

Comune di Sant'Agata Bolognese

Città Metropolitana di Bologna

RELAZIONE GEOLOGICA inerente la caratterizzazione e modellazione geologica del sito (6.2.1. NTC 2018)

RELAZIONE GEOTECNICA relativa alle indagini, alla caratterizzazione e alla modellazione geotecnica a supporto della progettazione strutturale (6.2.2. NTC 2018) nonché relativa alla verifica delle opere di fondazione (6.4. NTC 2018)

ANALISI PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE relativa alla caratterizzazione geofisica del volume significativo di terreno (3.2.2 NTC 2018), valutazione dell'azione sismica di riferimento (3.2.3. NTC 2018), Risposta sismica locale e verifica della stabilità nei confronti della liquefazione (7.11.3. NTC 2018)



OGGETTO:

**Caratterizzazione geologica,
geotecnica e sismica del
comparto di attuazione privata
denominato Comparto LB63X**



Dott. Geol. Pierluigi Dallari
Agosto 2021
Rif. 781/21



GEO GROUP s.r.l.

Via C. Costa, 182 - 41123 MODENA

Tel. 059/3967169 Fax. 059/5960176

E-mail: info@geogroupmodena.it

P.IVA e C.F. 02981500362

www.geogroupmodena.it



**AZIENDA CON SISTEMA
DI GESTIONE QUALITÀ
CERTIFICATO DA DNV
= ISO 9001 =**

Relazione Tecnica

RELAZIONE GEOLOGICA

inerente la caratterizzazione e modellazione geologica del sito (6.2.1. NTC 2018)

RELAZIONE GEOTECNICA

Relativa alle indagini, alla caratterizzazione e alla modellazione geotecnica a supporto della progettazione strutturale (6.2.2. NTC 2018) nonché relativa alla verifica delle opere di fondazione (6.4. NTC 2018)

ANALISI PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

Relativa alla caratterizzazione geofisica del volume significativo di terreno (3.2.2 NTC 2018), valutazione dell'azione sismica di riferimento (3.2.3. NTC 2018), Risposta sismica locale e verifica della stabilità nei confronti della liquefazione (7.11.3. NTC 2018)

Oggetto:

Caratterizzazione geologica, geotecnica e sismica del comparto di
attuazione privata denominato Comparto LB63X

LOCALITÀ

Sant'Agata Bolognese
Via Ferruccio Lamborghini
Comune di Sant'Agata Bolognese(BO)

COMMITTENTE

Studio Tecnico

Rif.721/21

Sommario

1. Premesse	1
2. Inquadramento Geologico e Geomorfologico.....	2
2.1. Elementi di geologia e geomorfologia.....	2
2.2. Elementi di Inquadramento Sismico	5
3. Indagini Geognostiche	7
3.1. Indagini Geotecniche	7
3.1.1. Strumentazione Impiegata.....	8
3.1.2. Risultati delle indagini eseguite	10
3.2. Indagini Geofisiche	16
3.2.1. Indagini in sismica passiva a stazione singola – HVSR	17
3.2.2. Indagine Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW	21
4. Caratterizzazione Sismica del Sito.....	24
4.1. Pericolosità sismica di base.....	24
4.2. Categoria del sottosuolo	26
4.3. Azione sismica e risposta sismica del sito – Risposta Sismica Locale	27
5. Modellazione Geologica e Geotecnica del Sito.....	36
5.1. Modello geotecnico del sottosuolo.....	36
5.2. Stabilità nei confronti della liquefazione.....	42
5.3. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 476/2021)	45
6. Considerazioni Conclusive	46

Tavole

Tavola 1:	Carta Corografica	Scala 1:25'000
Tavola 2:	Carta Topografica	Scala 1:5'000
Tavola 3:	Carta delle Indagini	Scala 1:2'000

Allegati

Allegato 1:	Prove Penetrometriche
Allegato 2:	Indagini Sismiche
Allegato 3:	Verifica alla Liquefazione

1. PREMESSE

Nel mese di agosto 2021 è stato eseguito il presente studio geologico, geotecnico e sismico inerente alla caratterizzazione geologica geotecnica e sismica a del comparto di attuazione privata, sito in Via Ferruccio Lamborghini a Sant'Agata Bolognese (BO).

Di seguito si propone uno stralcio della Sezione C.T.R. 2002100 della Regione Emilia Romagna con ortofoto C.G.R. in sovrapposizione e l'ubicazione dell'area di studio.



Figura 1: ubicazione dell'area di studio.

Di seguito si riportano le coordinate del sito in esame.

SITO IN ESAME		
COORDINATE GEOGRAFICHE WGS 84		
LATITUDINE	LONGITUDINE	LOCALITÀ
44.657177	11.117455	Via Ferruccio Lamborghini

La presente relazione fa riferimento alle disposizioni normative contenute in:

- Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 – D.M. 17/01/2018;
- DGR 476/2021.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

2.1. Elementi di geologia e geomorfologia

Il sito di studio è all'interno della Pianura Padana e la morfologia è pianeggiante con un'altitudine media di circa 22 metri sul livello del mare.

Da un punto di vista geologico le litologie risultano messe in posto da una dinamica deposizionale legata ad un ambiente di piana alluvionale. Si osservano, infatti, alternanze di argille e limi con sporadici impulsi sabbiosi almeno nei primi 30 metri dal piano campagna.

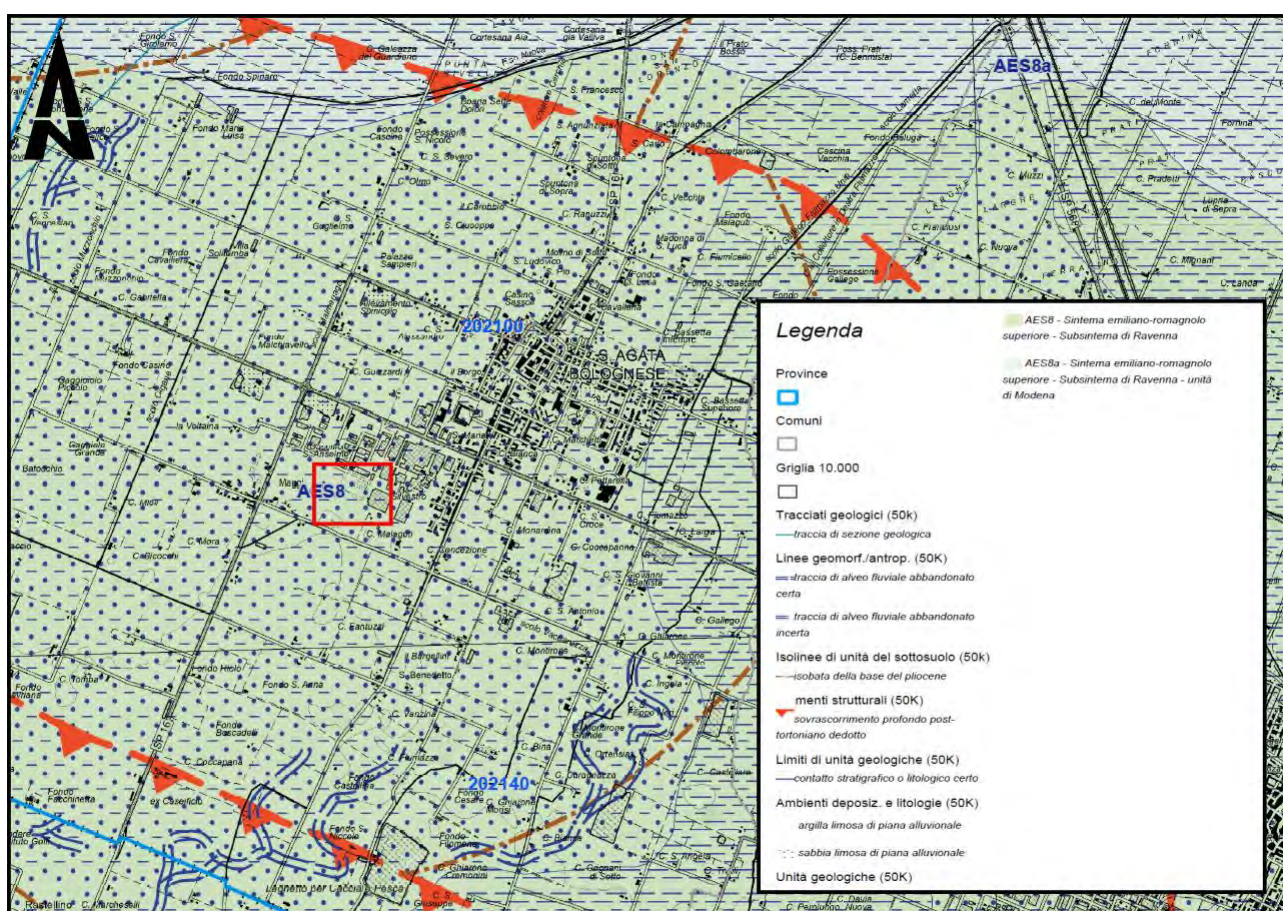


Figura 2: stralcio della Carta Regionale alla scala 1:25000 dell'area d'interesse.

Da un punto di vista strutturale, dalla Carta Geologica Regionale, si rileva la presenza di due sovrascorrimenti presunti, uno Nord e uno a Sud dell'abitato di Sant'Agata Bolognese.

Sempre dalla Carta geologica della Regione Emilia Romagna si evince la presenza di tracce di paleo – alvei presunti e certi.

Di seguito si riporta uno stralcio della Carta Geologica della Regione Emilia Romagna alla scala 1:5000.



Figura 3: stralcio della Carta Regionale alla scala 1:25000 dell'area d'interesse.

Di seguito si riporta la descrizione delle litologie affioranti nell'area.

AES - SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE

Unità alluvionale costituita da sedimenti grossolani e fini, talora intensamente pedogenizzati, con alla base una superficie di discontinuità nel margine appenninico e nell 'alta pianura, passante a una superficie di continuità nel sottosuolo della pianura, su AEI. Sintema parzialmente suddiviso in subsintemi limitati, in affioramento, da scarpate di terrazzo fluviale e paleosuoli e nel sottosuolo della pianura da bruschi contatti fra depositi fini alluvionali e palustri su depositi grossolani di conoide e di piana alluvionale.

Pleistocene medio?-Olocene

AES8 – Subintesa di Ravenna

Ghiaie e ghiaie sabbiose, passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali. Limi prevalenti nelle fasce pedecollinari di interconoide. A tetto suoli a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente fino a 150 cm e parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallo-bruno. Contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. Potenza fino a oltre 25 m.

Olocene (età radiometrica della base: 11.000 - 8.000 anni).

AES8a - Unità ' di Modena

Depositi ghiaiosi passanti a sabbie e limi di terrazzo alluvionale. Limi prevalenti nelle fasce pedecollinari di interconoide. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo, rigio-giallastro o bruno grigiastro. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m).

Post-VI secolo d.C.

Al fine di fornire un quadro esaustivo delle litologie presenti nell'area è stata consultata anche la Carta Geologico Tecnica allegata al Piano di Microzonazione Sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese, di cui si allega nel seguito uno stralcio.

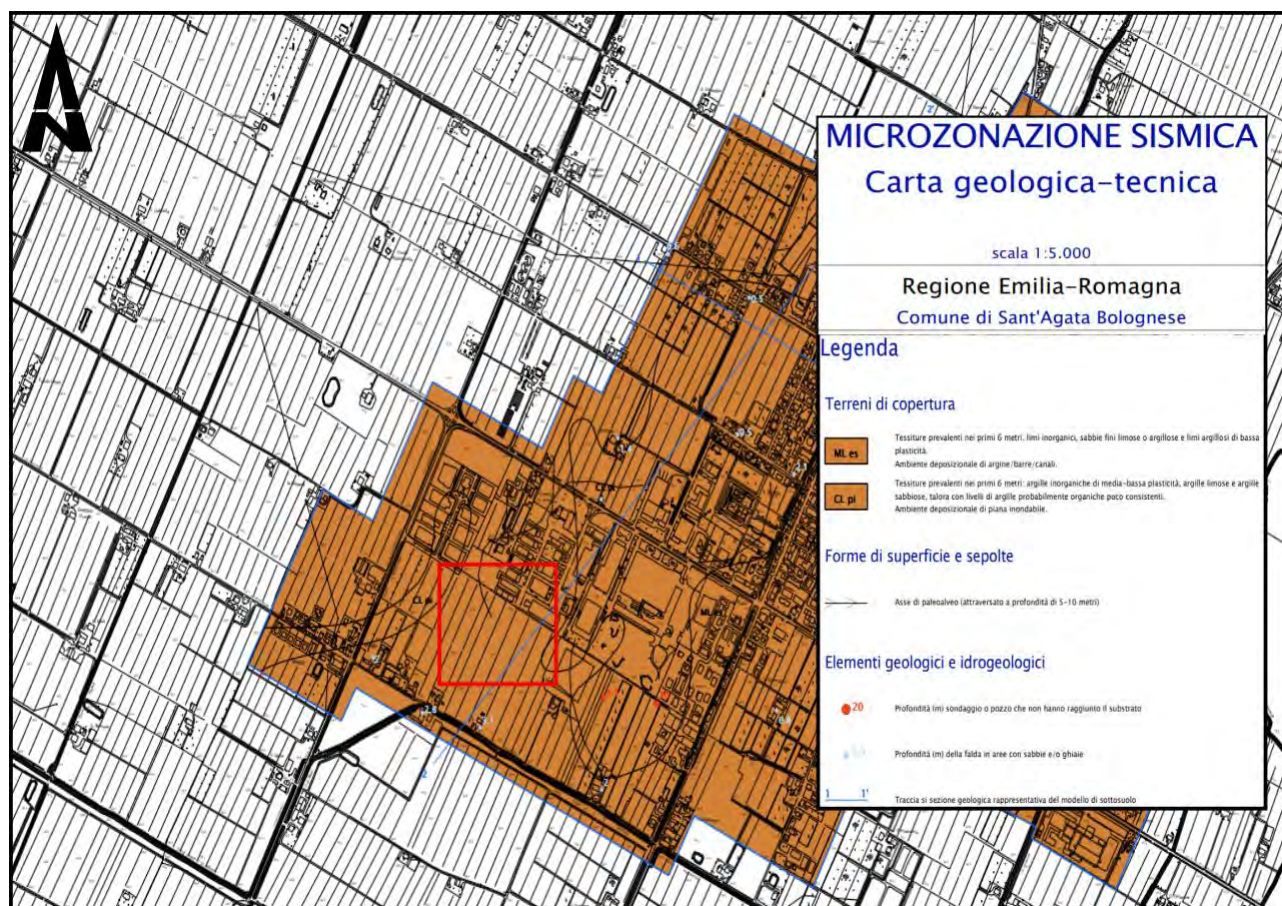


Figura 4: stralcio della Carta Geologico Tecnica del Comune di Sant'Agata Bolognese.

La Carta Geologico Tecnica del Comune di Sant'Agata Bolognese riporta per l'area in esame quanto segue:

- **CL pi:** tessiture prevalenti nei primi 6 metri: argille inorganiche di media – bassa plasticità, argille limose e argille sabbiose, talora con livelli di argille probabilmente organiche poco consistenti. Ambiente deposizionale di piana inondabile.

2.2. Elementi di Inquadramento Sismico

A supporto dell'analisi sismica e della valutazione della stabilità del sito, successivamente descritta nei paragrafi seguenti, per quel che concerne i fenomeni co-sismici è stata preliminarmente consultata la cartografia relativa allo studio di Microzonazione Sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese (BO).

Di seguito si riporta uno stralcio della Carta delle Velocità allegata al Piano di Microzonazione Sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese.

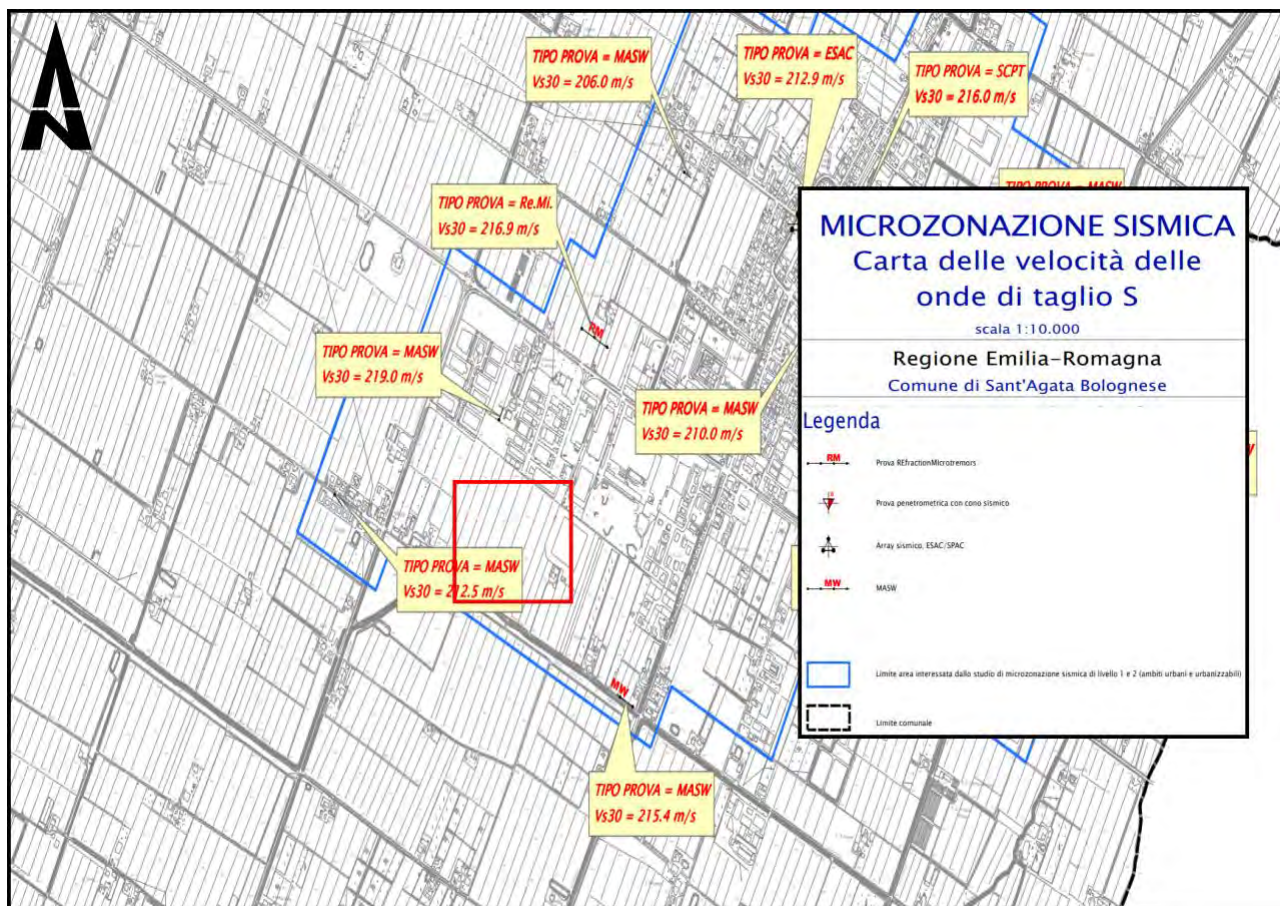


Figura 5: stralcio della Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni, MOPS Sant'Agata Bolognese.

Dalla Carta delle Velocità delle Onde di Taglio di cui in figura 5 emerge che per l'area in esame i valori di velocità delle onde S nei primi 30 metri sono compresi tra $210.00 < Vs_{30} [m/s] < 219$.

Dalla consultazione della Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni si rileva che per l'area di studio la frequenza fondamentale è generalmente inferiore a $f_0 < 1$.

In relazione alla consultazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica si, di cui un estratto è riportato nel seguito in figura 6, si nota come l'area in esame ricada in zona di attenzione per instabilità da liquefazione e nel seguito sarà meglio definito l'argomento.

Al fine di derivare la pericolosità sismica locale si riporta nel paragrafo §4.3 l'analisi di III livello dello studio di risposta sismica locale.

Di seguito si riporta uno stralcio della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

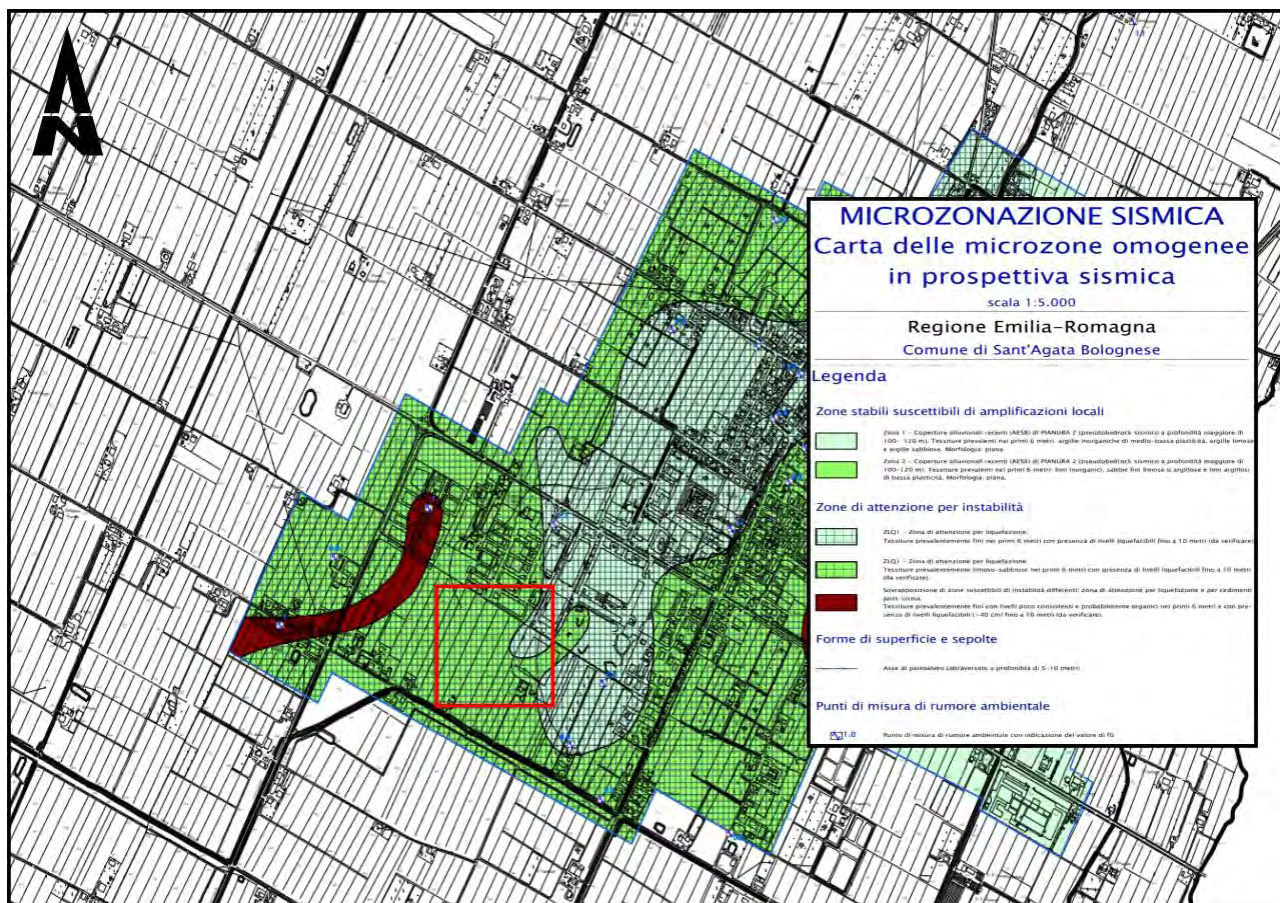


Figura 6: stralcio della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese.

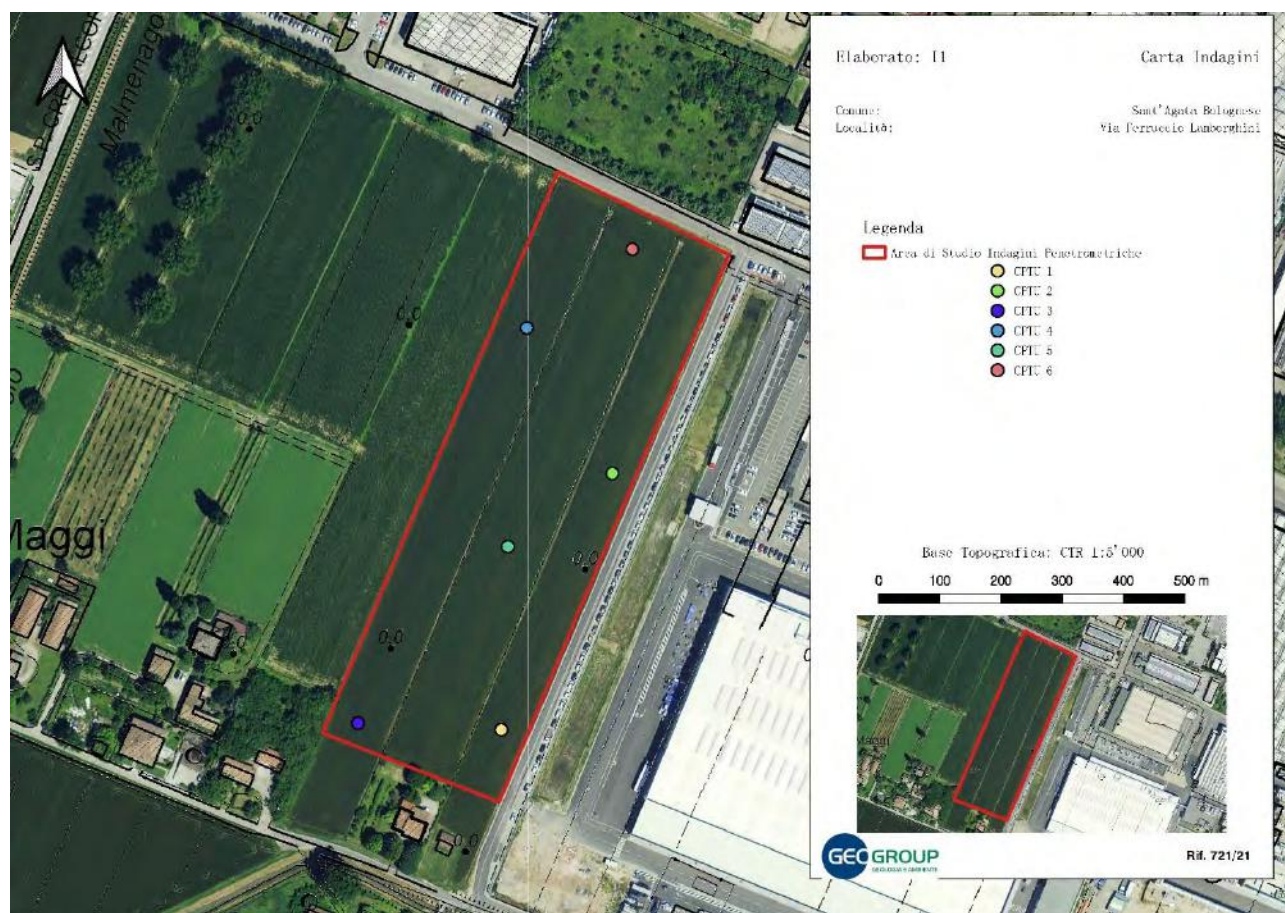
3. INDAGINI GEOGNOSTICHE

3.1. Indagini Geotecniche

In relazione alla litologia presente nell'area e in base alla tipologia di intervento in progetto, sono state eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- n. 6 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU;

La seguente tavola riporta l'ubicazione delle indagini geotecniche eseguite.



La seguente tabella riporta le profondità raggiunte da ciascuna prova.

Prova	Latitudine	Longitudine	Profondità	Falda
CPTU 1	4946952.218	667863.260	20.31 m da p.c.	2.50 m da p.c.
CPTU 2	4947078.060	667917.105	20.27 m da p.c.	2.50 m da p.c.
CPTU 3	4946955.295	667792.186	30.00 m da p.c.	2.50 m da p.c.
CPTU 4	4947149.134	667874.952	30.00 m da p.c.	2.50 m da p.c.
CPTU 5	4947041.446	667866.030	23.23 m da p.c.	2.50 m da p.c.
CPTU 6	4947187.902	667926.951	30.00 m da p.c.	2.50 m da p.c.

3.1.1. Strumentazione Impiegata

Il penetrometro utilizzato per realizzare le prove statiche è un Gouda da 200 kN di spinta, montato su IVECO Trakker.

La prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPTe/U), consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica standard, connessa all'estremità inferiore di una batteria di aste cave, che viene infissa a pressione e velocità costante nel terreno tramite un dispositivo di spinta idraulico che agisce alla sommità delle aste.



La punta elettrica è strumentata con sensori elettrici e un sistema di trasmissione dei dati in superficie via cavo, che permette l'acquisizione e la registrazione dei dati quasi in continuo, ogni centimetro. I dati misurati durante la prova sono la resistenza totale alla penetrazione Q_t , la resistenza alla penetrazione della punta Q_c e la resistenza laterale del manicotto F_s ; è possibile inoltre monitorare, durante l'esecuzione della prova, alcuni parametri di controllo quali l'inclinazione rispetto alla verticalità e la velocità di penetrazione del cono.

Una punta elettrica particolare, detta "piezocono", è dotata anche di un dispositivo di misura della pressione, attraverso il quale viene misurata la pressione dell'acqua nei pori del terreno u (CPTU). La pressione che viene misurata è la pressione $u = u_0 + \Delta u$, dove u_0 è la pressione dovuta al livello idrostatico e Δu quella generata dallo sforzo alla penetrazione nel terreno.

Il piezocono utilizzato è un Pagani, con sistema di acquisizione TGAS07 ed è dotato di un dispositivo di misura della pressione costituito da un cilindro metallico saturato con grasso, situato poco al di sopra della punta conica. Si riportano, di seguito, la composizione dell'attrezzatura di prova e le caratteristiche del piezocono.

Caratteristiche del Piezocono			
Canali di misura:		Dimensioni:	
Resistenza di punta (q_c):	10; 50; 100 MPa	Angolo di apertura cono:	60°
Attrito laterale (f_s):	0,5 MPa	Diametro:	36 mm
Pressione nei pori (U):	2,5 MPa	Sezione di spinta:	10 cm ²
Inclinazione:	0 - 40°	Superficie laterale:	150 cm ²
		Peso:	2,1 kg
		Lunghezza:	413 mm

Le prove sono state elaborate mediante il software CPeT – IT v. 1.7.4.13 prodotto da GeoLogisMiki – Geotechnical Software. I report, in cui sono riportati su grafici i dati di resistenza e pressione interstiziale misurati ed illustrata l'interpretazione litostratigrafica e geotecnica della prova, sono riportati in **Allegato n.1**. La caratterizzazione litostratigrafica del terreno è stata effettuata in funzione delle carte proposte da Robertson, in cui il tipo di comportamento del terreno è definito da tre parametri: qt, resistenza alla punta corretta, Rf, Bq, nella prima carta (1986) e con i parametri normalizzati nella seconda (1990).

Di seguito si riporta una tabella delle correlazioni utilizzate per la definizione dei terreni attraversati e dei parametri degli stessi.

:: Unit Weight, g (kN/m³) :: $g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_s}\right) + 1.236 \right)$ where g_w = water unit weight :: Permeability, k (m/s) :: $I_c < 3.27$ and $I_c > 1.00$ then $k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$ $I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ then $k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$:: N_{SPR} (blows per 30 cm) :: $N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_s} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$:: Young's Modulus, E_s (MPa) :: $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ (applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$) :: Relative Density, D_r (%) :: $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c_cutoff}\text{)}$:: State Parameter, ψ :: $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$:: Peak drained friction angle, ϕ (°) :: $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ (applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8) :: 1-D constrained modulus, M (MPa) :: If $I_c > 2.20$ $a = 14$ for $Q_{tn} > 14$ $a = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$ $M_{CPT} = a \cdot (q_t - \sigma_v)$ If $I_c \leq 2.20$ $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$	:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) :: $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) :: $V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) :: $N_{lt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$ $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{lt}}$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) :: $S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 1, 2, 3, 4 and 9 or } I_c > I_{c_cutoff}\text{)}$:: Overconsolidation Ratio, OCR :: $k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: In situ Stress Ratio, K_0 :: $K_0 = 0.1 \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_{vo}} \right)$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: Soil Sensitivity, S_t :: $S_t = \frac{N_s}{F_r}$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$) :: Effective Stress Friction Angle, ϕ' (°) :: $\phi' = 29.5^\circ \cdot B_q^{0.121} \cdot (0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t)$ (applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)
---	---

3.1.2. Risultati delle indagini eseguite

Prova Penetrometrica CPTu 1

Dalla prova penetrometrica CPTu 1 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 1		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.50 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	-2.50 m da p.c.
1.50 – 7.65 m da p.c.	Argille Limose	
7.65 – 8.50 m da p.c.	Sabbie e Sabbie Limose	
8.50 – 20.31 m da p.c.	Argille e Argille debolmente Limose	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.

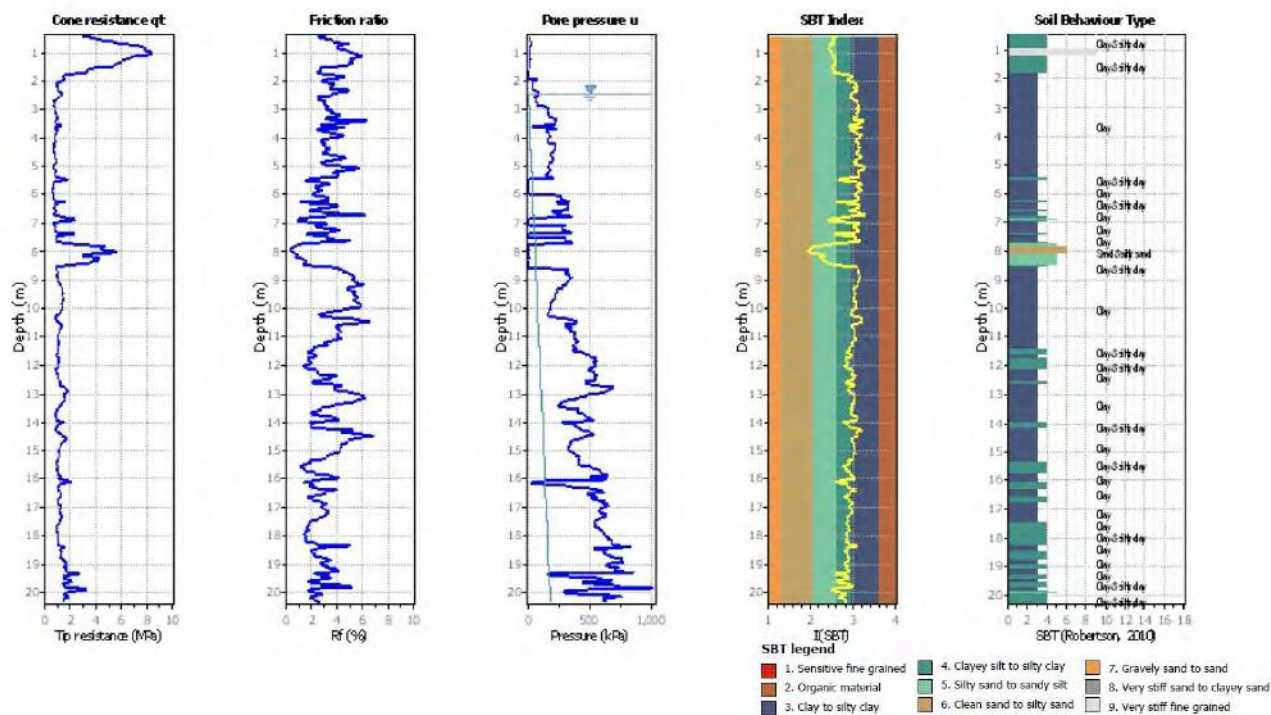


Figura 7: grafico della prova CPTu 1 derivante dal software di elaborazione CPTe - IT.

Prova Penetrometrica CPTu 2

Dalla prova penetrometrica CPTu 2 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 2		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.50 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	-2.50 m da p.c.
1.50 – 3.80 m da p.c.	Argille Limose e Limi Argillosi	
7.65 – 8.50 m da p.c.	Argille	
8.50 – 20.27 m da p.c.	Argille e Argille Limose	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.

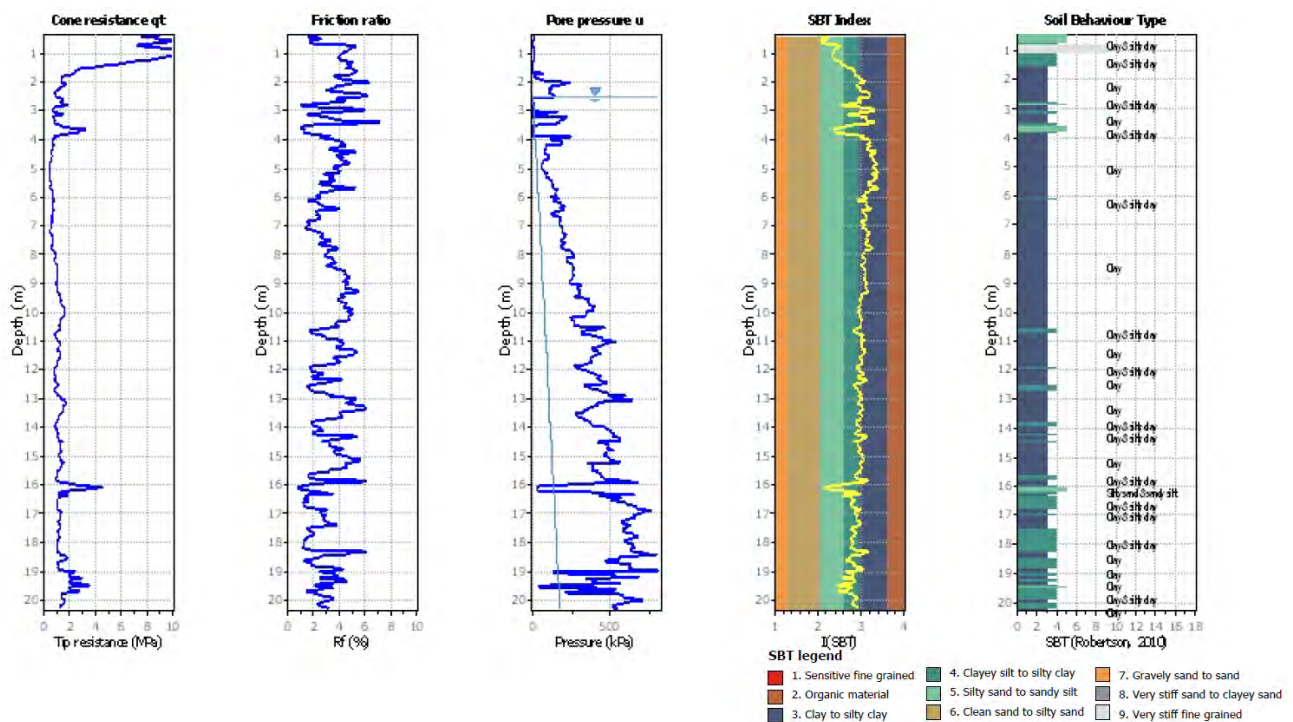


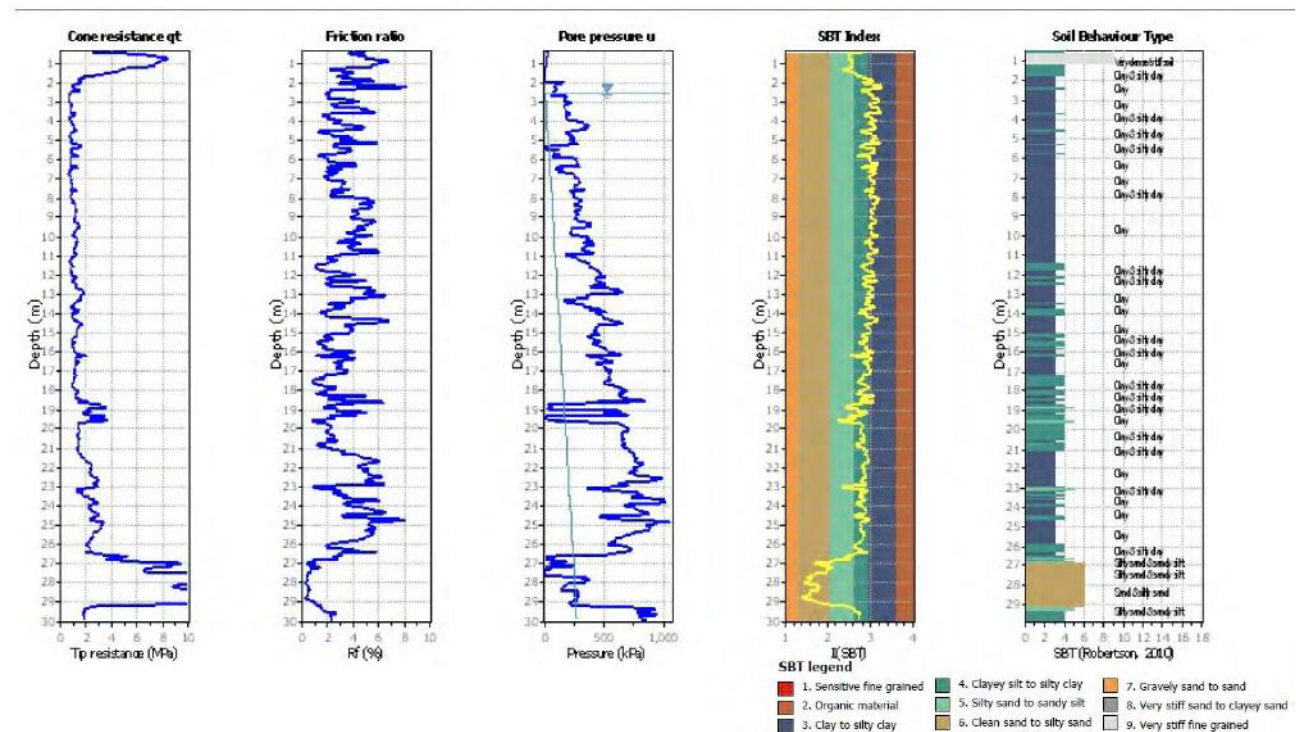
Figura 8: grafico della prova CPTu 2 derivante dal software di elaborazione CPTe - IT

Prova Penetrometrica CPTu 3

Dalla prova penetrometrica CPTu 3 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 3		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.50 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	
1.50 – 6.50 m da p.c.	Argille	-2.50 m da p.c.
6.50 – 18.40 m da p.c.	Argille debolmente limose	
18.40 – 26.85 m da p.c.	Argille e Argille Limose	
26.85 – 29.20 m da p.c.	Limi Sabbiosi e Sabbie Limose	
29.20 – 30.00 m da p.c.	Argilla Inorganica	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.

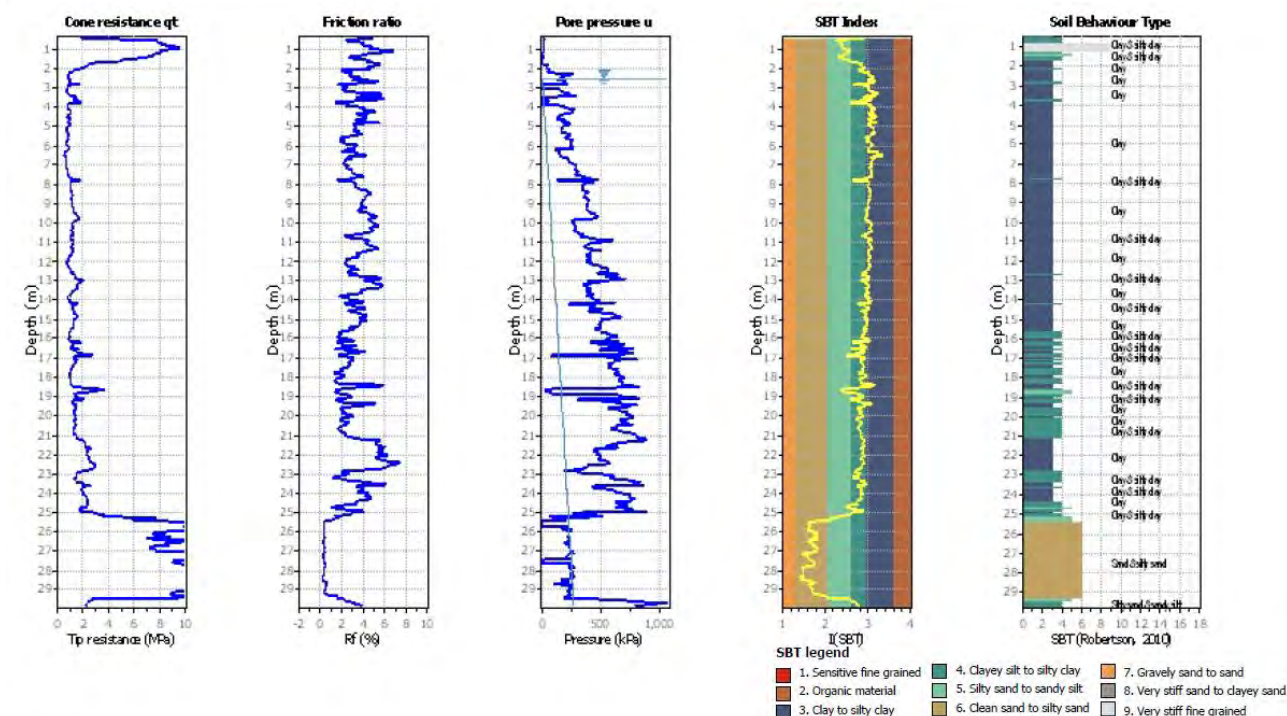


Prova Penetrometrica CPTu 4

Dalla prova penetrometrica CPTu 4 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 4		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.70 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	-2.50 m da p.c.
1.70 – 7.50 m da p.c.	Argille	
7.50 – 18.30 m da p.c.	Argille debolmente limose	
18.30 – 25.25 m da p.c.	Argille e Argille Limose	
25.25 – 29.80 m da p.c.	Sabbia e Sabbia Limosa	
29.20 – 30.00 m da p.c.	Argilla Inorganica	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.

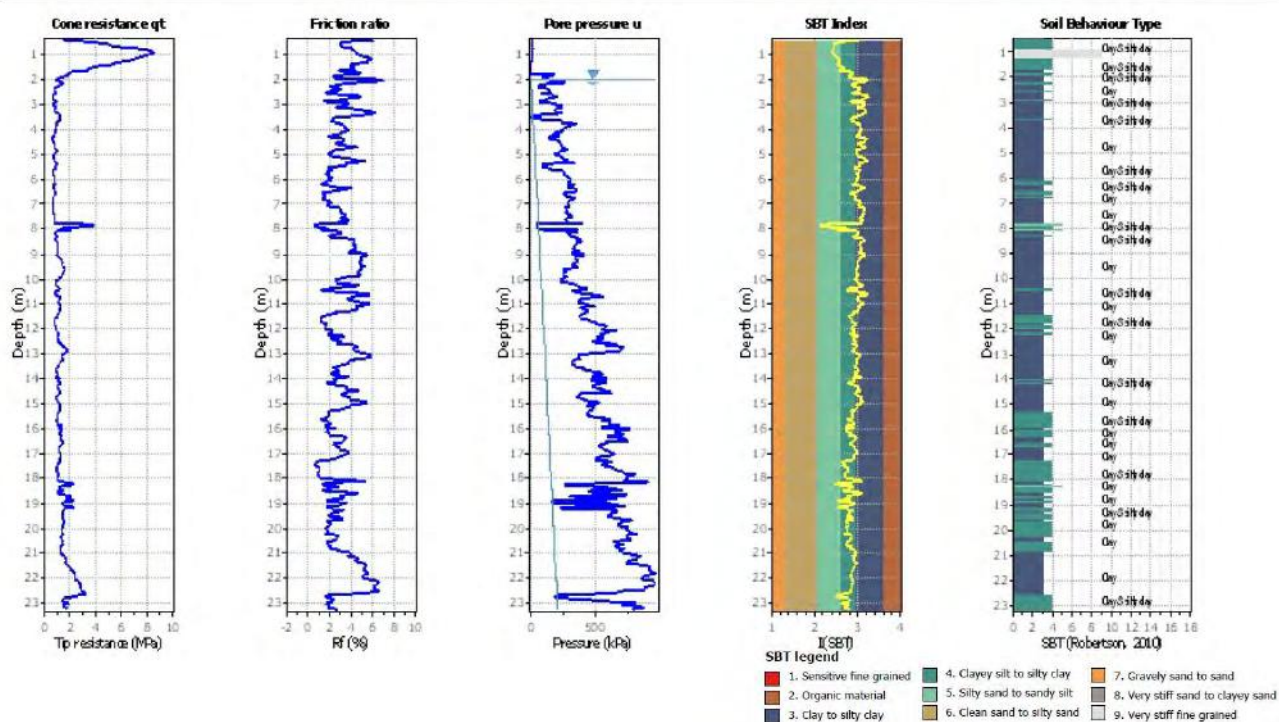


Prova Penetrometrica CPTu 5

Dalla prova penetrometrica CPTu 5 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 5		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.50 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	-2.00 m da p.c.
1.50 – 8.10 m da p.c.	Argille e Argille Limose	
8.10 – 21.00 m da p.c.	Argille	
21.00 – 23.30 m da p.c.	Argille Debolmente Limose	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.

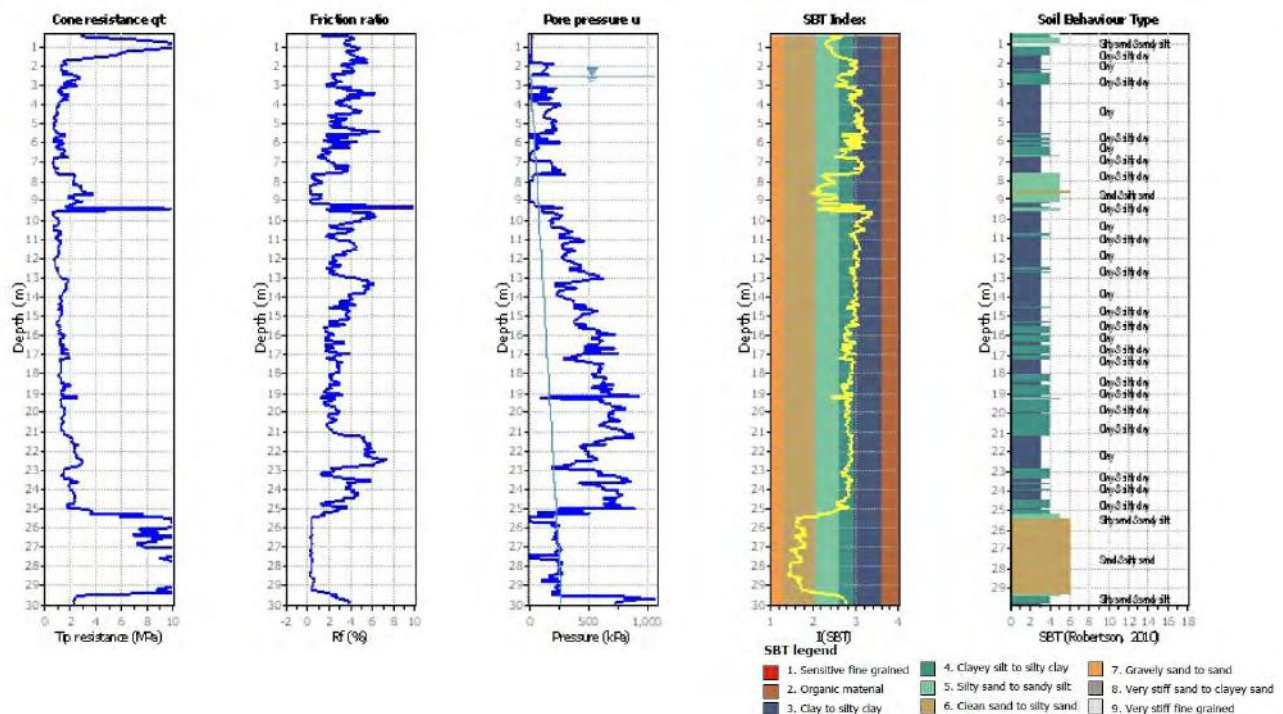


Prova Penetrometrica CPTu 6

Dalla prova penetrometrica CPTu 6 deriva la seguente stratigrafia.

PROVA PENETROMETRICA CPTu 6		
Profondità	Terreno	Falda
0.00 – 1.55 m da p.c.	Terreno Agricolo e Argille Limose	-2.50 m da p.c.
1.55 – 7.60 m da p.c.	Argille e Argille Limose	
7.60 – 8.50 m da p.c.	Limi Sabbiosi e Sabbie Limose	
8.50 – 25.40 m da p.c.	Argille e Argille Debolmente Limose	
25.40 – 29.40 m da p.c.	Sabbia e Sabbia Limosa	
29.40 – 30.00 m da p.c.	Argilla Inorganica	

Di seguito si allega il grafico della prova che riporta: resistenza alla punta, attrito laterale, pressione dei pori, indice SBT e tipologia di comportamento del suolo.



3.2. Indagini Geofisiche

Per la caratterizzazione dell'area di studio sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche.

- | | | |
|------------------------------------|--|------|
| - n. 3 indagini in sismica passiva | Horizontal to Vertical Spectral Ratio | HVSR |
| - n. 1 indagini in sismica attiva | Multichannel Analysis of Surface Waves | MASW |

Di seguito si riporta un'immagine allo scopo di ubicare le indagini eseguite.



Figura 9: ubicazione delle indagini geofisiche eseguite.

3.2.1. Indagini in sismica passiva a stazione singola – HVSR

La caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica di indagine sismica passiva HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – Metodo di Nakamura) è finalizzata all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di sito. Esse sono correlabili ai cambi litologici presenti sia all'interno della copertura che nell'ammasso roccioso. L'utilizzo di algoritmi di calcolo finalizzati ad una modellizzazione sintetica dello spettro H/V, permette di correlare ogni picco spettrale con le discontinuità presenti nel sottosuolo (per esempio i cambi litologici). I dati che si possono ricavare sono spessori, profondità e velocità di propagazione delle onde di taglio all'interno del sismo-strato individuato. Tramite l'elaborazione di moti superiori e l'analisi dell'andamento delle tre componenti del moto, è possibile distinguere i picchi di origine naturale da quelli generati dai moti superiori o da artefatti, al fine di garantire una corretta interpretazione dello spettro sismico registrato. La tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) trova la sua massima applicazione negli studi di microzonazione sismica poiché fornisce un parametro fondamentale (frequenza propria di risonanza di sito) per una corretta progettazione di edifici antisismici. Negli ultimi anni si è affermata anche per la sua versatilità poiché si è dimostrato come lo spettro sismico può rappresentare un modello sismo – stratigrafico del sottosuolo.

La tecnica HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un "velocimetro triassiale" conforme alle norme SESAME. I risultati che si possono ottenere da indagini sismiche HVSR sono:

- La frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici antisismici. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, per evitare l'effetto di "doppia risonanza", fenomeno estremamente pericoloso per la stabilità delle costruzioni.
- La frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se, in caso di sisma, la costruzione potrà essere o meno a rischio.
- La stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità, anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la tecnica HVSR, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato, inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Indagine HVSR 1

I risultati dell'indagine HVSR sono riportati integralmente nell'allegato 2 in calce al presente documento, nel seguito si riportano le principali caratteristiche del sito in termini di contenuto in frequenza.

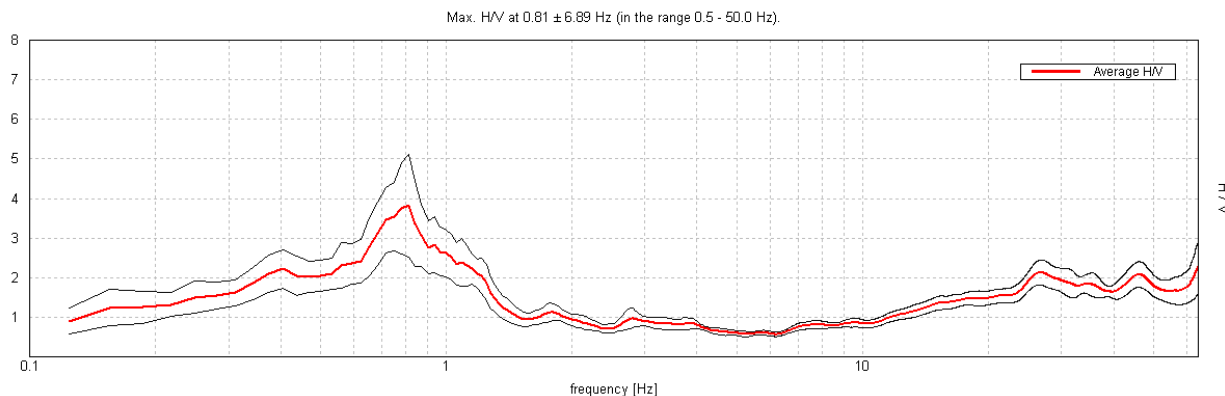
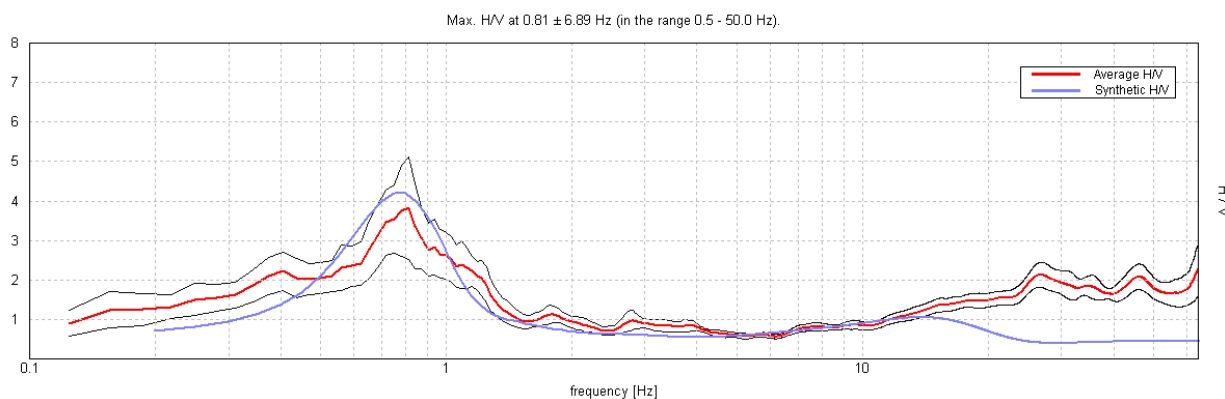


Figura 10: spettro H/V del sito indagato del punto di acquisizione 1.

Il picco individuato durante l'elaborazione delle informazioni contenute nel segnale sembra identificabile a circa **0.80 Hz**. Il picco risulta piuttosto profondo e potrebbe rappresentare il passaggio tra la copertura e il bedrock sismico.

La modellazione del segnale ha permesso di effettuare una stima delle Vs 30 che dà il seguente risultato.



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	300	0.45
152.00	90.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

Vs_{eq}(0.0-30.0)= 219 m/s

Indagine HVSR 2

I risultati dell'indagine HVSR sono riportati integralmente nell'allegato 2 in calce al presente documento, nel seguito si riportano le principali caratteristiche del sito in termini di contenuto in frequenza.

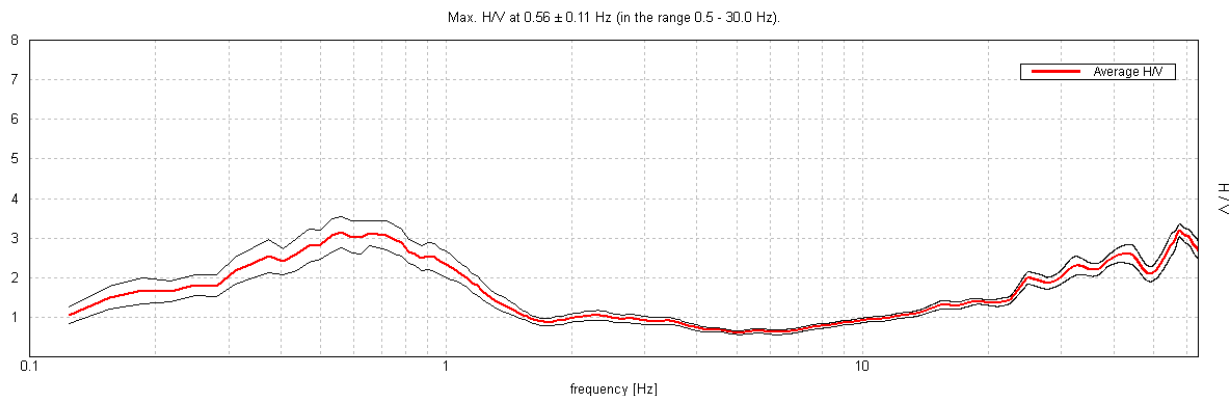
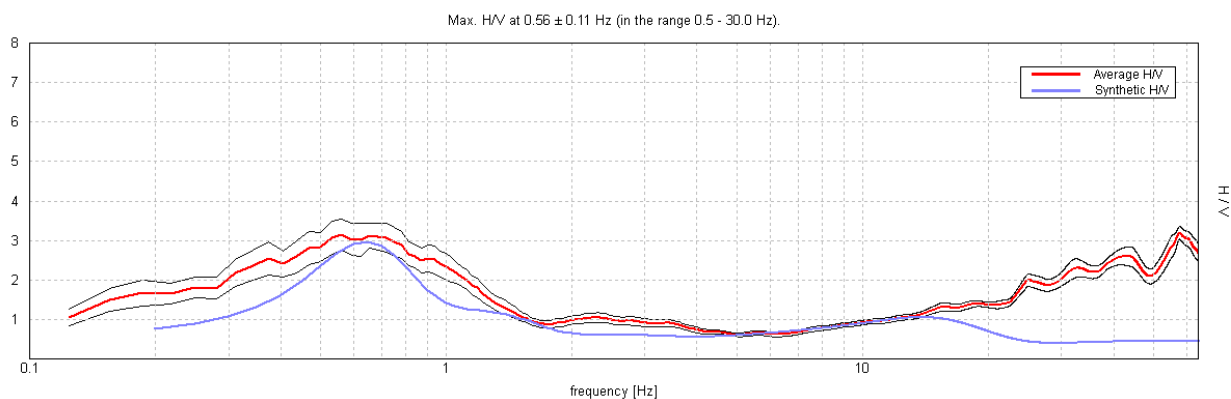


Figura 11: spettro H/V del sito indagato del punto di acquisizione 2.

Il picco individuato durante l'elaborazione delle informazioni contenute nel segnale sembra identificabile a circa **0.67 Hz**. Il picco risulta piuttosto profondo e potrebbe rappresentare il passaggio tra la copertura e il bedrock sismico.

La modellazione del segnale ha permesso di effettuare una stima delle Vs 30 che dà il seguente risultato.



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	290	0.42
182.00	120.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

Vs_{eq}(0.0-30.0)= 217 m/s

Indagine HVSR 3

I risultati dell'indagine HVSR sono riportati integralmente nell'allegato 2 in calce al presente documento, nel seguito si riportano le principali caratteristiche del sito in termini di contenuto in frequenza.

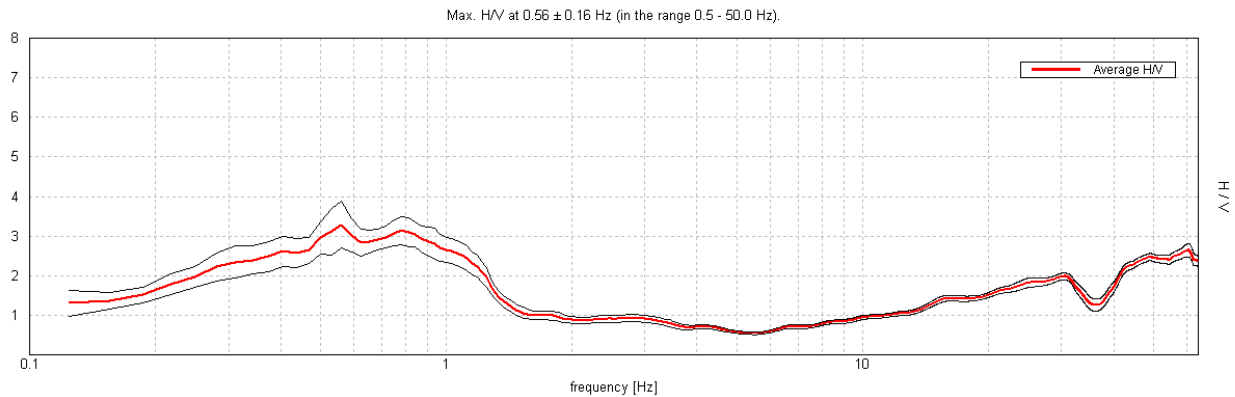
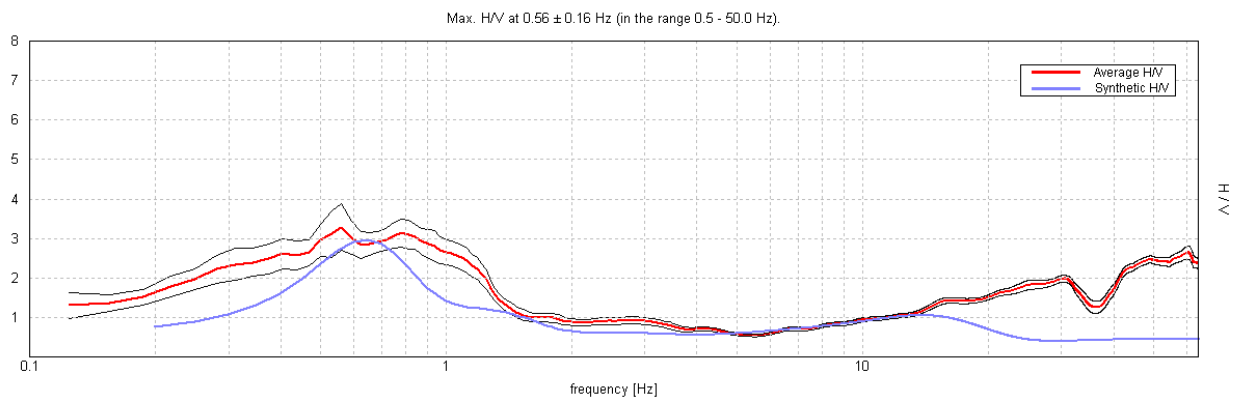


Figura 12: spettro H/V del sito indagato del punto di acquisizione 3.

Il picco individuato durante l'elaborazione delle informazioni contenute nel segnale sembra identificabile a circa **0.72 Hz**. Il picco risulta piuttosto profondo e potrebbe rappresentare il passaggio tra la copertura e il bedrock sismico.

La modellazione del segnale ha permesso di effettuare una stima delle Vs 30 che dà il seguente risultato.



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	290	0.42
182.00	120.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

Vs_{eq}(0.0-30.0)= 217 m/s

3.2.2. Indagine Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW

Per misurare le velocità delle onde di taglio si possono eseguire prospezioni sismiche mediante stendimenti superficiali, utilizzando geofoni verticali da 4,5 Hz ed acquisendo attivamente i segnali delle onde rifratte alla superficie mediante una sorgente artificiale provocata. Questa tecnica, nota con la sigla MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), permette di ricostruire il profilo verticale delle Vs con procedimenti di modellazione diretta delle velocità di fase delle onde, rifratte alla superficie. Partendo dal sismogramma registrato mediante sorgente energizzante in asse con lo stendimento, viene eseguita un'analisi spettrale che ha consentito di elaborare un'immagine della distribuzione del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono. Da tale elaborazione, tramite una fase di "picking" del segnale ad elevata intensità è stata ottenuta la "curva di dispersione", dalla cui inversione è stato calcolato il modello sismo-stratigrafico espresso in termini di velocità delle onde di taglio (Vs). I dati sono stati registrati mediante un sismografo Geode Geometrics 24 bit con filtri disinseriti, velocità di campionamento (sample rate) di 0.25 millisecondi e lunghezza delle acquisizioni di 2 secondi. Si effettuano battute poste ad un offset almeno pari a 5 metri di distanza dal primo geofono, mediante grave da 12,0 kg di massa.

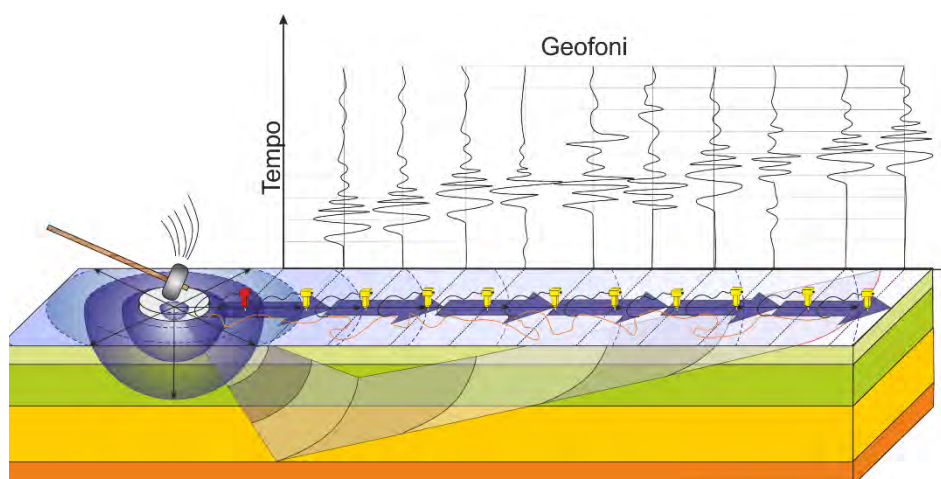


Figura 13: schema di una prova MASW con array lineare.

Indagine MASW 1

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, $V(\text{fase})/\text{freq.}$, può essere convertito nel profilo $V_s/\text{profondità}$. Tale metodo non è univoco e quindi il modello che ne scaturisce è un modello teorico; per questo motivo è preferibile operare in presenza di dati di taratura onde ricavare il modello reale. In ragione dell'assenza di prove geognostiche eseguite in sito il modello che segue è stato ipotizzato sulla base delle considerazioni di natura geologica derivate dalla campagna di rilievo e dalle considerazioni di natura geotecnica derivate dalle indagini CPTu, eseguite in sito.

Di seguito, figura 14, si riporta in forma sintetica il risultato dell'indagine sismica MASW eseguita.

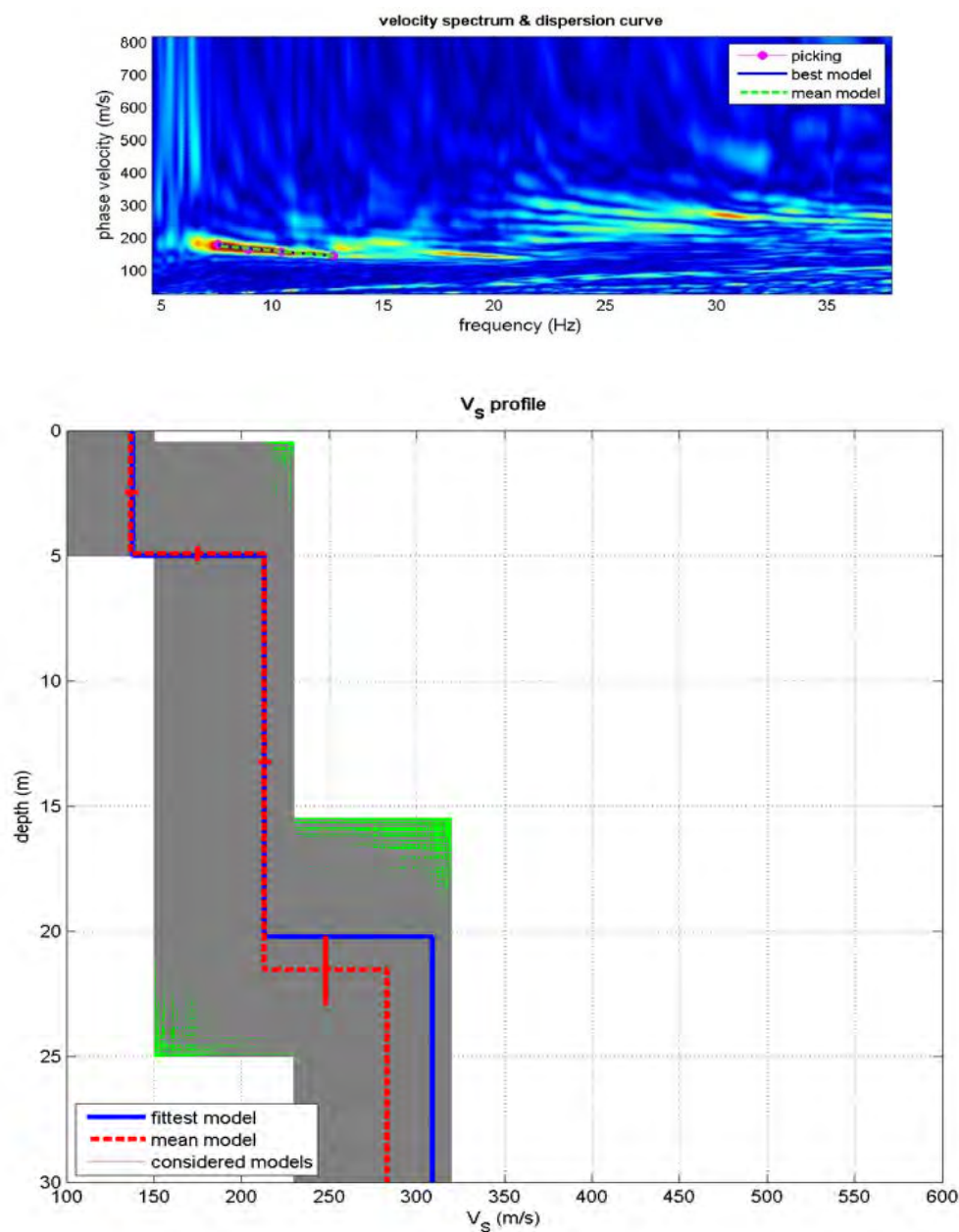


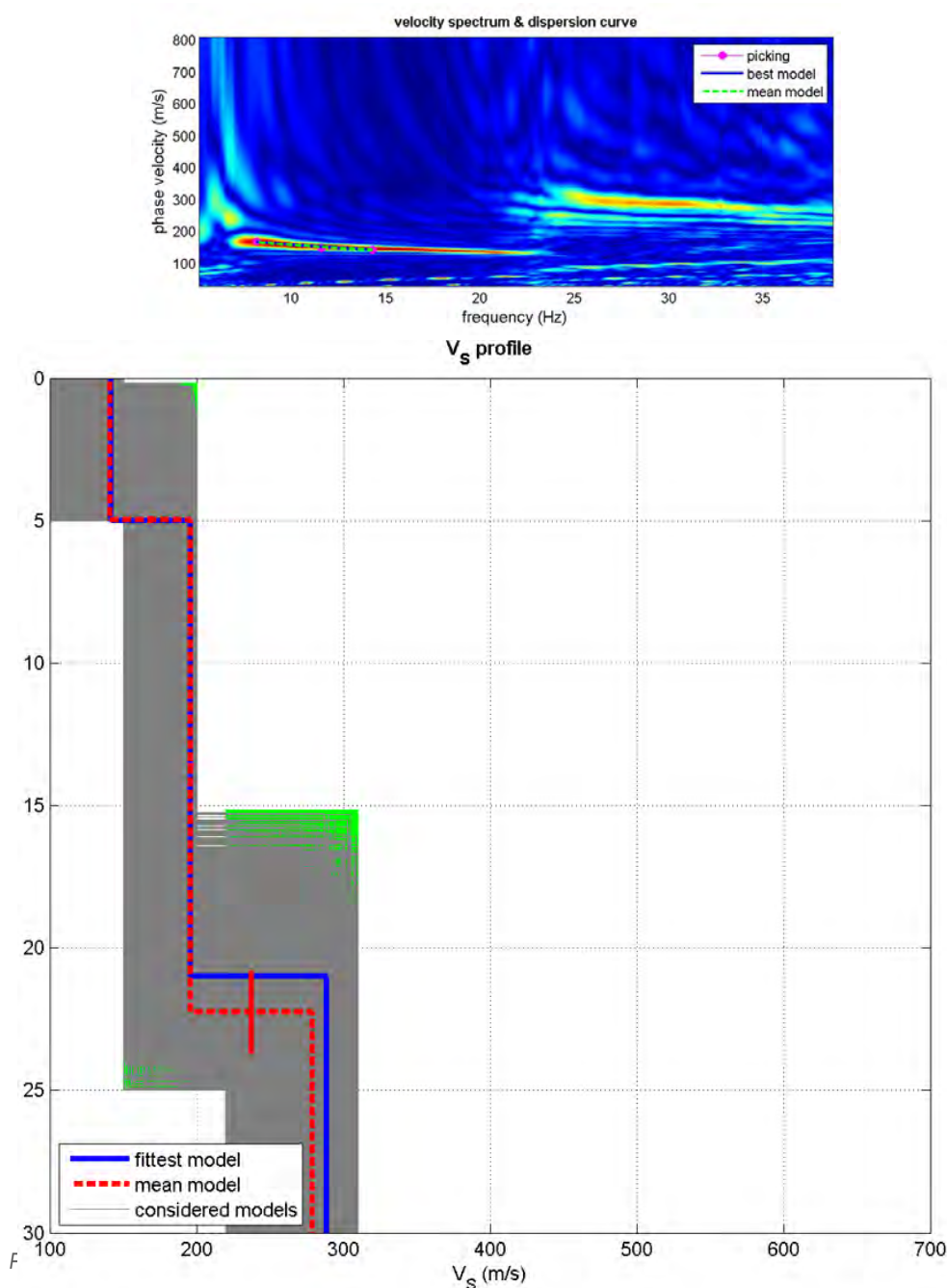
Figura 14: modello di velocità determinato elaborando la prova MASW e in basso a destra lo spettro di velocità.

Per il sito esaminato l'indagine MASW individua una V_{s30} pari a **$V_{s30} = 209$ m/s**.

Indagine MASW 2

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, $V(fase)/freq.$, può essere convertito nel profilo $V_s/profondità$. Tale metodo non è univoco e quindi il modello che ne scaturisce è un modello teorico; per questo motivo è preferibile operare in presenza di dati di taratura onde ricavare il modello reale. In ragione dell'assenza di prove geognostiche eseguite in sito il modello che segue è stato ipotizzato sulla base delle considerazioni di natura geologica derivate dalla campagna di rilievo e dalle considerazioni di natura geotecnica derivate dalle indagini CPTu eseguite in sito.

Di seguito, figura 15, si riporta in forma sintetica il risultato dell'indagine sismica MASW eseguita.



Per il sito esaminato l'indagine MASW individua una V_{s30} pari a **$V_{s30} = 198$ m/s**.

4. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

4.1. Pericolosità sismica di base

Secondo la classificazione sismica del territorio nazionale proposta a partire dall'O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche, il **Comune di Sant'Agata Bolognese (BO)** risulta appartenente alla **classe di sismicità 3**.

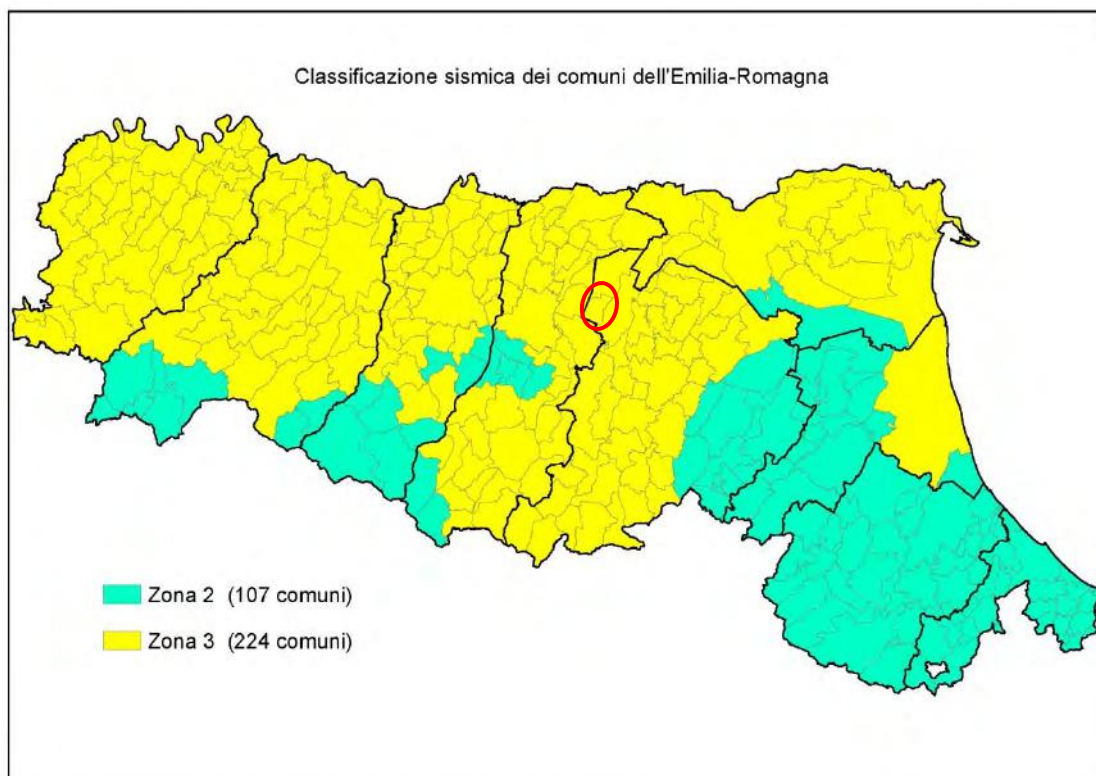


Figura 16: Classificazione sismica e dei comuni della regione Emilia-Romagna a partire dall'O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche (aggiornamento luglio 2018) e ubicazione del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese (BO).

La suddivisione del territorio nazionale in zone a diversa classe di sismicità, caratterizzate da un valore di accelerazione di picco ed un corrispondente spettro di risposta elastico da utilizzare nella progettazione, risulta in realtà superata dall'entrata in vigore del D.M. 14/01/2008. Sulla base dei contenuti delle NNTC 2008 e delle successive NTC 2018, per ogni costruzione deve essere definita un'accelerazione di riferimento propria, in funzione delle coordinate geografiche dell'area e della vita nominale dell'opera.

Per ciascuna area in oggetto, in relazione a un periodo di riferimento T_R stimato di 475 anni, è stato definito un parametro di accelerazione massima attesa a_g definita in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido e con superficie topografica orizzontale. L'accelerazione a_g rappresenta uno dei parametri principali che definisce la **pericolosità sismica di base**, insieme ai parametri F_0 e T_c^* dello spettro di risposta elastico, desumibili nelle tabelle riportate sotto.

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 44,658435
longitudine: 11,118477
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 16061 Lat: 44,6609
Lon: 11,1014 Distanza: 1377,416
Sito 2 ID: 16062 Lat: 44,6623
Lon: 11,1716 Distanza: 4225,742
Sito 3 ID: 16284 Lat: 44,6123
Lon: 11,1736 Distanza: 6730,639
Sito 4 ID: 16283 Lat: 44,6109
Lon: 11,1034 Distanza: 5416,440

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30
[anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,478
Tc*: 0,255 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50
[anni]
ag: 0,059 g
Fo: 2,513
Tc*: 0,270 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475
[anni]
ag: 0,160 g
Fo: 2,555
Tc*: 0,276 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975
[anni]
ag: 0,212 g
Fo: 2,516
Tc*: 0,282 [s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,650
St: 1,000
Kh: 0,014
Kv: 0,007
Amax: 0,699
Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,018
Kv: 0,009
Amax: 0,864
Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,450
Cc: 1,610
St: 1,000
Kh: 0,056
Kv: 0,028
Amax: 2,282
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,380
Cc: 1,590
St: 1,000
Kh: 0,082
Kv: 0,041
Amax: 2,869
Beta: 0,280

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50
Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 44.657498
longitudine: 11.117476

4.2. Categoria del sottosuolo

Per determinare il parametro V_{30} e definire quindi la categoria di sottosuolo dell'area indagata (§ 3.2.2 NTC 2018) sono state eseguite in sito le indagini sismiche sopra descritte nel paragrafo precedente. Il valore di V_{30} si calcola attraverso la formula 3.2.1 delle NTC 2018:

$$V_{S,Eq} = \frac{H}{\sum_i \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

dove H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Dall'elaborazione delle indagini sismiche MASW e HVSR si sono ottenuti i valori di $V_{S,30}$ e di frequenza naturale del terreno f_0 riportati nelle seguenti tabelle:

MASW 1	V_{S30}	209 m/s	-
MASW 2	V_{S30}	198 m/s	-
HVSR 1	V_{S30}	219 m/s	$f_0 = 0.80$ Hz
HVSR 2	V_{S30}	217 m/s	$f_0 = 0.67$ Hz
HVSR 3	V_{S30}	217 m/s	$f_0 = 0.72$ Hz

Grafico 1: risultati ottenuti dalla modellazione dei dati ottenuti dall'indagine MASW e HVSR.

Pertanto, secondo la classificazione del sottosuolo imposta dal NTC 2018, si definisce il sottosuolo indagato come appartenente alla categoria **C**, corrispondente a

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.

4.3. Azione sismica e risposta sismica del sito – Risposta Sismica Locale

Per ottemperare ai riferimenti normativi citati l'analisi è stata svolta secondo quanto indicato al § 7.11.3 delle NTC 2018, attraverso analisi numerica monodimensionale in campo lineare equivalente. Per fare ciò è stato utilizzato come strumento di lavoro il software di calcolo STRATA (University of Texas - Austin).

Ai fini della restituzione degli spettri di accelerazione, relativi allo stato limite SLV, è stata svolta la verifica dell'amplificazione del sito mediante l'utilizzo di un modello simulato in campo lineare equivalente.

Utilizzando un modello lineare equivalente è possibile ottenere una soluzione di un modello non lineare, attraverso analisi lineari complete nelle quali al termine di ogni interazione vengono aggiornati i parametri di **rigidezza** e **smorzamento** che sono dipendenti dallo stato di deformazione del terreno. Attraverso un'iterazione di calcoli si raggiunge una convergenza prefissata a monte della fase di computazione.

Il software STRATA è in grado di valutare la risposta sismica di un deposito di terreno, considerando un profilo monodimensionale in cui si propagano linearmente le onde sismiche, in funzione dei parametri dinamici attribuiti al terreno. Il terreno viene schematizzato come un sistema di N strati orizzontali omogenei, isotropi e visco-elastici, sovrastanti un semispazio uniforme, attraversati da un treno di onde di taglio che incidono verticalmente le superfici. Ogni strato è descritto per mezzo dello spessore H , del modulo di taglio massimo $G_{\max}$ o dalla corrispondente velocità massima $V_{\max}$, dal valore dello smorzamento D , dal peso dell'unità di volume γ e dalle curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio normalizzato ($G / G_0 - \gamma$) e le corrispondenti curve dello smorzamento ($D - \gamma$) con la deformazione di taglio γ . Il modello lineare visco-elastico fa riferimento al modello reologico di Kelvin-Voigt, costituito da una molla e uno smorzatore viscoso in parallelo. Tale modello è descritto quindi dalla rigidezza (**G**) e dallo smorzamento (**D**). L'onda monodimensionale viene descritta dall'equazione in cui lo spostamento provocato (u) è funzione della profondità (z) e del tempo (t):

$$u(z, t) = A \exp[i(\omega t + k^* z)] + B \exp[i(\omega t - k^* z)]$$

Nell'equazione appena presentata A e B rappresentano le corrispettive amplificazioni del tetto e della base dello strato considerato. Il fattore k^* risulta dipendente dal modulo di taglio (G), dal grado di smorzamento (D) e dalla densità del terreno (ρ). Le relazioni sono le seguenti:

$$k^* = \frac{\omega}{v_s^*}$$

$$v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}}$$

$$G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2}) \approx G(1 + i2D)$$

Dove G^* e v_s^* , rappresentano il modulo di taglio e la velocità di taglio.

Di seguito si propone un esempio di modello a strati continui utilizzabile con il codice di calcolo STRATA.

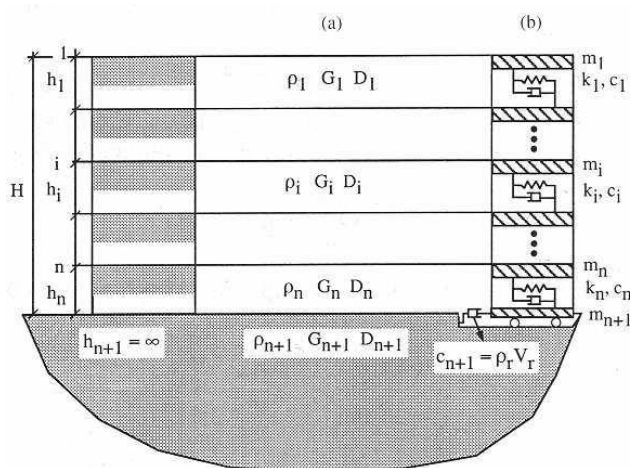


Figura 17: Modello a strati continui adottato per la simulazione con il codice di calcolo STRATA.

MODELLO SIMULATO

Il modello simulato deriva dai dati ottenuti dalla prova geofisica che compone la campagna geognostica eseguita in sito. Tale profilo approssima il comportamento del sottosuolo, dal punto di vista sismico, in corrispondenza dell'area studiata. Il profilo considerato deriva dall'interpolazione dei dati provenienti dalle indagini geofisiche eseguite e i dati, di natura bibliografica, disponibili per il sito di riferimento.

Il profilo sismico del sottosuolo utilizzato per la modellazione della RSL deriva dall'elaborazione congiunta delle indagini HVSR1 e MASW eseguite in sito, integrate con dati di bibliografia. Si illustra successivamente il modello utilizzato:

Tabella 1: Modello ottenuto dall'elaborazione delle indagini sismiche.

Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.00	5.00	130.00	0.45
5.00	20.00	210.00	0.43
25.00	40.00	300.00	0.43
65.00	90.00	450.00	0.42
inf.	inf.	700.00	0.40

Per descrivere il comportamento dinamico dei terreni costituenti il modello sono state considerate curve di decadimento dei moduli di rigidezza e smorzamento, al variare della deformazione percentuale $\gamma(\%)$. Si riporta successivamente la curva di decadimento considerata per l'esecuzione del calcolo di risposta sismica locale:

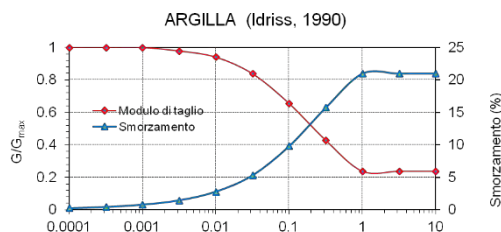


Figura 18: Curva di decadimento dei moduli G/G_{max} e smorzamento D , utilizzati per descrivere il comportamento dei materiali coesivi che compongono il sottosuolo in oggetto.

In accordo con quanto esposto nella D.G.R. 476/21, l'analisi RSL in oggetto è stata svolta adottando come input sismico 7 accelerogrammi, corrispondenti allo stato limite SLV. I segnali di riferimento sono stati successivamente scalati per il

valore di PGA_0 atteso al suolo rigido in corrispondenza dell'areale oggetto di analisi. Per fare ciò è stata considerata l'interpolazione spaziale dei valori di PGA_0 proposta da INGV per il territorio nazionale e resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi.

Per il sito in oggetto tale valore è pari a **0.160g** considerando un valore di **$C_u = 1.00$** (Classe d'uso II) e **$V_n = 50$ anni** per ottenere un tempo di ritorno pari a 475 anni.

RISULTATI OTTENUTI

Sulla scorta delle verifiche svolte mediante software STRATA, in riferimento al modello considerato, è stato possibile definire, nel dominio delle frequenze, la funzione TF (Funzione di trasferimento) e rapporto spettrale di amplificazione associato. Per via grafica si inserisce successivamente la funzione di trasferimento TF ottenuta a seguito dell'analisi RSL in oggetto. Attraverso tale funzione è possibile definire il campo di frequenze entro il quale il sottosuolo, in corrispondenza del sito in oggetto, amplifica il segnale sismico, oltre che a quantificare l'amplificazione stessa.

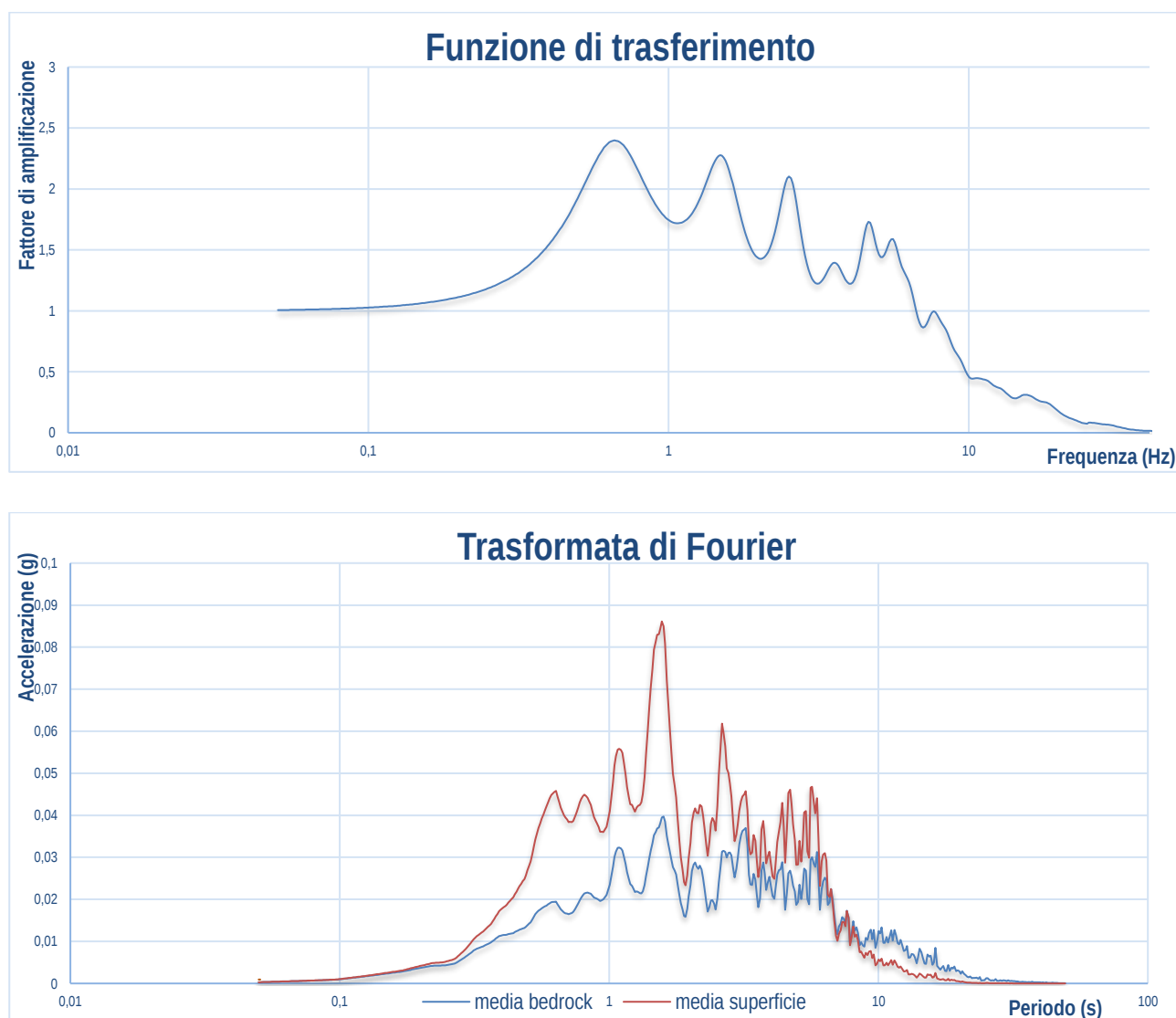


Grafico 2: Dall'alto: Funzione di Trasferimento e funzione FFT.

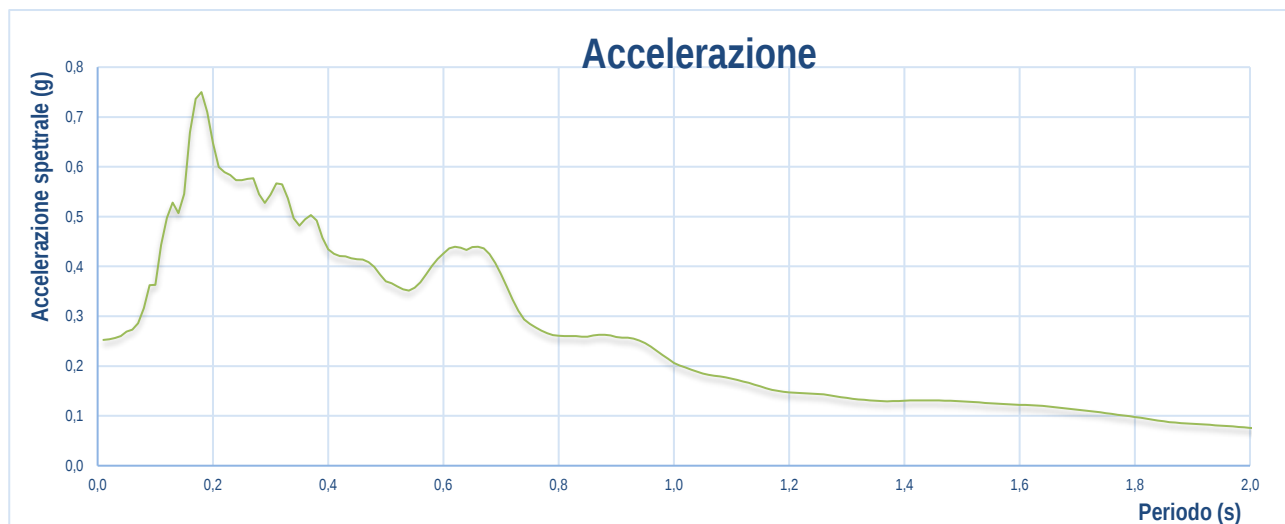


Grafico 3: Spettro accelerazione RSL.

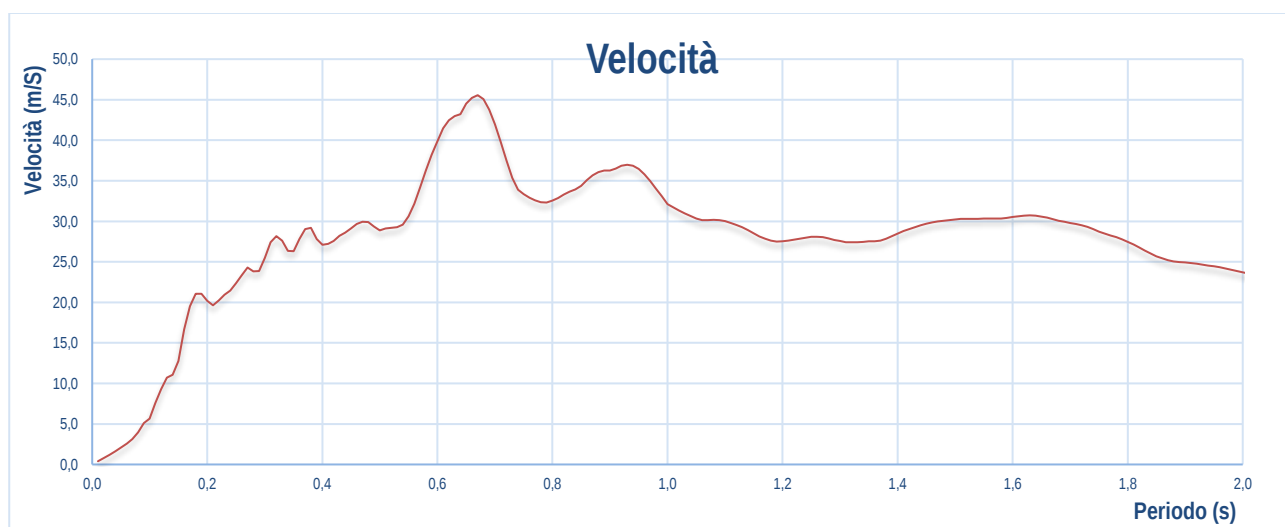


Grafico 4: Spettro velocità RSL

Spettro RSL – SLV 475 anni

T [s]	Ag	0.5	0.370	1.02	0.197	1.54	0.126
0.00	0.252	0.51	0.366	1.03	0.193	1.55	0.125
0.01	0.252	0.52	0.360	1.04	0.189	1.56	0.125
0.02	0.254	0.53	0.354	1.05	0.185	1.57	0.124
0.03	0.257	0.54	0.351	1.06	0.182	1.58	0.123
0.04	0.260	0.55	0.357	1.07	0.181	1.59	0.123
0.05	0.269	0.56	0.368	1.08	0.179	1.6	0.122
0.06	0.273	0.57	0.384	1.09	0.177	1.61	0.122
0.07	0.286	0.58	0.401	1.1	0.175	1.62	0.122
0.08	0.316	0.59	0.415	1.11	0.172	1.63	0.121
0.09	0.362	0.6	0.426	1.12	0.169	1.64	0.120
0.1	0.363	0.61	0.436	1.13	0.166	1.65	0.119
0.11	0.443	0.62	0.439	1.14	0.163	1.66	0.118
0.12	0.497	0.63	0.437	1.15	0.159	1.67	0.116
0.13	0.528	0.64	0.433	1.16	0.155	1.68	0.115
0.14	0.507	0.65	0.439	1.17	0.153	1.69	0.114
0.15	0.546	0.66	0.439	1.18	0.150	1.7	0.112
0.16	0.669	0.67	0.436	1.19	0.148	1.71	0.111
0.17	0.737	0.68	0.425	1.2	0.147	1.72	0.110
0.18	0.750	0.69	0.407	1.21	0.146	1.73	0.109
0.19	0.710	0.7	0.384	1.22	0.146	1.74	0.107
0.2	0.648	0.71	0.359	1.23	0.145	1.75	0.105
0.21	0.600	0.72	0.334	1.24	0.145	1.76	0.104
0.22	0.589	0.73	0.311	1.25	0.144	1.77	0.102
0.23	0.583	0.74	0.294	1.26	0.143	1.78	0.101
0.24	0.573	0.75	0.285	1.27	0.142	1.79	0.099
0.25	0.573	0.76	0.278	1.28	0.140	1.8	0.098
0.26	0.576	0.77	0.271	1.29	0.138	1.81	0.096
0.27	0.577	0.78	0.266	1.3	0.136	1.82	0.094
0.28	0.545	0.79	0.262	1.31	0.134	1.83	0.092
0.29	0.528	0.8	0.261	1.32	0.133	1.84	0.091
0.3	0.544	0.81	0.260	1.33	0.132	1.85	0.089
0.31	0.567	0.82	0.260	1.34	0.131	1.86	0.088
0.32	0.564	0.83	0.260	1.35	0.131	1.87	0.086
0.33	0.537	0.84	0.259	1.36	0.130	1.88	0.085
0.34	0.497	0.85	0.259	1.37	0.129	1.89	0.085
0.35	0.482	0.86	0.261	1.38	0.129	1.9	0.084
0.36	0.495	0.87	0.263	1.39	0.130	1.91	0.083
0.37	0.503	0.88	0.263	1.4	0.130	1.92	0.083
0.38	0.492	0.89	0.261	1.41	0.131	1.93	0.082
0.39	0.457	0.9	0.258	1.42	0.131	1.94	0.081
0.4	0.434	0.91	0.257	1.43	0.131	1.95	0.080
0.41	0.425	0.92	0.257	1.44	0.131	1.96	0.080
0.42	0.421	0.93	0.255	1.45	0.131	1.97	0.079
0.43	0.420	0.94	0.251	1.46	0.131	1.98	0.078
0.44	0.416	0.95	0.246	1.47	0.131	1.99	0.077
0.45	0.415	0.96	0.239	1.48	0.130	2	0.076
0.46	0.413	0.97	0.231	1.49	0.130		
0.47	0.409	0.98	0.223	1.5	0.129		
0.48	0.399	0.99	0.214	1.51	0.129		
0.49	0.384	1	0.206	1.52	0.128		
		1.01	0.201	1.53	0.127		

Come descritto nell'all. 2 della DGR 476/2021, la stima del fattore di amplificazione **FA** è stata calcolata considerando un tempo di ritorno $T_R=475$ anni, con uno smorzamento $\zeta=5\%$, e relativi parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, in particolare:

- accelerazione di picco orizzontale (PGA);
- intensità spettrale SA

$$SA = \int_{T_1}^{T_2} A(T, \zeta) dT$$

dove A è lo spettro di risposta in accelerazione, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento; sono stati considerati quattro intervalli di periodo proprio T ottenendo quattro valori di intensità spettrale:

	T₁	T₂
SA1	0,1 s	0,5 s
SA2	0,4 s	0,8 s
SA3	0,7 s	1,1 s
SA4*	0,5 s	1,5 s

- intensità spettrale SI

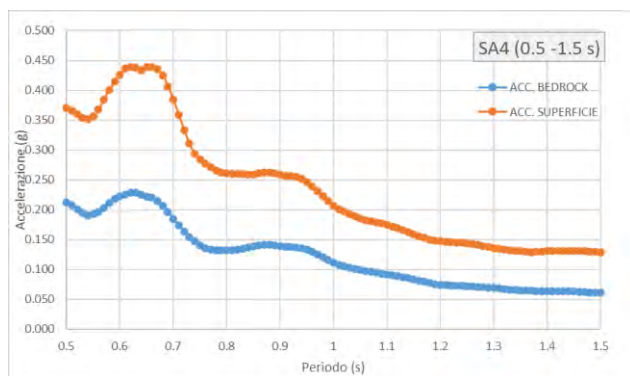
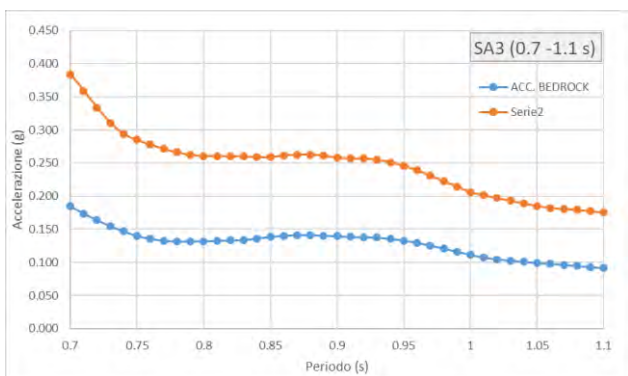
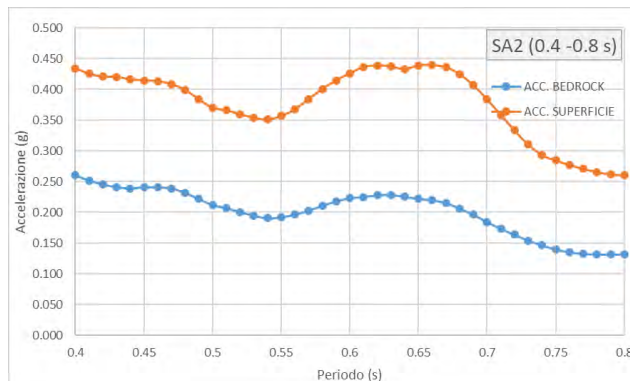
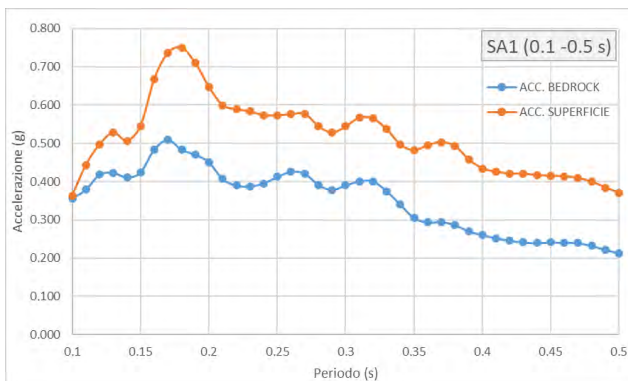
$$SI = \int_{T_1}^{T_2} V(T, \zeta) dT$$

dove V è lo spettro di risposta in velocità, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento³; sono stati considerati tre intervalli di periodo proprio T ottenendo tre valori di intensità

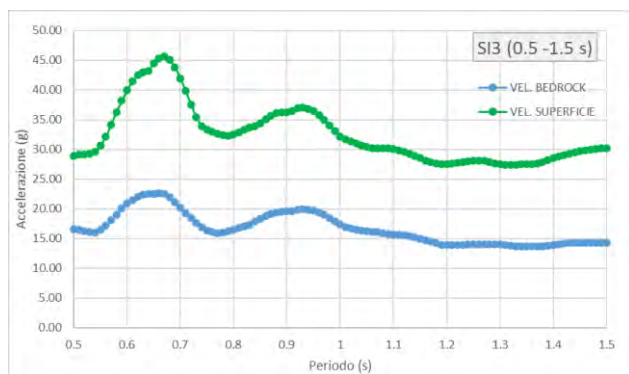
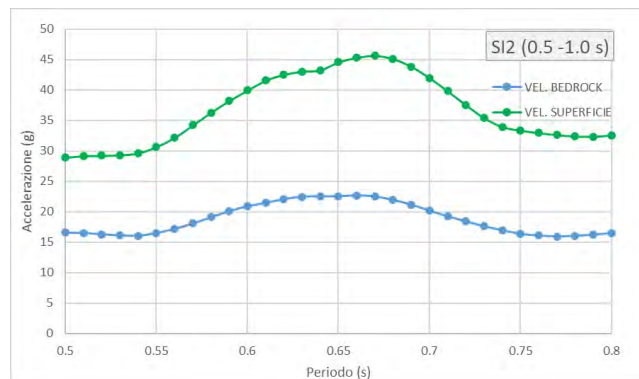
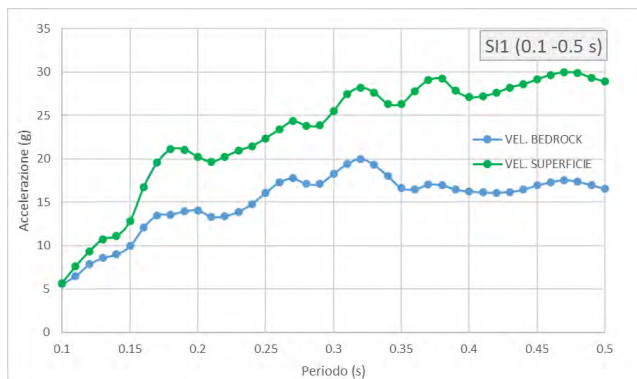
	T₁	T₂
SI1	0,1 s	0,5 s
SI2	0,5 s	1,0 s
SI3*	0,5 s	1,5 s

Di seguito si riportano i grafici degli spettri di risposta in accelerazione e velocità calcolati per l'area in studio.

SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE



SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITÀ



Di seguito si riportano in tabella i FA:

Tabella 2: Fattori di amplificazione SA1 –SA2 –SA3 – SA4.

Fattore di amplificazione	Periodo T (s)	FA
Fattore di Amplificazione SA1	$0.1s \leq T \leq 0.5s$	1.51
Fattore di Amplificazione SA2	$0.4s \leq T \leq 0.8s$	1.89
Fattore di Amplificazione SA3	$0.7s \leq T \leq 1.1s$	1.92
Fattore di Amplificazione SA4	$0.5s \leq T \leq 1.5s$	1.95

Tabella 3: Fattori di amplificazione SI1 –SI2 –SI3.

Fattore di amplificazione	Periodo T (s)	FA
Fattore di Amplificazione SI1	$0.1s \leq T \leq 0.5s$	1.51
Fattore di Amplificazione SI2	$0.5s \leq T \leq 1.0s$	1.94
Fattore di Amplificazione SI3	$0.5s \leq T \leq 1.5s$	1.95

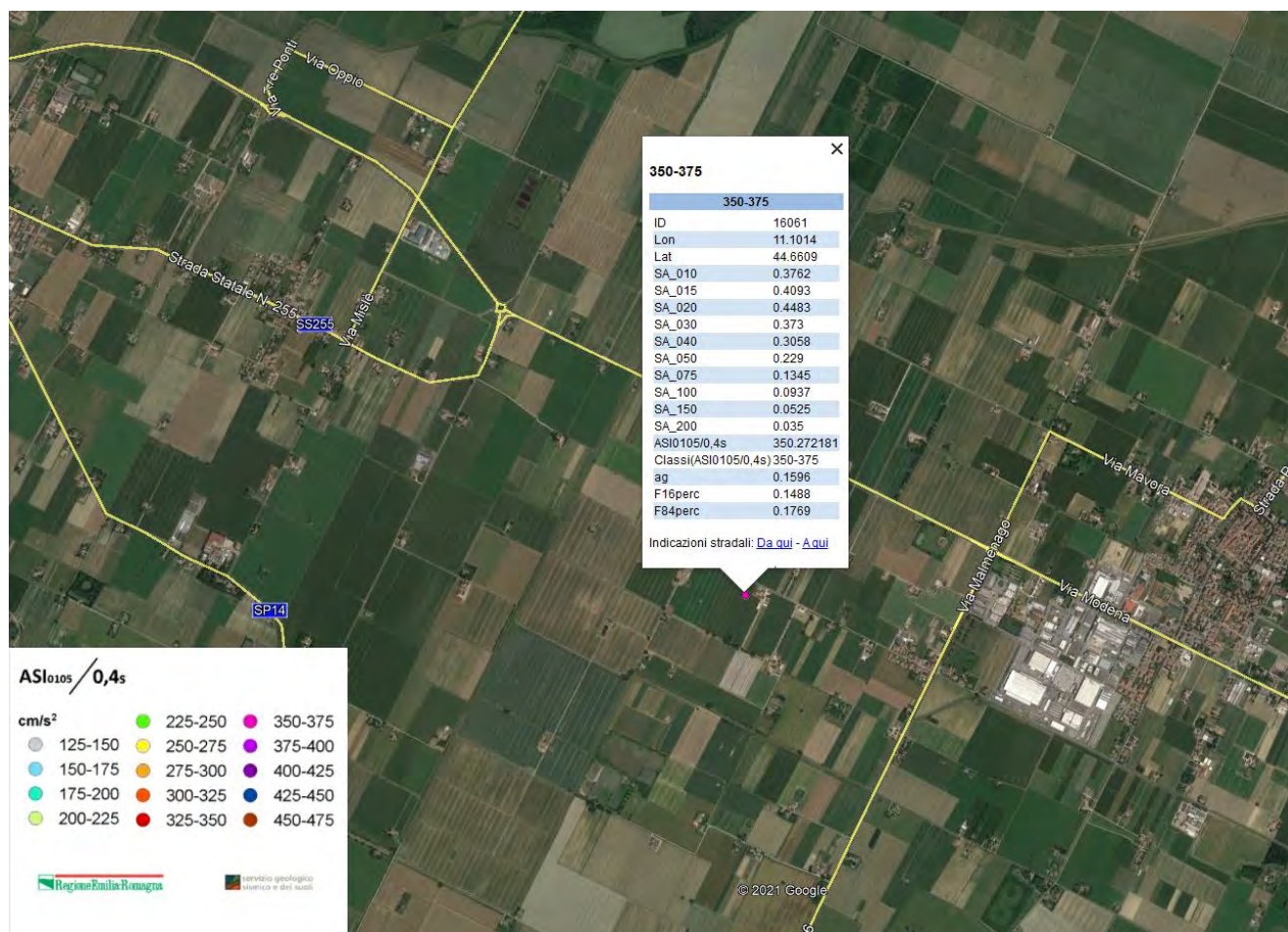
Infine si è calcolato il valore di H_{SM} , ovvero il parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto, dato dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0.1 \leq T \leq 0.5$ s e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file all_4_coord.kmz disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, di seguito si riportano i valori della griglia INGV dell'area in studio.

La zona in studio presenta un valore di $ASI_{UHS}/\Delta T$ pari a **350**.

Tabella 4: Valori di ASI_{UHS}/ΔT per l'area in studio - griglia INGV.



Di seguito si riportano i valori di H_{SM} e H_{0408} , H_{0711} , H_{0515} ricavati, ovvero lo scuotimento in accelerazione (cm/s^2) atteso al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Tabella 5: Valori H_{sm} ottenuti per i diversi periodi.

H_{SM}	Periodo T (s)
$H_{SM} = 527$	$0,1 s \leq T \leq 0,5s$
$H_{0408} = 662$	$0,4 s \leq T \leq 0,8s$
$H_{0711} = 670$	$0,7 s \leq T \leq 1,1s$
$H_{0515} = 682$	$0,5 s \leq T \leq 1,5s$

Dai risultati sopra esposti dell'analisi di risposta sismica locale si ottiene un valore di accelerazione massima attesa al suolo del valore **$PGA_{max}=A_{max}=0.252g$** (per $T=0 s$).

5. MODELLAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SITO

5.1. Modello geotecnico del sottosuolo

La modellazione geotecnica che segue è finalizzata a fornire un quadro della distribuzione dei parametri geotecnici dei terreni indagati nell'area di studio. Considerando le dimensioni in superficie del lotto indagato e vista la variabilità litostratigrafica dei materiali indagati, del tutto compatibile con un deposito alluvionale, si è deciso di fornire un modello geotecnico per ciascuna prova CPTu eseguita.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 1

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 1			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ_{DRY}	γ_{SAT}	c'	C_u	Φ'	D_r	E_s	M	k
0.00 - 1.50	1.5	TERRENO AGRICOLO E ARGILLE LIMOSE	20	22	21.42	150	24		21000	85	2.16E-06
1.50 - 7.65	6.15	ARGILLE LIMOSE	17	19	8.71	61	21		8540	12	6.99E-08
7.65 - 8.50	0.85	SABBIE E SABBIE LIMOSE	17.4	19.4			33	35	37000		3.24E-06
8.50 - 20.31	11.81	ARGILLE E ARGILLE DEBOLMENTE E LIMOSE	17.2	19.2	10.14	71	22		9940	8.3	2.90E-09
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESION E EFFICACE	COESION E NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- D_r : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- m_v : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freattimetro, si attestava a 2.50 m da piano campagna.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 2

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 2			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ_{DRY}	γ_{SAT}	c'	C_u	Φ'	D_r	E_s	M	k
0.00 - 1.50	1.5	TERRENO AGRICOLO E LIMI SABBIOSI	20	22			35	89	80000		9.59E-06
1.50 - 3.80	2.3	ARGILLE LIMOSE E LIMI ARGILLOSI	17.5	19.5	13.28	93	23		13020	20	1.74E-07
3.80 - 8.50	2.7	ARGILLE LIMOSE E LIMI ARGILLOSI	17	19	8.14	57	21		37000	6.9	3.07E-09
8.50 - 20.27	11.75	ARGILLE E ARGILLE LIMOSE	17.1	19.1	11.97	83.8	22		11732	11.3	2.63E-08
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESION E EFFICACE	COESION E NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- D_r : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- mv : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freatimetro, si attestava a 2.50 m da piano campagna.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 3

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 3			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ _{DRY}	γ _{SAT}	c'	Cu	Φ'	Dr	Es	M	k
0.00 - 1.50	1.5	TERRENO AGRICOLO E ARGILLE LIMOSE	20	22	21.42	150	24		21000	85	2.16E-06
1.50 - 6.50	5	ARGILLE	16.9	18.9	9.428	66	21		9240	12.8	4.56E-08
6.50 - 18.40	11.9	ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	17	19	9.171	64.2	21		8988	7.5	3.23E-09
18.40 - 26.85	8.45	ARGILLE E ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	18.2	20.2	19.19	134	23		18760	19.0	8.82E-09
26.85 - 29.20	2.35	LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE	18.6	20.6			34	41	94000		2.10E-05
29.20 - 30.00	0.7	ARGILLE	17.4	19.4	14.42	101	23		14140	8.3	2.80E-09
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESIONE EFFICACE	COESIONE NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ₃	kN/m ₃	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- D_r : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- m_v : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freatimetro, si attestava a 2.50 m da piano campagna.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 4

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 4			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ_{DRY}	γ_{SAT}	c'	C_u	Φ'	D_r	E_s	M	k
0.00 - 1.70	1.7	TERRENO AGRICOLO E LIMI SABBIOSI	20.2	22.2			35	82.4	7500 0		3.07E-06
1.70 - 7.50	5	ARGILLE	16.8	18.8	8.857	62	21		8680	10.8	2.53E-08
7.50 - 18.30	11.9	ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	17.2	19.2	10.07	70.5	22		9870	8.8	3.39E-09
18.30 - 25.25	8.45	ARGILLE E ARGILLE LIMOSE	17.9	19.9	15.71	110	24		1540 0	14.0	5.22E-09
25.25 - 29.80	2.35	SABBIA E SABBIA LIMOSA	18.2	20.2			33	40	7000 0		2.11E-05
29.20 - 30.00	0.7	ARGILLE	18.3	20.3	18.57	130	24		1820 0	13.0	1.84E-09
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESIONE EFFICACE	COESIONE NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- D_r : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- m_v : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freatimetro, si attestava a 2.50 m da piano campagna.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 5

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 5			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ_{DRY}	γ_{SAT}	c'	Cu	Φ'	Dr	Es	M	k
0.00 - 1.50	1.5	TERRENO AGRICOLO E ARGILLE LIMOSE	20	22	21.42	150	24		21000	70	2.26E-06
1.50 - 8.10	6.6	ARGILLE LIMOSE	16.7	19.7	8.857	62	21		8680	11	8.51E-08
8.10 - 21.00	12.9	ARGILLE	17.1	19.1		70	22		37000	8.3	3.78E-09
21.00 - 23.30	2.23	ARGILLE E ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	18.4	20.4	17.85	125	23		17500	18.8	2.99E-09
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESIONE EFFICACE	COESIONE NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- D_r : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- m_v : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freaticometro, si attestava a 2.00 m da piano campagna.

Parametri di resistenza e deformabilità

CPTu 6

MODELLO GEOTECNICO - CPTu 6			Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini								
Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	γ_{DRY}	γ_{SAT}	c'	C_u	Φ'	Dr	E_s	M	k
0.00 - 1.55	1.55	TERRENO AGRICOLO E SABBIE LIMOSE	20.1	22.1			35	81	73000		3.80E-06
1.55 - 7.60	6.05	ARGILLE E ARGILLE LIMOSE	17	19	11.14	78	23		10920	10.3	6.24E-08
7.60 - 9.60	2	LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE	17	19		70	33	33			1.74E-06
9.60 - 25.40	15.8	ARGILLE E ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	17.5	19.5	12.28	86	23		12040	11.0	6.82E-09
25.40 - 29.40	4	SABBIE E SABBIE LIMOSE	18.2	20.2		70	35	47	83000		2.30E-05
29.40 - 30.00	0.6	ARGILLE E ARGILLE DEBOLMENTE LIMOSE	18.4	20.4	21.85	153	23		21420	18.0	2.67E-08
		DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME SECCO	PESO DI VOLUME SATURO	COESION E EFFICACE	COESION E NON DRENATA	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE	DENSITA' RELATIVA	MODULO ELASTICO	MODULO EDOMETRICO	PERMEABILITA'
		U.M.	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	%	kPa	MPa	m/s

Dove:

- γ : peso di volume del terreno (secco e saturo)
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata
- Φ : angolo di attrito interno
- Dr : densità relativa
- E_s : modulo elastico
- M : modulo edometrico
- mv : modulo di compressibilità edometrica
- k : permeabilità

Al termine dell'indagine il livello piezometrico, misurato con freatimetro, si attestava a 2.50 m da piano campagna.

5.2. Stabilità nei confronti della liquefazione

In accordo con la normativa regionale DGR 476/21 si è proceduto alla verifica della liquefazione per le verticali di prova CPTU1 – CPTU2 – CPTU3 – CPTU4 – CPTU5 – CPTU6.

La valutazione del fenomeno della liquefazione viene svolta attraverso il calcolo del fattore di sicurezza di ciascun livello che compone il sottosuolo analizzato nei confronti del fenomeno stesso. Il fattore di sicurezza è derivato secondo la seguente formulazione:

$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1atm}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

Dove:

CRR è rappresentato dal rapporto di resistenza ciclica

MSF rappresenta il fattore di scala della magnitudo che è funzione della magnitudo stessa, della PGA e del valore di CRR

K_σ è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata

CSR è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di taglio indotta dall'azione sismica, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace. Tale parametro è derivabile secondo la seguente formulazione:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

I termini che compongono la seguente relazione sono rappresentati da a_{max}/g che descrive il valore dell'accelerazione orizzontale a $T = 0.00$ s, il rapporto della tensione litostatica totale ed efficace, e il coefficiente riduttivo r_d . Quest'ultimo, in accordo con la predetta normativa è stato stimato secondo la seguente formulazione:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

dove M rappresenta il valore di magnitudo di riferimento per il sito in analisi.

Il valore **CRR** è stato ricavato attraverso la metodologia di calcolo proposta da **Boulanger&Idriss 2014**. Per le specifiche della procedura di calcolo adottata si faccia riferimento all'allegato **A2.2** della DGR 476/2021 della Regione Emilia Romagna. L'analisi di liquefazione è stata eseguita entro i -20.00 m rispetto al piano campagna come prescritto dalla normativa di riferimento.

Le verifiche sono state svolte considerando una magnitudo di riferimento **M = 6.14** (derivante dalla zonazione sismogenetica) e una accelerazione massima al suolo **A_{max} = 0.252g** (Risposta sismica locale).

A seguito dell'identificazione del fattore di sicurezza F_L è stato determinato l'indice potenziale di liquefazione IL (LPI) attraverso il quale è possibile definire l'esposizione del sito al rischio di liquefazione. Il potenziale di liquefazione LPI è stato determinato secondo la seguente formulazione:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{in cui} \quad w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

Dove $F(z)$ viene determinato secondo le formulazioni proposte da Somnez (2003)

$$\begin{array}{ll} F(z) = 0 & \text{per } F_L \geq 1.2 \\ F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L) & \text{per } 1.2 > F_L \geq 0.95 \\ F(z) = 1 - F_L & \text{per } F_L \leq 0.95 \end{array}$$

In base al valore di LPI ottenuto è possibile fornire un'indicazione del rischio di liquefazione. In considerazione delle linee guida emesse dalla Regione Emilia Romagna, a seguito degli eventi sismici di Maggio e Giugno 2012, si considera la classificazione di rischio definita da **Somnez 2003**:

INDICE DI LIQUEFAZIONE	Rischio di liquefazione
LPI=0	Nulla
0<LPI≤2	Basso
2<LPI≤5	Moderato
5<LPI≤10	Alto
15>LPI	Molto alto

Si illustra successivamente il valore di LPI derivato dalle verticali di prova, considerando un'accelerazione massima al suolo **A_{max} = 0.252g** (calcolata secondo RSL – terzo livello di approfondimento), la soggiacenza **della falda freatica è stata considerata in condizioni sismiche alla profondità Dw= -1.00 m** e una magnitudo di riferimento pari a **M=6.14**.

A seguito delle verifiche, in riferimento alle verticali, sono stati ottenuti i seguenti valori di LPI:

INDAGINE	INDICE DI LIQUEFAZIONE	RISCHIO
CPTU1	1.976	BASSO
CPTU2	0.571	BASSO
CPTU3	0.054	BASSO
CPTU4	0.08	BASSO
CPTU5	0.00	NULLO
CPTU6	4.80	BASSO

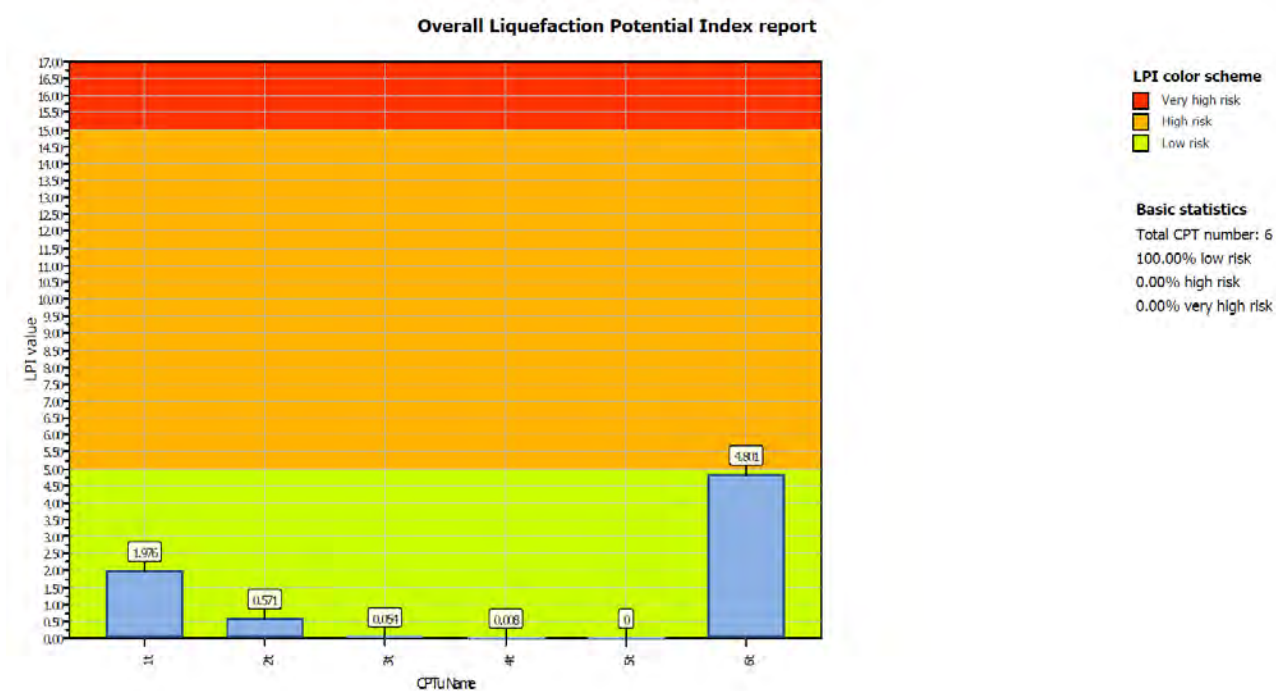


Grafico 5: Indice di liquefazione dalle prove CPTU.

5.3. Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 476/2021)

Per cedimento si intende l'abbassamento del piano campagna, ovvero la sommatoria dei prodotti della deformazione verticale media per lo spessore di ciascuno degli strati deformati.

Il cedimento post sismico può essere dovuto a terreni granulari saturi, insaturi e a terreni coesivi soffici; tali cedimenti vengono stimati con la seguente equazione:

$$s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$$

ε_{vi} = deformazione volumetrica;

Δz_i = spessore dello strato i-esimo.

I cedimenti conseguenti a liquefazione di terreni granulari saturi hanno luogo immediatamente dopo il terremoto o comunque in un tempo non superiore a un giorno, i cedimenti per densificazione di terreni granulari insaturi avvengono durante lo scuotimento sismico, mentre i cedimenti per consolidazione di terreni coesivi soffici possono richiedere tempi anche molto lunghi in funzione delle condizioni stratigrafiche e geotecniche.

Si riportano di seguito i valori dei cedimenti post sismici in terreni incoerenti sia in saturi (Liq. settlement) che insaturi (Dry settlement) per le verticali eseguite.

CPTU	Dry Seattle (cm)	Liq Seattle (cm)
CPTU1	0	2.72
CPTU2	0	0.73
CPTU3	0	0.26
CPTU4	0	0.15
CPTU5	0	0
CPTU6	0	6.53

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel mese di agosto 2021 è stato eseguito il presente elaborato al fine di verificare le condizioni di edificabilità e di pericolosità sismica dell'area.

Sulla base dei dati emersi dall'elaborazione delle indagini geotecniche eseguite (§ 3.1), è emersa la presenza di un deposito alluvionale costituito principalmente da alternanze di litotipi argillosi e limosi con a luoghi la presenza di lenti sabbiose. La stratigrafia si configura, sulla media dell'area indagata, con la presenza di un primo livello di terreno a carattere prevalentemente limo argilloso dello spessore di circa 1.50 m molto asciutto e con una discreta tendenza alla sovraconsolidazione; a questo primo strato entro i primi 10 metri dal piano campagna sono presenti argille e limi di media consistenza con a luoghi episodi sabbiosi di spessore metrico caratterizzati da un medio – scarso grado di addensamento; oltre i 10 metri di profondità si rileva la presenza di argille e argille debolmente limose caratterizzate da media consistenza fino a circa 20 metri di profondità; oltre i 20 metri si individuano orizzonti di argille limose e argille con a luoghi la presenza di livelli metrici di sabbia dotati di medio scarso addensamento. La stratigrafia desunta dalle indagini eseguite in sito è compatibile con quella di un deposito di piana alluvionale descritto in letteratura e nella cartografia consultata.

La falda freatica è stata rilevata nel mese di agosto 2021 alla quota di $D_w = -2.0/2.50$ dal piano campagna.

Al fine di fornire una stima dei parametri geotecnici si è deciso di produrre un modello geotecnico per ciascuna prova eseguita, in virtù della distanza tra una prova e in virtù della relativa eterogeneità che emersa tra alcune delle prove eseguite. I modelli geotecnici fanno emergere la presenza, principalmente, di materiali coesivi con una coesione non drenata generalmente da media a medio elevata. I modelli geotecnici fanno altresì percepire la presenza di alcuni orizzonti metrici di materiali sabbiosi e limoso sabbiosi dotati di un grado di addensamento medio scarso, la presenza di questi materiali andrà approfondita in sede di progetto definitivo.

La caratterizzazione sismica del sito è stata condotta sulla base di indagini geofisiche di tipo MASW e HVSr eseguita nel sito in studio (§ 4.2), tali prove, hanno permesso di determinare che la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità $V_{s30} = 198 \text{ m/s}$. Sulla base delle NTC 2018, e tenendo conto dell'indagine sismica sopraccitata, si classifica il terreno di fondazione in oggetto come appartenente alla **categoria C**, corrispondente a:

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**.

Per la definizione dell'azione sismica del sito è stata eseguito uno studio di risposta sismica locale (§ 4.3). Dall'analisi così eseguita si sono ottenuti i seguenti risultati:

	RSL	
ag	F.A.	A _{max}
0.160g	1.51	0.252g

È stata eseguita la verifica della suscettibilità al fenomeno della liquefazione sulla base delle prove penetrometriche CPTU eseguite in sito, considerando una accelerazione massima al suolo **A_{max} = 0.252g** (calcolata dal terzo livello di risposta sismica locale DGR 476/2021), la soggiacenza della falda freatica è stata considerata in condizioni sismiche alla profondità **Dw=-1.00 m da p.c.**, e una **magnitudo di riferimento** pari a **M=6.14**. Dall'analisi della suscettibilità nei confronti del fenomeno della liquefazione così eseguita sono ottenuti i seguenti valori di LPI (§ 5.3):

INDAGINE	INDICE DI LIQUEFAZIONE	RISCHIO
CPTU1	1.976	BASSO
CPTU2	0.571	BASSO
CPTU3	0.054	BASSO
CPTU4	0.08	NULLO
CPTU5	0.00	NULLO
CPTU6	4.80	BASSO

Sono stati inoltre calcolati i cedimenti indotti dall'azione sismica (§ 5.4).

CPTU	Dry Seattle (cm)	Liq Seattle (cm)
CPTU1	0	2.72
CPTU2	0	0.73
CPTU3	0	0.26
CPTU4	0	0.15
CPTU5	0	0
CPTU6	0	6.53

Come anticipato in precedenza la presenza, a luoghi, di episodi sabbiosi a medio scarso addensamento produce un rischio basso di liquefazione. In ragione dell'esistenza del rischio di liquefazione risulterà necessario, in sede di progetto definitivo, approfondire le indagini in modo da definire in modo accurato l'estensione delle lenti di sabbia e in modo da definire con precisione quali soluzioni adottare al fine di minimizzare il rischio.

In modo particolare si ritiene che sia necessario approfondire le indagini nelle aree dove sono state eseguite le prove penetrometriche CPTu 1 e CPTu 6 data l'esistenza di consistenti lenti sabbiose entro i 20 metri di profondità.

Si ricorda inoltre che, in fase esecutiva, dovranno essere realizzate ulteriori indagini specifiche per ogni singolo fabbricato, al fine di poter calcolare con maggior precisione la struttura di fondazione.

A disposizione per ulteriori chiarimenti, cogliamo l'occasione per porgere cordiali saluti.

Modena, 09 Settembre 2021

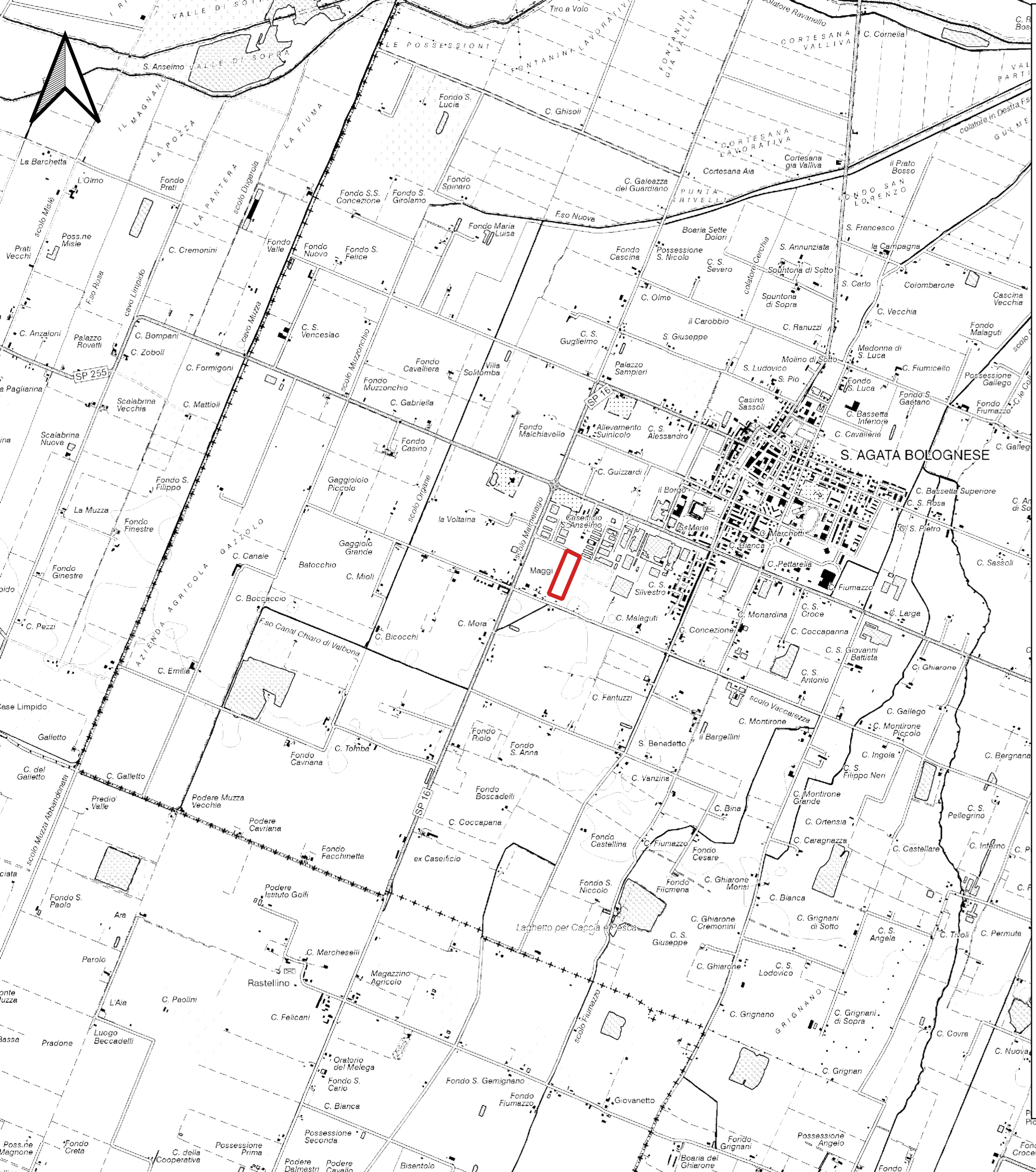
Dott. Geol. Pier Luigi Dallari



GEO GROUP s.r.l.

Indagini geognostiche e geofisiche – geologia applicata alle costruzioni – laboratorio geotecnico - idrogeologia
– coltivazione cave– bonifiche – consolidamenti – geologia ambientale – consulenze geologiche e geotecniche

TAVOLE



Elaborato: Tavola 1

Carta Corografica

Comune:
Località:

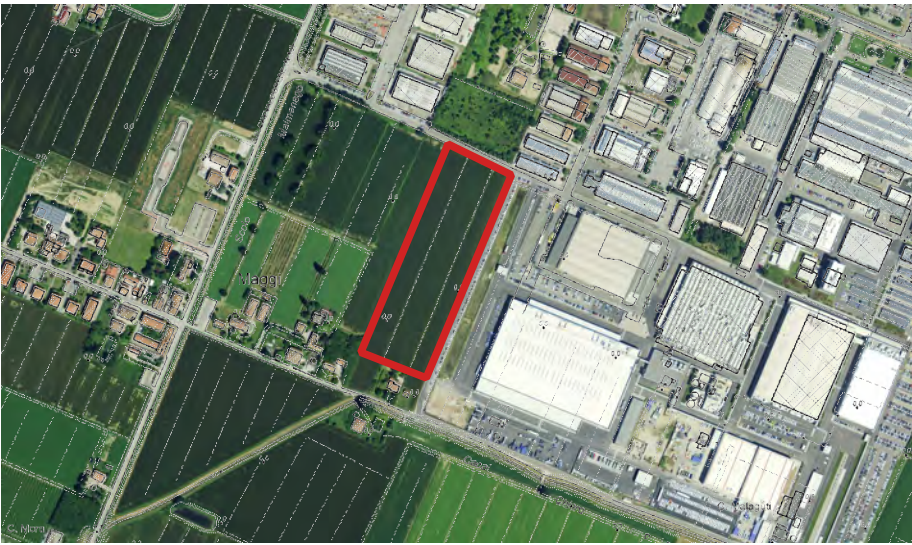
Sant'Agata Bolognese
Via Ferruccio Lamborghini

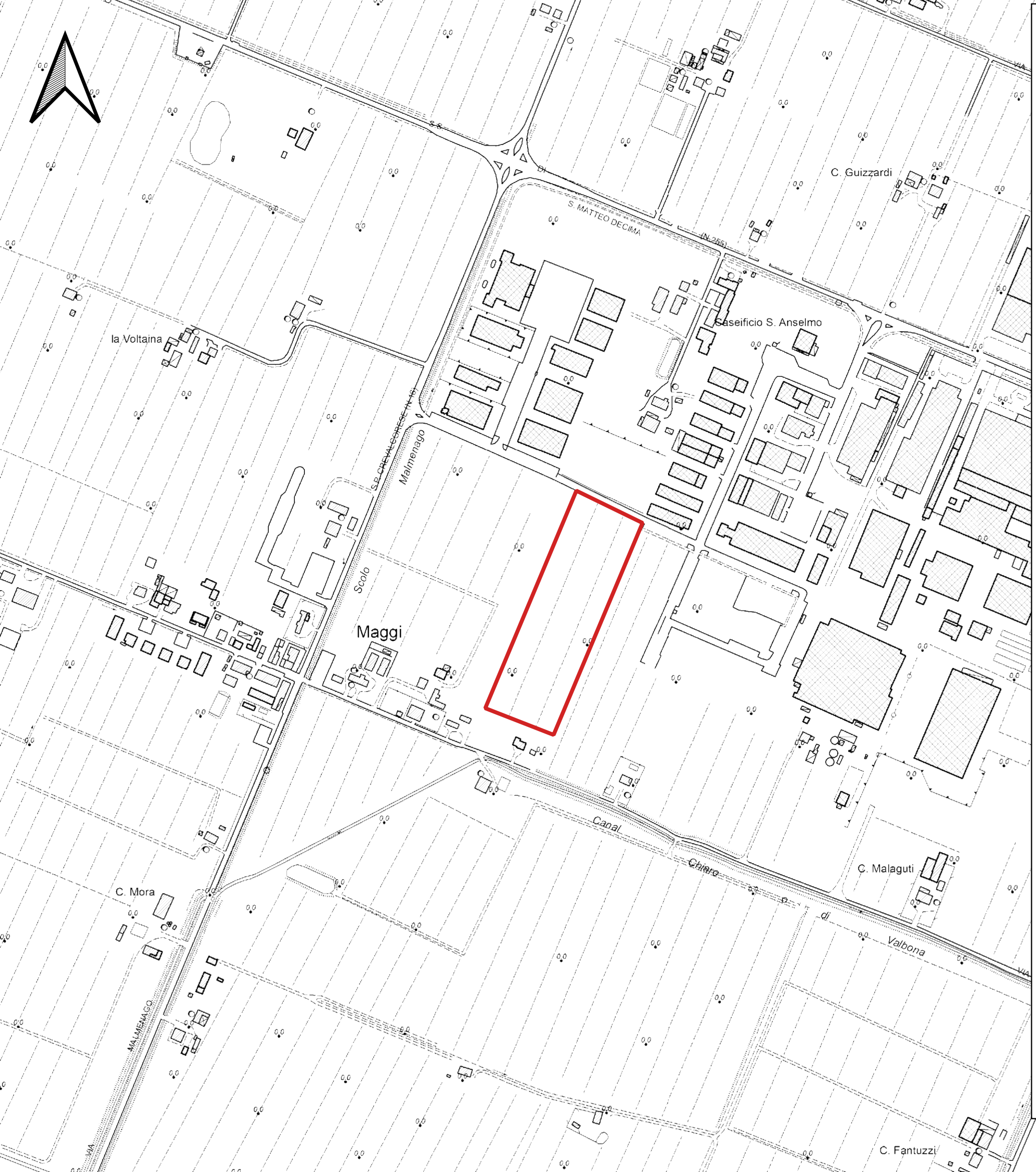
Legenda

 AREA DI STUDIO

Base Topografica: CTR 1:25'000

0 500 1,000 1,500 2,000 2,500 m





Elaborato: Tavola 2

Carta Topografica

Comune:
Località:

Sant'Agata Bolognese
Via Ferruccio Lamborghini

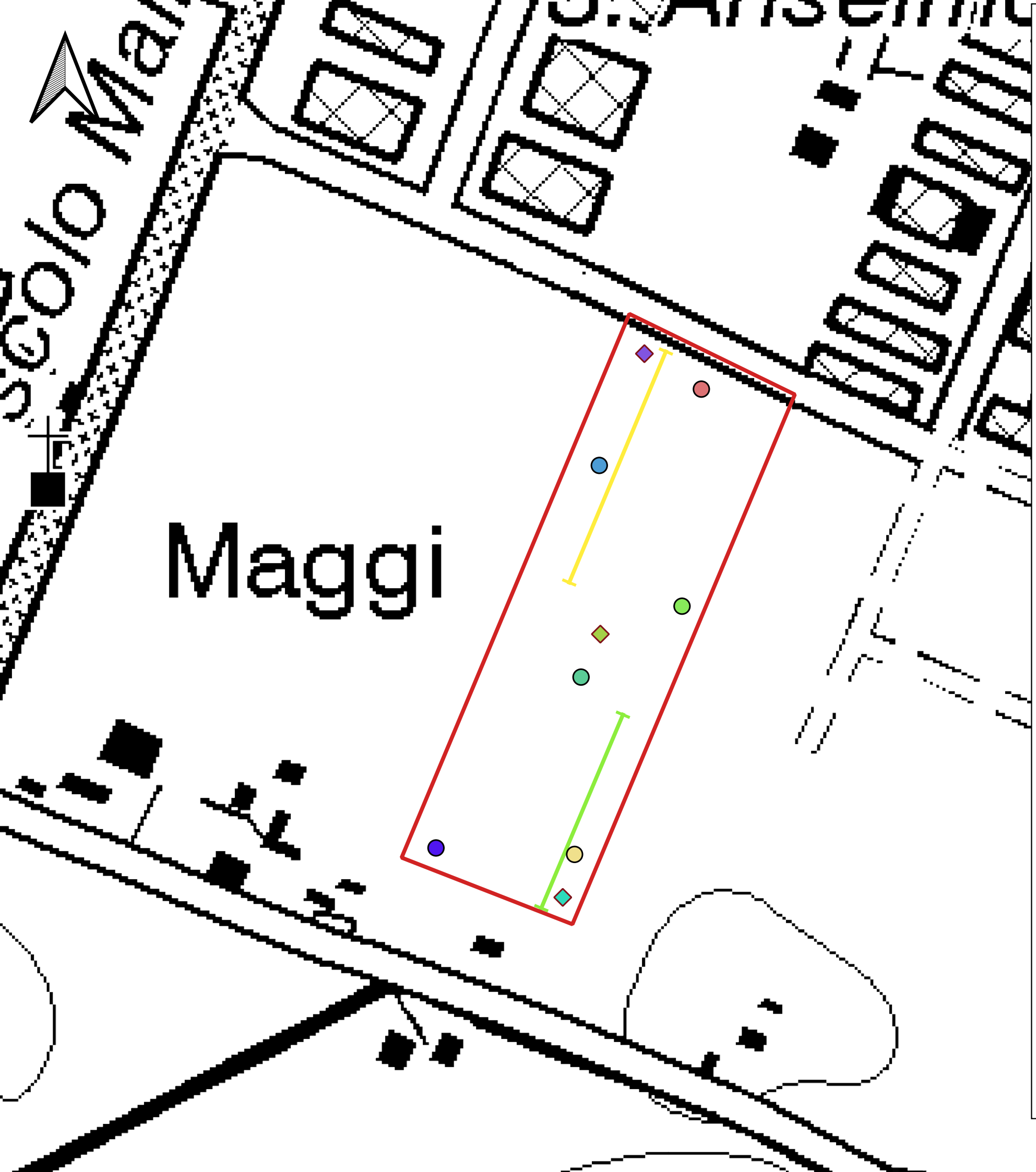
Legenda

 AREA DI STUDIO

Base Topografica: CTR 1:5'000

0 100 200 300 400 500 m





Elaborato: Tavola 3

Carta Indagini

Comune:

Sant'Agata Bolognese

Località:

Via Ferruccio Lamborghini

Legenda

 AREA DI STUDIO Indagini Sismiche

Prove Penetrometriche

Sismica Passiva

 CPTU 1

 STAZIONE 1

 CPTU 2

 STAZIONE 2

 CPTU 3

 STAZIONE 3

 CPTU 4

Sismica Attiva

 CPTU 5

 STENDIMENTO 1

 CPTU 6

 STENDIMENTO 2

Base Topografica: CTR 1:2'000

0 50 100 150 200 250 m

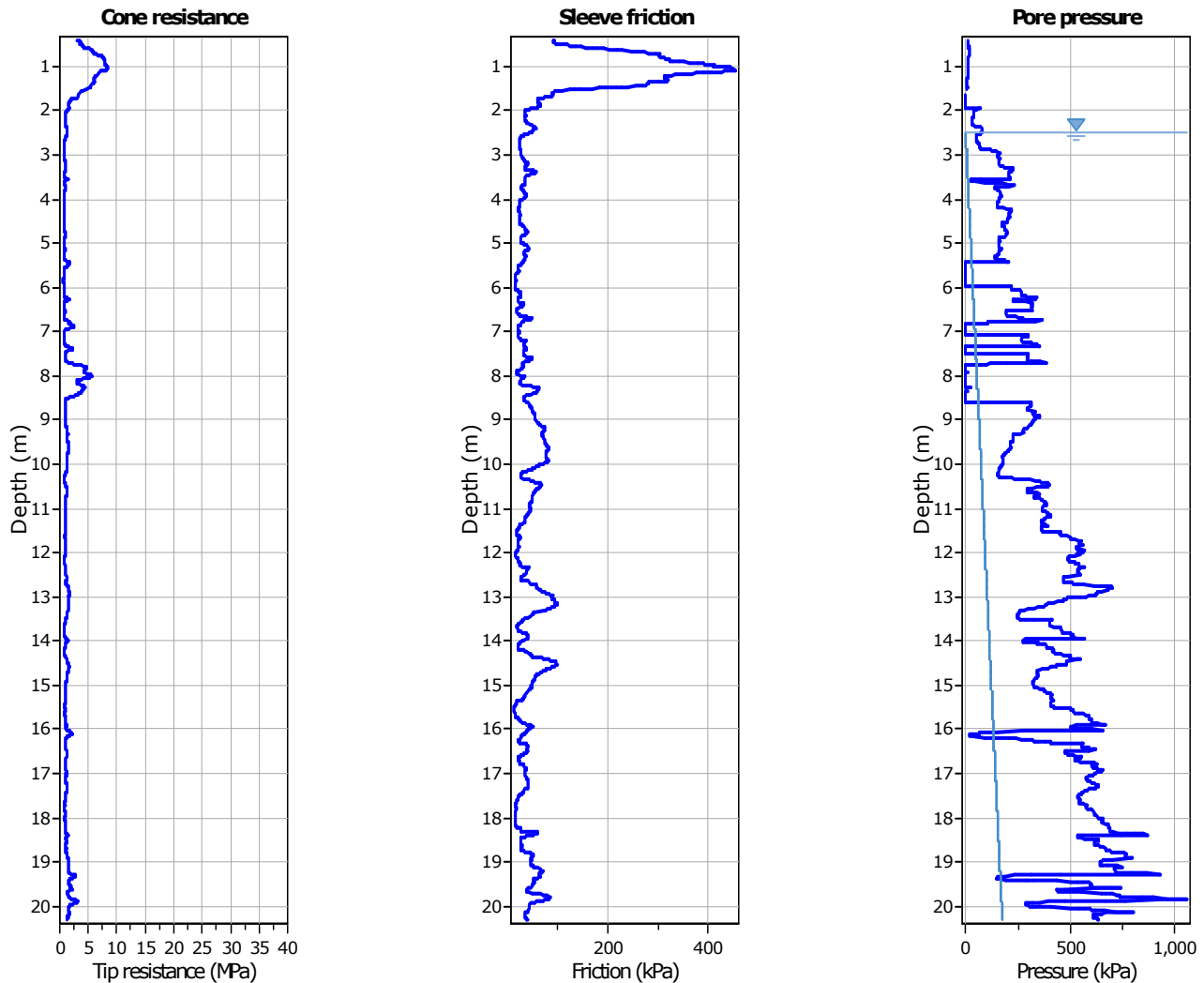


GEO GROUP s.r.l.

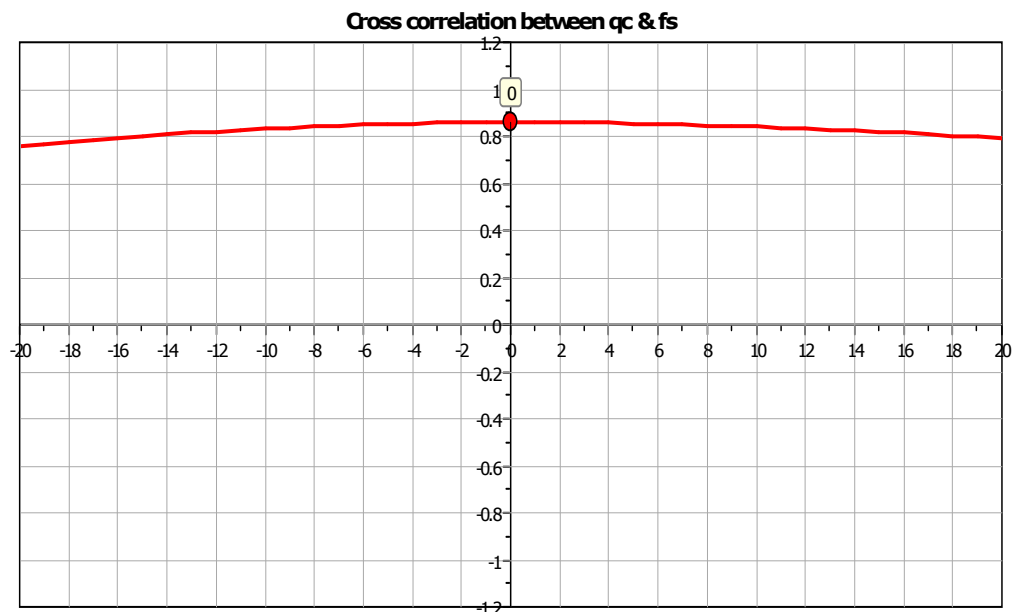
Indagini geognostiche e geofisiche – geologia applicata alle costruzioni – laboratorio geotecnico - idrogeologia
– coltivazione cave– bonifiche – consolidamenti – geologia ambientale – consulenze geologiche e geotecniche

ALLEGATO N° 1

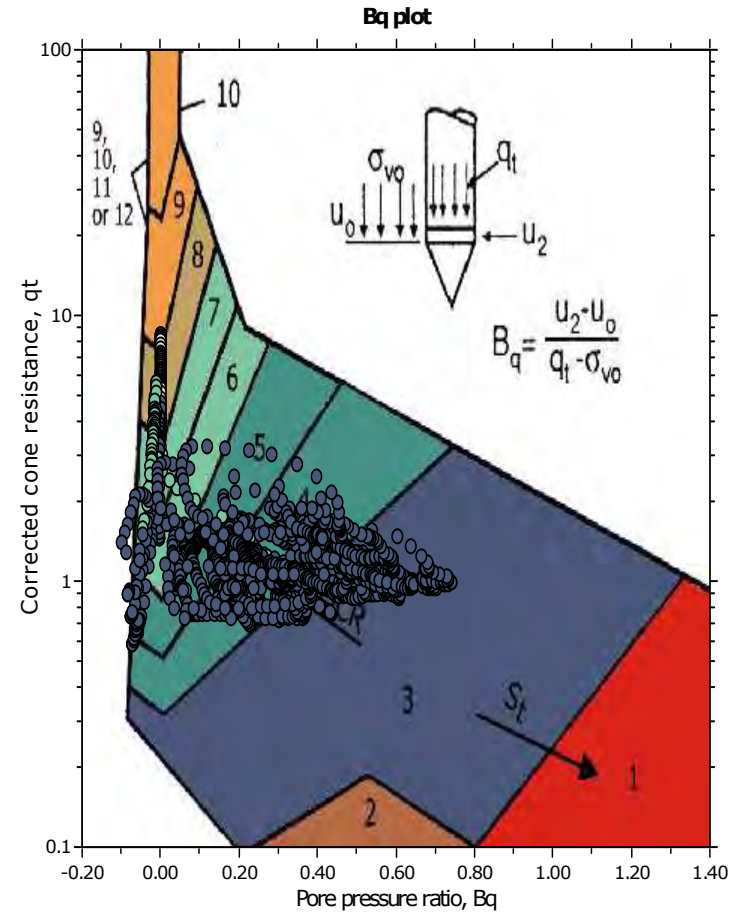
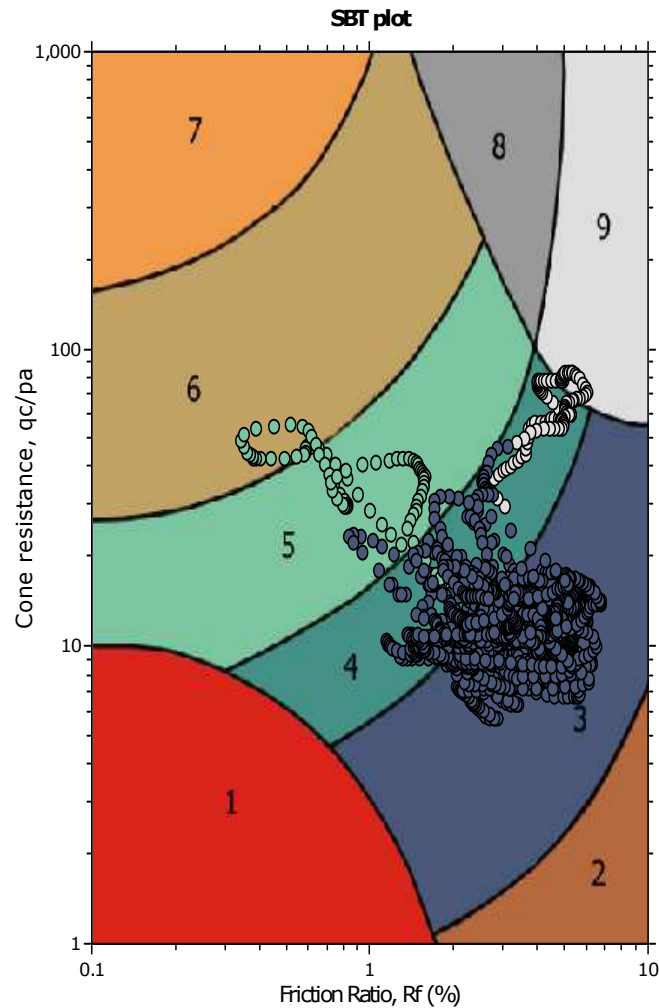
Prove penetrometriche statiche CPTU corredate di interpretazione geotecnica



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).



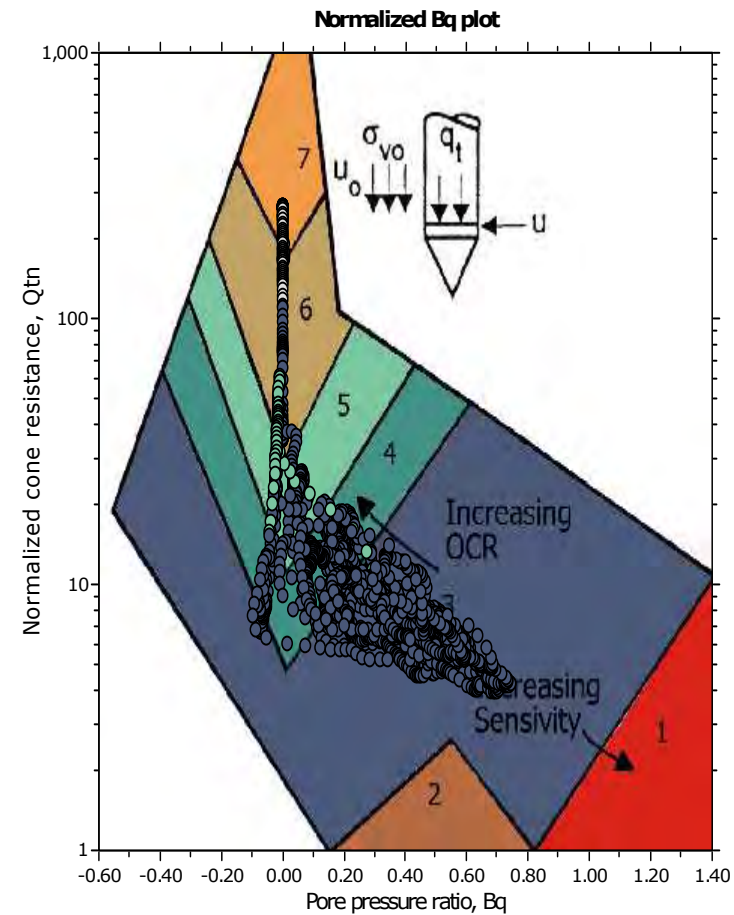
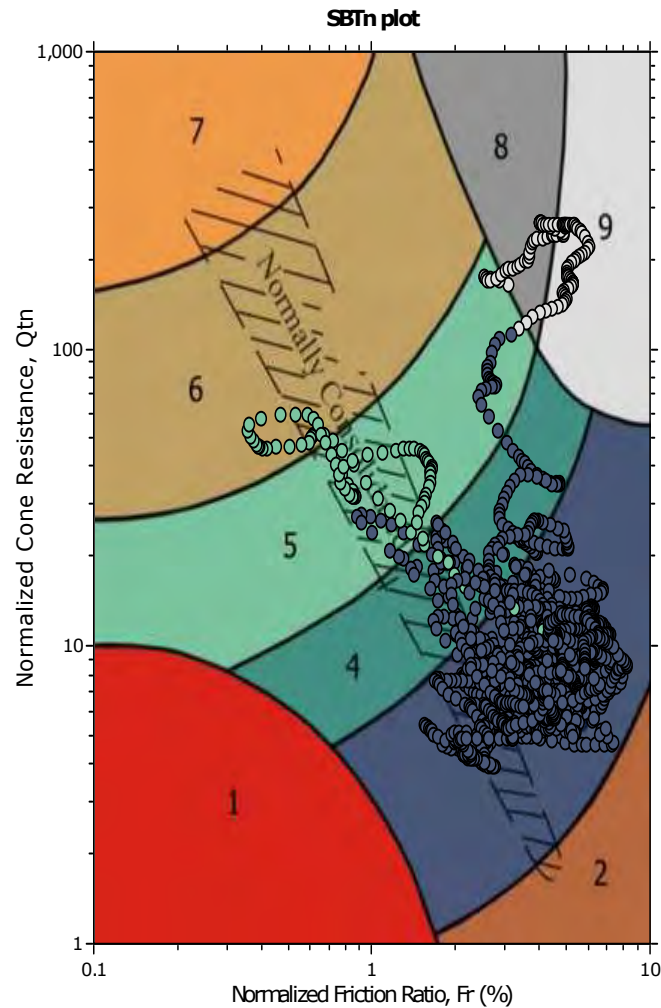
SBT - Bq plots



SBT legend

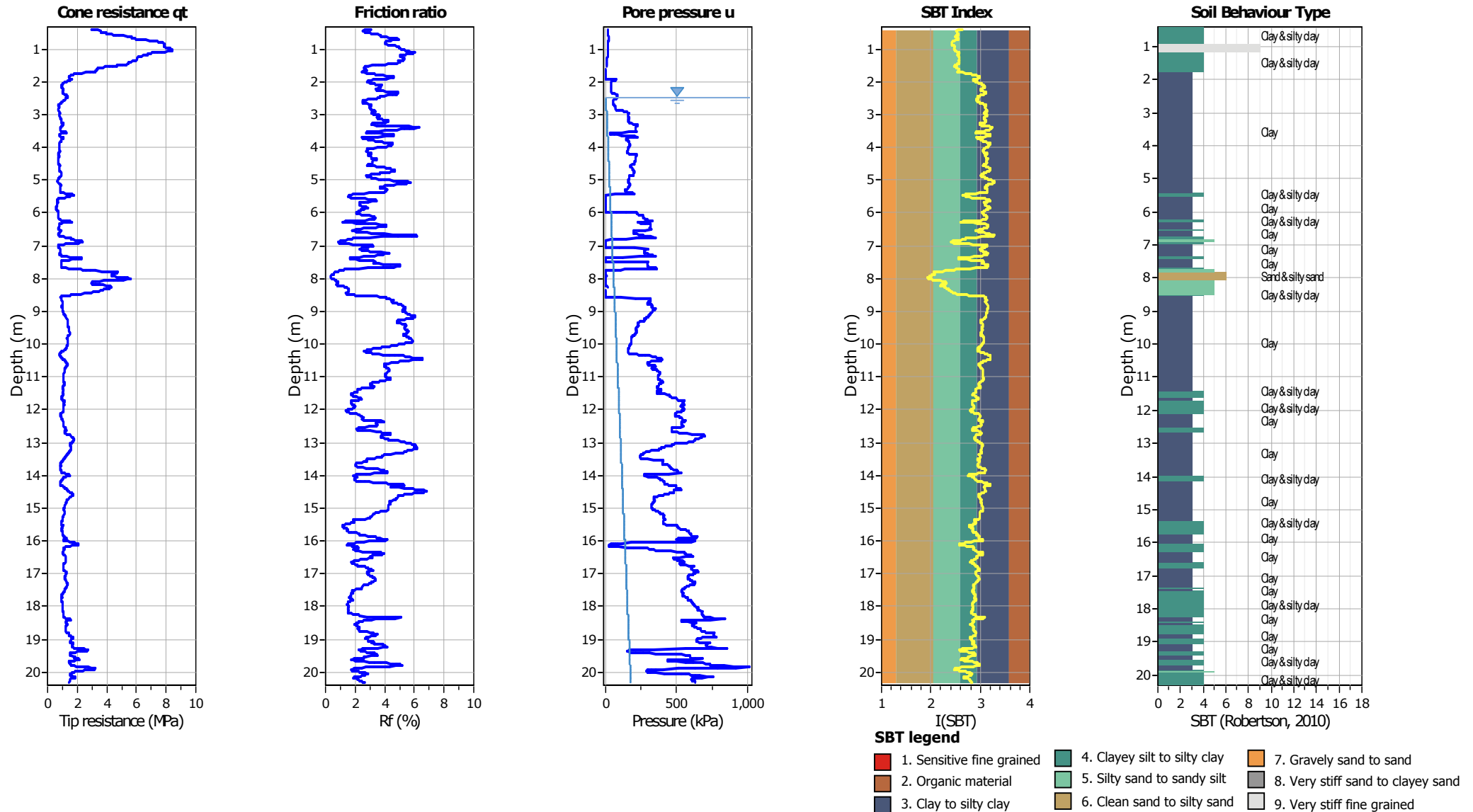
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

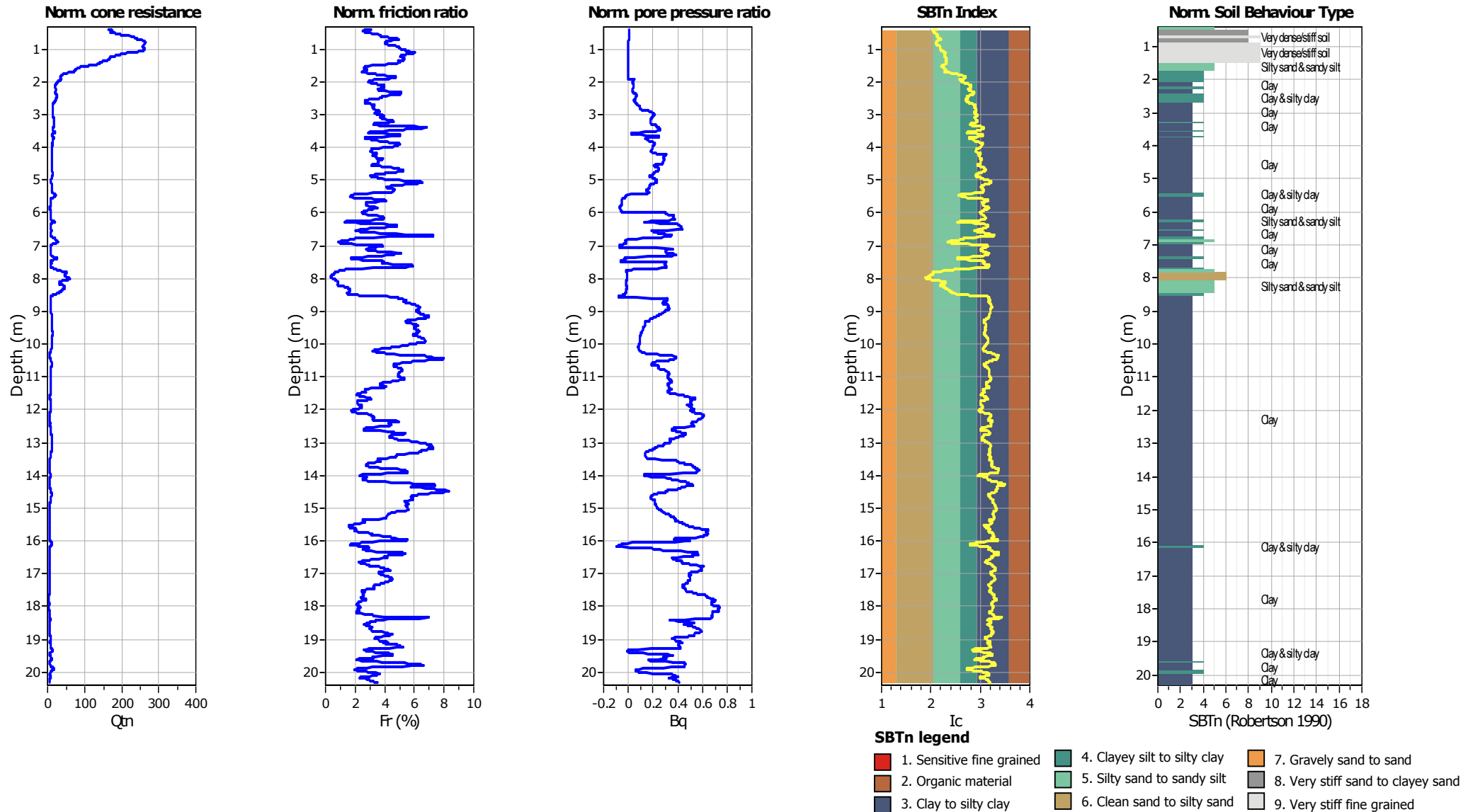
SBT - Bq plots (normalized)

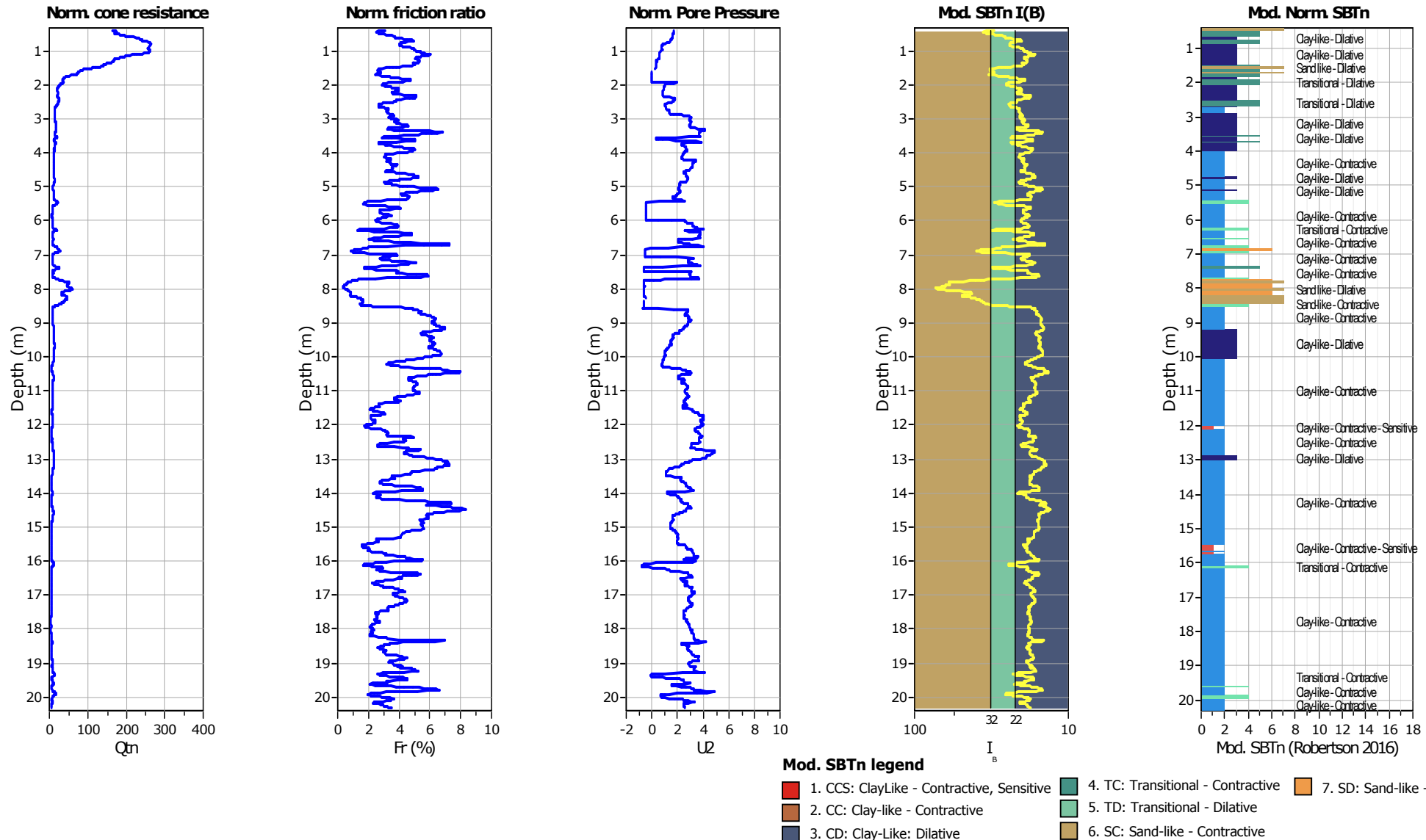


SBTn legend

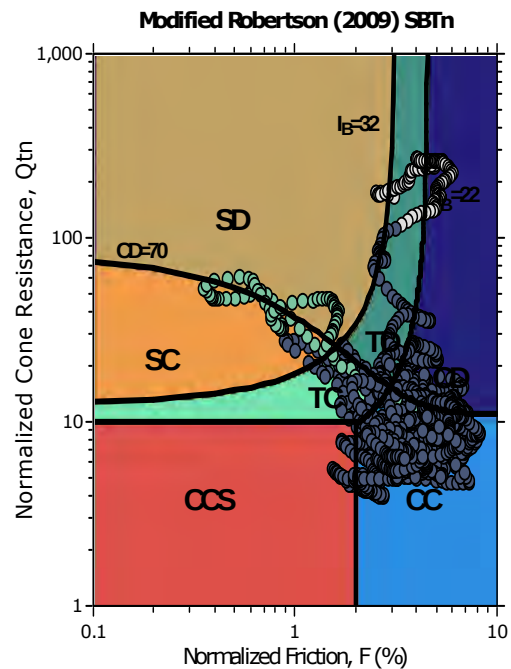
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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



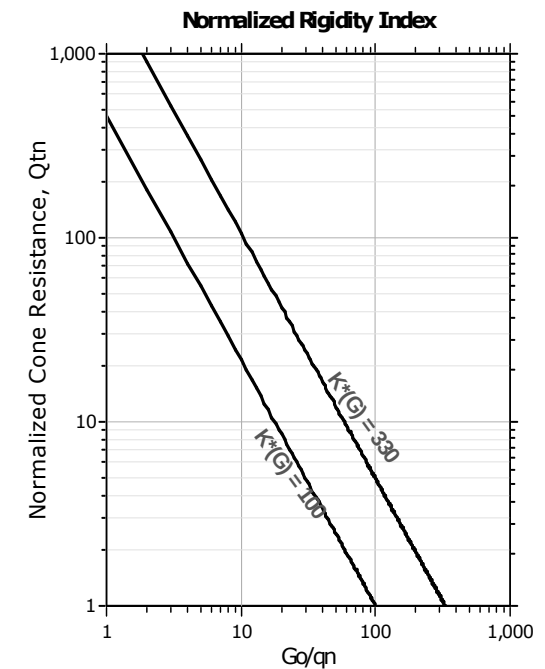
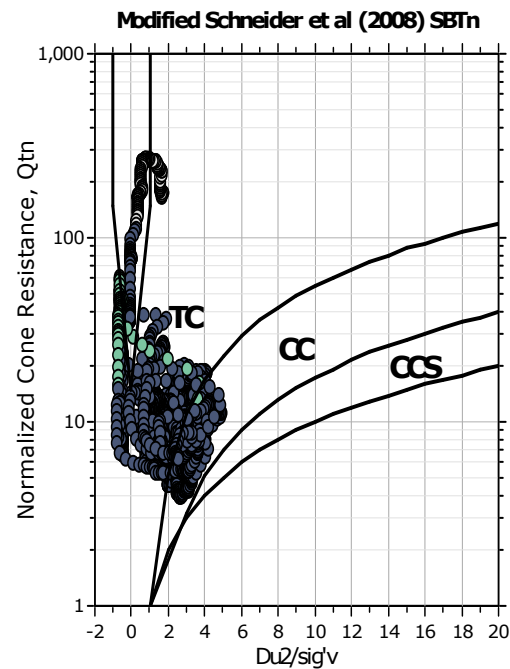




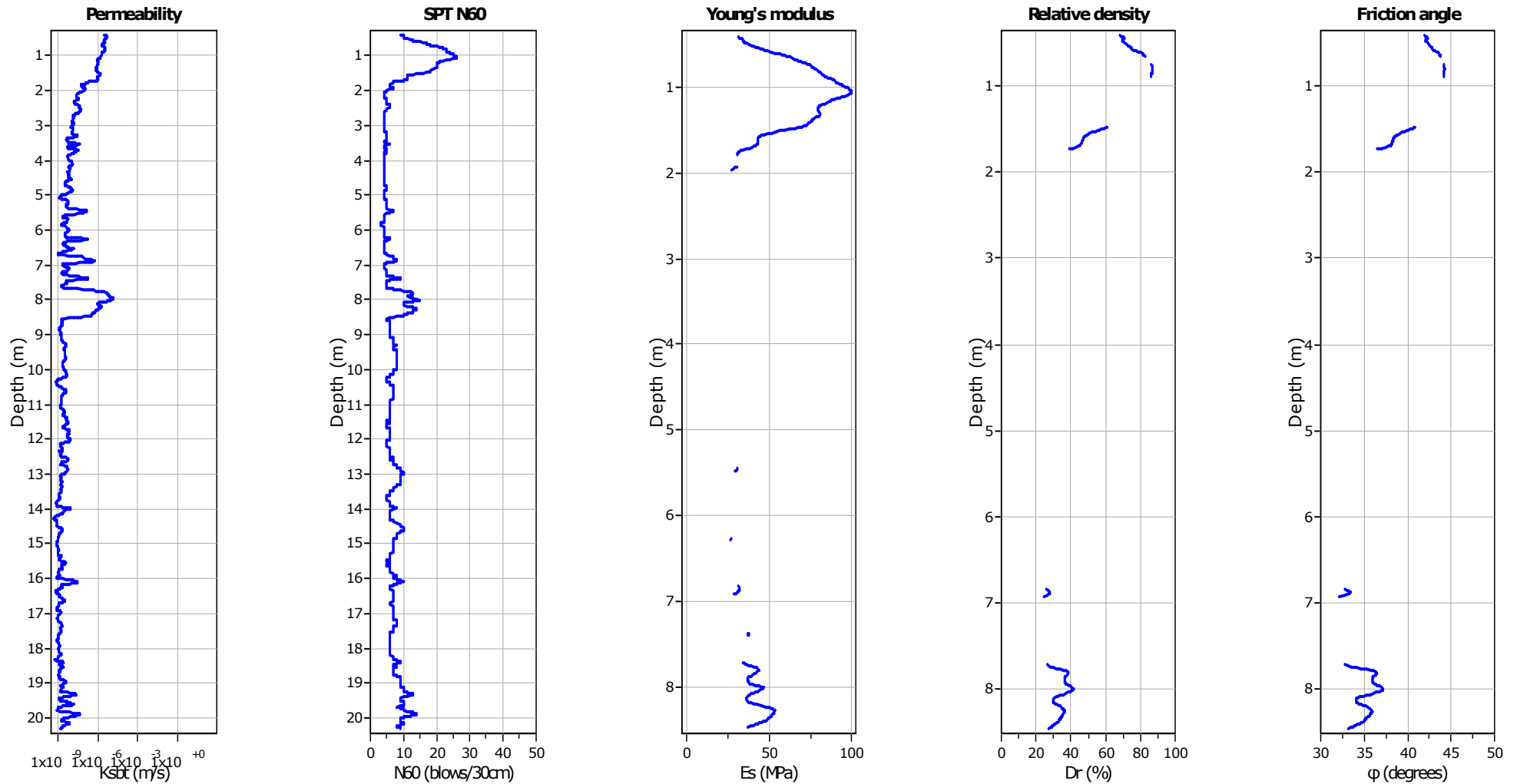
Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative



$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

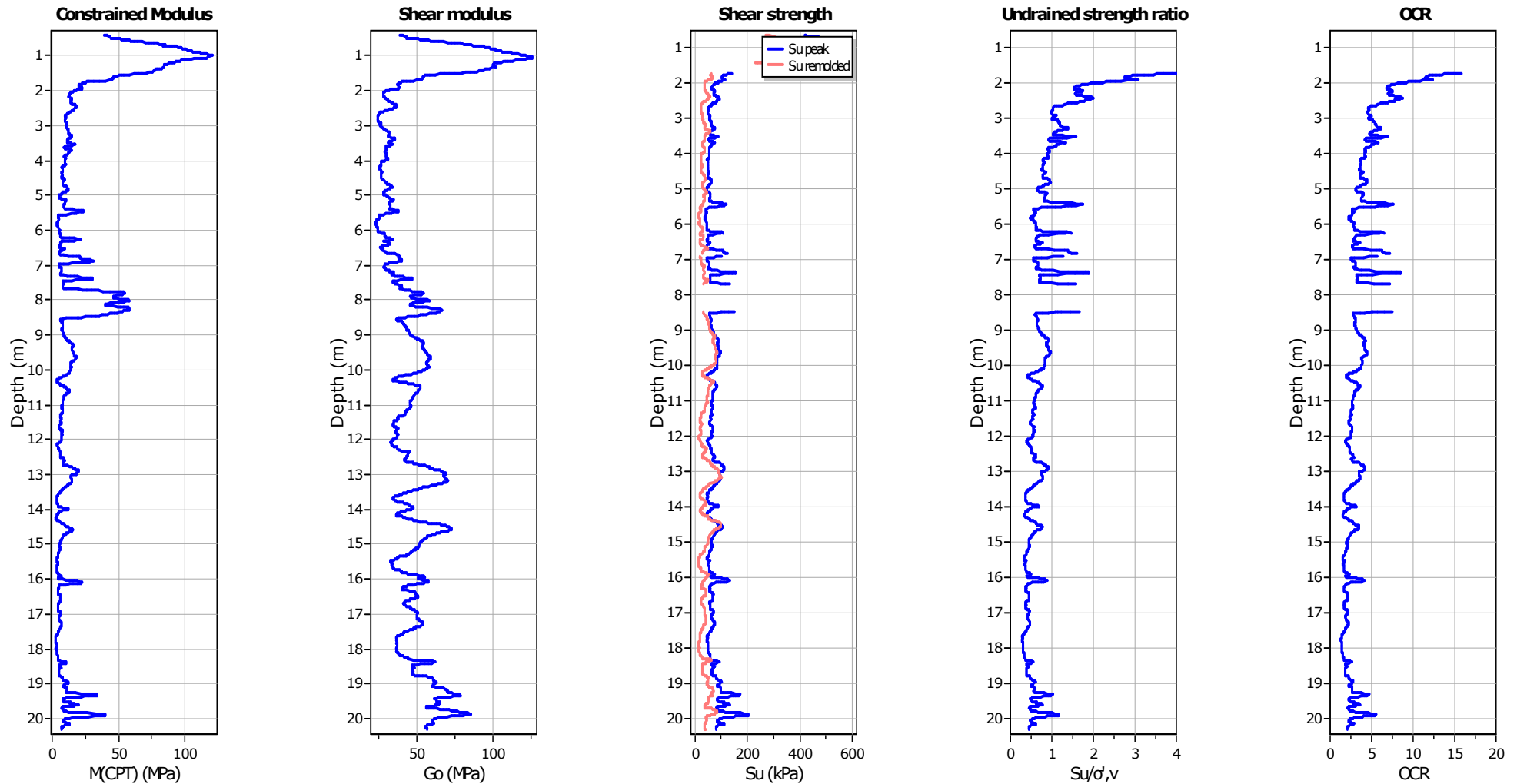
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)

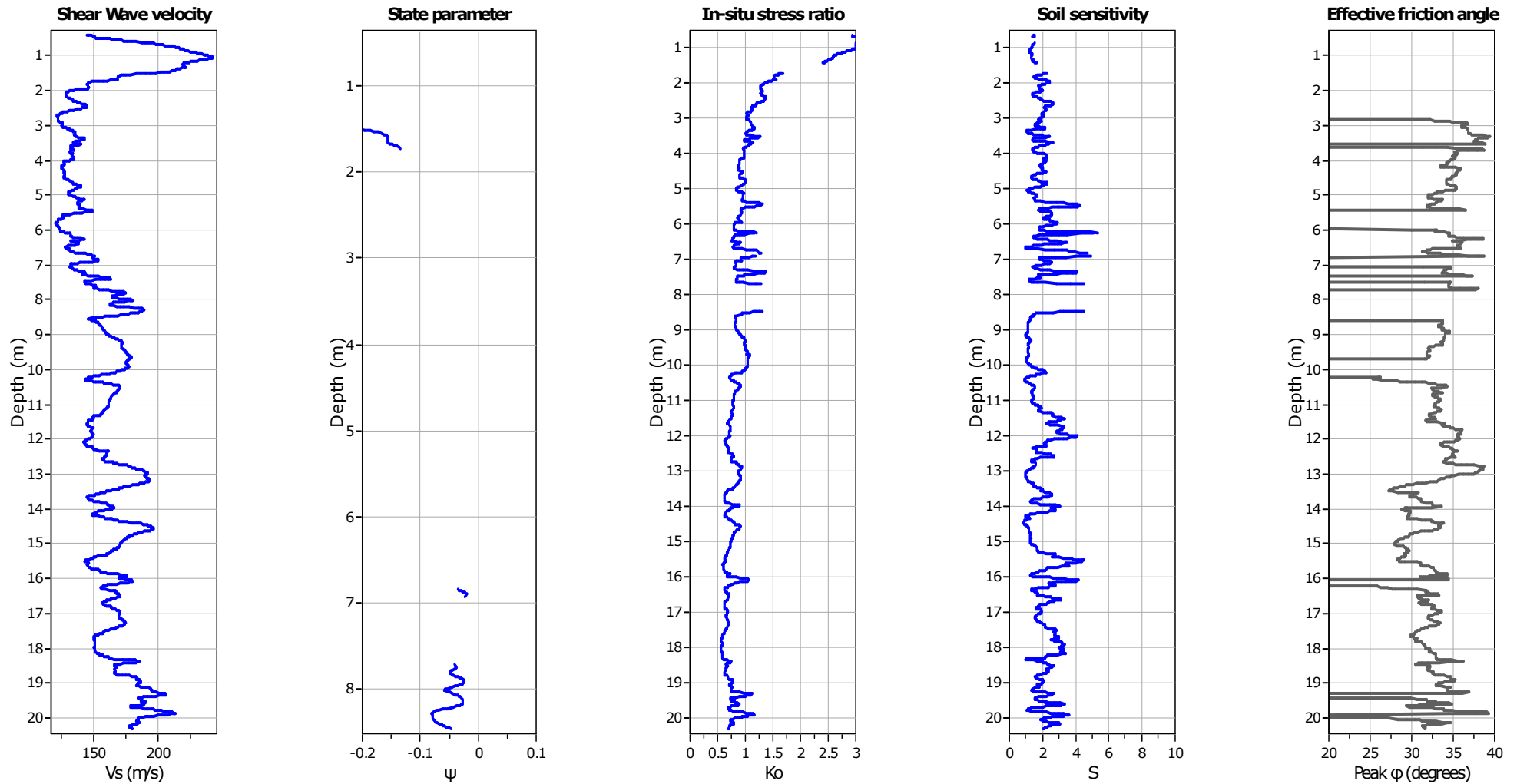
G_0 : Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

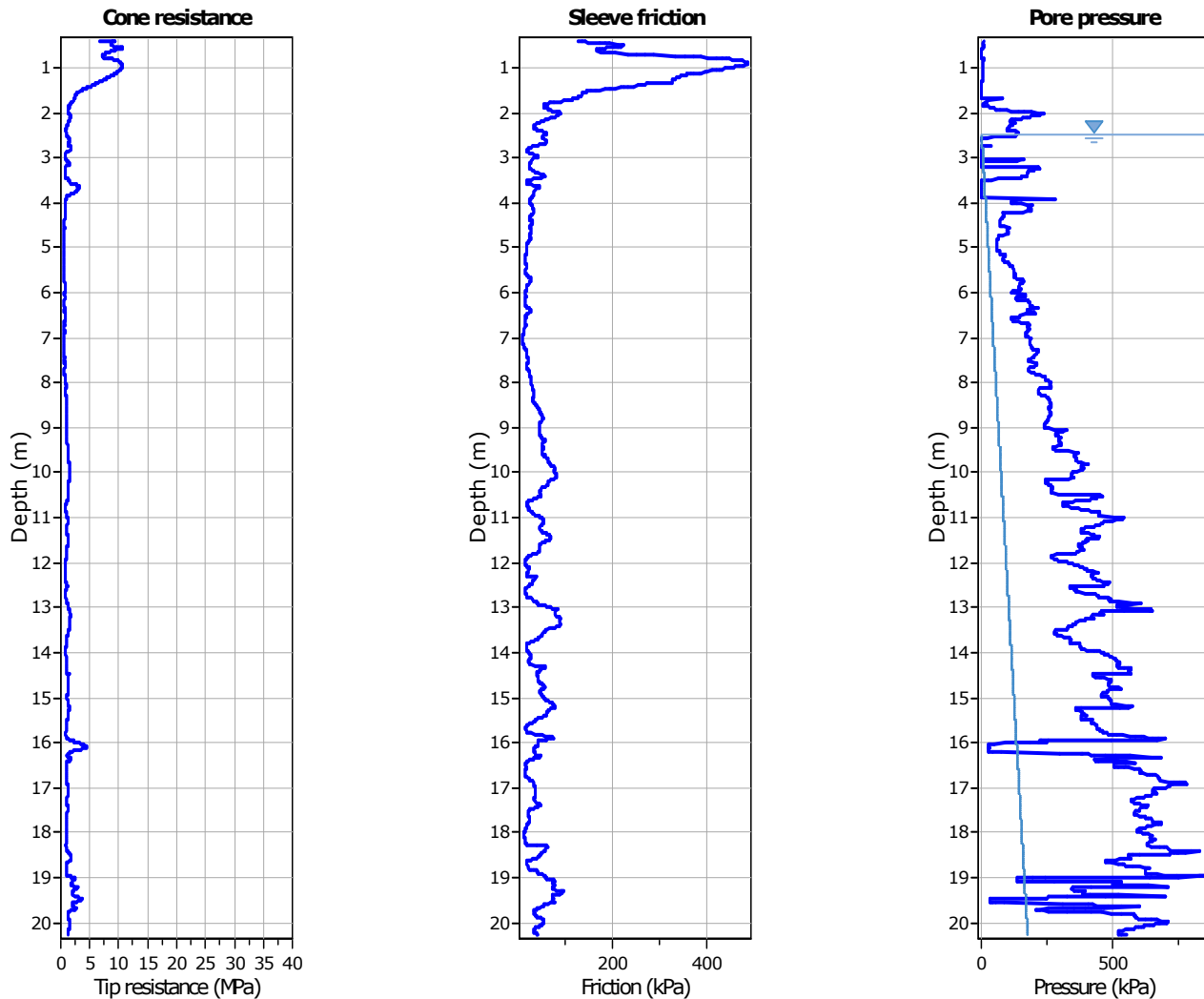
● Flat Dilatometer Test data



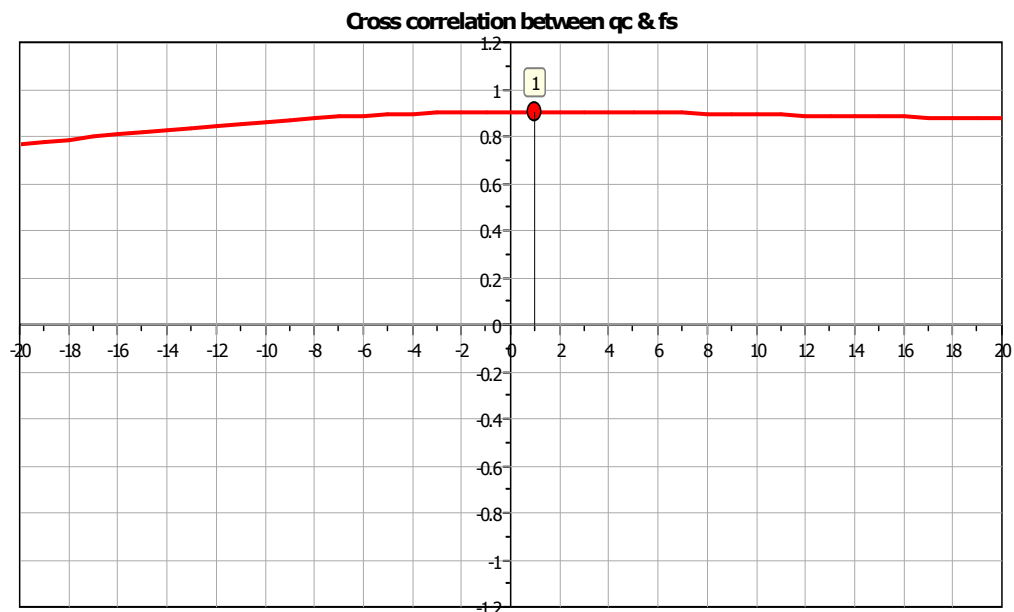
Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

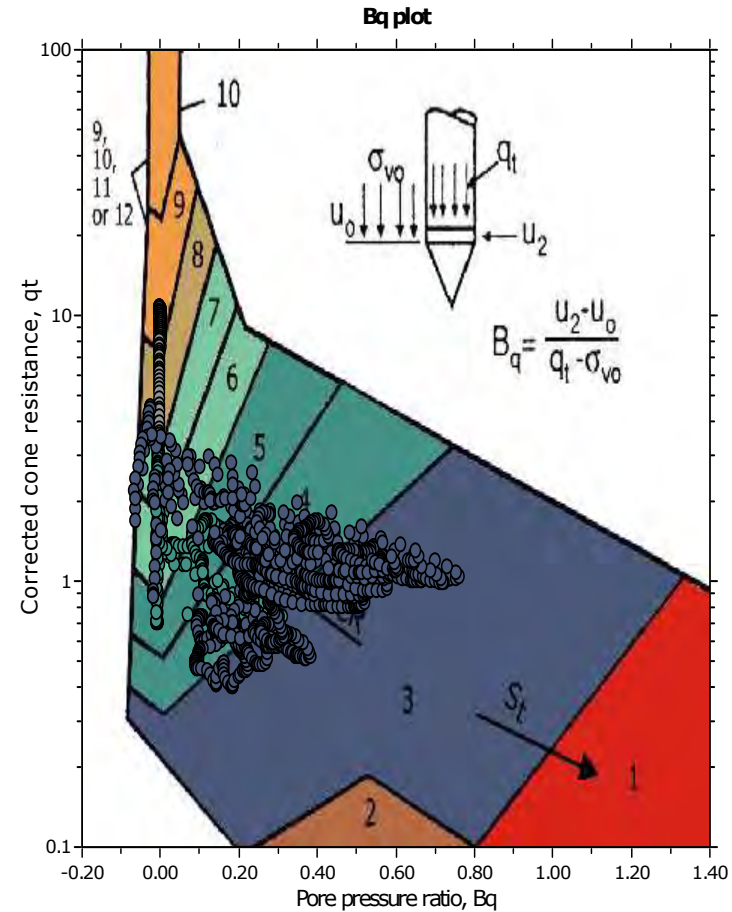
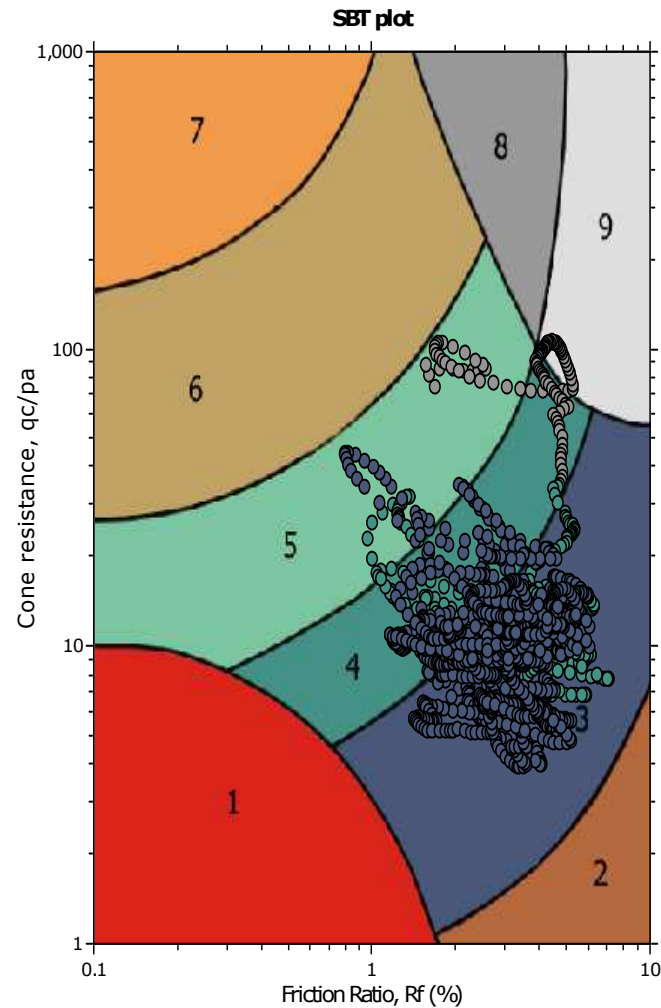
—●— User defined estimation data



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).



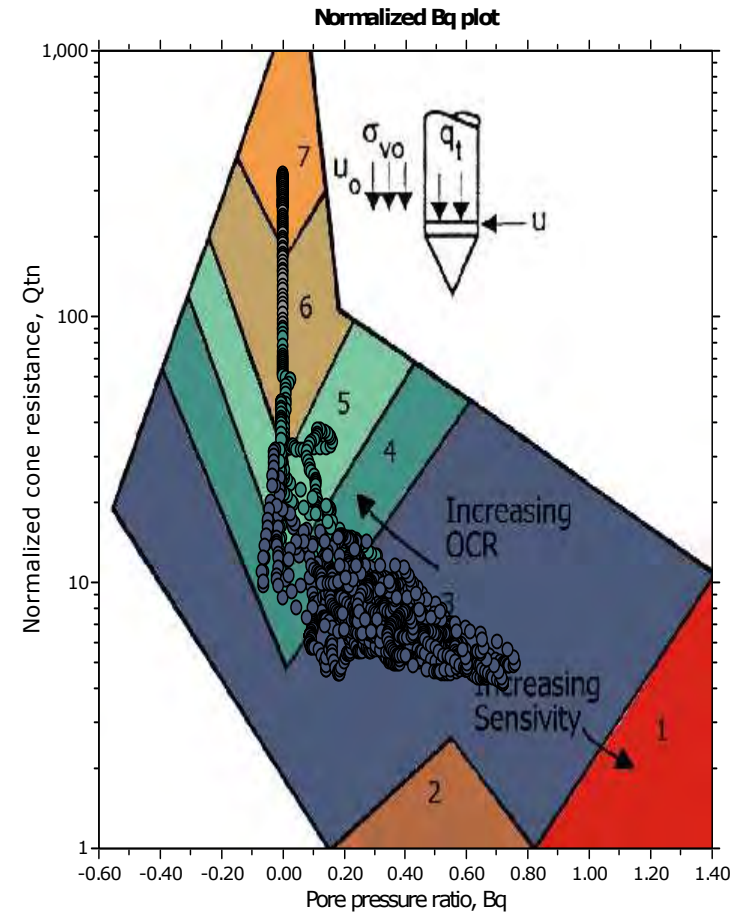
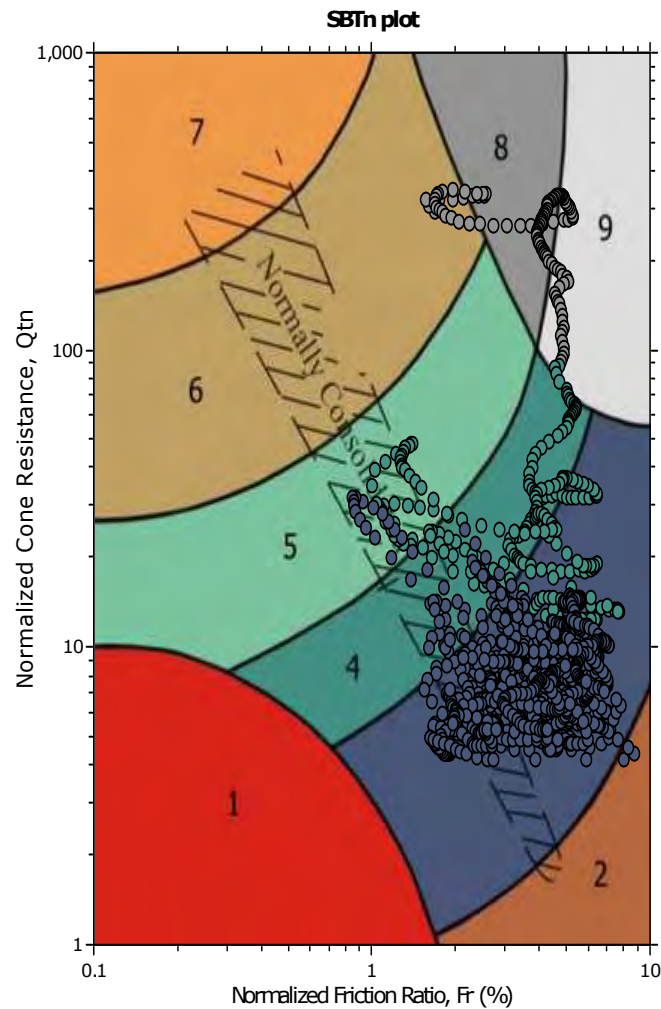
SBT - Bq plots



SBT legend

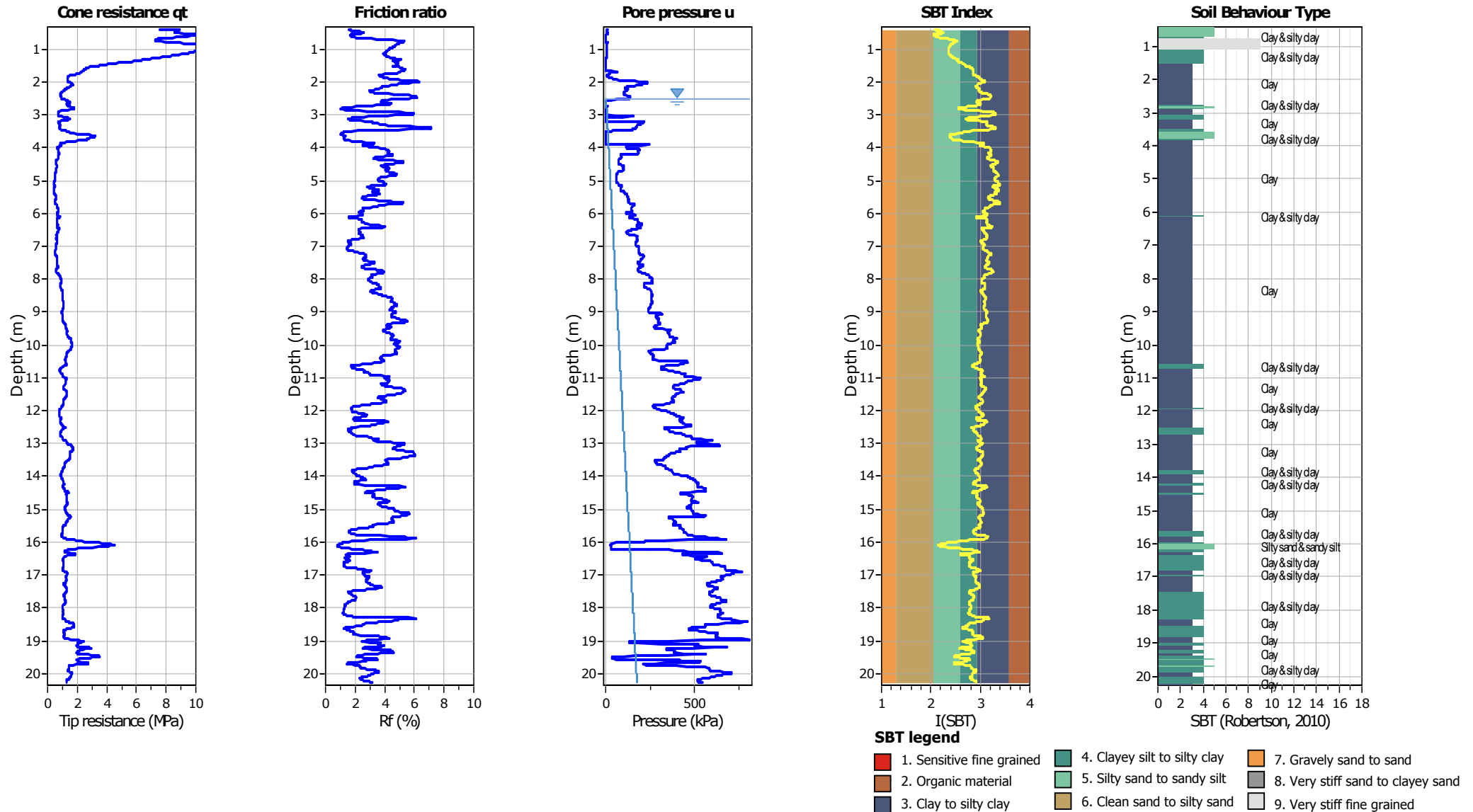
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

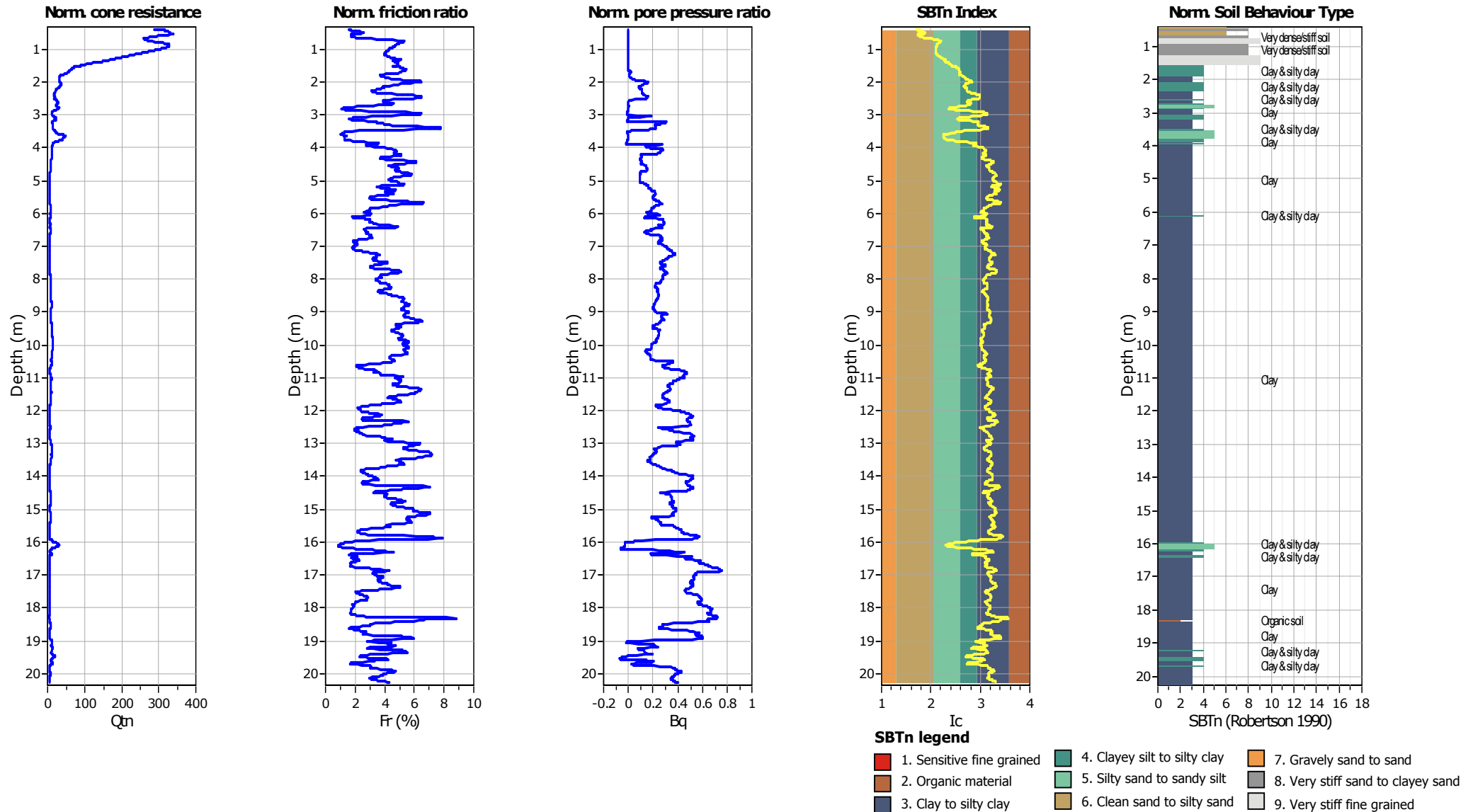
SBT - Bq plots (normalized)



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 |



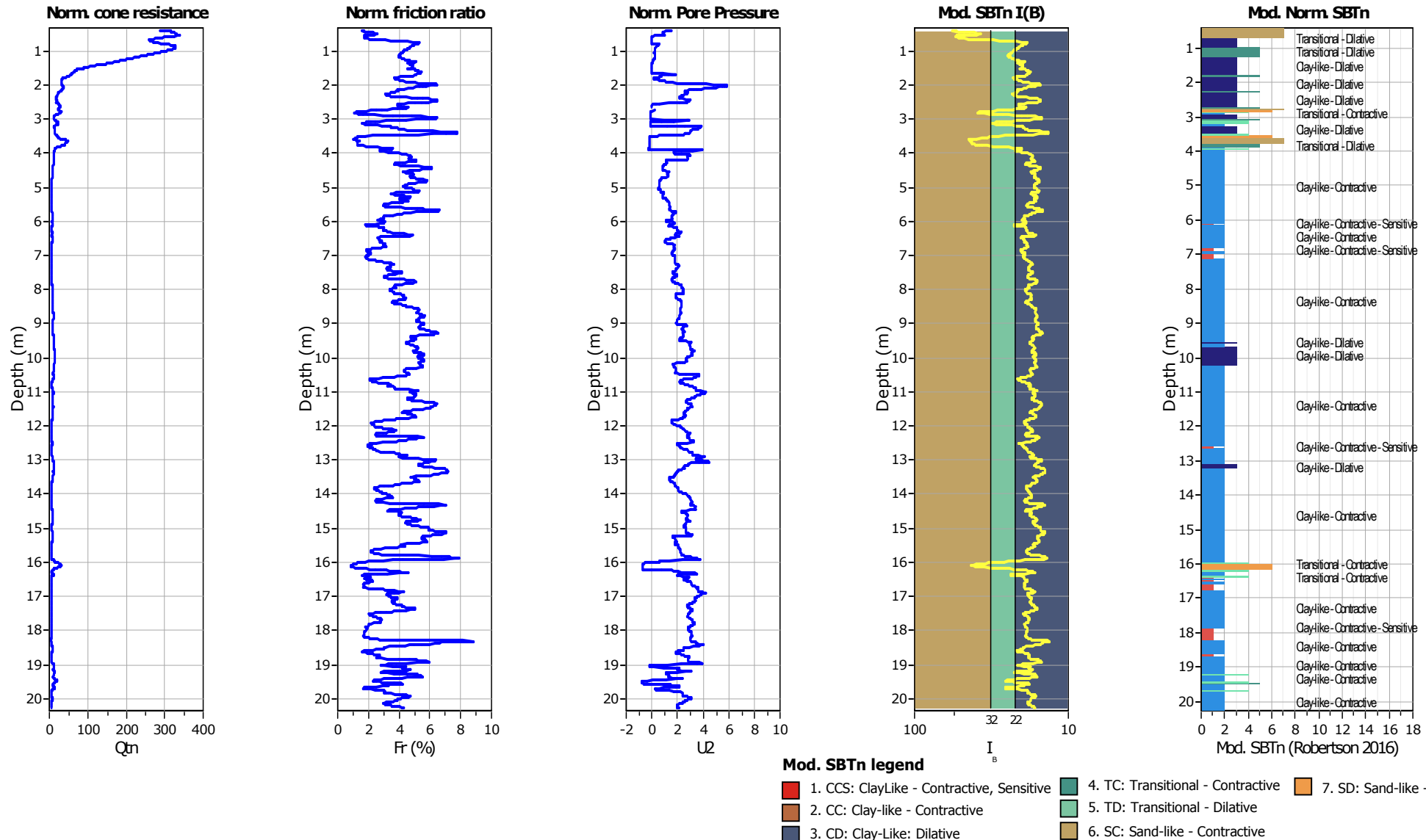


Project:

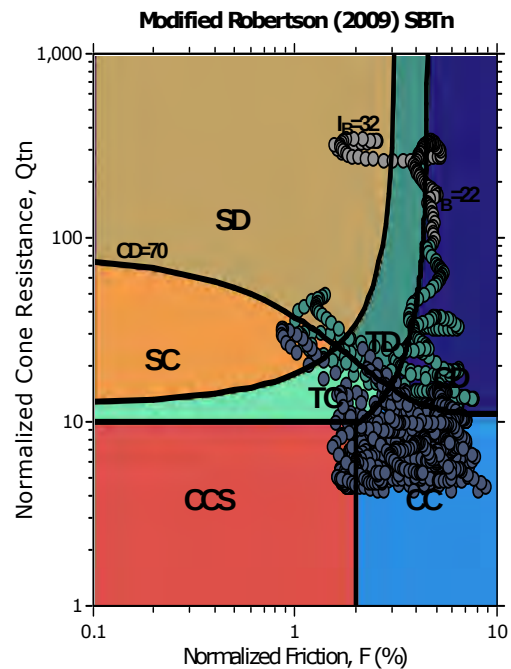
Location:

CPT: 2t

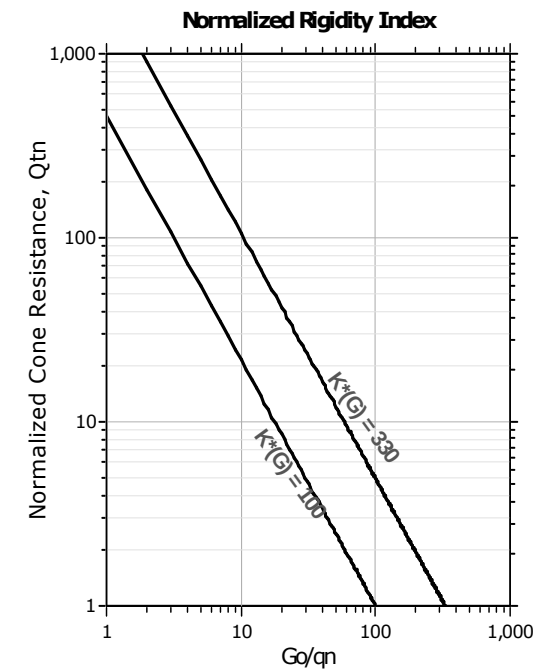
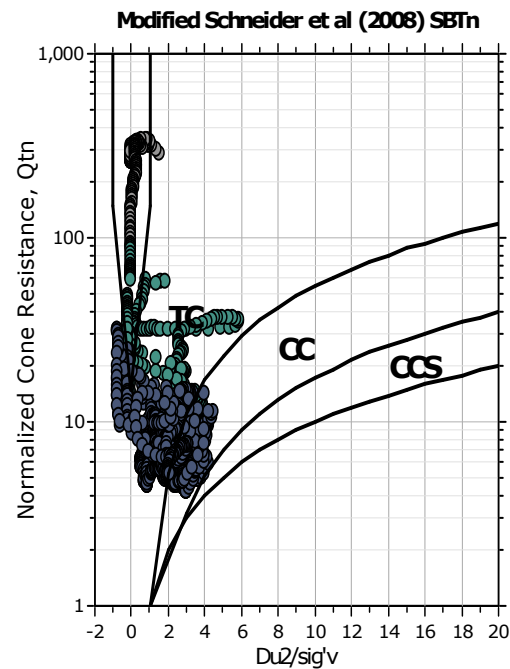
Total depth: 20.27 m, Date: 25/08/2021



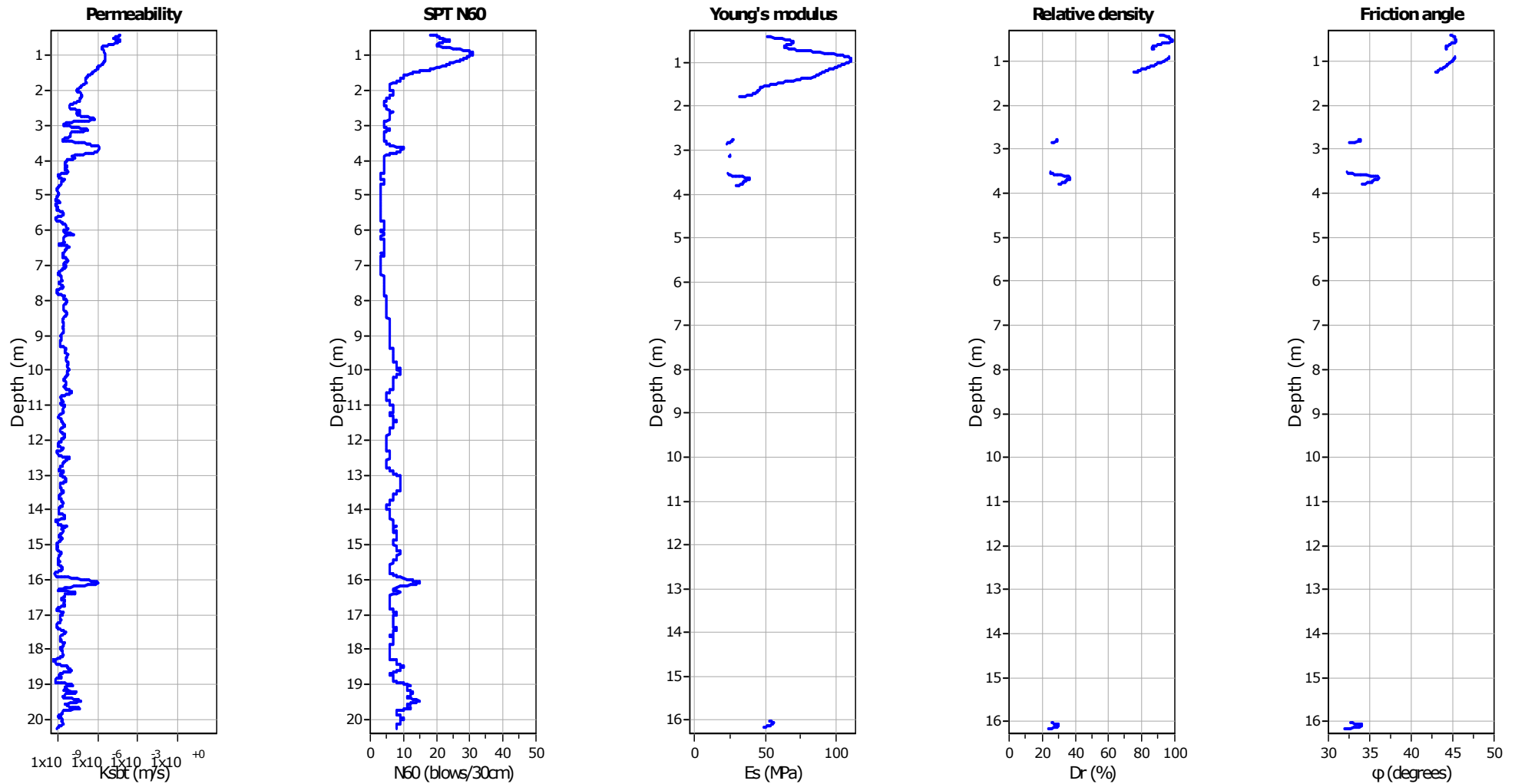
Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative



$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

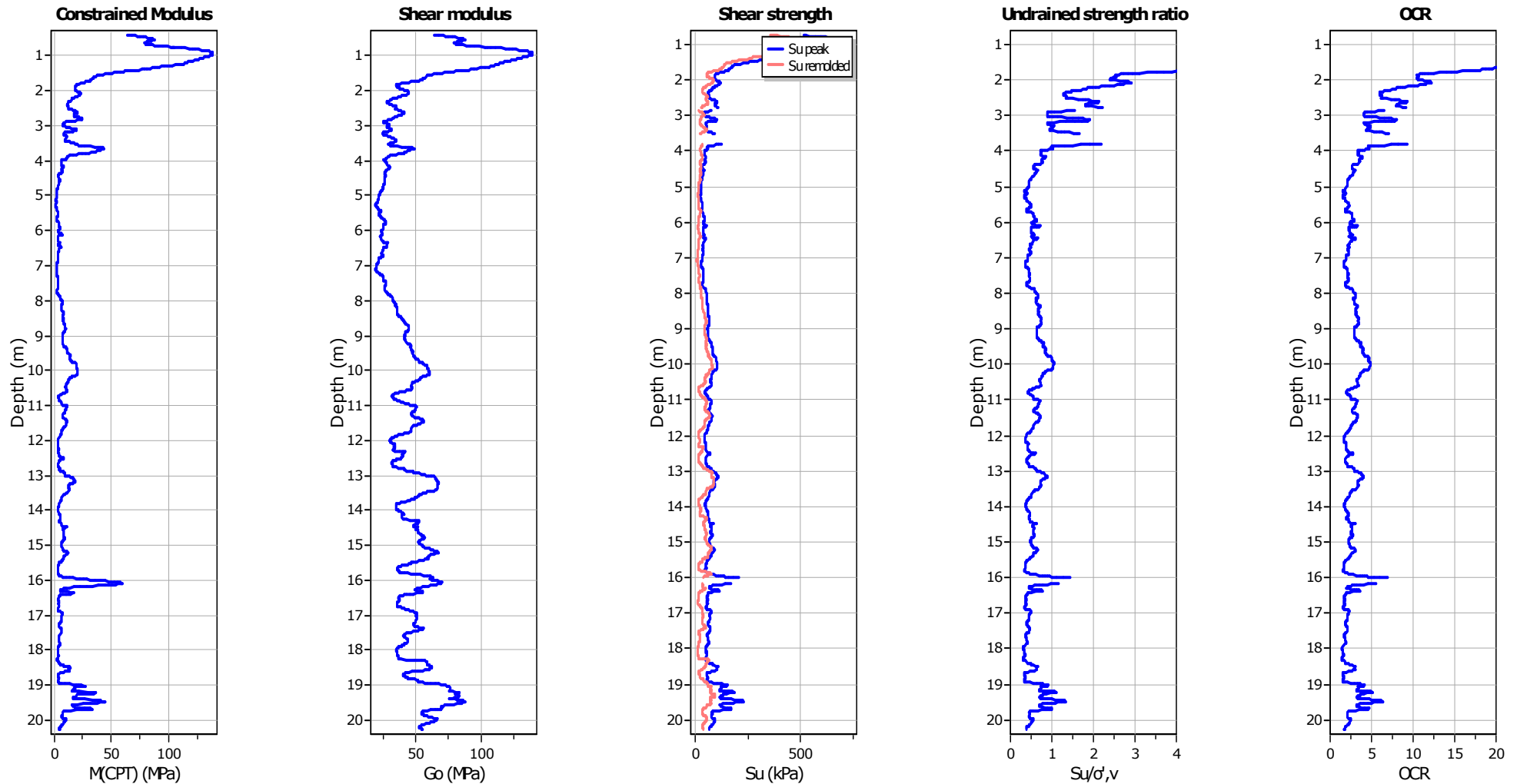
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)

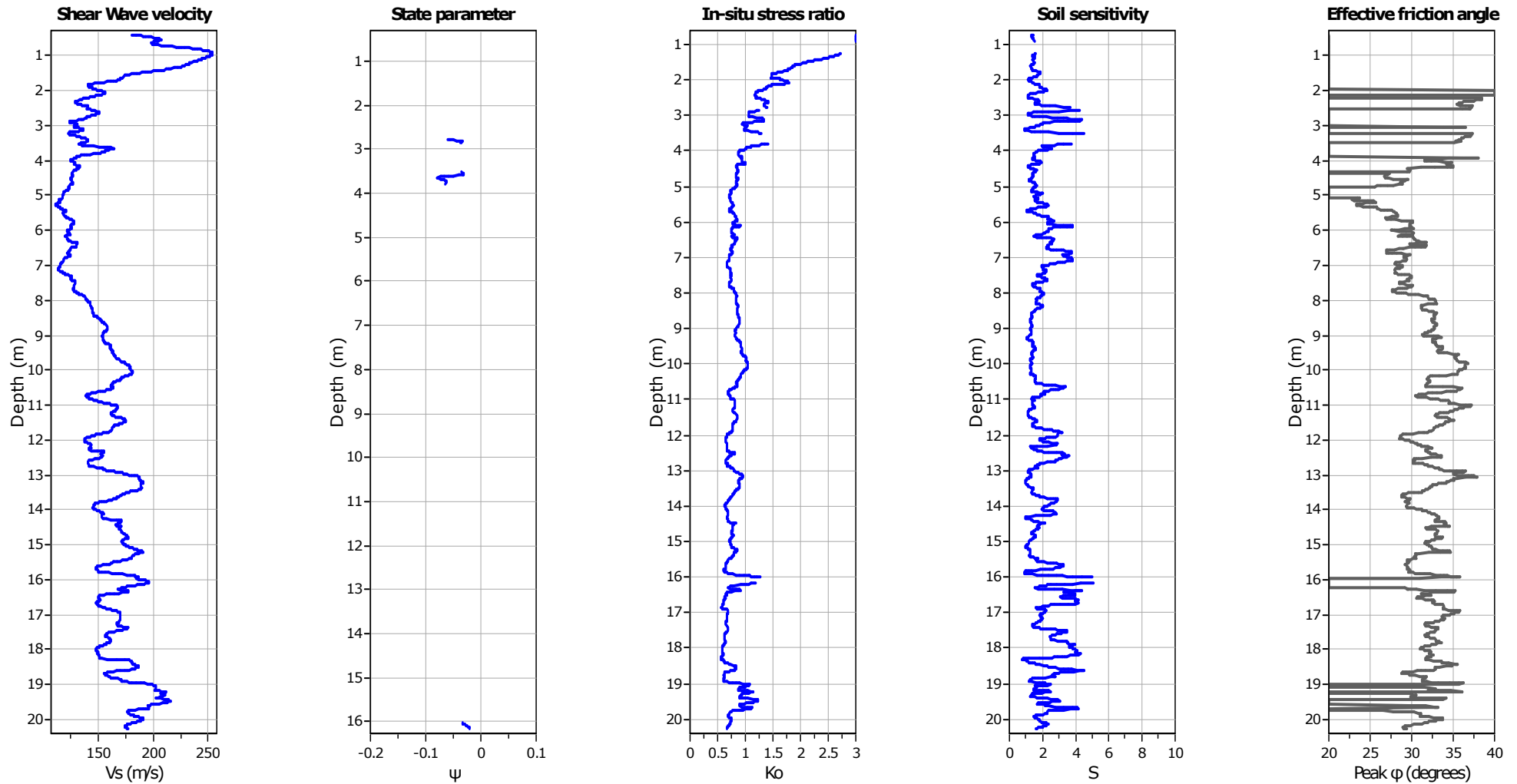
Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

—●— User defined estimation data

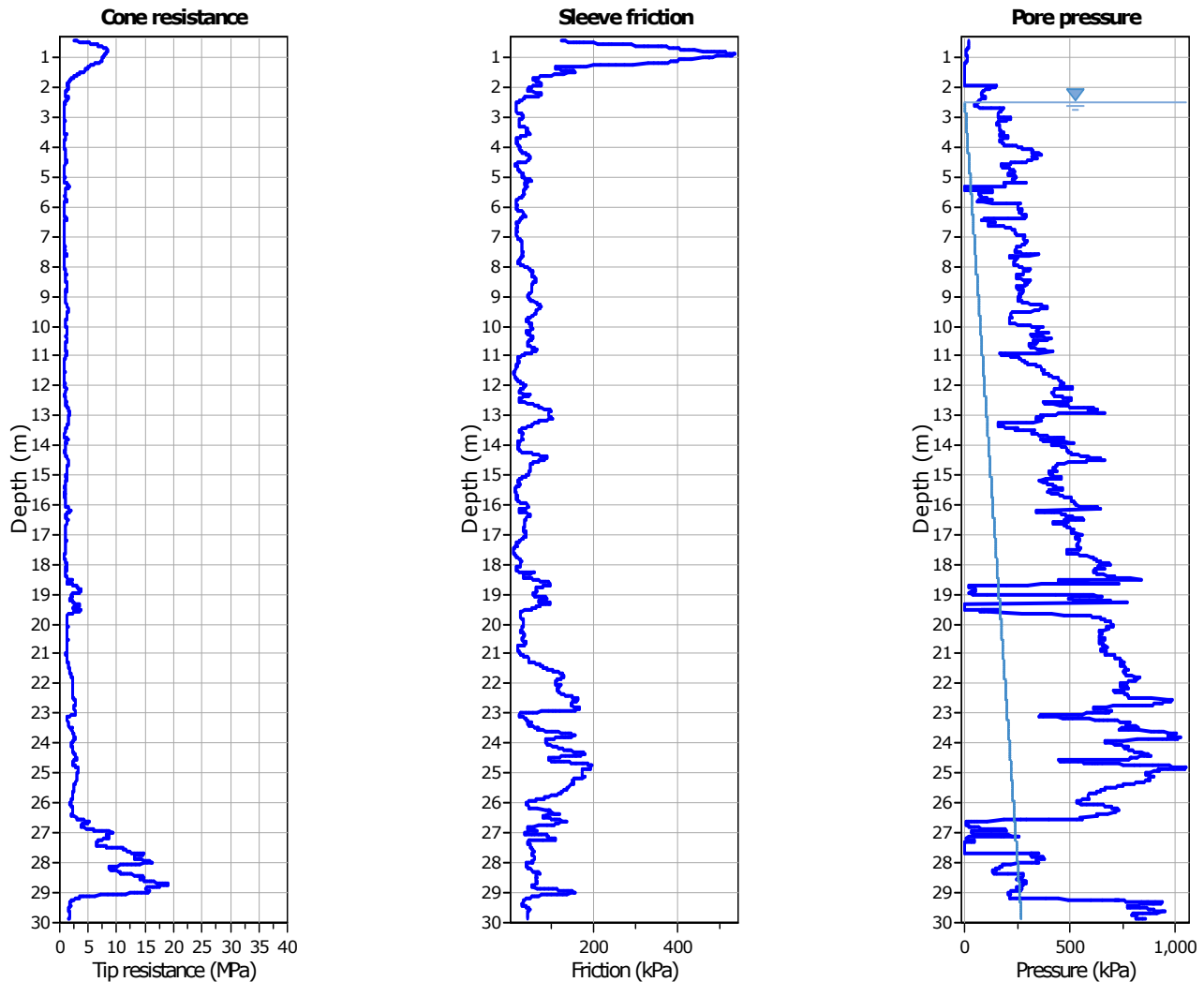
—●— Flat Dilatometer Test data



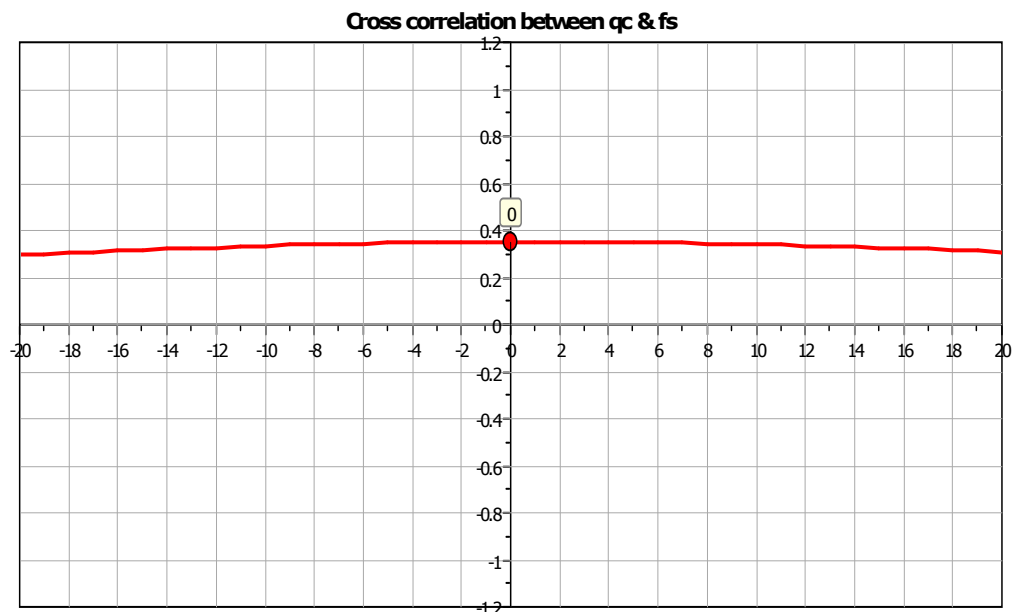
Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

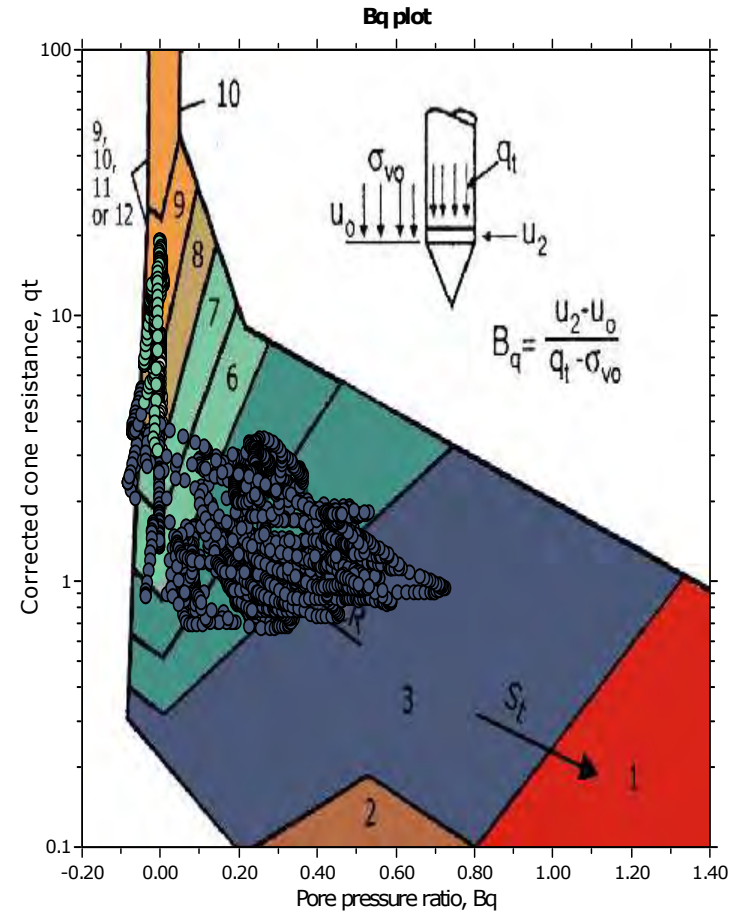
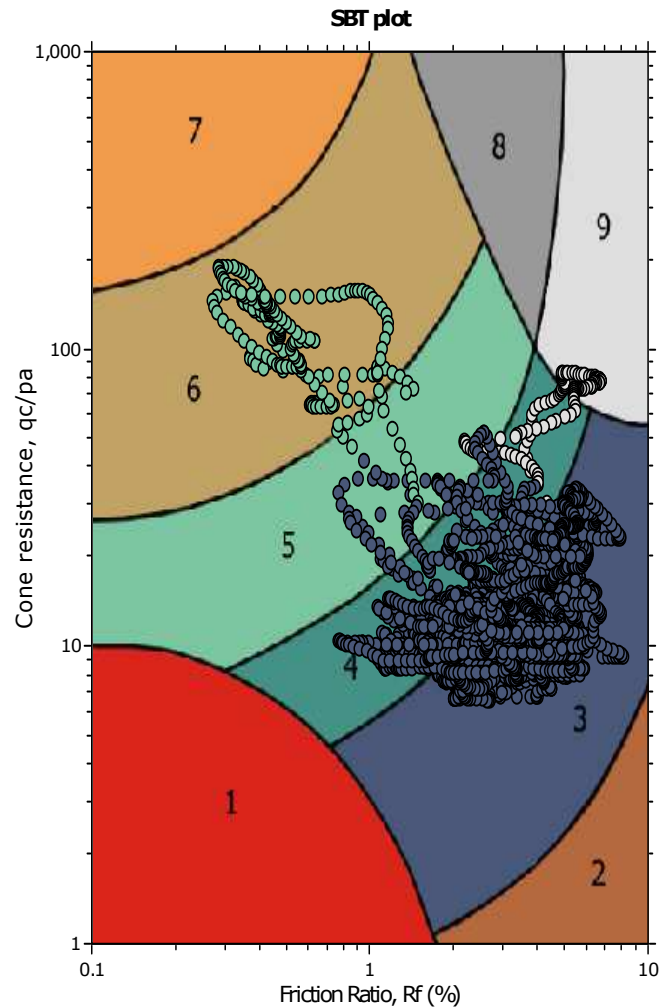
—●— User defined estimation data



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).



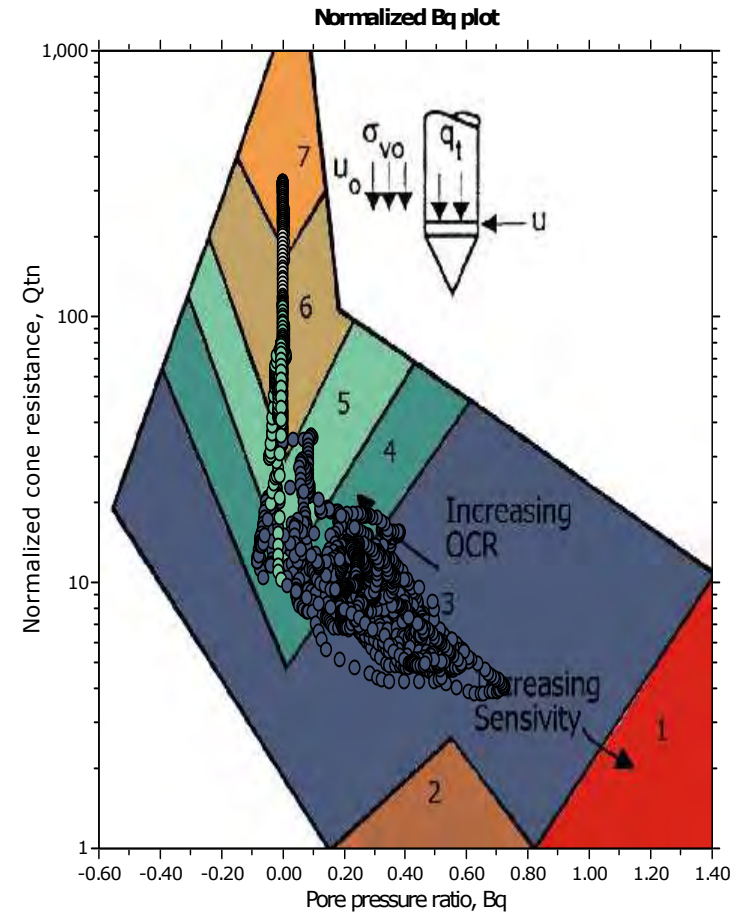
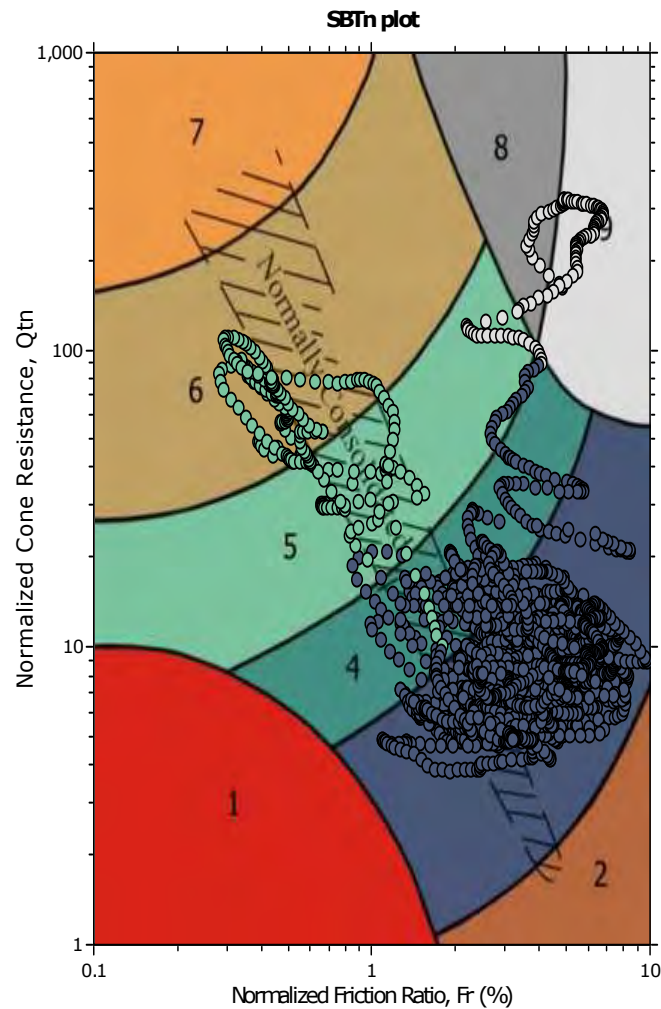
SBT - Bq plots



SBT legend

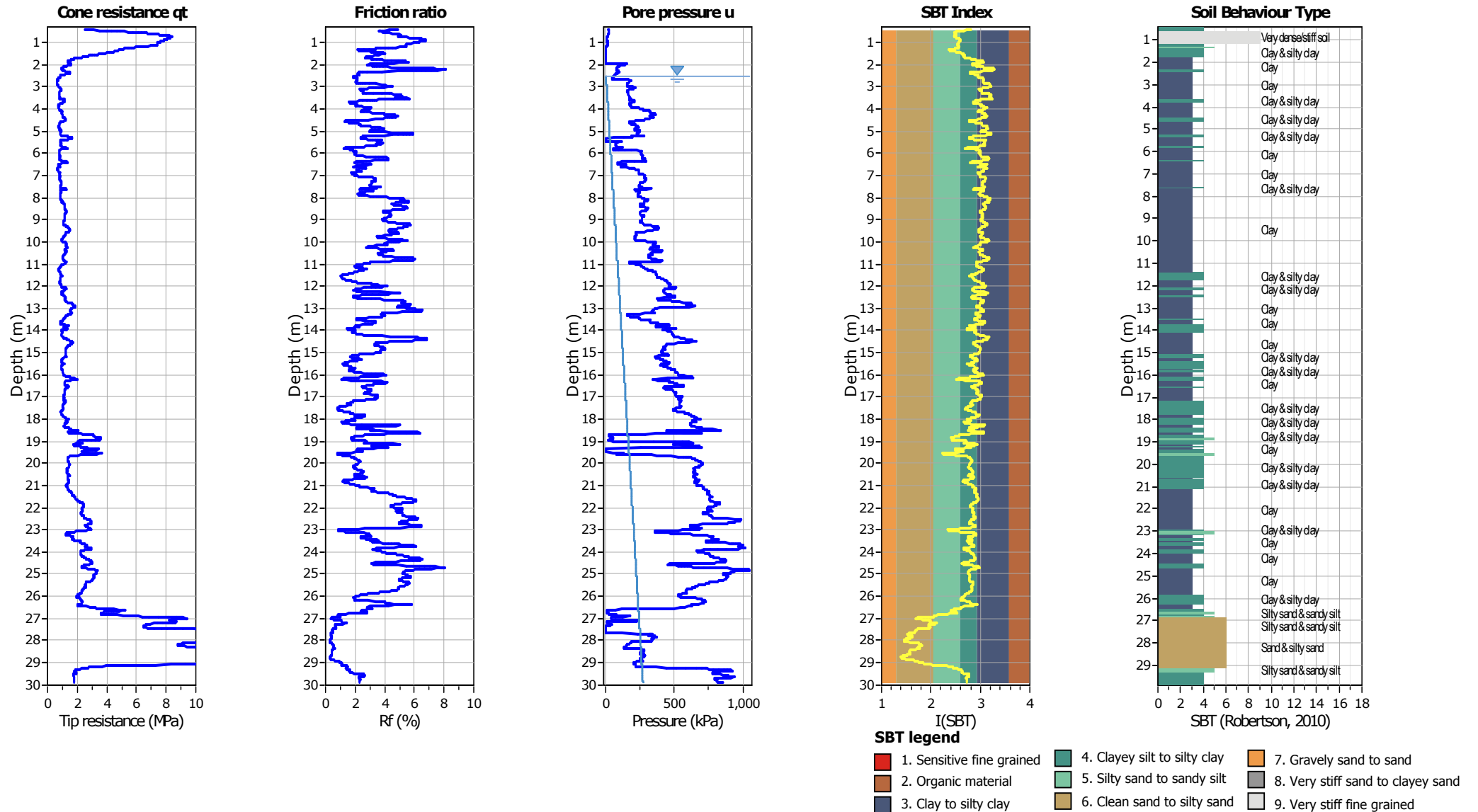
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

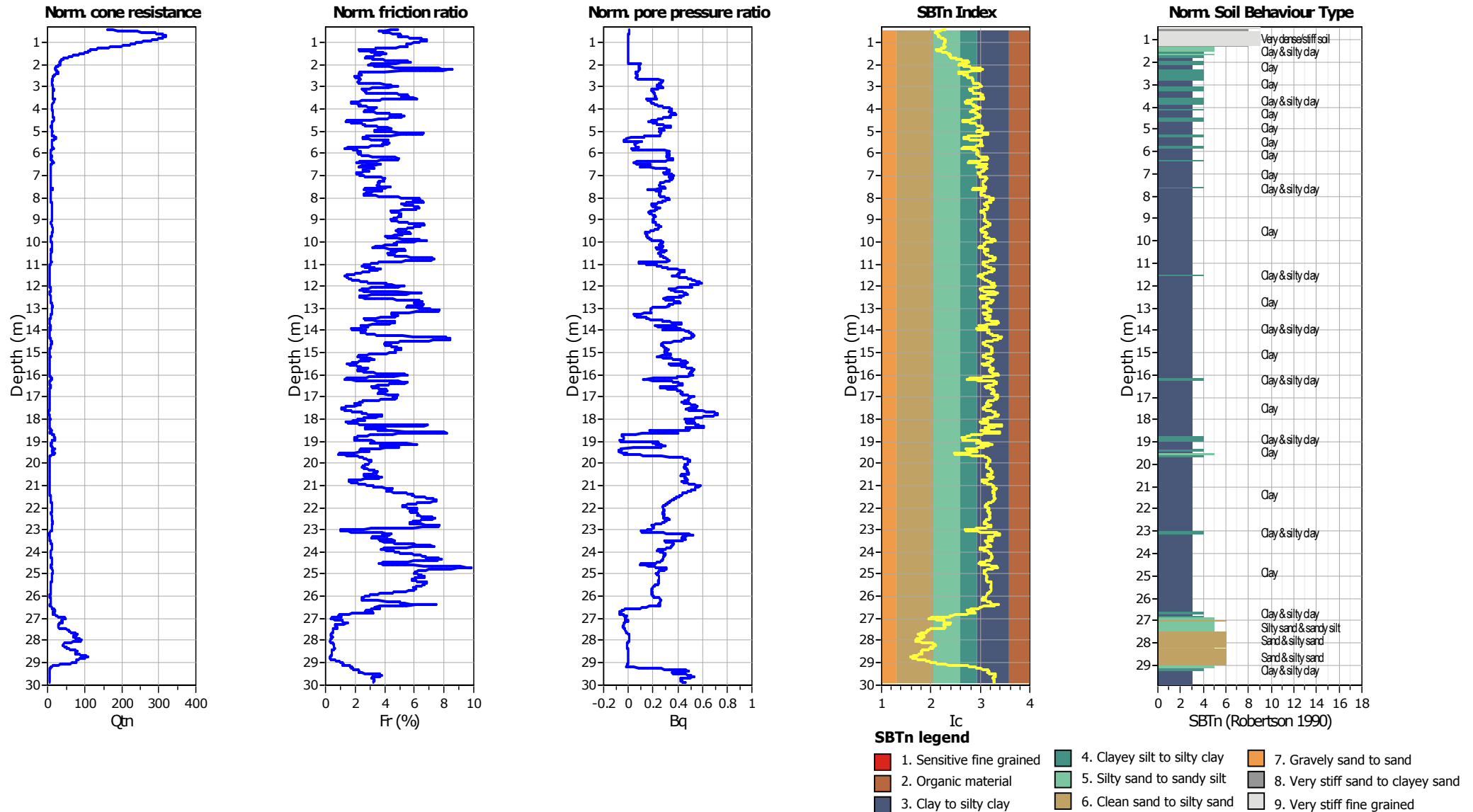
SBT - Bq plots (normalized)



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 |



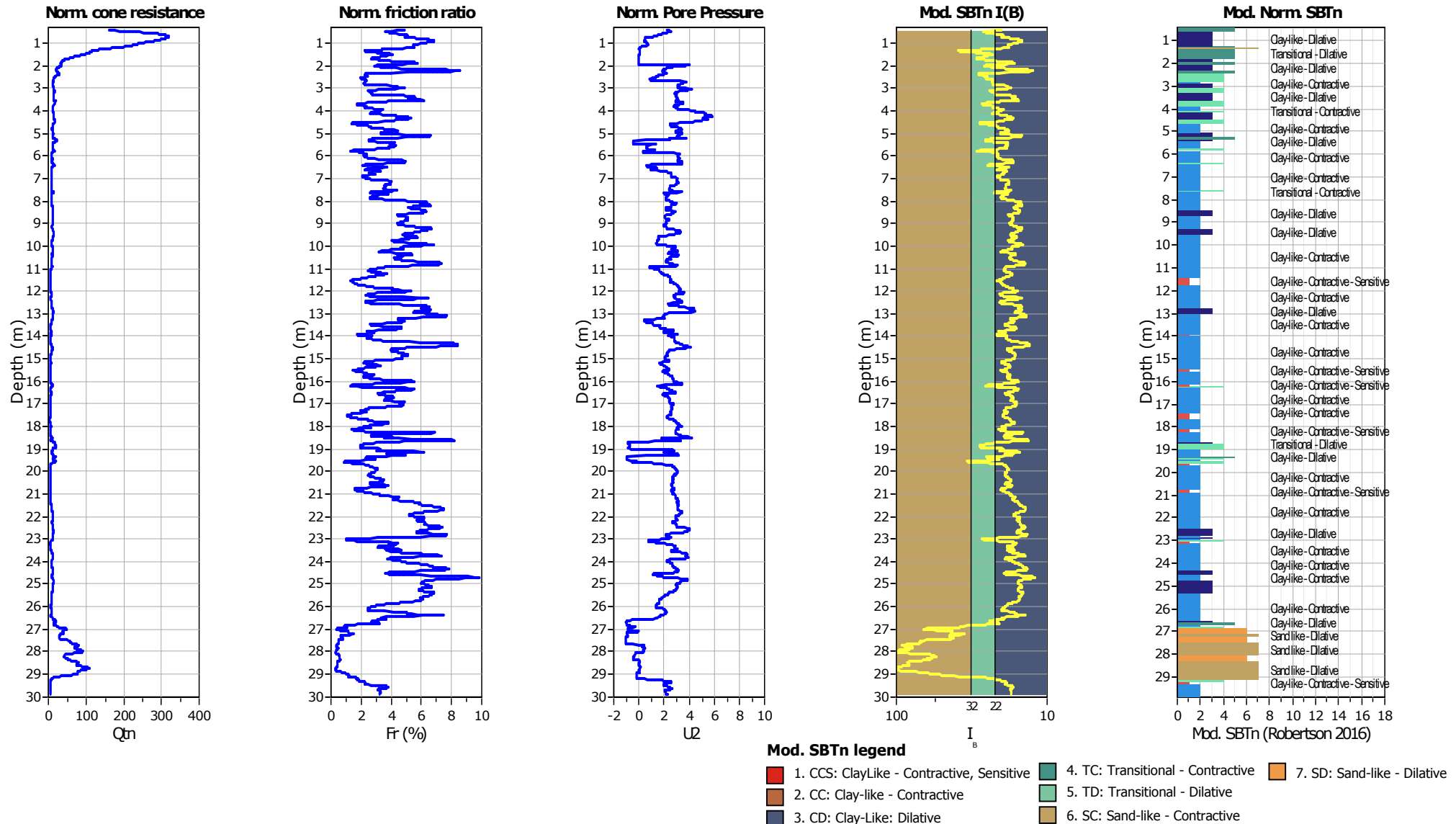


Project:

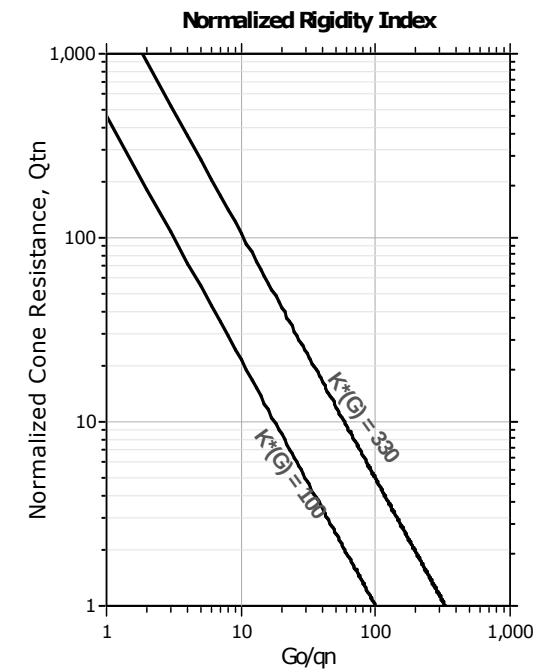
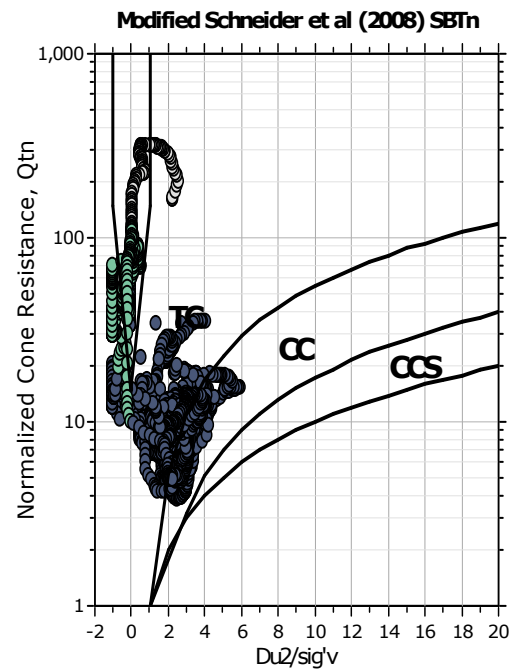
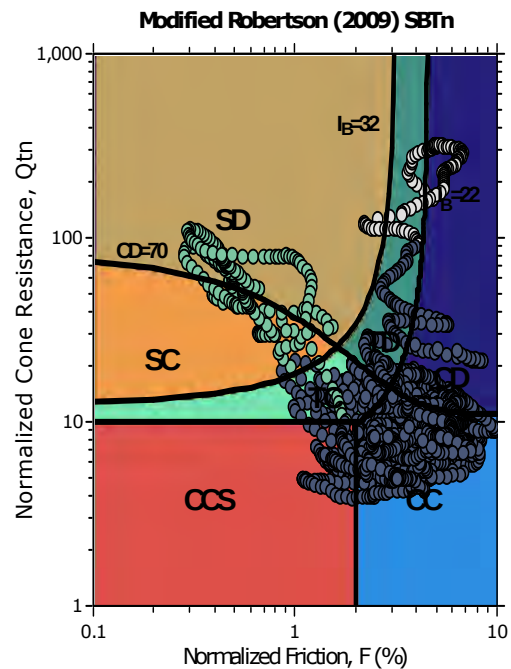
Location:

CPT: 3t

Total depth: 29.90 m, Date: 25/08/2021

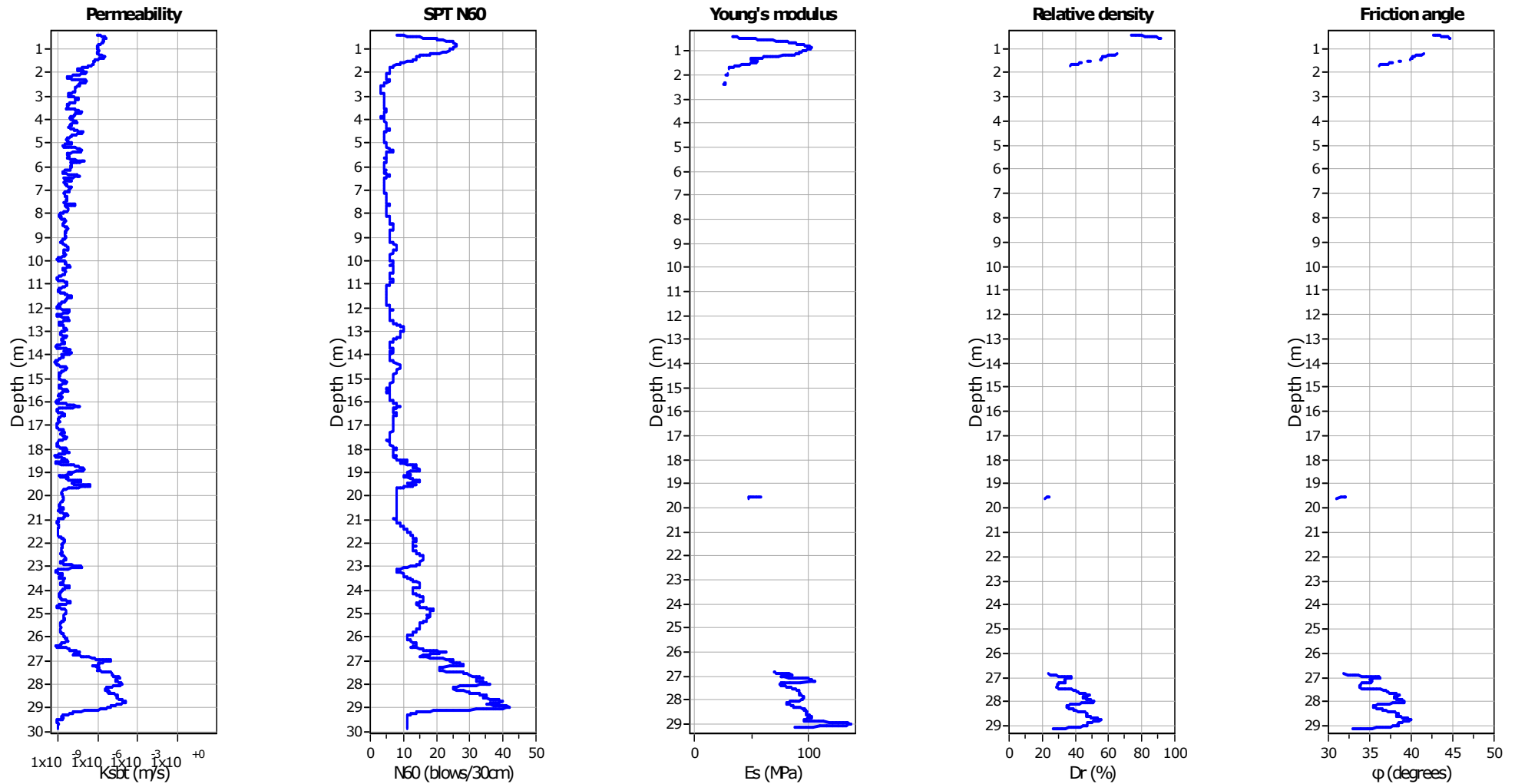


Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

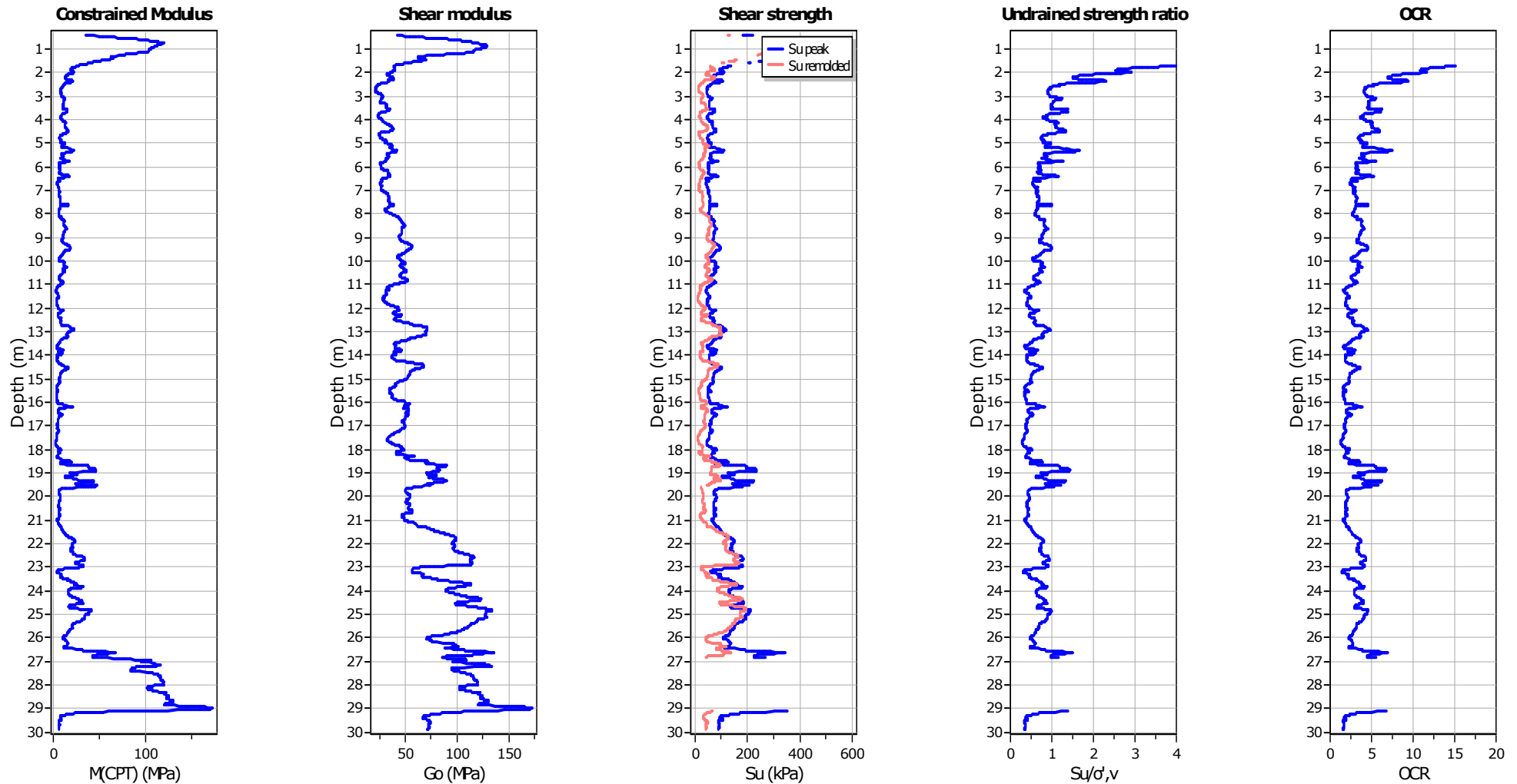
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

● User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)

G_0 : Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

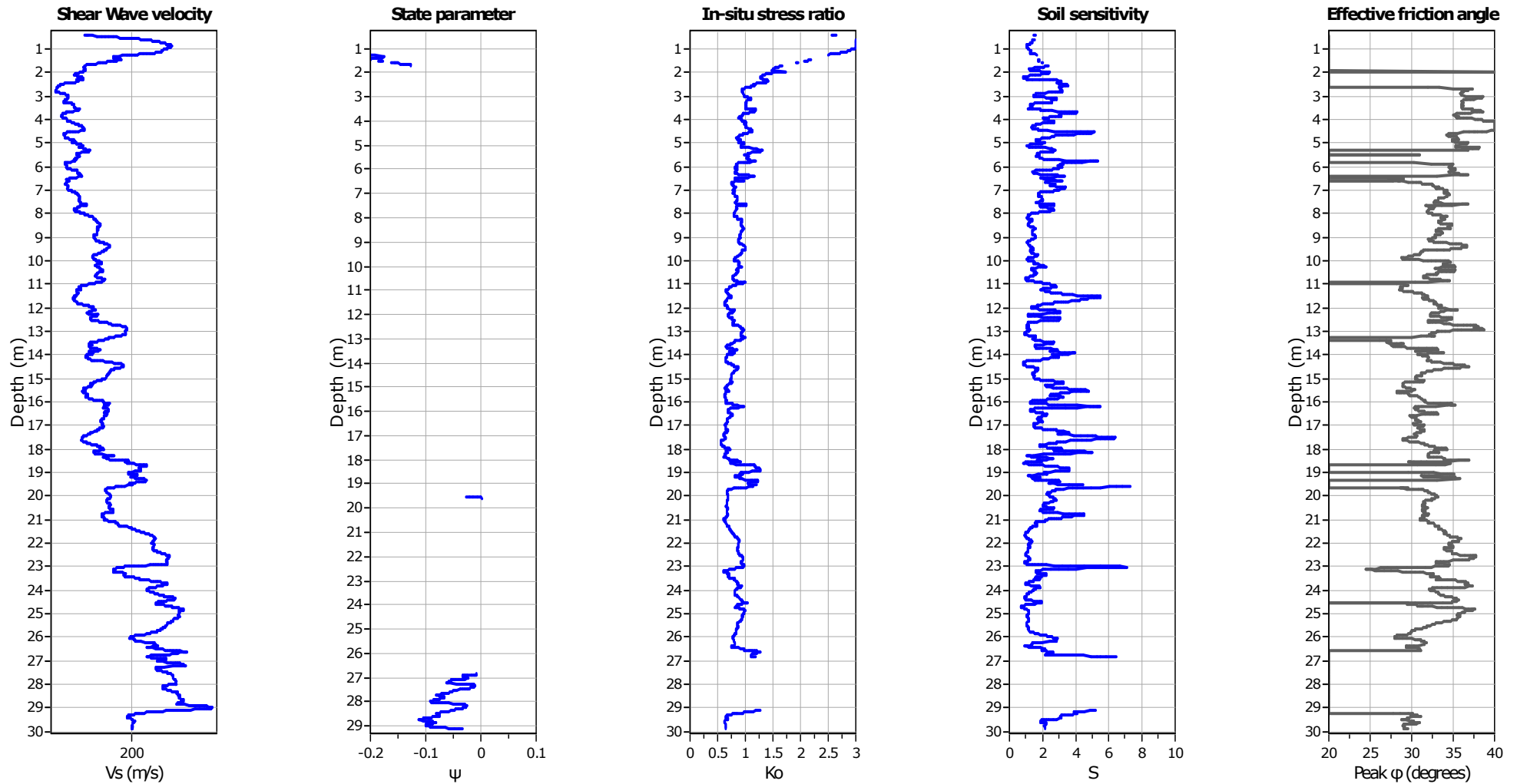
● Flat Dilatometer Test data

Project:

Location:

CPT: 3t

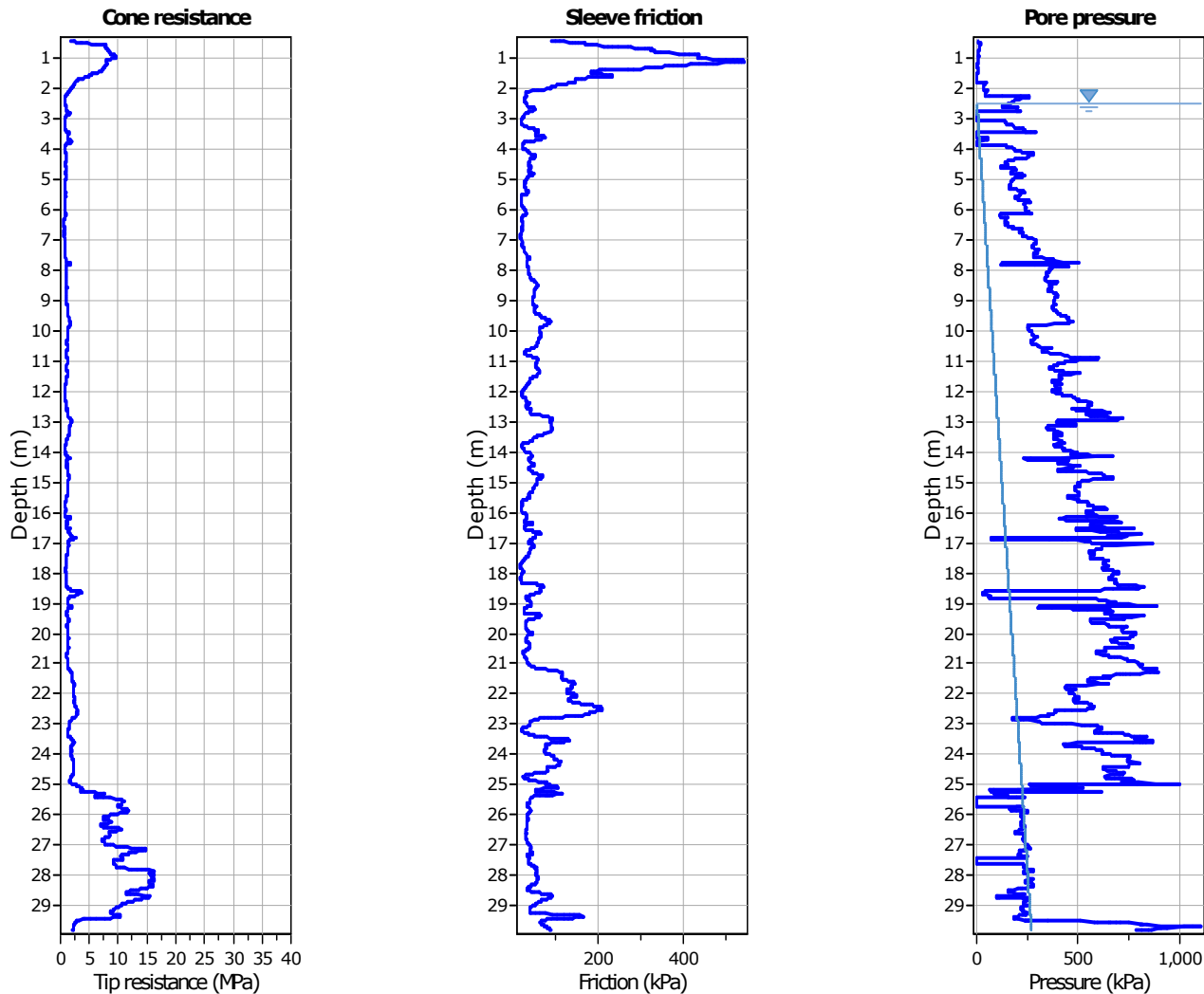
Total depth: 29.90 m, Date: 25/08/2021



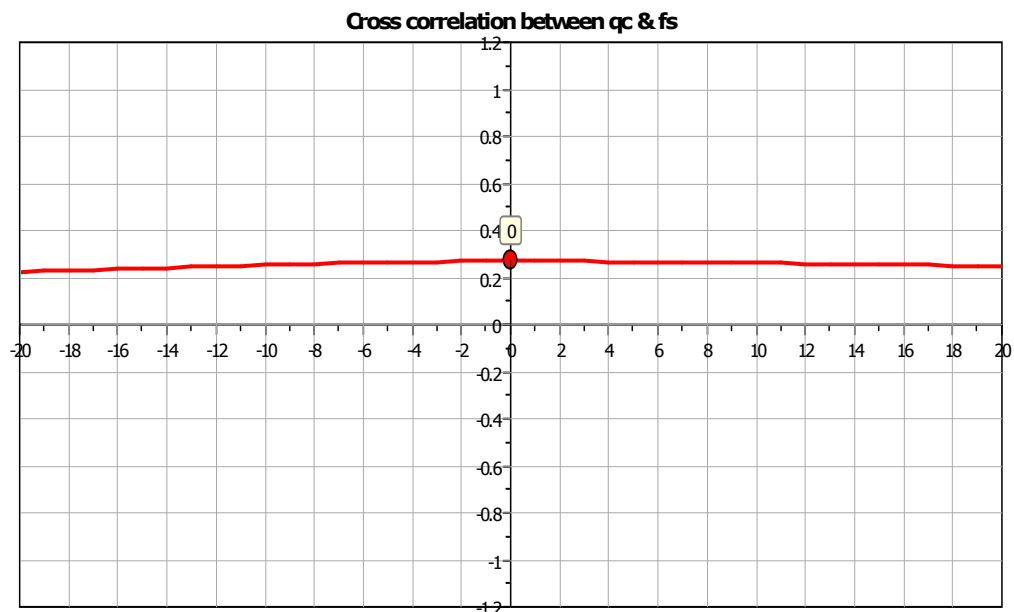
Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

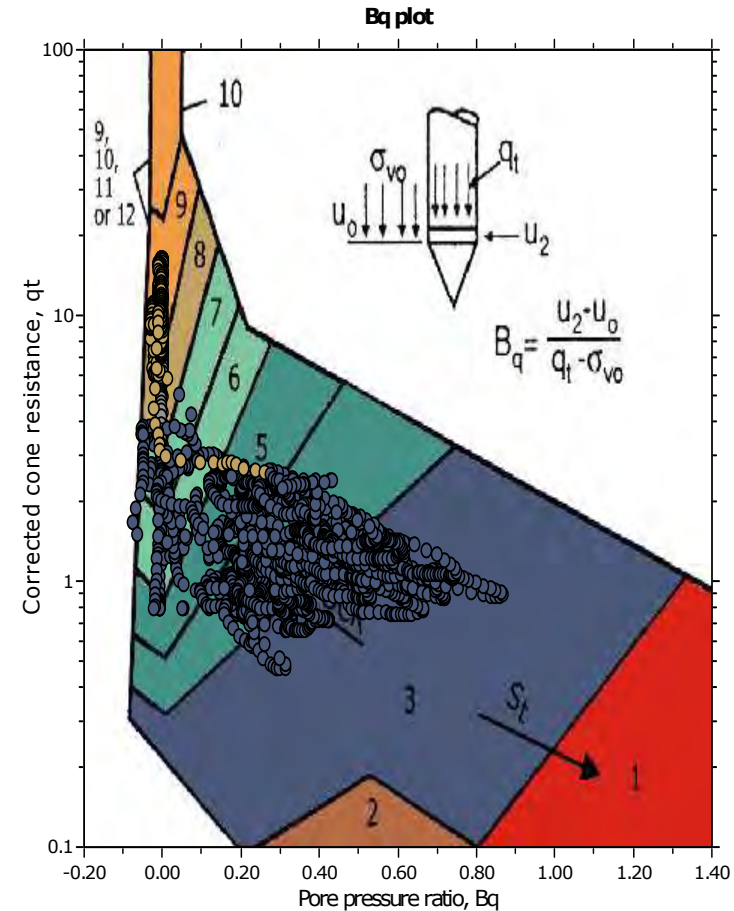
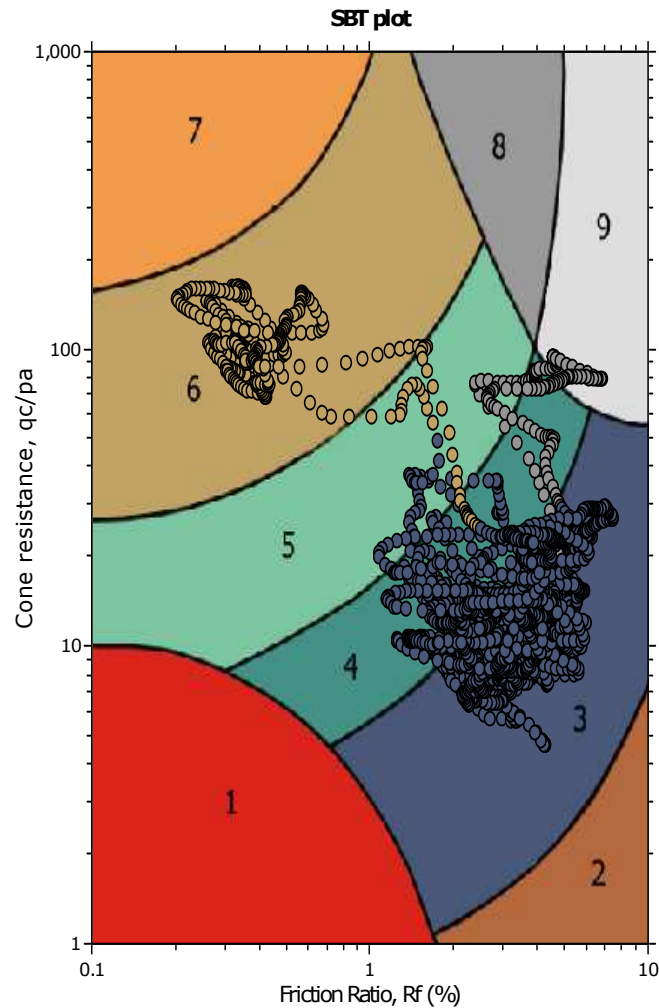
—●— User defined estimation data



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).



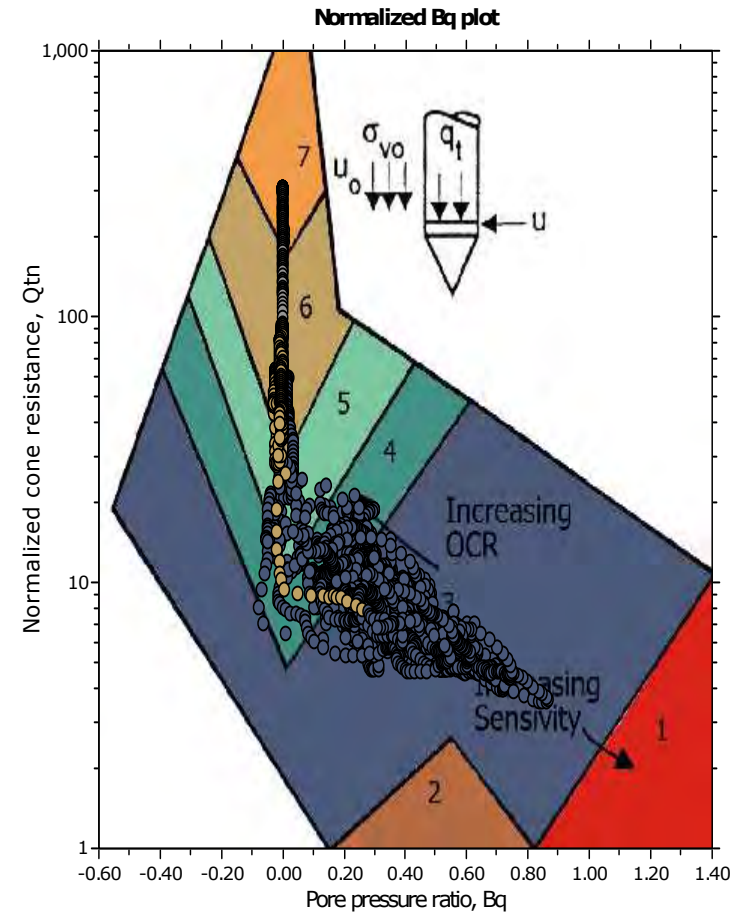
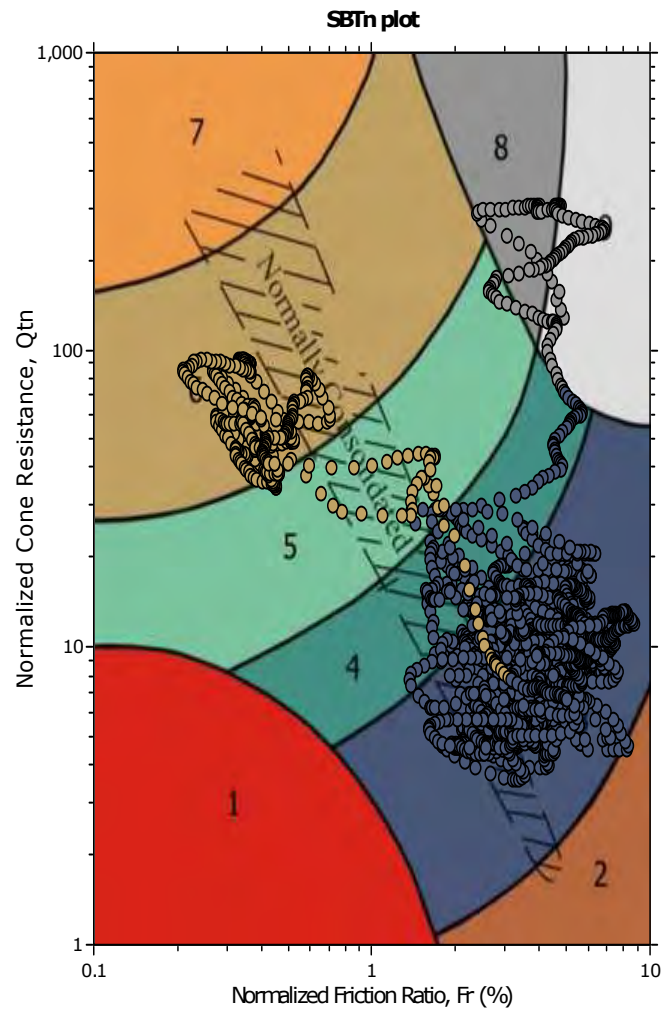
SBT - Bq plots



SBT legend

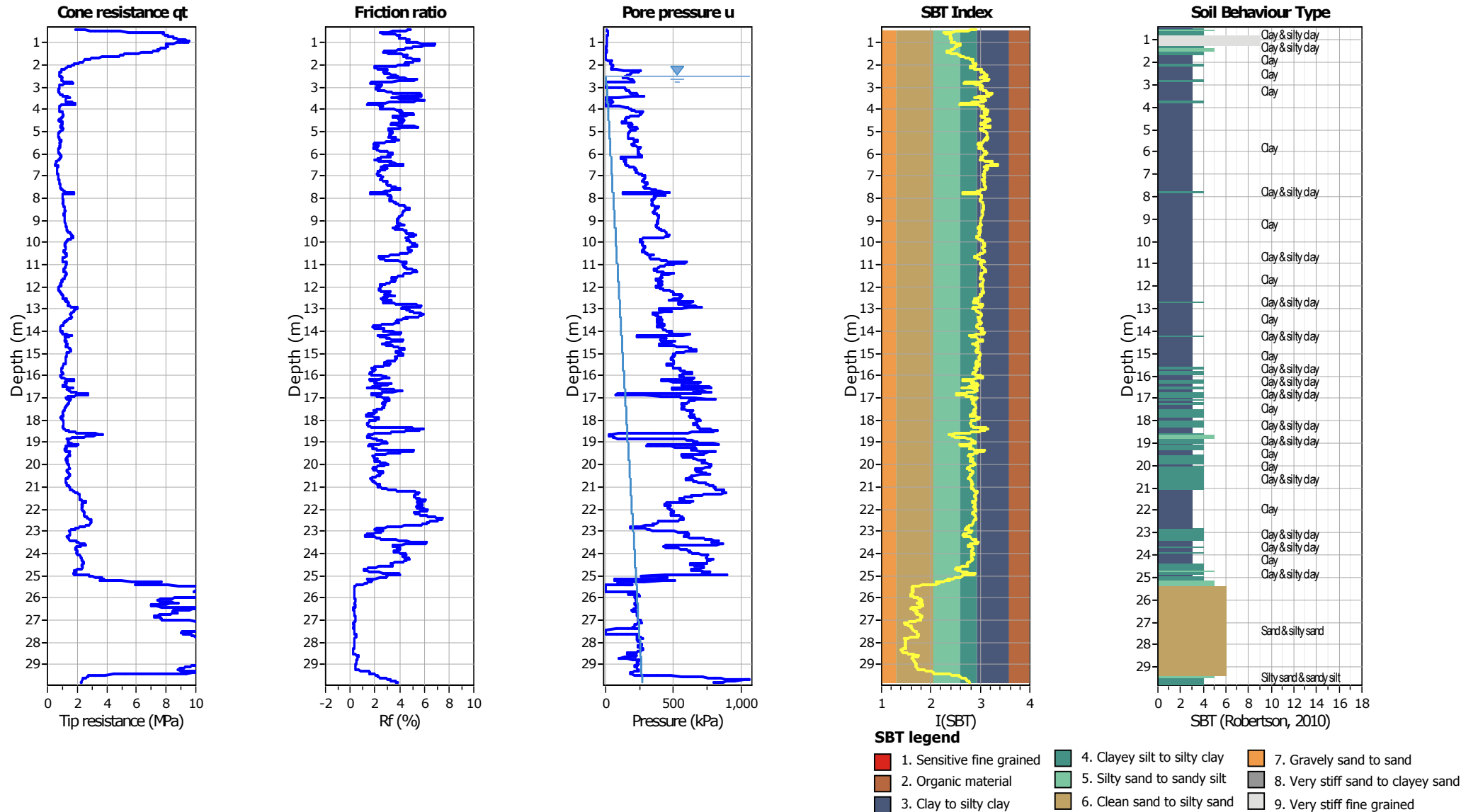
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

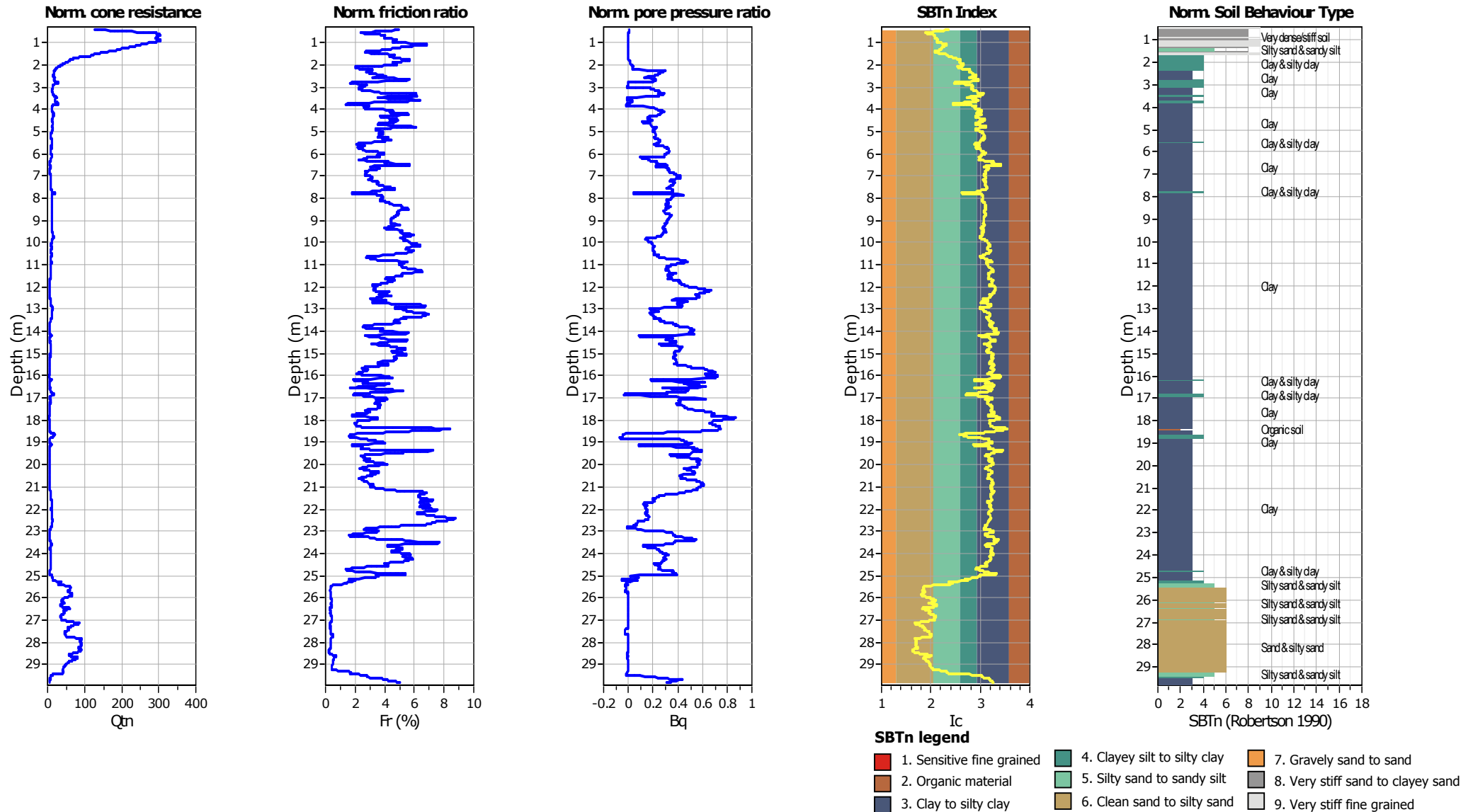
SBT - Bq plots (normalized)



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 |



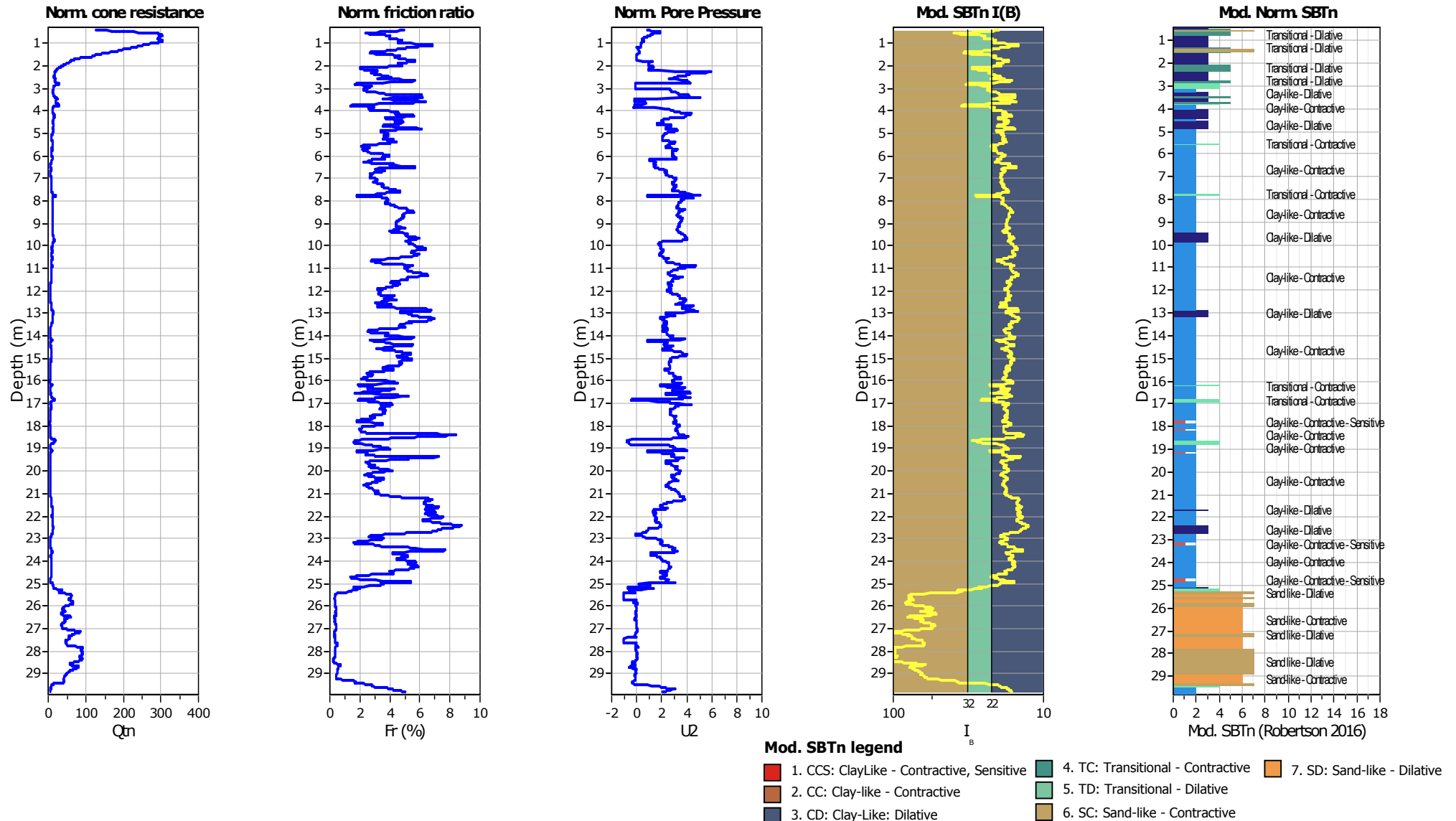


Project:

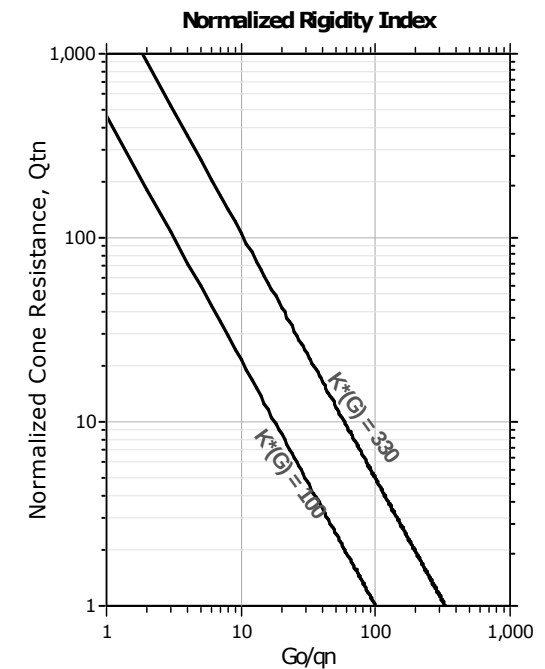
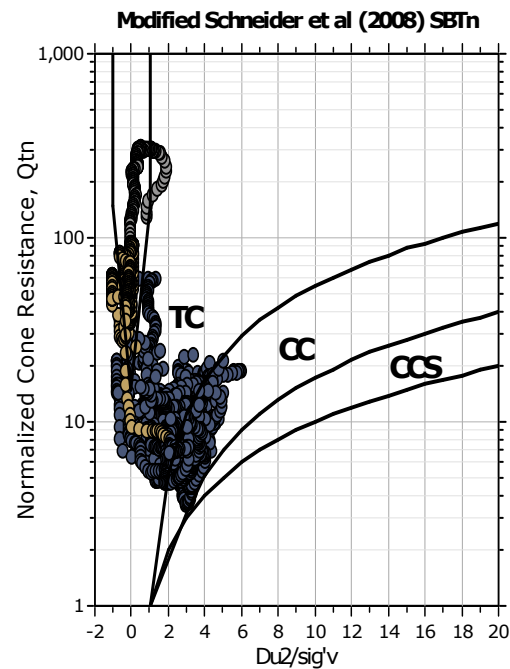
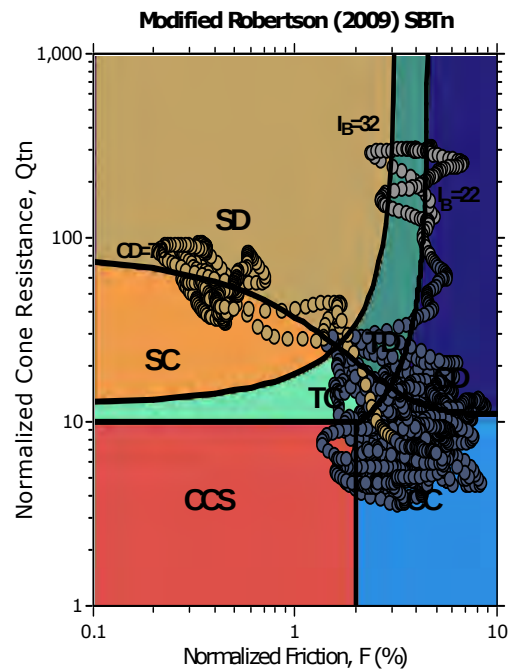
Location:

CPT: 4t

Total depth: 29.81 m, Date: 25/08/2021

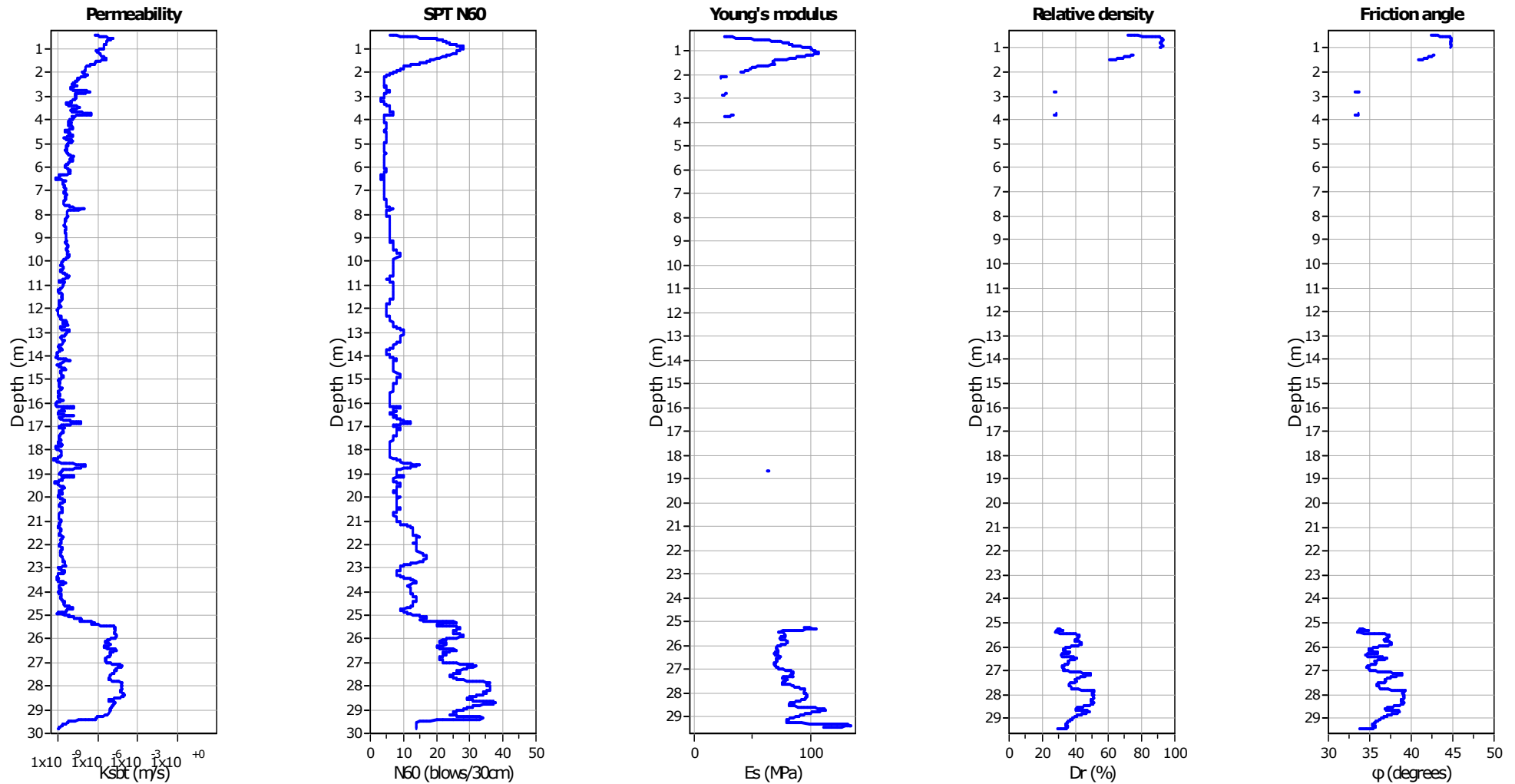


Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

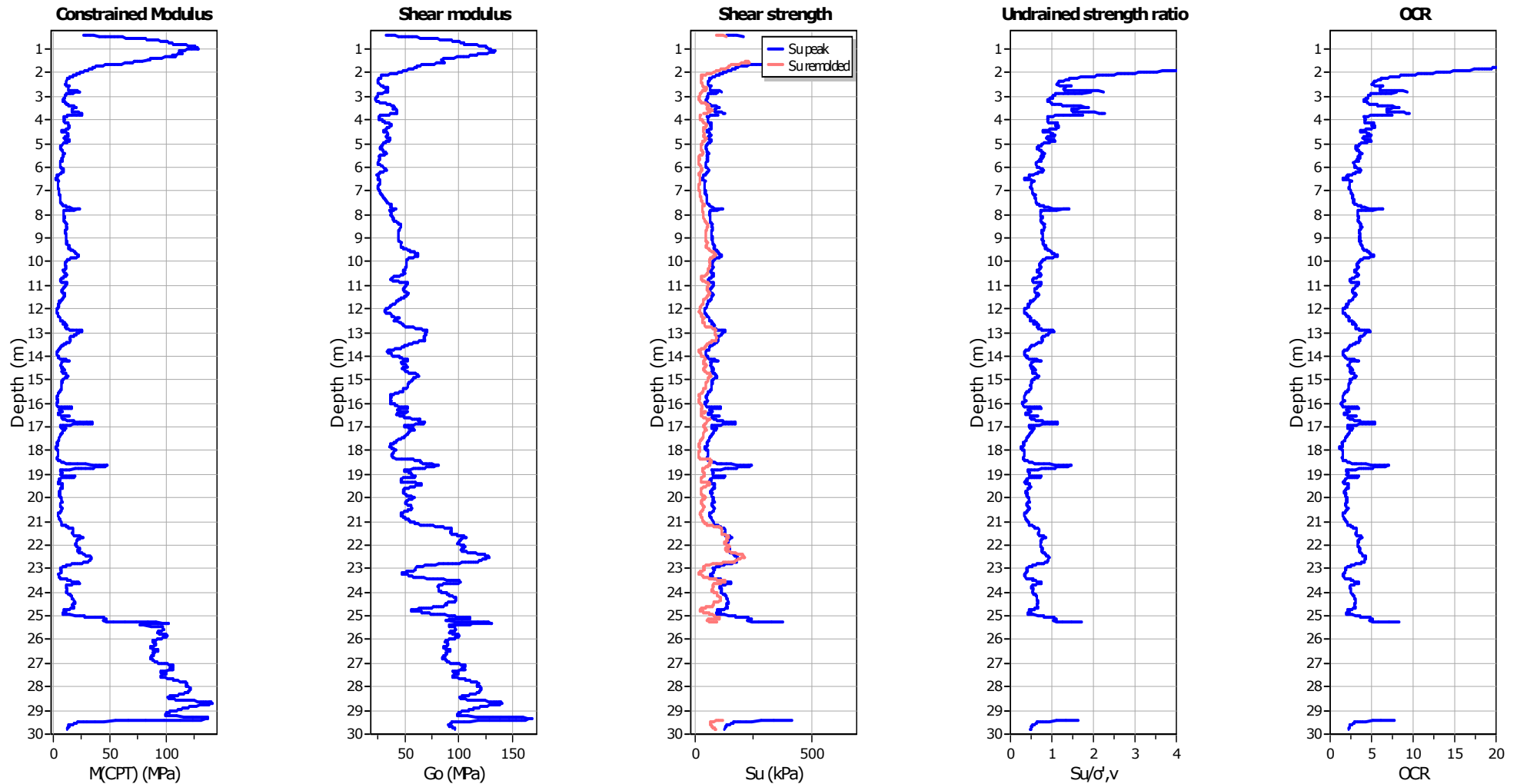
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

● User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)

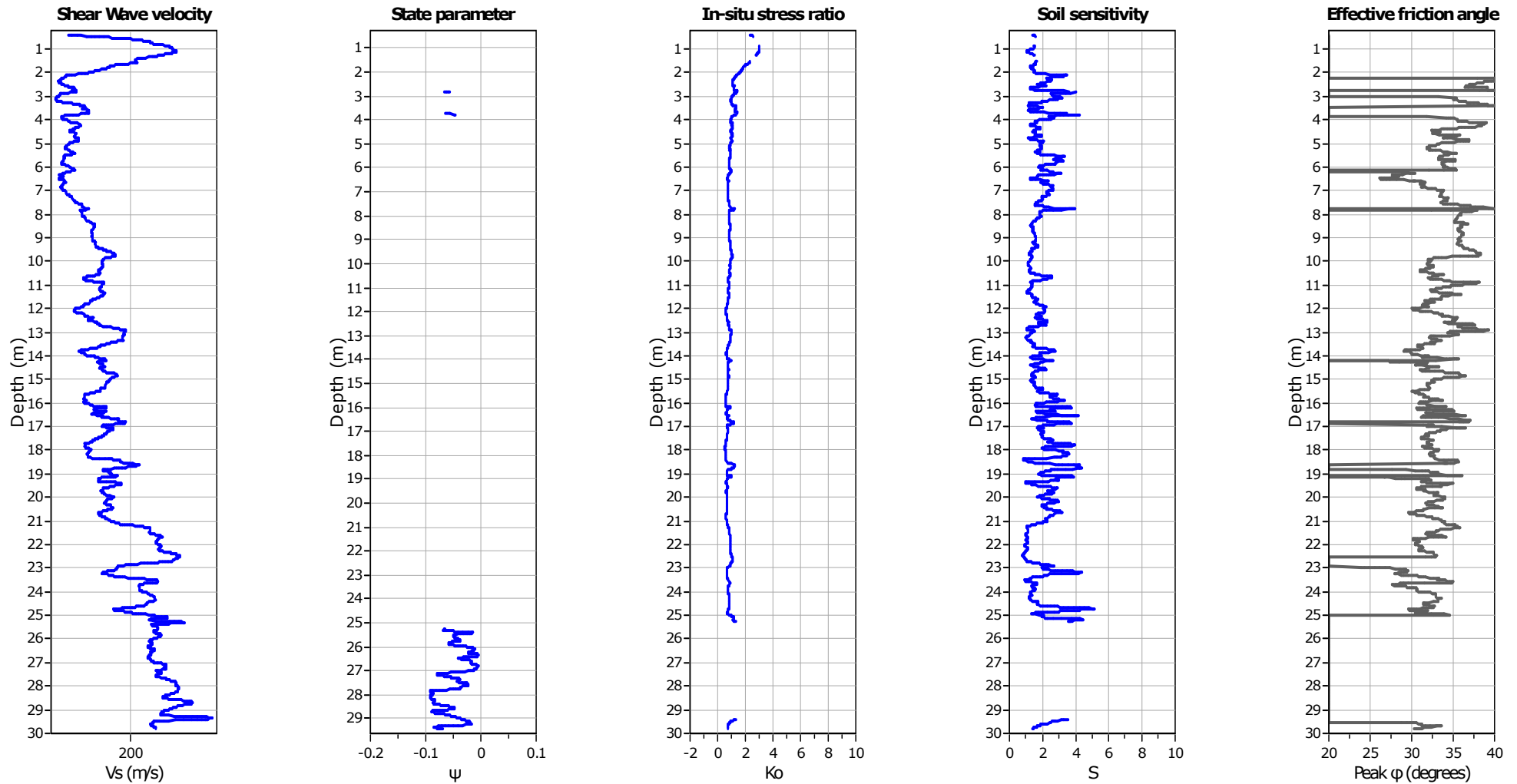
G_o : Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data

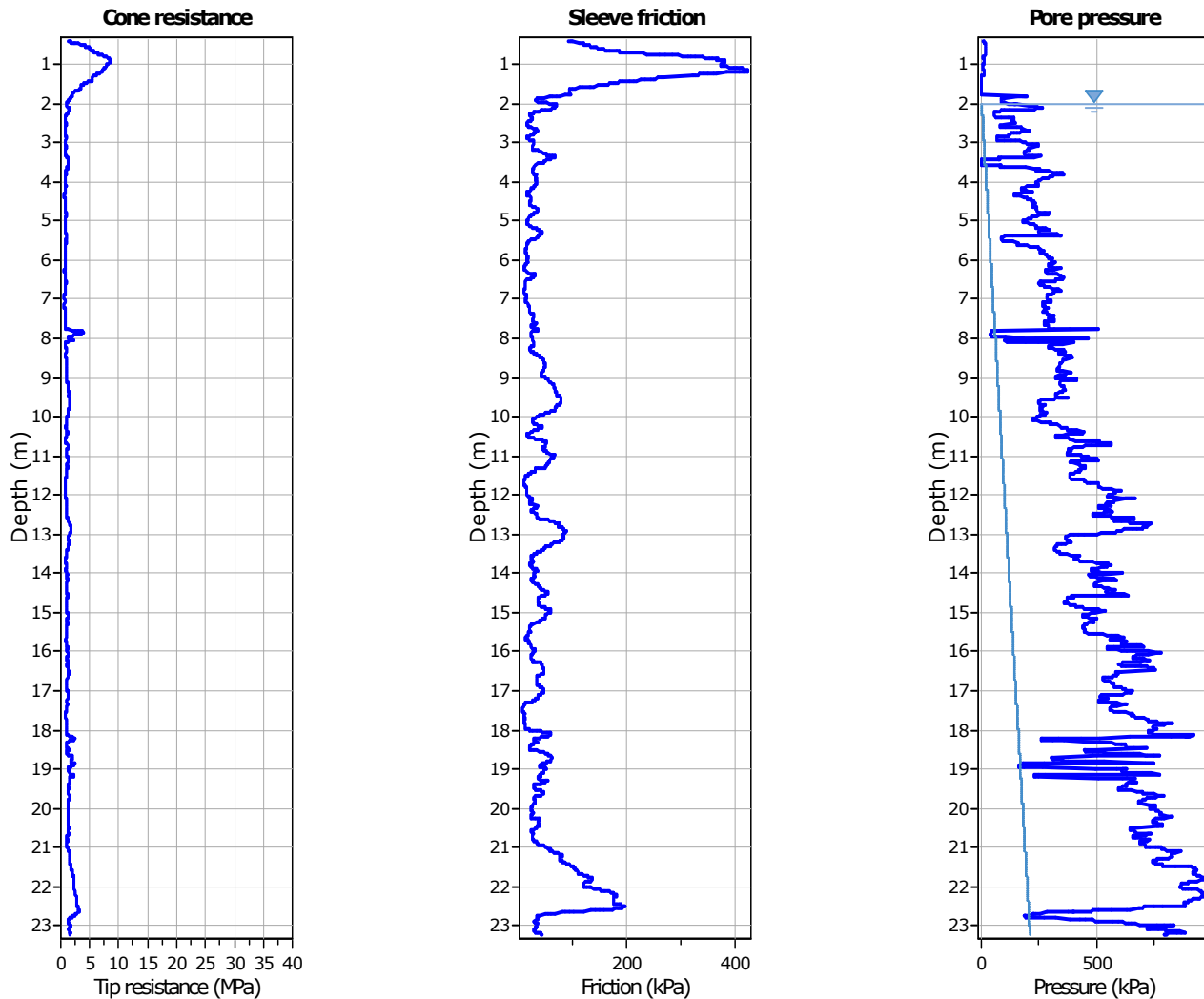
● Flat Dilatometer Test data



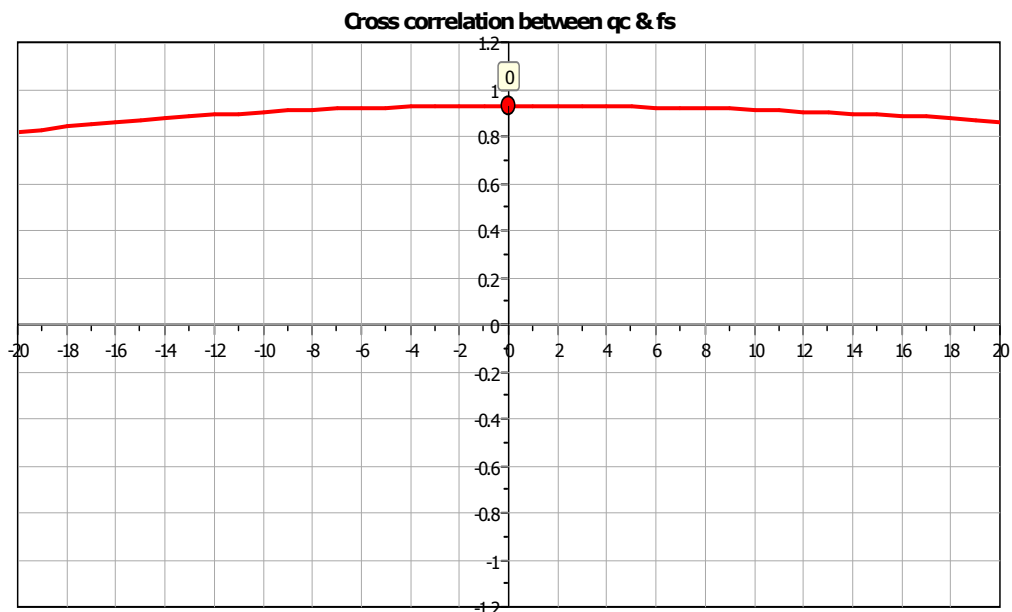
Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

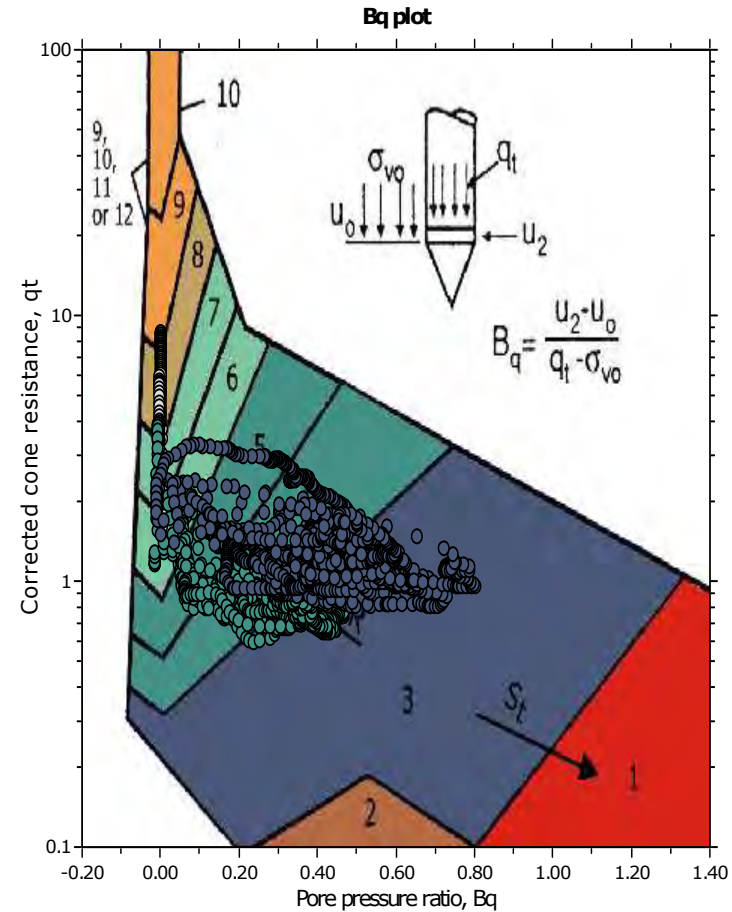
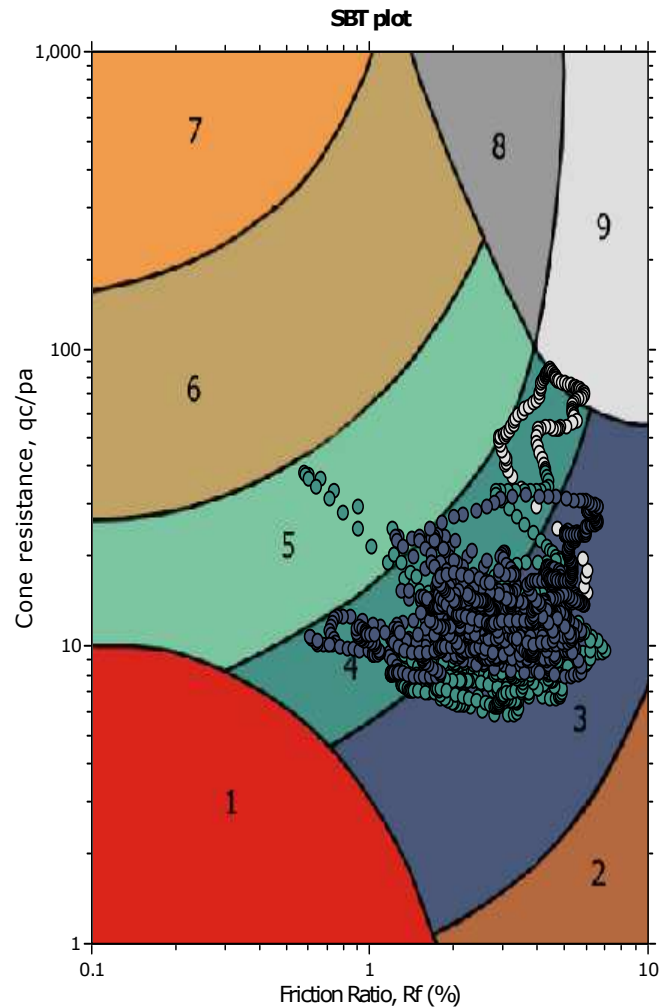
—●— User defined estimation data



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).



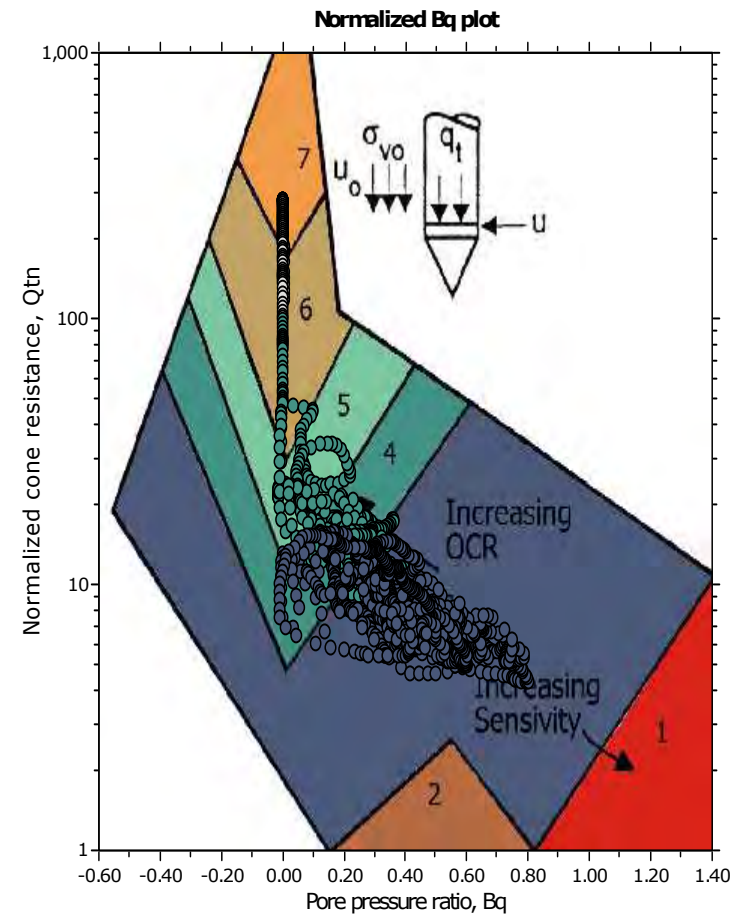
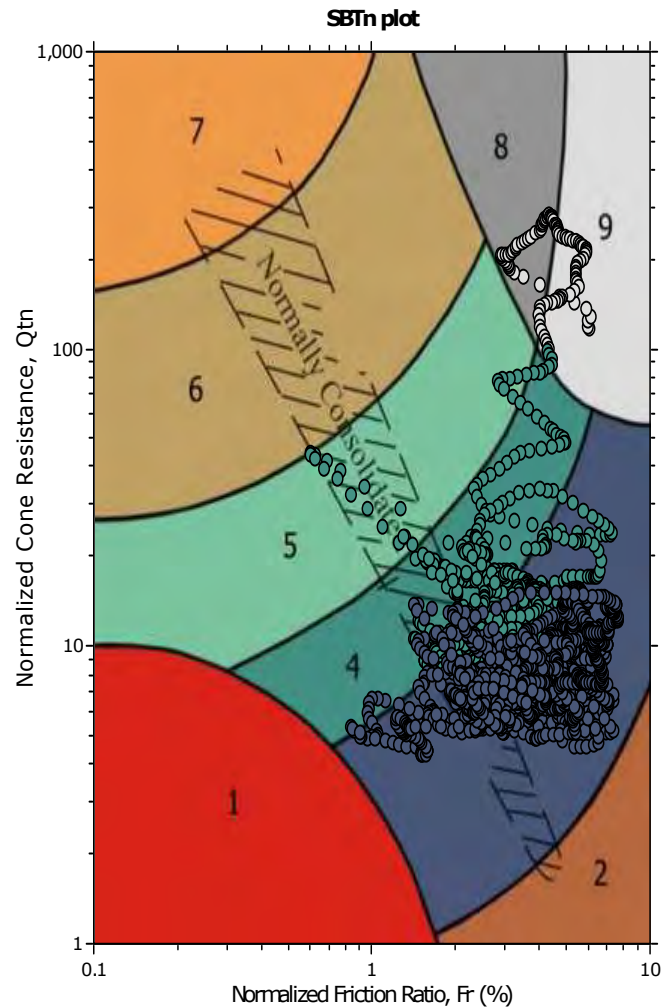
SBT - Bq plots



SBT legend

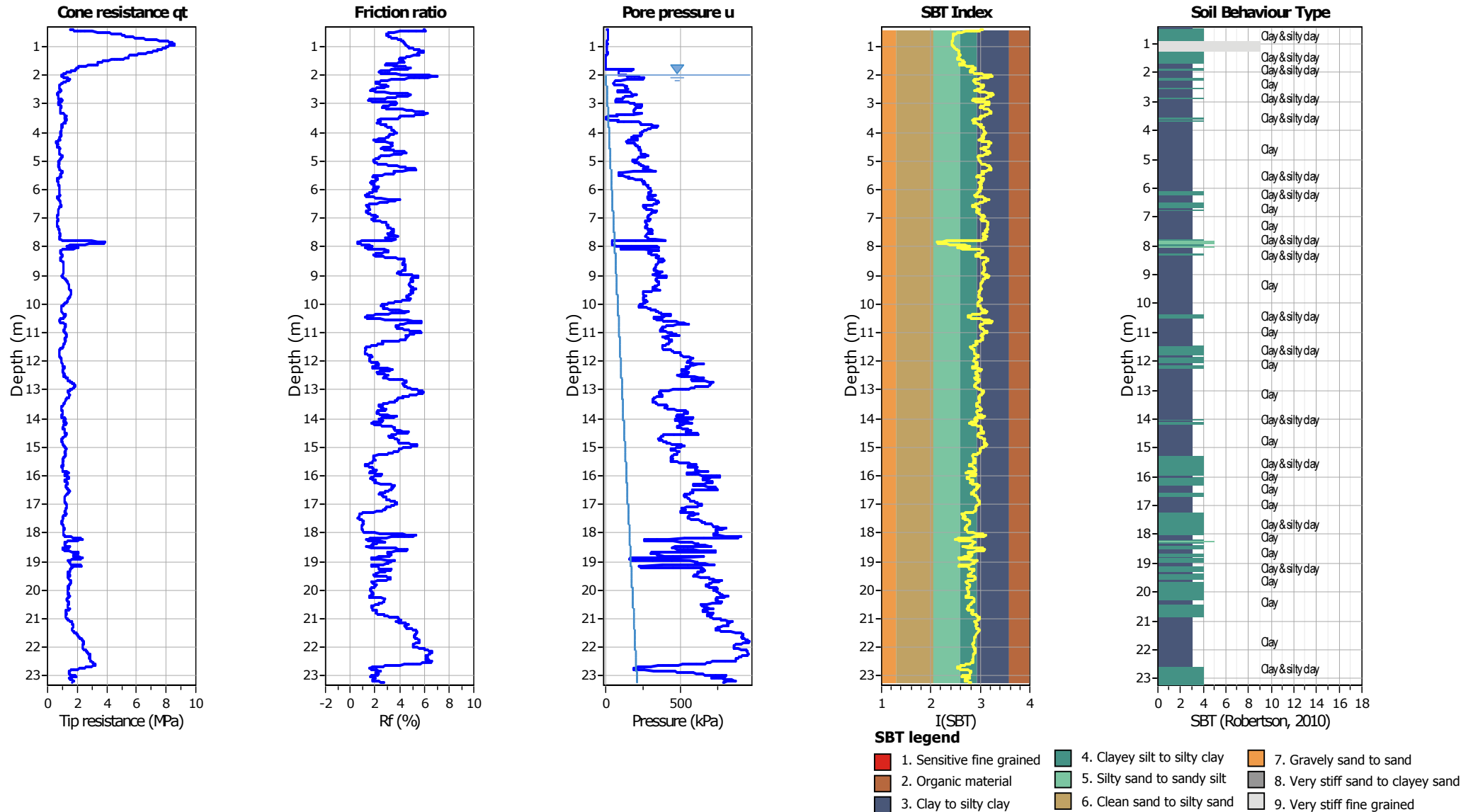
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

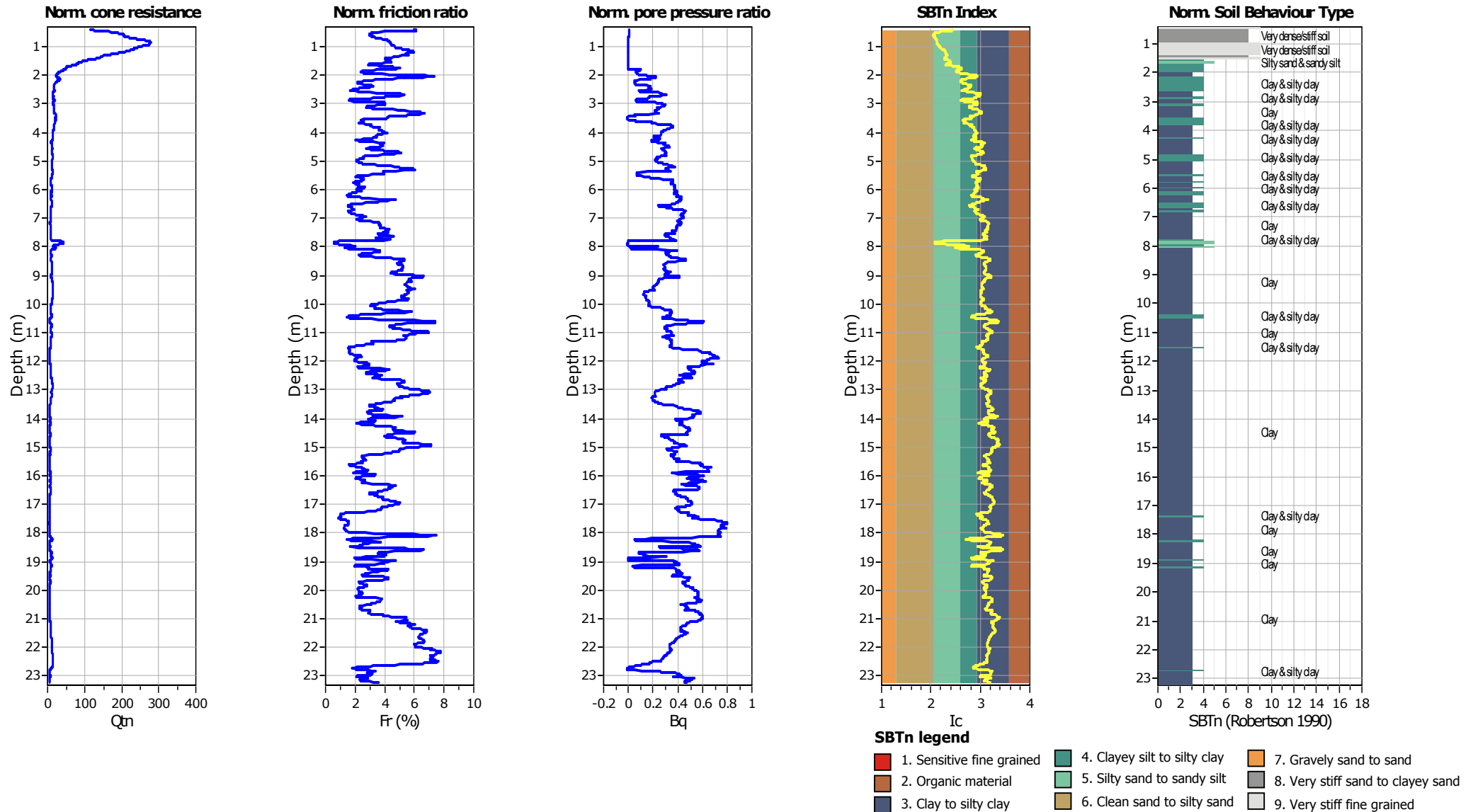
SBT - Bq plots (normalized)



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 |



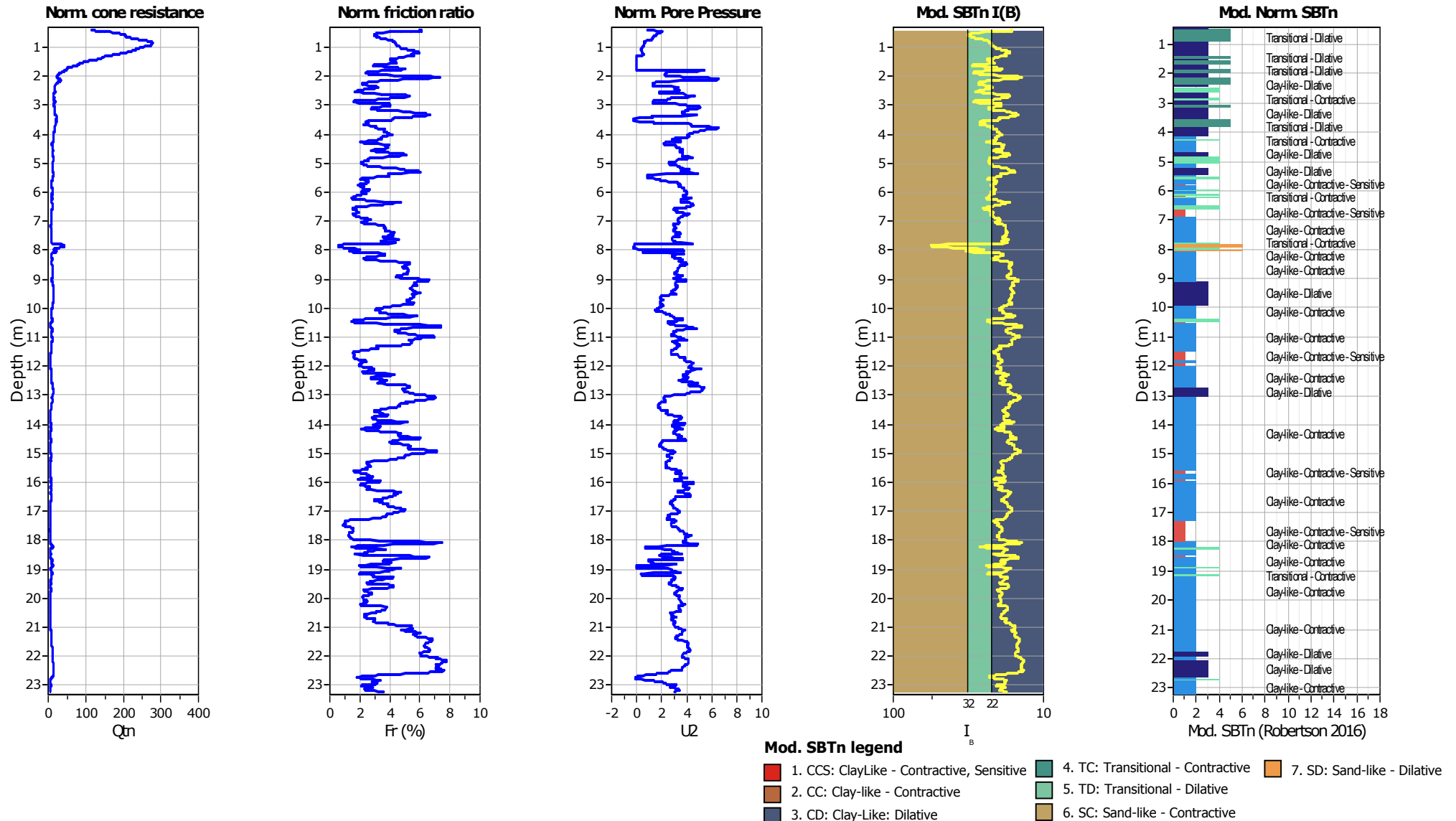


Project:

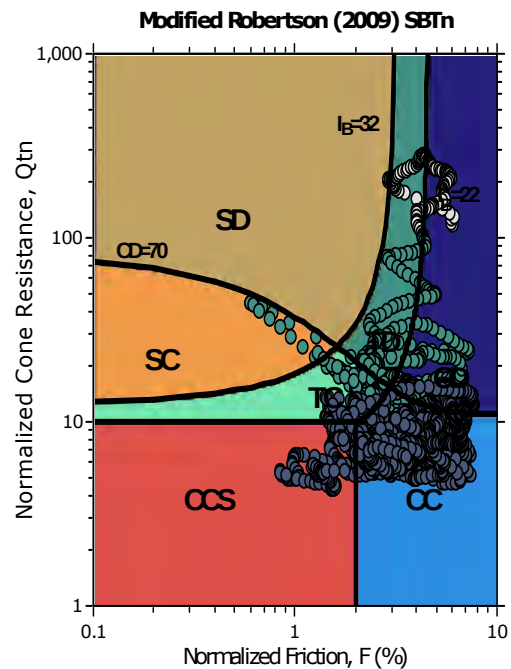
Location:

CPT: 5t

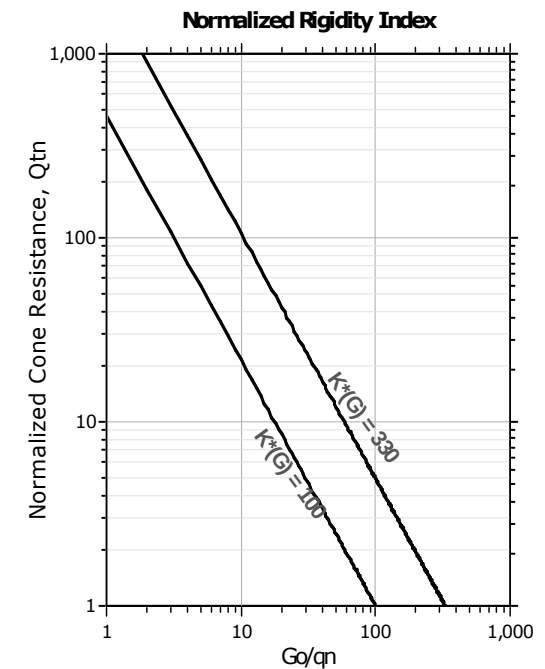
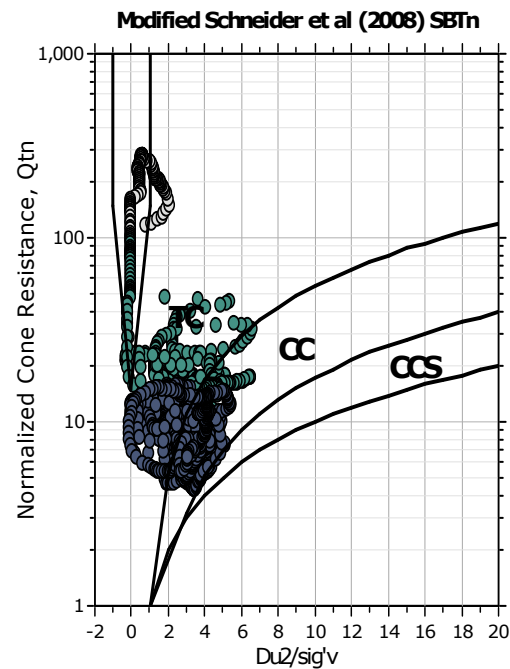
Total depth: 23.23 m, Date: 25/08/2021



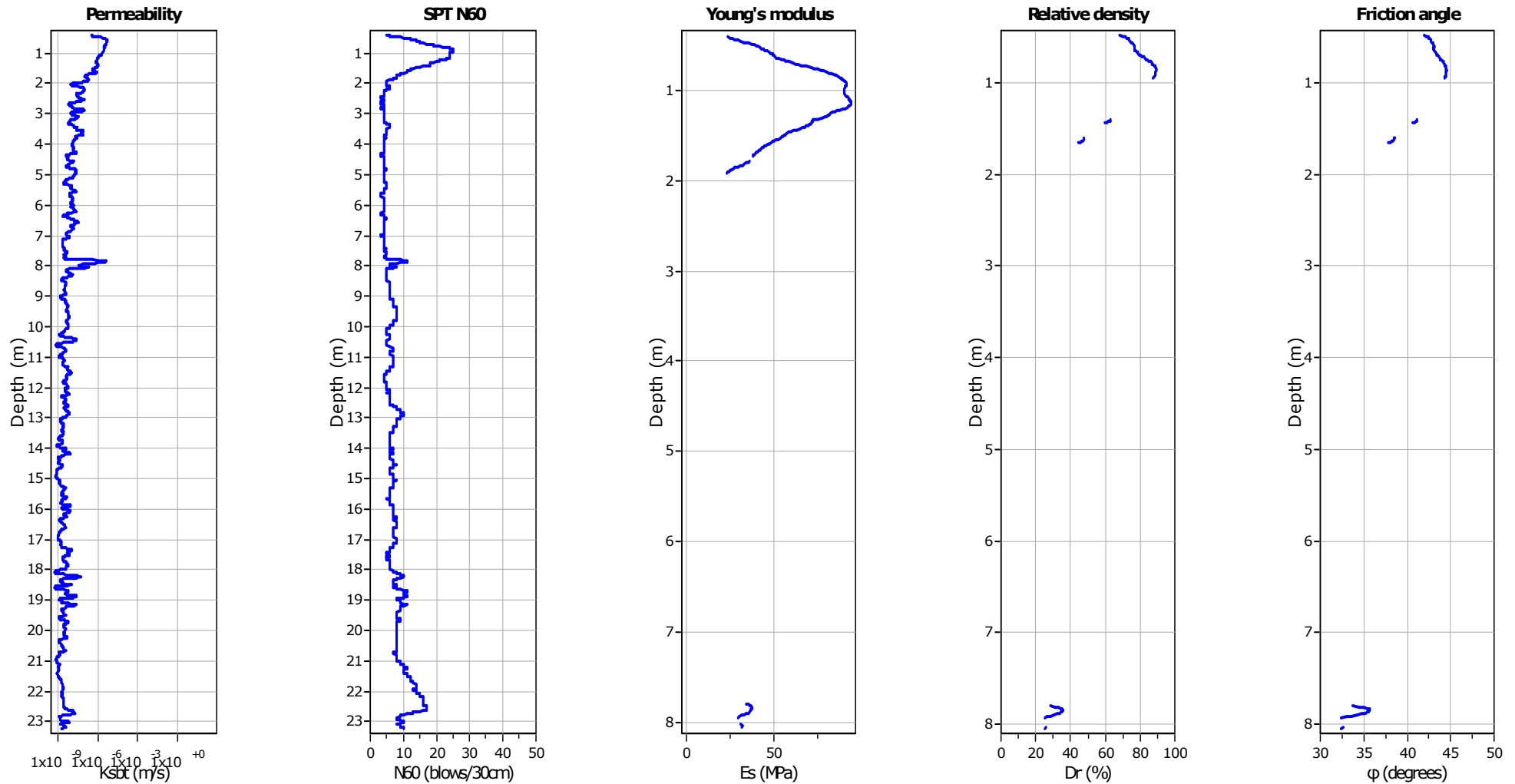
Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative



$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

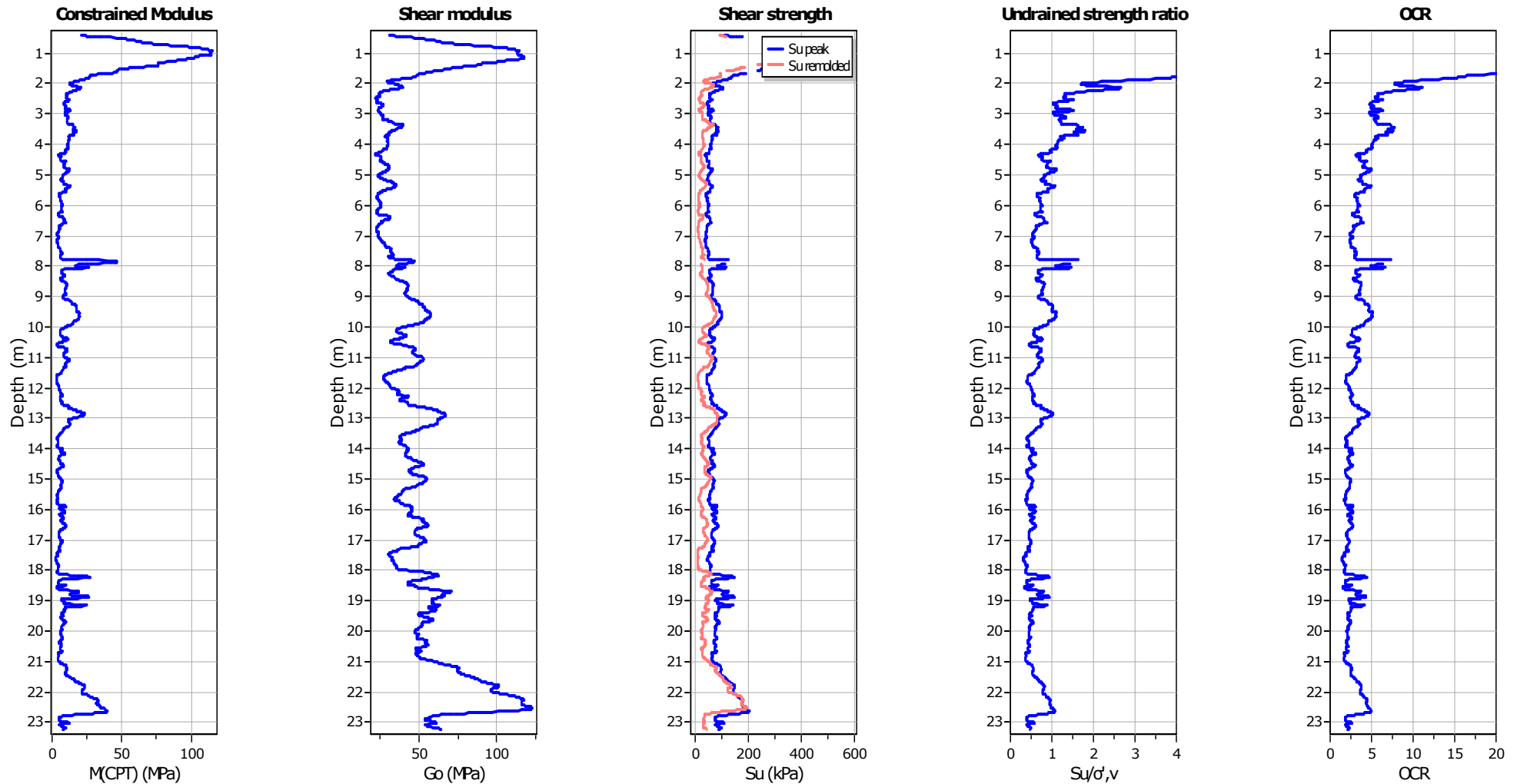
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

—●— User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)

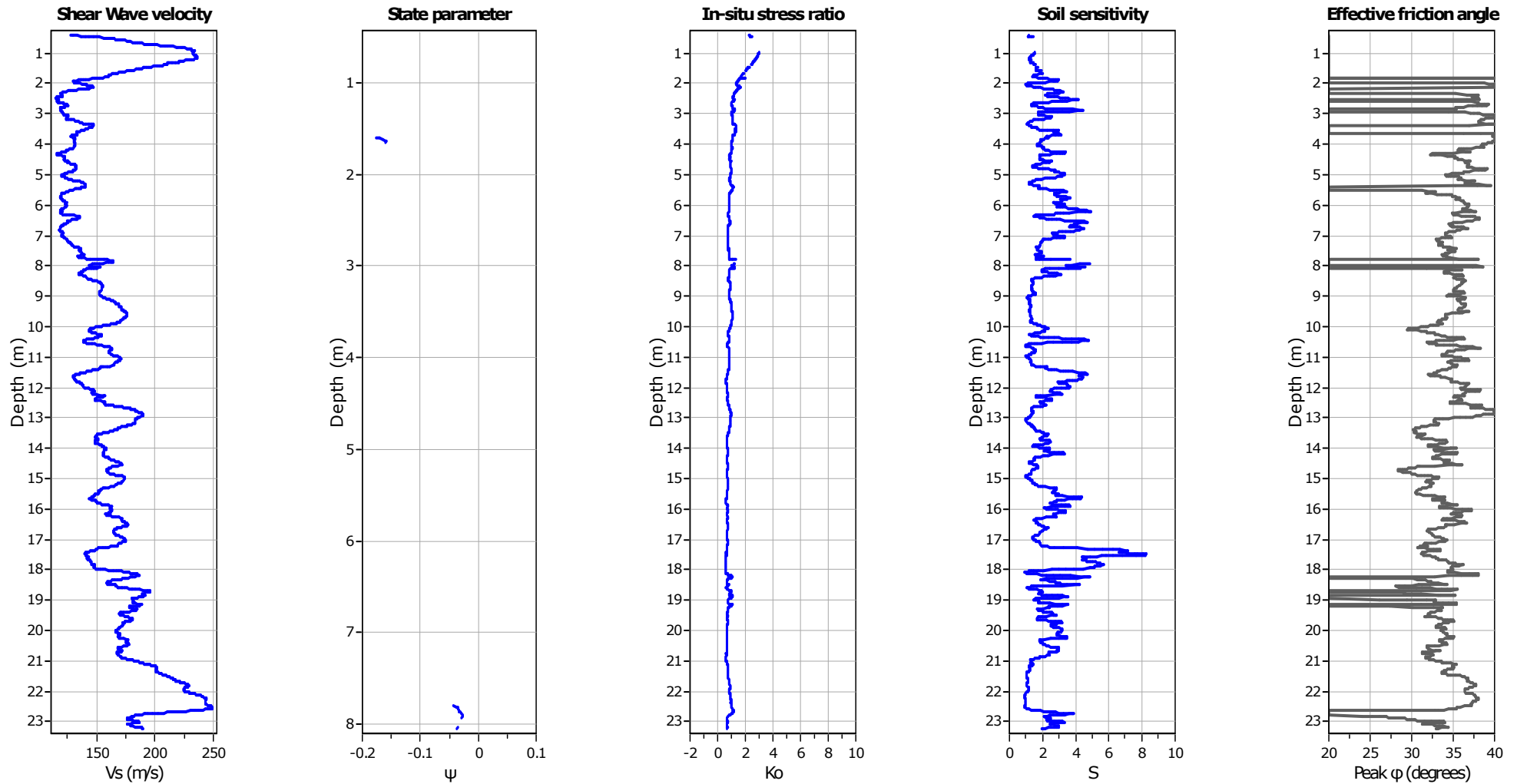
G_0 : Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

—●— User defined estimation data

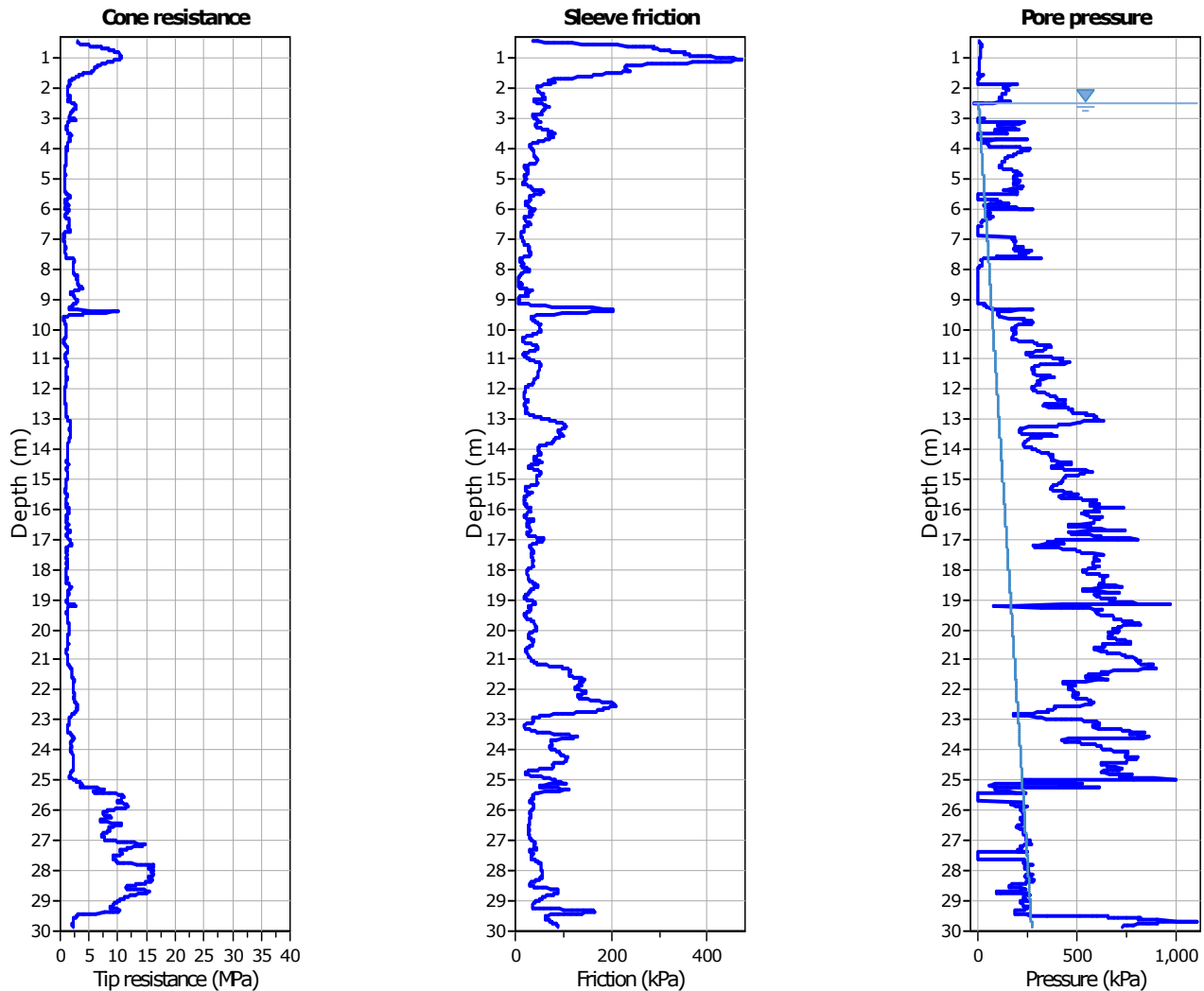
—●— Flat Dilatometer Test data



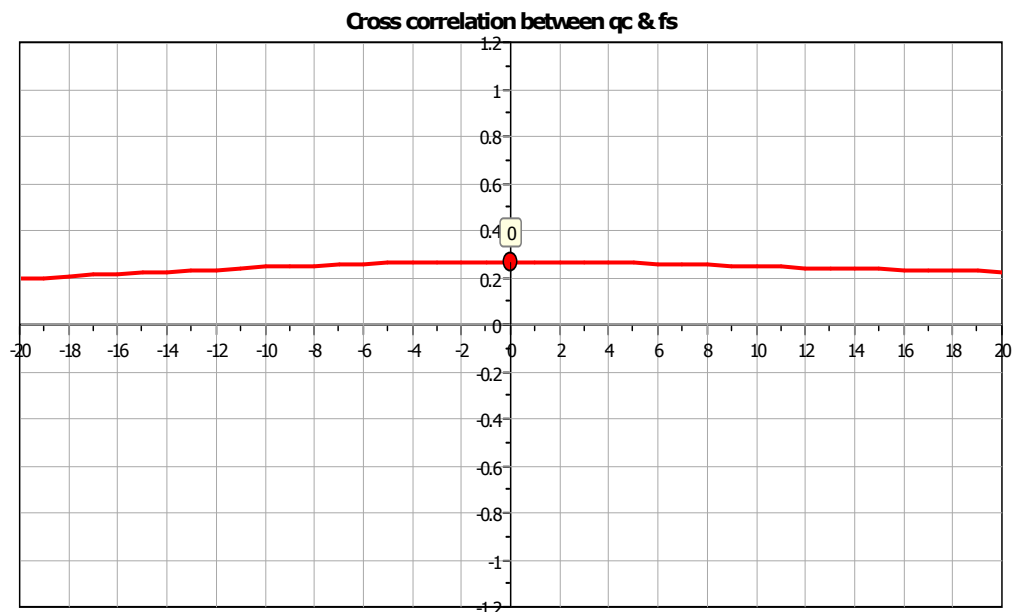
Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

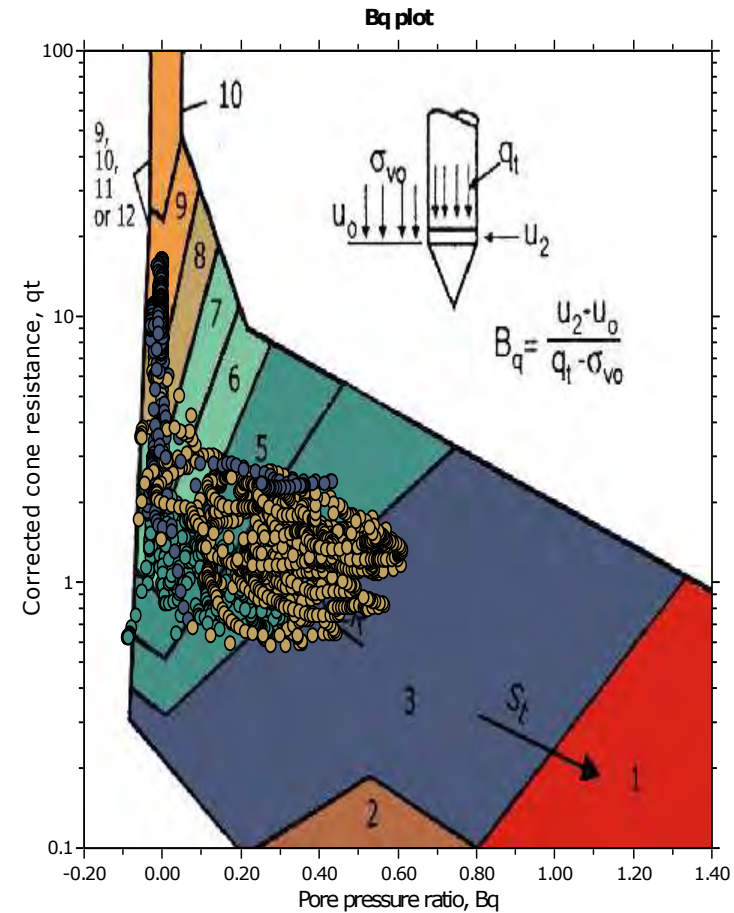
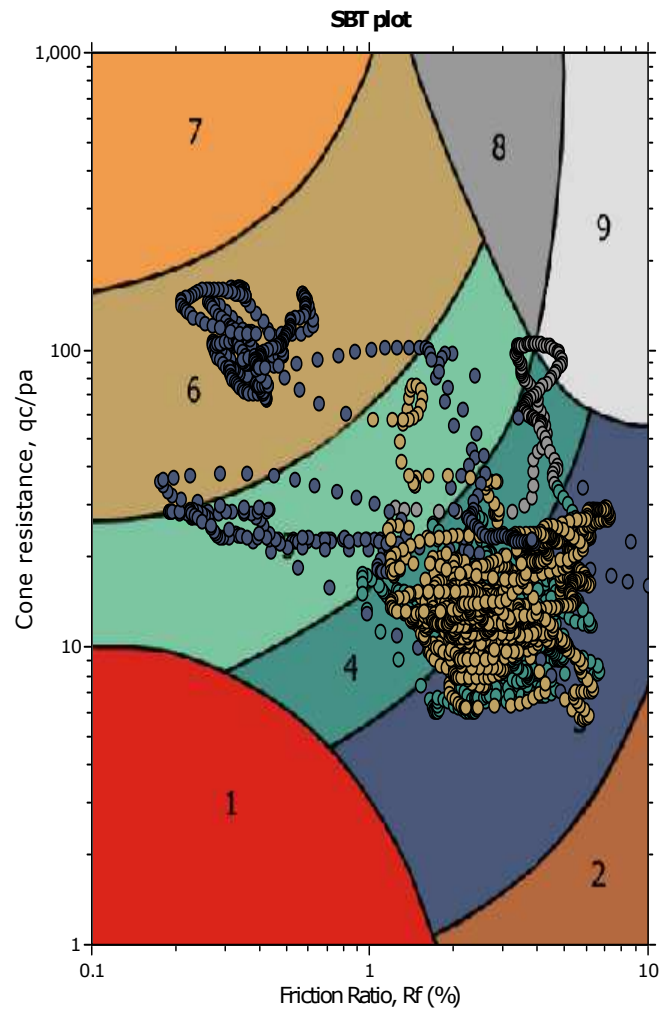
—●— User defined estimation data



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).



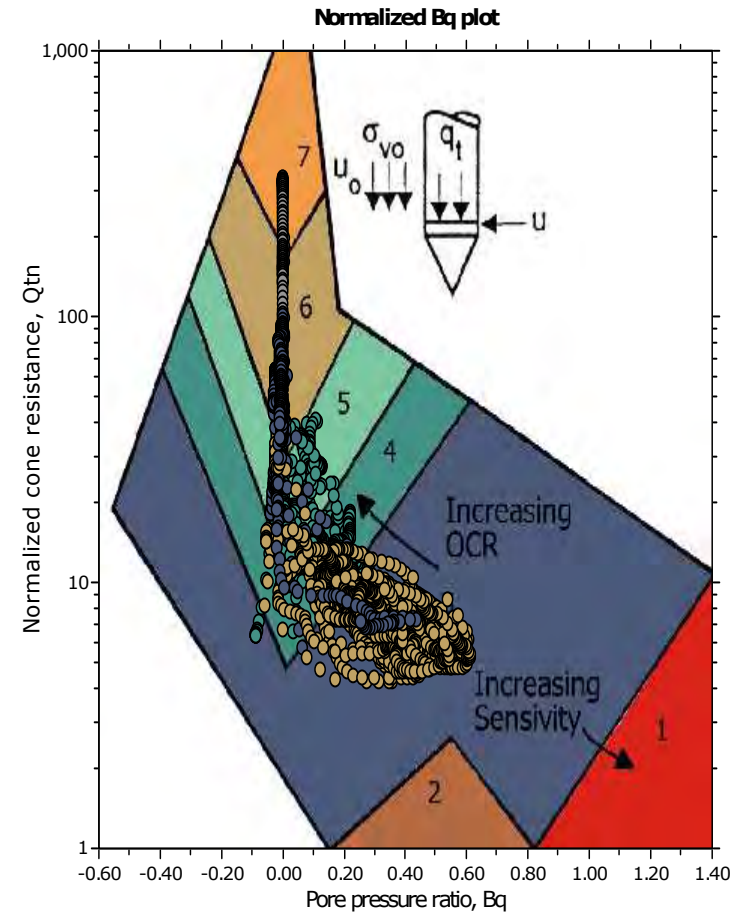
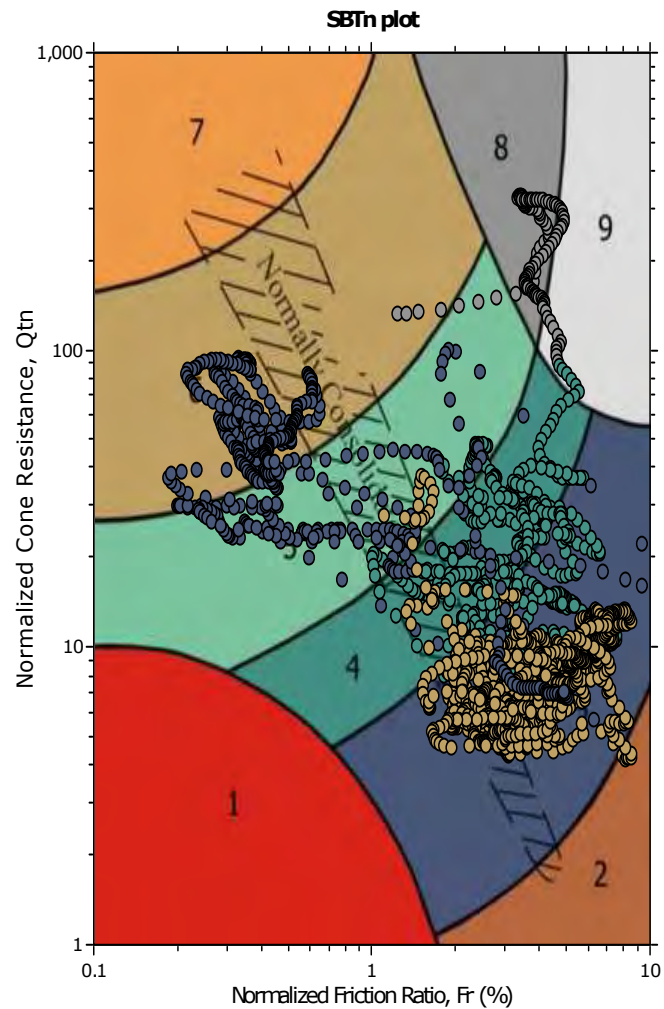
SBT - Bq plots



SBT legend

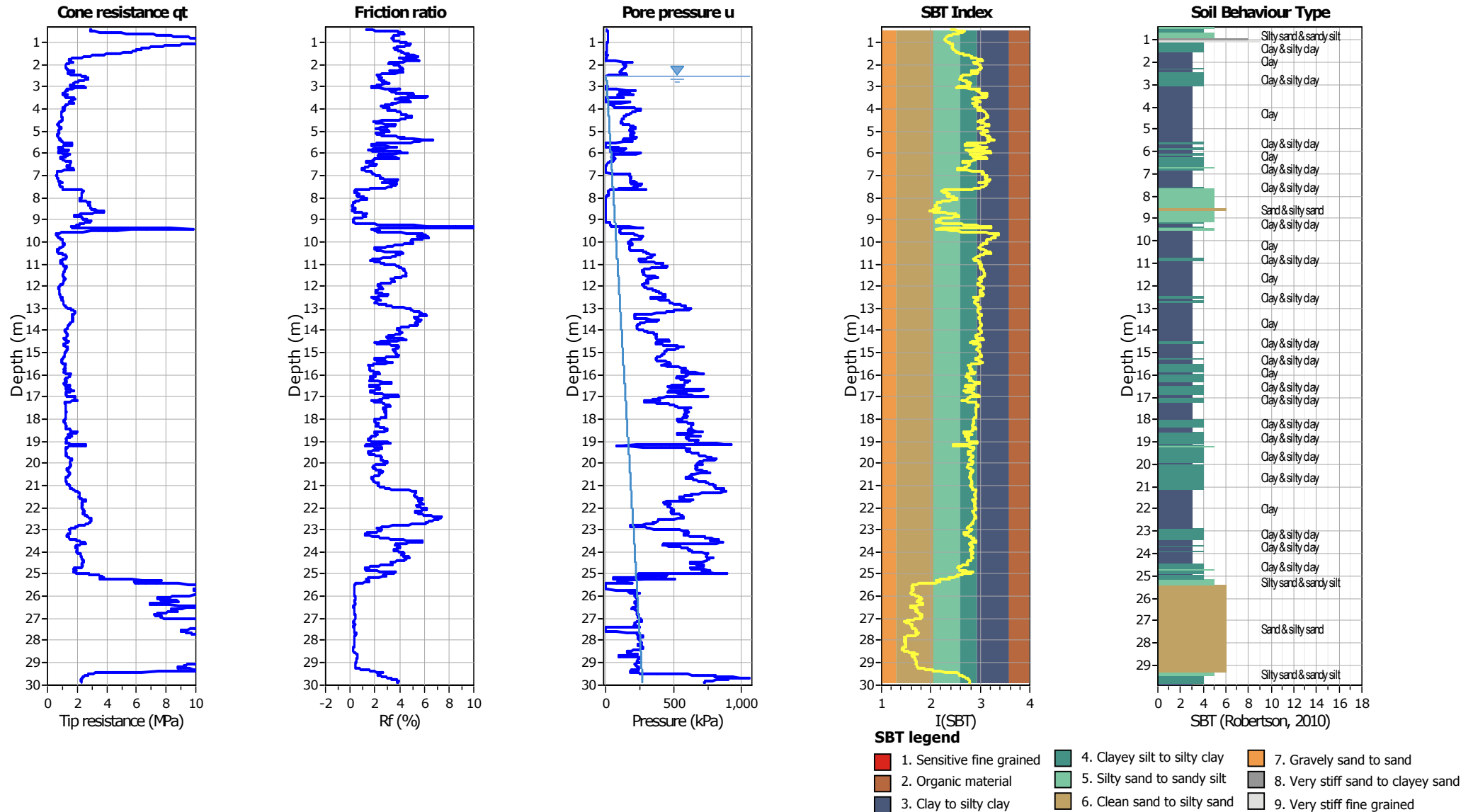
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

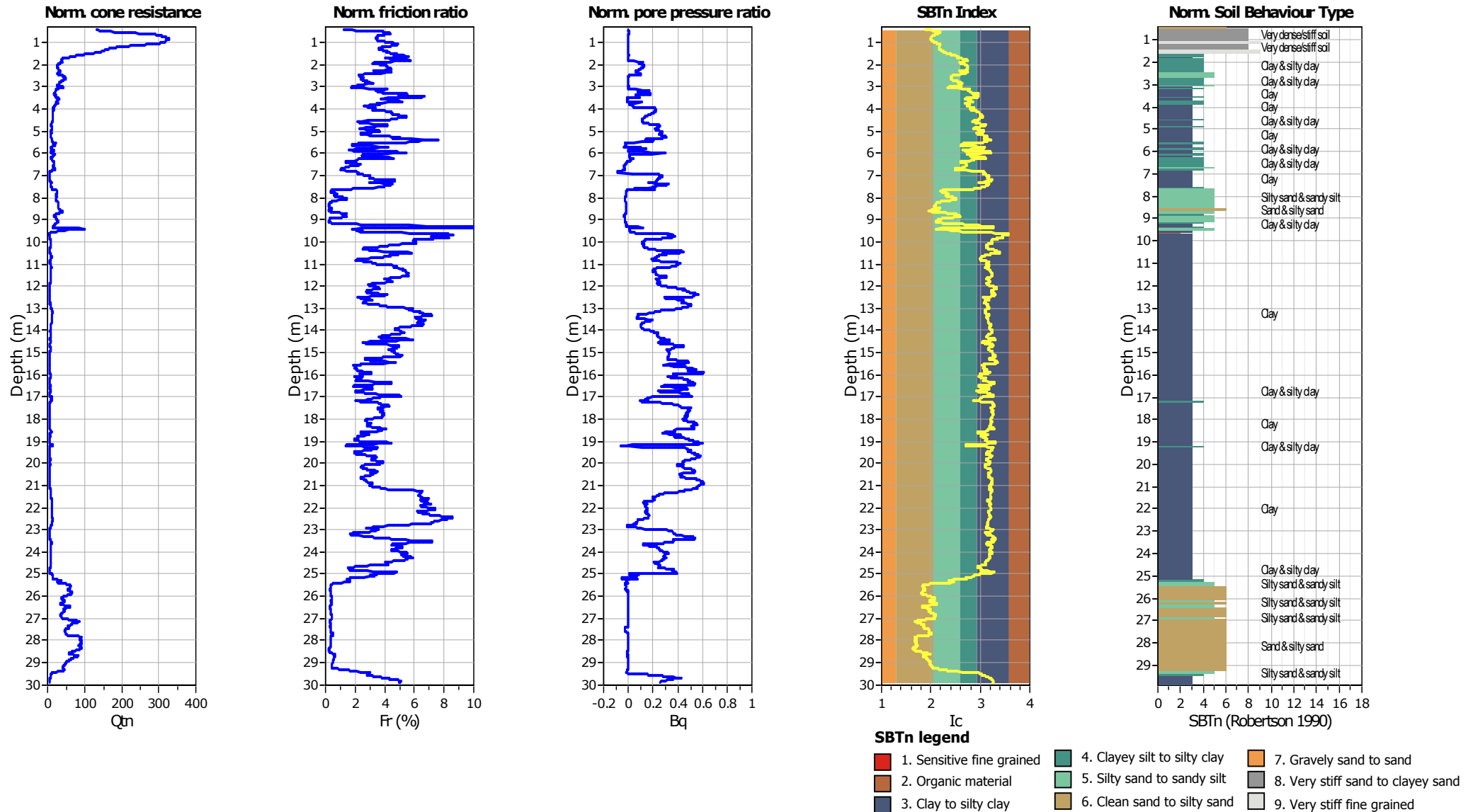
SBT - Bq plots (normalized)

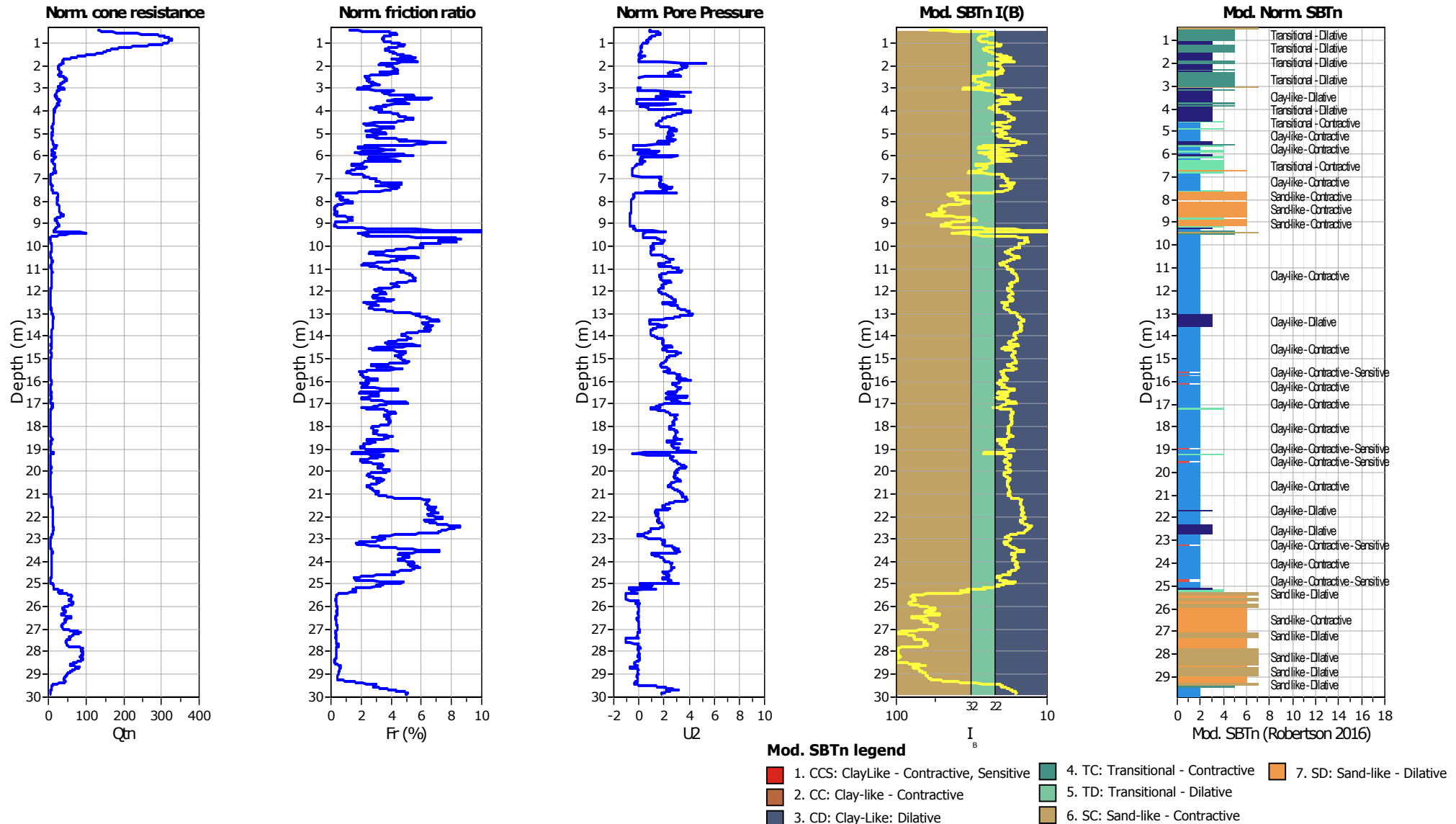


SBTn legend

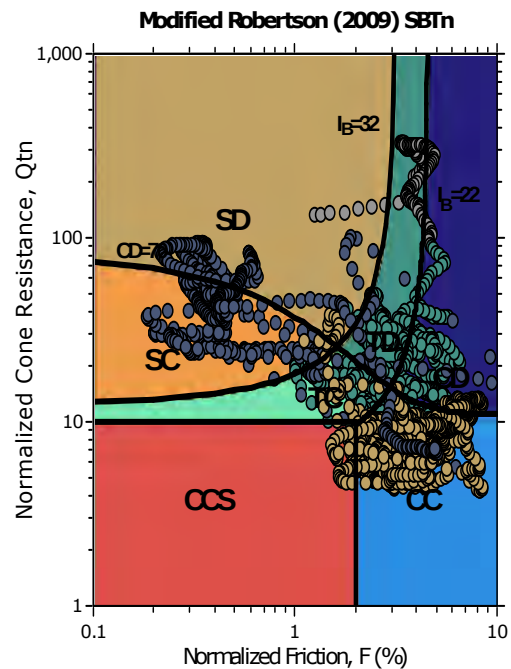
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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



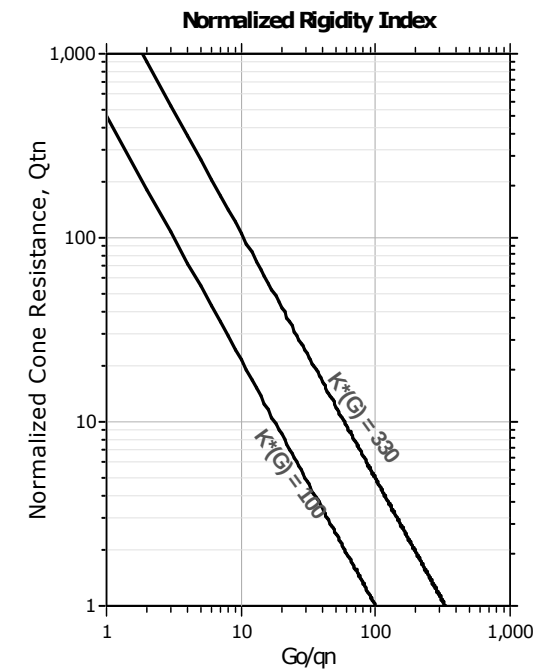
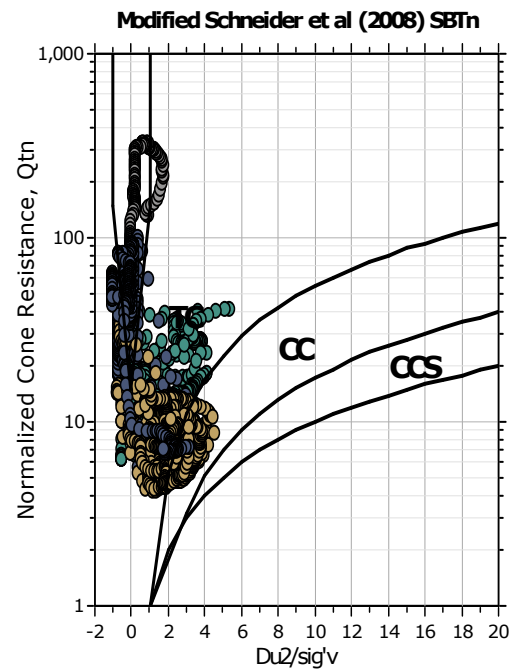




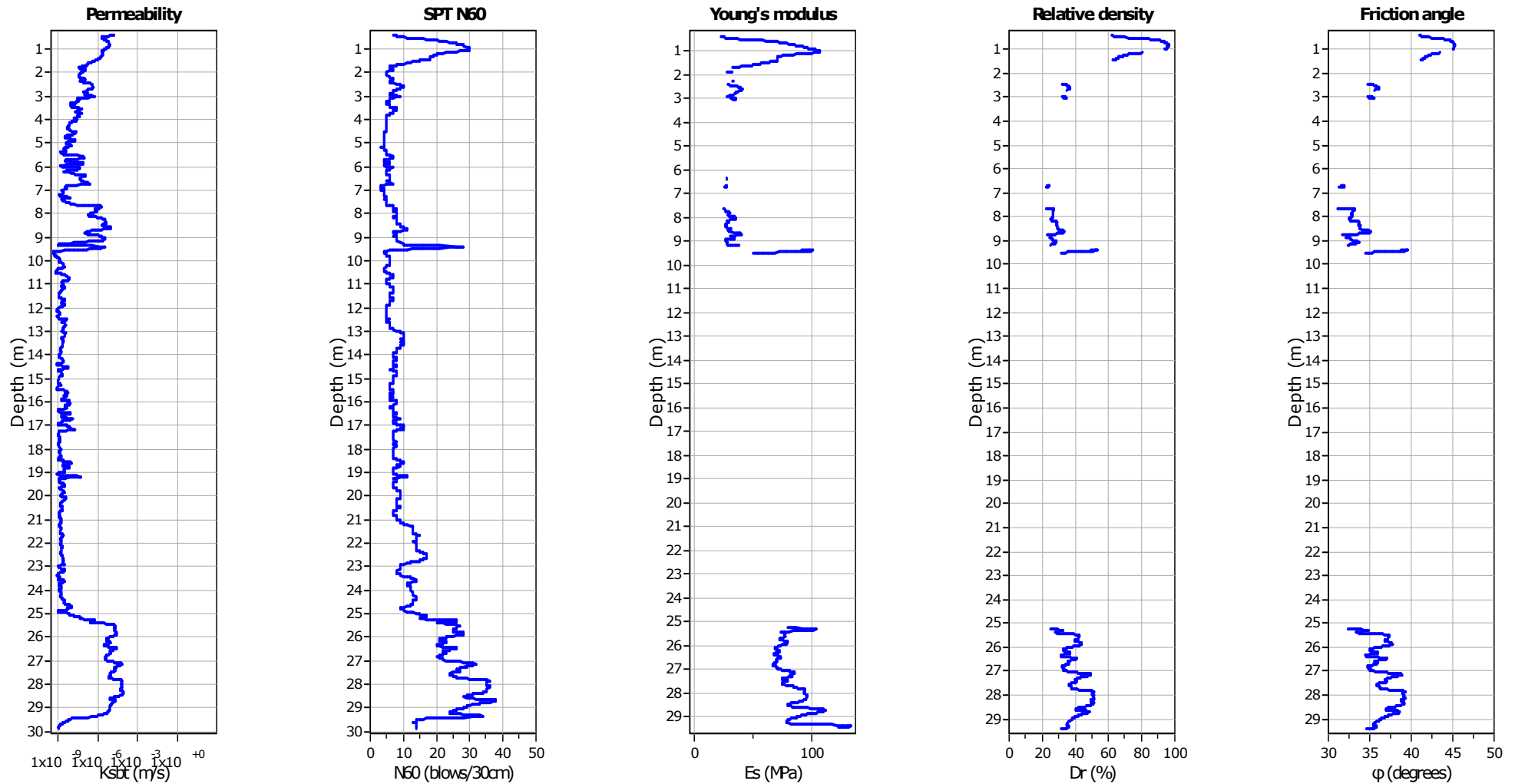
Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative



$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
 (e.g. age/cementation)



Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

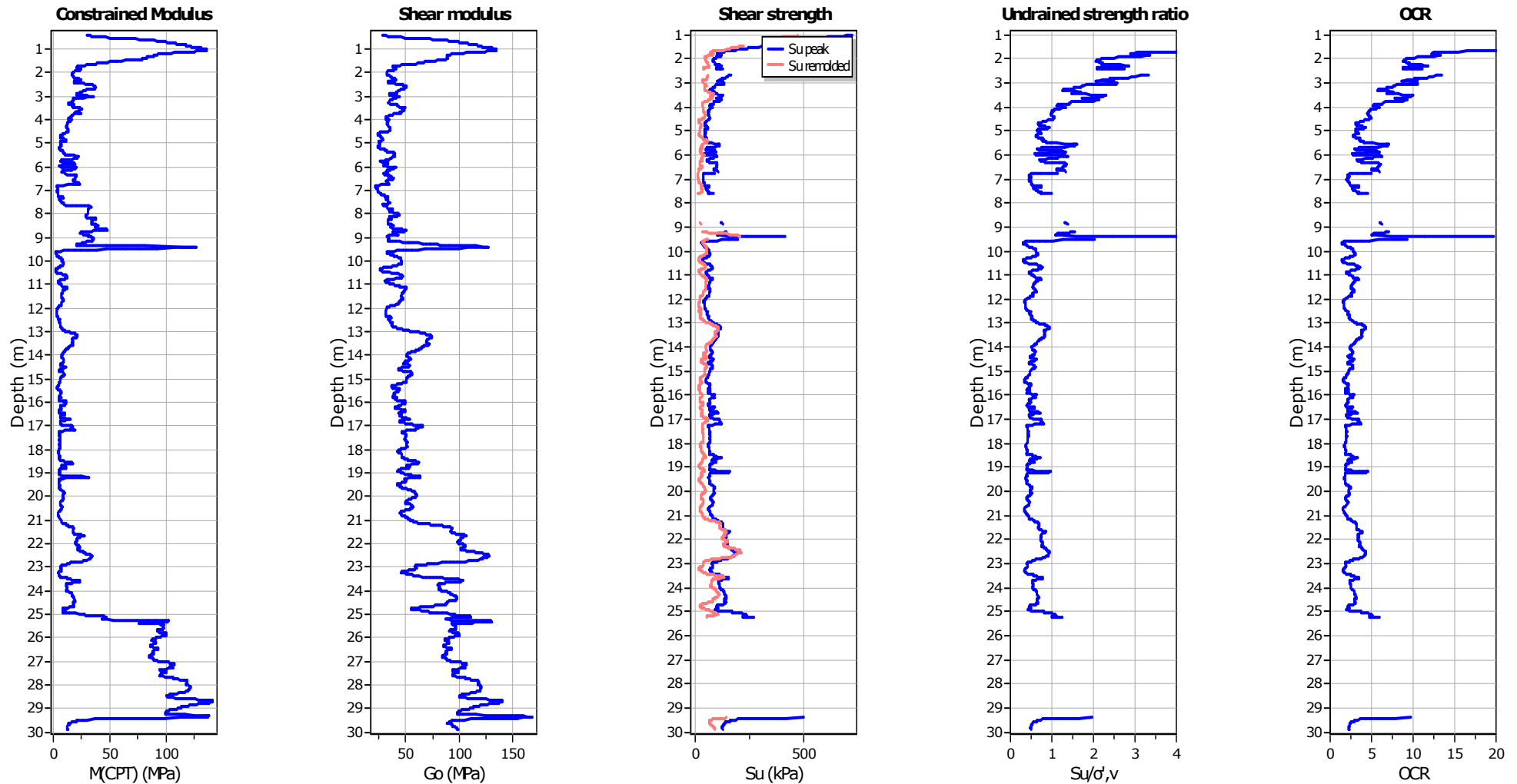
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

● User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

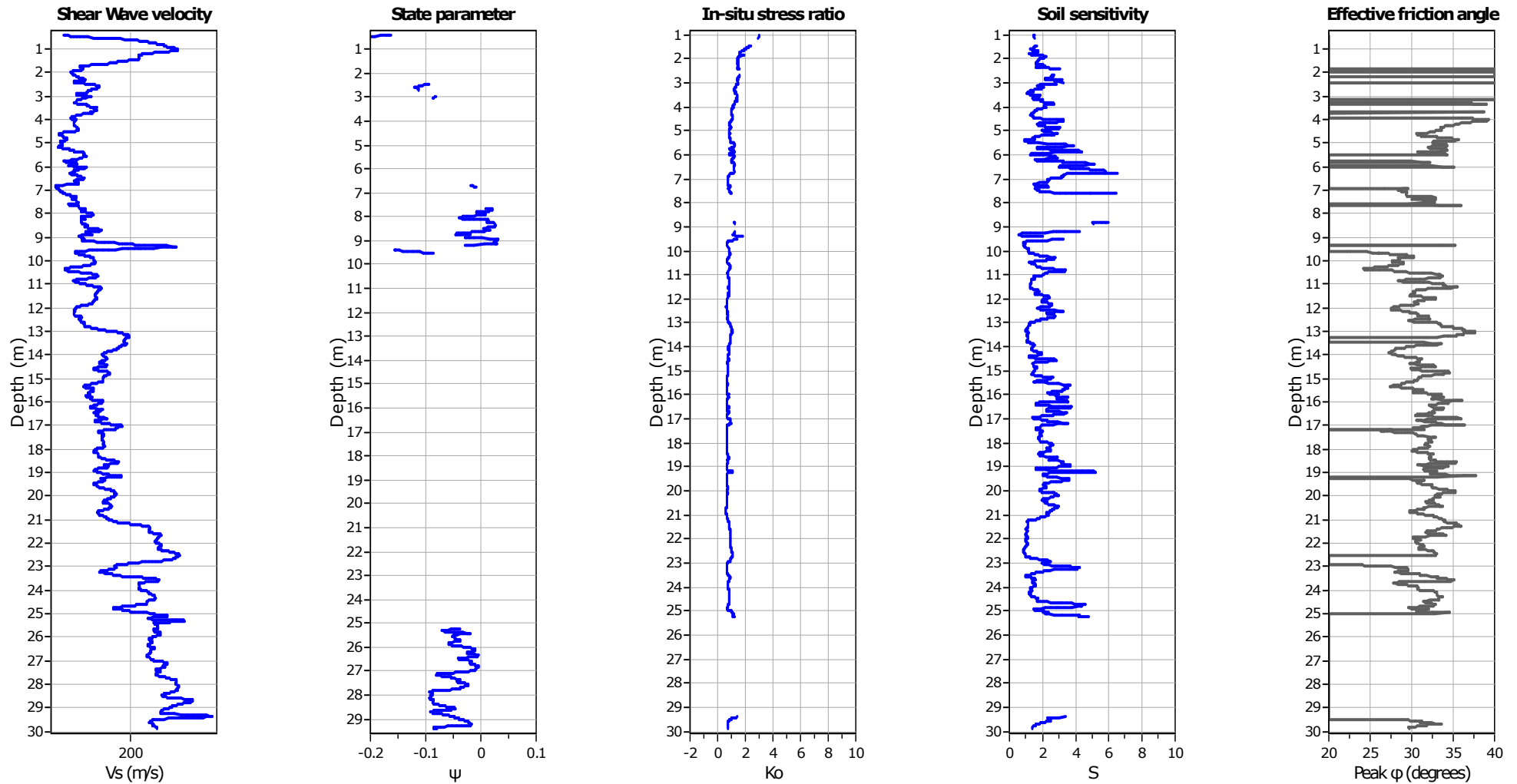
Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

—●— User defined estimation data

—●— Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

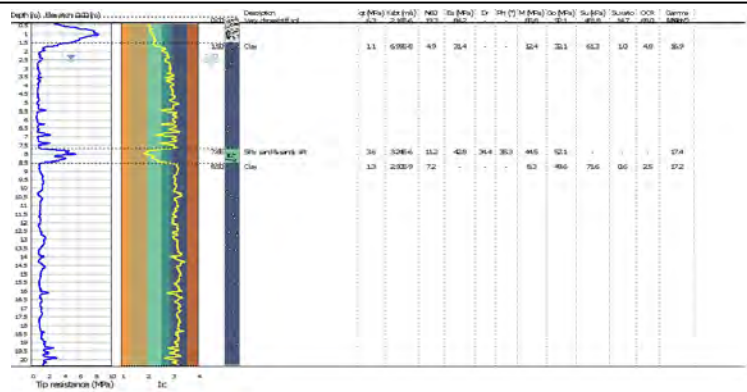
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

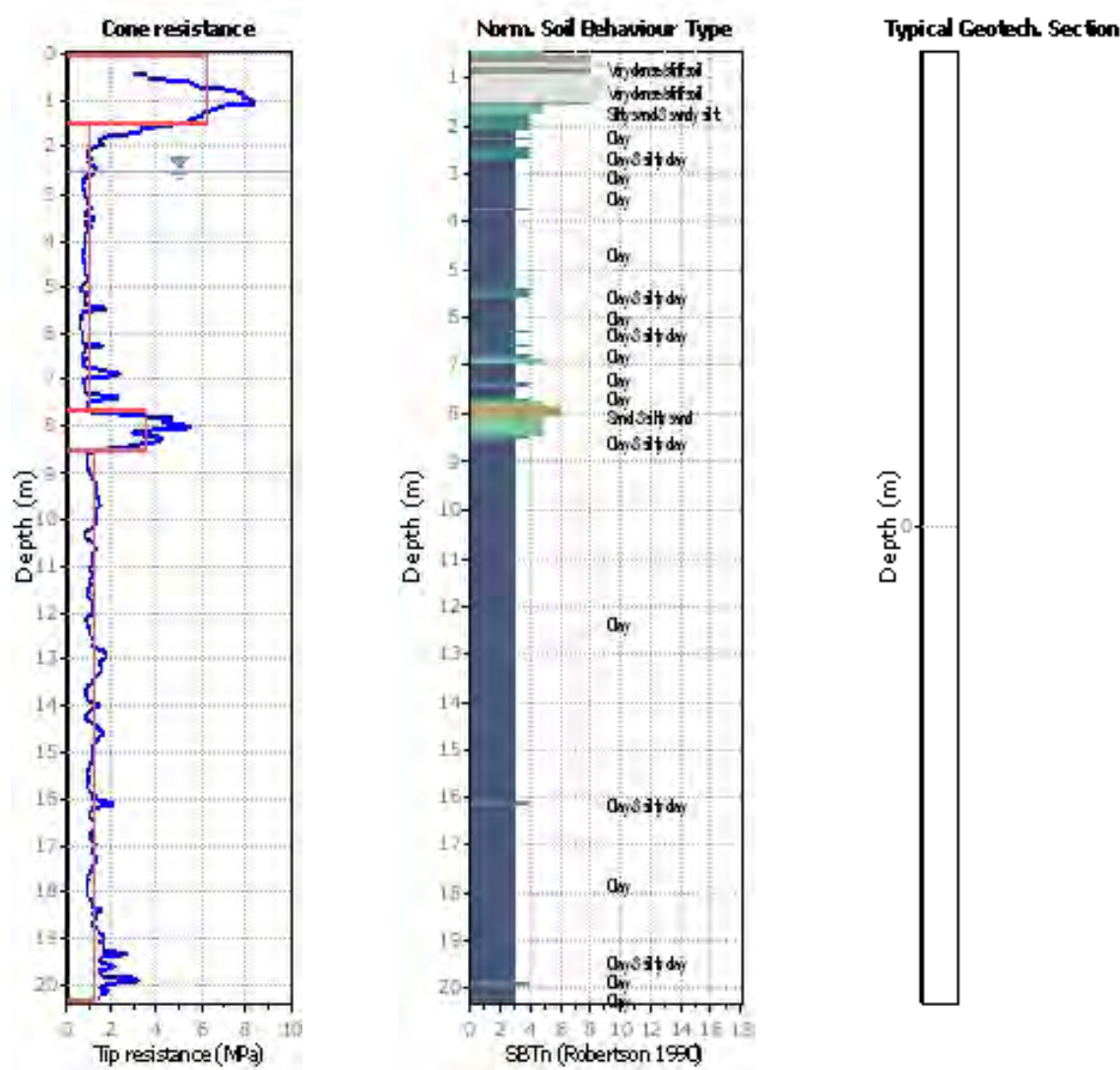
—●— User defined estimation data

Geo Group S.r.l.
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

Project:
Location:

CPT: 1t
Total depth: 20.31 m, Date: 25/08/2021





Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.50 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 6.26 ± 1.47 MPa

Sleeve friction: 291.21 ± 102.76 kPa

SBT_n: 9

SBT_n description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: $2.16E-06 \pm 1.26E-06$ m/s

N₆₀: 19.31 ± 4.66 blows

Es: 84.19 ± 9.83 MPa

Dr (%): 0.00 ± 0.00

ϕ (degrees): 0.00 ± 0.00 °

Unit weight: 20.11 ± 0.61 kN/m³

Constrained Mod.: 85.76 ± 21.69 MPa

Go: 92.15 ± 23.71 MPa

Su: 481.80 ± 72.49 kPa

Su ratio: 14.72 ± 3.22

O.C.R.: 67.98 ± 14.88

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.50 (m), End depth: 7.65 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.06 ±0.60 MPa

Sleeve friction: 33.33 ±17.08 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 6.99E-08 ±2.25E-07 m/s

N60: 4.92 ±1.66 blows

Es: 31.41 ±3.23 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.91 ±0.56 kN/m³

Constrained Mod.: 12.36 ±9.31 MPa

Go: 32.07 ±6.76 MPa

Su: 61.25 ±20.60 kPa

Su ratio: 1.04 ±0.48

O.C.R.: 4.79 ±2.23

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 7.65 (m), End depth: 8.50 (m)****Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 3.61 ±1.11 MPa

Sleeve friction: 34.29 ±13.48 kPa

SBT_n: 5

SBTn description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 3.24E-06 ±3.99E-06 m/s

N60: 11.23 ±2.29 blows

Es: 42.82 ±5.46 MPa

Dr (%): 34.43 ±3.72

φ (degrees): 35.34 ±1.05 °

Unit weight: 17.44 ±0.44 kN/m³

Constrained Mod.: 44.50 ±12.34 MPa

Go: 52.13 ±7.59 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 8.50 (m), End depth: 20.31 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.25 ±0.33 MPa

Sleeve friction: 42.53 ±20.95 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 2.90E-09 ±4.32E-09 m/s

N60: 7.18 ±1.54 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.23 ±0.64 kN/m³

Constrained Mod.: 8.27 ±5.28 MPa

Go: 49.57 ±10.76 MPa

Su: 71.55 ±22.27 kPa

Su ratio: 0.55 ±0.18

O.C.R.: 2.54 ±0.82

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

Project:**Location:****CPT: 1t**

Total depth: 20.31 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

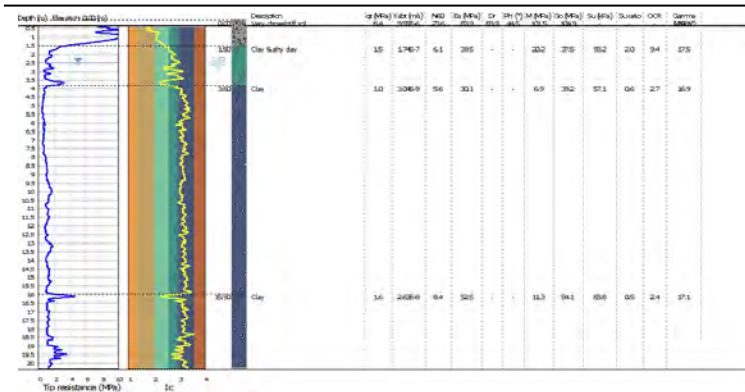
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.50	2.16E-06	19.3	84.2	0.0	0.0	85.8	92.1	481.8	14.7	68.0	20.1
1.50		(±1.26E-06)	(±4.7)	(±9.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±21.7)	(±23.7)	(±72.5)	(±3.2)	(±14.9)	(±0.6)
1.50	6.15	6.99E-08	4.9	31.4	0.0	0.0	12.4	32.1	61.3	1.0	4.8	16.9
7.65		(±2.25E-07)	(±1.7)	(±3.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.3)	(±6.8)	(±20.6)	(±0.5)	(±2.2)	(±0.6)
7.65	0.85	3.24E-06	11.2	42.8	34.4	35.3	44.5	52.1	0.0	0.0	0.0	17.4
8.50		(±3.99E-06)	(±2.3)	(±5.5)	(±3.7)	(±1.1)	(±12.3)	(±7.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
8.50	11.81	2.90E-09	7.2	0.0	0.0	0.0	8.3	49.6	71.6	0.6	2.5	17.2
20.31		(±4.32E-09)	(±1.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.3)	(±10.8)	(±22.3)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.6)

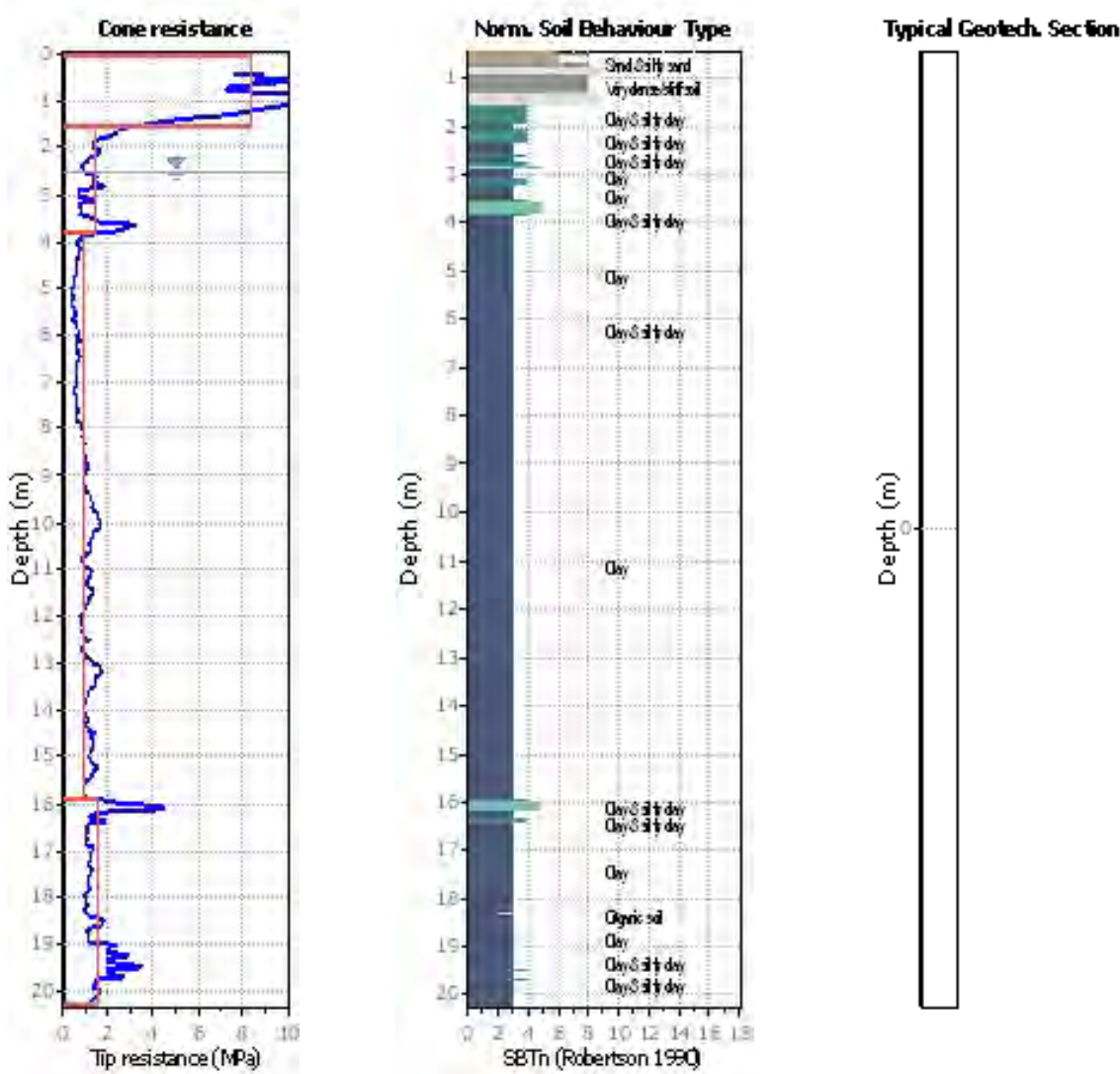
Depth values presented in this table are measured from free ground surface

info@geogroupmodena.it

Location:

Total depth: 20.27 m, Date: 25/08/2021





Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.50 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 8.36 ±1.89 MPa

Sleeve friction: 317.13 ±112.98 kPa

SBT_n: 8

SBT_n description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: 9.59E-06 ±1.37E-05 m/s

N60: 23.64 ±4.76 blows

Es: 83.87 ±18.88 MPa

Dr (%): 89.90 ±6.41

φ (degrees): 44.54 ±0.70 °

Unit weight: 20.33 ±0.49 kN/m³

Constrained Mod.: 101.53 ±25.59 MPa

Go: 104.92 ±22.43 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.50 (m), End depth: 3.80 (m)****Description:** Clay & silty clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.50 ±0.69 MPa

Sleeve friction: 52.92 ±32.74 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.74E-07 ±3.15E-07 m/s

N60: 6.12 ±2.01 blows

Es: 39.47 ±9.41 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.49 ±0.71 kN/m³

Constrained Mod.: 20.23 ±9.79 MPa

Go: 37.48 ±9.12 MPa

Su: 93.16 ±42.87 kPa

Su ratio: 2.05 ±1.21

O.C.R.: 9.45 ±5.60

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 3.80 (m), End depth: 15.90 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.97 ±0.32 MPa

Sleeve friction: 35.86 ±20.02 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.04E-09 ±7.44E-09 m/s

N60: 5.57 ±1.78 blows

Es: 30.07 ±0.83 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.89 ±0.77 kN/m³

Constrained Mod.: 6.95 ±4.20 MPa

Go: 39.24 ±12.87 MPa

Su: 57.09 ±19.92 kPa

Su ratio: 0.58 ±0.18

O.C.R.: 2.69 ±0.82

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 15.90 (m), End depth: 20.27 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.57 ±0.69 MPa

Sleeve friction: 37.57 ±19.74 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.63E-08 ±1.21E-07 m/s

N60: 8.38 ±2.30 blows

Es: 52.46 ±52.46 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.14 ±0.72 kN/m³

Constrained Mod.: 11.26 ±11.63 MPa

Go: 54.13 ±13.79 MPa

Su: 83.75 ±36.85 kPa

Su ratio: 0.52 ±0.22

O.C.R.: 2.42 ±1.03

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

Project:**Location:****CPT: 2t**

Total depth: 20.27 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

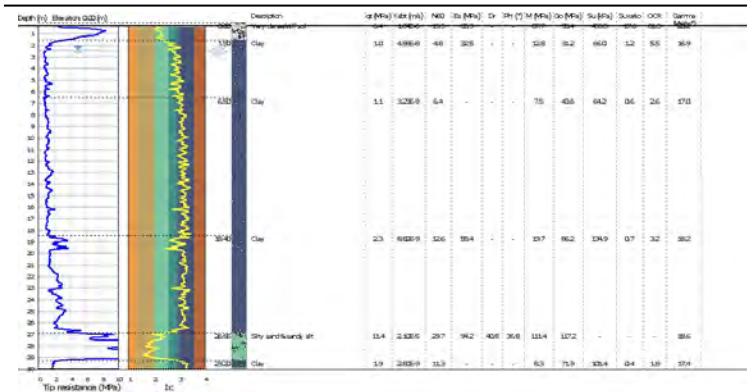
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.50	9.59E-06	23.6	83.9	89.9	44.5	101.5	104.9	0.0	0.0	0.0	20.3
1.50		(±1.37E-05)	(±4.8)	(±18.9)	(±6.4)	(±0.7)	(±25.6)	(±22.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
1.50	2.30	1.74E-07	6.1	39.5	0.0	0.0	20.2	37.5	93.2	2.0	9.4	17.5
3.80		(±3.15E-07)	(±2.0)	(±9.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.8)	(±9.1)	(±42.9)	(±1.2)	(±5.6)	(±0.7)
3.80	12.10	3.04E-09	5.6	30.1	0.0	0.0	6.9	39.2	57.1	0.6	2.7	16.9
15.90		(±7.44E-09)	(±1.8)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.2)	(±12.9)	(±19.9)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.8)
15.90	4.37	2.63E-08	8.4	52.5	0.0	0.0	11.3	54.1	83.8	0.5	2.4	17.1
20.27		(±1.21E-07)	(±2.3)	(±52.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±11.6)	(±13.8)	(±36.9)	(±0.2)	(±1.0)	(±0.7)

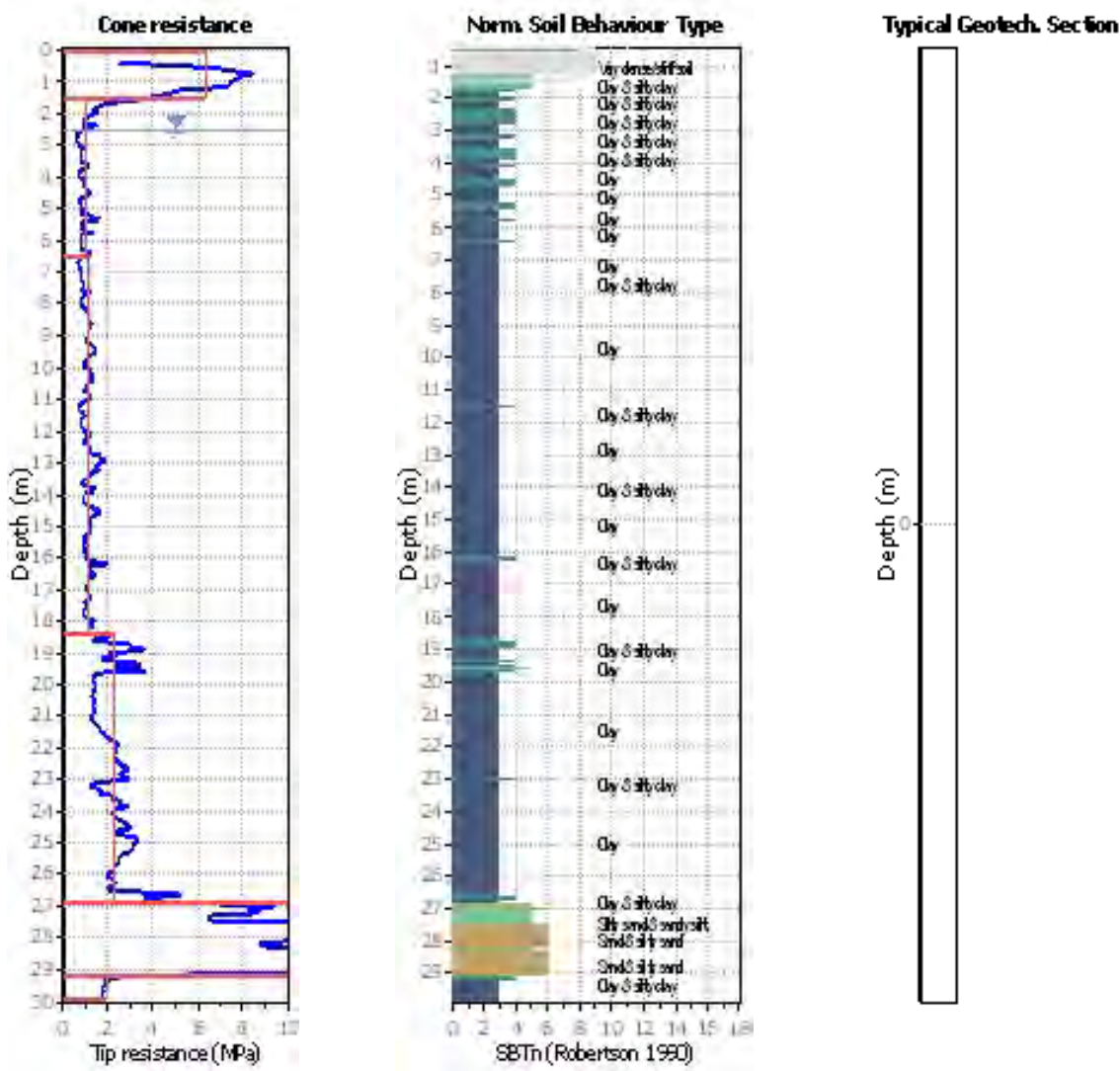
Depth values presented in this table are measured from free ground surface

info@geogroupmodena.it

Location:

Total depth: 29.90 m, Date: 25/08/2021





Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.50 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 6.37 ± 1.63 MPa

Sleeve friction: 320.28 ± 145.04 kPa

SBT_n: 9

SBT_n description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: $1.84E-06 \pm 9.77E-07$ m/s

N₆₀: 19.90 ± 5.20 blows

Es: 85.95 ± 17.62 MPa

Dr (%): 0.00 ± 0.00

ϕ (degrees): 0.00 ± 0.00 °

Unit weight: 20.17 ± 0.72 kN/m³

Constrained Mod.: 87.75 ± 23.12 MPa

Go: 95.39 ± 26.21 MPa

Su: 499.34 ± 109.31 kPa

Su ratio: 17.60 ± 4.67

O.C.R.: 81.30 ± 21.56

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.50 (m), End depth: 6.50 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.04 ±0.45 MPa

Sleeve friction: 33.65 ±19.84 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 4.56E-08 ±9.74E-08 m/s

N60: 4.82 ±1.36 blows

Es: 32.48 ±8.02 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.87 ±0.67 kN/m³

Constrained Mod.: 12.75 ±6.93 MPa

Go: 31.18 ±6.74 MPa

Su: 65.97 ±25.96 kPa

Su ratio: 1.20 ±0.71

O.C.R.: 5.53 ±3.28

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 6.50 (m), End depth: 18.40 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.11 ±0.23 MPa

Sleeve friction: 36.89 ±20.04 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.23E-09 ±3.34E-09 m/s

N60: 6.40 ±1.23 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.00 ±0.69 kN/m³

Constrained Mod.: 7.51 ±3.92 MPa

Go: 43.56 ±9.88 MPa

Su: 64.17 ±15.69 kPa

Su ratio: 0.57 ±0.17

O.C.R.: 2.62 ±0.79

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 18.40 (m), End depth: 26.85 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.29 ±0.72 MPa

Sleeve friction: 88.65 ±48.86 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 8.82E-09 ±2.48E-08 m/s

N60: 12.56 ±3.21 blows

Es: 58.41 ±15.86 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.23 ±0.83 kN/m³

Constrained Mod.: 19.68 ±12.24 MPa

Go: 86.19 ±24.47 MPa

Su: 134.95 ±49.43 kPa

Su ratio: 0.69 ±0.24

O.C.R.: 3.18 ±1.11

::: Layer No: 5 :::**Code: 5** **Start depth: 26.85 (m), End depth: 29.20 (m)****Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 11.41 ±3.81 MPa

Sleeve friction: 62.93 ±26.28 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 2.10E-05 ±2.70E-05 m/s

N60: 29.69 ±6.34 blows

Es: 94.18 ±13.74 MPa

Dr (%): 40.80 ±7.85

φ (degrees): 36.83 ±1.92 °

Unit weight: 18.59 ±0.44 kN/m³

Constrained Mod.: 111.41 ±23.86 MPa

Go: 117.23 ±17.45 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 6 :::**Code:** 6 **Start depth:** 29.20 (m), **End depth:** 29.90 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.94 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 38.46 ±5.62 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 2.80E-09 ±3.58E-09 m/s

N60: 11.31 ±0.83 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.42 ±0.17 kN/m³

Constrained Mod.: 8.30 ±4.38 MPa

Go: 71.87 ±4.05 MPa

Su: 101.42 ±22.26 kPa

Su ratio: 0.40 ±0.09

O.C.R.: 1.84 ±0.41

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

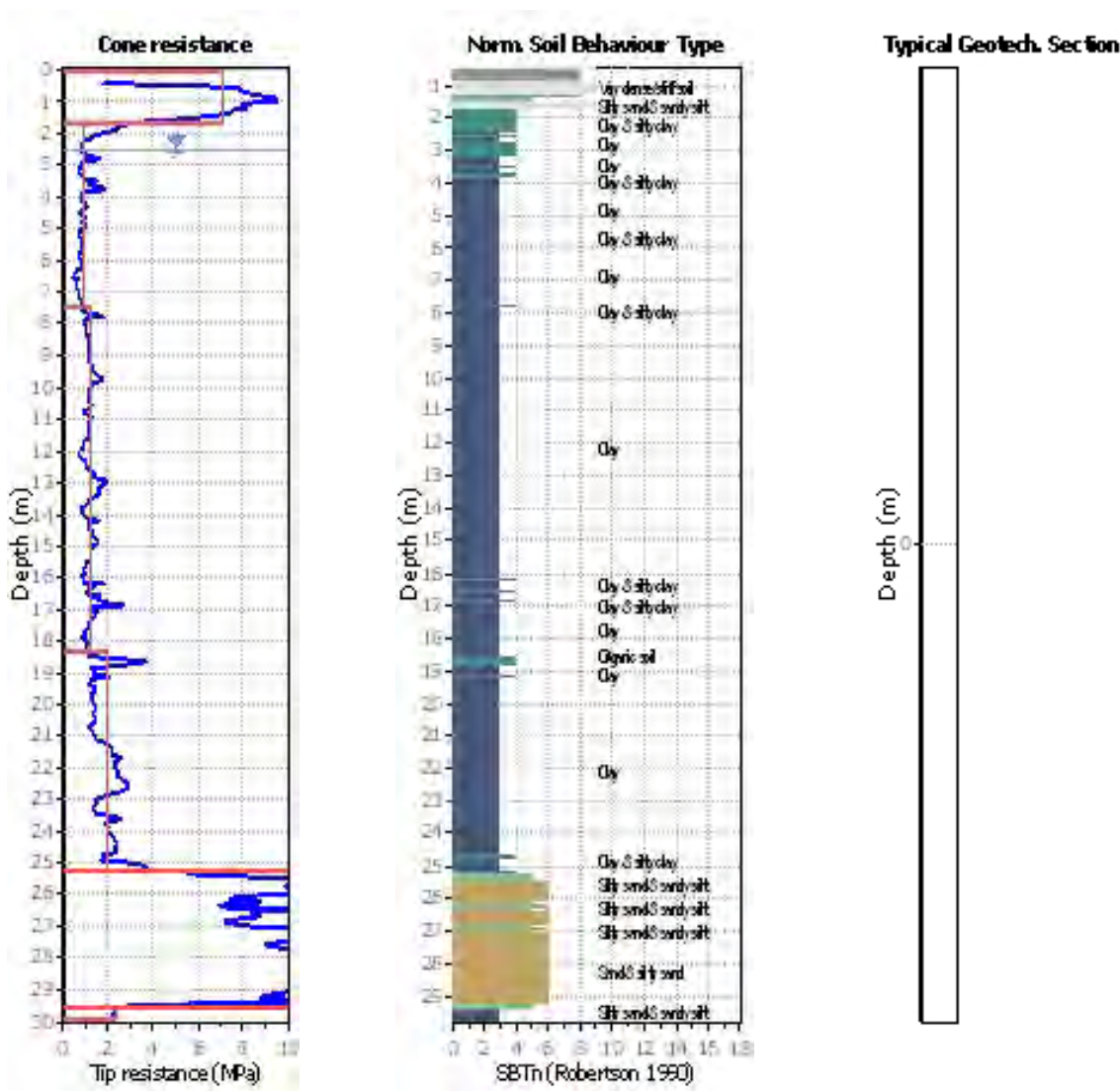
Project:**Location:****CPT: 3t**

Total depth: 29.90 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.50	1.84E-06	19.9	85.9	0.0	0.0	87.7	95.4	499.3	17.6	81.3	20.2
1.50		(±9.77E-07)	(±5.2)	(±17.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±23.1)	(±26.2)	(±109.3)	(±4.7)	(±21.6)	(±0.7)
1.50	5.00	4.56E-08	4.8	32.5	0.0	0.0	12.8	31.2	66.0	1.2	5.5	16.9
6.50		(±9.74E-08)	(±1.4)	(±8.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.9)	(±6.7)	(±26.0)	(±0.7)	(±3.3)	(±0.7)
6.50	11.90	3.23E-09	6.4	0.0	0.0	0.0	7.5	43.6	64.2	0.6	2.6	17.0
18.40		(±3.34E-09)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.9)	(±9.9)	(±15.7)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.7)
18.40	8.45	8.82E-09	12.6	58.4	0.0	0.0	19.7	86.2	134.9	0.7	3.2	18.2
26.85		(±2.48E-08)	(±3.2)	(±15.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±12.2)	(±24.5)	(±49.4)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.8)
26.85	2.35	2.10E-05	29.7	94.2	40.8	36.8	111.4	117.2	0.0	0.0	0.0	18.6
29.20		(±2.70E-05)	(±6.3)	(±13.7)	(±7.8)	(±1.9)	(±23.9)	(±17.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
29.20	0.70	2.80E-09	11.3	0.0	0.0	0.0	8.3	71.9	101.4	0.4	1.8	17.4
29.90		(±3.58E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.4)	(±4.1)	(±22.3)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.2)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface



Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.70 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 7.04 ±1.94 MPa

Sleeve friction: 306.23 ±124.32 kPa

SBT_n: 8

SBTn description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: 3.07E-06 ±2.96E-06 m/s

N60: 21.16 ±5.44 blows

Es: 75.35 ±14.91 MPa

Dr (%): 82.38 ±11.49

φ (degrees): 43.63 ±1.40 °

Unit weight: 20.20 ±0.62 kN/m³

Constrained Mod.: 92.63 ±25.92 MPa

Go: 98.66 ±25.25 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.70 (m), End depth: 7.50 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.97 ±0.40 MPa

Sleeve friction: 33.36 ±23.60 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.53E-08 ±4.69E-08 m/s

N60: 4.69 ±1.34 blows

Es: 36.90 ±10.61 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.81 ±0.68 kN/m³

Constrained Mod.: 10.80 ±6.92 MPa

Go: 31.28 ±7.29 MPa

Su: 62.28 ±29.51 kPa

Su ratio: 1.09 ±0.79

O.C.R.: 5.05 ±3.63

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 7.50 (m), End depth: 18.30 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.21 ±0.26 MPa

Sleeve friction: 42.23 ±18.29 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.39E-09 ±6.29E-09 m/s

N60: 6.86 ±1.25 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.25 ±0.58 kN/m³

Constrained Mod.: 8.77 ±4.94 MPa

Go: 47.60 ±8.87 MPa

Su: 70.49 ±18.94 kPa

Su ratio: 0.60 ±0.20

O.C.R.: 2.77 ±0.93

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 18.30 (m), End depth: 25.25 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.94 ±0.62 MPa

Sleeve friction: 71.66 ±47.62 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 5.22E-09 ±1.42E-08 m/s

N60: 11.02 ±2.95 blows

Es: 63.07 ±0.97 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.89 ±0.86 kN/m³

Constrained Mod.: 14.15 ±10.24 MPa

Go: 75.50 ±22.91 MPa

Su: 111.66 ±43.22 kPa

Su ratio: 0.58 ±0.21

O.C.R.: 2.70 ±0.99

::: Layer No: 5 :::**Code: 5** **Start depth: 25.25 (m), End depth: 29.60 (m)****Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 10.53 ±3.17 MPa

Sleeve friction: 47.54 ±25.25 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 2.11E-05 ±2.34E-05 m/s

N60: 27.05 ±5.34 blows

Es: 83.89 ±13.38 MPa

Dr (%): 40.05 ±6.13

φ (degrees): 36.73 ±1.45 °

Unit weight: 18.20 ±0.49 kN/m³

Constrained Mod.: 99.94 ±20.61 MPa

Go: 105.01 ±16.65 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 6 :::**Code:** 6 **Start depth:** 29.60 (m), **End depth:** 29.90 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.35 ±0.07 MPa

Sleeve friction: 75.04 ±7.65 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.84E-09 ±6.86E-10 m/s

N60: 14.00 ±0.00 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.28 ±0.11 kN/m³

Constrained Mod.: 13.04 ±1.08 MPa

Go: 93.86 ±2.35 MPa

Su: 130.39 ±5.18 kPa

Su ratio: 0.51 ±0.02

O.C.R.: 2.35 ±0.10

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

Project:**Location:****CPT: 4t**

Total depth: 29.81 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

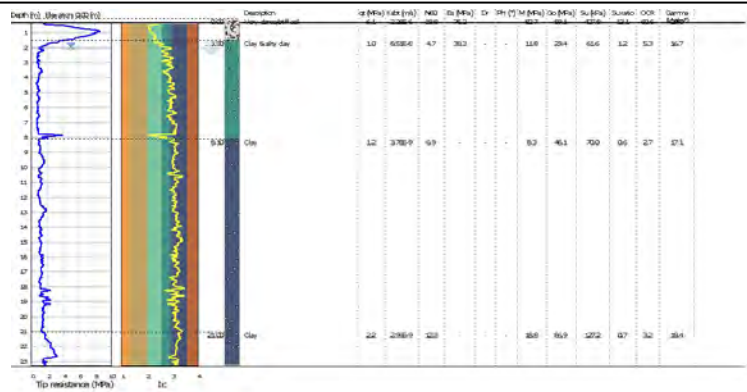
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.70	3.07E-06	21.2	75.3	82.4	43.6	92.6	98.7	0.0	0.0	0.0	20.2
1.70		(±2.96E-06)	(±5.4)	(±14.9)	(±11.5)	(±1.4)	(±25.9)	(±25.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
1.70	5.80	2.53E-08	4.7	36.9	0.0	0.0	10.8	31.3	62.3	1.1	5.0	16.8
7.50		(±4.69E-08)	(±1.3)	(±10.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.9)	(±7.3)	(±29.5)	(±0.8)	(±3.6)	(±0.7)
7.50	10.80	3.39E-09	6.9	0.0	0.0	0.0	8.8	47.6	70.5	0.6	2.8	17.2
18.30		(±6.29E-09)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.9)	(±8.9)	(±18.9)	(±0.2)	(±0.9)	(±0.6)
18.30	6.95	5.22E-09	11.0	63.1	0.0	0.0	14.1	75.5	111.7	0.6	2.7	17.9
25.25		(±1.42E-08)	(±3.0)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.2)	(±22.9)	(±43.2)	(±0.2)	(±1.0)	(±0.9)
25.25	4.35	2.11E-05	27.0	83.9	40.0	36.7	99.9	105.0	0.0	0.0	0.0	18.2
29.60		(±2.34E-05)	(±5.3)	(±13.4)	(±6.1)	(±1.5)	(±20.6)	(±16.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
29.60	0.30	1.84E-09	14.0	0.0	0.0	0.0	13.0	93.9	130.4	0.5	2.4	18.3
29.90		(±6.86E-10)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.1)	(±2.3)	(±5.2)	(±0.0)	(±0.1)	(±0.1)

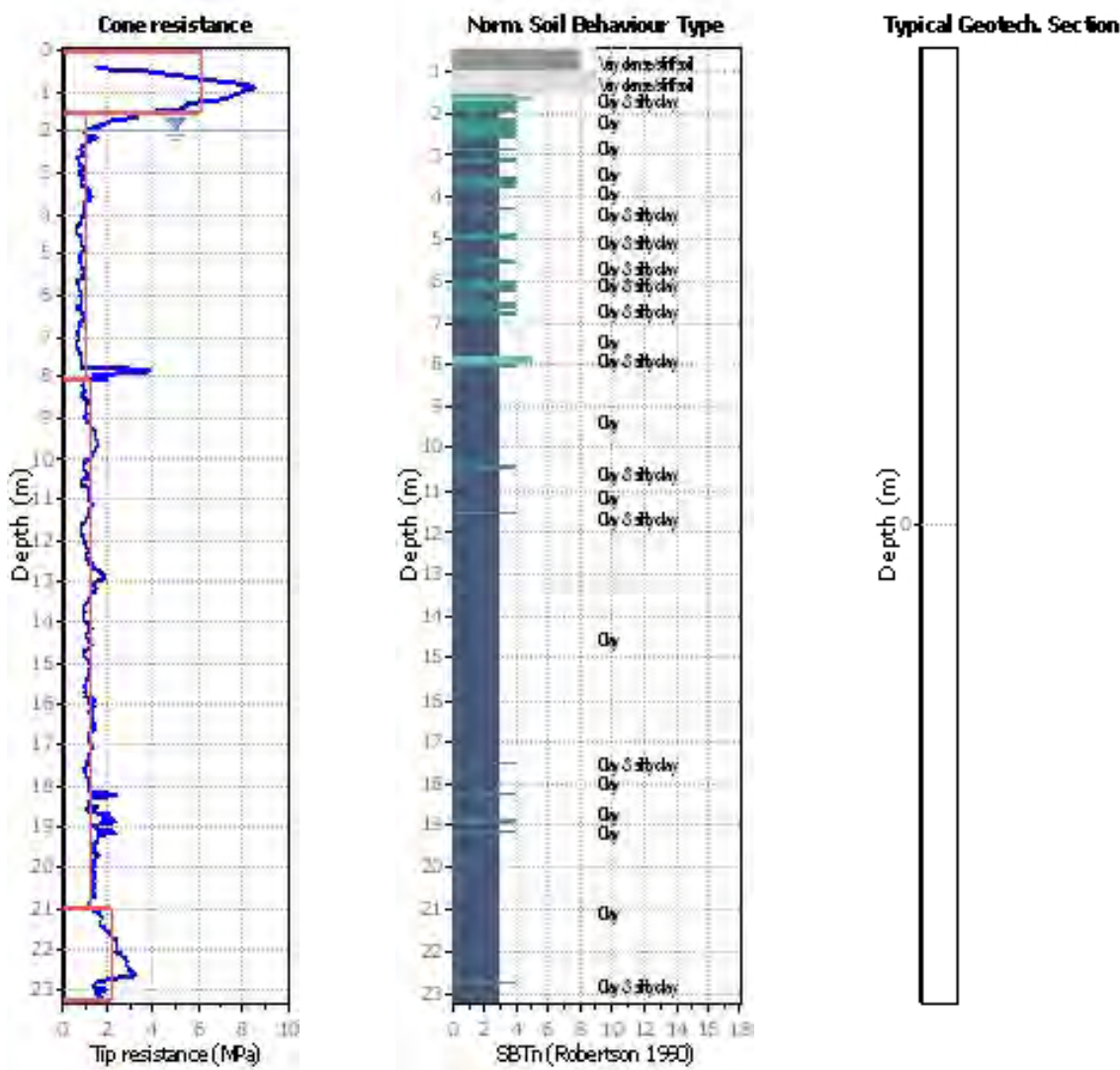
Depth values presented in this table are measured from free ground surface

Geo Group S.r.l.
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

Project:
Location:

CPT: 5t
Total depth: 23.23 m, Date: 25/08/2021





Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.50 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 6.12 ± 1.81 MPa

Sleeve friction: 275.78 ± 105.63 kPa

SBT_n: 9

SBT_n description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: $2.26E-06 \pm 1.46E-06$ m/s

N₆₀: 18.75 ± 5.41 blows

Es: 76.22 ± 21.24 MPa

Dr (%): 0.00 ± 0.00

ϕ (degrees): 0.00 ± 0.00 °

Unit weight: 20.02 ± 0.64 kN/m³

Constrained Mod.: 82.68 ± 25.32 MPa

Go: 89.12 ± 25.60 MPa

Su: 427.82 ± 138.97 kPa

Su ratio: 13.11 ± 3.50

O.C.R.: 60.59 ± 16.18

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.50 (m), End depth: 8.10 (m)****Description:** Clay & silty clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.02 ±0.59 MPa

Sleeve friction: 29.66 ±22.68 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 8.51E-08 ±3.72E-07 m/s

N60: 4.67 ±1.69 blows

Es: 38.28 ±10.24 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.66 ±0.73 kN/m³

Constrained Mod.: 11.81 ±8.97 MPa

Go: 29.36 ±7.88 MPa

Su: 61.59 ±32.30 kPa

Su ratio: 1.16 ±0.89

O.C.R.: 5.34 ±4.10

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 8.10 (m), End depth: 21.00 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.23 ±0.26 MPa

Sleeve friction: 37.14 ±17.98 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.78E-09 ±4.13E-09 m/s

N60: 6.91 ±1.33 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.07 ±0.66 kN/m³

Constrained Mod.: 8.28 ±4.54 MPa

Go: 46.09 ±9.35 MPa

Su: 70.02 ±17.56 kPa

Su ratio: 0.58 ±0.18

O.C.R.: 2.66 ±0.84

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 21.00 (m), End depth: 23.23 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.16 ±0.55 MPa

Sleeve friction: 102.40 ±53.42 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.99E-09 ±3.43E-09 m/s

N60: 12.31 ±2.78 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.40 ±0.80 kN/m³

Constrained Mod.: 18.80 ±10.63 MPa

Go: 86.88 ±22.29 MPa

Su: 127.23 ±39.10 kPa

Su ratio: 0.70 ±0.21

O.C.R.: 3.21 ±0.96

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

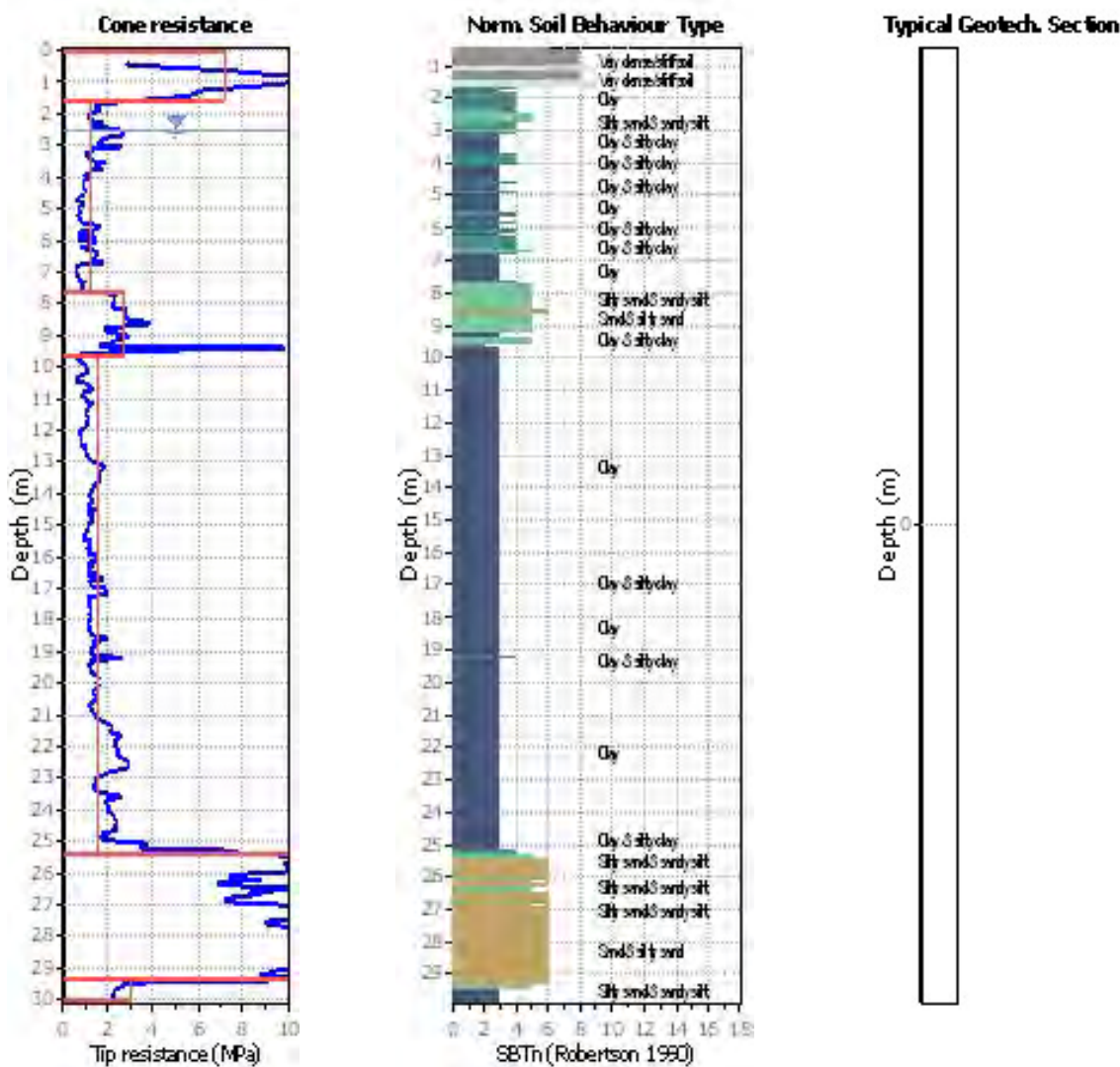
Project:**Location:****CPT: 5t**

Total depth: 23.23 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.50	2.26E-06	18.8	76.2	0.0	0.0	82.7	89.1	427.8	13.1	60.6	20.0
1.50		(±1.46E-06)	(±5.4)	(±21.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±25.3)	(±25.6)	(±139.0)	(±3.5)	(±16.2)	(±0.6)
1.50	6.60	8.51E-08	4.7	38.3	0.0	0.0	11.8	29.4	61.6	1.2	5.3	16.7
8.10		(±3.72E-07)	(±1.7)	(±10.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.0)	(±7.9)	(±32.3)	(±0.9)	(±4.1)	(±0.7)
8.10	12.90	3.78E-09	6.9	0.0	0.0	0.0	8.3	46.1	70.0	0.6	2.7	17.1
21.00		(±4.13E-09)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.5)	(±9.3)	(±17.6)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.7)
21.00	2.23	2.99E-09	12.3	0.0	0.0	0.0	18.8	86.9	127.2	0.7	3.2	18.4
23.23		(±3.43E-09)	(±2.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.6)	(±22.3)	(±39.1)	(±0.2)	(±1.0)	(±0.8)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface



Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 1.55 (m)

Description: Very dense/stiff soil

Basic results

Total cone resistance: 7.16 ±2.48 MPa

Sleeve friction: 280.65 ±107.86 kPa

SBT_n: 8

SBT_n description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: 3.80E-06 ±2.82E-06 m/s

N₆₀: 20.89 ±6.51 blows

Es: 73.71 ±21.59 MPa

Dr (%): 81.32 ±13.15

φ (degrees): 43.48 ±1.58 °

Unit weight: 20.08 ±0.74 kN/m³

Constrained Mod.: 92.11 ±29.04 MPa

Go: 94.54 ±27.29 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 2 :::**Code: 2** **Start depth: 1.55 (m), End depth: 7.60 (m)****Description:** Clay & silty clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.25 ±0.53 MPa

Sleeve friction: 39.71 ±23.23 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 6.24E-08 ±1.03E-07 m/s

N60: 5.61 ±1.58 blows

Es: 35.41 ±7.92 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.11 ±0.72 kN/m³

Constrained Mod.: 15.33 ±8.79 MPa

Go: 35.49 ±7.49 MPa

Su: 78.15 ±33.61 kPa

Su ratio: 1.36 ±0.89

O.C.R.: 6.26 ±4.11

::: Layer No: 3 :::**Code: 3** **Start depth: 7.60 (m), End depth: 9.60 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.72 ±1.36 MPa

Sleeve friction: 34.26 ±49.50 kPa

SBT_n: 5SBT_n description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 1.74E-06 ±2.04E-06 m/s

N60: 9.05 ±3.80 blows

Es: 34.11 ±14.73 MPa

Dr (%): 28.87 ±5.28

φ (degrees): 33.59 ±1.43 °

Unit weight: 16.69 ±1.18 kN/m³

Constrained Mod.: 34.61 ±17.92 MPa

Go: 45.53 ±19.83 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 4 :::**Code: 4** **Start depth: 9.60 (m), End depth: 25.40 (m)****Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 1.56 ±0.75 MPa

Sleeve friction: 53.10 ±38.85 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 6.82E-09 ±4.01E-08 m/s

N60: 8.75 ±3.30 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.45 ±0.83 kN/m³

Constrained Mod.: 10.90 ±10.57 MPa

Go: 59.76 ±22.58 MPa

Su: 86.07 ±36.12 kPa

Su ratio: 0.55 ±0.16

O.C.R.: 2.53 ±0.74

::: Layer No: 5 :::**Code: 6** **Start depth: 25.40 (m), End depth: 29.40 (m)****Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 11.01 ±2.76 MPa

Sleeve friction: 43.98 ±21.83 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 2.30E-05 ±2.30E-05 m/s

N60: 27.59 ±4.88 blows

Es: 82.90 ±12.78 MPa

Dr (%): 40.55 ±5.91

φ (degrees): 36.86 ±1.38 °

Unit weight: 18.16 ±0.47 kN/m³

Constrained Mod.: 103.14 ±14.27 MPa

Go: 103.90 ±16.02 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

:: Layer No: 6 ::**Code:** 7 **Start depth:** 29.40 (m), **End depth:** 30.00 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 3.05 ±1.59 MPa

Sleeve friction: 82.52 ±23.90 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.67E-08 ±8.85E-08 m/s

N60: 15.78 ±4.46 blows

Es: 122.57 ±122.57 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.42 ±0.40 kN/m³

Constrained Mod.: 25.09 ±26.23 MPa

Go: 101.58 ±18.54 MPa

Su: 163.07 ±75.32 kPa

Su ratio: 0.65 ±0.31

O.C.R.: 2.99 ±1.45

Geo Group S.r.l.

v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)

059 3967169

info@geogroupmodena.it

Project:**Location:****CPT: 6t**

Total depth: 29.90 m, Date: 25/08/2021

Summary table of mean values

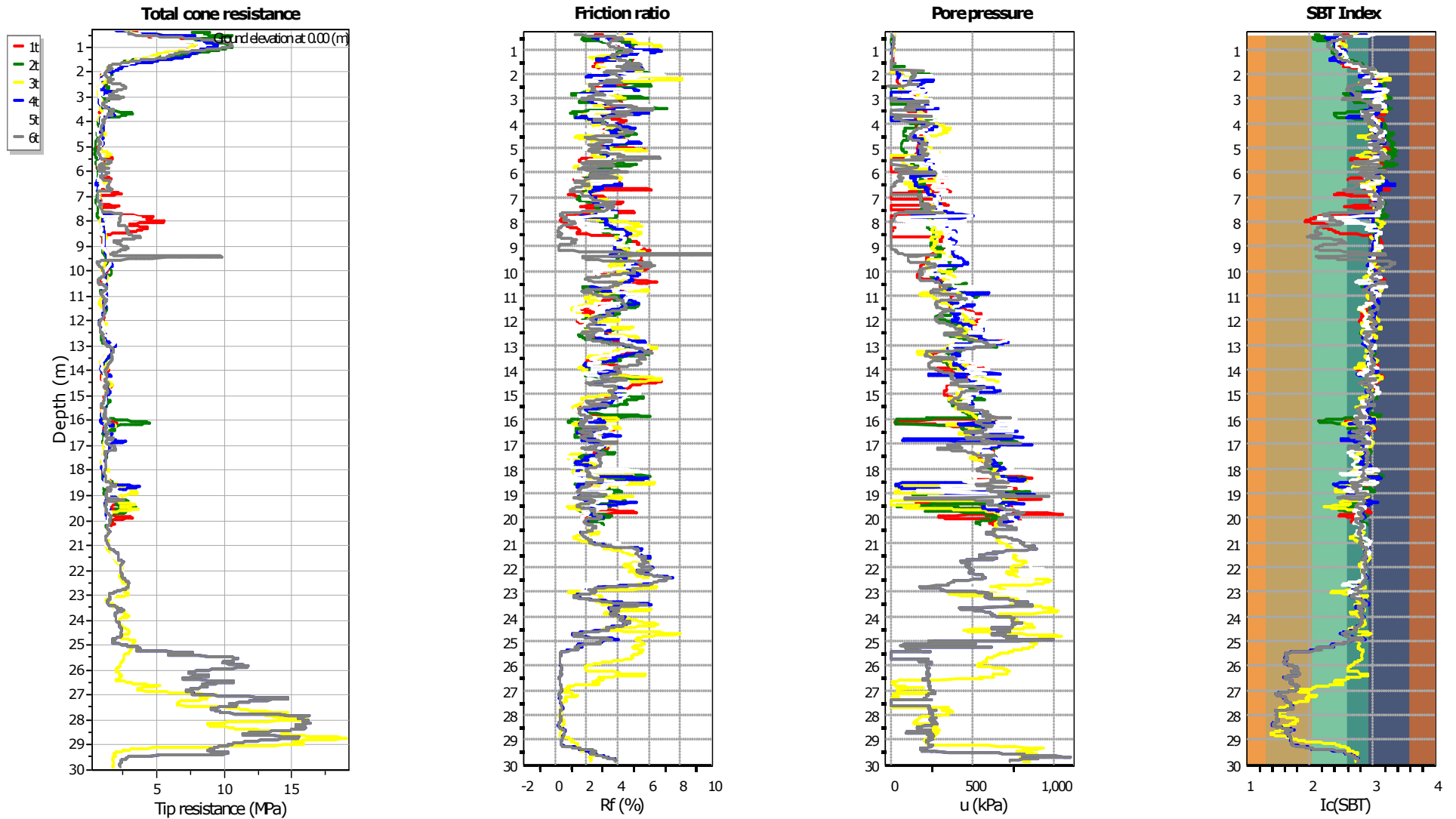
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	1.55	3.80E-06	20.9	73.7	81.3	43.5	92.1	94.5	0.0	0.0	0.0	20.1
1.55		(±2.82E-06)	(±6.5)	(±21.6)	(±13.1)	(±1.6)	(±29.0)	(±27.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
1.55	6.05	6.24E-08	5.6	35.4	0.0	0.0	15.3	35.5	78.1	1.4	6.3	17.1
7.60		(±1.03E-07)	(±1.6)	(±7.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±8.8)	(±7.5)	(±33.6)	(±0.9)	(±4.1)	(±0.7)
7.60	2.00	1.74E-06	9.1	34.1	28.9	33.6	34.6	45.5	0.0	0.0	0.0	16.7
9.60		(±2.04E-06)	(±3.8)	(±14.7)	(±5.3)	(±1.4)	(±17.9)	(±19.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.2)
9.60	15.80	6.82E-09	8.8	0.0	0.0	0.0	10.9	59.8	86.1	0.5	2.5	17.5
25.40		(±4.01E-08)	(±3.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.6)	(±22.6)	(±36.1)	(±0.2)	(±0.7)	(±0.8)
25.40	4.00	2.30E-05	27.6	82.9	40.6	36.9	103.1	103.9	0.0	0.0	0.0	18.2
29.40		(±2.30E-05)	(±4.9)	(±12.8)	(±5.9)	(±1.4)	(±14.3)	(±16.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
29.40	0.60	2.67E-08	15.8	122.6	0.0	0.0	25.1	101.6	163.1	0.6	3.0	18.4
30.00		(±8.85E-08)	(±4.5)	(±122.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±26.2)	(±18.5)	(±75.3)	(±0.3)	(±1.5)	(±0.4)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

Project:

Location:

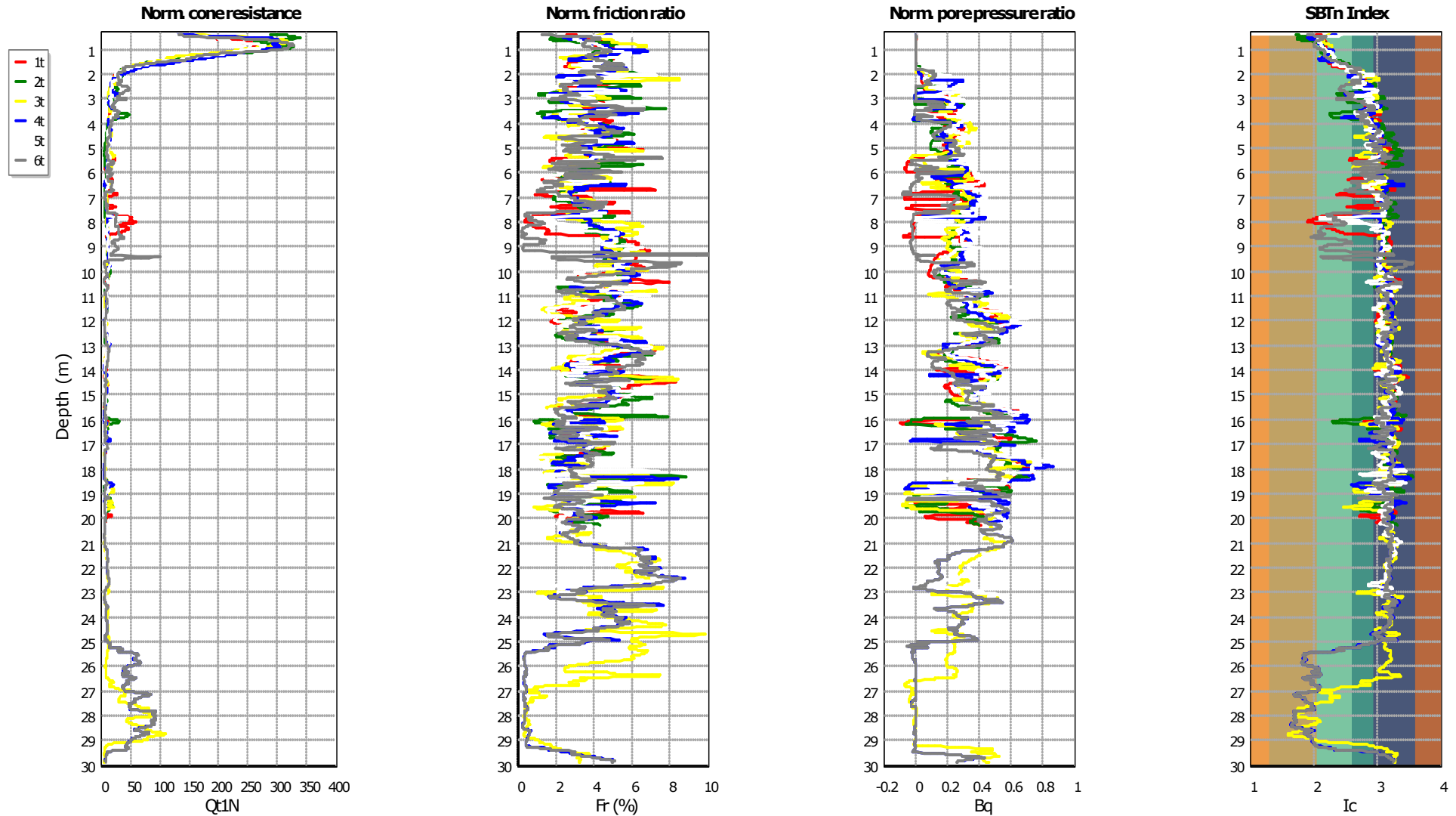
Overlay basic interpretation plots



Project:

Location:

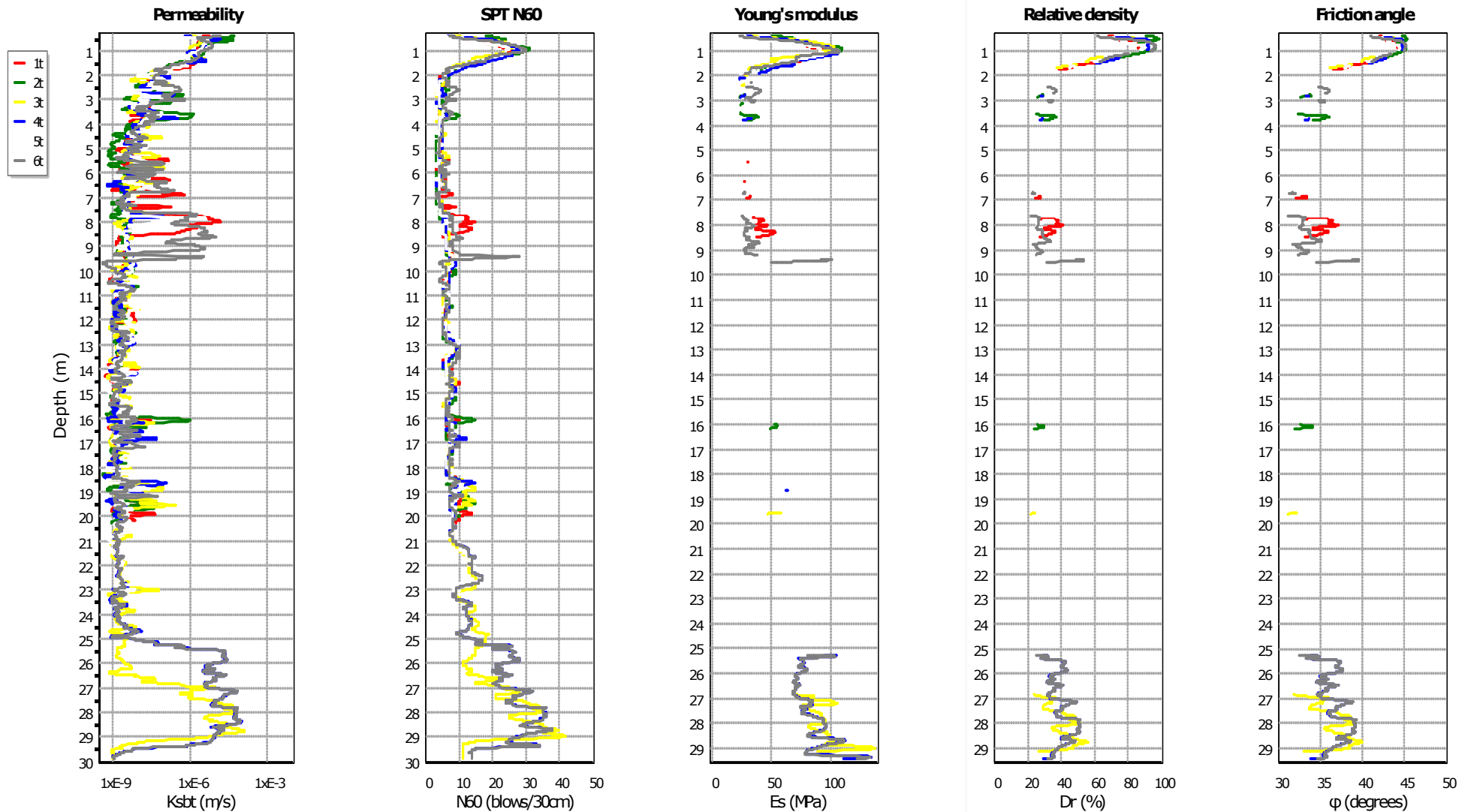
Normalized basic plots



Project:

Location:

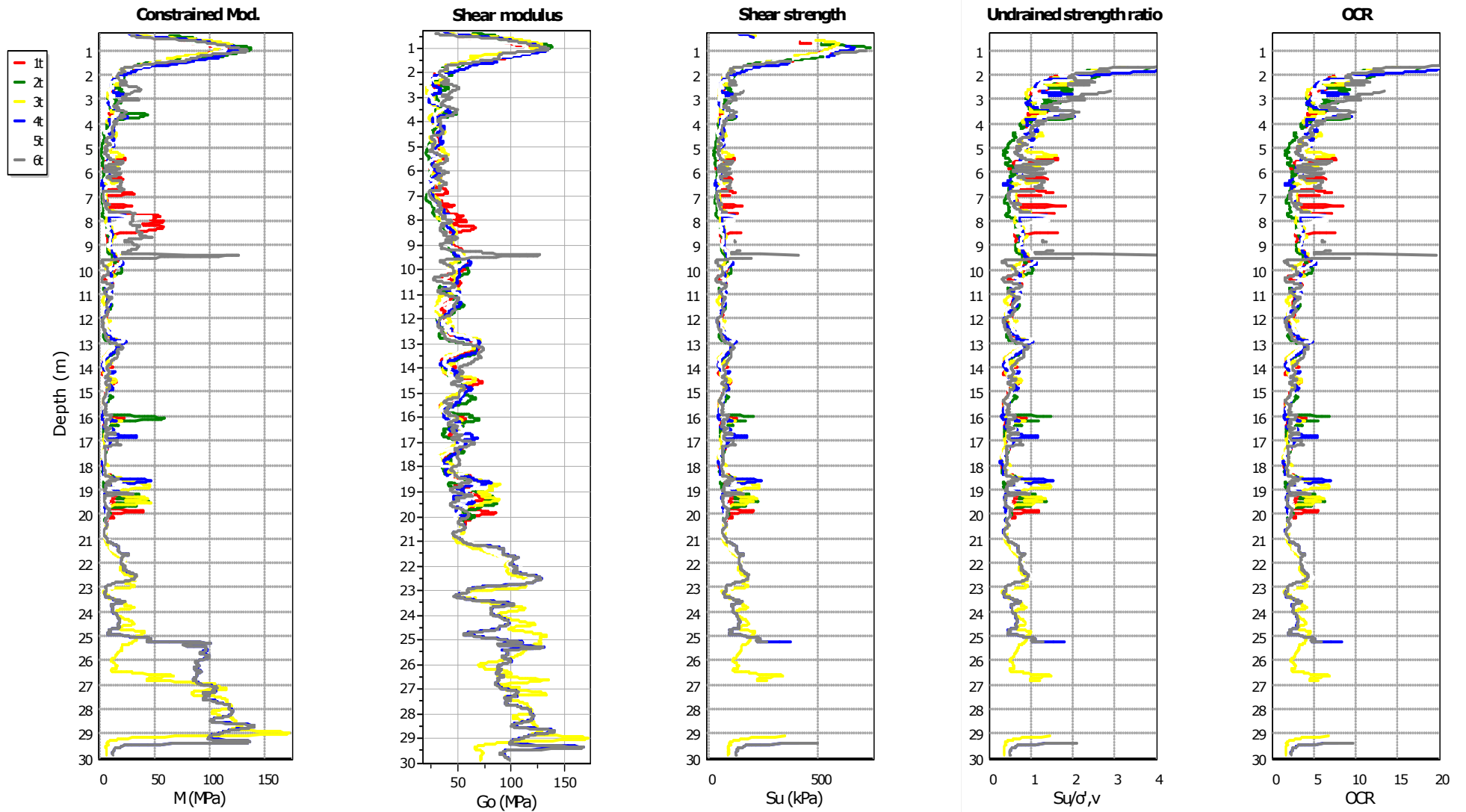
Overlay estimation plots (1)



Project:

Location:

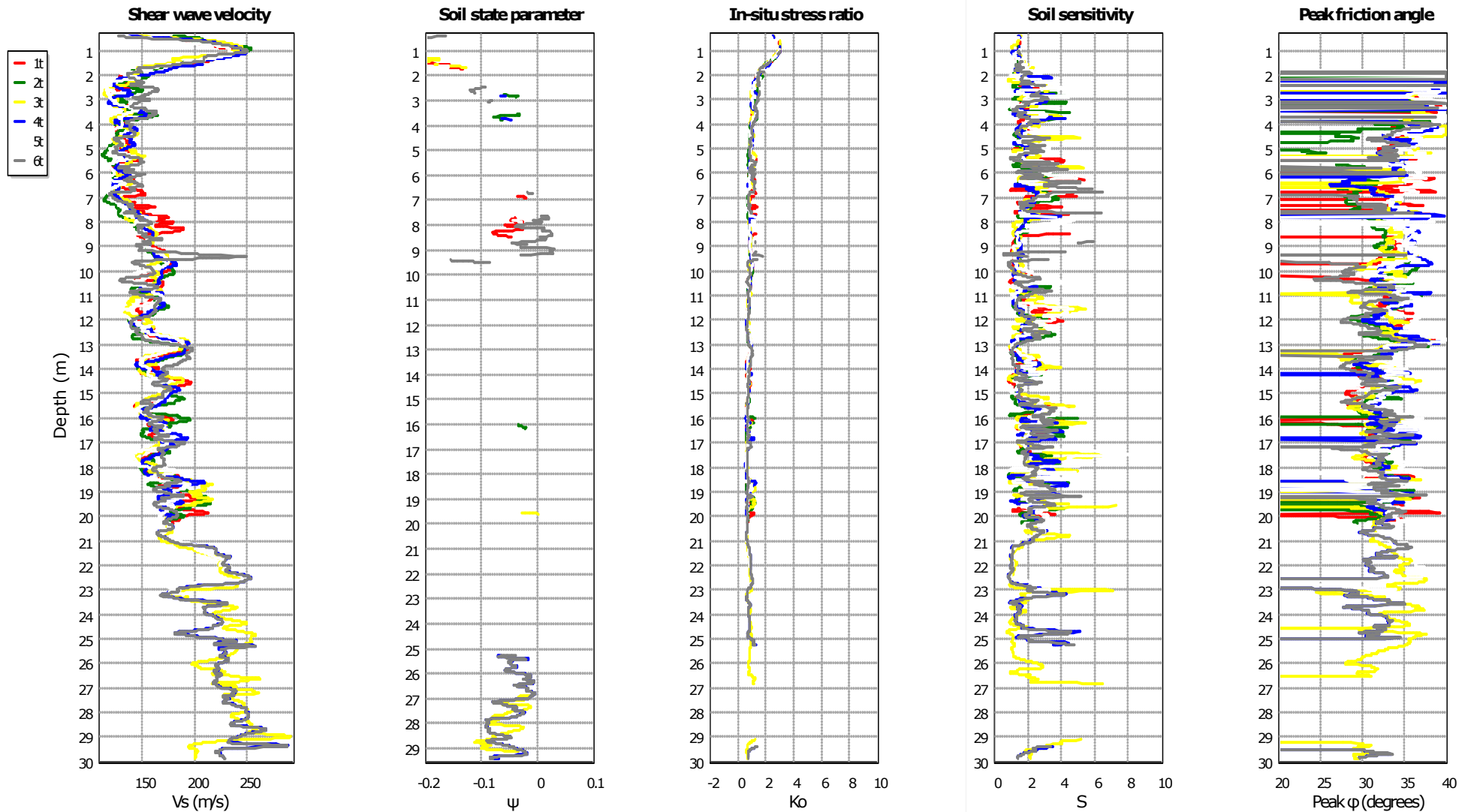
Overlay estimation plots (2)



Project:

Location:

Overlay estimation plots (3)



GEO GROUP s.r.l.

Indagini geognostiche e geofisiche – geologia applicata alle costruzioni – laboratorio geotecnico - idrogeologia
– coltivazione cave– bonifiche – consolidamenti – geologia ambientale – consulenze geologiche e geotecniche

ALLEGATO N° 2

Indagini sismiche

SANT'AGATA BOLOGNESE, VIA F. LAMBORGHINI 0001

Instrument: TE3-0303/01-17

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 51

Start recording: 20/08/2021 11:33:05 End recording: 20/08/2021 11:53:05

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 25% trace (manual window selection)

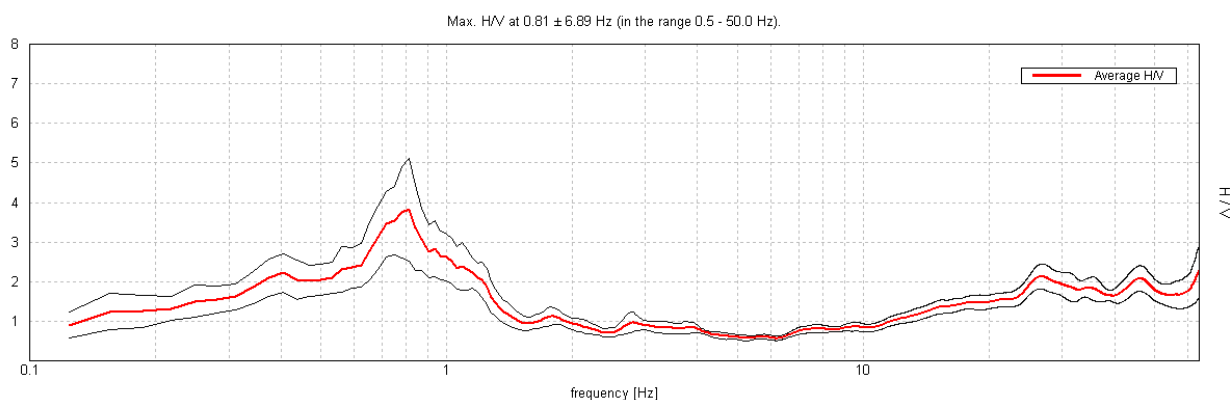
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

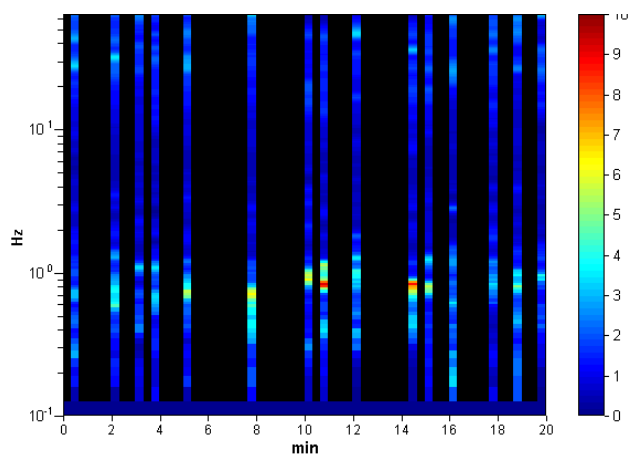
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

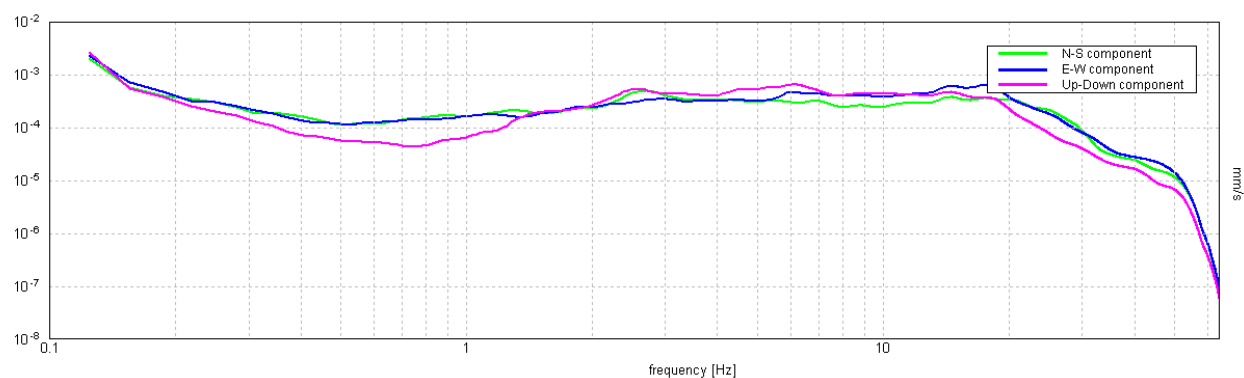
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



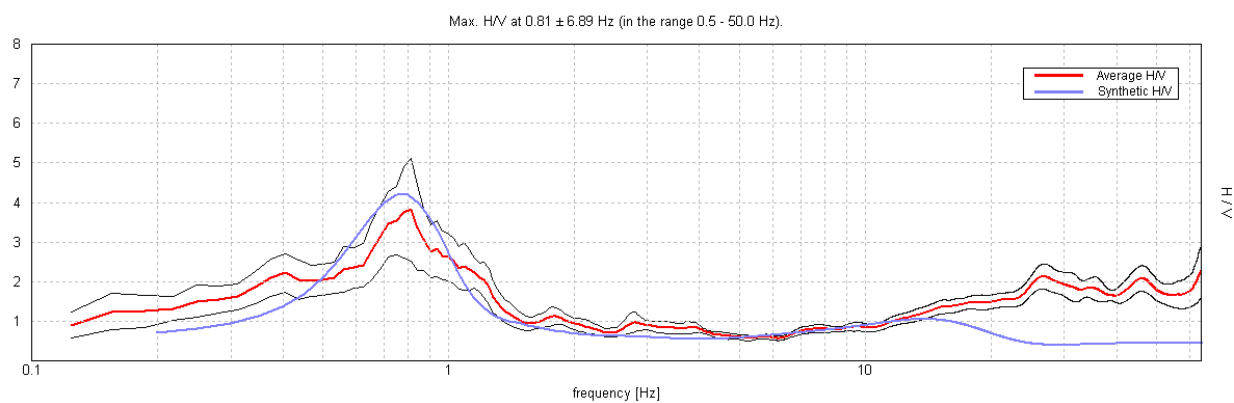
H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA

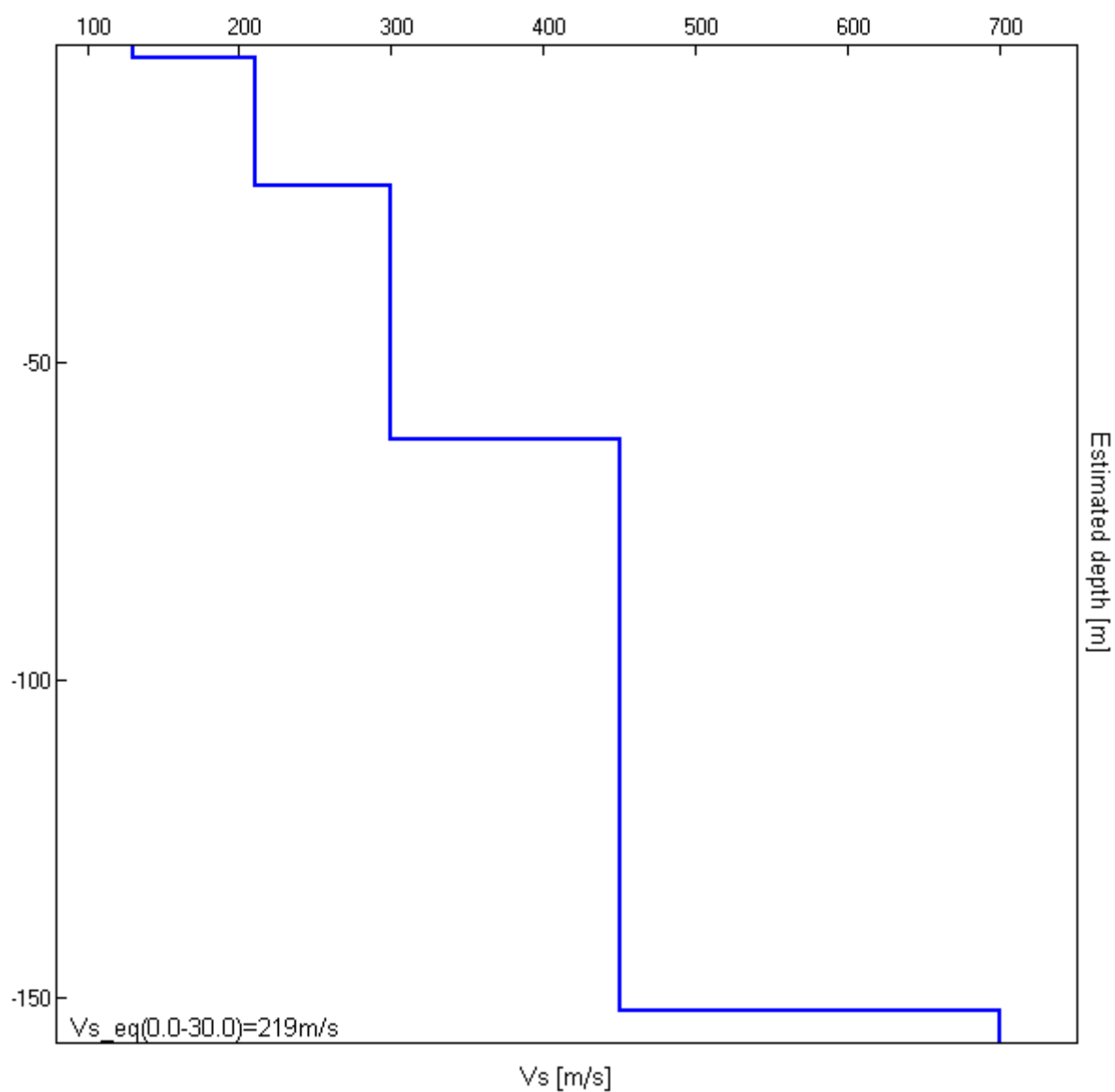


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	300	0.45
152.00	90.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=219\text{m/s}$



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 0.81 ± 6.89 Hz (in the range 0.5 - 50.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.81 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$243.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 40 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.344 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.82 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 8.48142 < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$6.89116 < 0.12188$		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$1.2923 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

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

SANT'AGATA BOLOGNESE, VIA F. LAMBORGHINI 0002

Instrument: TE3-0303/01-17

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 51

Start recording: 20/08/2021 12:23:47 End recording: 20/08/2021 12:43:47

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 65% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

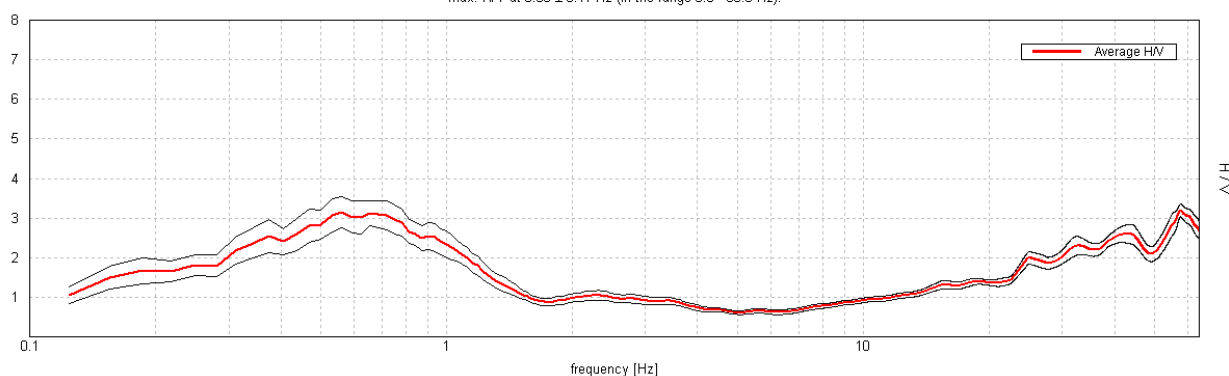
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

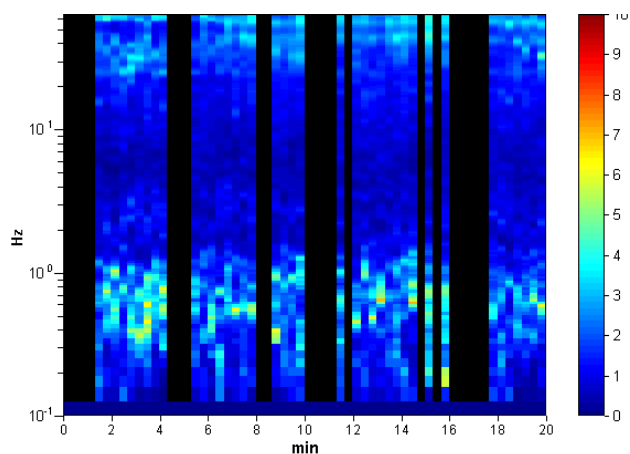
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

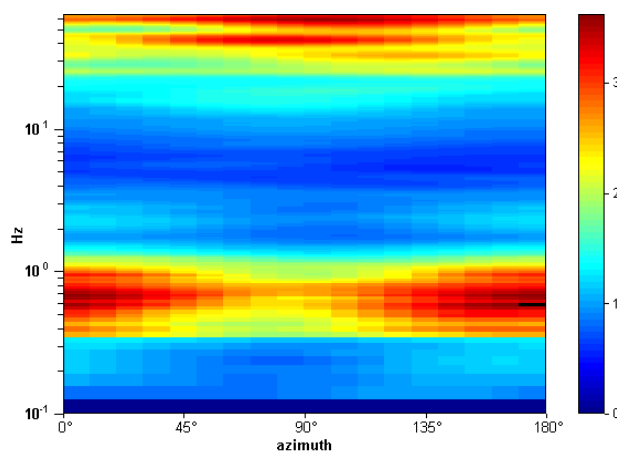
Max. H/V at 0.56 ± 0.11 Hz (in the range 0.5 - 30.0 Hz).



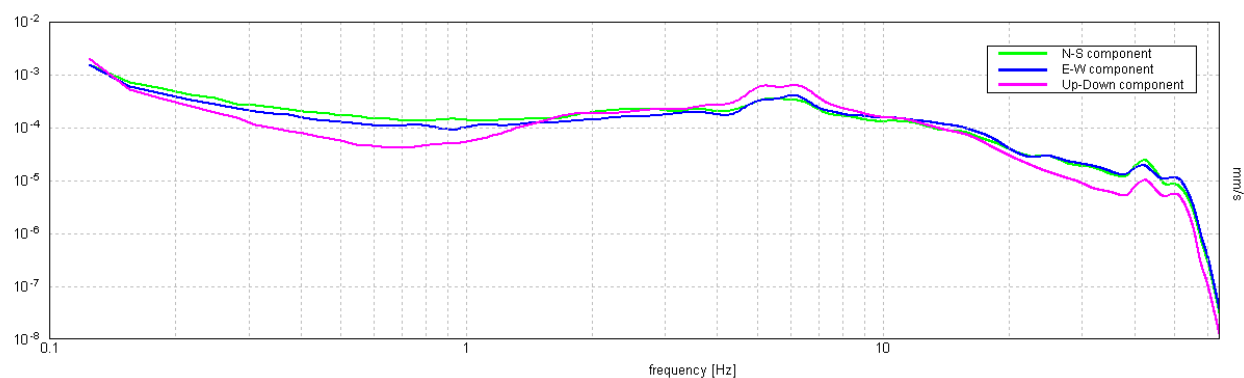
H/V TIME HISTORY



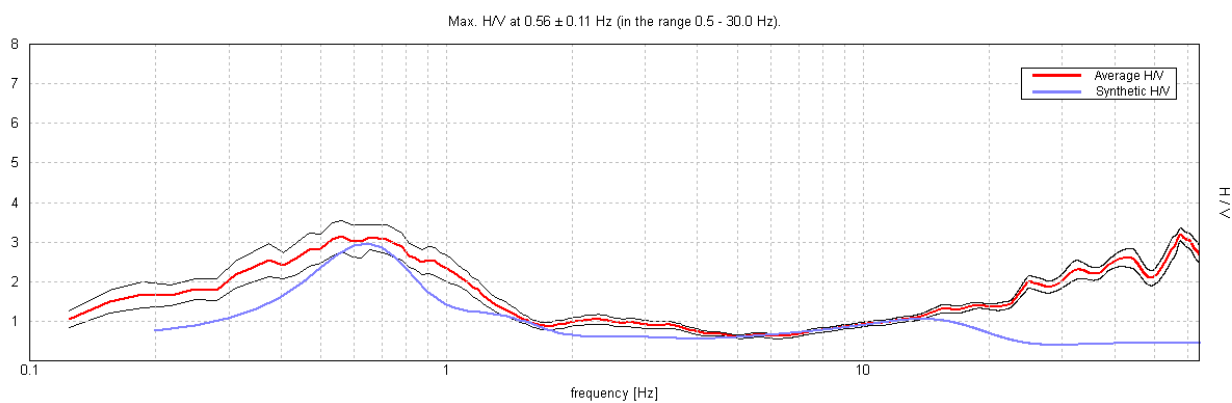
DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

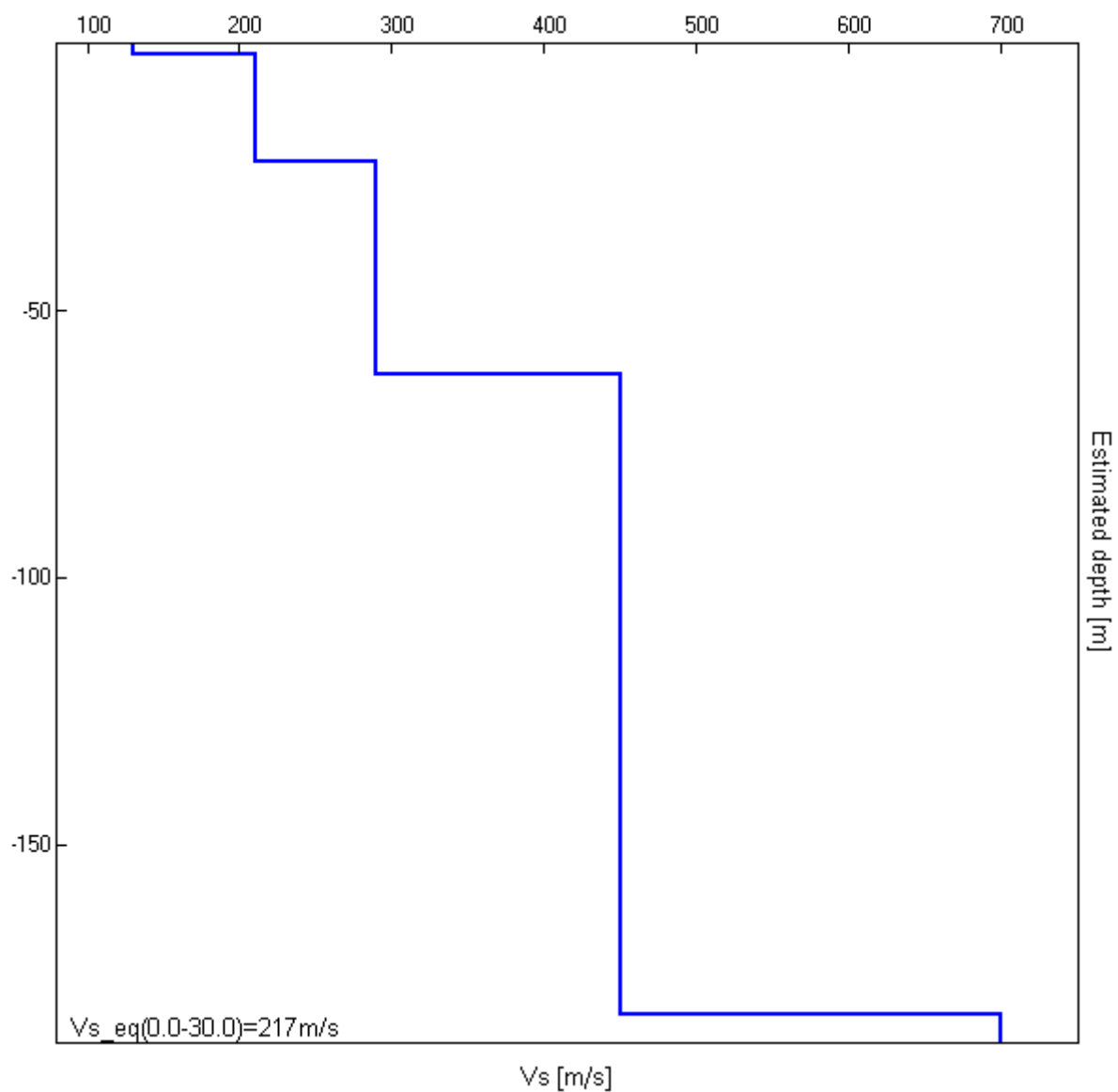


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	290	0.42
182.00	120.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=217\text{m/s}$



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 0.56 ± 0.11 Hz (in the range 0.5 - 30.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.56 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$438.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 28 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.156 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.16 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.19971 < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.11234 < 0.08438$		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3931 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

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

SANT'AGATA BOLOGNESE, VIA F. LAMBORGHINI 0003

Instrument: TE3-0303/01-17

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 51

Start recording: 20/08/2021 12:56:29 End recording: 20/08/2021 13:16:29

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analysis performed on the entire trace.

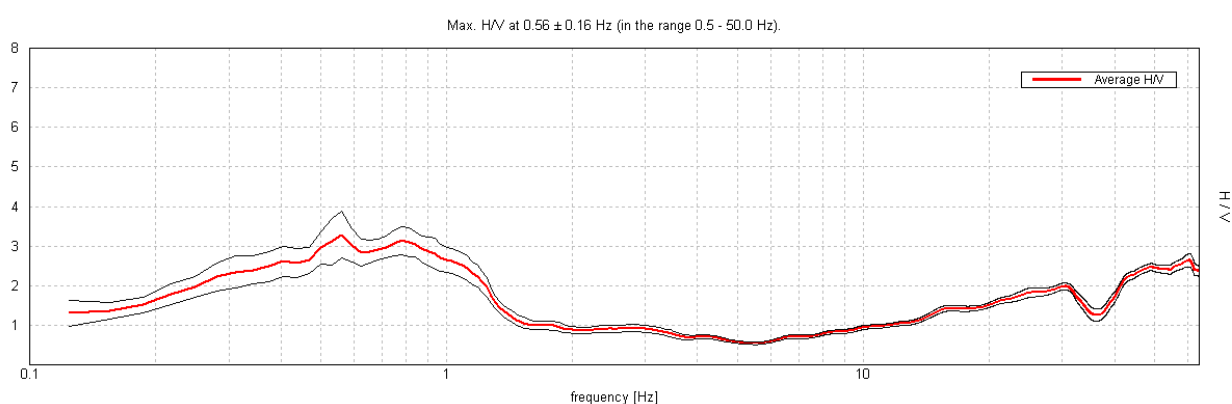
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

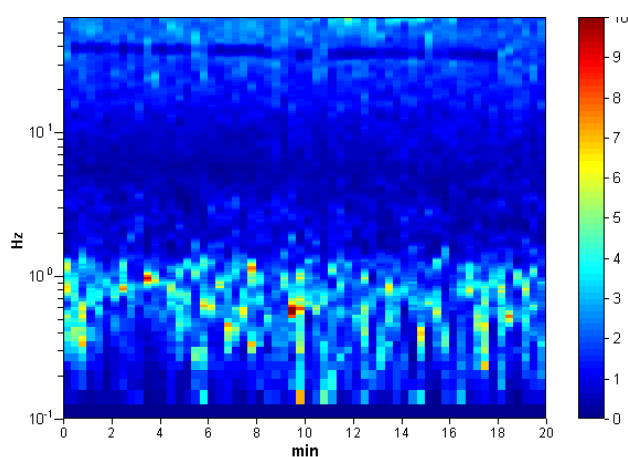
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

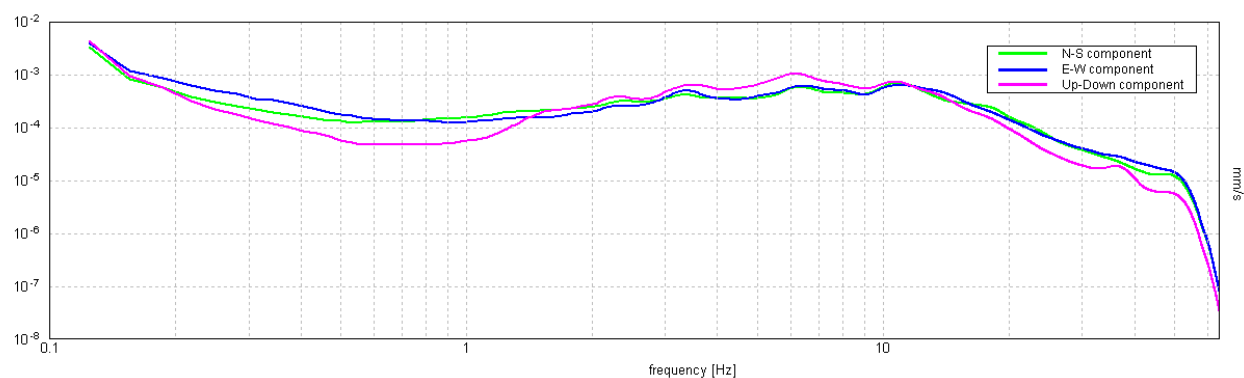
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



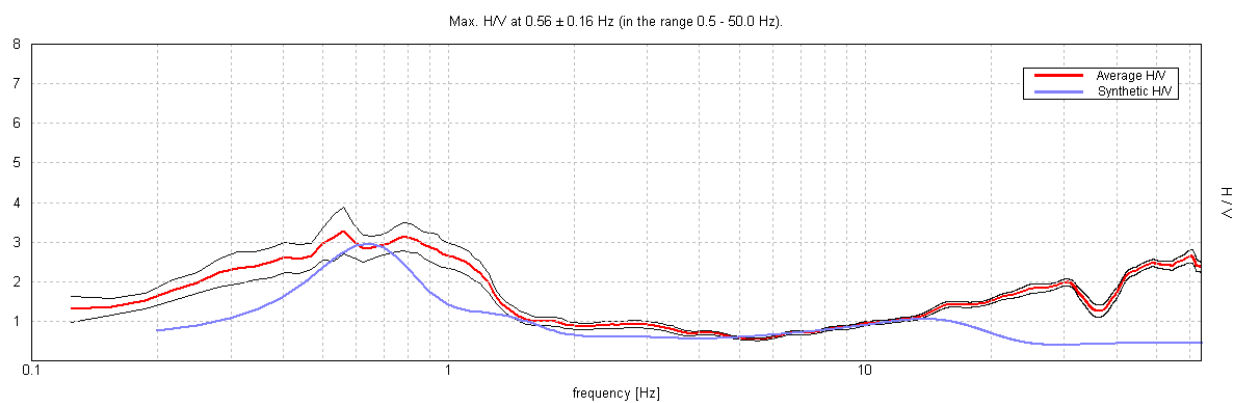
H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA

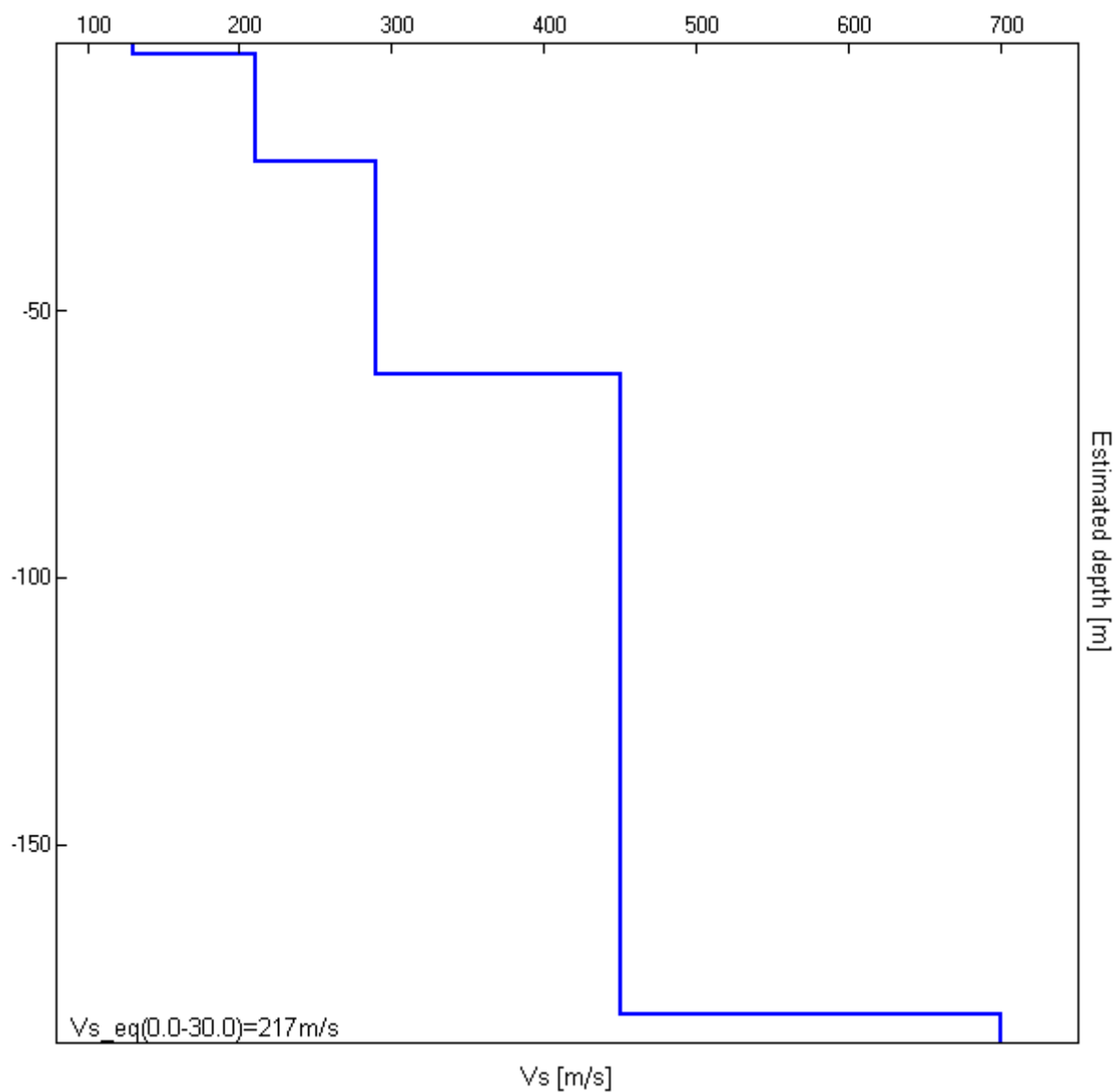


EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
2.00	2.00	130	0.40
22.00	20.00	210	0.45
62.00	40.00	290	0.42
182.00	120.00	450	0.40
inf.	inf.	700	0.35

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=217\text{m/s}$



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 0.56 ± 0.16 Hz (in the range 0.5 - 50.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.56 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$675.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 28 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.188 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.313 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.28 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.29151 < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.16398 < 0.08438$		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.5876 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

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

Multichannel Analysis of Surface Waves - 1

Lavoro: Caratterizzazione del Terreno di Fondazione

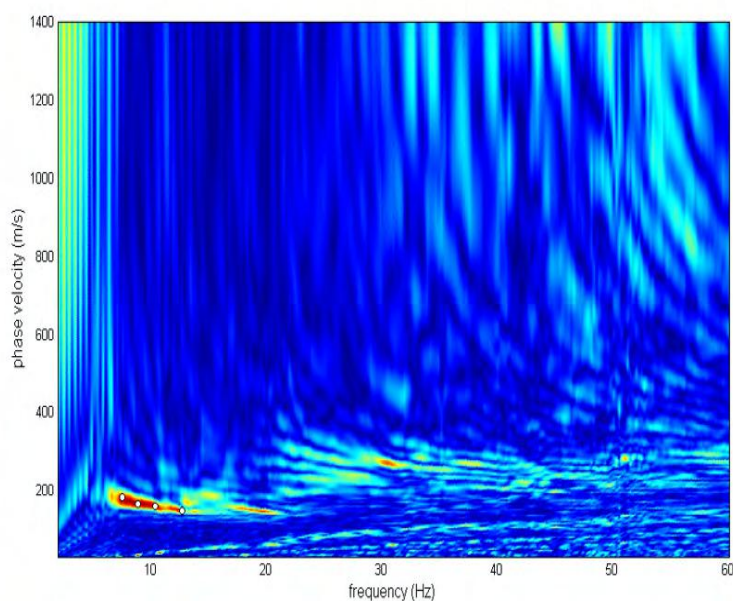
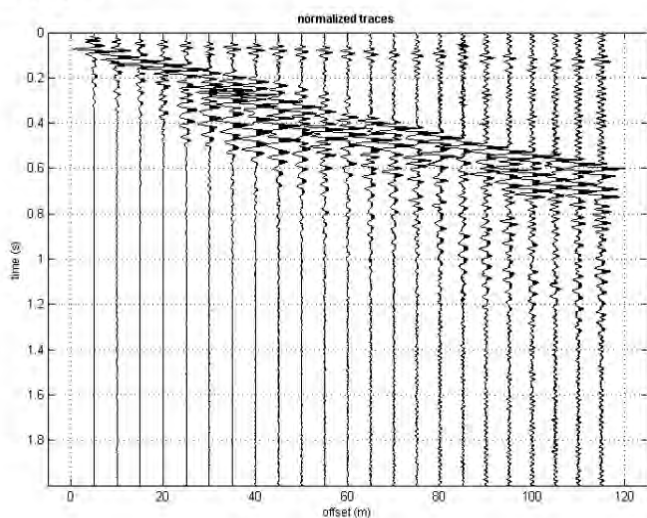
Località: Via Ferruccio Lamborghini

Committente: Studio Tecnico

Comune: Sant'Agata Bolognese



dataset: 1006 dal
sampling: 0.25ms [4000Hz] - 8000 samples
minimum offset: 5 m
geophone spacing: 5 m



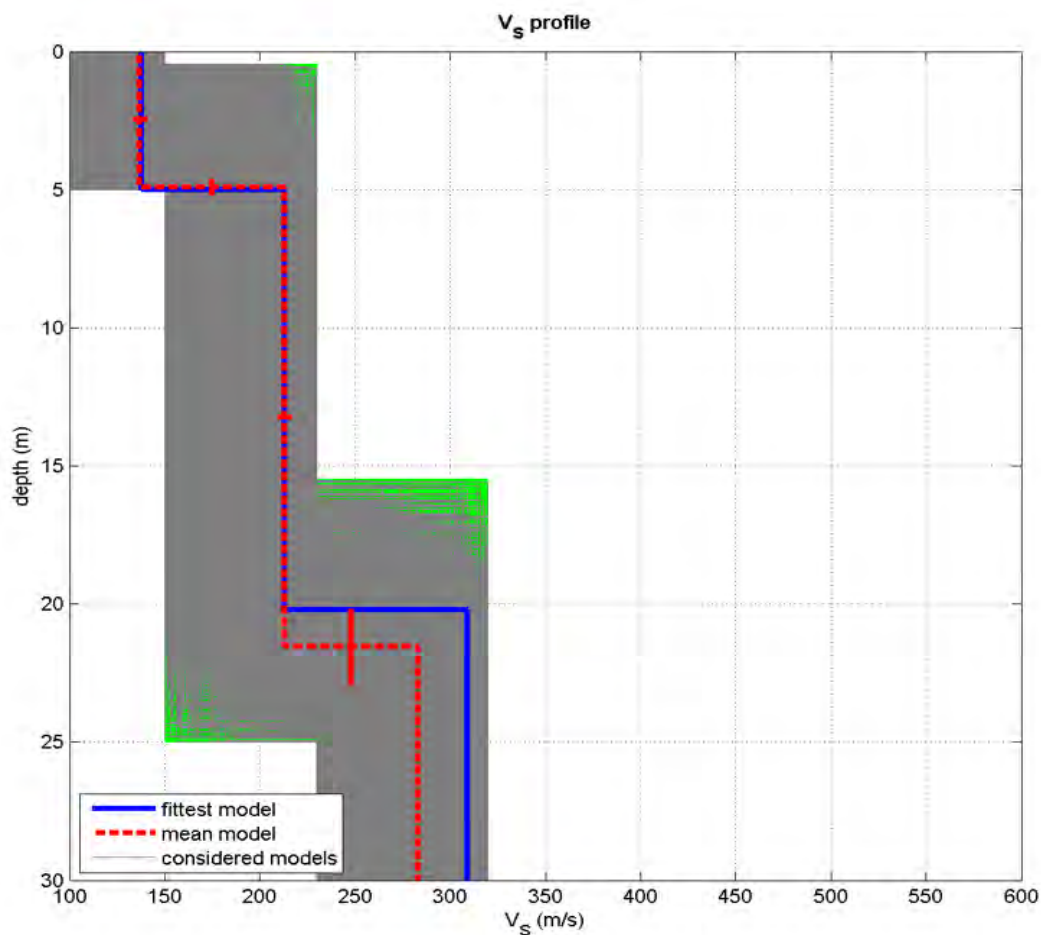
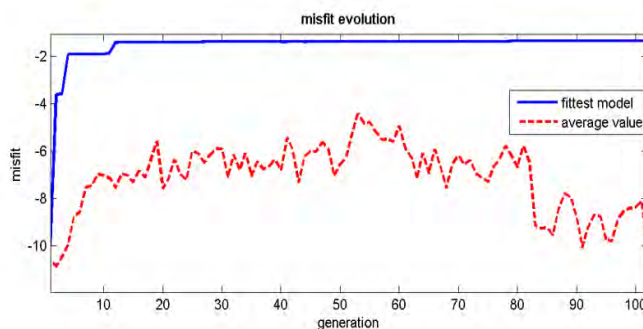
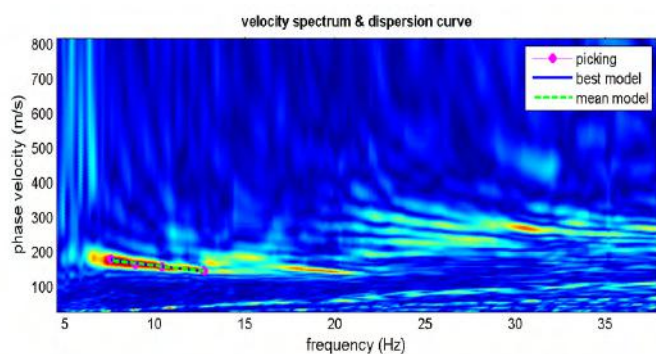
Multichannel Analysis of Surface Waves - 1

Lavoro: Caratterizzazione del Terreno di Fondazione

Località: Via Ferruccio Lamborghini

Committente: Studio Tecnico

Comune: Sant'Agata Bolognese



dataset: 1006.dat

dispersion curve: PICK.cdp

V_{s30} (best model): 215 m/s

V_{s30} (mean model): 209 m/s

$V_{s30} = 209 \text{ m/s}$

Multichannel Analysis of Surface Waves - 2

Lavoro: Caratterizzazione del Terreno di Fondazione

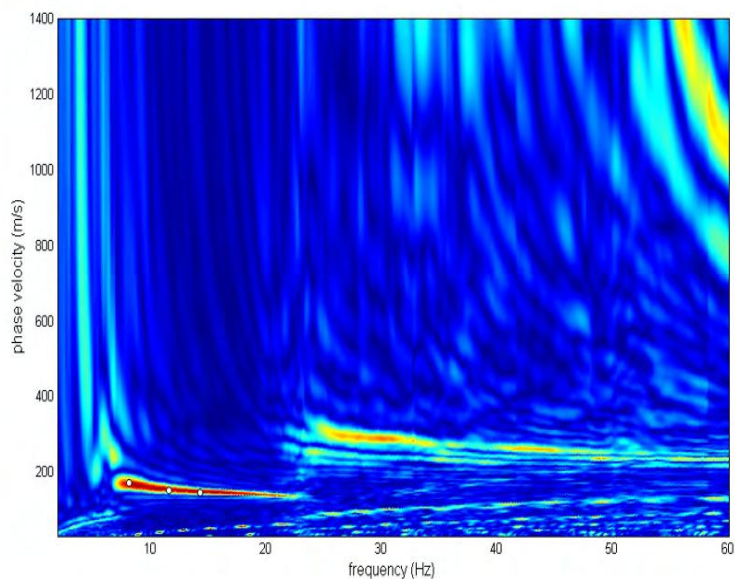
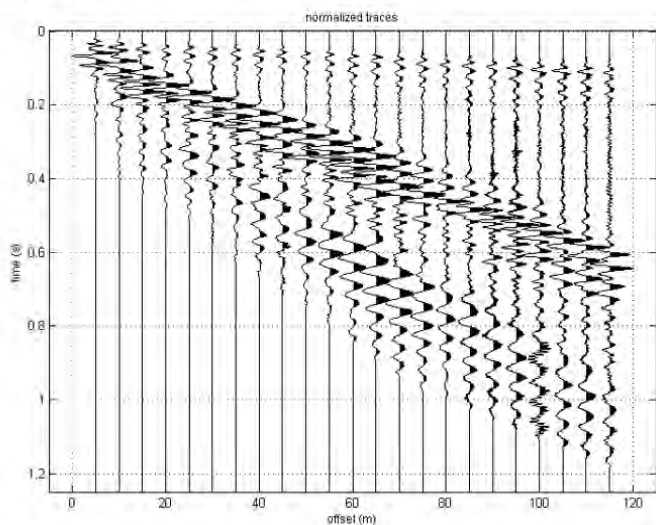
Località: Via Ferruccio Lamborghini

Committente: Studio Tecnico

Comune: Sant'Agata Bolognese



dataset: 1010.dat
sampling: 0.25ms (4000Hz) - 8000 samples
minimum offset: 5 m
geophone spacing: 5 m



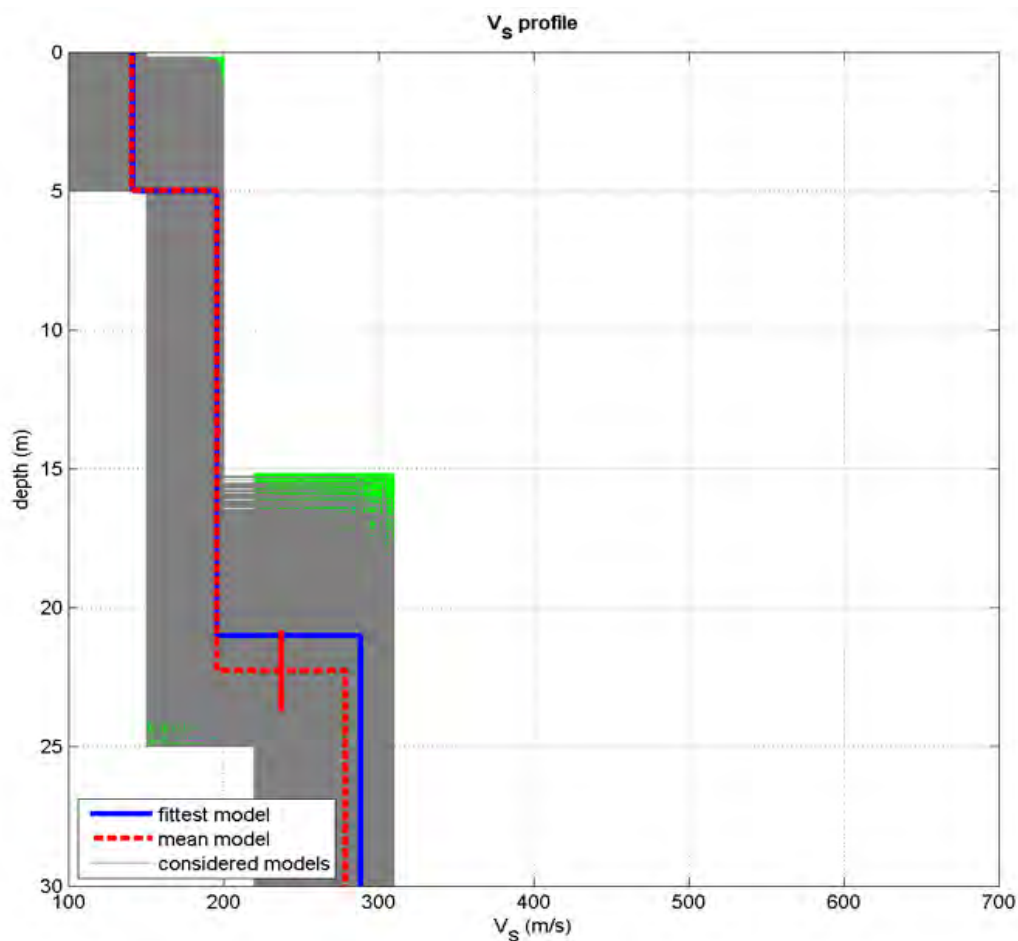
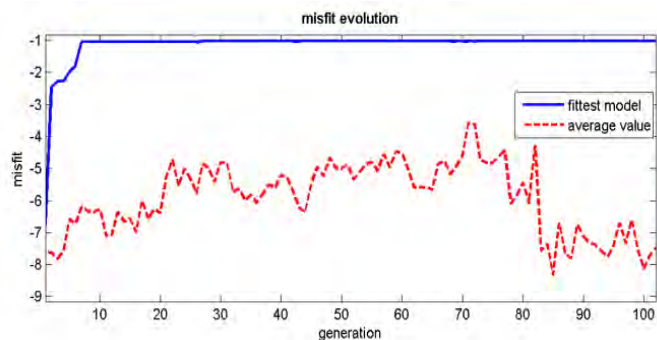
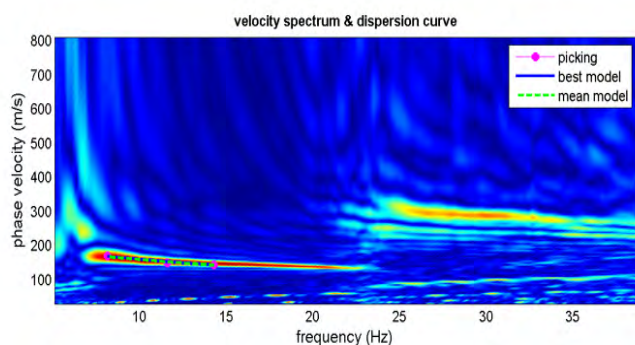
Multichannel Analysis of Surface Waves - 2

Lavoro: Caratterizzazione del Terreno di Fondazione

Località: Via Ferruccio Lamborghini

Committente: Studio Tecnico

Comune: Sant'Agata Bolognese



dataset: 1010.dat

dispersion curve: PICKI.cdp

V_{s30} (best model): 203 m/s

V_{s30} (mean model): 198 m/s

VS30 = 198 m/s

GEO GROUP s.r.l.

Indagini geognostiche e geofisiche – geologia applicata alle costruzioni – laboratorio geotecnico - idrogeologia
– coltivazione cave– bonifiche – consolidamenti – geologia ambientale – consulenze geologiche e geotecniche

ALLEGATO N° 3

Verifica alla liquefazione

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

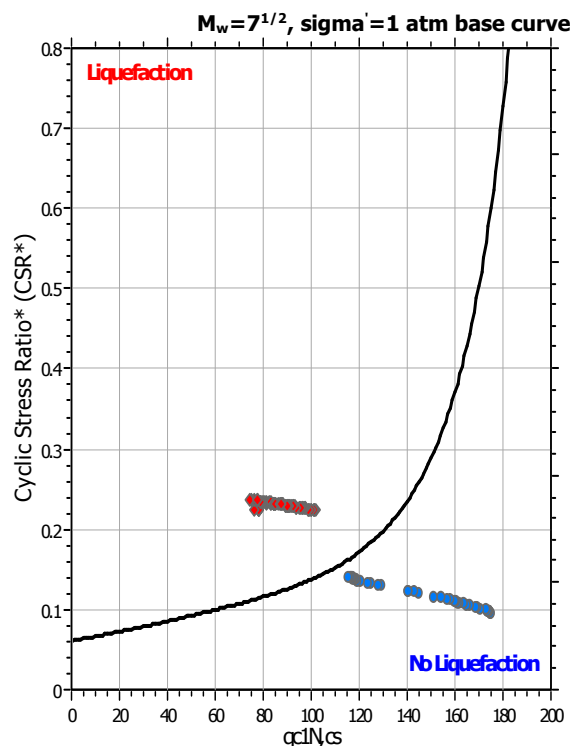
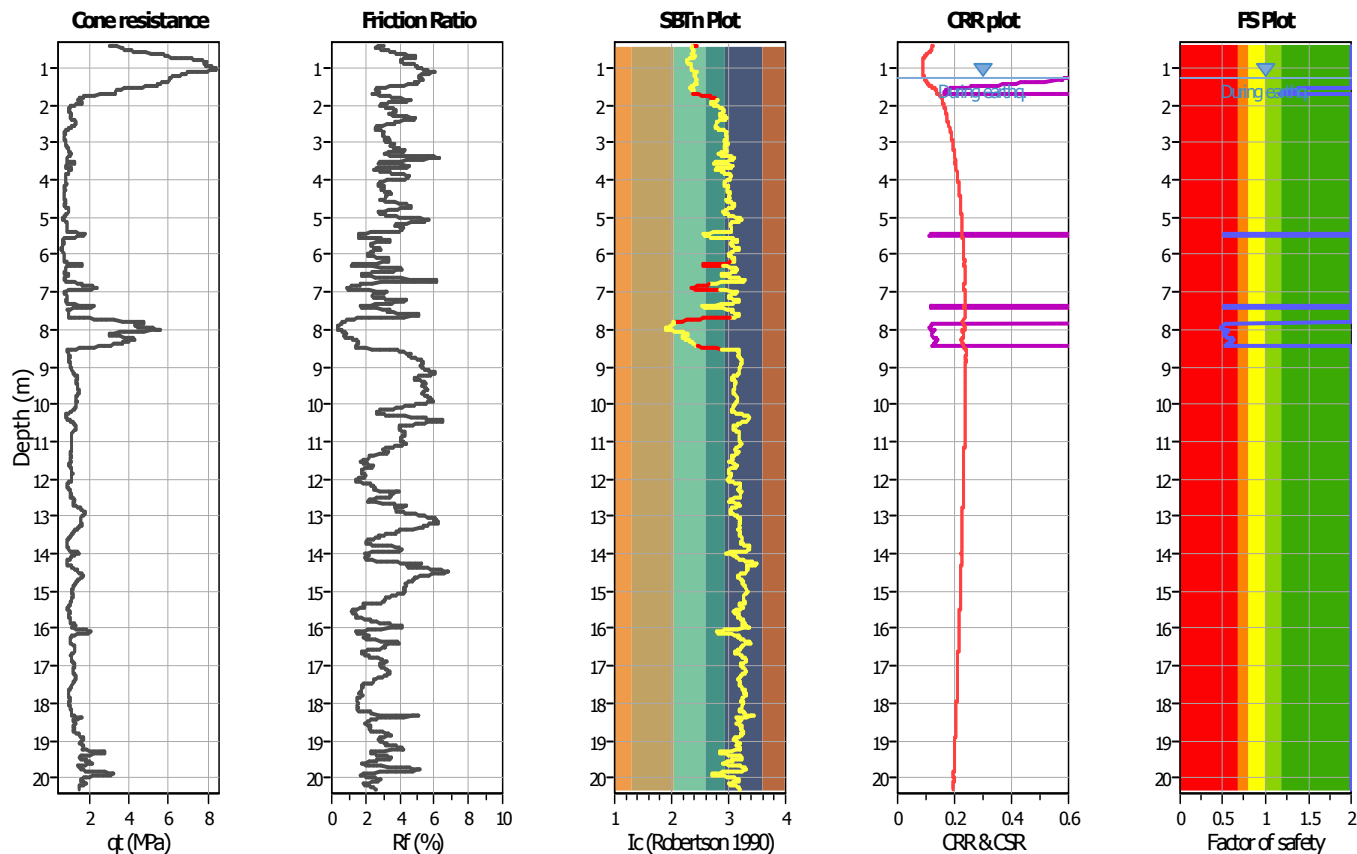
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

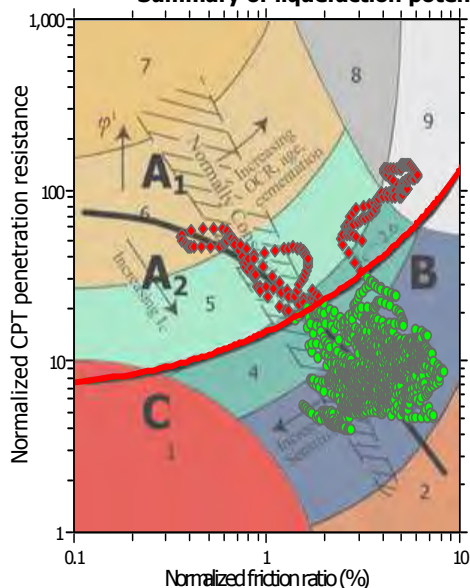
CPT file : 1t

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes	MSF method:	Method

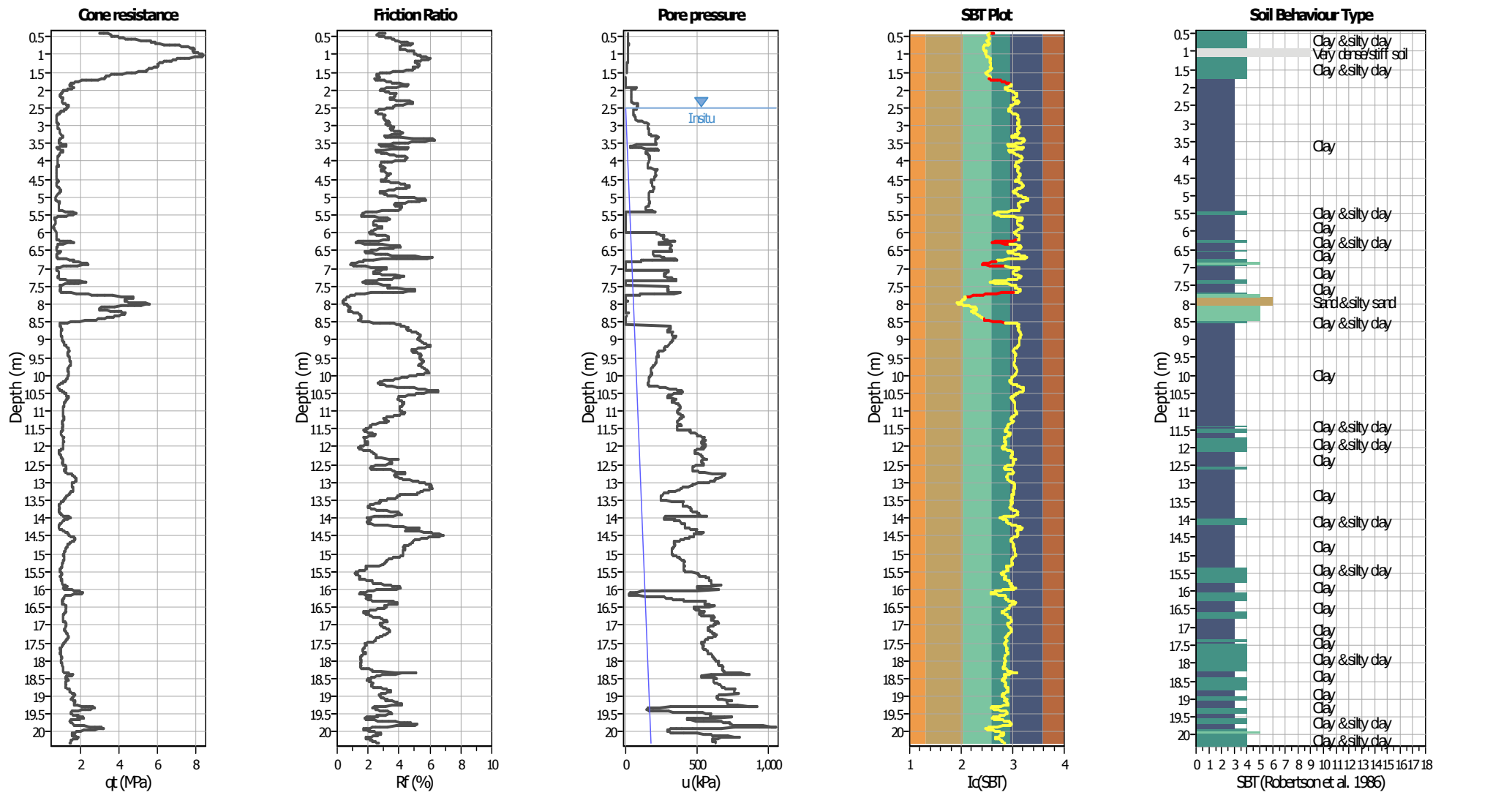


Summary of liquefaction potential



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



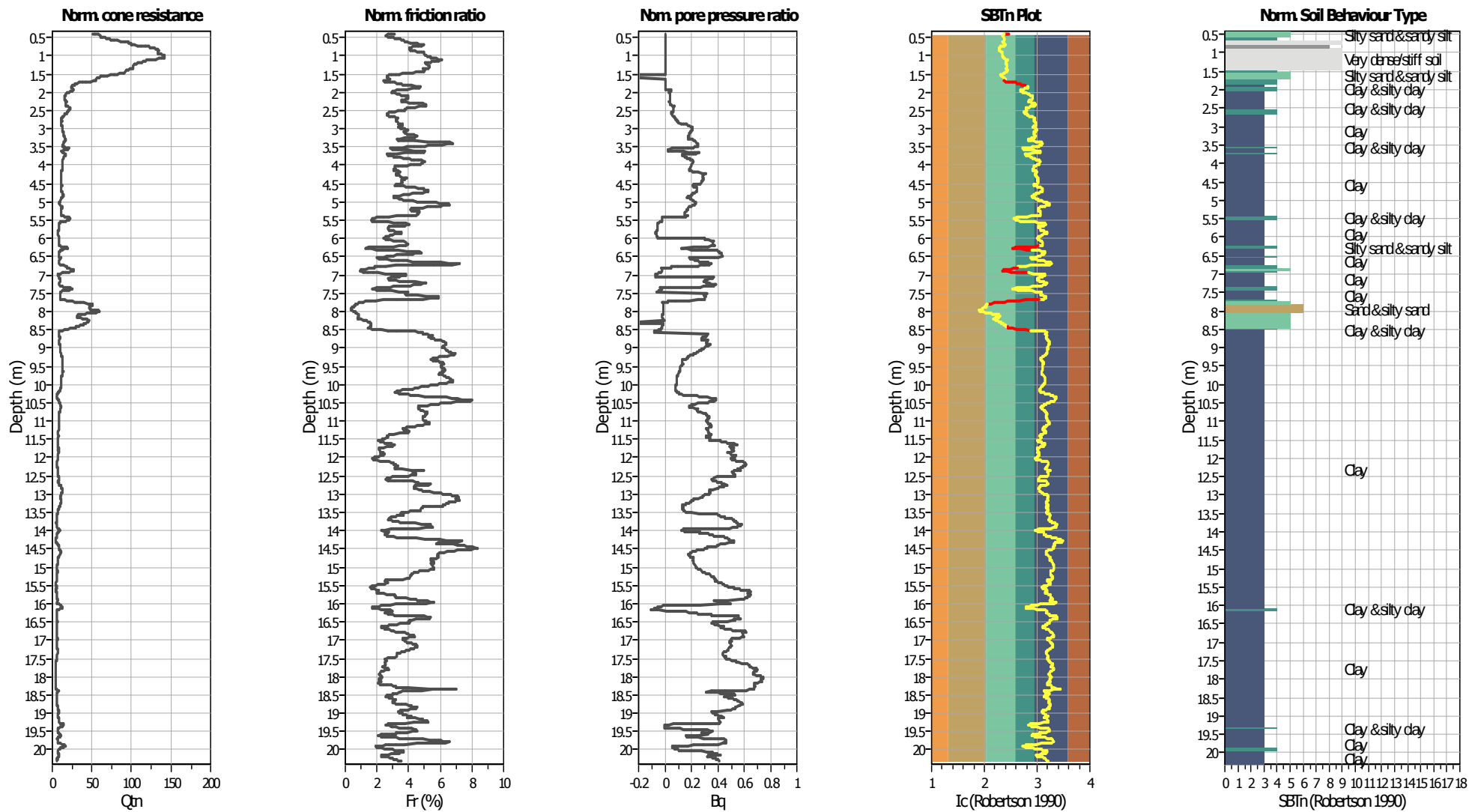
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBT 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

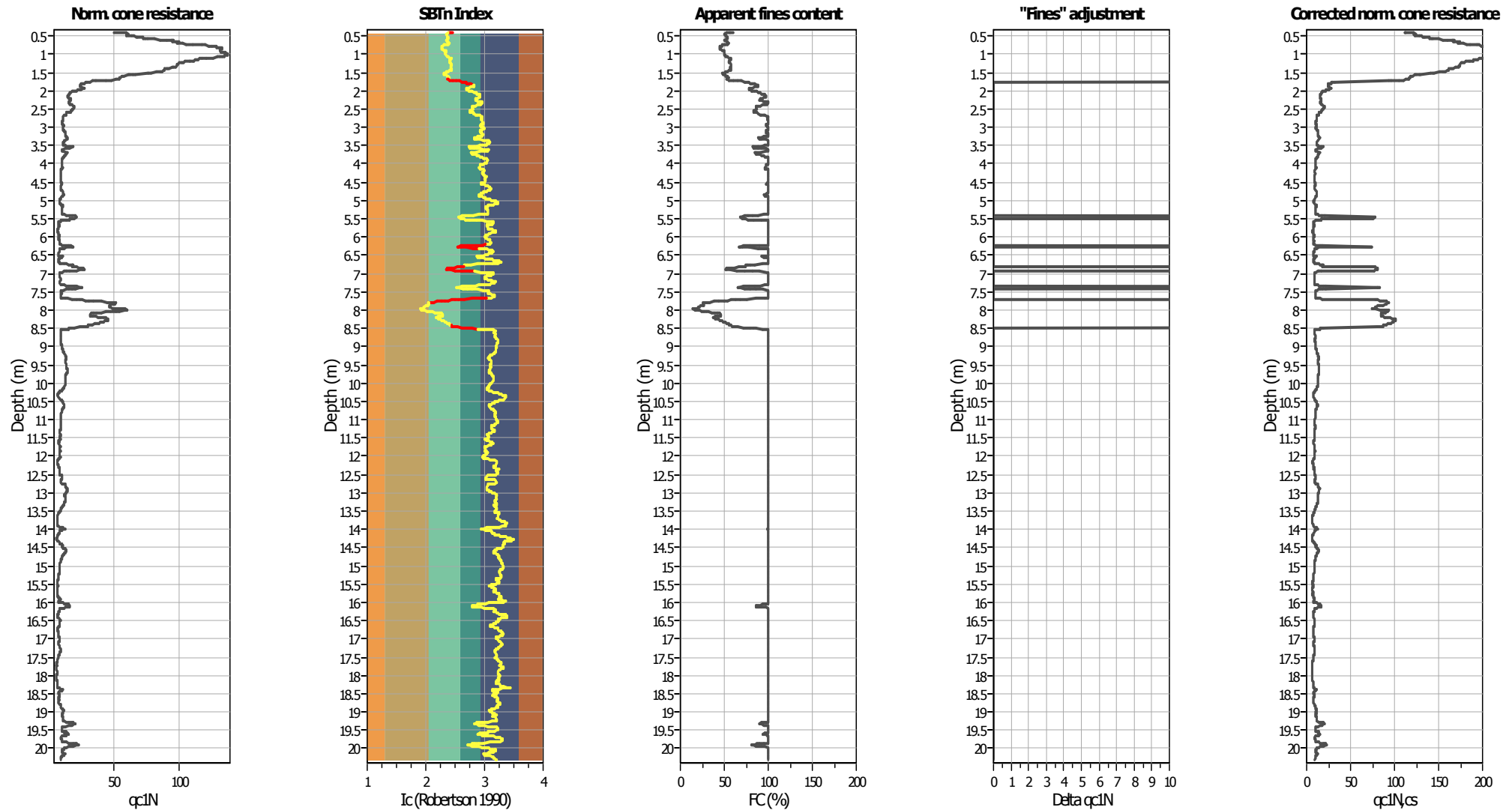
CPT basic interpretation plots (normalized)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

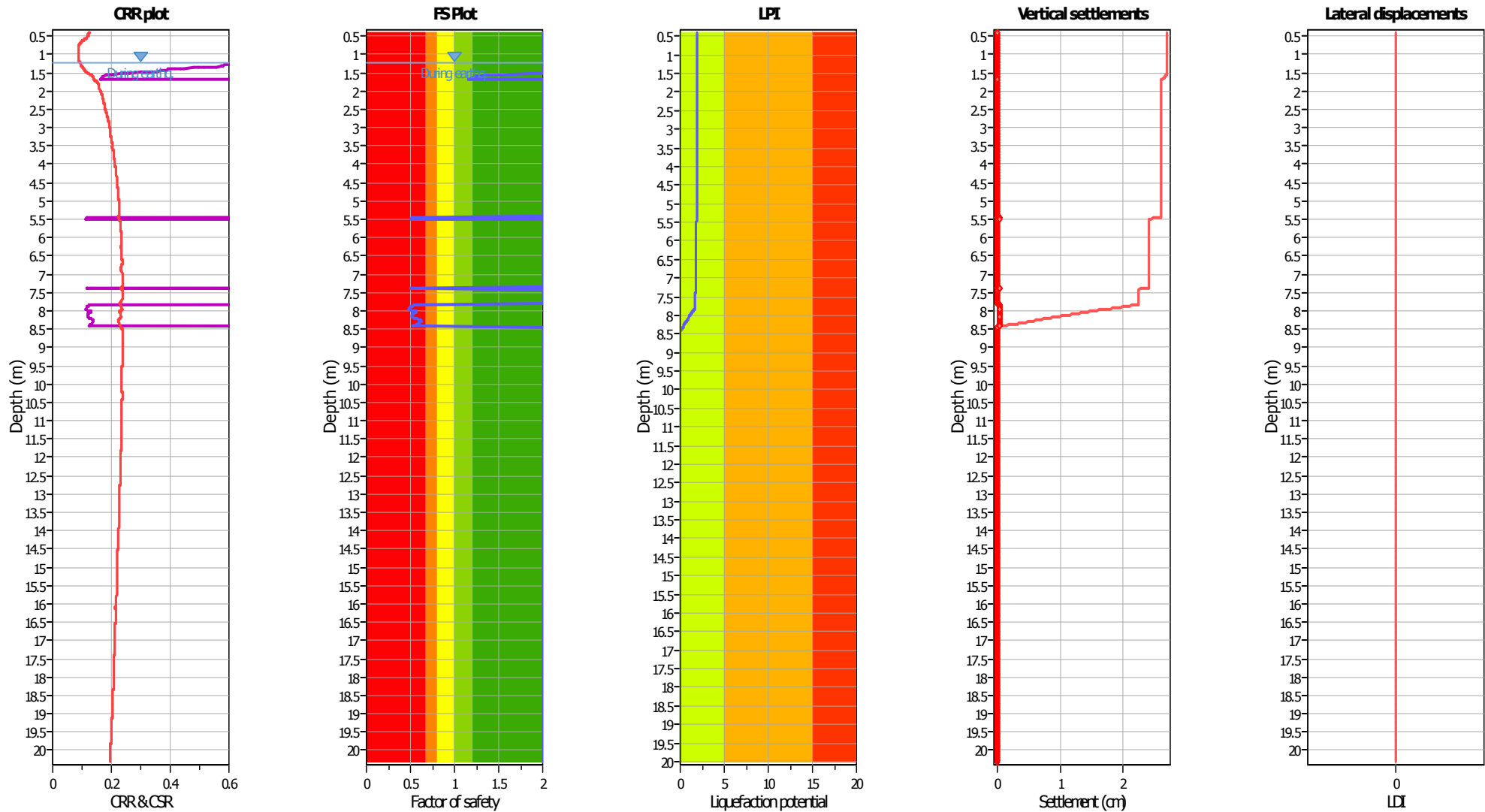
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

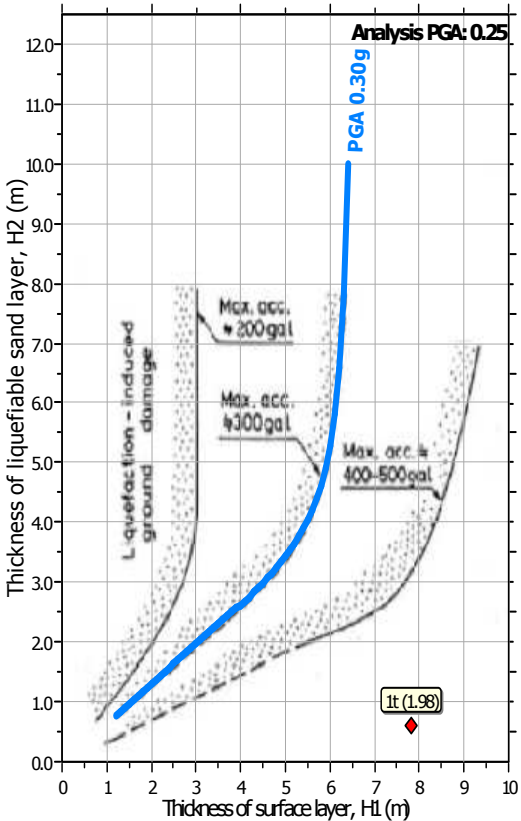
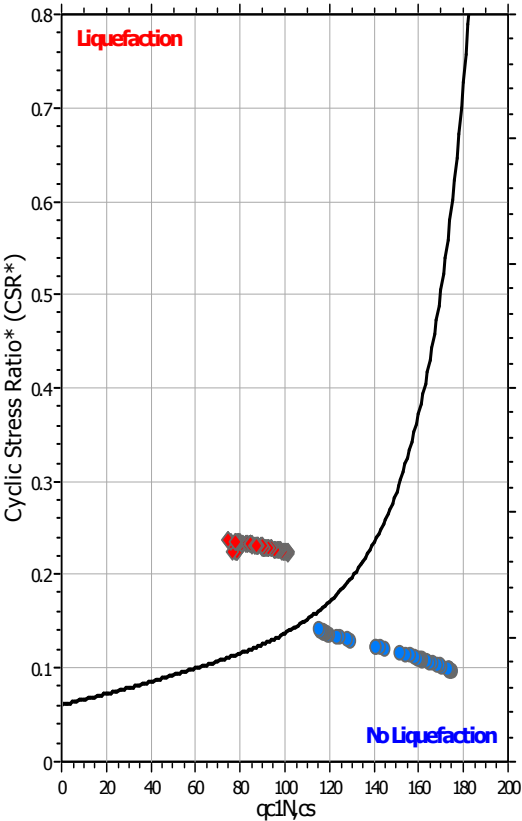
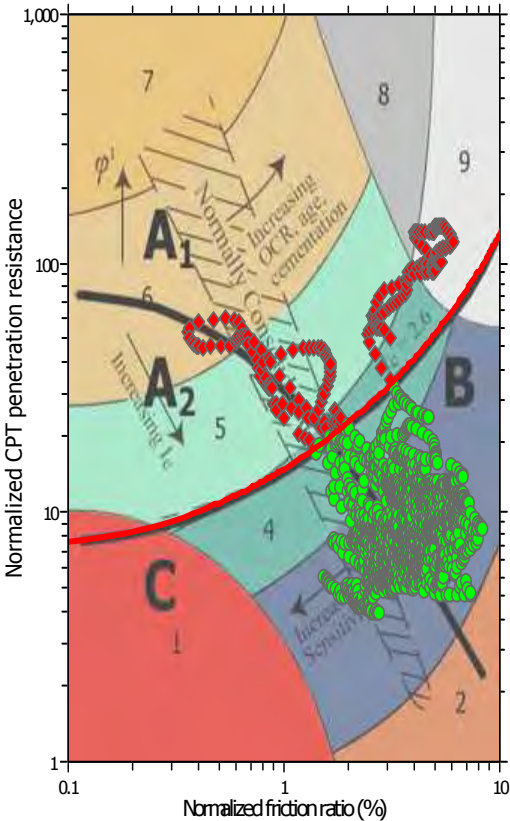
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Light Green	Low risk

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

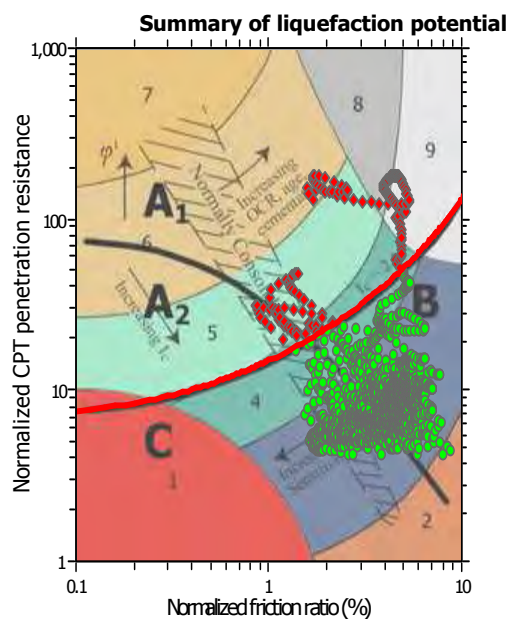
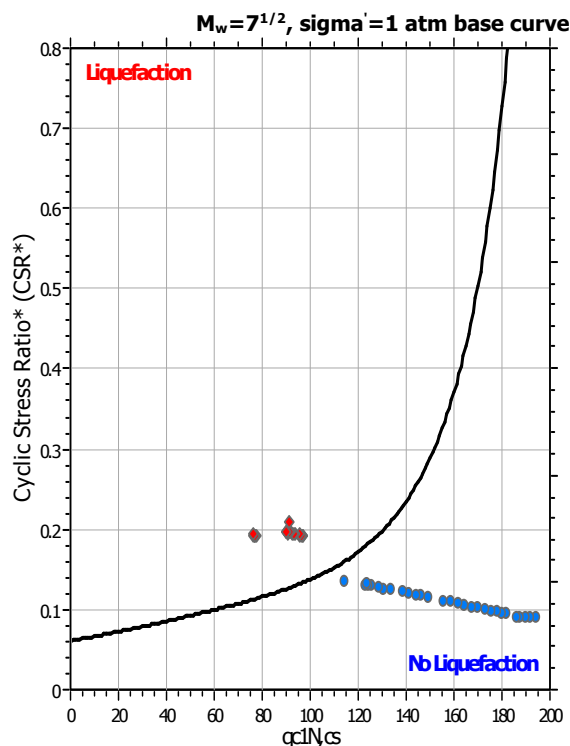
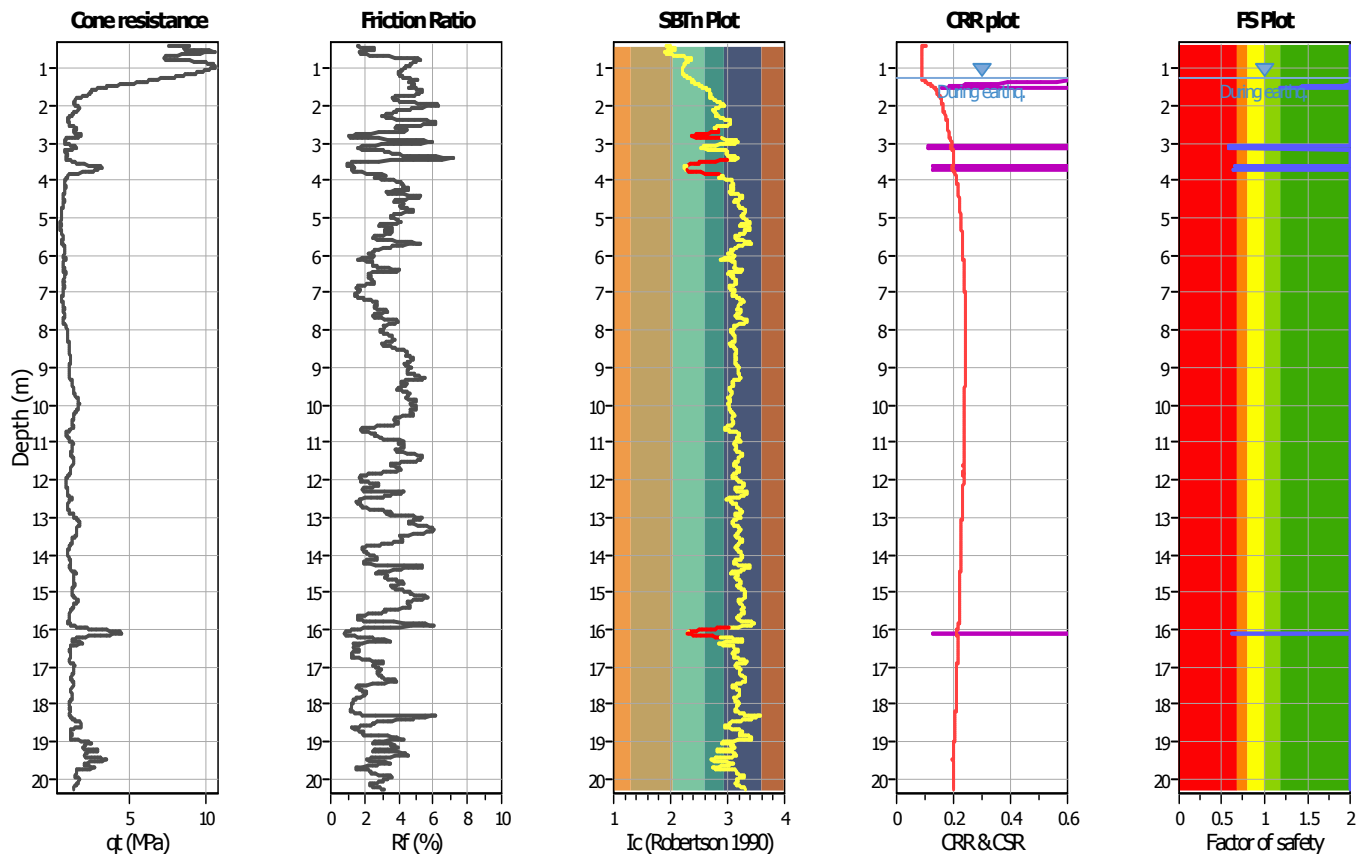
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

CPT file : 2t

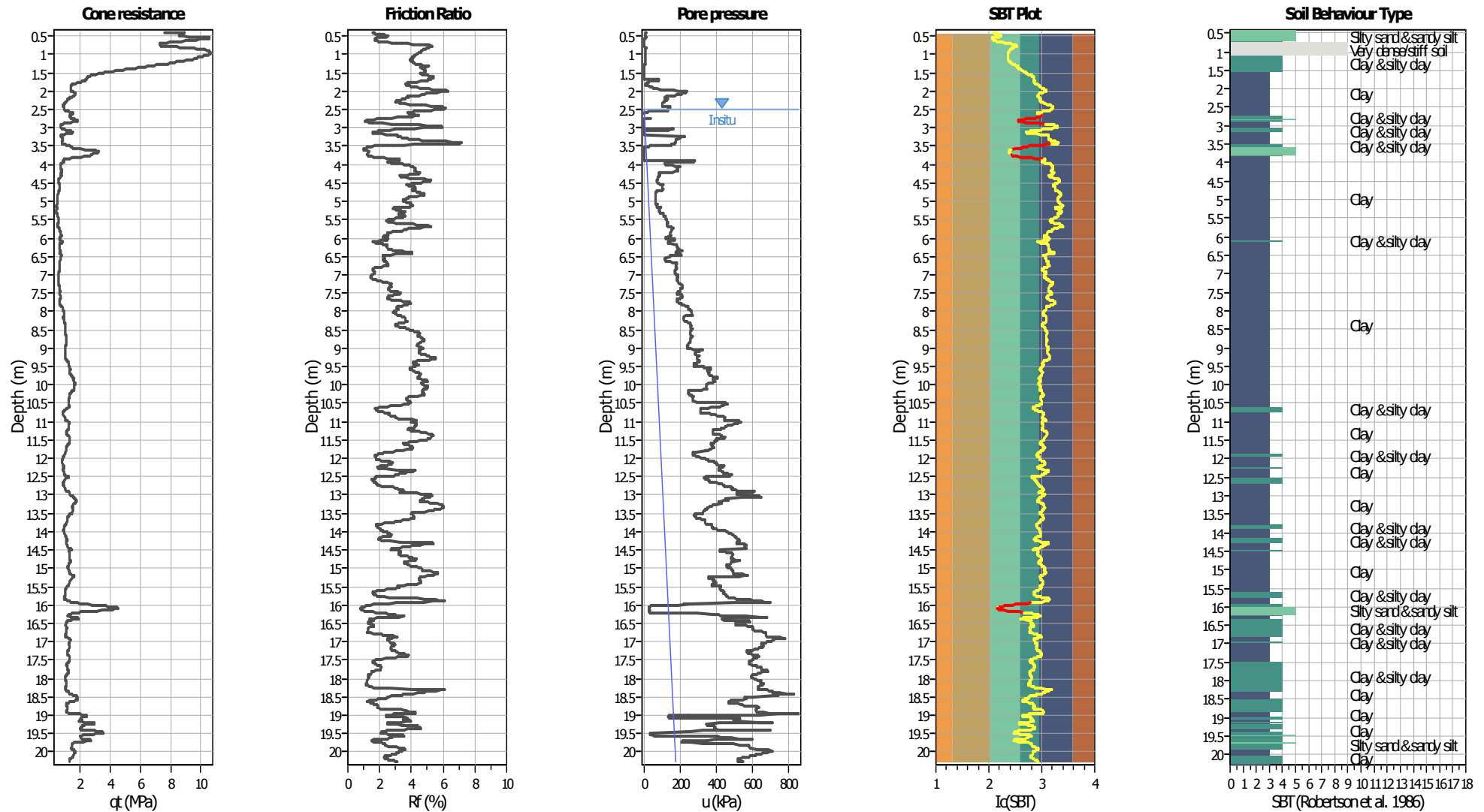
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



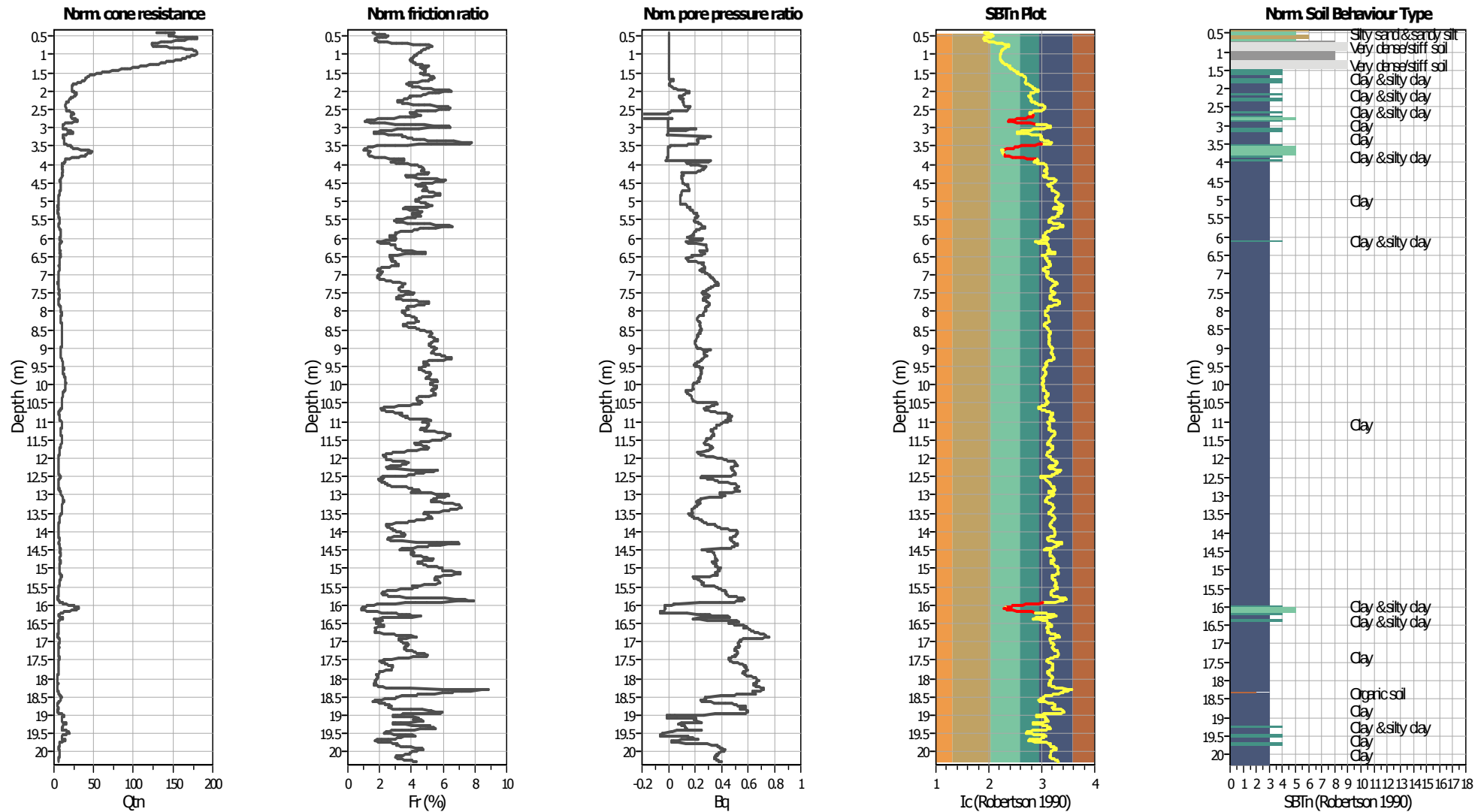
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBT 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

CPT basic interpretation plots (normalized)



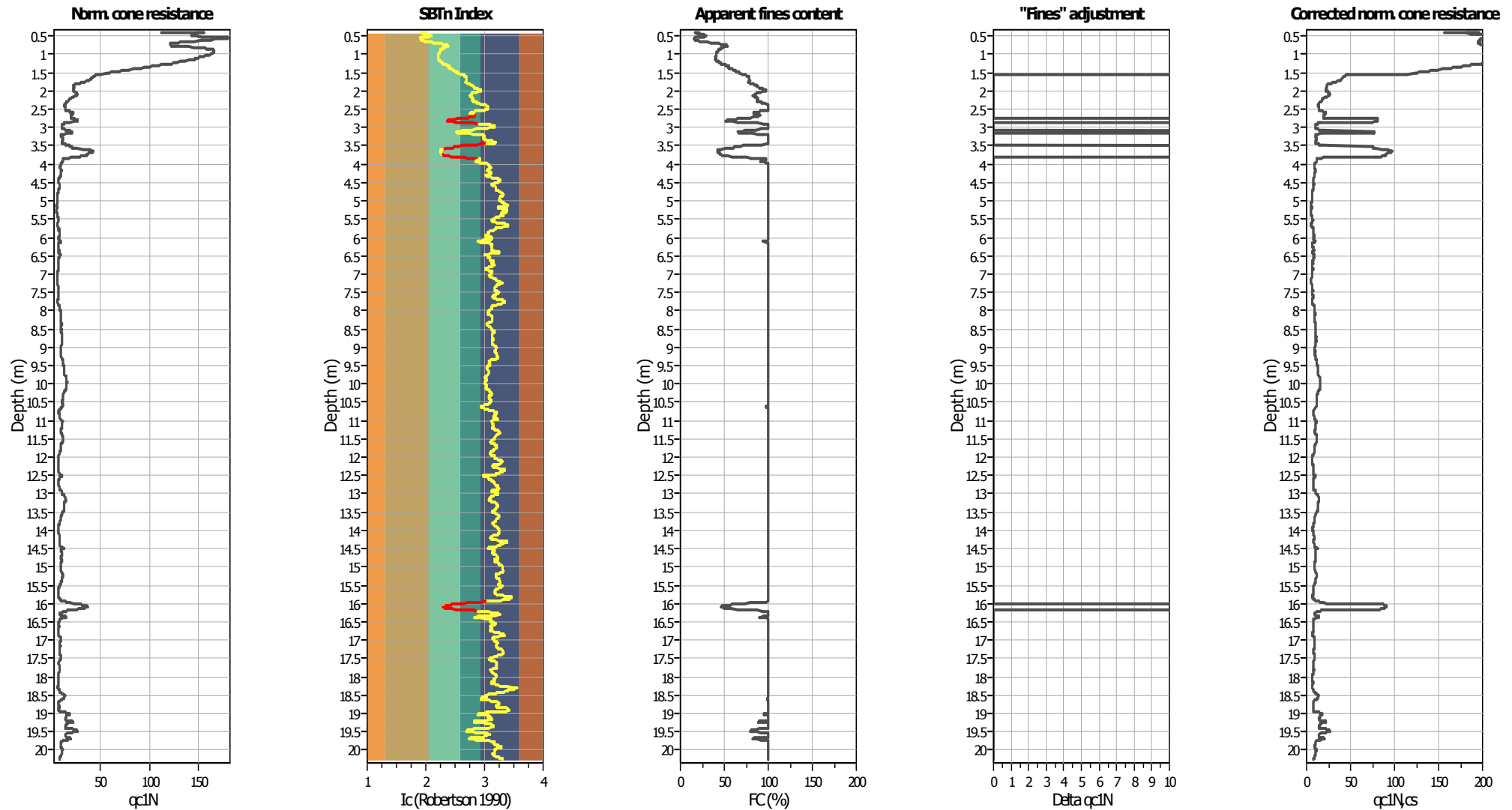
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

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

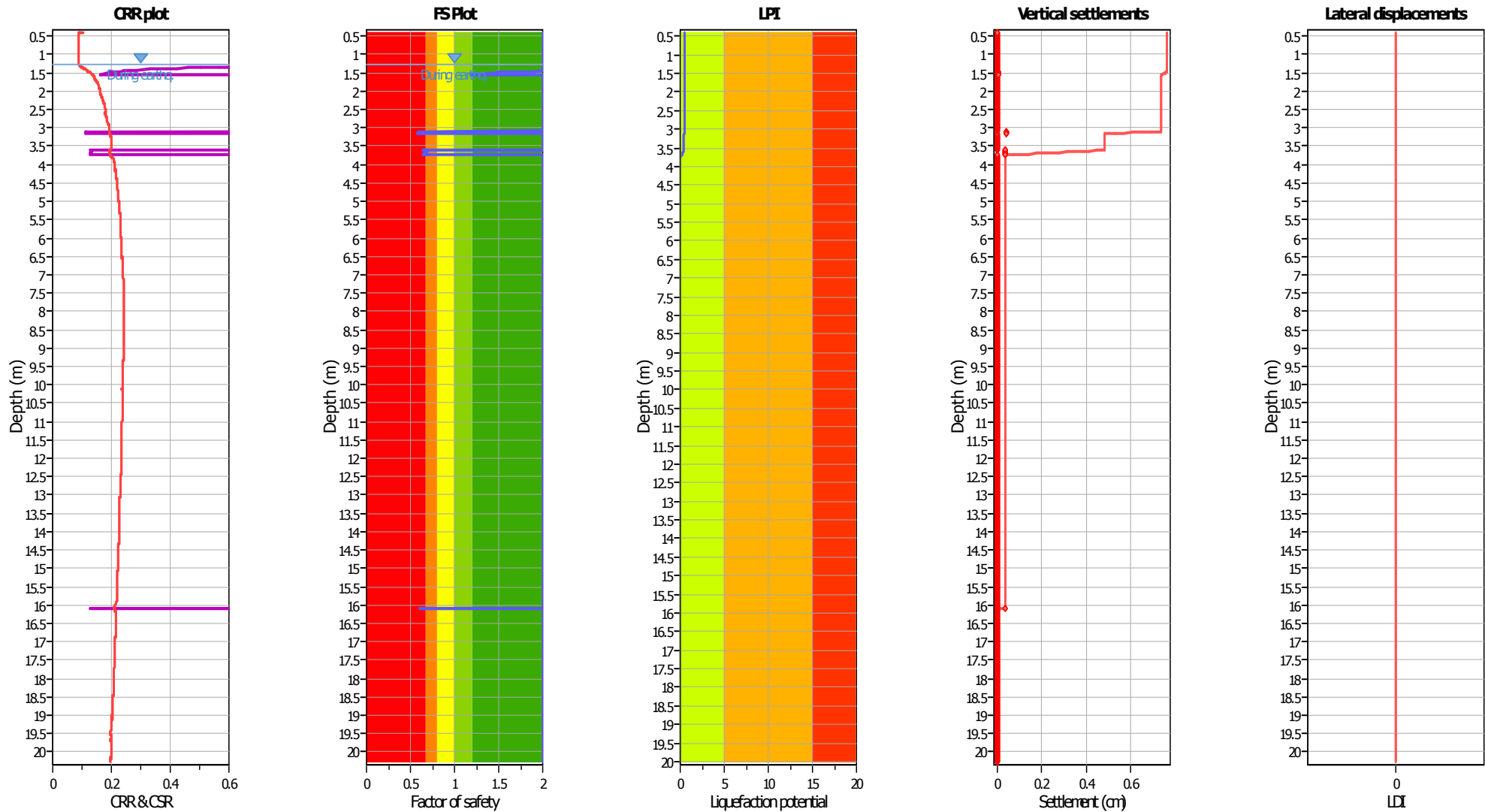
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _σ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

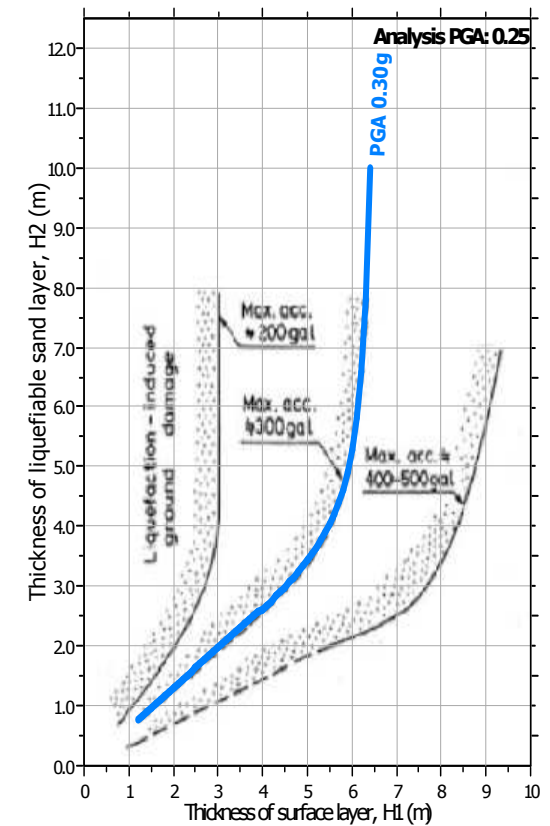
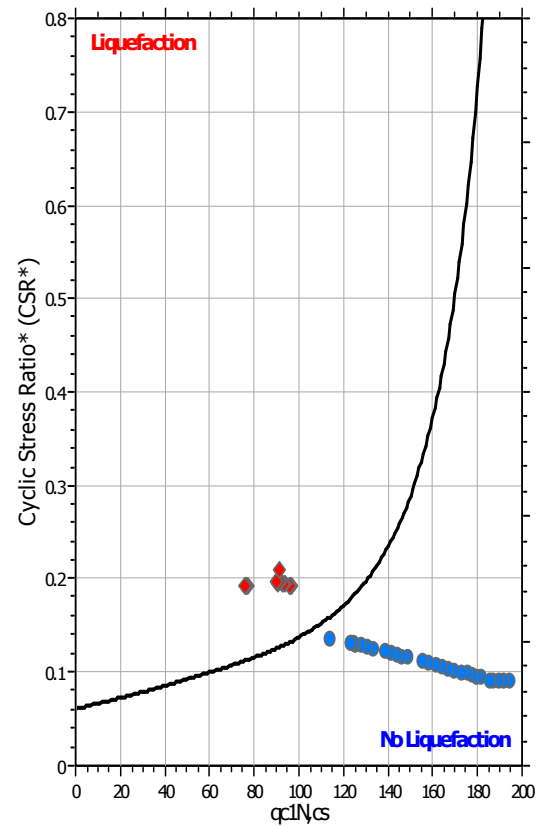
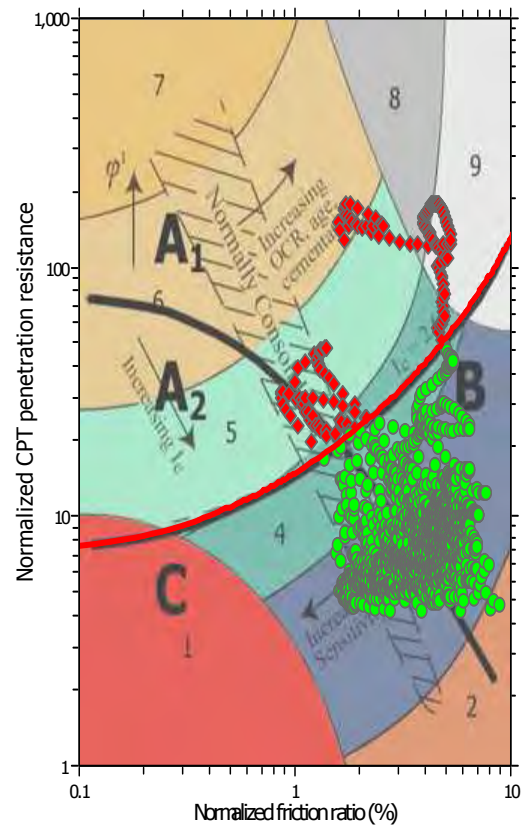
F.S. color scheme

- 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

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

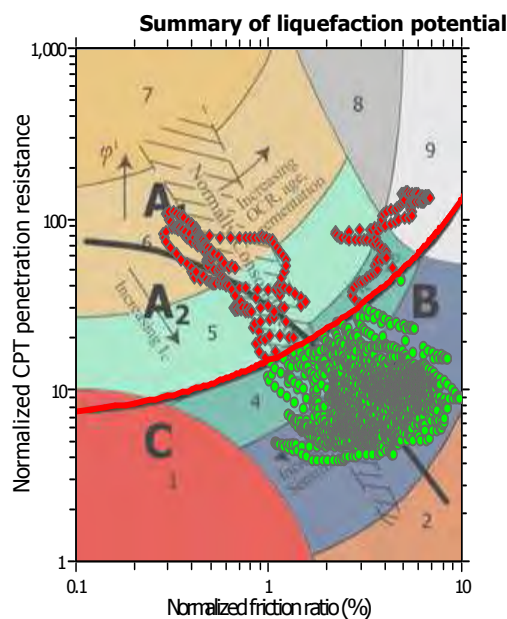
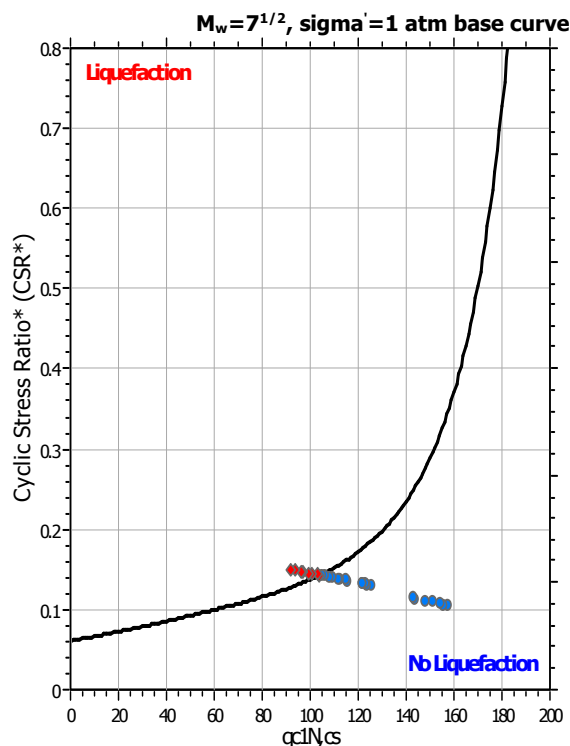
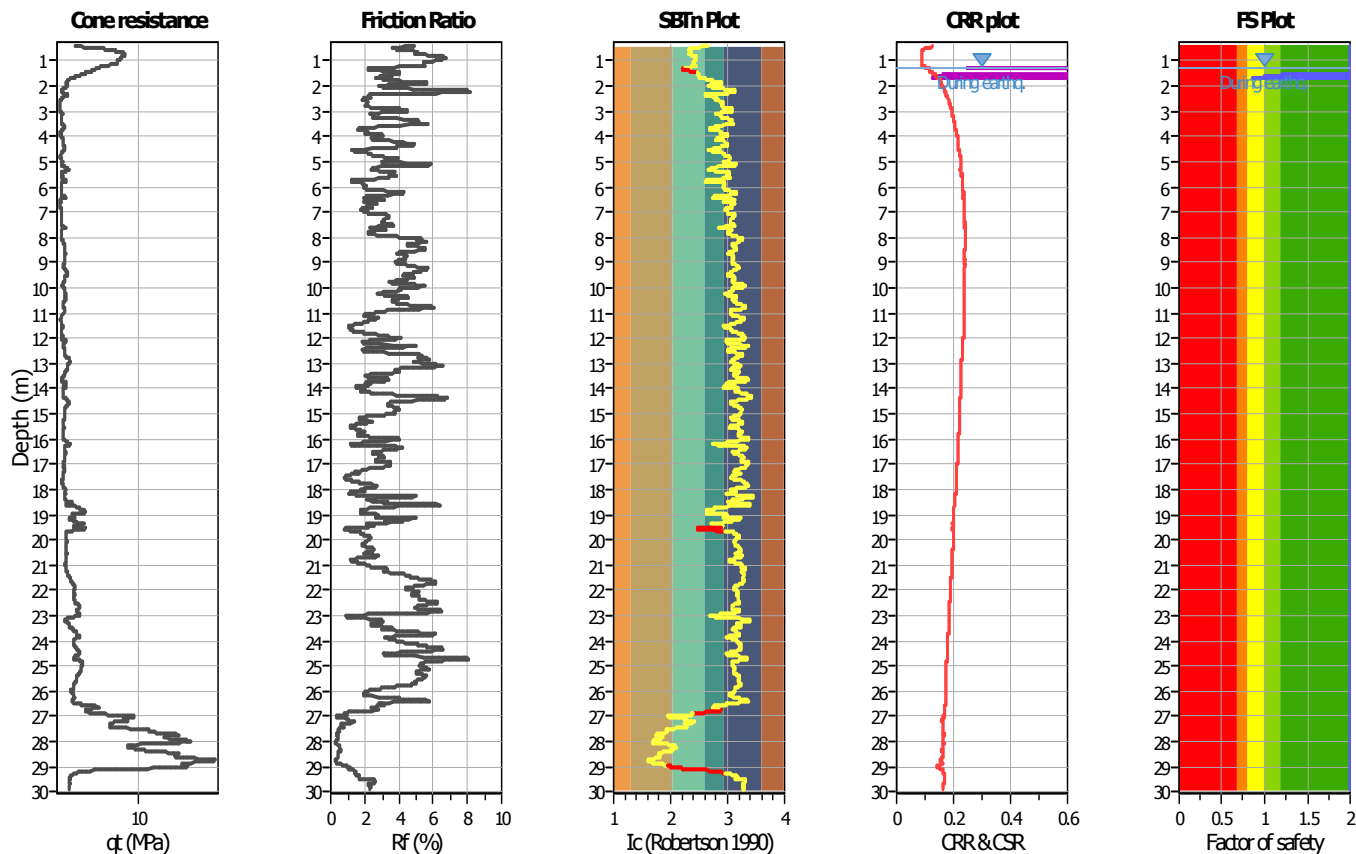
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

CPT file : 3t

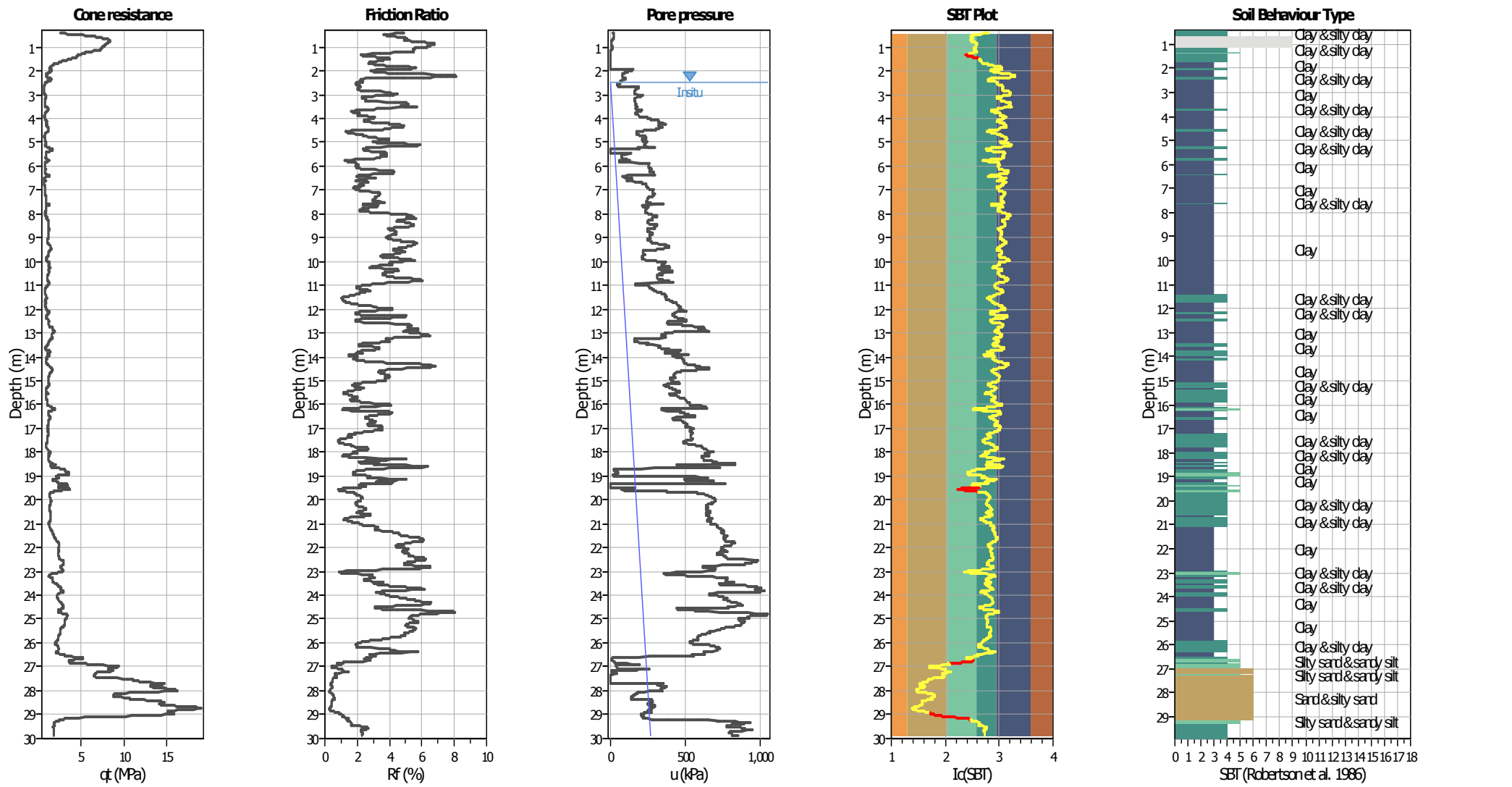
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



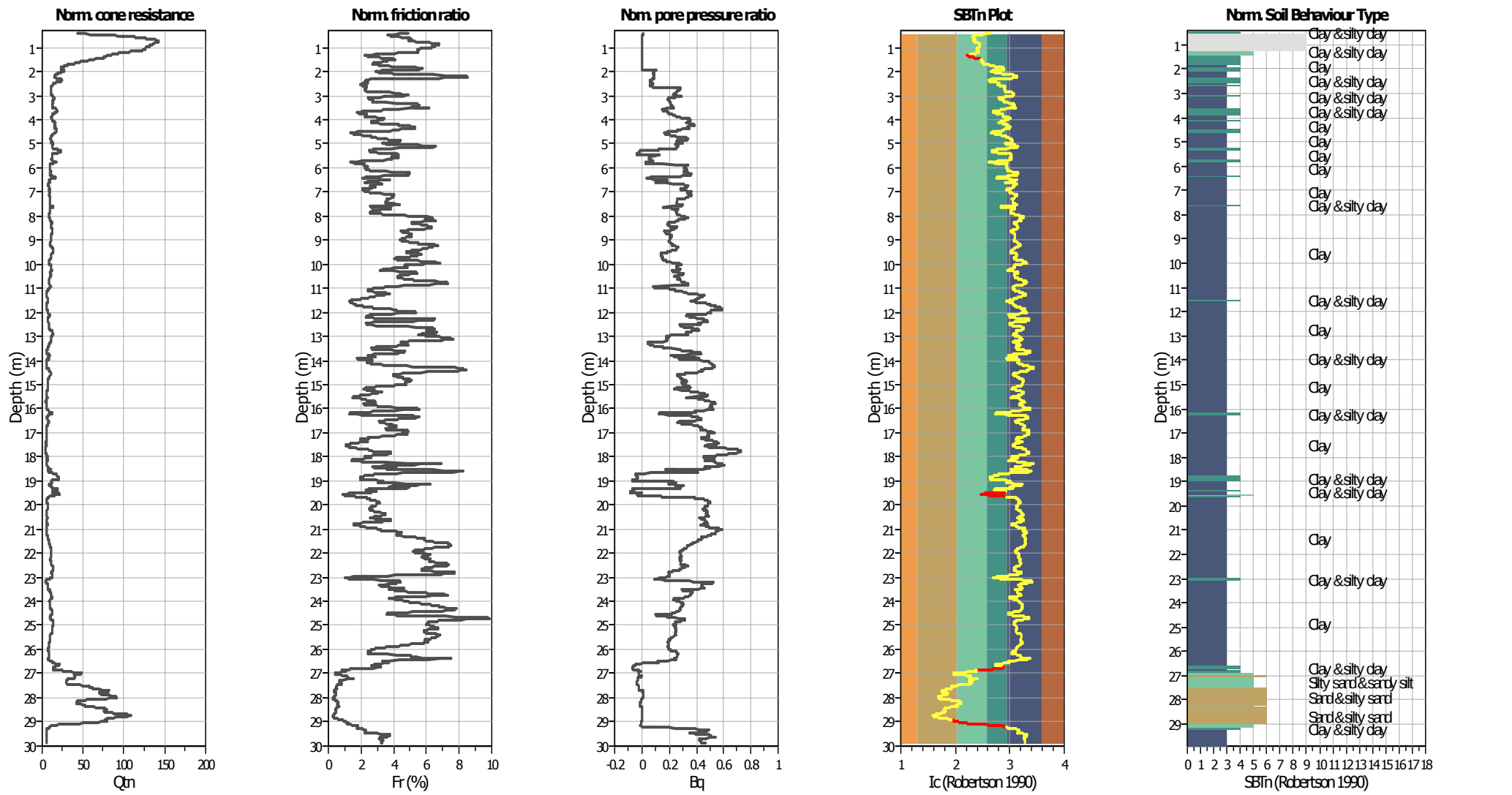
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _g applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

SBT 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

CPT basic interpretation plots (normalized)



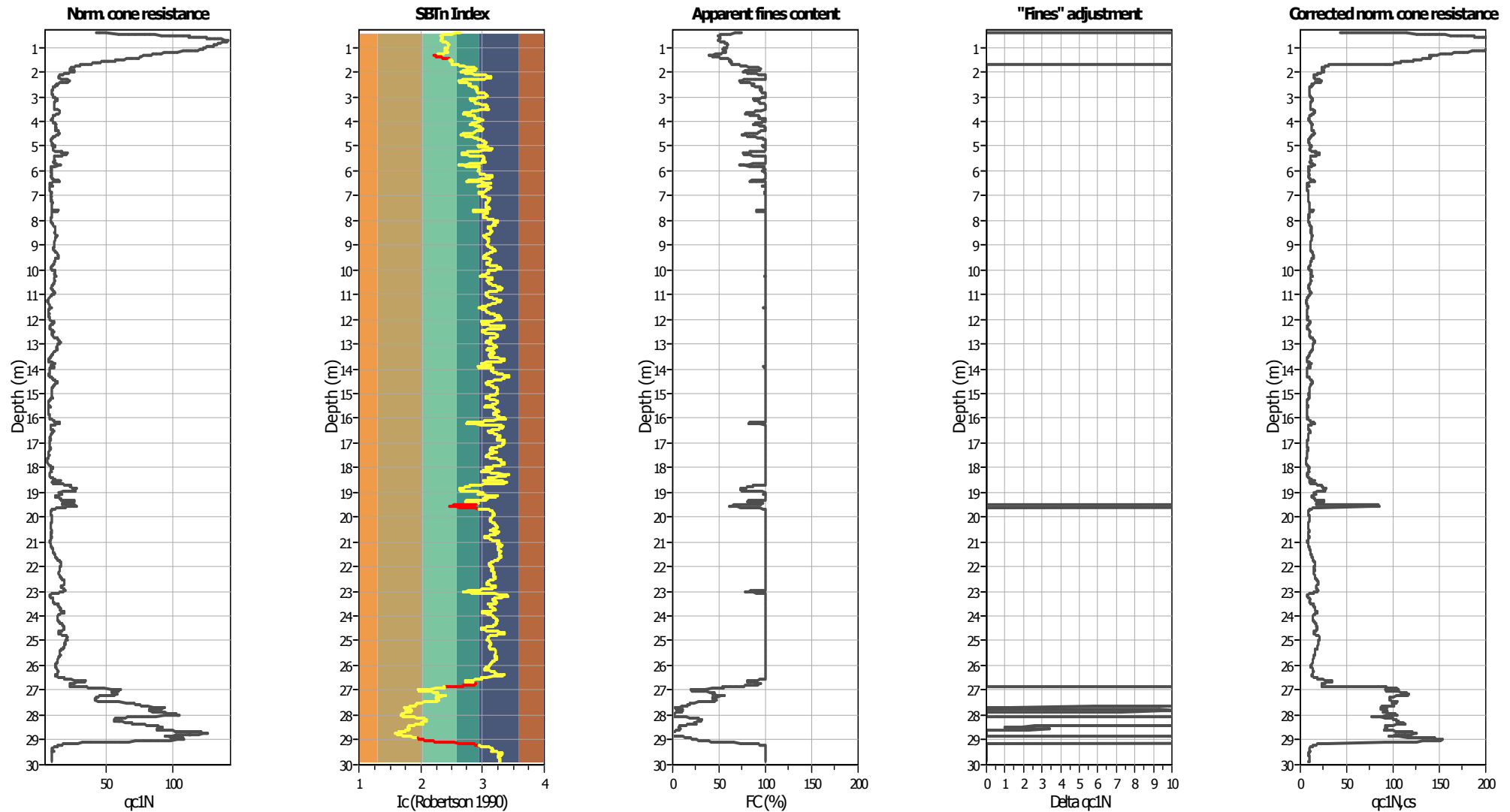
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c 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:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

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

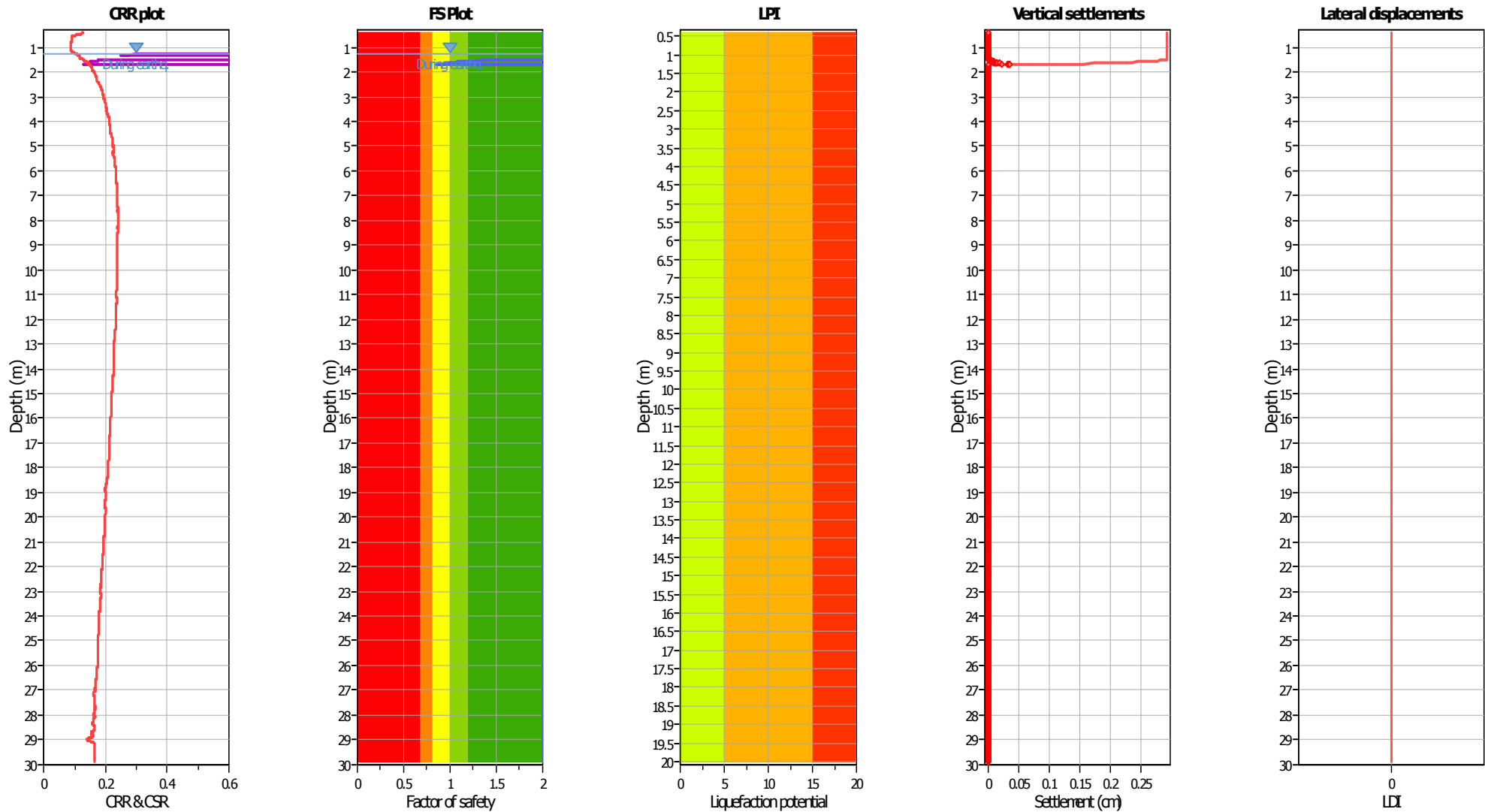
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_g applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

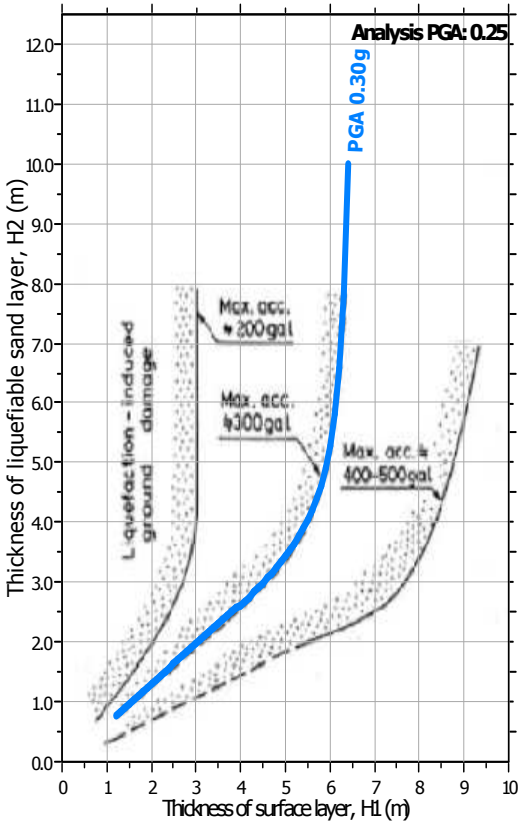
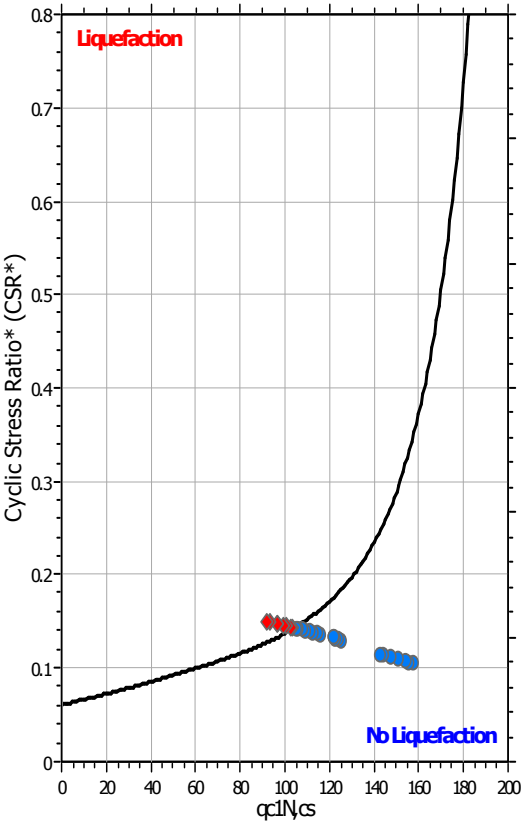
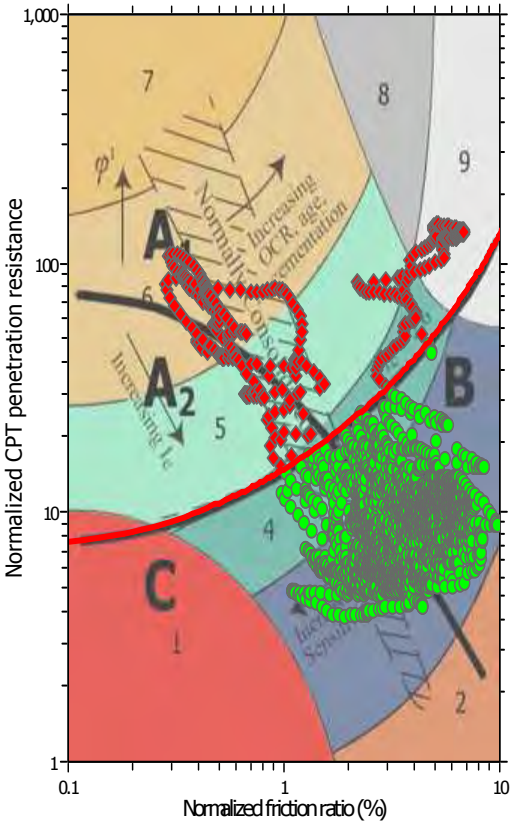
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

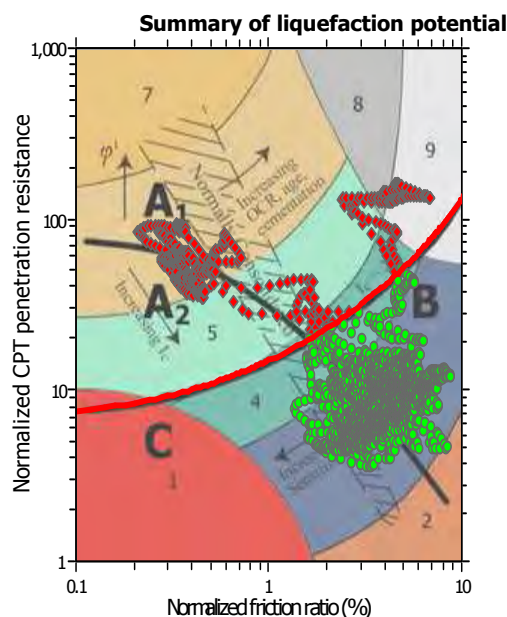
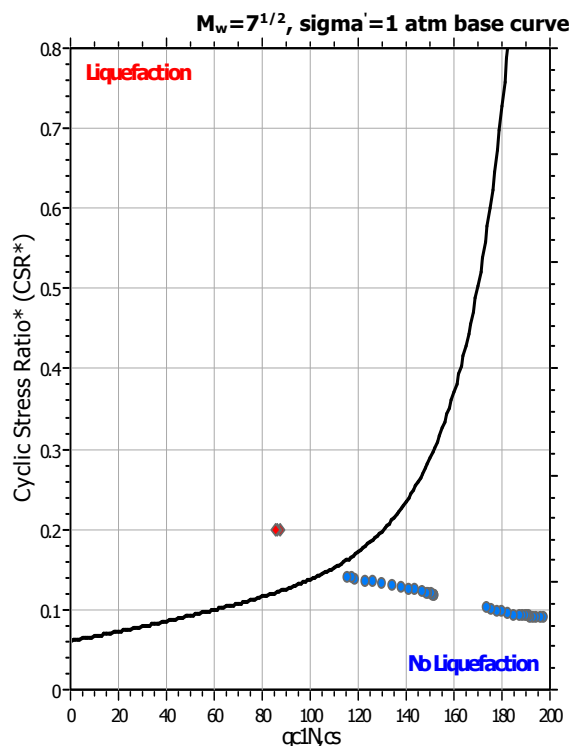
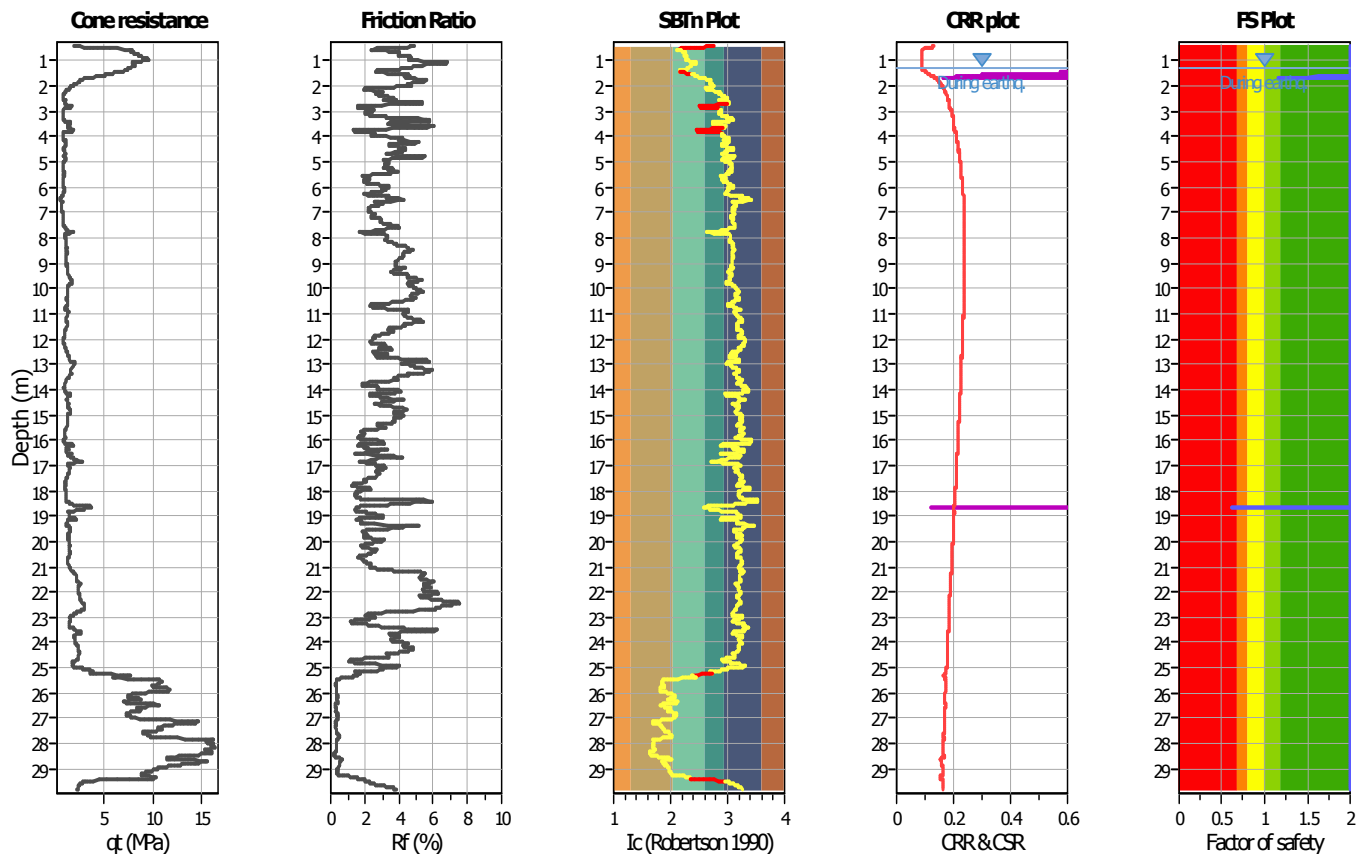
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

CPT file : 4t

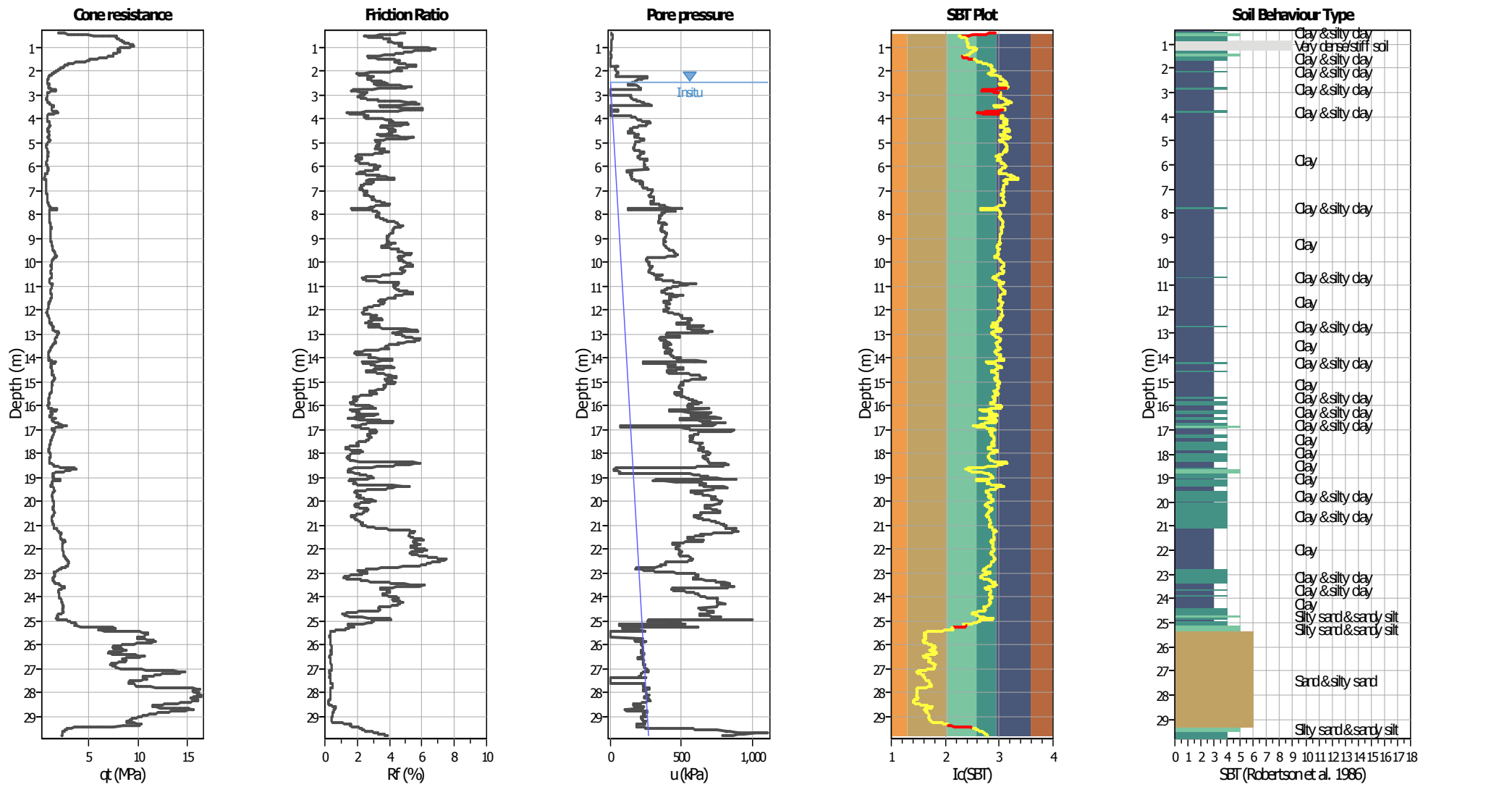
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



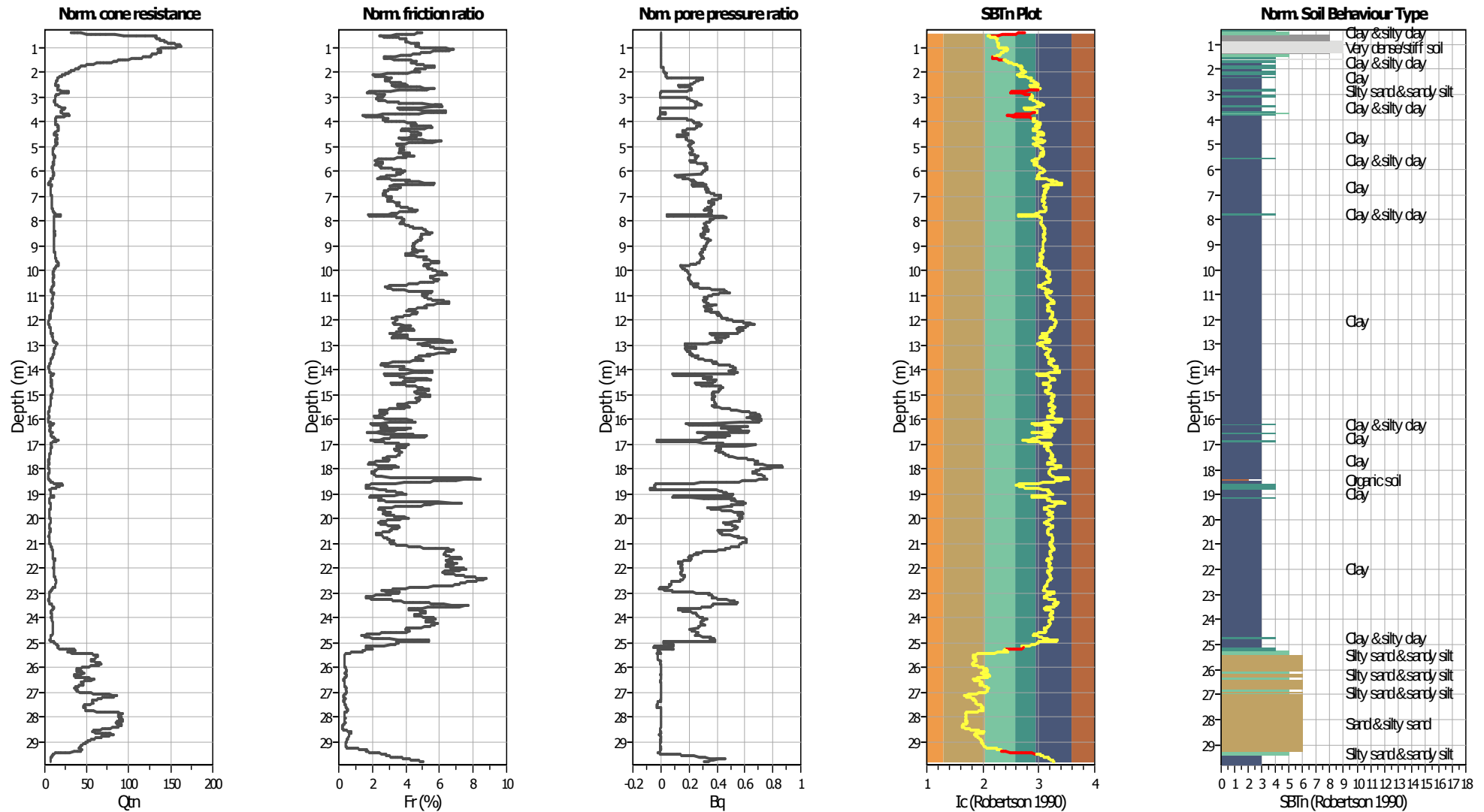
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBT 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

CPT basic interpretation plots (normalized)



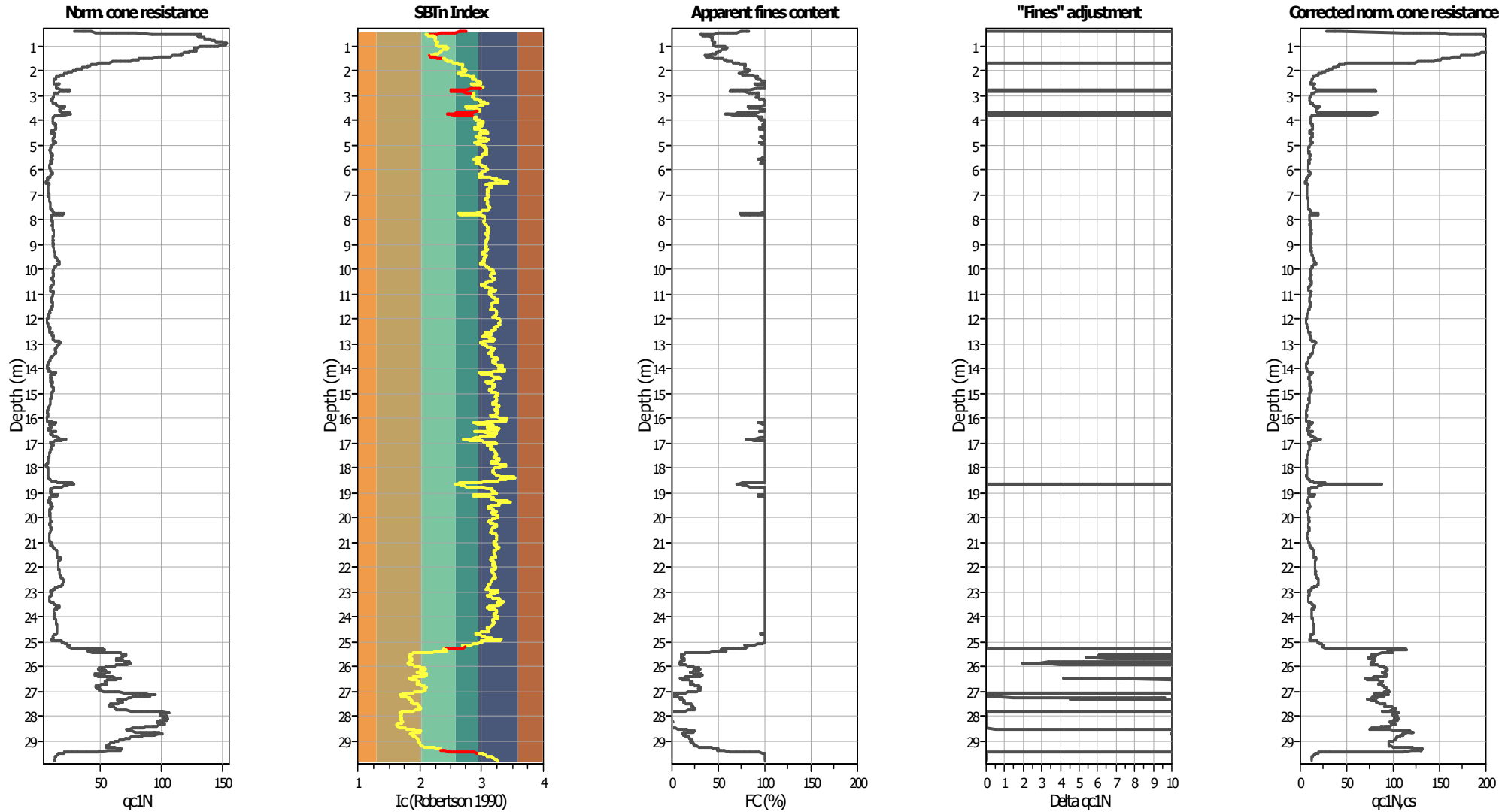
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_p applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

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

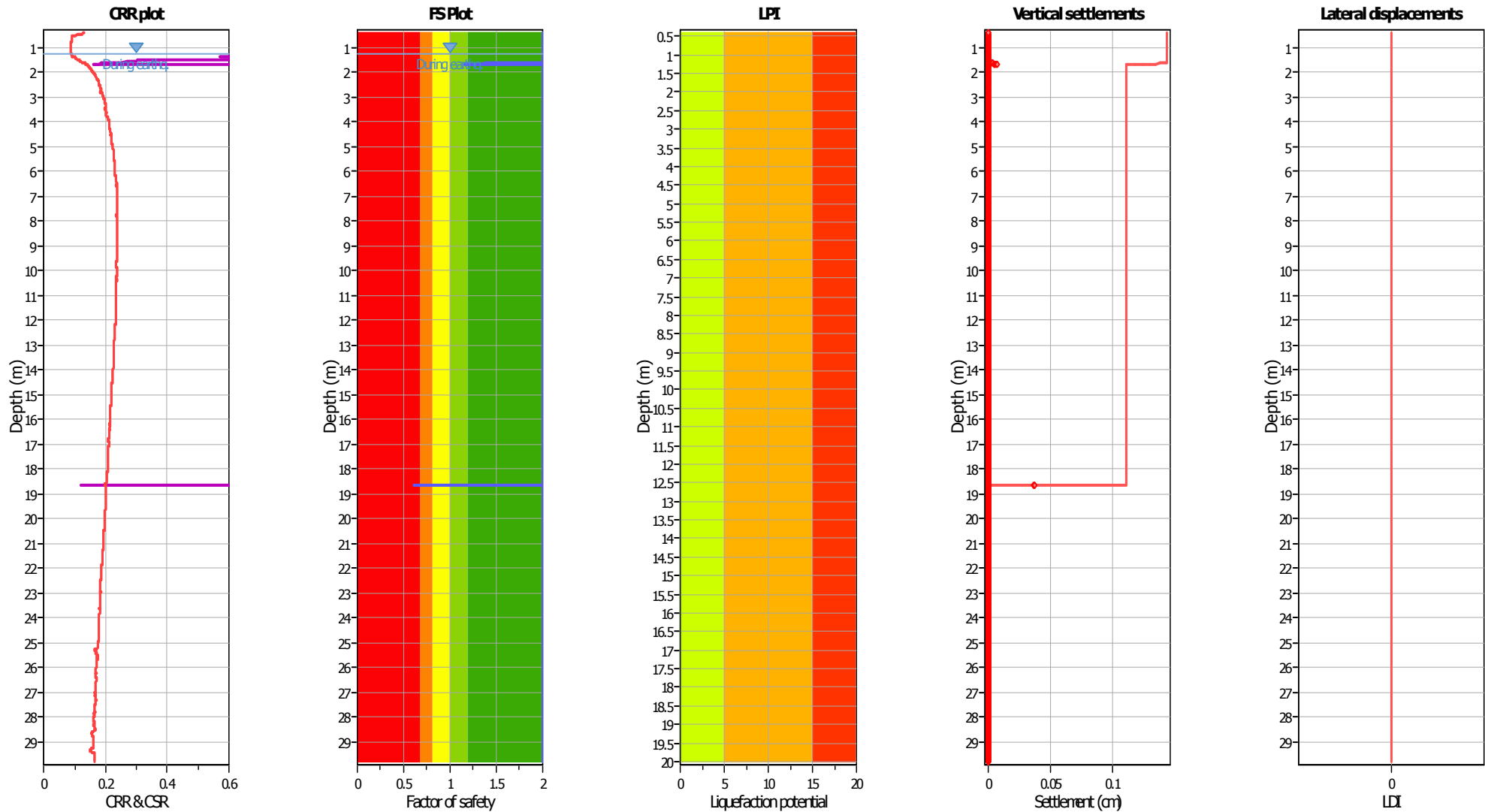
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

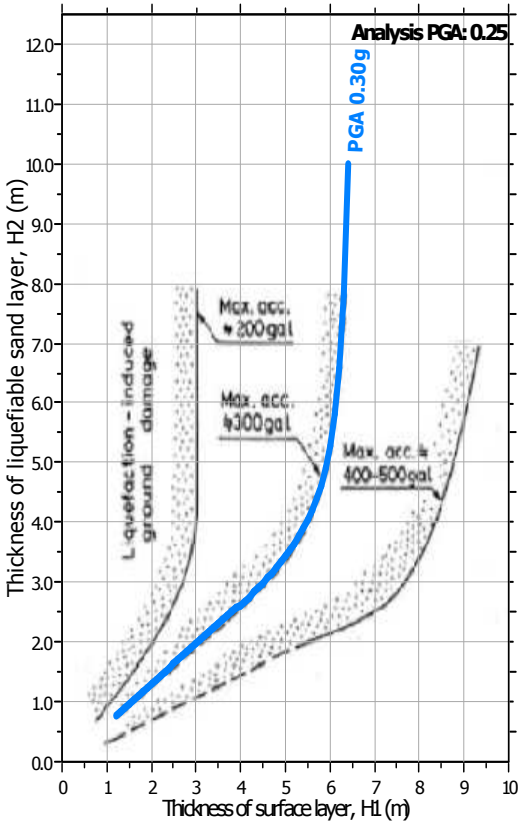
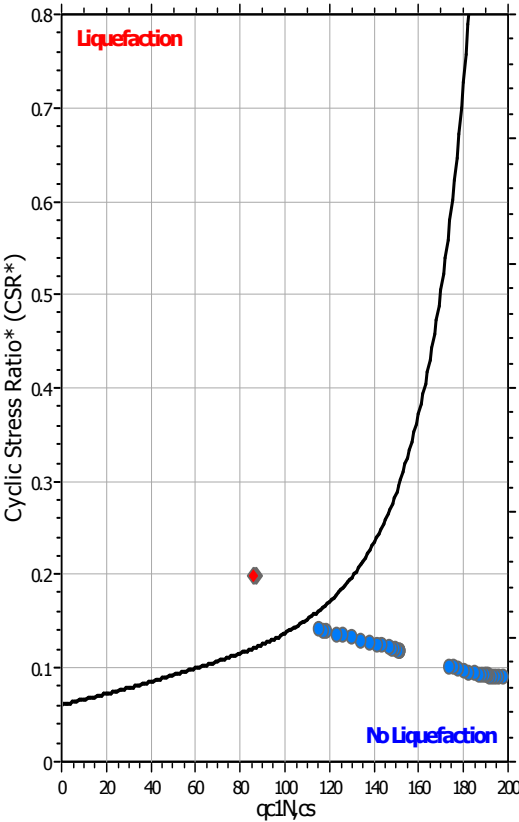
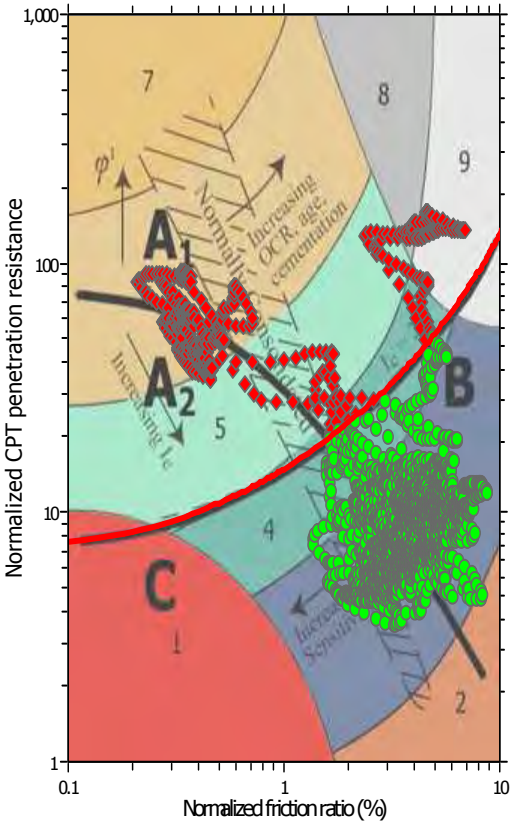
F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

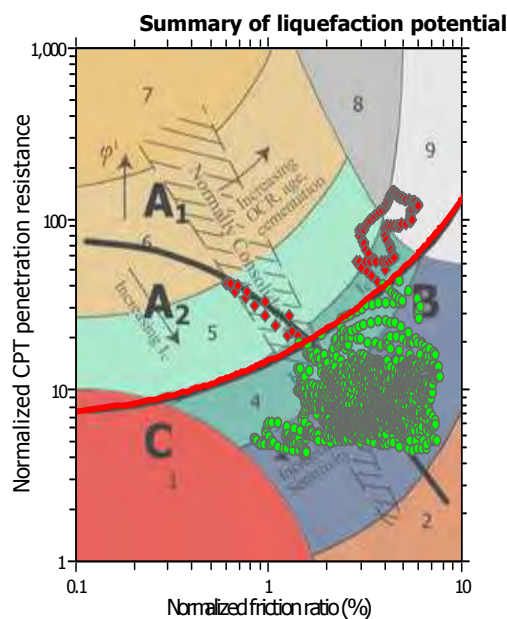
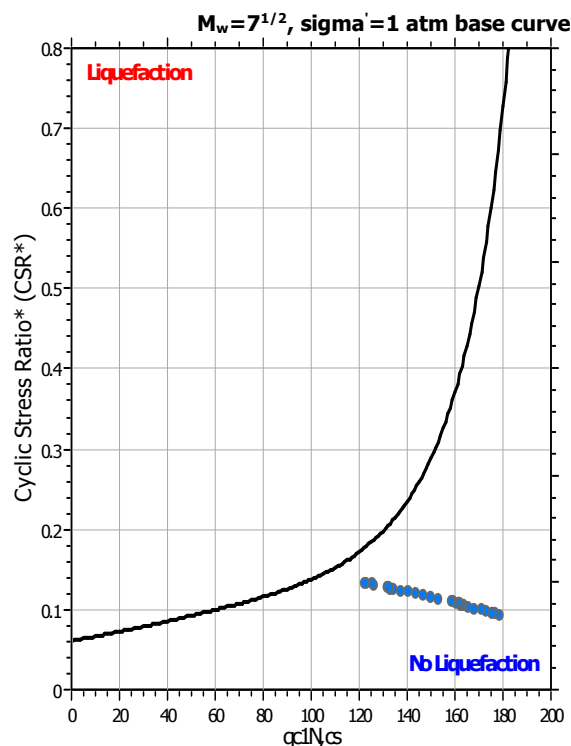
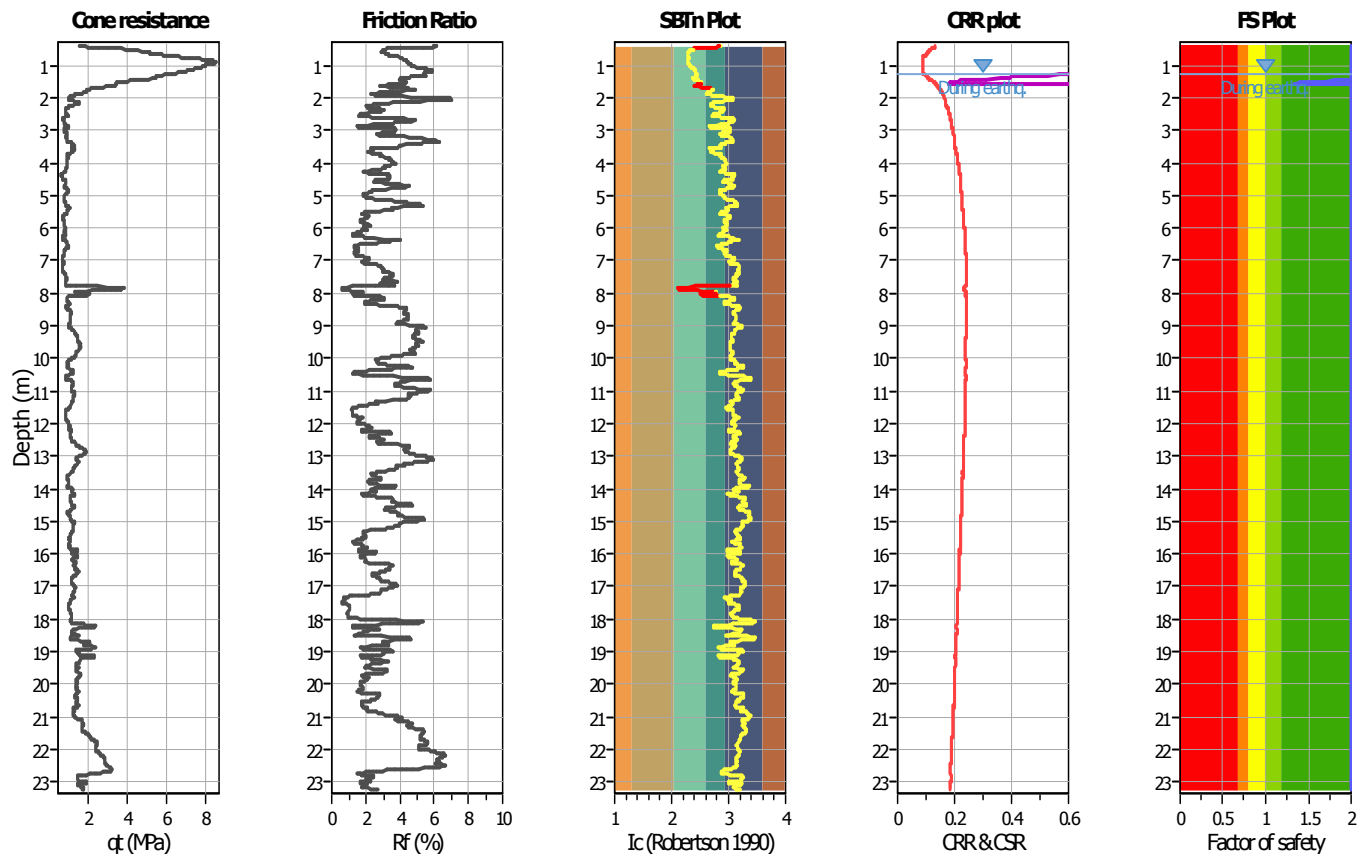
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

CPT file : 5t

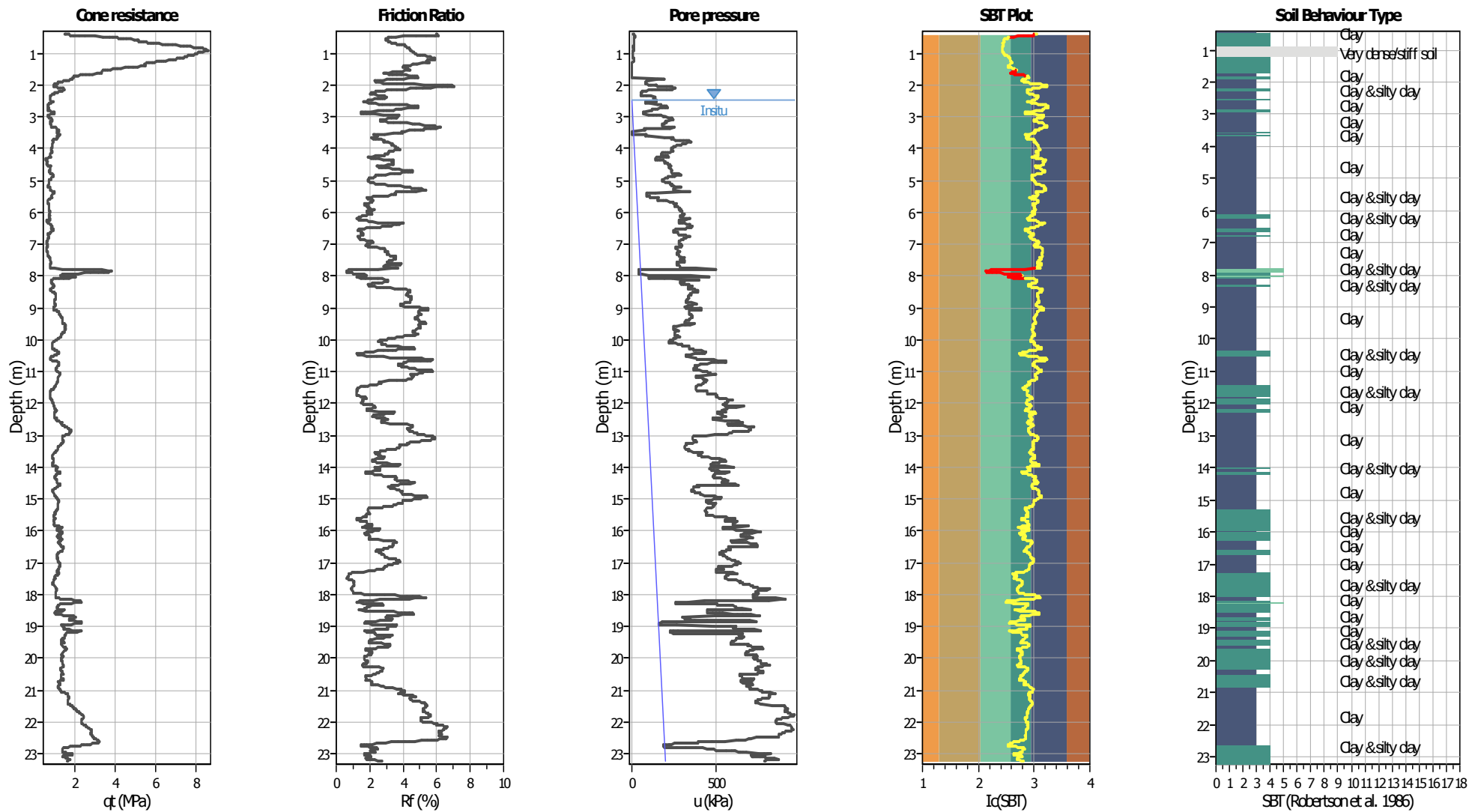
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



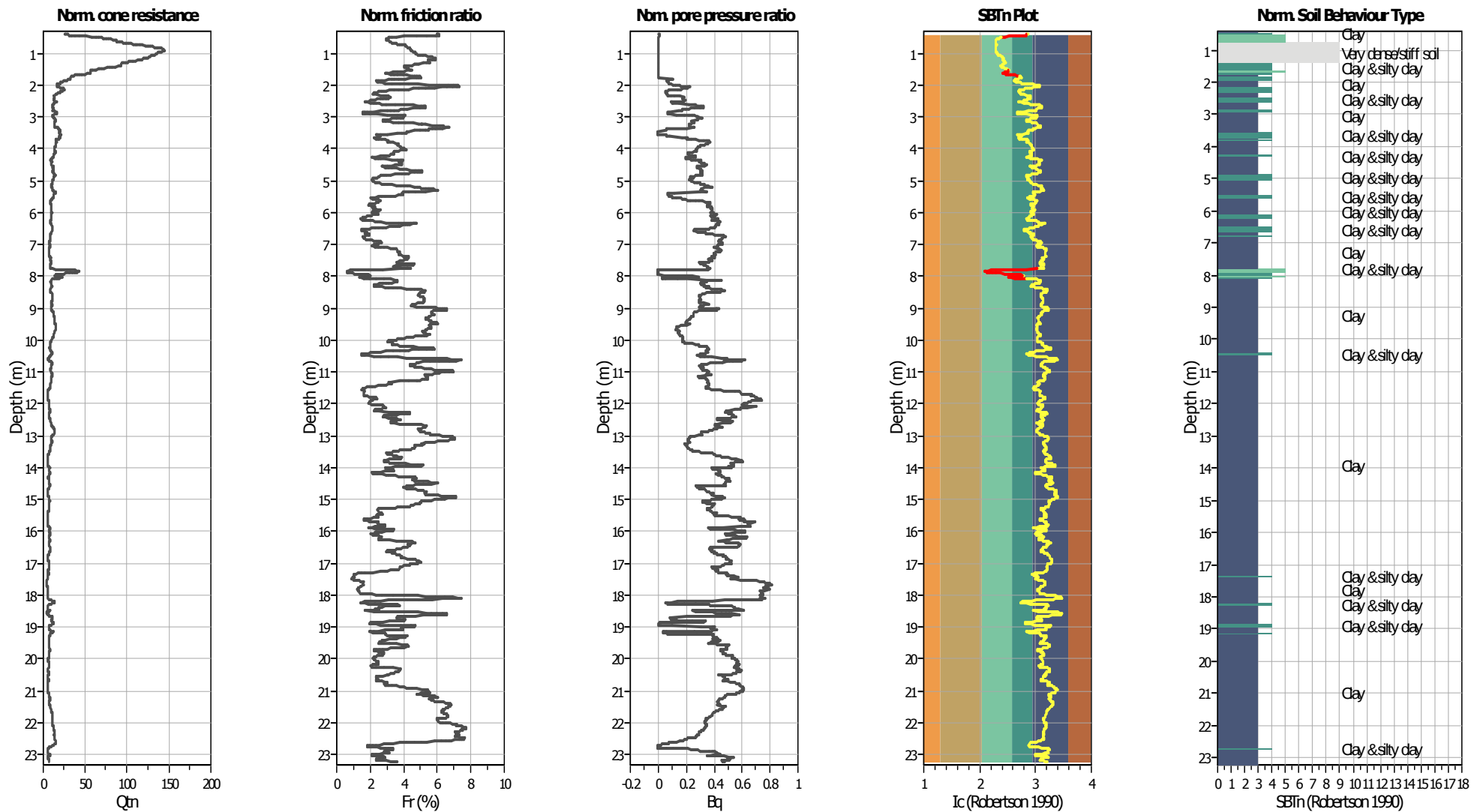
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

SBT 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

CPT basic interpretation plots (normalized)



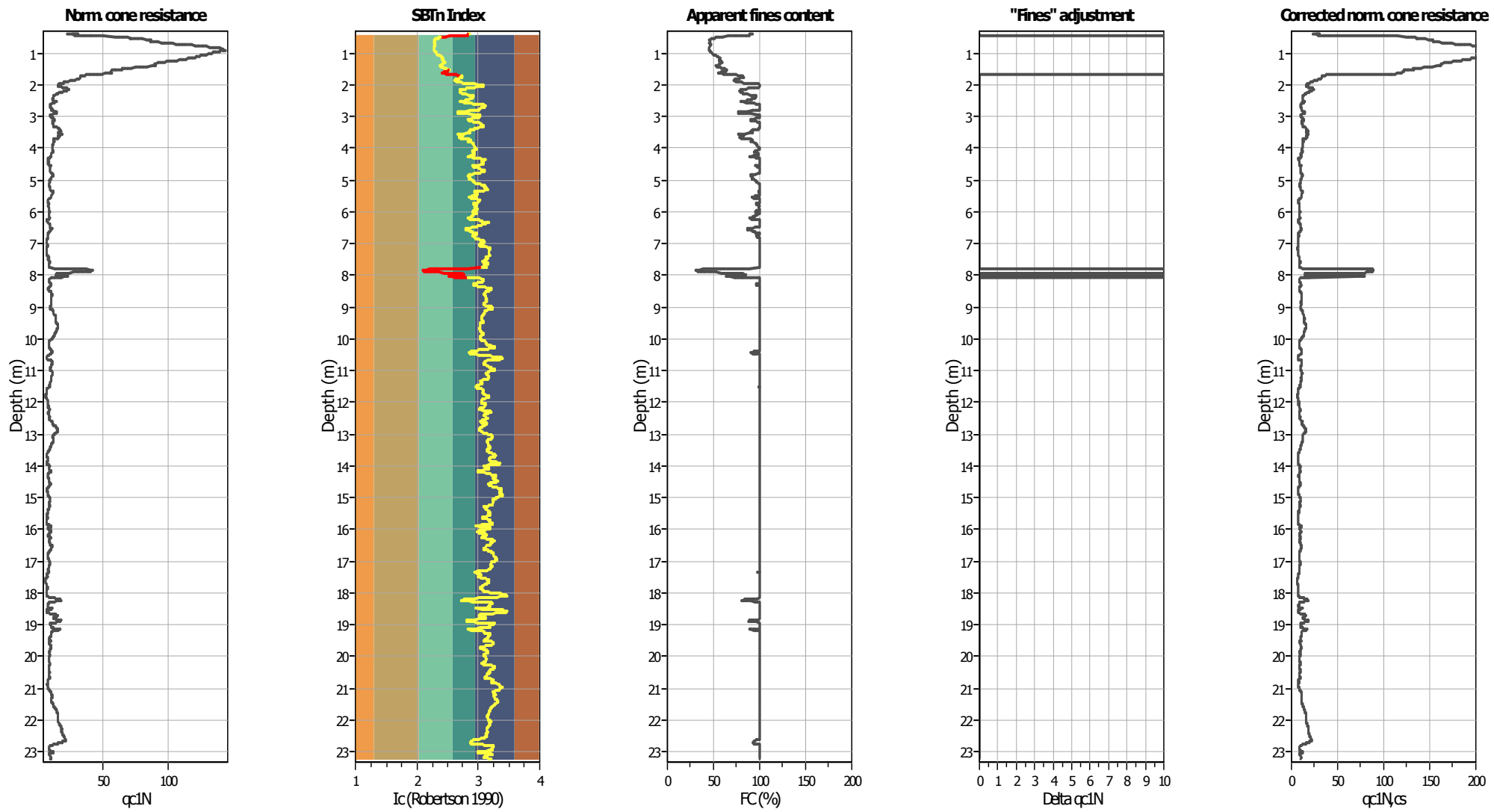
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _g applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

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

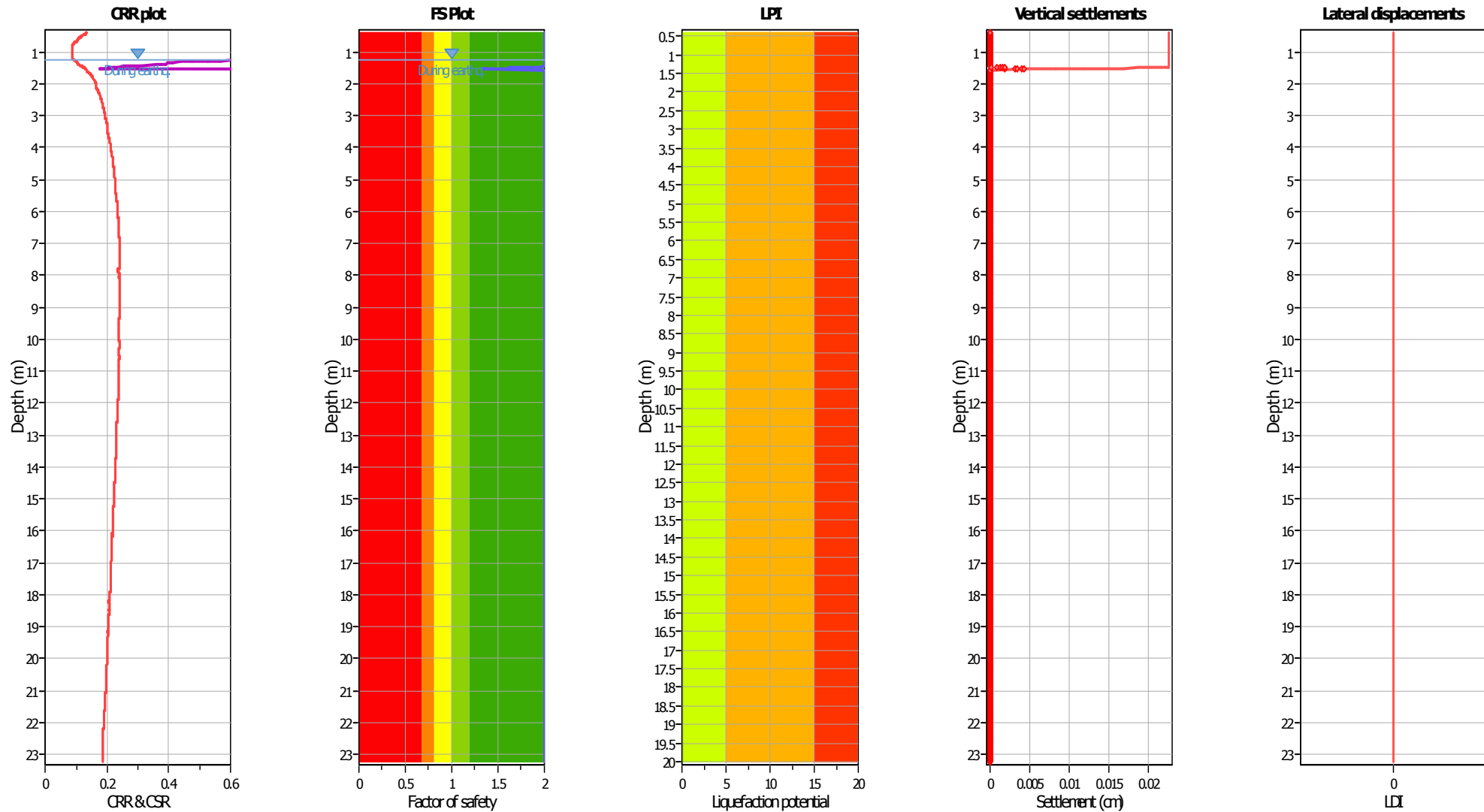
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_g applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_{σ} applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

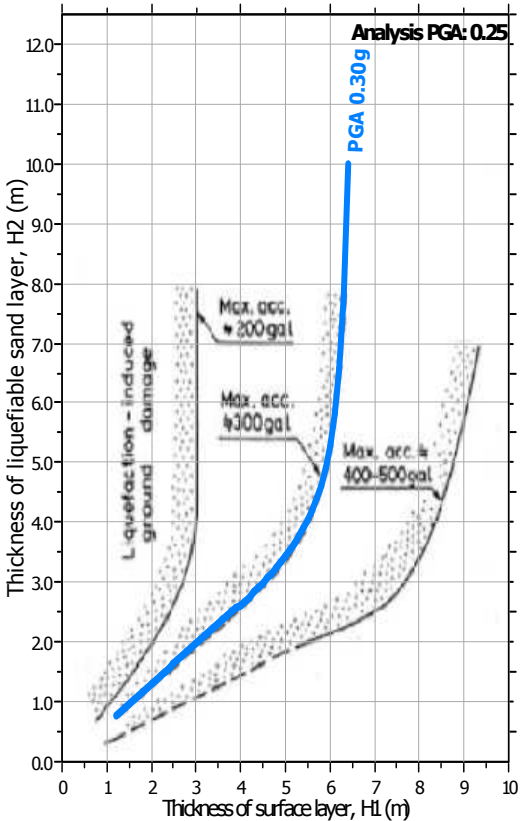
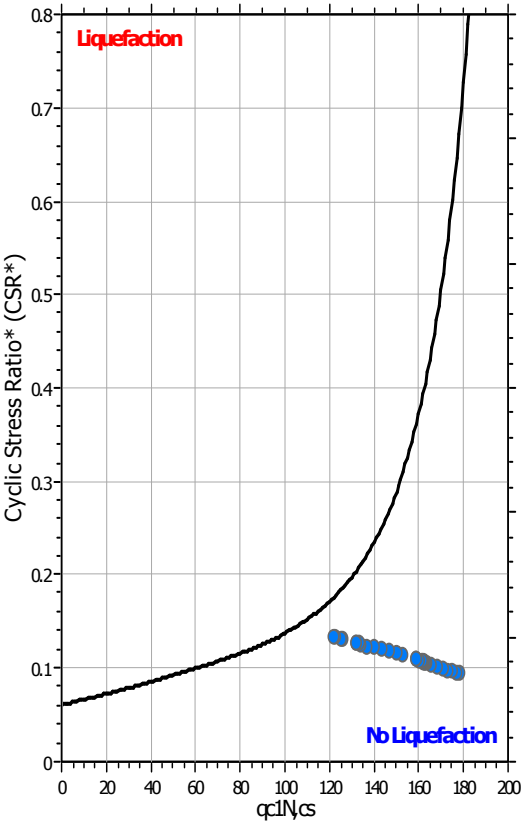
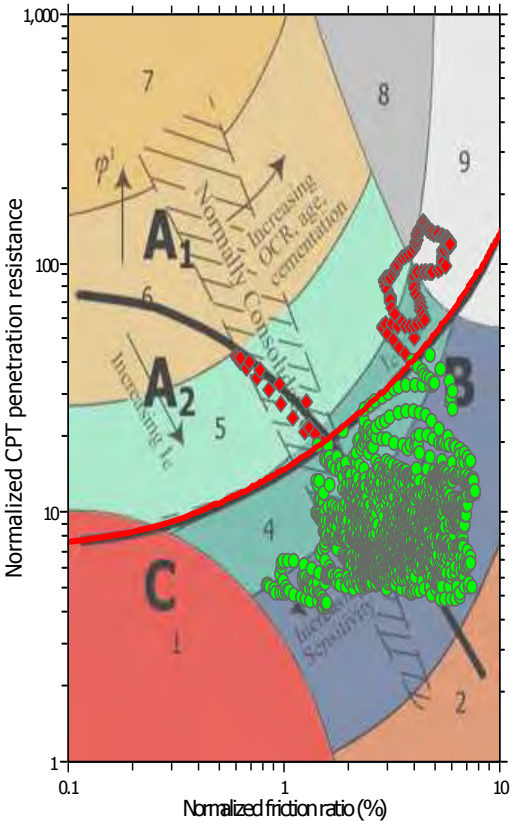
F.S. color scheme

■	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

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

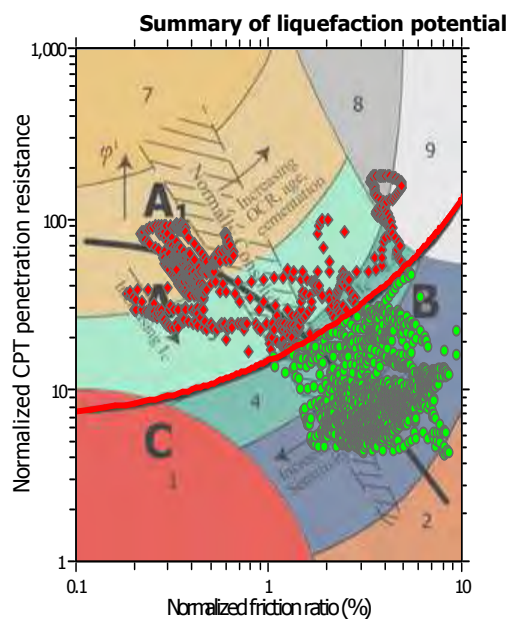
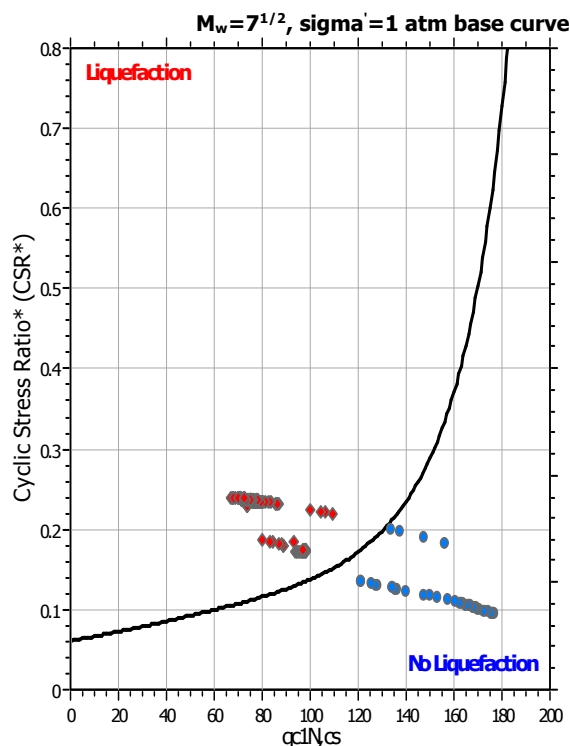
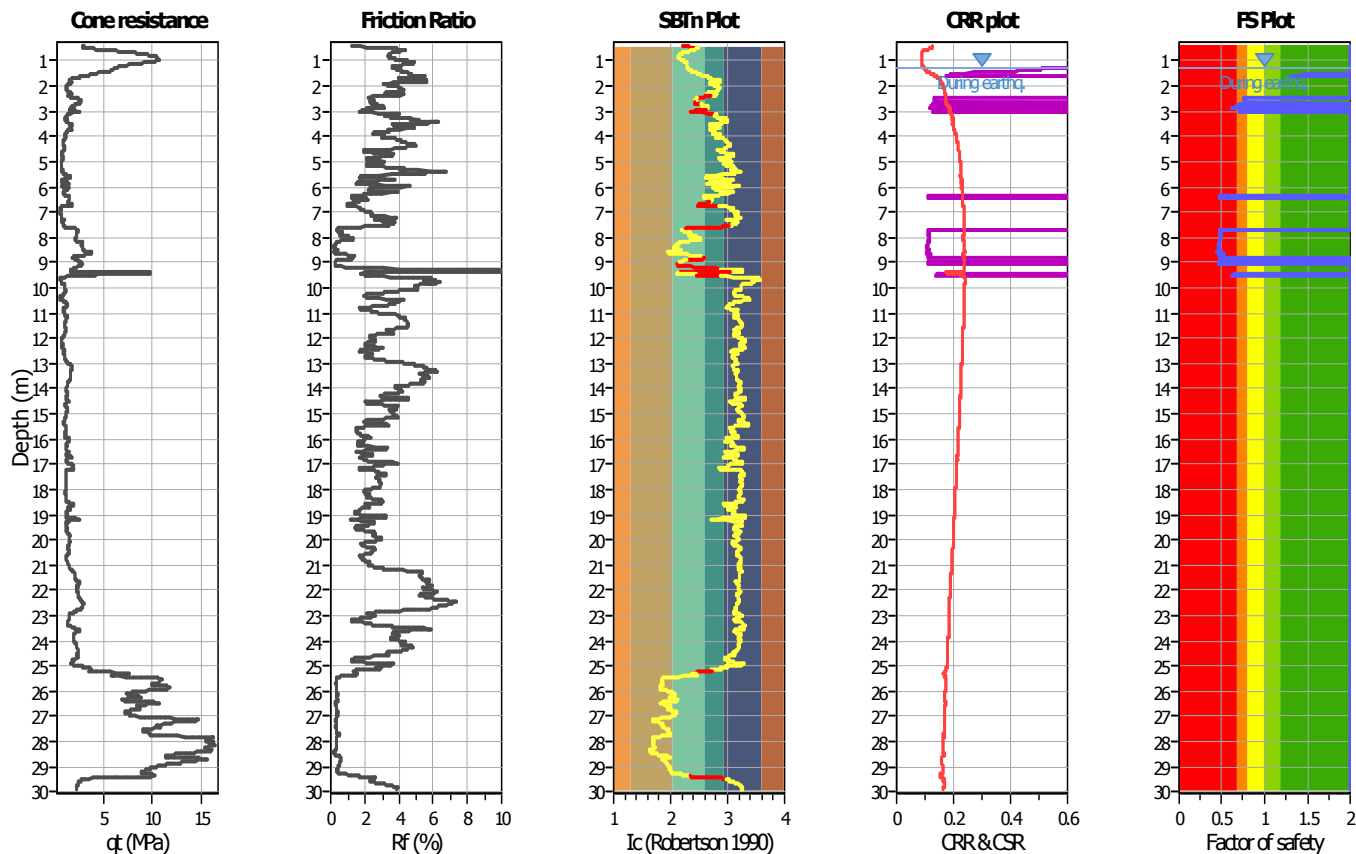
Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

CPT file : 6t

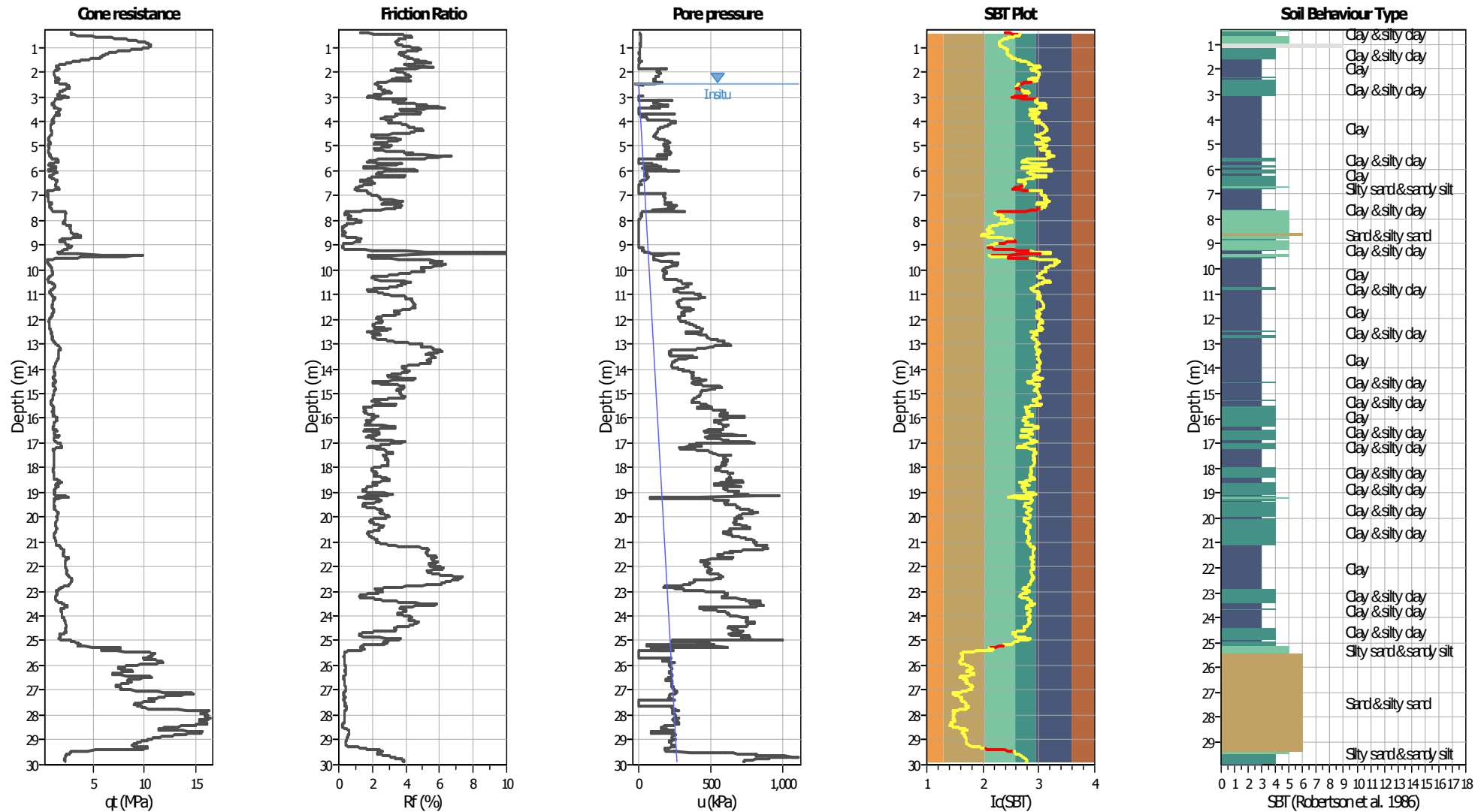
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.25 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:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.25	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots



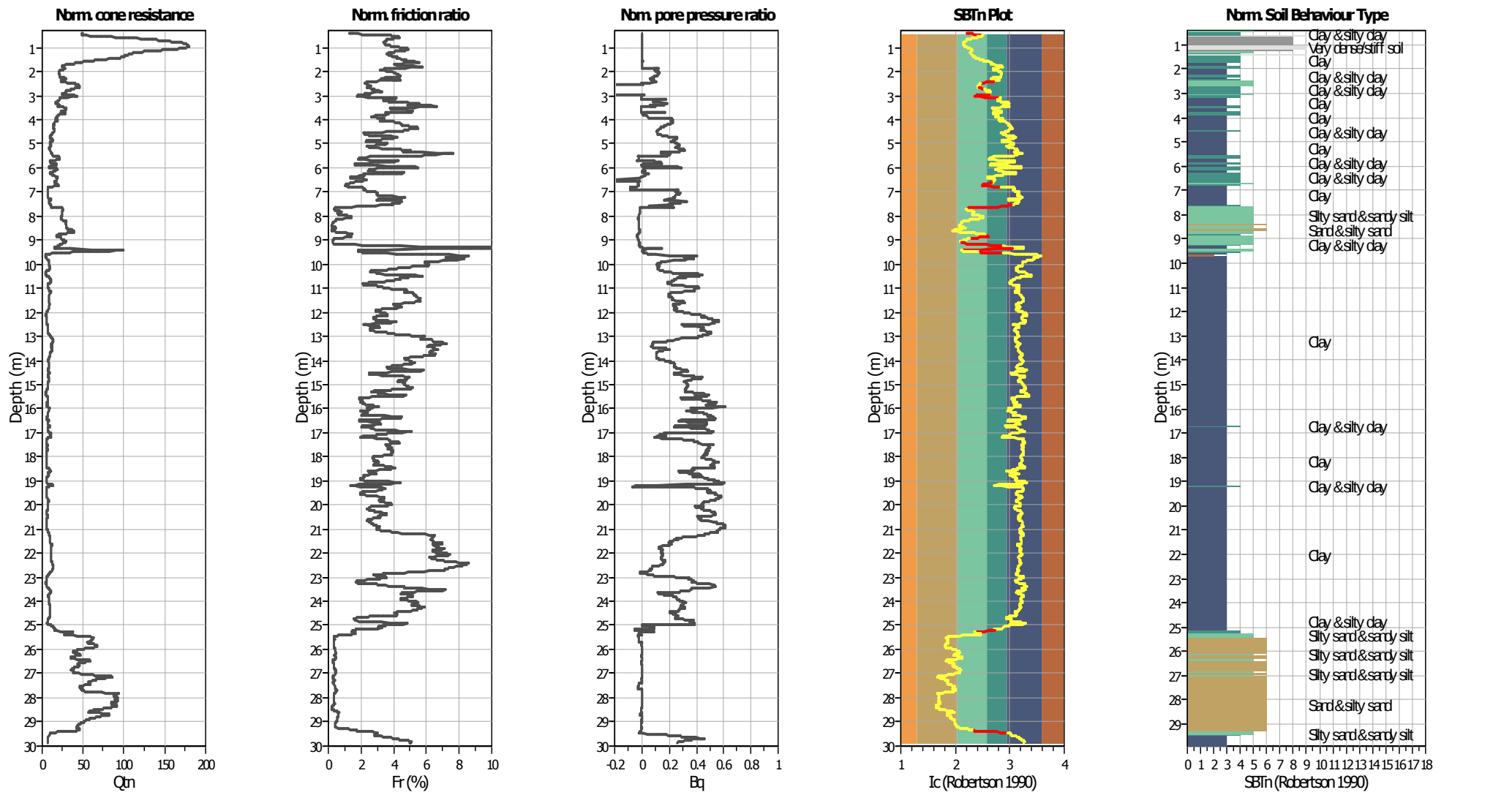
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_g applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

SBT 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

CPT basic interpretation plots (normalized)



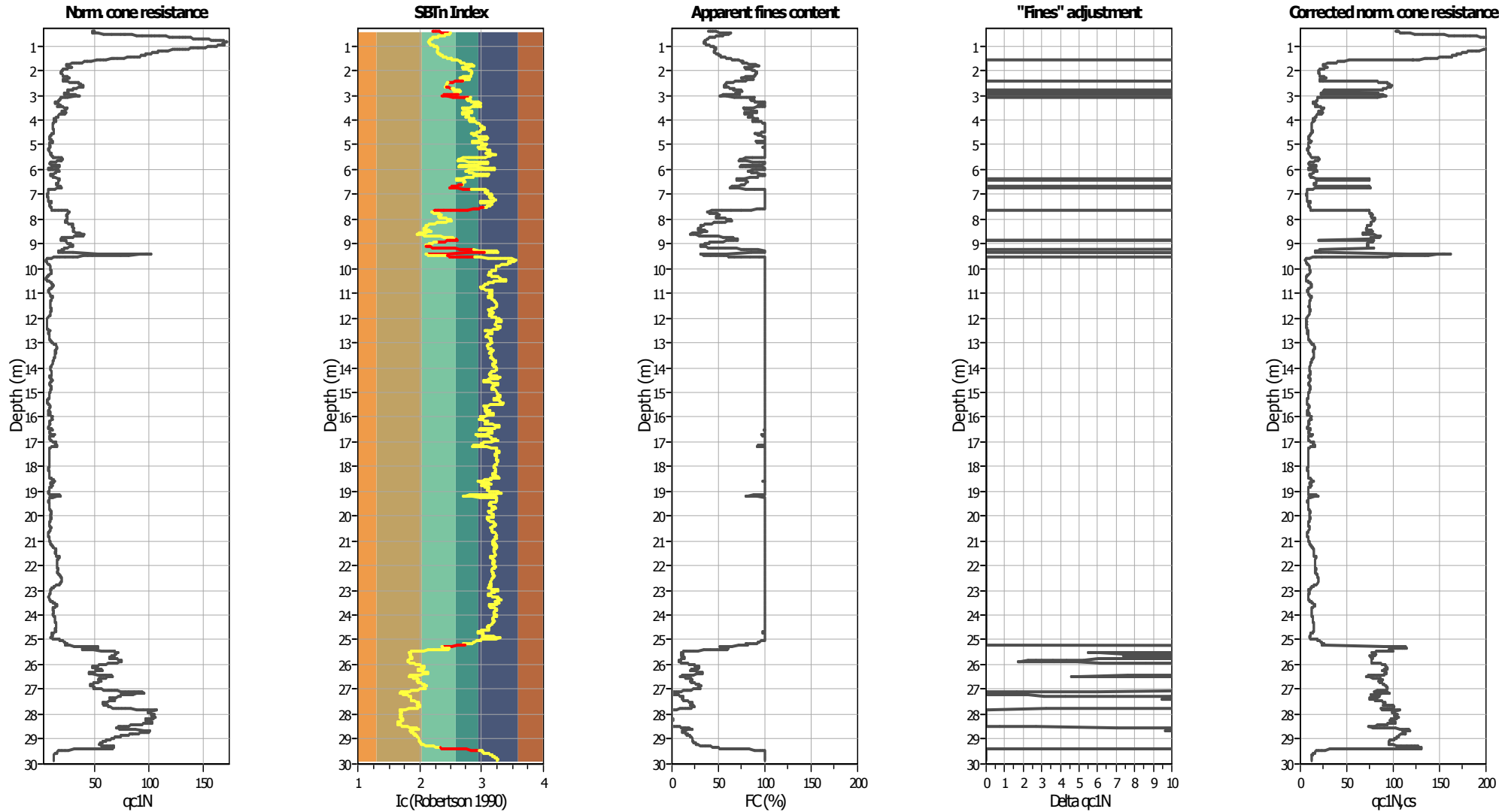
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _g applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
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

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

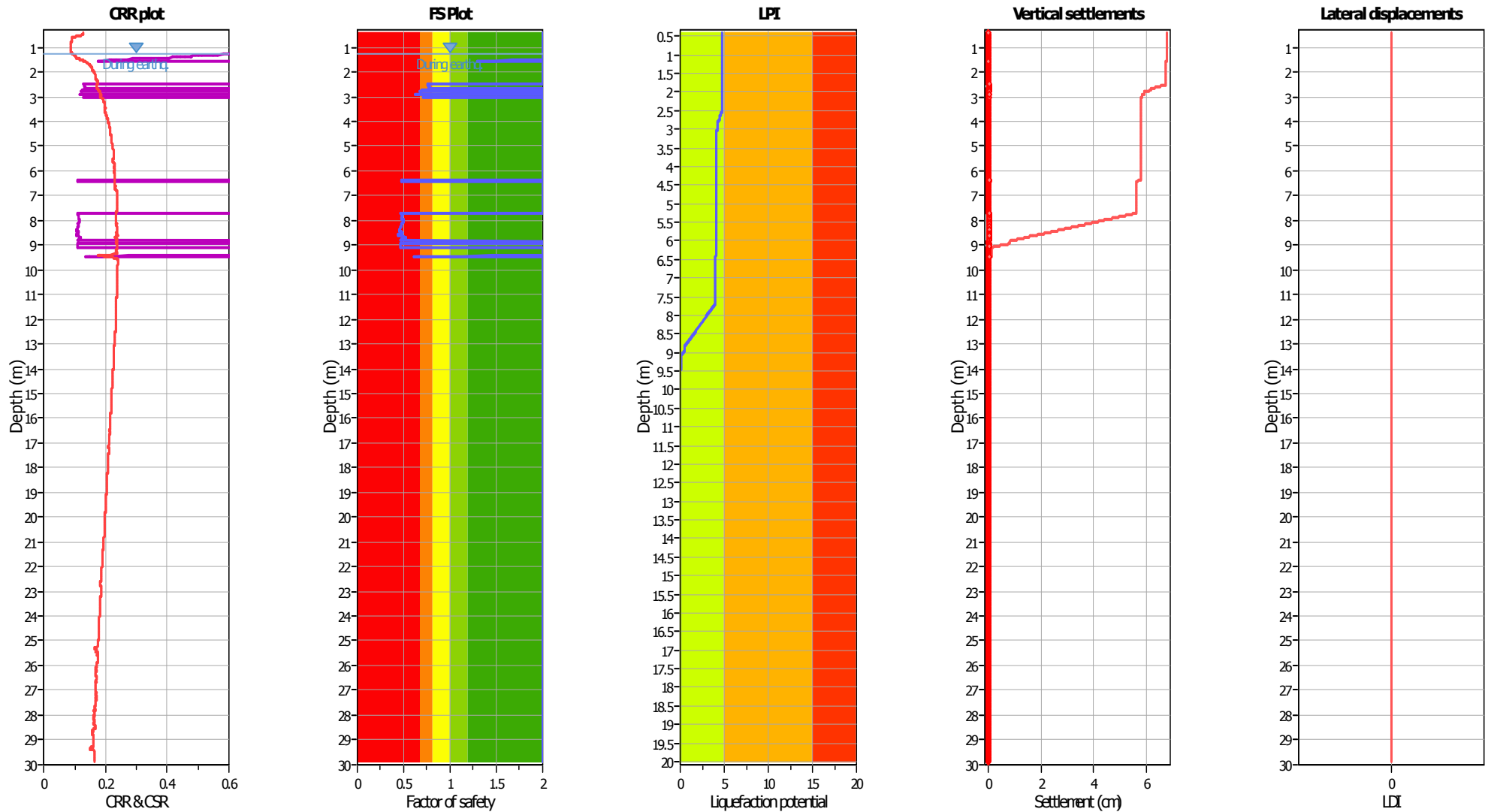
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

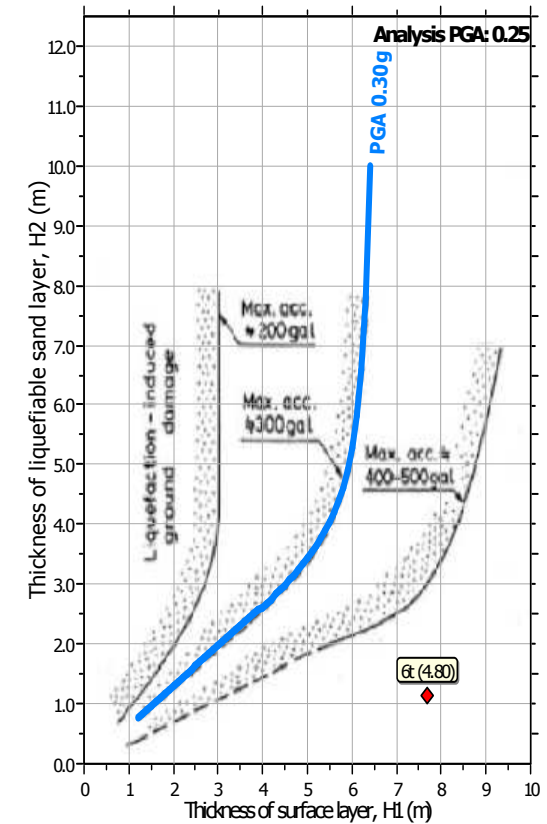
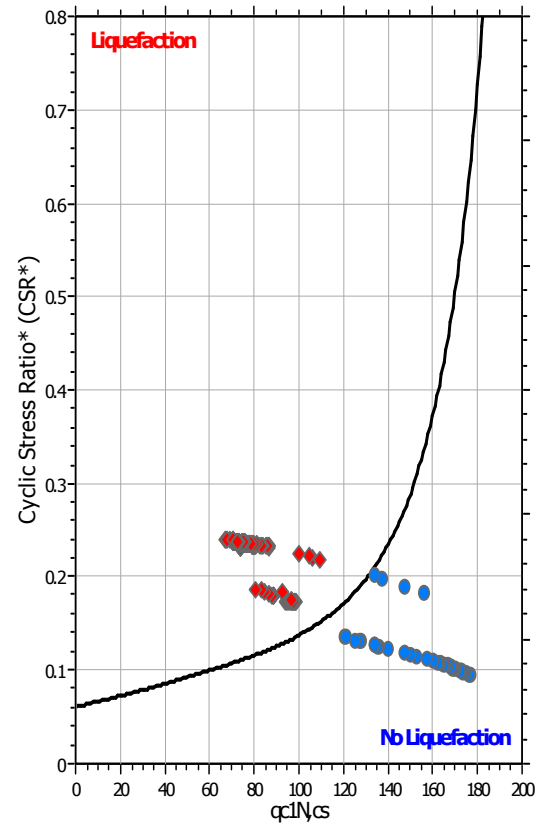
Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K ₀ applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	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

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

LPI color scheme

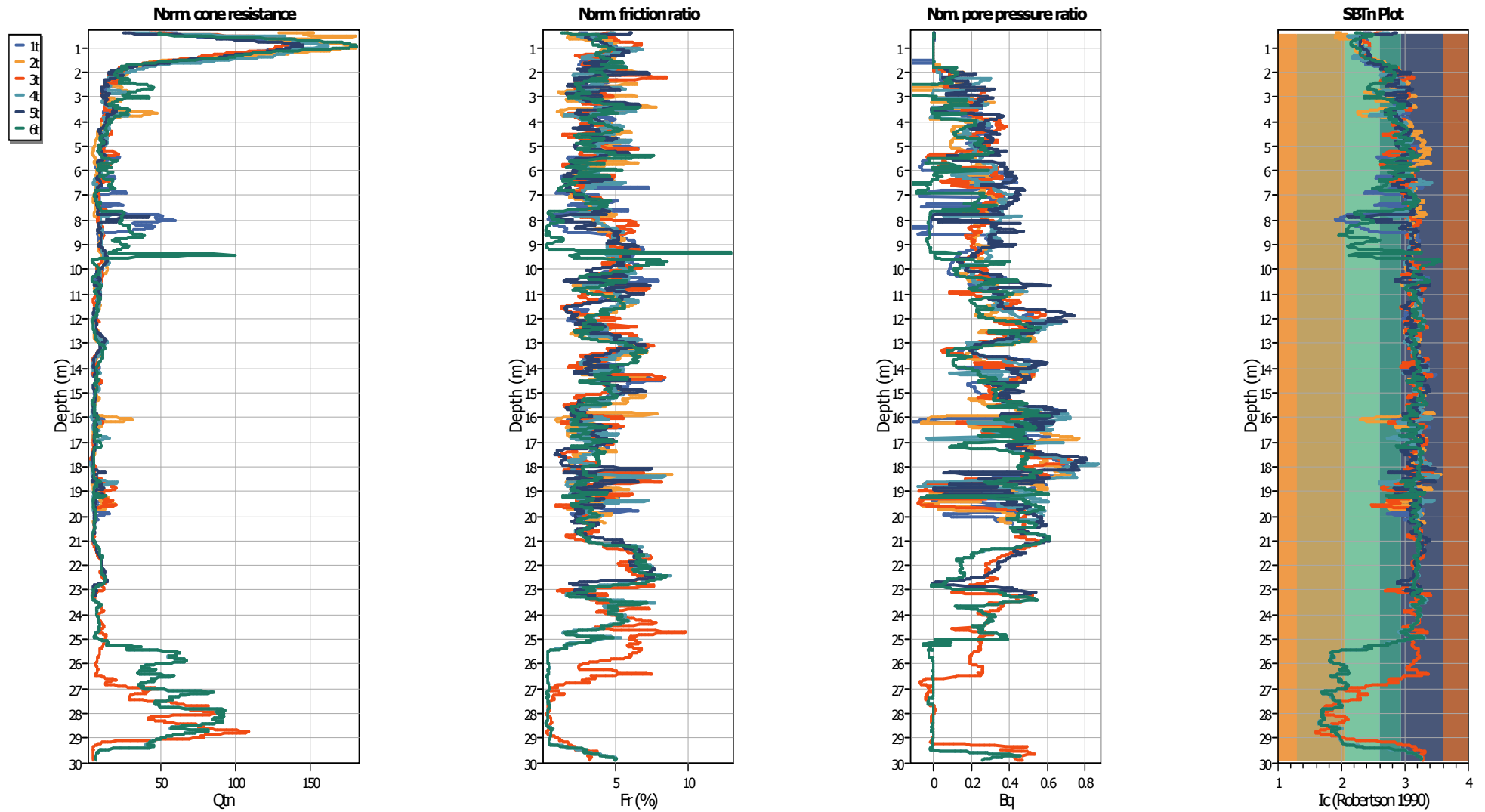
Red	Very high risk
Orange	High risk
Light green	Low risk



Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.25 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _o applied:	Yes
Earthquake magnitude M _w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.25	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	2.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

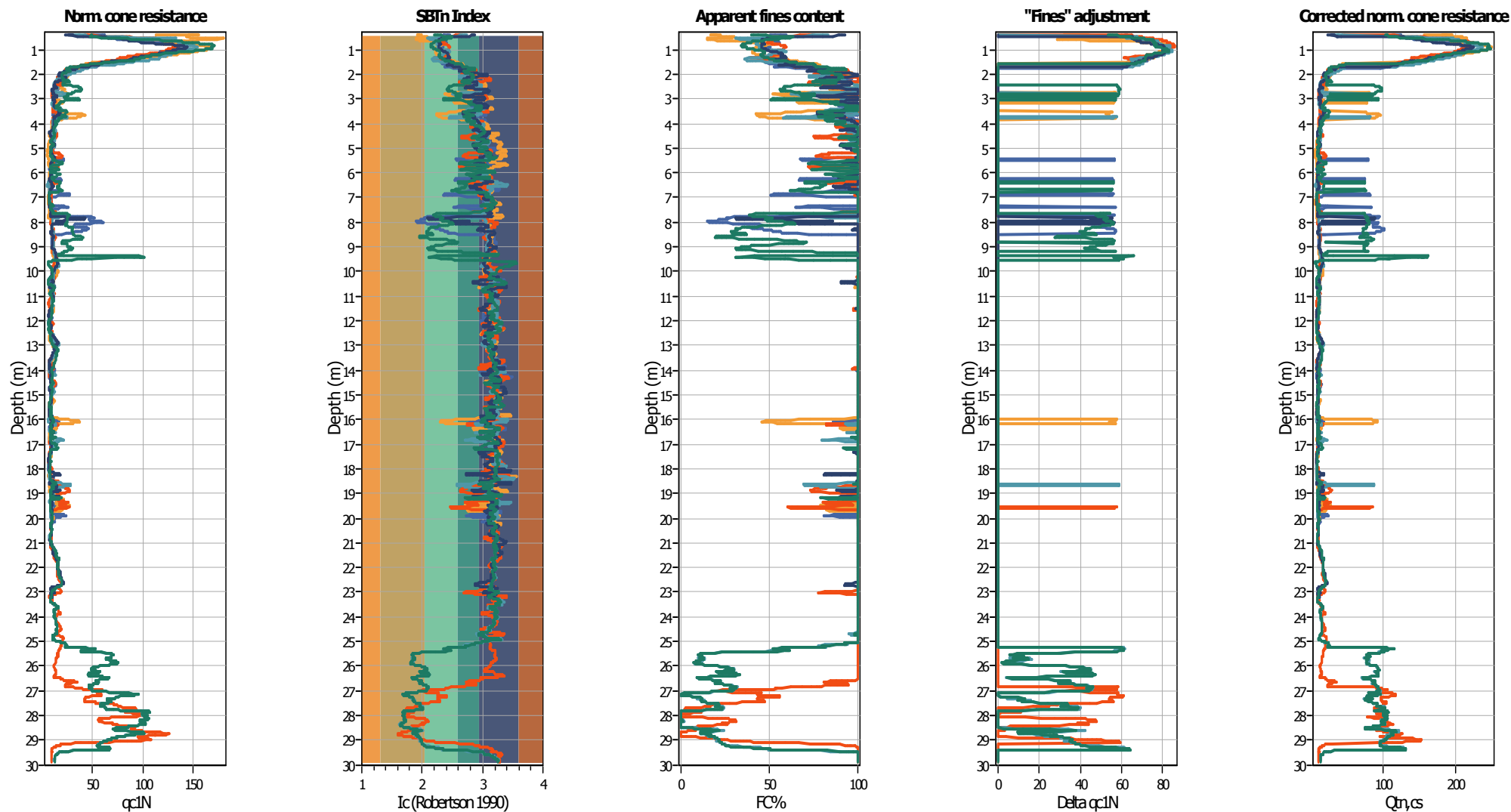
Project: Analisi Liquefazione

Overlay Normalized Plots



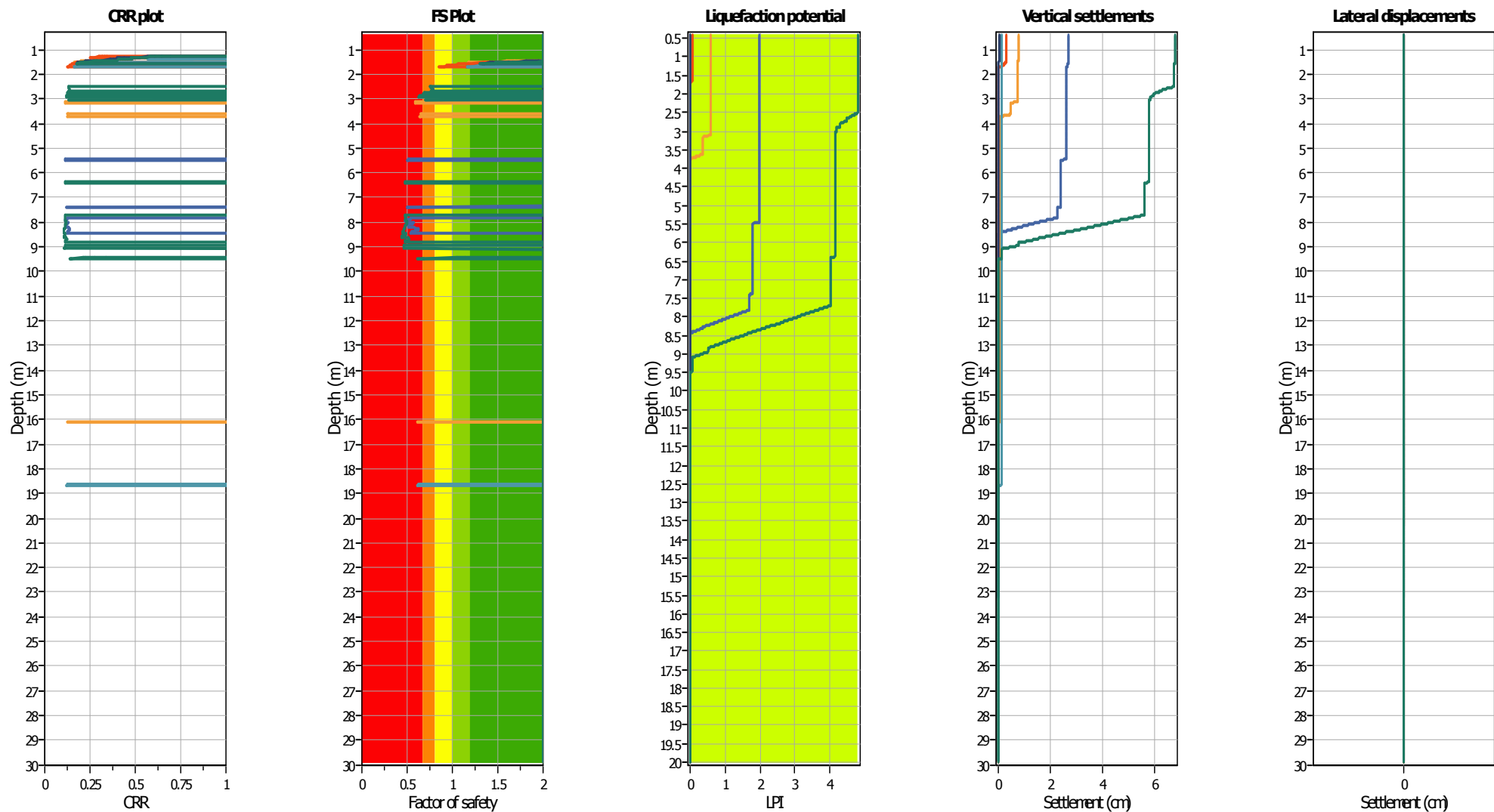
Project: Analisi Liquefazione

Overlay Intermediate Results



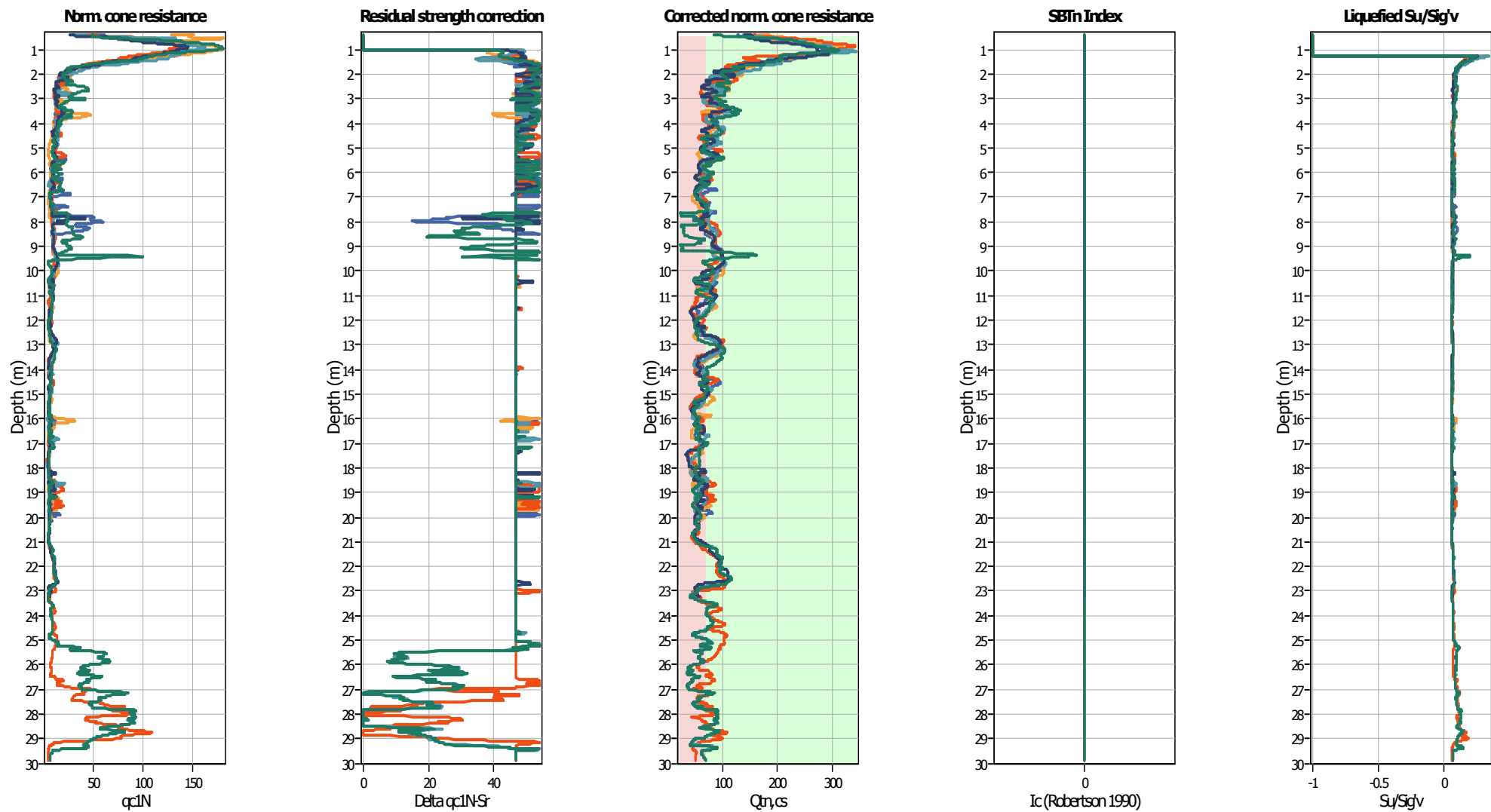
Project: Analisi Liquefazione

Overlay Cyclic Liquefaction Plots



Project: Analisi Liquefazione

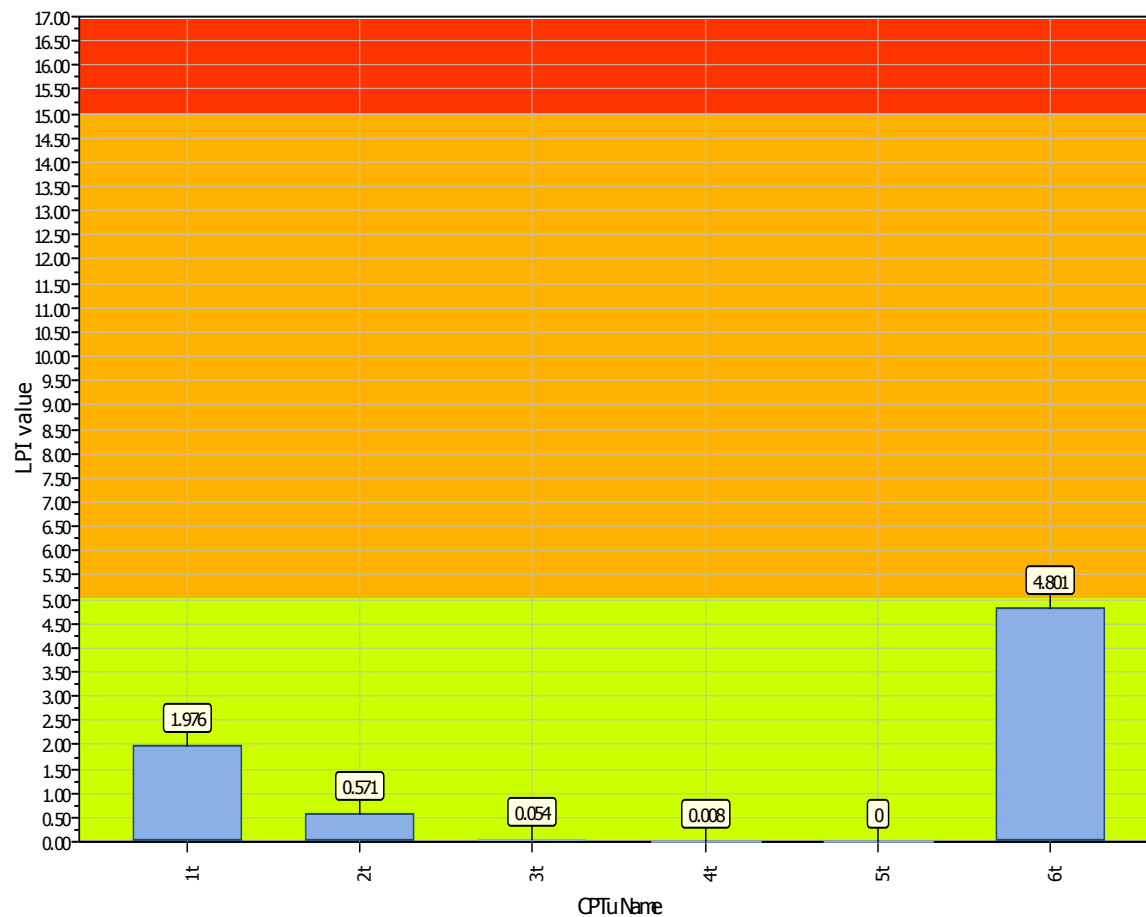
Overlay Strength Loss Plots



Project title : Analisi Liquefazione

Location : Sant'Agata Bolognese - Via Ferruccio Lamborghini

Overall Liquefaction Potential Index report



LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

Basic statistics

Total CPT number: 6
100.00% low risk
0.00% high risk
0.00% very high risk