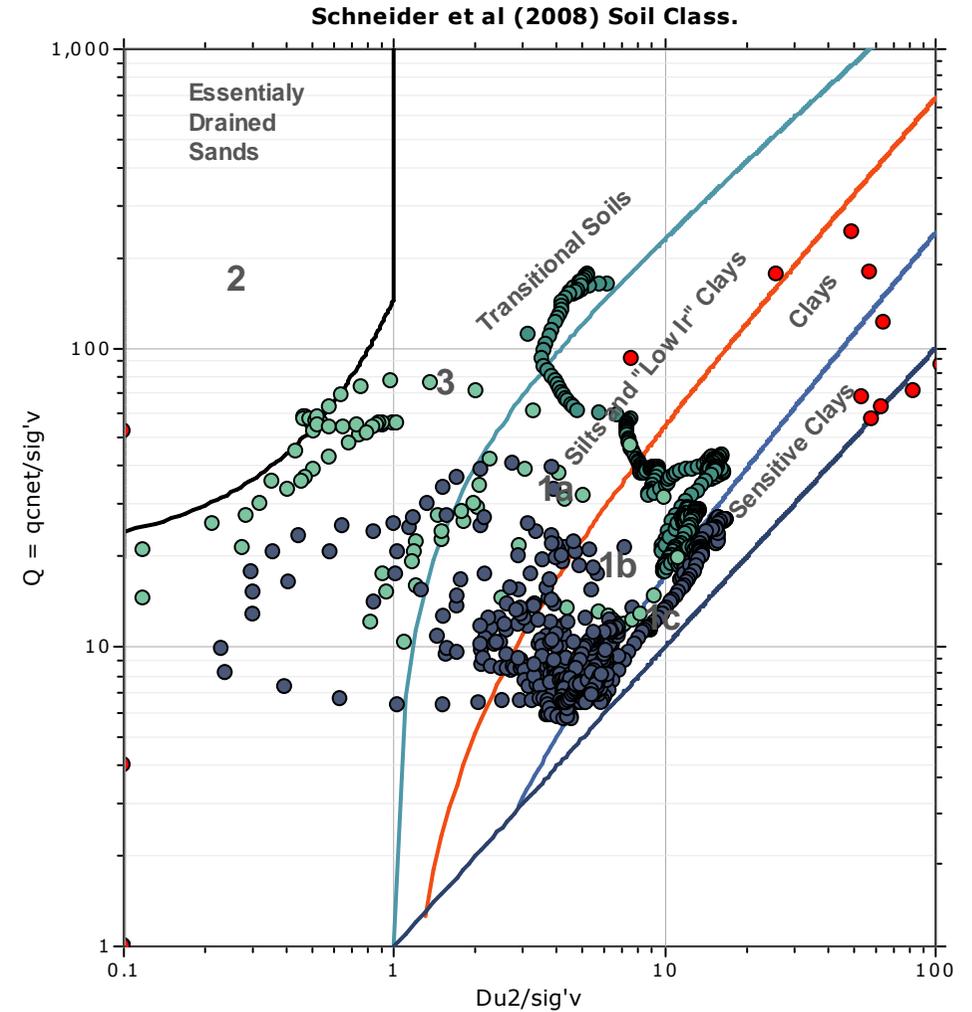
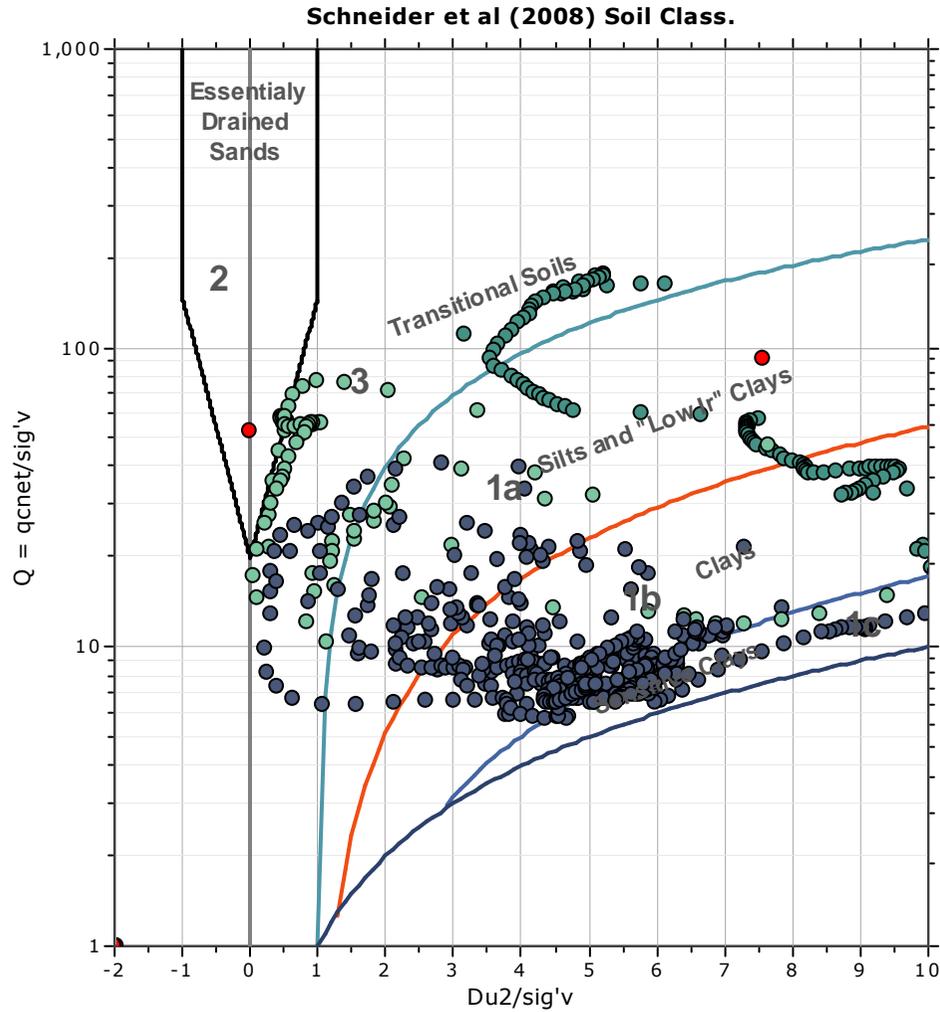


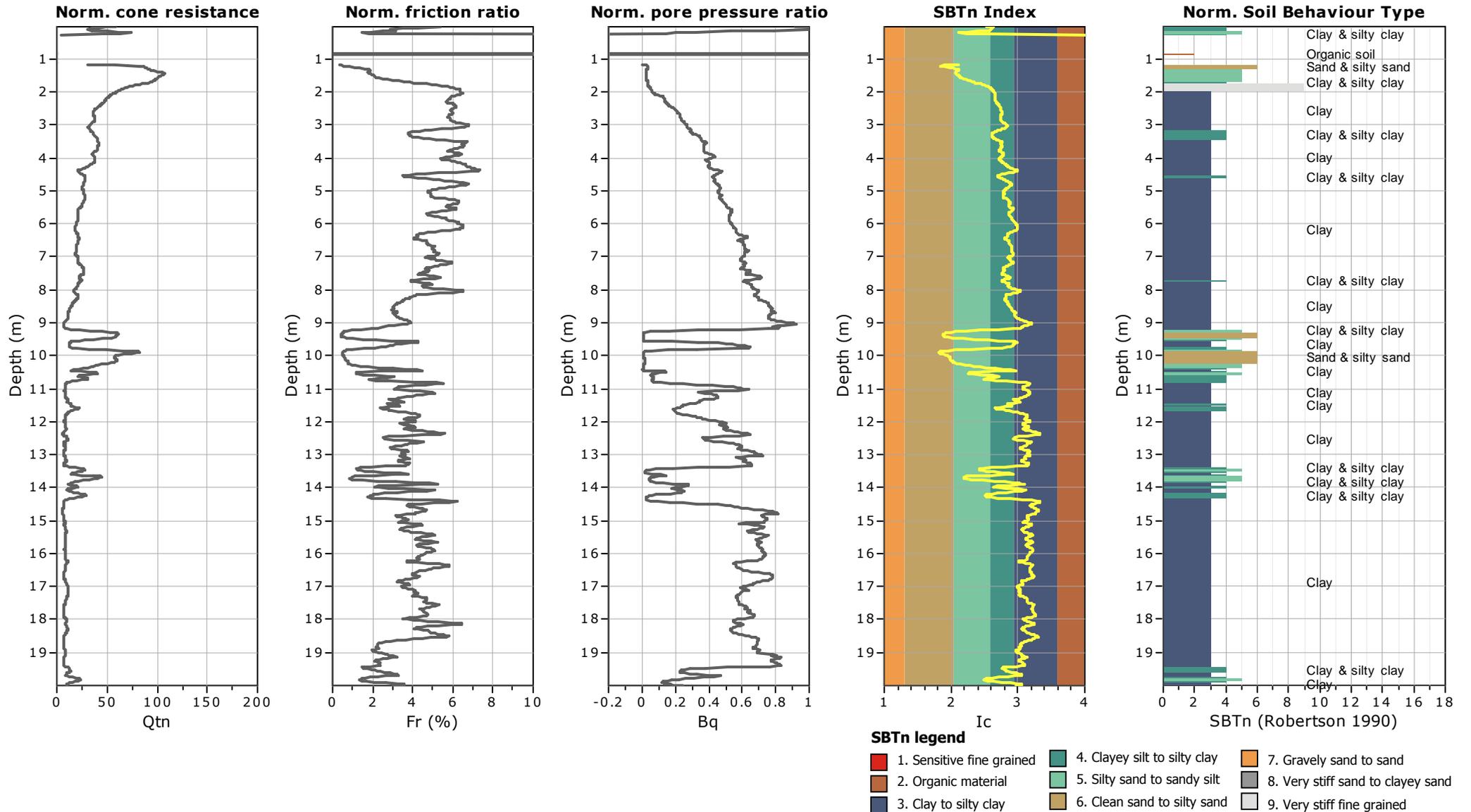
SBTn legend

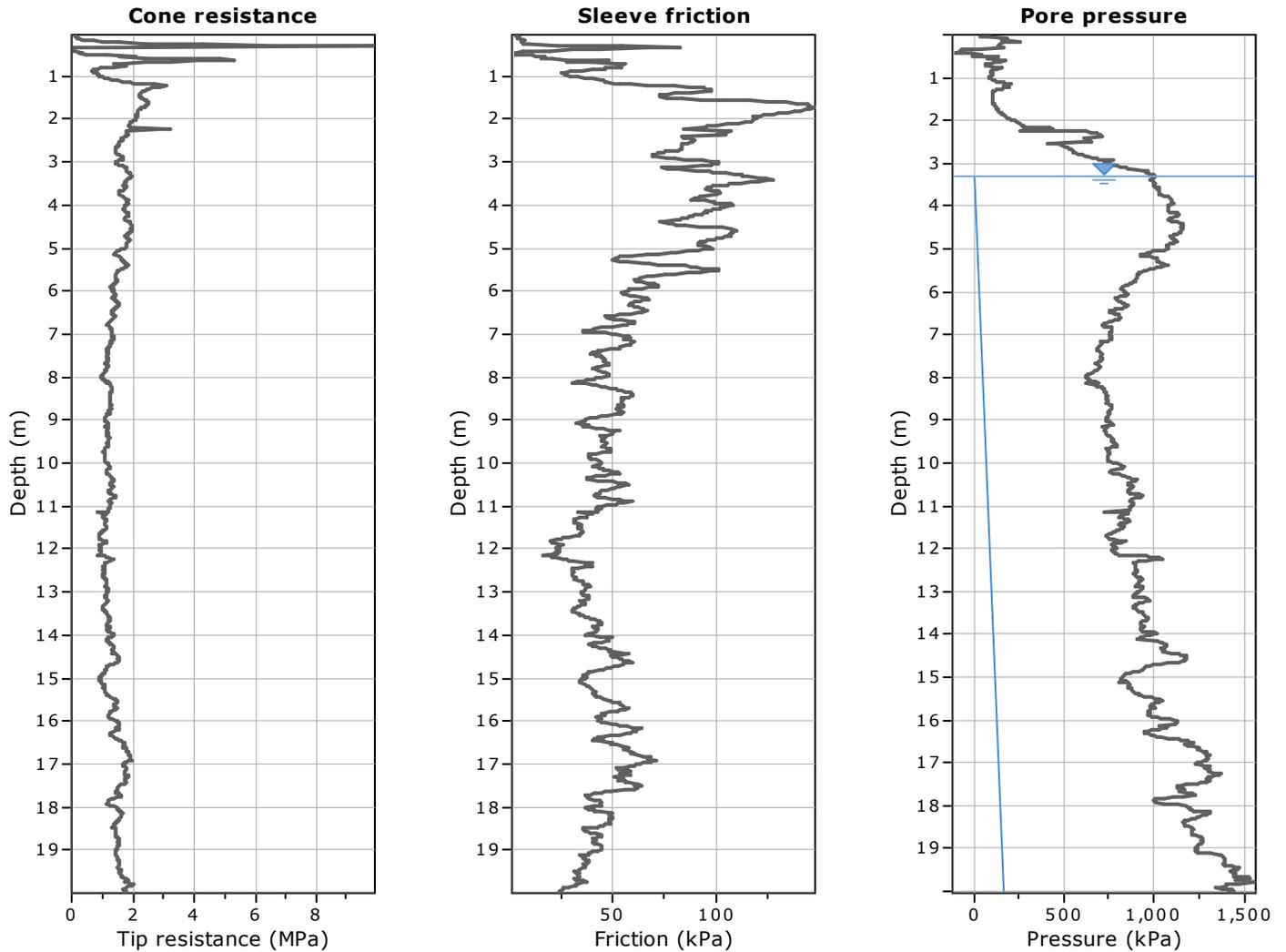
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |



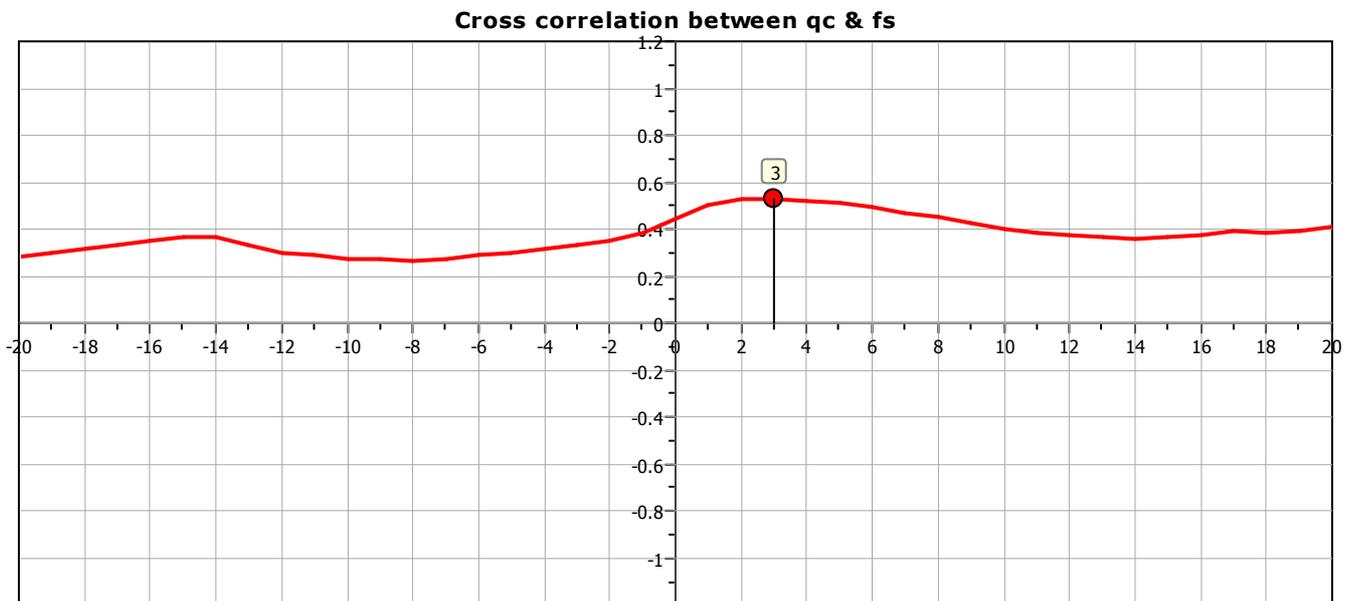
Bq plots (Schneider)





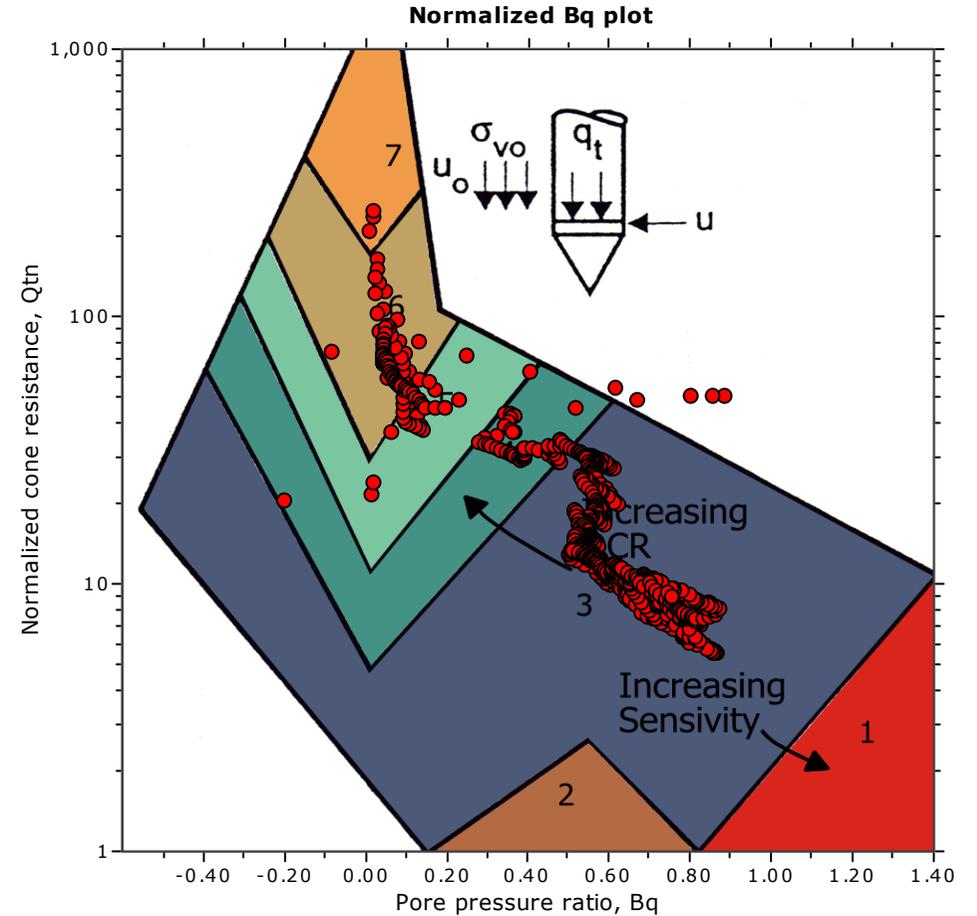
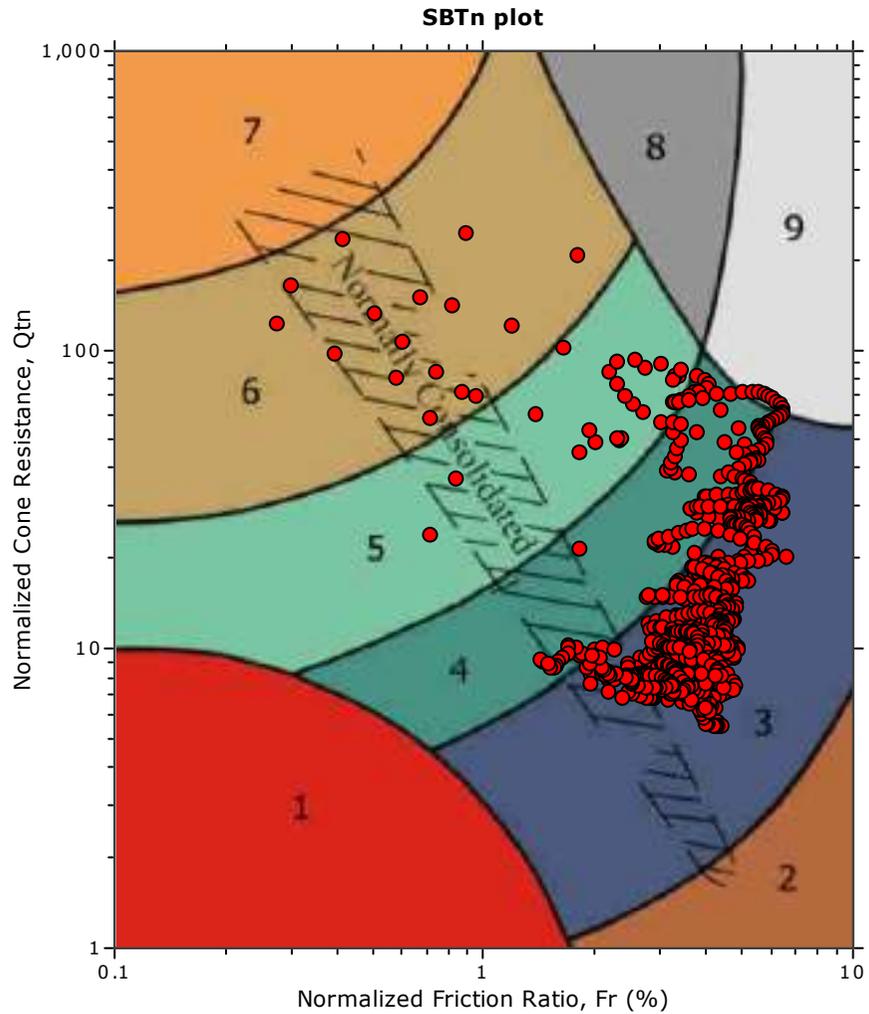


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).





SBT - Bq plots (normalized)

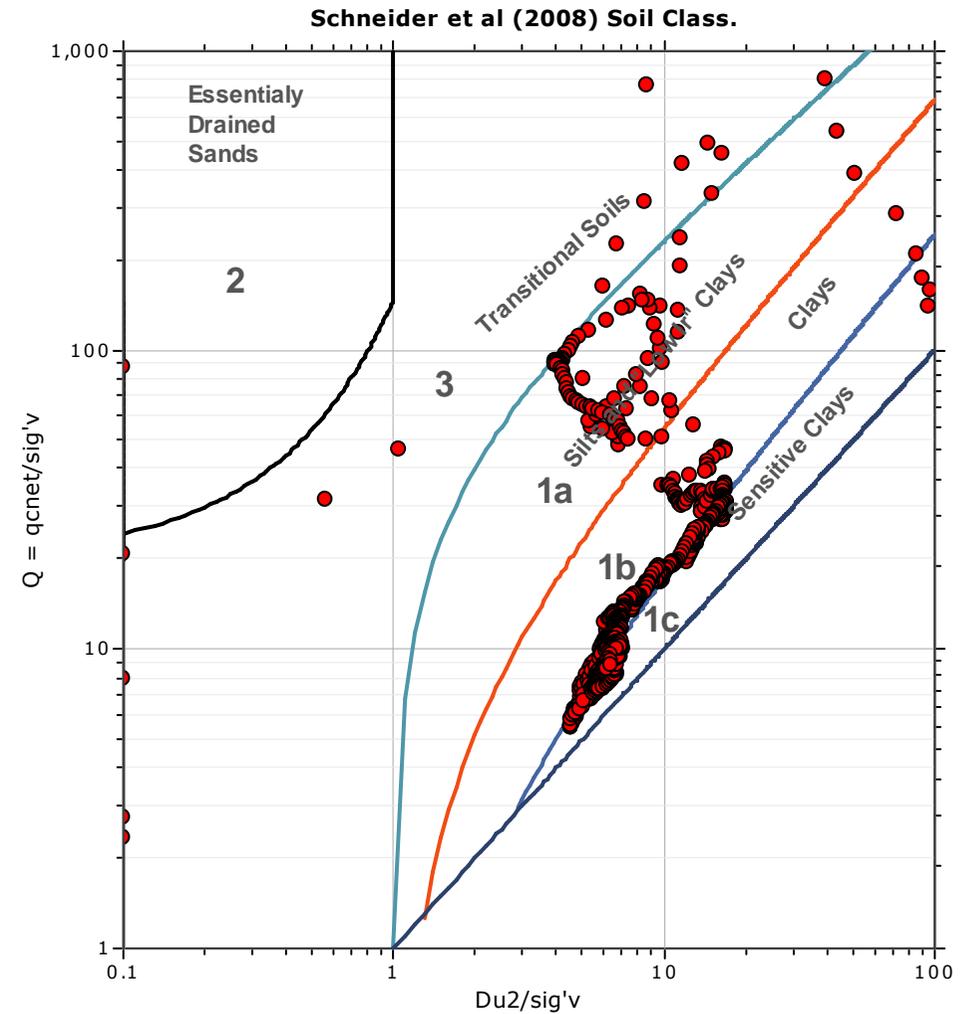
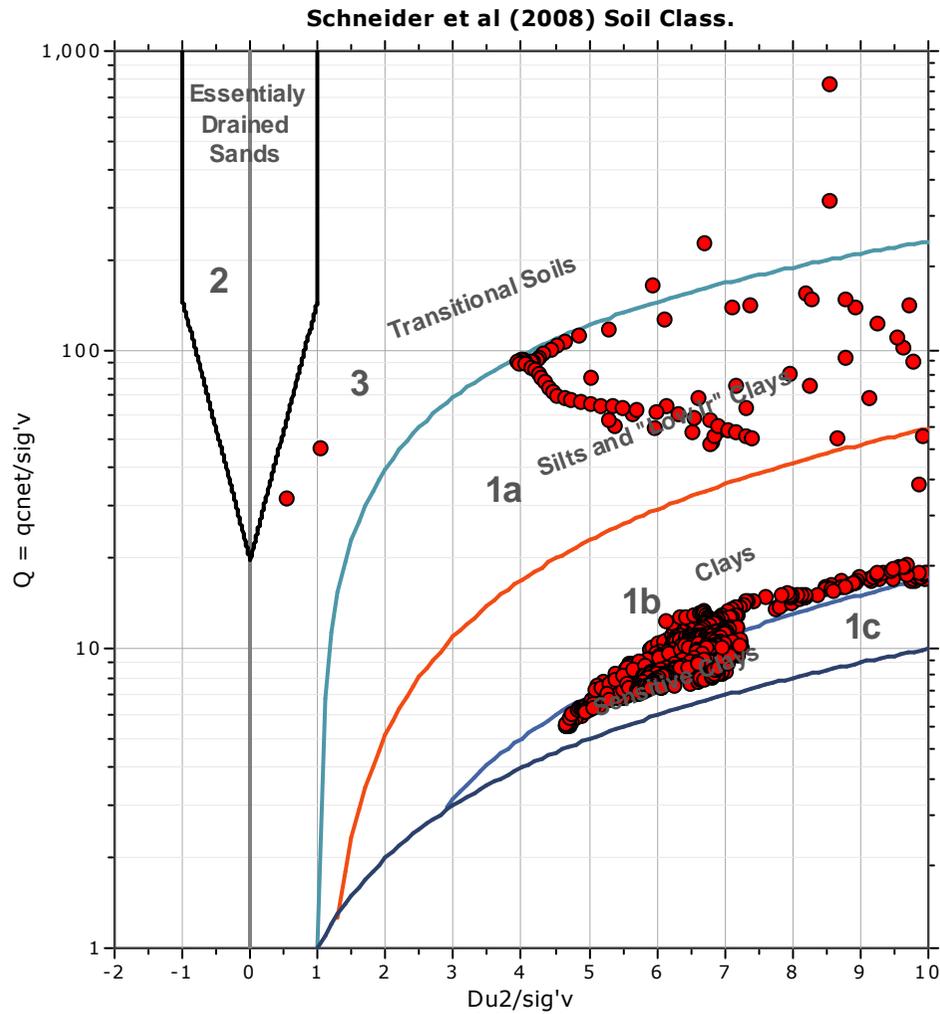


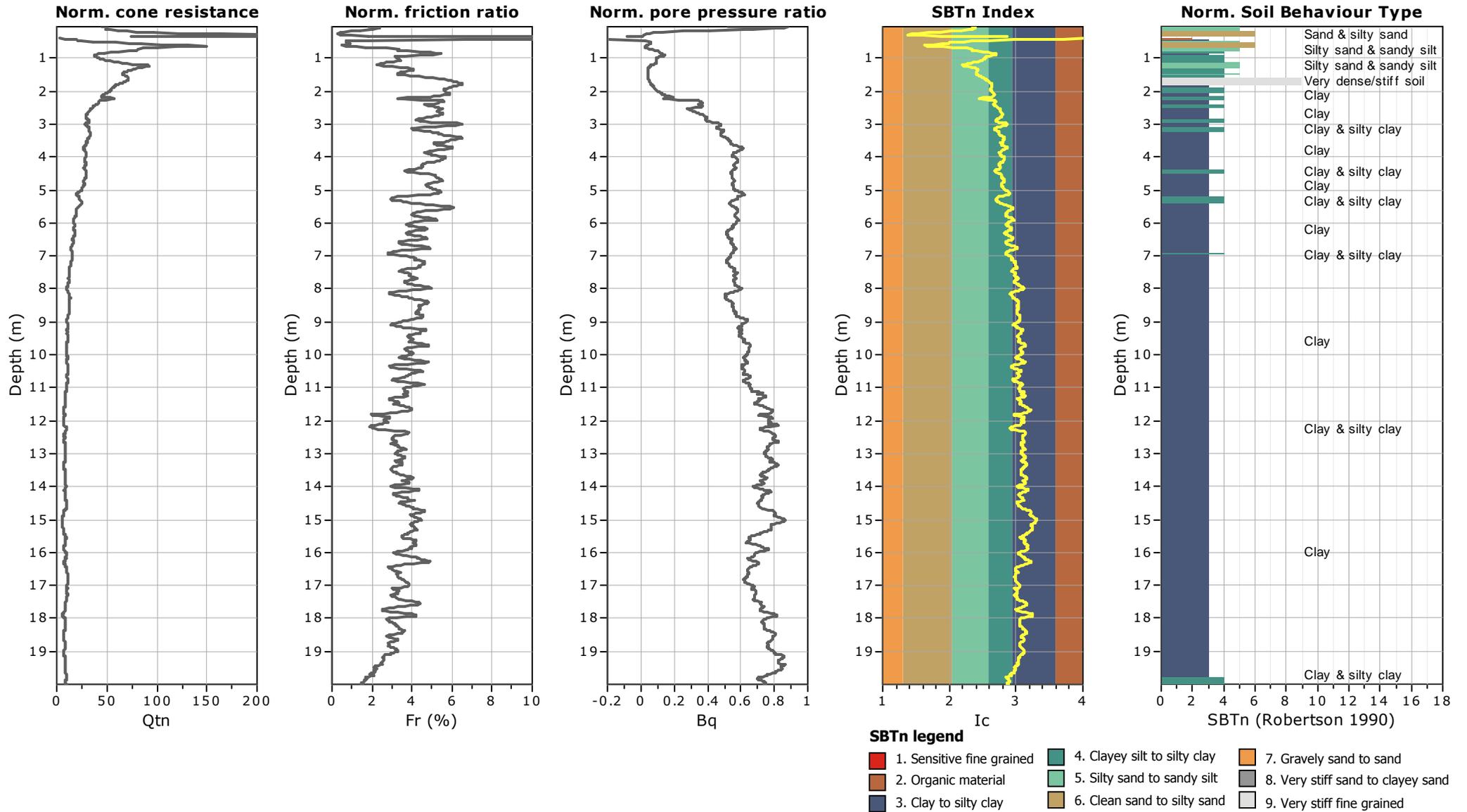
SBTn legend

- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |



Bq plots (Schneider)





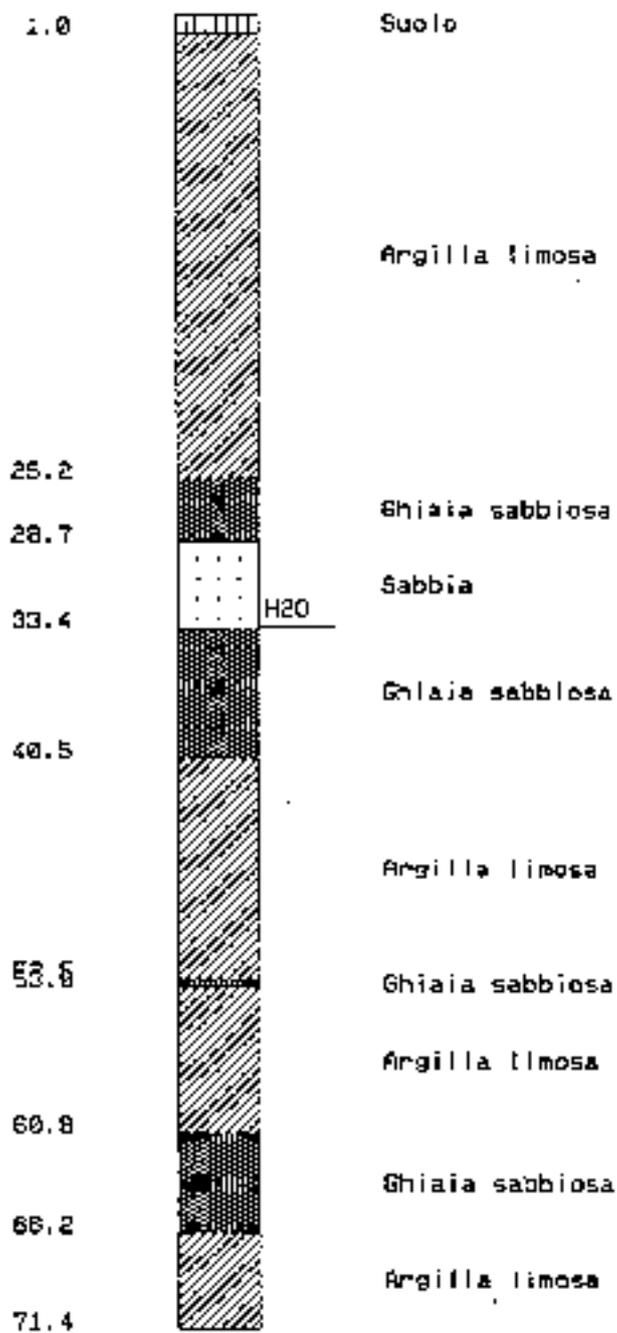
ALLEGATO B

INDAGINI GEOGNOSTICHE

***SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI
REGIONE EMILIA ROMAGNA – DATABASE ON-LINE***

- STRATIGRAFIE POZZI PER ACQUA

Profondita' in m.



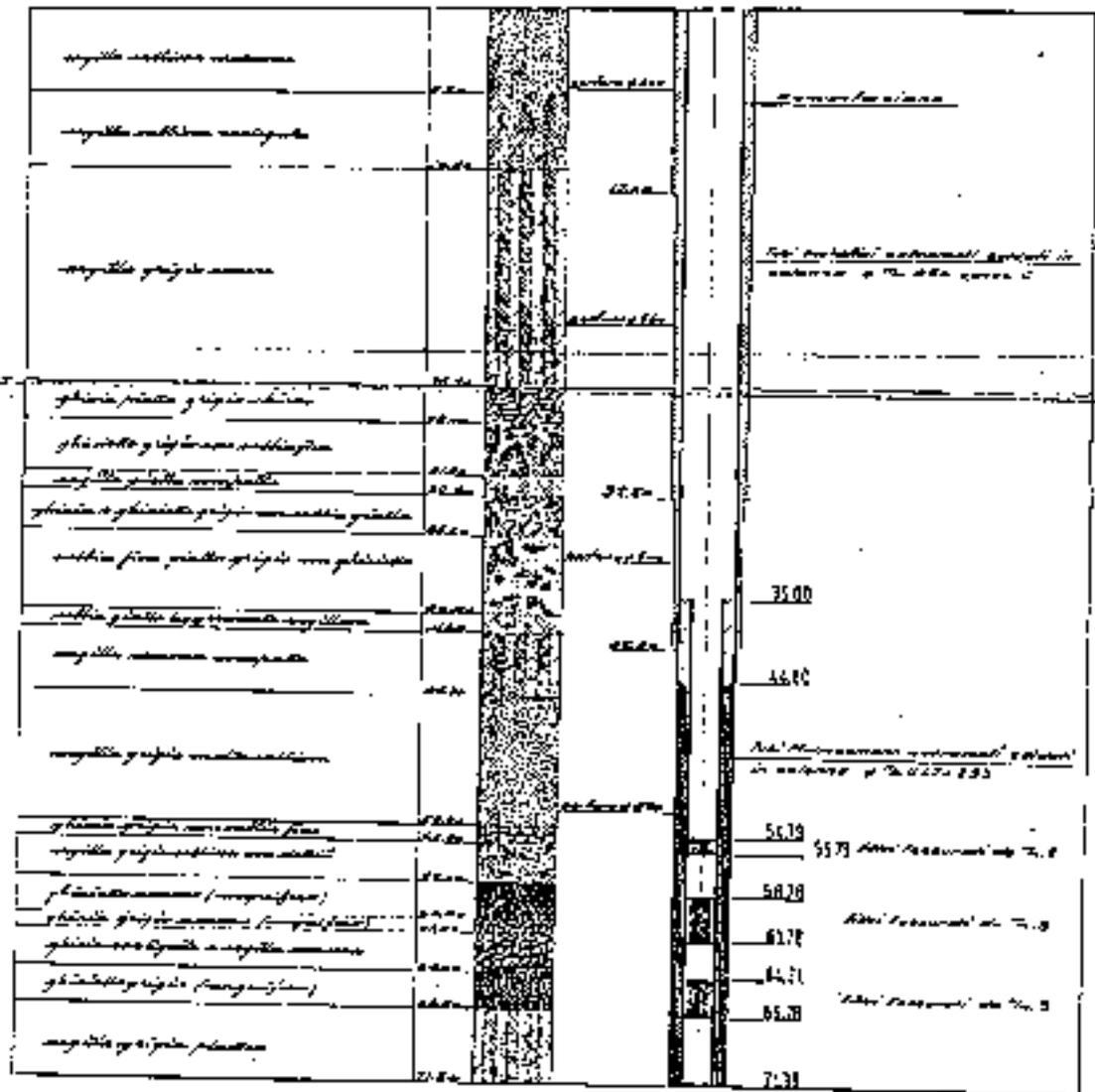
S.P.A. SUCCESSORI ING. A. BONARIVA
BOLOGNA

PREZZO N. 4. ESEGUITO PER CONTO DEL *Spett.*

S.F.I.R. Forlimpopoli
SEZIONE STRATIGRAFICA

LOGLI 114: FORLIMPOPOLI (1/4 per Corchiasa)
Ateneo Pascher-Kolb-strata Nord SW

PREZZI STRATIGRAFICI



ALLEGATO C

STUDIO GEOFISICO CON TROMOGRAFO DIGITALE

- RELAZIONE TECNICA
- REPORT SOFTWARE GRILLA

RELAZIONE TECNICA

1 Sismica tromografica

La sismica tromografica è una tecnica passiva che studia le onde a bassa frequenza e di bassa entità del terreno (microtremori) tramite misure puntuali sul suolo.

Con sofisticati strumenti (tromografi digitali) e specifiche tecniche di analisi dati (tecnica HVSR) è possibile misurare le onde prodotte dal rumore sismico ambientale ed analizzarne la struttura.

La tecnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spazial Ratio*), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970) e poi da Nakamura (1989), è quella maggiormente utilizzata. Essa consiste nello studio dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale, per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. È ormai ampiamente riconosciuto in letteratura che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli. Inoltre si riconosce che le singole componenti del rumore ambientale possono registrare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali e antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali con la componente verticale risulta stabile, conservando le frequenze di risonanza del sito.

La tecnica HVSR può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione geofisica del sottosuolo.

In un modello ideale di terreno costituito di due strati (1 e 2) con diversa densità (ρ_1 e ρ_2) e diverse velocità delle onde S (V_{s1} e V_{s2}) è possibile mettere in relazione la frequenza di risonanza dello strato , il suo spessore e la velocità delle onde S al suo interno. Tale relazione è espressa in maniera semplificata dalla seguente formula:

$$f_r = \frac{V_{s1}}{h}$$

dove:

- f_r è la frequenza di risonanza dello strato 1;
- V_{s1} è la velocità delle onde S nello strato 1;
- h è lo spessore dello strato 1.

Questo metodo, nella sua forma estesa e completa, viene utilizzato per la ricostruzione di modelli multistrato complessi, in grado di fornire parametri fisici del terreno.

Come è possibile notare, all'interno dell'equazione sono presenti tre incognite. Dalla misura tromografica si ottiene unicamente il valore della frequenza di risonanza degli strati (f_r), per cui l'equazione risulta indeterminata. Per risolverla è necessario fornire un valore di riferimento (V_{s1} o h), detto "vincolo", che ne consenta la soluzione. Tale valore può giungere da altre indagini o da bibliografia. Nel caso specifico per risolvere l'equazione si utilizzerà lo spessore h del primo strato ottenuto dall'interpretazione di specifiche indagini geognostiche realizzate in sito.

2 Strumento utilizzato

Per le misure dei microtremori è stato utilizzato un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., che permette la registrazione del rumore sismico ambientale, al fine di verificare la risposta sismica locale e di fornire il parametro V_s_{eq} necessario per la classificazione del suolo di fondazione secondo la normativa vigente (NTC 2018).

Il TROMINO è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e *Up-Down*), che consentono l'acquisizione digitale in alta definizione dei microtremori (ampiezze d'onda inferiori a 10 μm), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t , tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite un *software* dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi. Lo strumento è stato posizionato in due punti rappresentativi per tutta l'area indagata. La centralina è stata posizionata all'interno di due buche profonde circa 5 cm in modo tale da ottenere una superficie pianeggiante omogenea per garantire un perfetto accoppiamento strumento/terreno.

3 Interpretazione della misura

I dati registrati sono stati elaborati e interpretati con il software Grilla. L'analisi è sintetizzata nel report finale generato da Grilla (vedi report a fine testo) che indica anche in forma tabellare il log sismostratigrafico del comparto.

Nell'ultima pagina del report è riportata la rispondenza della misura, e relativa elaborazione, alle linee guida del progetto SESAME. I criteri si riferiscono all'utilizzo della misura per la valutazione della risposta sismica locale in accordo con il metodo di Nakamura e, in particolare, verificano la chiarezza e validità dei picchi registrati. Come evidenziato dalla test SESAME la misura risponde a tutti i criteri di validità della misura (prime tre equazioni) e a solo ad alcuni criterio di chiarezza dell'interpretazione dei picchi (ultime sei equazioni).

L'interpretazione delle misure ai fini della ricostruzione del profilo sismostratigrafico del sito e alla definizione del parametro V_s_{eq} , è stata effettuata utilizzando i dati stratigrafici disponibili dalle prove CPTU realizzate in adiacenza alle misure sismiche.

In particolare come primo passaggio stratigrafico (vincolo) per la costruzione del modello sismico si è utilizzato principalmente il cambio di caratteristiche geotecniche evidenziato dalle prove tra i 21 e i 26 m dal p.c. (tetto della prima lente ghiaia e/o sabbia ghiaiosa).

4 Considerazioni finali

Dall'interpretazione delle due misure sono emersi i seguenti risultati :

■ TR1

- Il picco principale del sito è posto a circa 7,7 Hz e presenta un rapporto H/V pari a 2,6.
- Nel profilo di velocità delle onde V_s non si notano inversione di velocità significative.

- Nel campo delle frequenze di interesse ingegneristico (0,7 Hz ÷ 11 Hz) si segnalano le frequenze comprese tra 2,2 e 2,6 Hz e le frequenze tra 7 e 8 Hz in grado di generare modesti effetti di risonanza nel terreno.
- Il parametro Vs_{eq} (0+30 m) del sito risulta pari a 229 m/s ($\pm 15\%$).

■ **TR2**

- Il picco principale del sito è posto a circa 2,6 Hz e presenta un rapporto H/V pari a 2,8.
- Nel profilo di velocità delle onde Vs non si notano inversione di velocità significative.
- Nel campo delle frequenze di interesse ingegneristico (0,7 Hz ÷ 11 Hz) si segnalano le frequenze comprese tra 2,4 e 2,8 Hz e le frequenze tra 8 e 9 Hz in grado di generare modesti effetti di risonanza nel terreno.
- Il parametro Vs_{eq} (0+30 m) del sito risulta pari a 229 m/s ($\pm 15\%$).

Loiano, lì 10 Dicembre 2021

Dott. Geol. Alberto Filelfi
(O.G.E.R. - Sez. A – A.P. 1115)

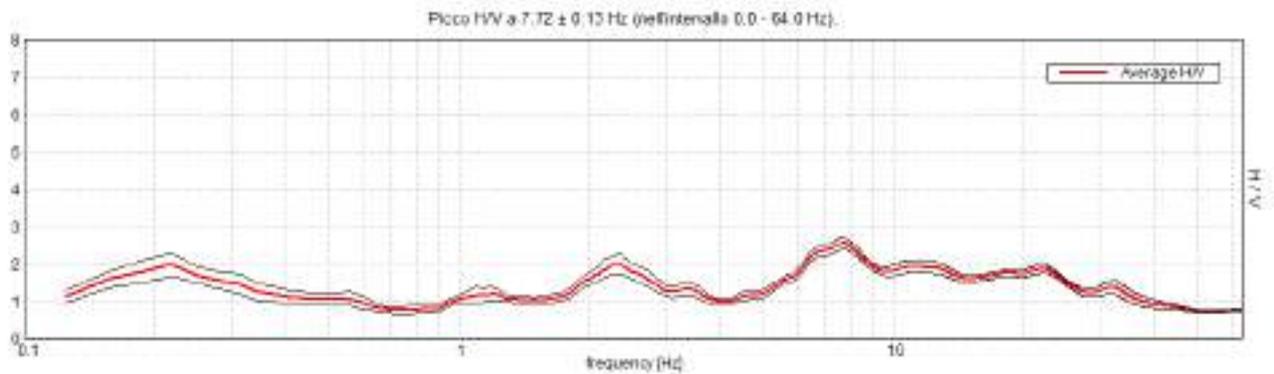


REPORT

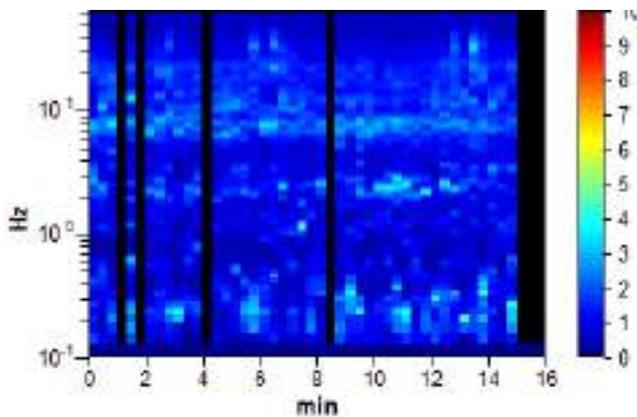
FORLIMPOPOLI, EX-ORBAT TR1

Strumento: TEN-0015/01-07
Inizio registrazione: 29/11/21 16:50:33 Fine registrazione: 29/11/21 17:06:34
Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
Durata registrazione: 0h16'00". Analizzato 85% tracciato (selezione manuale)
Freq. campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 20 s
Tipo di lisciamento: Triangular window
Lisciamento: 10%

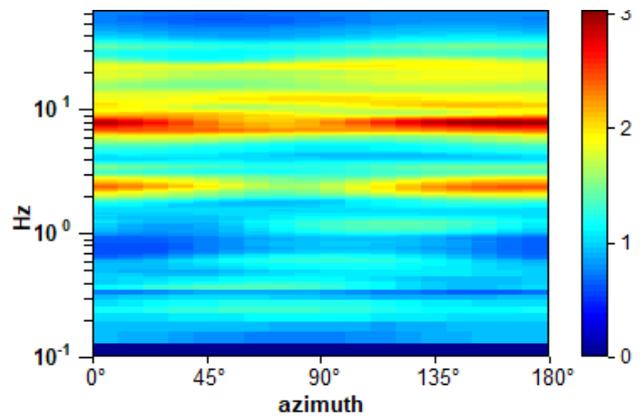
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



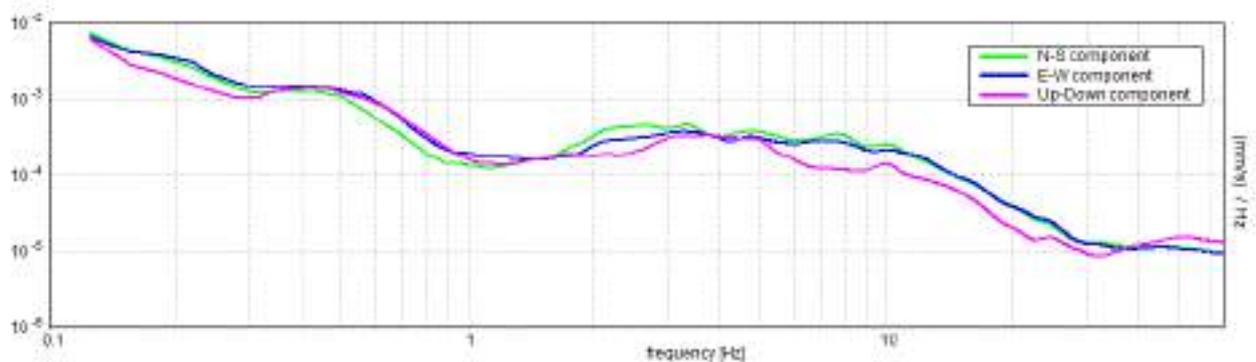
SERIE TEMPORALE H/V



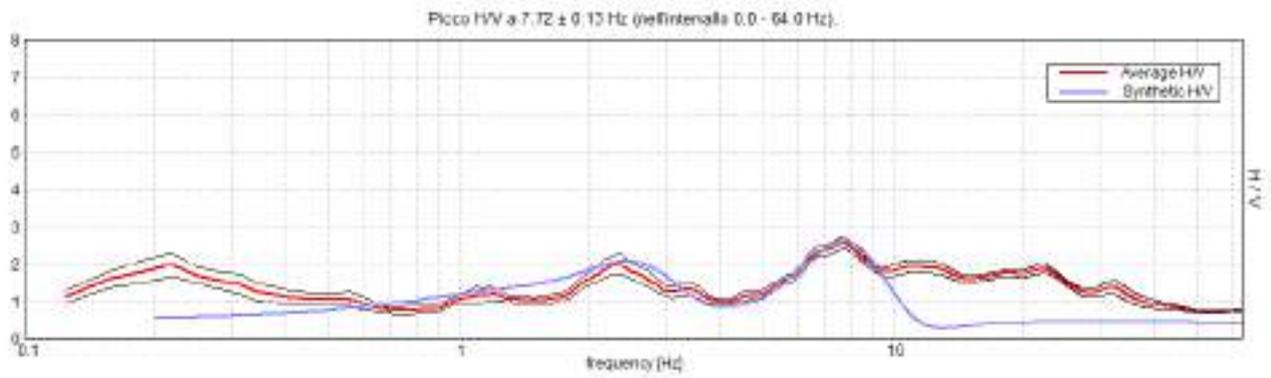
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

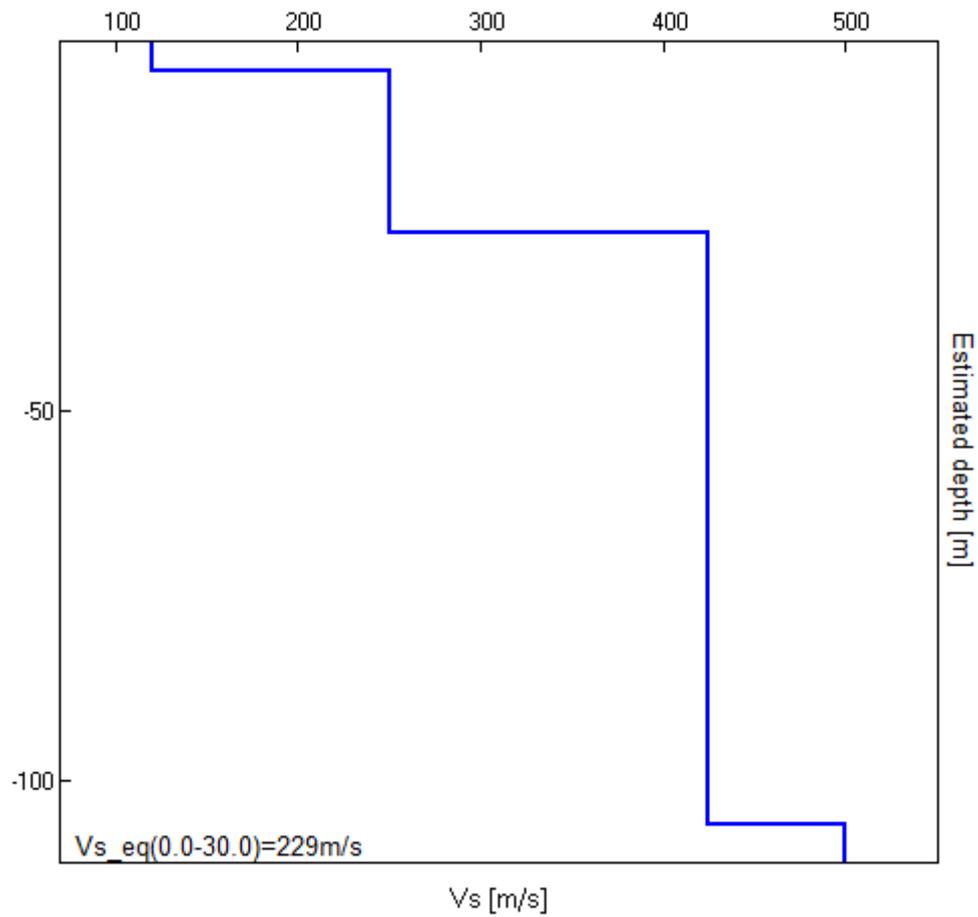


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
4.00	4.00	120	0.45
26.00	22.00	250	0.44
106.00	80.00	425	0.40
inf.	inf.	500	0.38

Vs_eq(0.0-30.0)=229m/s



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

Picco H/V a 7.72 ± 0.13 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$7.72 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$6329.4 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 372	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	5.156 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	26.875 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.55 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01712 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.13213 < 0.38594$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1547 < 1.58$	OK	

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

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

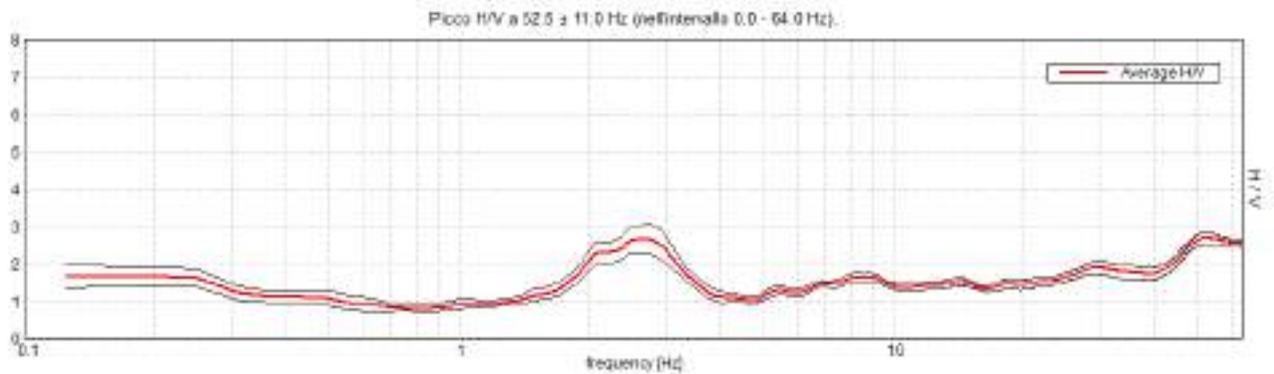
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

REPORT

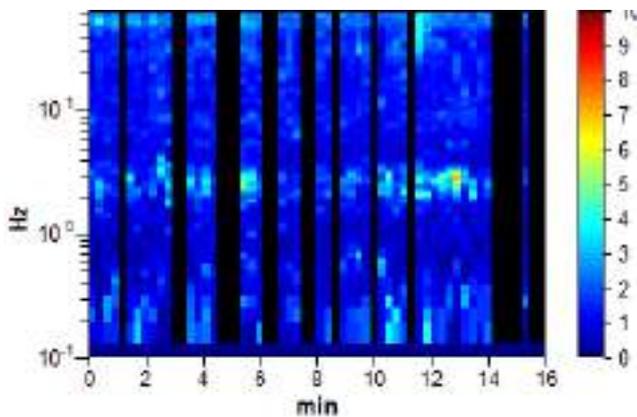
FORLIMPOPOLI, EX-ORBAT TR2

Strumento: TEN-0015/01-07
Inizio registrazione: 29/11/21 17:57:09 Fine registrazione: 29/11/21 18:13:10
Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
Durata registrazione: 0h16'00". Analizzato 68% tracciato (selezione manuale)
Freq. campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 16 s
Tipo di lisciamento: Triangular window
Lisciamento: 10%

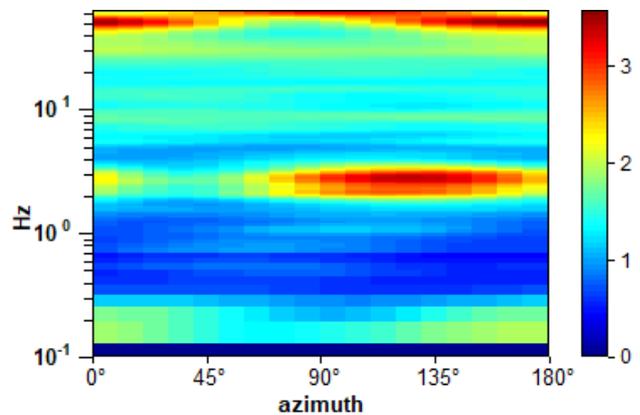
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



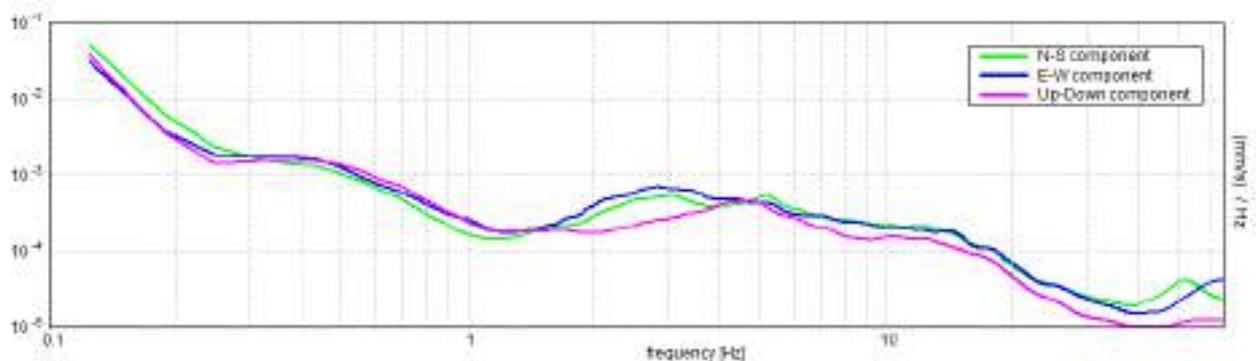
SERIE TEMPORALE H/V



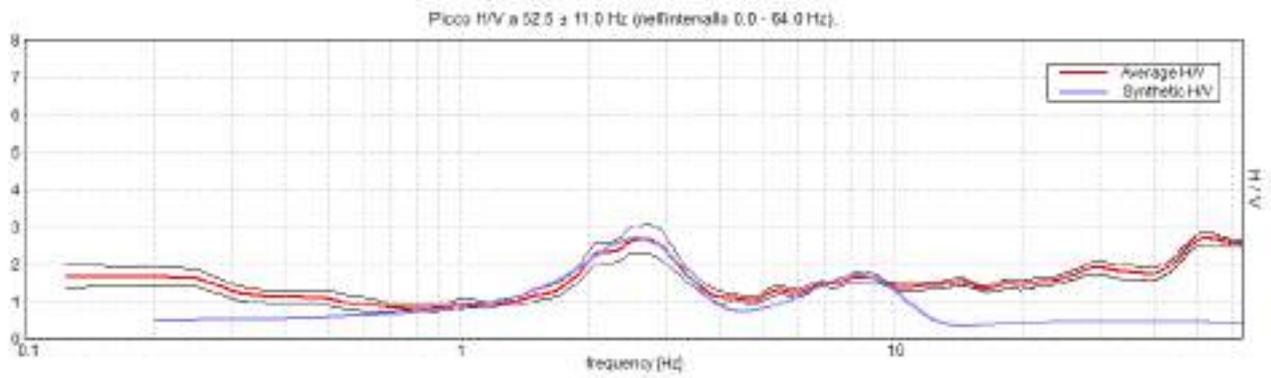
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

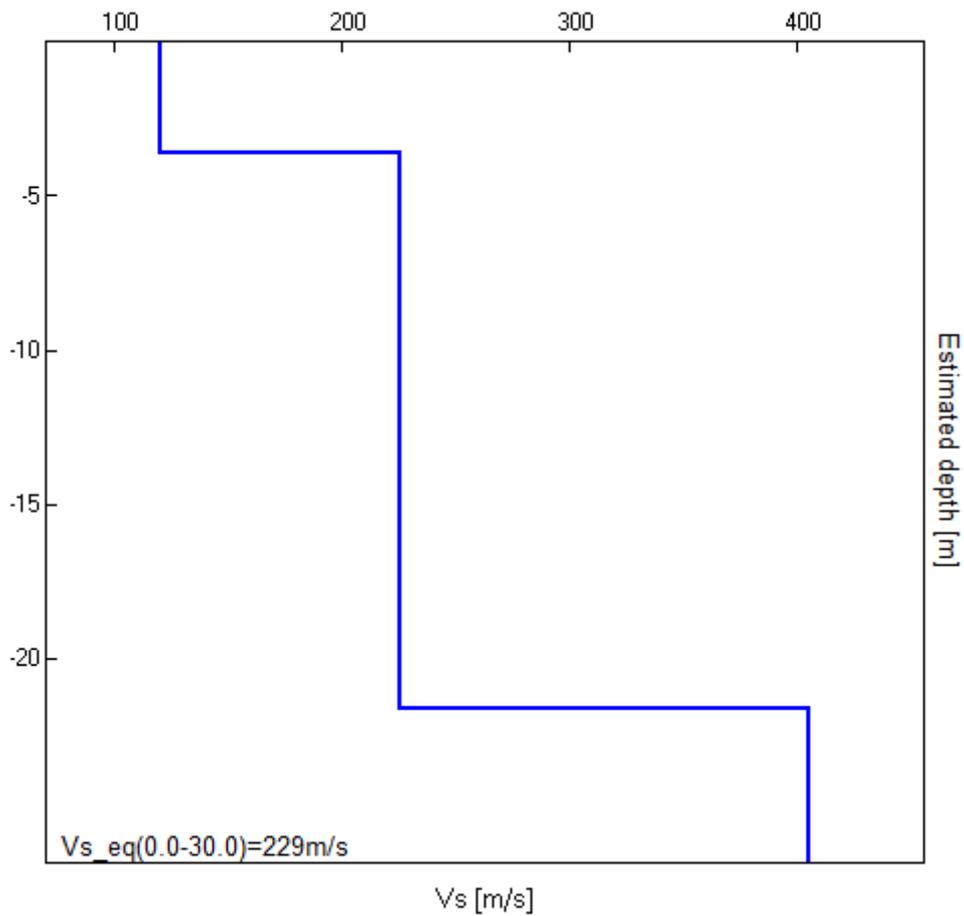


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
3.60	3.60	120	0.45
21.60	18.00	225	0.42
inf.	inf.	405	0.38

Vs_eq(0.0-30.0)=229m/s



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

Picco H/V a 52.5 ± 11.0 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$52.50 > 0.63$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$34440.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 605	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	16.813 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$2.69 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.20961 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$11.00436 < 2.625$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1774 < 1.58$	OK	

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

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

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

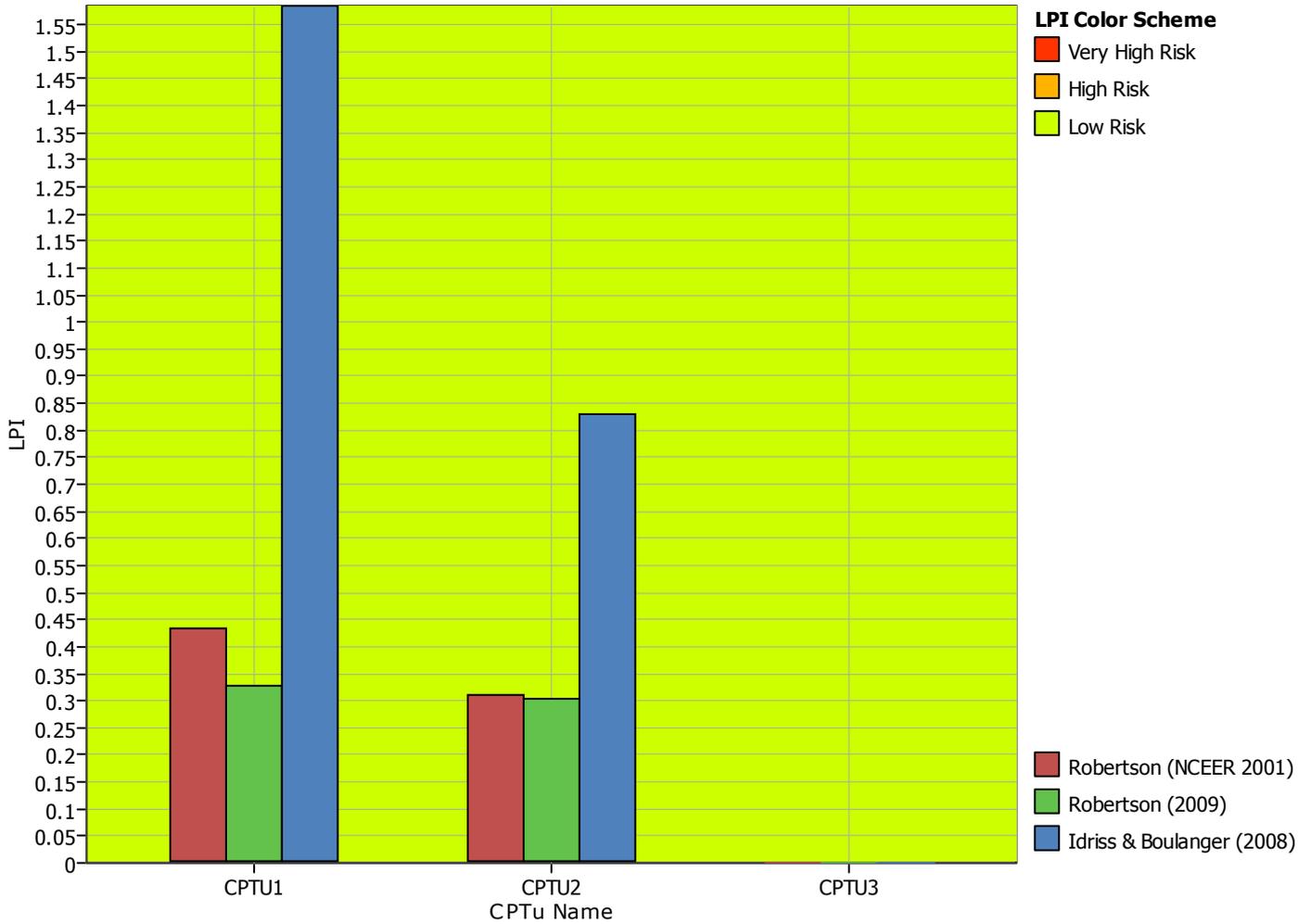
ALLEGATO D

VERIFICHE DELL'INDICE DI POTENZIALE LIQUEFAZIONE DEL SITO (LPI)

- **RISULTATI RELAZIONE DI CALCOLO PROGRAMMA CLIQ**
(risultati grafici senza tabelle di calcolo)



Overall Parametric Assessment Method



:: CPT main liquefaction parameters details ::

CPT Name	Earthquake Mag.	Earthquake Accel.	GWT in situ (m)	GWT earthq. (m)
CPTU1	6.14	0.20	3.20	2.50
CPTU2	6.14	0.20	3.30	2.50
CPTU3	6.14	0.20	3.30	2.50

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

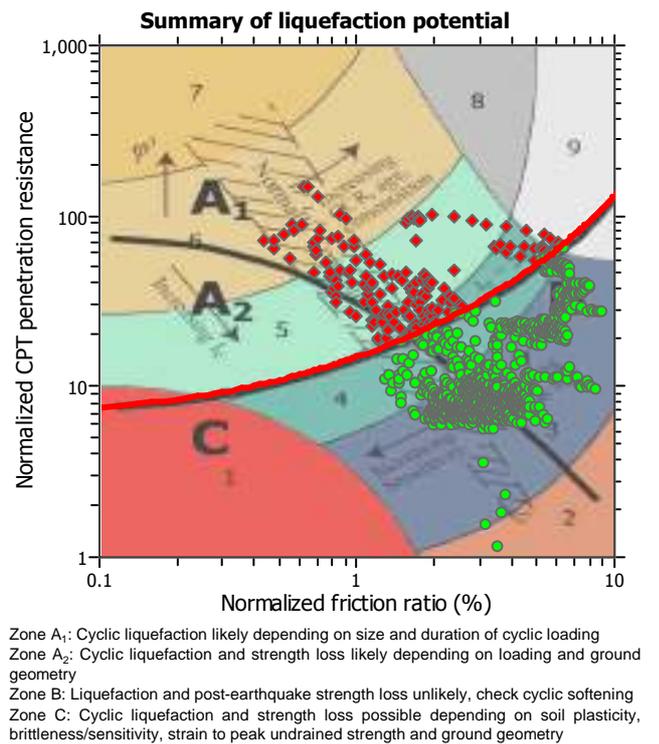
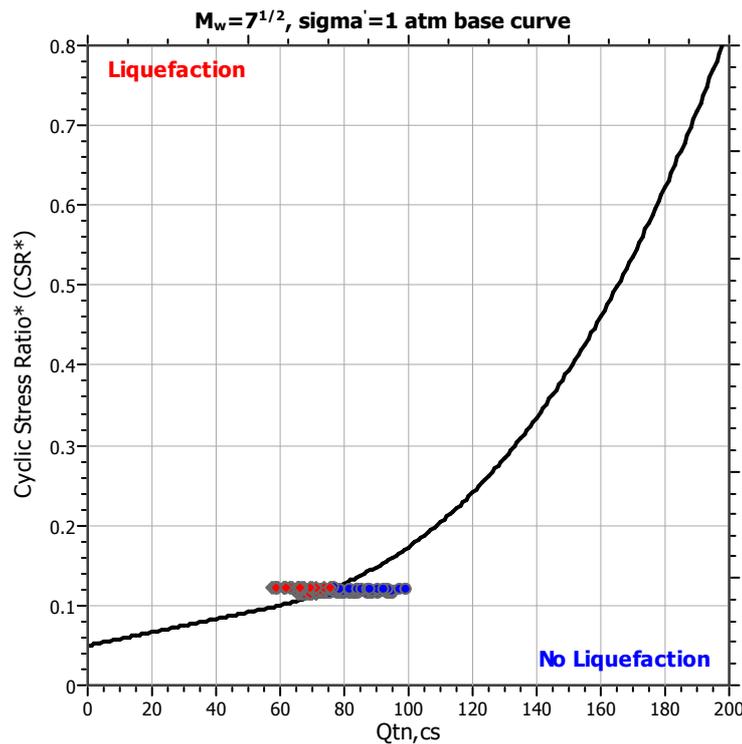
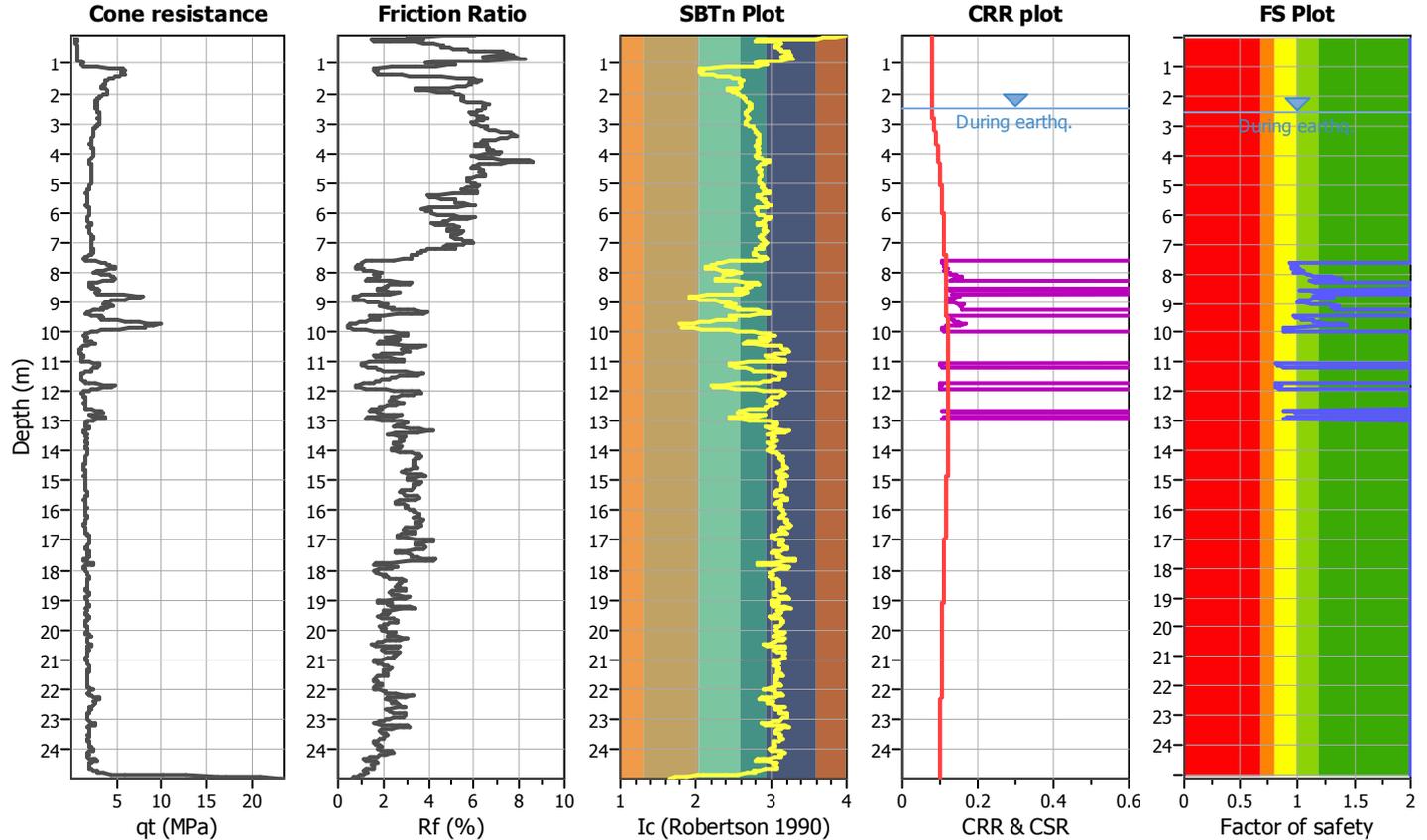
Project title : FORLIMPOPOLI

Location : EX AREA ORBAT

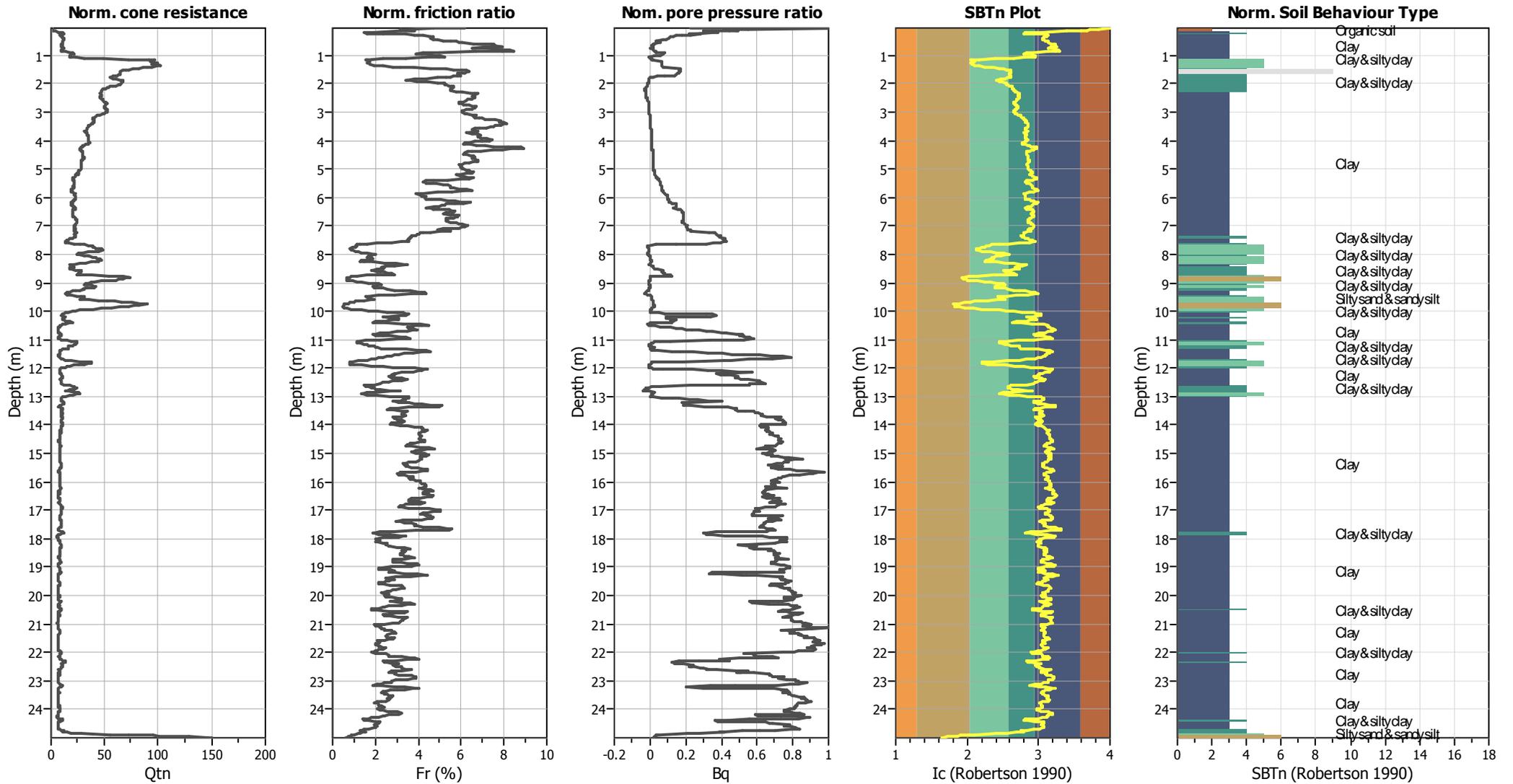
CPT file : CPTU1

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		



CPT basic interpretation plots (normalized)



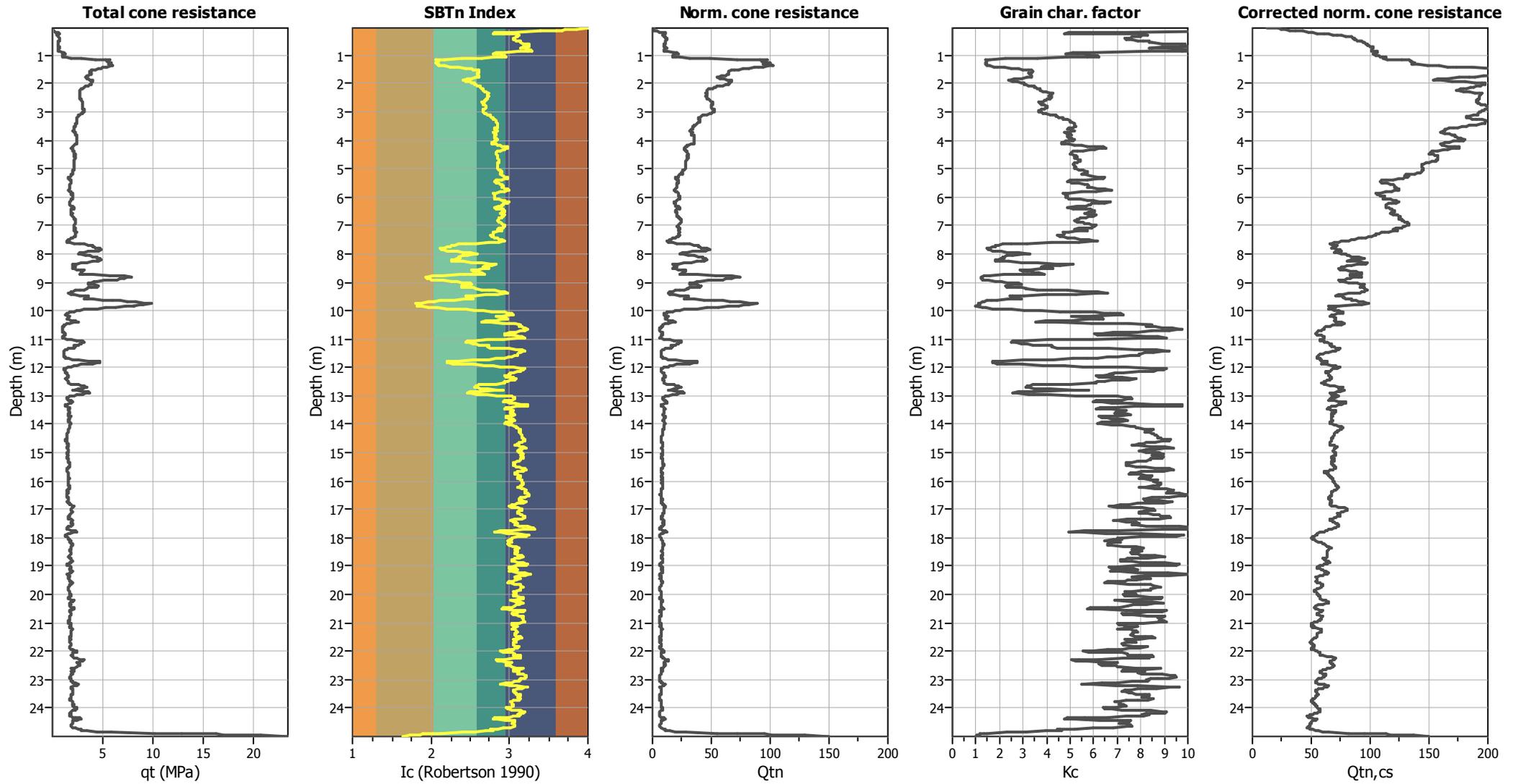
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_v applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

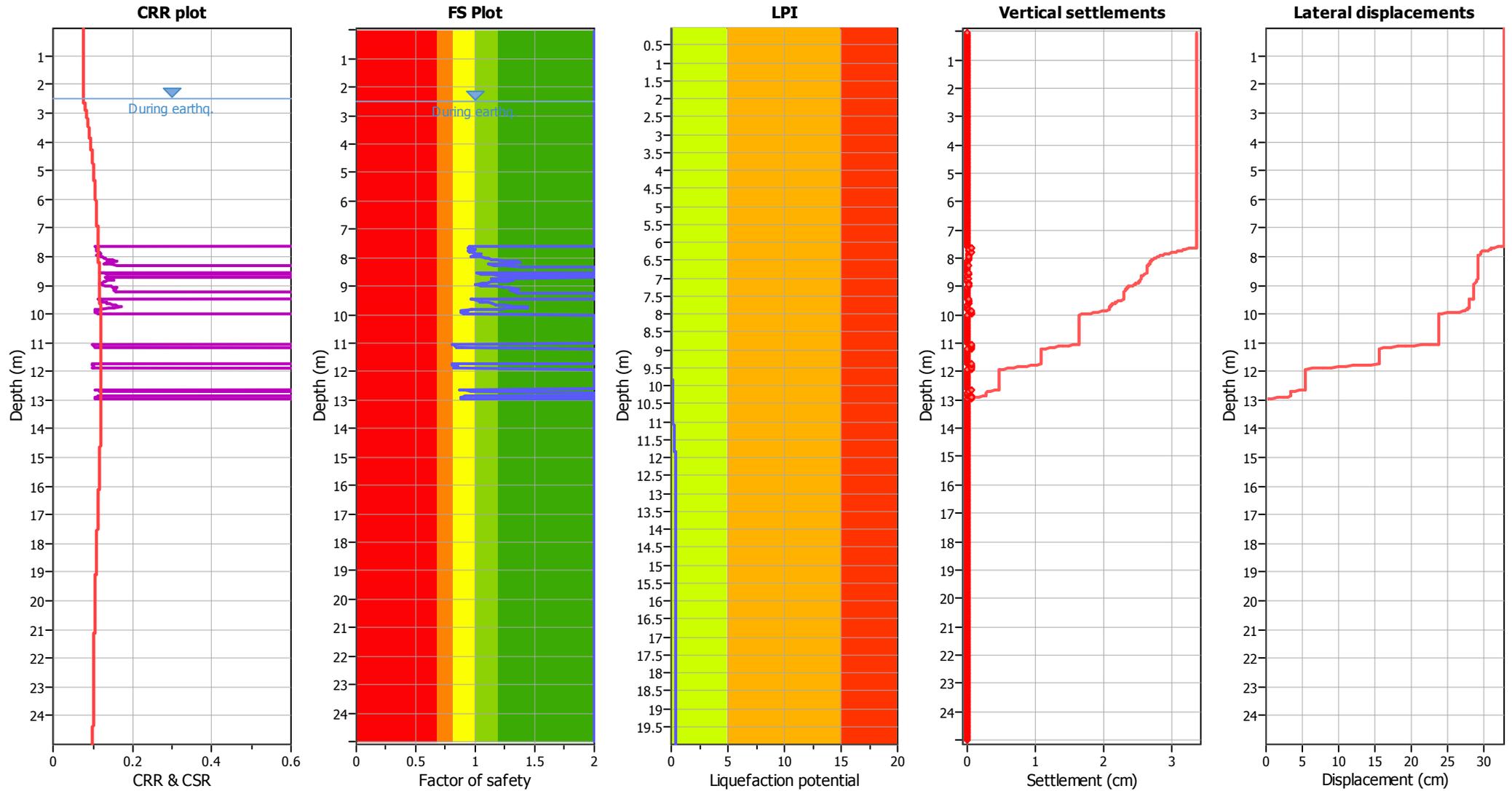
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_{cs} applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	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:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	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 REPORT

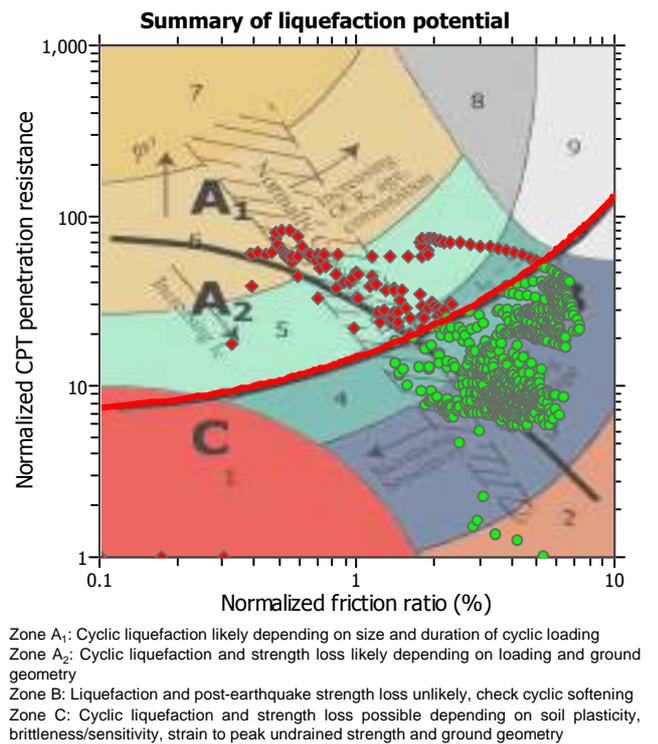
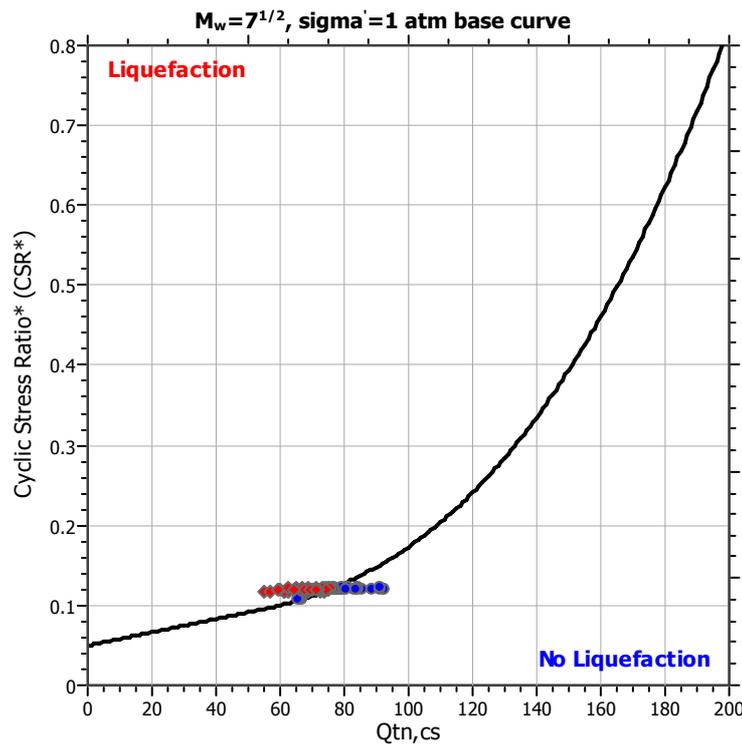
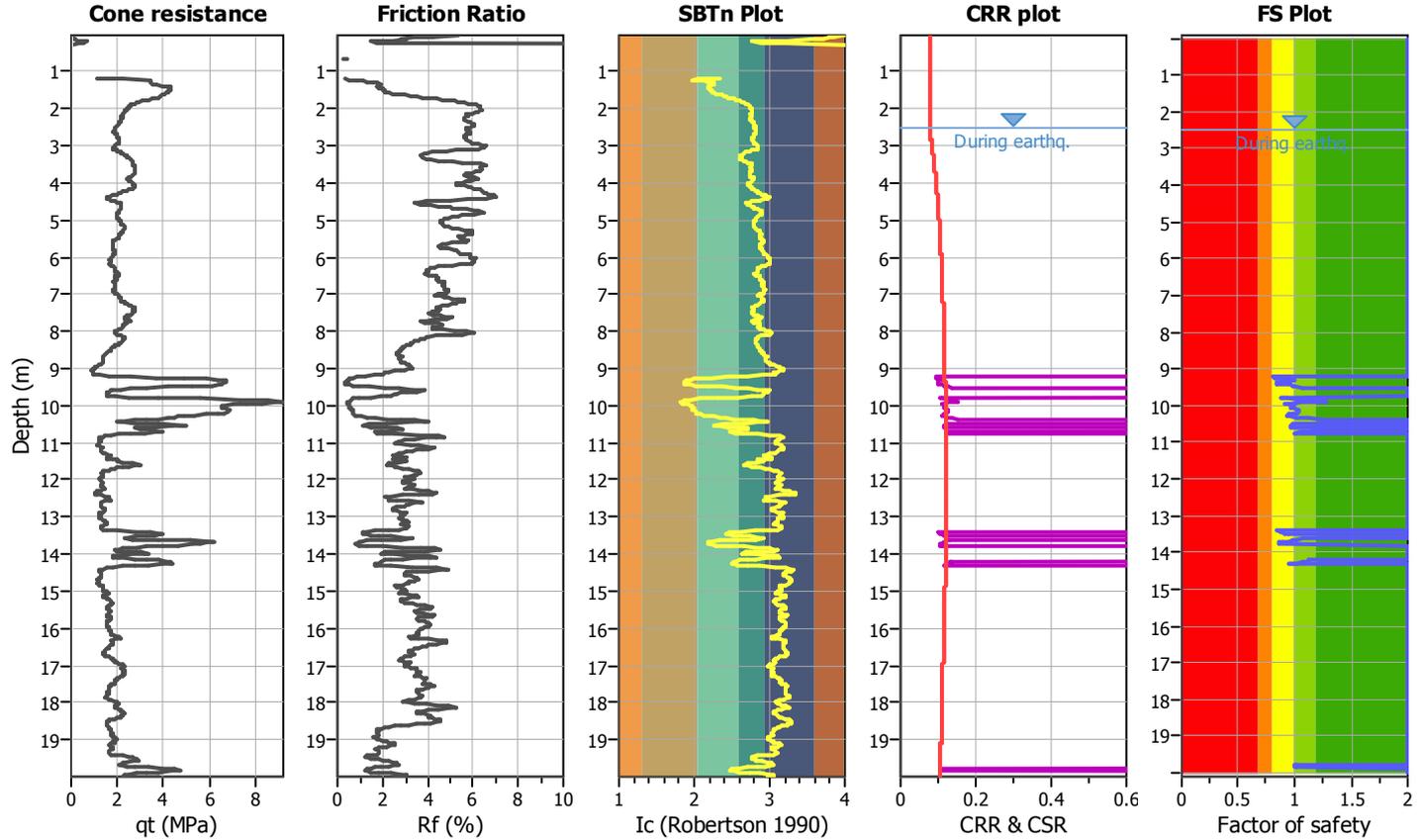
Project title : FORLIMPOPOLI

Location : EX AREA ORBAT

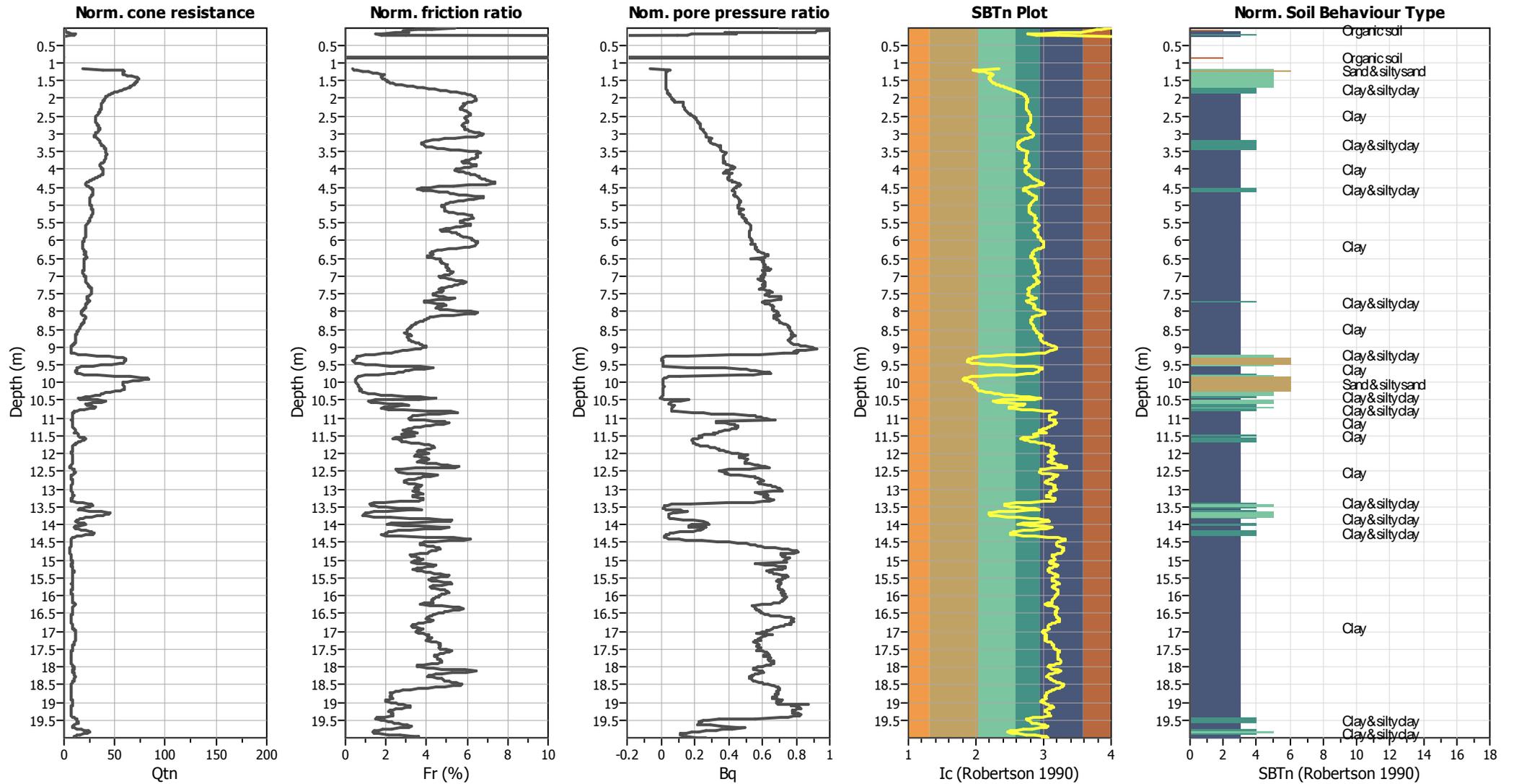
CPT file : CPTU2

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.50 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method based



CPT basic interpretation plots (normalized)



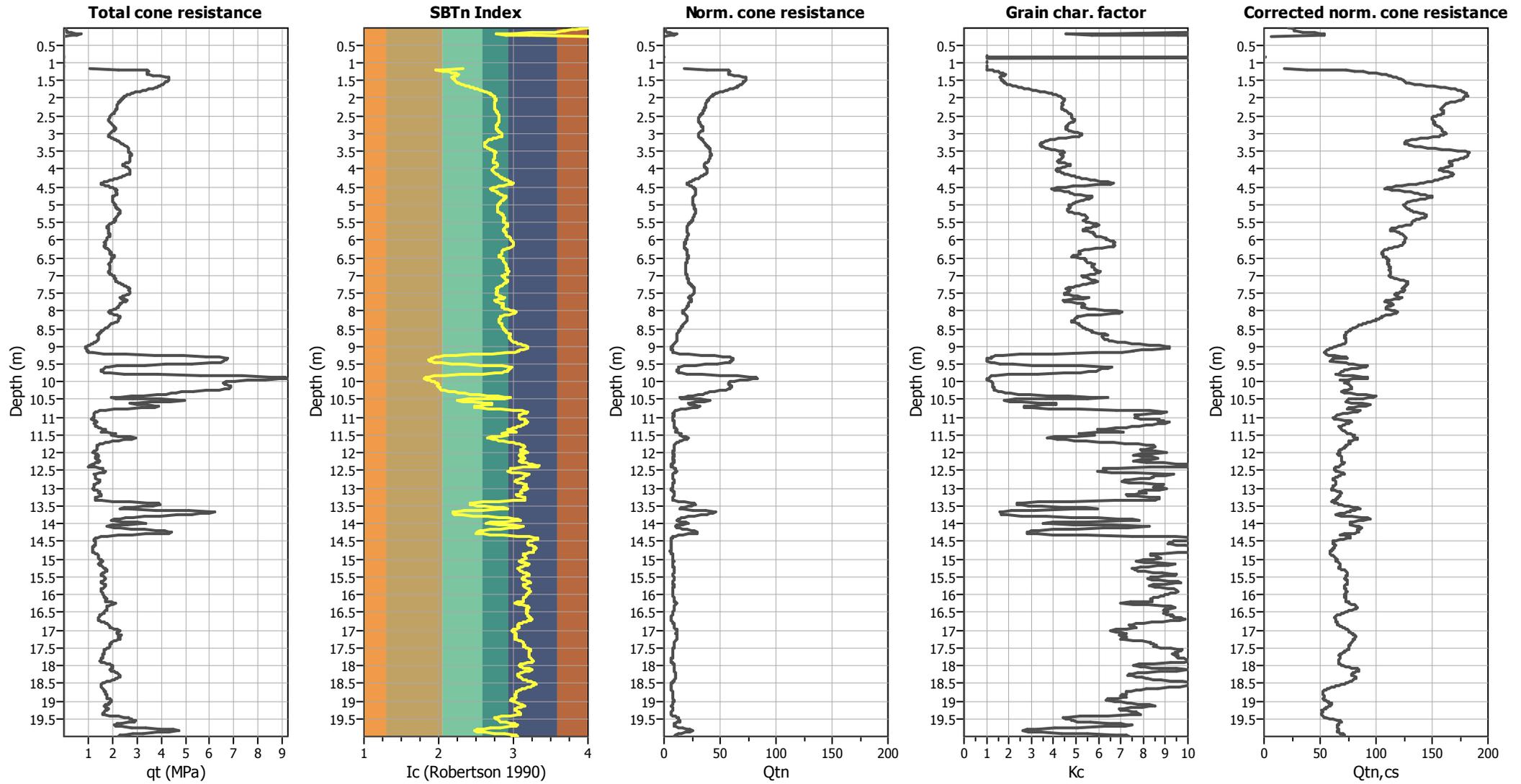
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_v applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

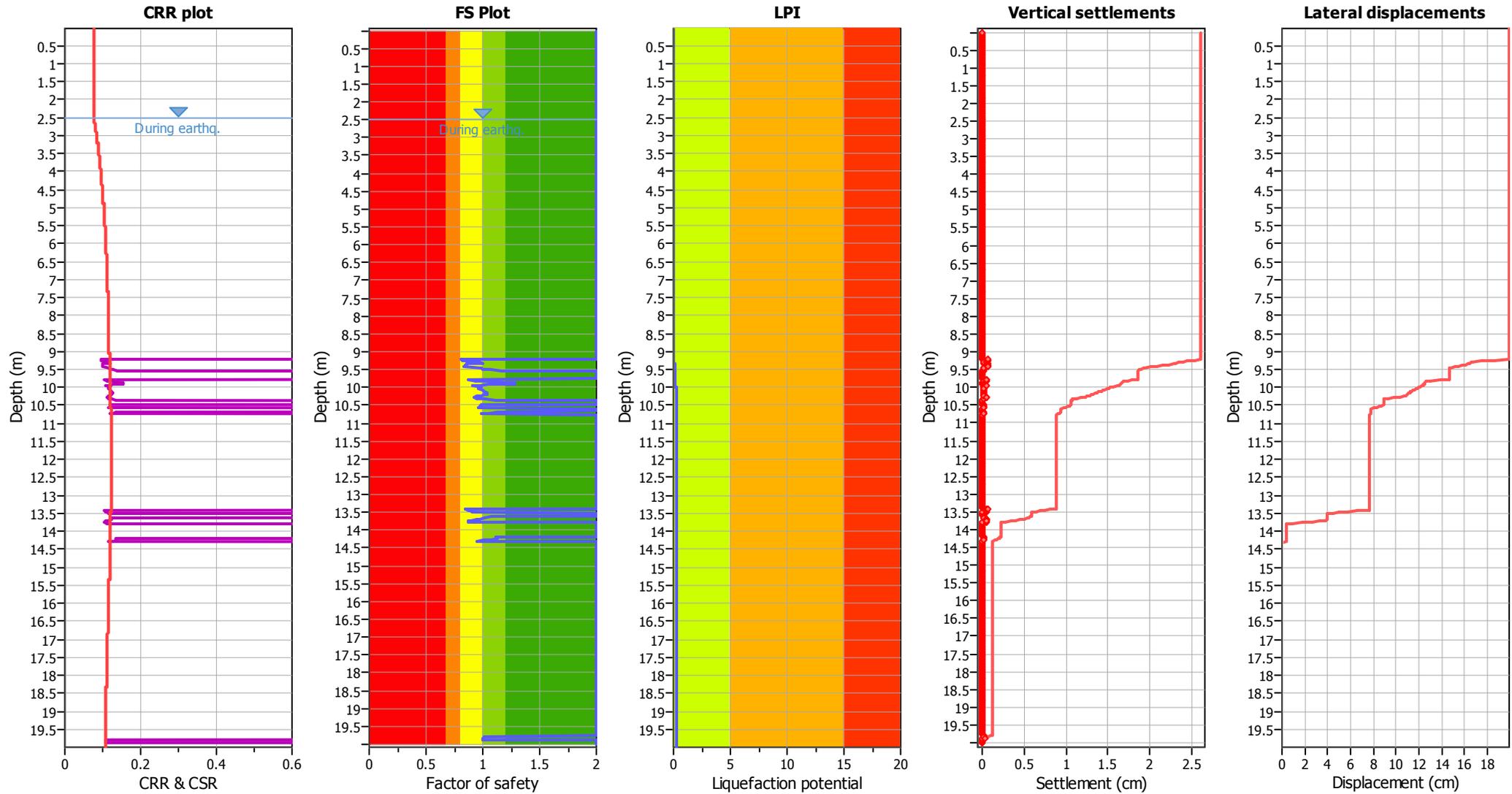
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_{cs} applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	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:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	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 REPORT

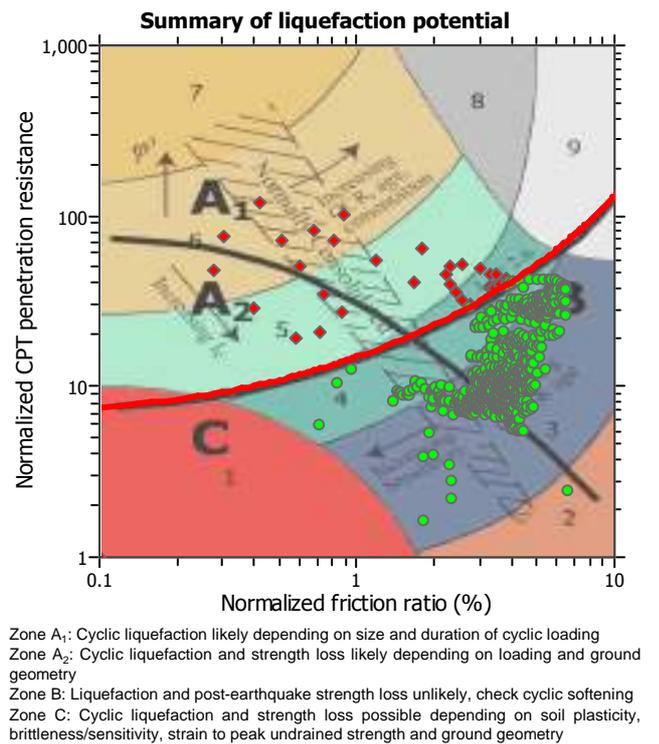
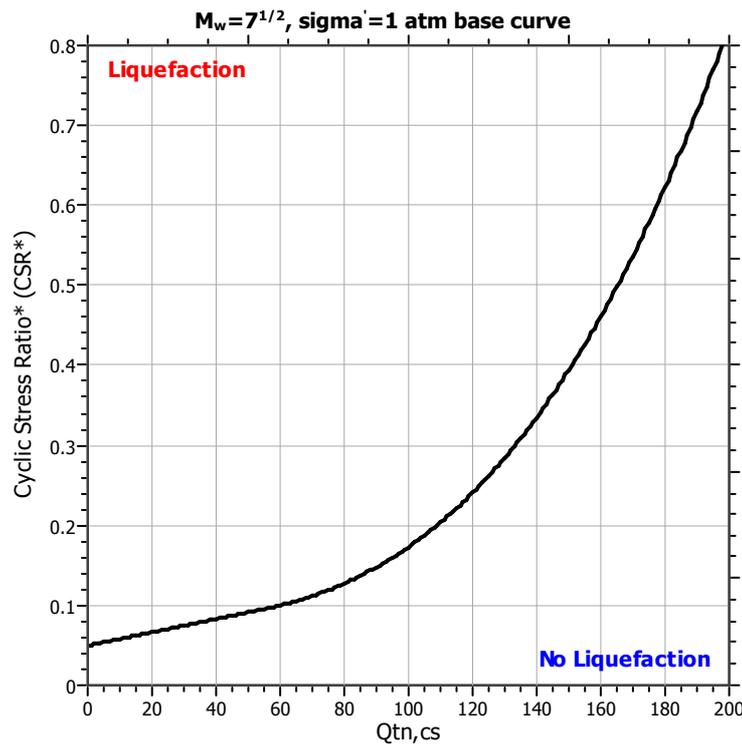
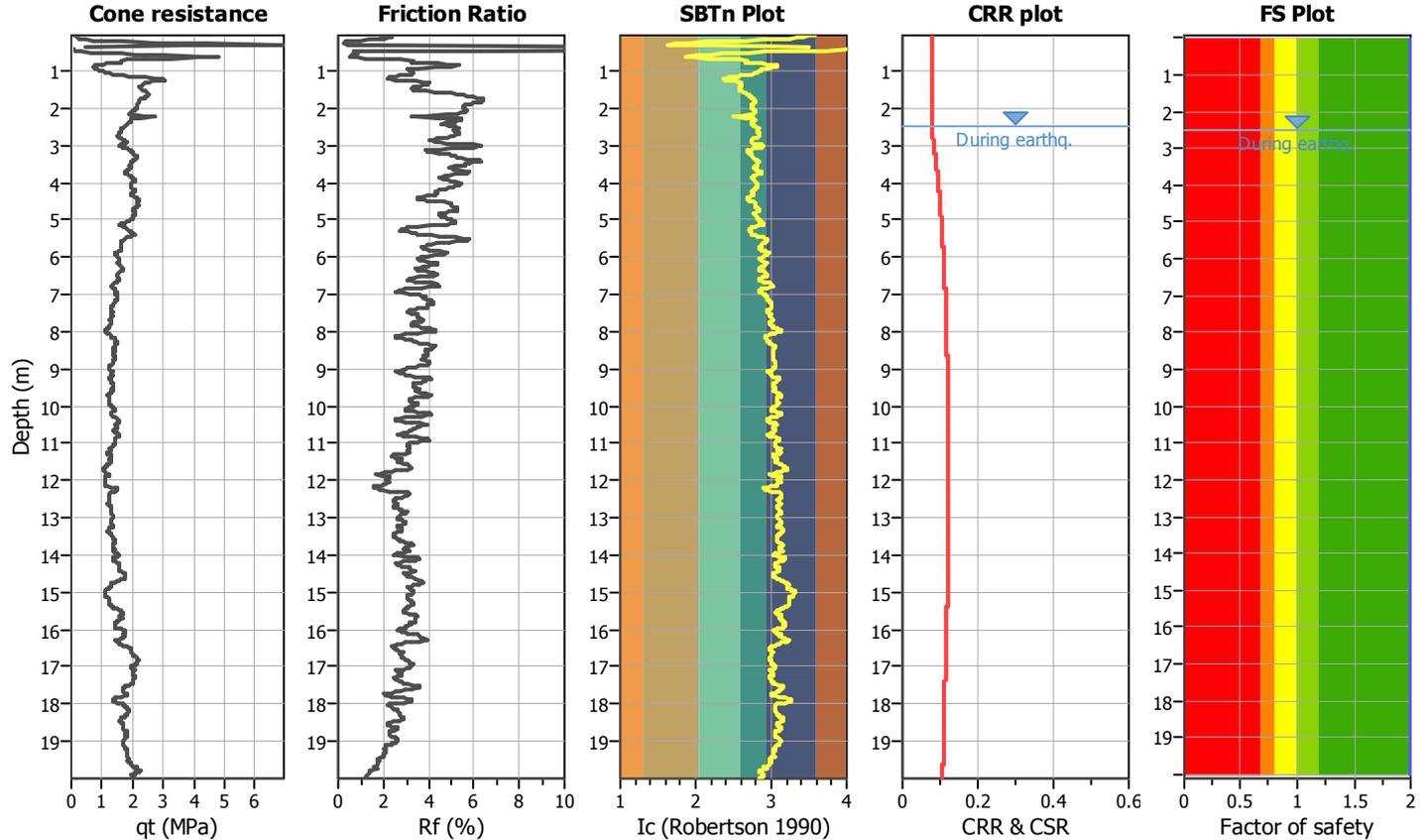
Project title : FORLIMPOPOLI

Location : EX AREA ORBAT

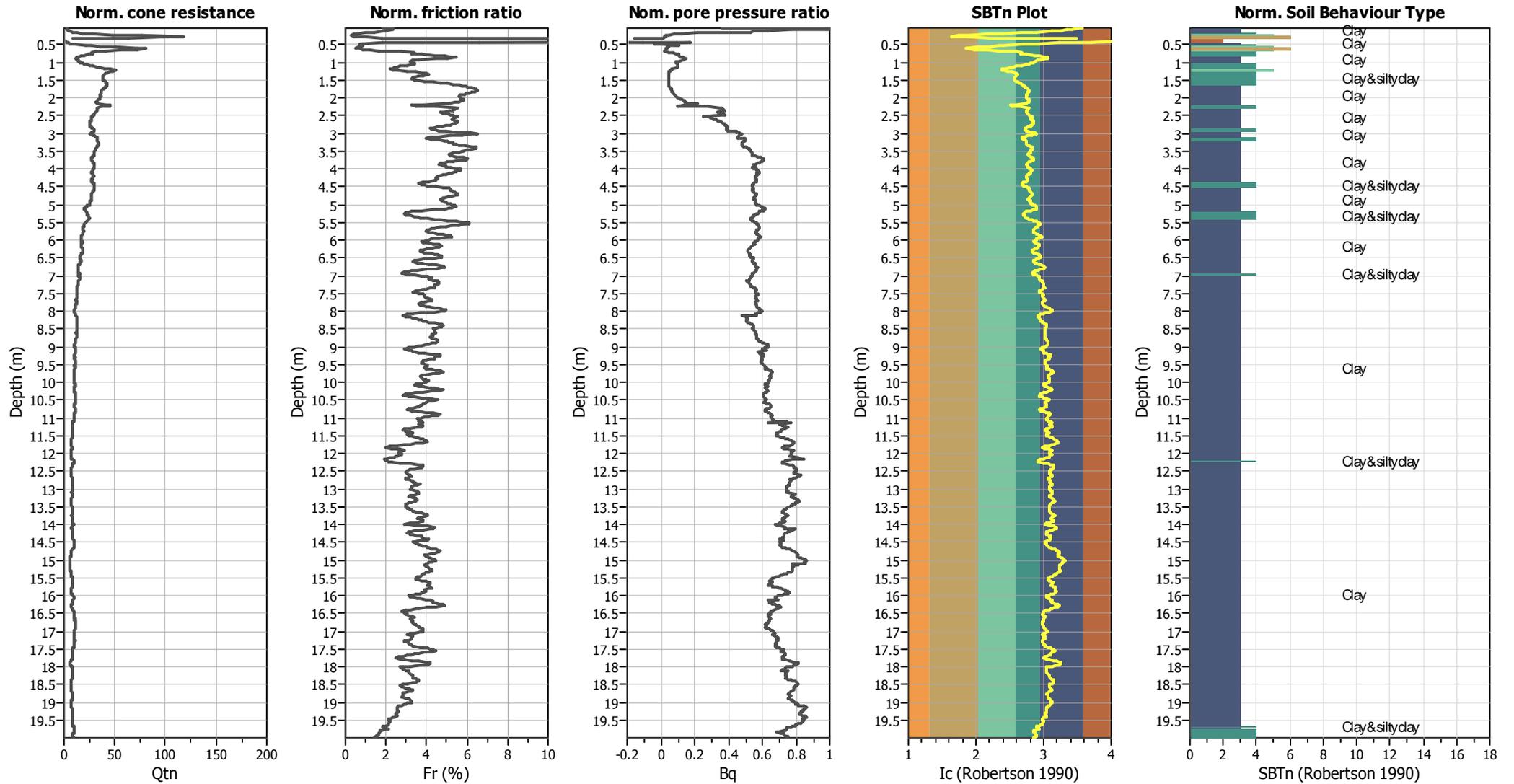
CPT file : CPT-03

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		



CPT basic interpretation plots (normalized)



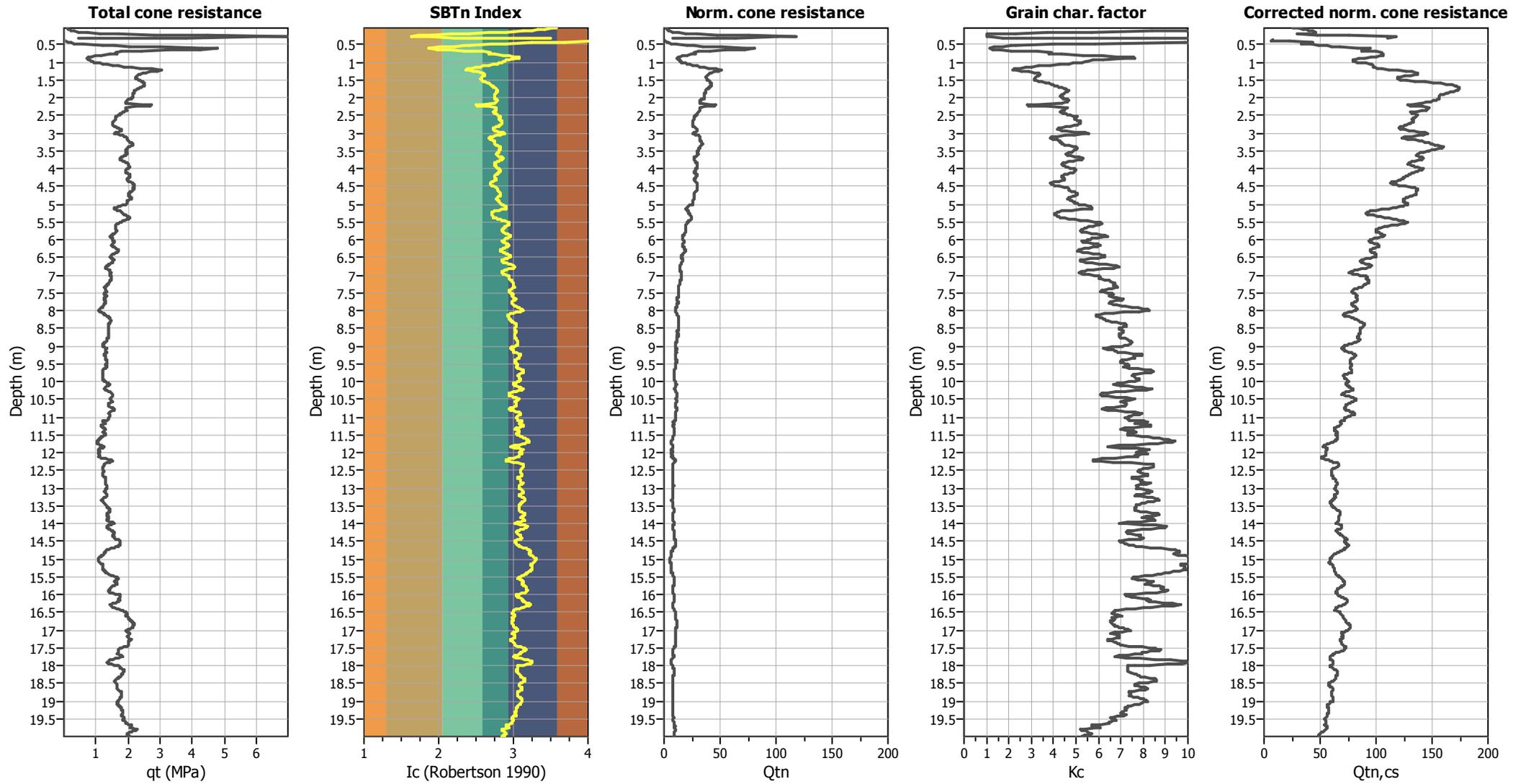
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_v applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBTn legend

1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained

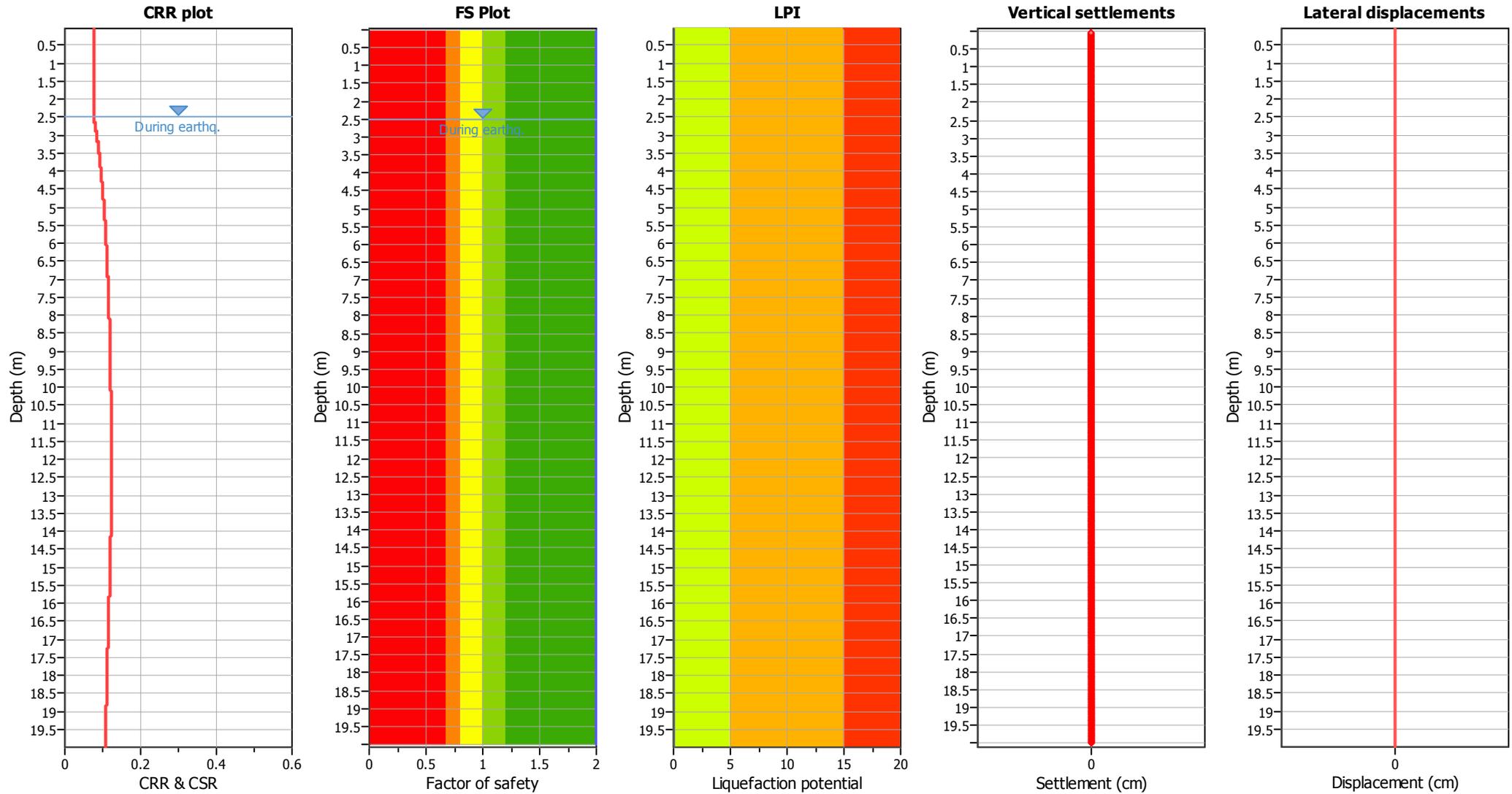
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_{cs} applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	3.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (earthq.):	2.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	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:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.20	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

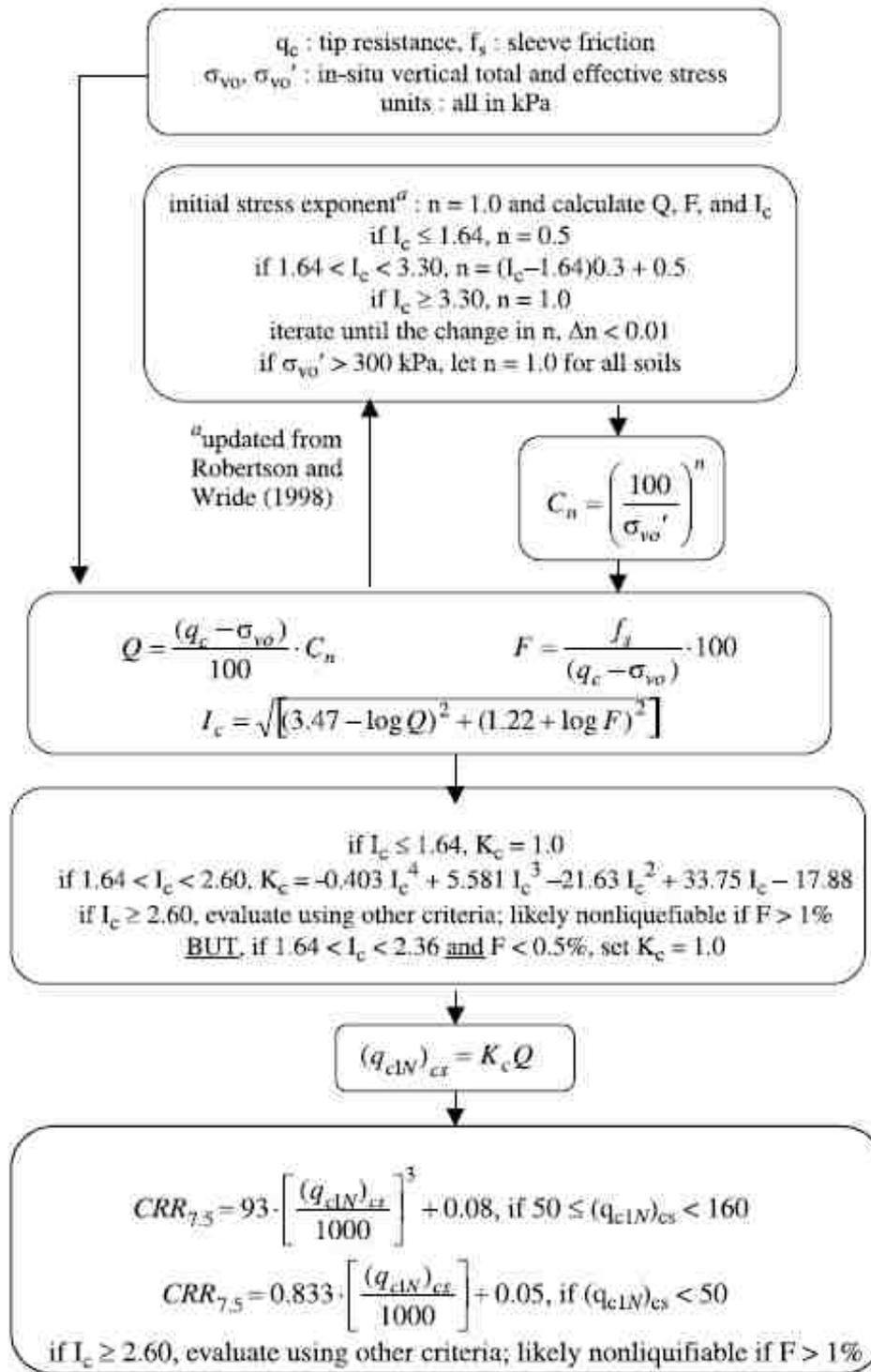
- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, NCEER (1998)

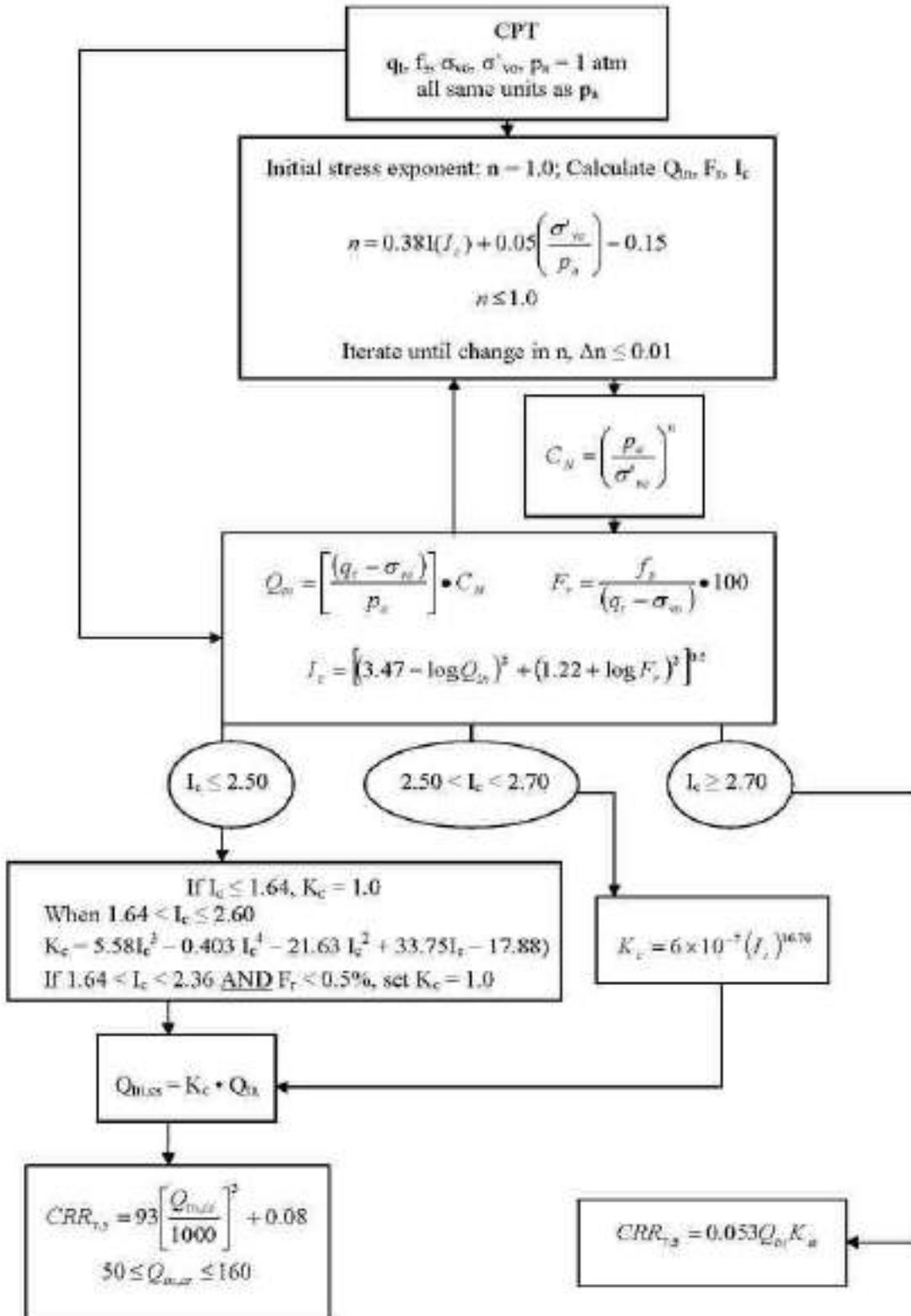
Calculation of soil resistance against liquefaction is performed according to the Robertson & Wride (1998) procedure. The procedure used in the software, slightly differs from the one originally published in NCEER-97-0022 (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils). The revised procedure is presented below in the form of a flowchart¹:



¹ "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman

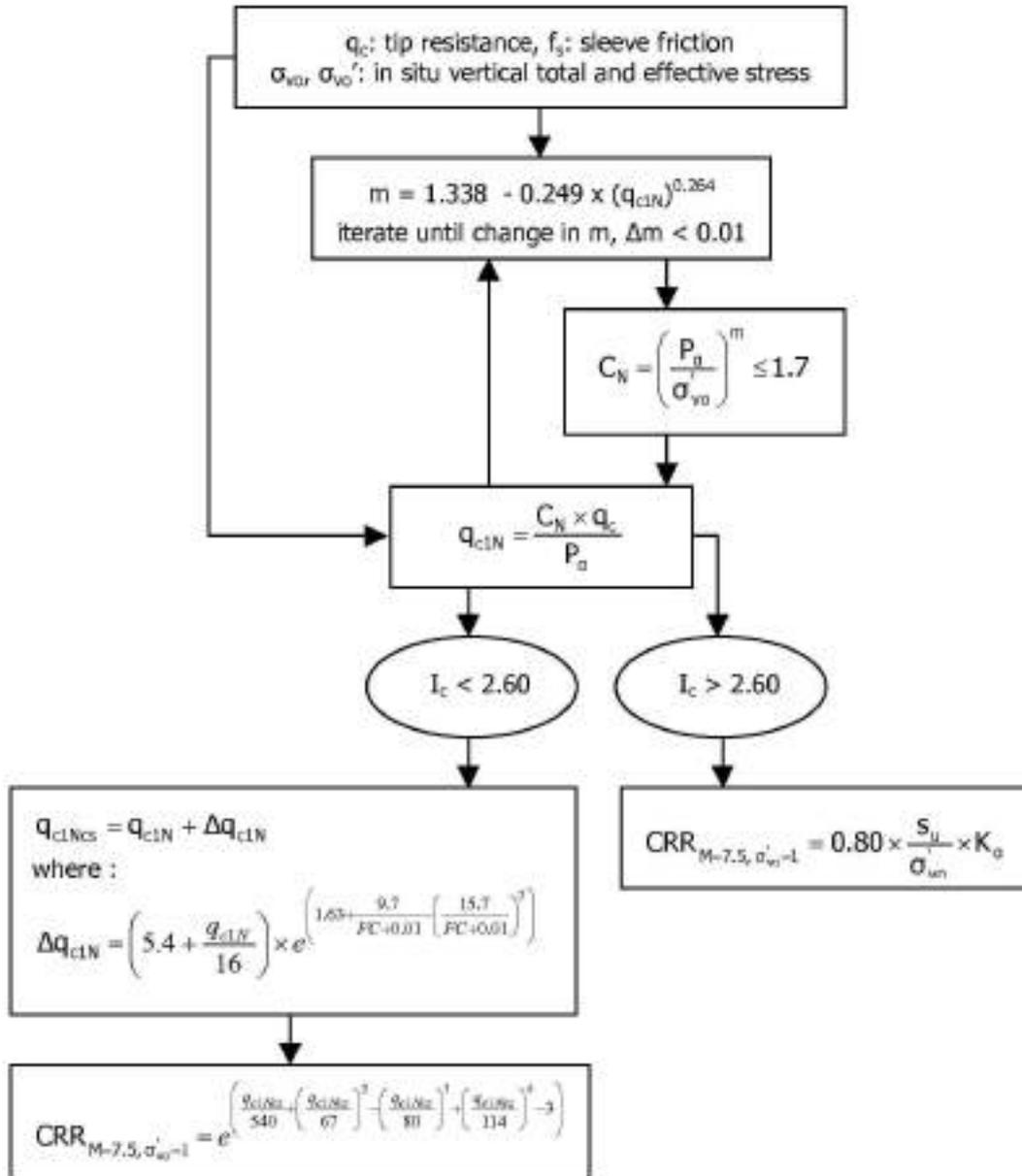
Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance (all soils), Robertson (2010)

Calculation of soil resistance against liquefaction is performed according to the Robertson & Wride (1998) procedure. This procedure used in the software, slightly differs from the one originally published in NCEER-97-0022 (Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils). The revised procedure is presented below in the form of a flowchart¹:



¹ P.K. Robertson, 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

Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, Idriss & Boulanger (2008)



Liquefaction Potential Index (LPI) calculation procedure

Calculation of the Liquefaction Potential Index (LPI) is used to interpret the liquefaction assessment calculations in terms of severity over depth. The calculation procedure is based on the methodology developed by Iwasaki (1982) and is adopted by AFPS.

To estimate the severity of liquefaction extent at a given site, LPI is calculated based on the following equation:

$$\text{LPI} = \int_0^{20} (10 - 0.5z) \times F_L \times dz$$

where:

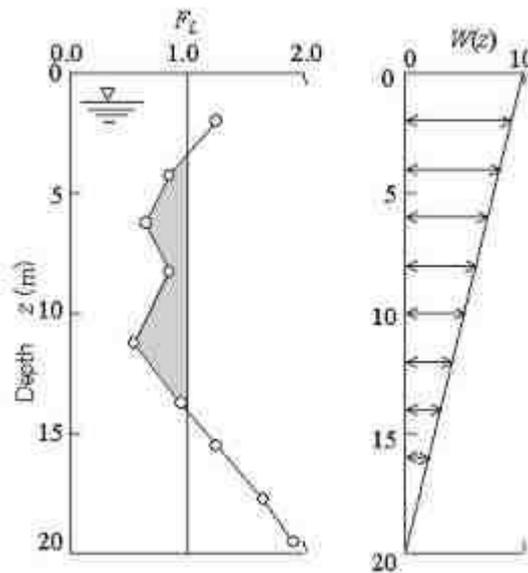
$F_L = 1 - \text{F.S.}$ when F.S. less than 1

$F_L = 0$ when F.S. greater than 1

z depth of measurement in meters

Values of LPI range between zero (0) when no test point is characterized as liquefiable and 100 when all points are characterized as susceptible to liquefaction. Iwasaki proposed four (4) discrete categories based on the numeric value of LPI:

- LPI = 0 : Liquefaction risk is very low
- $0 < \text{LPI} \leq 5$: Liquefaction risk is low
- $5 < \text{LPI} \leq 15$: Liquefaction risk is high
- LPI > 15 : Liquefaction risk is very high



Graphical presentation of the LPI calculation procedure

References

- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice, E & FN Spon Routledge, 352 p, ISBN 0-7514-0393-8.
- Boulanger, R.W. and Idriss, I. M., 2007. Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering June, Vol. 133, No. 6 pp 641-652
- Robertson, P.K. and Cabal, K.L., 2007, Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Available at no cost at <http://www.geologismiki.gr/>
- Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27 (1), 151-8.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., 1998. Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on the CPT Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, August.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H., Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2004, Estimating Liquefaction Induced Lateral Displacements using the SPT and CPT, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, 861-871
- Pradel, D., 1998, Procedure to Evaluate Earthquake-Induced Settlements in Dry Sandy Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 4, 364-368
- Iwasaki, T., 1986, Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 1, 2-70
- Papathanassiou G., 2008, LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence, Eng. Geol. 96:94–104
- P.K. Robertson, 2009, Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 11, pp 1337-1355
- P.K. Robertson, 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. and 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
- R. E. S. Moss, R. B. Seed, R. E. Kayen, J. P. Stewart, A. Der Kiureghian, K. O. Cetin, CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 8, August 1, 2006
- I. M. Idriss and R. W. Boulanger, Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute MNO-12