



INTERVENTI PER IL DRAGAGGIO DI 2,3 M m³ DI SEDIMENTI IN AREA MOLO POLISETTORIALE PER LA REALIZZAZIONE DI UN PRIMO LOTTO DELLA CASSA DI COLMATA FUNZIONALE ALL'AMPLIAMENTO DEL V SPORGENTE DEL PORTO DI TARANTO

Progetto Esecutivo

ELABORATI GENERALI

Relazione geotecnica

SCALA:

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|------------------|-----|----|----|----|----|----|---|-----|-----|
| CODICE PROGETTO | | CODICE ELABORATO | | | | | | | | REV | REP |
| PUG102 | | PE | GET | GE | 00 | 00 | RE | 02 | B | 361 | |

| REVISIONI | REV | DATA | DESCRIZIONE | REDATTO | CONTROLLATO | APPROVATO |
|-----------|-----|--------------|---------------------------------------|-----------|-------------|-----------|
| | B | Maggio 2016 | Nota A.P. Prot. U. 0006807 22/04/2016 | Mandolini | | |
| | A | Gennaio 2016 | Emissione | Mandolini | | |

Progettisti indicati - R.T.P.:

MANDATARIA



MANDANTE

ingLuigiSeverini.studio
Ingegneria Italiana

IL PROGETTISTA



Impresa:



IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA | 1 |
| 2 | INDAGINI ESEGUITE PER IL PROGETTO ESECUTIVO | 2 |
| 3 | RISULTATI DELLE INDAGINI E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA | 9 |
| 3.1 | MARGINAMENTO A MARE..... | 9 |
| 3.1.1 | Stratigrafia..... | 9 |
| 3.1.2 | Risultati delle prove in sito | 10 |
| 3.1.3 | Risultati delle prove in laboratorio..... | 20 |
| 3.1.4 | Modello Geotecnico di Sottosuolo | 37 |
| 3.2 | AREA DI COLMATA | 37 |
| 3.2.1 | Caratterizzazione dei depositi limosi e argillosi (DLA)..... | 38 |
| 3.2.2 | Caratterizzazione dei depositi argillosi (DA) | 43 |
| 3.2.3 | Modello Geotecnico di Sottosuolo per l'area di colmata | 48 |
| 3.3 | MARGINAMENTO A TERRA | 48 |
| 3.4 | AREA DI DRAGAGGIO..... | 55 |
| 4 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE..... | 66 |

APPENDICE: CPTU INTERPRETATION



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

1 PREMESSA

Nella presente relazione, a supporto della progettazione esecutiva degli *Interventi per il dragaggio di 2,3 Mm³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto*, sono presentati i risultati della campagna di indagini eseguita nell'area di intervento nel periodo maggio-settembre 2015, di maggior rilievo ai fini dell'individuazione dei modelli geotecnici di riferimento per il dimensionamento della struttura di confinamento della cassa, per il conferimento dei materiali dragati nella cassa e degli interventi volti ad accelerare il decorso dei cedimenti del materiale di colmata all'interno della stessa.

Per una più agevole consultazione del documento, i risultati delle indagini e la relativa interpretazione in termini di parametri fisici, meccanici ed idraulici dei terreni rinvenuti in sito sono distinti per ambito di intervento: fascia di marginamento a mare della cassa di colmata, area di colmata, fascia di confinamento a terra della cassa di colmata e area di dragaggio.

Per quanto concerne l'inquadramento geografico e geologico dell'area di intervento, si rimanda alla Relazione Geotecnica del Progetto Definitivo a base gara (PUG102PDED008_rev. 0) nella quale gli aspetti salienti riguardanti la geologia, la morfologia e l'idrologia dei luoghi sono ampiamente descritti.

Anche per quanto riguarda gli aspetti prettamente geotecnici, ovviamente, tutto quanto riportato nella Relazione Geotecnica del Progetto Definitivo è stato tenuto in debito conto. Tuttavia, l'analisi critica dei dati ivi riportati, svolta alla luce delle risultanze delle nuove indagini, che si sono concentrate nell'area di stretta pertinenza della vasca di colmata e che perciò si devono ritenere maggiormente significative ai fini della caratterizzazione della l'area stessa, ha condotto all'individuazione di un contesto geotecnico, per alcuni aspetti, sensibilmente diverso e di seguito descritto.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

 Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

2 INDAGINI ESEGUITE PER IL PROGETTO ESECUTIVO

Le indagini propedeutiche alla progettazione esecutiva sono state eseguite per ottenere, con adeguato dettaglio, la caratterizzazione geotecnica, geofisica e geomorfologica del sito interessato dai lavori.

La campagna geognostica è stata condotta in linea con quanto prescritto al Capo 16 - Parte Seconda del CSA del Progetto Definitivo, secondo il programma condiviso con Autorità Portuale e Direzione Lavori (Relazione tecnico-illustrativa delle indagini propedeutiche, Elab. n. PUG102-PE-GET-IG-00-00-IN-01-A), con lo scopo di integrare ed ampliare le precedenti campagne per ottenere una conoscenza dettagliata dei luoghi interessati dall'intervento, per la completa definizione progettuale delle opere nella configurazione offerta in fase di gara.

In ottemperanza alle indicazioni del CSA, il programma delle indagini integrative è stato definito partendo dagli studi già effettuati dall'Ente Appaltante, ma individuando i necessari approfondimenti, anche per le aree già sondate in precedenza, con intensità e profondità in linea con le geometrie delle opere da realizzare e sufficienti alla definizione di tutti i parametri necessari per la redazione del Progetto Esecutivo.

Sono state approfondite le conoscenze sulle caratteristiche geologiche e geotecniche dei terreni interessati dai dragaggi, dalle opere di marginamento a terra ed a mare ed a quelli di fondazione nell'area di colmata, secondo una campagna molto articolata che ha compreso:

- N. 20 perforazioni a carotaggio continuo a mare in area di dragaggio con prelievo di N.7 campioni rimaneggiati per analisi geotecniche;
- N. 22 perforazioni a carotaggio continuo a mare lungo l'asse del marginamento della cassa di colmata con prelievo di N.135 campioni indisturbati e N.15 rimaneggiati per analisi geotecniche;
- N. 16 perforazioni a carotaggio continuo a terra con prelievo di N.38 campioni indisturbati + N.4 rimaneggiati per analisi geotecniche e N.24 rimaneggiati per analisi ambientali;
- N. 15 prove sismiche tipo MASW a terra;
- N. 10 prove sismiche tipo MASW a mare;
- N. 11 prove di permeabilità in foro tipo Lefranc;
- N. 12 prove dilatometriche con dilatometro Marchetti;
- N. 18 CPTU;
- N. 24 prove di dissipazione;
- il rilievo batimetrico tramite ecoscandaglio Multibeam (Mbes) all'interno delle due aree di lavoro "Area di Dragaggio" e "Vasca di Colmata";
- il rilievo del fondale tramite Side Scan Sonar (SSS) della fascia di marginamento della "Vasca di Colmata";
- il rilievo stratigrafico attraverso il Sub Bottom Profiler (SBP) della fascia di marginamento della "Vasca di Colmata" e dell'intera "Area di Dragaggio".



Autorità Portuale di Taranto

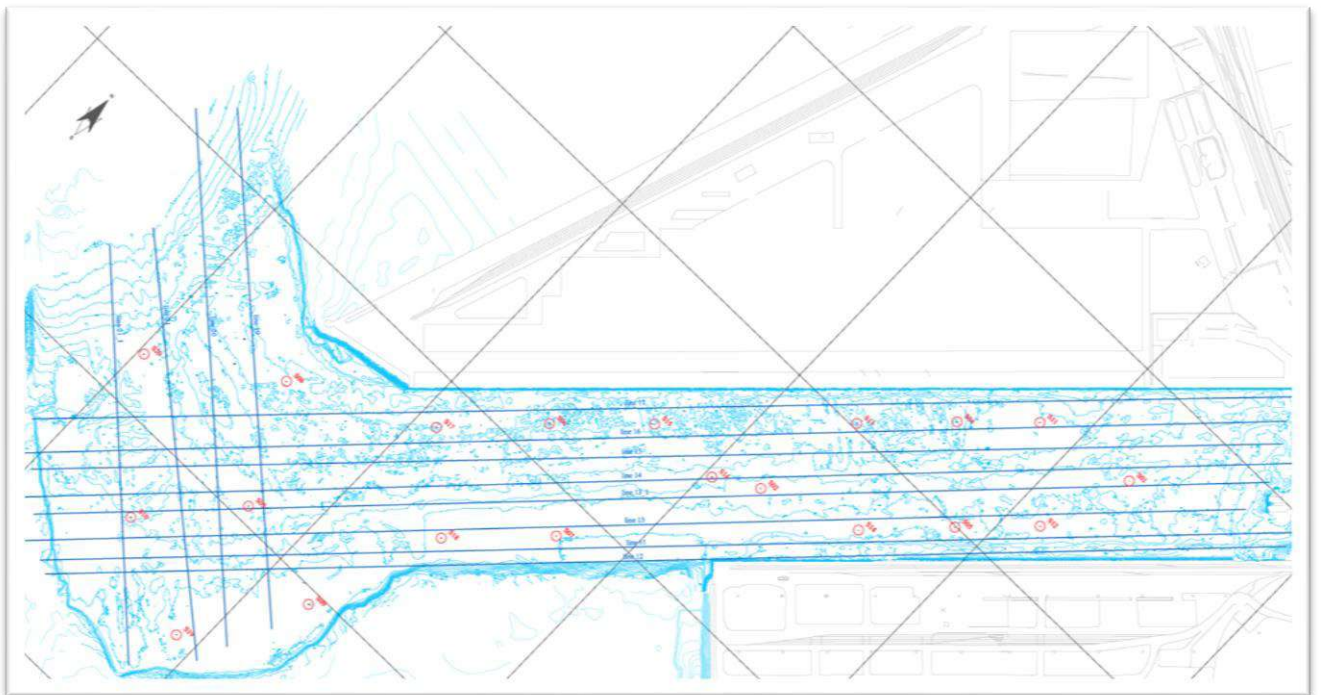
Interventi per il dragaggio di 2,3 M³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

○ Area di dragaggio

In quest'area le indagini svolte hanno avuto lo scopo di individuare le caratteristiche dei sedimenti costituenti il fondale marino che saranno sottoposti alle operazioni di dragaggio, anche per profondità non raggiunte dalle precedenti campagne di caratterizzazione. Per tale motivo sono stati effettuati rilievi geomorfologici e sondaggi a mare con prelievo di campioni rimaneggiati destinati ad una caratterizzazione geotecnica, spinti fino a profondità maggiori rispetto a quelle previste dal dragaggio, rilievi batimetrici e stratigrafici.



Indagini area dragaggio

○ Cassa di colmata - Mare

Le indagini eseguite in area cassa di colmata hanno consentito l'individuazione delle caratteristiche dei materiali presenti sul fondale che saranno interessati dall'opera di marginamento a mare e dalla colmata.

Lungo la fascia che sarà interessata dalla realizzazione del marginamento a mare della cassa di colmata, sono stati eseguiti sondaggi a carotaggio continuo con esecuzione di prove di permeabilità di tipo Lefranc e prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per caratterizzazione geotecnica, prove penetrometriche statiche con

l'utilizzo del piezocono per la misura delle pressioni interstiziali comprese prove di dissipazione, prove dilatometriche, prospezioni geofisiche tipo MASW, nonché i rilievi batimetrici, geomorfologici e stratigrafici.

Quattro sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti all'interno della futura cassa di colmata allo scopo di ottenere dati oltre che stratigrafici anche sulle caratteristiche di permeabilità dei limi tramite l'esecuzione di prove di tipo Lefranc. A queste hanno fatto seguito anche quattro prove penetrometriche statiche e prove di dissipazione con l'uso del piezocono.

○ **V Sporgente – ex Yard Belleli**

Le indagini a terra hanno interessato un'area antropizzata, attualmente e precedentemente adibita ad uso industriale. È stato necessario pertanto anche caratterizzare, da un punto di vista qualitativo e ambientale, i materiali costituenti lo strato di riporto presente a partire dal piano di calpestio.

Sono state eseguiti: sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per analisi di laboratorio geotecnico e contestuale campionamento della matrice di terreno di origine antropica da caratterizzare da un punto di vista ambientale e chimico per l'assegnazione del codice C.E.R., prove penetrometriche statiche di tipo CPTU, a scopo di taratura per quelle condotte a mare, e prospezioni geofisiche di tipo MASW.

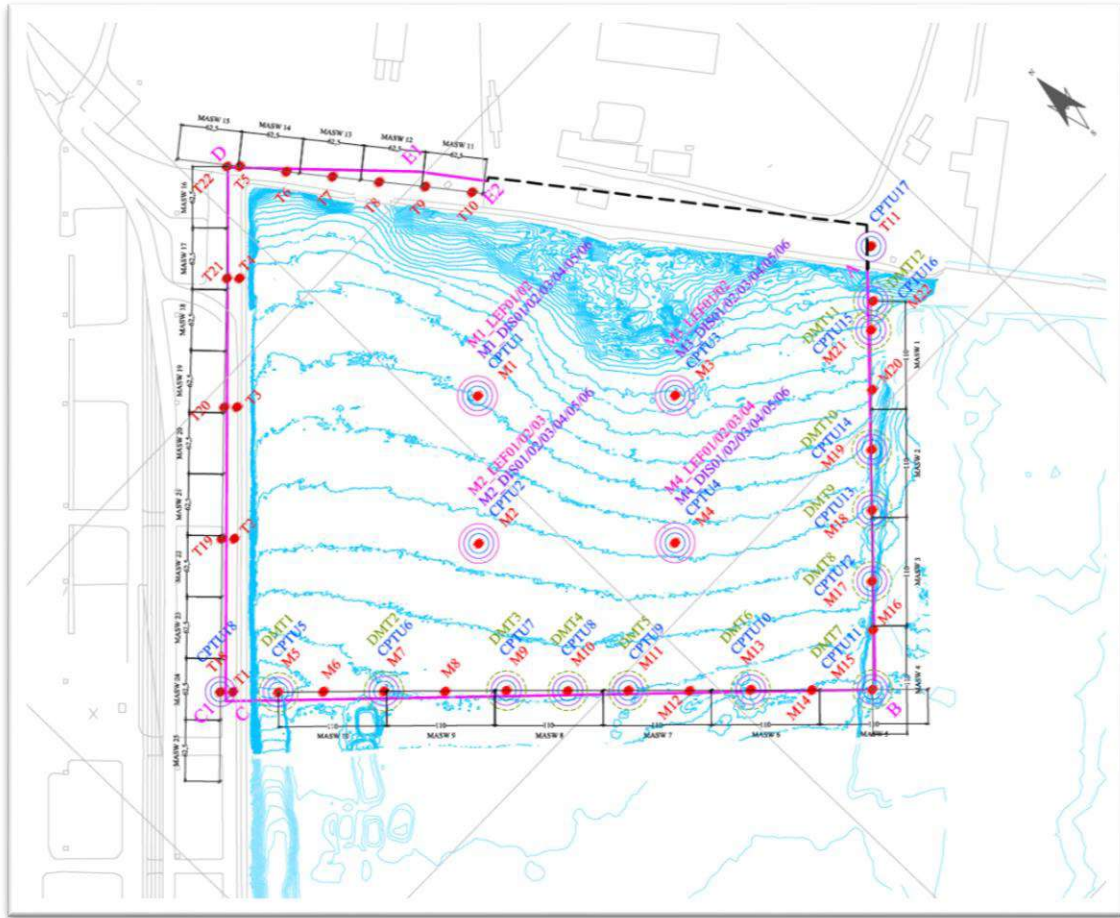


Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx



Indagini a mare ed a terra area cassa di colmata

Gli elaborati relativi ai risultati delle indagini sono stati trasmessi al Direttore dei Lavori ed al RUP in data 15 ottobre 2015 con lettera prot. 79-TA-OUT/9292/A831. Il Direttore dei Lavori ha certificato l'avvenuta esecuzione delle indagini con nota prot. DL/Roma/PUG401 SOL028-2015.docx/ del 18 novembre 2015. Si riporta di seguito l'elenco elaborati relativo alla predetta trasmissione.

ELENCO ELABORATI

| REP N° | FILE | DOCUMENTO / TITOLO | CODICE | | | | | | | | | | REV. | |
|--------|------|--------------------|--------|---|---|-----|----|---|---|----|----|---|------|---|
| 241 | DOC | ELENCO ELABORATI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 8 | C |



Autorità Portuale di Taranto
Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|---|--------|---|---|-----|----|---|---|----|----|---|---|---|
| 172 | DOC | RELAZIONE TECNICA RIASSUNTIVA | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 2 | A |
| 093 | DOC | RELAZIONE DELLE ATTIVITA' SVOLTE IN CANTIERE | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 1 | A |
| 094 | DOC | INDAGINI GEOGNOSTICHE - DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA Fotografie delle attività svolte in cantiere | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 2 | A |
| 095 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 3 | A |
| 096 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 1: Certificati di caratterizzazione ambientale dei terreni | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 4 | A |
| 097 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 2: Certificati sulle caratteristiche fisiche generali | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 5 | A |
| 098 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 3: Certificati sondaggi S e sondaggi M da 1 a 4 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 6 | A |
| 099 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 4: Certificati sondaggi M da 5 a 7 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 7 | A |
| 100 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 5: Certificati sondaggi M da 8 a 10 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 8 | A |
| 101 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 6: Certificati sondaggi M da 11 a 14 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 0 | 9 | A |
| 102 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 7: Certificati sondaggi M da 15 a 18 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 0 | A |
| 103 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITA' DI LABORATORIO – Allegato 8: Certificati sondaggi M da 19 a 22 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 1 | A |
| 192 | DOC | RELAZIONE TECNICA DELLE ATTIVITÀ DI LABORATORIO – Allegato 9: Certificati sondaggi T | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 2 | A |
| 240 | DOC | INDAGINI A MARE PROVE DI LABORATORIO INTEGRATIVE (ILAG) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 4 | 8 | A |
| 173 | DOC | RELAZIONE TECNICA SONDAGGI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 3 | A |
| 174 | DOC | RELAZIONE TECNICA PROVE DI PERMEABILITÀ LEFRANC | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 4 | A |



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|--|--------|---|---|-----|----|---|---|----|----|---|---|---|
| 175 | DOC | RELAZIONE TECNICA C.P.T.U. | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 5 | A |
| 176 | DOC | RELAZIONE TECNICA PROVE DILATOMETRICHE | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 6 | A |
| 177 | DOC | RELAZIONE TECNICA RILIEVI GEOFISICI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 7 | A |
| 197 | DOC | AREA DI DRAGAGGIO – RELAZIONE TECNICA RILIEVI SISMOSTRATIGRAFICI (SPB) INTEGRATIVI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 6 | A |
| 198 | DWG | ELABORATI GENERALI – RILIEVO AREA DI INTERVENTO | PUG102 | P | E | GEN | GE | 0 | 0 | 00 | PL | 0 | 1 | A |
| 179 | DOC | RELAZIONE TECNICA INDAGINI SISMICHE (MASW) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 1 | 9 | A |
| 180 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: RILIEVO BATIMETRICO | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 0 | A |
| 181 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (D.T.M.) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 1 | A |
| 182 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: PROFILI SISMICI INTERPRETATI (SBP) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 2 | A |
| 194 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO – INDAGINE INTEGRATIVA – PROFILI SISMICI INTERPRETATI (SPB) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 3 | A |
| 183 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: PROFILI STRATIGRAFICI TAV. 1 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 3 | A |
| 196 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: PROFILI STRATIGRAFICI TAV. 2 | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 5 | A |
| 195 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO – INDAGINE INTEGRATIVA - PROFILI STRATIGRAFICI (SPB) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 4 | A |
| 184 | DWG | VASCA DI COLMATA: RILIEVO BATIMETRICO | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 4 | A |
| 185 | DWG | VASCA DI COLMATA: MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (D.T.M.) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 5 | A |
| 186 | DWG | VASCA DI COLMATA: MOSAICO DEI SONOGRAMMI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 6 | A |
| 187 | DWG | VASCA DI COLMATA: PROFILI SISMICI INTERPRETATI (SBP) | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 7 | A |
| 188 | DWG | VASCA DI COLMATA: PROFILI STRATIGRAFICI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 8 | A |
| 189 | DWG | AREA DI DRAGAGGIO: PLANIMETRIA GENERALE DI INQUADRAMENTO DELLE INDAGINI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 2 | 9 | A |



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|--|--------|---|---|-----|----|---|---|----|----|---|---|---|
| 190 | DWG | VASCA DI COLMATA: PLANIMETRIA GENERALE DI INQUADRAMENTO DELLE INDAGINI | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 0 | A |
| 191 | DWG | VASCA DI COLMATA: PROFILI GEOLOGICI DEL MARGINAMENTO A MARE E DEL MARGINAMENTO A TERRA | PUG102 | P | E | GEN | IG | 0 | 0 | 00 | IN | 3 | 1 | A |

L'esecuzione delle indagini in sito è stata affidata alla ISOGEA s.r.l.; per le prove di laboratorio sui campioni di terreno indisturbati prelevati nel corso dei numerosi sondaggi ci si è avvalsi della GEOCONSULT s.r.l. (N. 103 campioni) e ILAG s.r.l. (N. 35 campioni). Inoltre, su incarico della Direzione Lavori, sono state eseguite altre prove di laboratorio su ulteriori N. 6 campioni presso il laboratorio GEOSTUDI s.r.l..

Nel seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti finalizzata alla caratterizzazione geotecnica dei terreni rinvenuti nelle diverse aree di intervento.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

3 RISULTATI DELLE INDAGINI E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Come anticipato in premessa, i risultati delle indagini e la relativa interpretazione ai fini della caratterizzazione geotecnica dei terreni rinvenuti in sito sono di seguito riportati distinguendo i diversi ambiti di intervento: la fascia di marginamento a mare (paragrafo 3.1), l'area di colmata (paragrafo 3.2), la fascia di confinamento a terra (paragrafo 3.3) e l'area di dragaggio (paragrafo 3.4).

3.1 MARGINAMENTO A MARE

3.1.1 Stratigrafia

L'insieme dei rilievi e delle perforazioni di sondaggio eseguiti, unitamente alle prove geotecniche in sito, hanno consentito di ricostruire la sequenza e la geometria dei depositi presenti al di sotto del fondale marino (Figura 1), la cui quota di rinvenimento si approfondisce di circa 4 m spostandosi da terra (ex Yard Belleli) verso mare (lato BC della cassa di colmata).

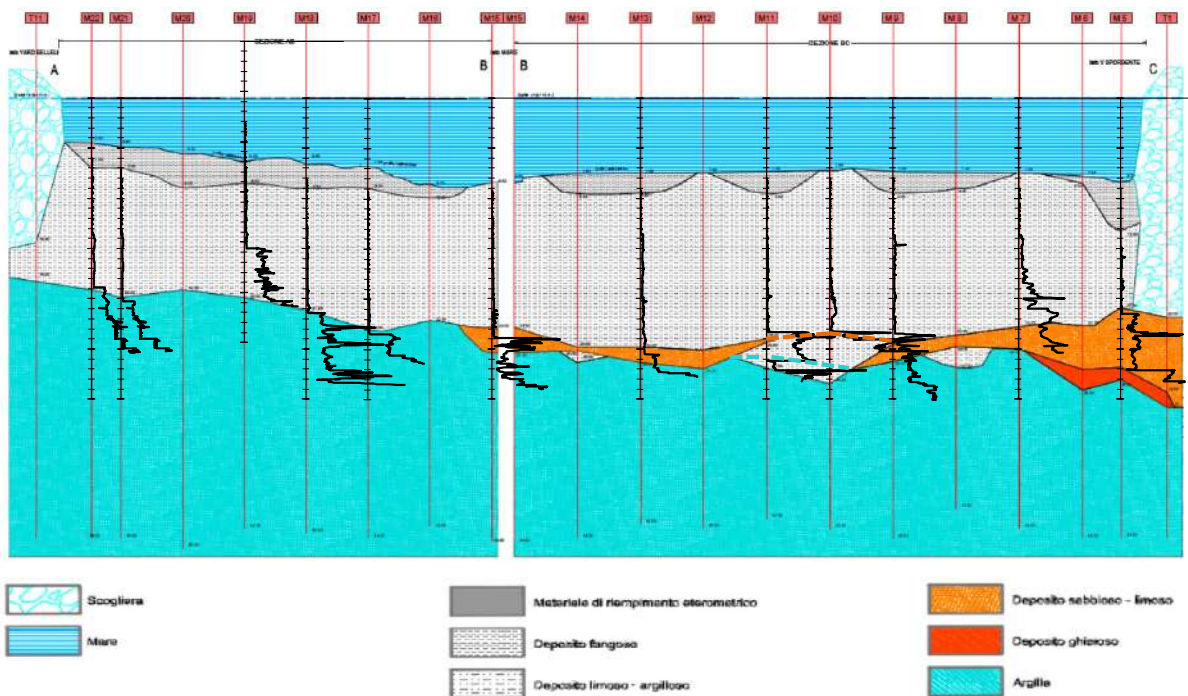


Figura 1 – Profili stratigrafici lungo i lati AB e BC desunti dalla campagna di indagini del progetto esecutivo (ISOGEA s.r.l.)

In particolare, sono state rinvenute le seguenti formazioni:

- **Terreni di riporto (R):** composti da ciottoli e blocchi sub-angolari di natura calcarea e scorie di loppa in matrice sabbioso-ghiaiosa; sono presenti solo in corrispondenza dell'area denominata Ex Yard Belleli e del V Sporgente.
- **Depositi fangosi (F):** ricchi di sostanze organiche, di caratteristiche meccaniche estremamente scadenti come testimoniato dalla circostanza che le attrezzature utilizzate per l'esecuzione delle prove CPTU avanzavano per il solo peso proprio senza necessità di spinta. Essi sono stati rinvenuti con continuità lungo il lato AB della cassa di colmata (con spessori variabili tra 1,3 m e 3,3 m circa), in maniera discontinua ancorchè diffusa lungo il lato BC della vasca (con spessori variabili tra 0,85 m e 5,3 m) e all'interno della vasca (verticali di sondaggio M1-M4, con spessori variabili tra 3,0 m e 5,0 m circa).
- **Depositi limosi e argillosi (DLA):** caratterizzati da ridotti valori della permeabilità e da modeste proprietà meccaniche; le analisi granulometriche eseguite sui corrispondenti campioni hanno rilevato che si tratta di limo e argilla con percentuali di sabbia trascurabili; hanno spessore variabile, compreso tra 10,0 m e 15,0 m circa lungo il lato AB, tra 8,0 m e 18,0 m circa lungo il lato BC e tra 6,0 m e 12,0 m circa all'interno della vasca.
- **Depositi limosi e sabbiosi (DLS):** costituiti prevalentemente da sabbie e solo in corrispondenza del V Sporgente da un piccolo livello di ghiaie; sono presenti lungo tutto il lato BC della vasca, con uno spessore fortemente variabile che in media è dell'ordine dei 2-3 metri (il massimo, di circa 7 m, è stato rinvenuto in corrispondenza del vertice C); sul lato AB, sono presenti solo in corrispondenza del vertice B.
- **Depositi argillosi (DA):** costituiti da argille e limi, caratterizzati da ridotti valori di permeabilità e buone caratteristiche meccaniche; sono stati rinvenuti fino alle massime profondità indagate a partire da quote variabili tra - 19 m s.l.m. e - 26 m s.l.m. lungo il lato AB, tra - 25 m s.l.m. e - 29 m s.l.m. lungo il lato BC e tra - 15,0 m s.l.m. e -22,5 m s.l.m. all'interno della vasca.

3.1.2 Risultati delle prove in sito

Nel seguito si riportano i risultati e le conseguenti interpretazioni delle prove in sito (dilatometriche, DMT; penetrometriche, CPTU; sismiche, MASW), la cui ubicazione è riportata in Figura 2.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

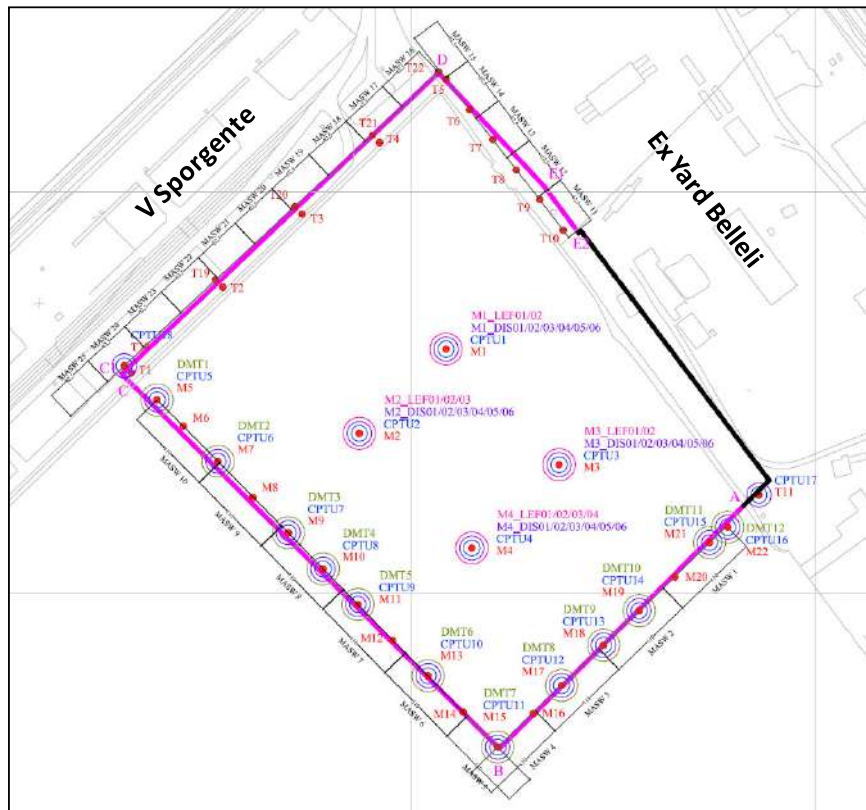


Figura 2 –Ubicazione in pianta delle indagini della campagna 2015 (ISOGEA s.r.l.)

Con riferimento alle **prove DMT**, che hanno interessato i terreni fino a una quota di circa -25 m s.l.m., l’elaborazione delle misure è stata eseguita mediante le relazioni riportate nella Tabella 1 tratta dal documento ufficiale “*The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*” predisposto nel 2001 dal Technical Committee 16 (Ground property characterisation from in-situ testing) dell’Associazione Geotecnica Internazionale (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE).



Autorità Portuale di Taranto
Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all’ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

| SYMBOL | DESCRIPTION | BASIC DMT REDUCTION FORMULAE | |
|----------|--------------------------------------|--|--|
| p_0 | Corrected First Reading | $p_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M - \Delta B)$ | |
| p_1 | Corrected Second Reading | $p_1 = B - Z_M - \Delta B$ | |
| I_D | Material Index | $I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$ | Z_M = Gage reading when vented to atm. If ΔA & ΔB are measured with the same gage used for current readings A & B, set $Z_M = 0$ (Z_M is compensated) |
| K_D | Horizontal Stress Index | $K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$ | σ'_{v0} = pre-insertion overburden stress |
| E_D | Dilatometer Modulus | $E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$ | E_D is NOT a Young's modulus E. E_D should be used only AFTER combining it with K_D (Stress History). First obtain $M_{DMT} = R_M E_D$, then e.g. $E \approx 0.8 M_{DMT}$ |
| K_0 | Coeff. Earth Pressure in Situ | $K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$ | for $I_D < 1.2$ |
| OCR | Overconsolidation Ratio | $OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$ | for $I_D < 1.2$ |
| c_u | Undrained Shear Strength | $c_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$ | for $I_D < 1.2$ |
| Φ | Friction Angle | $\Phi_{safe,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D$ | for $I_D > 1.8$ |
| c_h | Coefficient of Consolidation | $c_{h,DMTA} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{nex}$ | t_{nex} from A-log t DMT-A decay curve |
| k_h | Coefficient of Permeability | $k_h = c_h \gamma_w / M_h$ ($M_h \approx K_D M_{DMT}$) | |
| γ | Unit Weight and Description | (see chart in Fig. 16) | |
| M | Vertical Drained Constrained Modulus | $M_{DMT} = R_M E_D$ if $I_D \leq 0.6$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$ if $I_D \geq 3$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_D$ if $0.6 < I_D < 3$ $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ with $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$ if $K_D > 10$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$ if $R_M < 0.85$ set $R_M = 0.85$ | |
| u_0 | Equilibrium Pore Pressure | $u_0 = p_2 - C - Z_M + \Delta A$ | In free-draining soils |

Tabella 1. Relazioni utilizzate per l'elaborazione delle misure eseguite nel corso delle prove DMT.

Tutte le prove hanno consentito di classificare i terreni come limo- argillosi (indice di materiale $I_d < 1$) normalmente consolidati ($OCR \sim 1$). In quanto materiali di ridotta permeabilità, essi hanno esibito una risposta non drenata caratterizzabile, in termini di resistenza al taglio, attraverso la coesione non drenata c_u e, in termini di rigidità, attraverso il modulo edometrico E_{ed} .

La Figura 3 sintetizza tutti i risultati ottenuti, individuando la fascia dei valori minimi e massimi di c_u e E_{ed} ricavati. Si osserva una variazione essenzialmente lineare con la profondità, tipica di depositi di terreni a grana fina normalmente consolidati; con riferimento ai valori medi desunti da tutte le prove, a partire da - 10 m s.l.m. sono state individuate le seguenti leggi di variazione:

$$c_u [\text{kPa}] = 5 + 1,5 \cdot z [\text{m}]$$

$$E_{ed} [\text{MPa}] = 0,6 + 0,06 \cdot z [\text{m}]$$



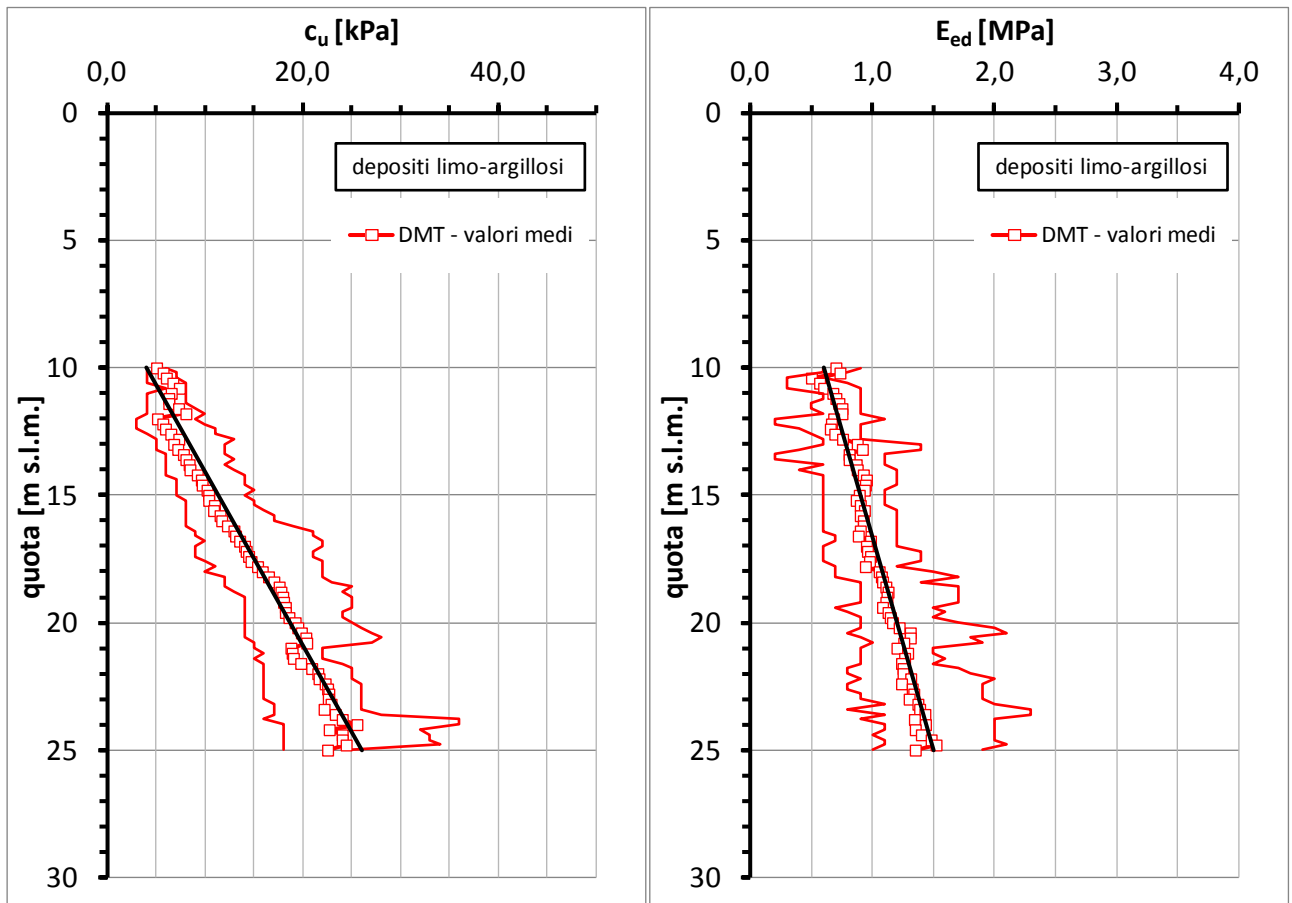


Figura 3 - Profili di variazione di c_u e E_{ed} con la profondità desunti dalle prove DMT.

Con riferimento alle **prove CPTU**, sono state prese in considerazione le prove allineate lungo l'asse del marginamento a mare:

- Lato AB – M22, M21, M19, M18, M17, M15
- Lato BC – M05, M07, M09, M10, M11, M13, M15

Per l'elaborazione dei risultati, ci si è avvalsi del software CPeT-IT versione 1.6 sviluppato dalla Gregg Drilling Inc. in collaborazione con il Prof. Emerito Peter Robertson della British Columbia University. Tutte le elaborazioni svolte per le singole verticali sono riportate nel documento "CPTU interpretation" in appendice. Per comodità, nel seguito verranno commentati i risultati suddividendoli secondo i lati AB e BC.

Primo passo per l'interpretazione delle misure è quello di classificare i terreni attraverso l'indice di classificazione del Soil Behaviour Type I_c (SBT) definito come:

$$I_c(SBT) = [(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5}$$

in cui Q_t = resistenza totale alla punta normalizzata = $(q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$; F_r = rapporto di attrito normalizzato espresso in % = $100 \cdot [f_s/(q_t - \sigma_{vo})]$.

I risultati ottenuti in termini di I_c sono stati confrontati con i valori riportati in Tabella 2 (Robertson, 2009 e Robertson et al, 2012) e hanno consentito la ricostruzione del profilo stratigrafico riportato nelle Figure 4 (lato AB) e 5 (lato BC).

| Zone | Soil Behavior Type | I_c |
|------|---|-------------|
| 1 | Sensitive, fine grained | N/A |
| 2 | Organic soils – clay | > 3.6 |
| 3 | Clays – silty clay to clay | 2.95 – 3.6 |
| 4 | Silt mixtures – clayey silt to silty clay | 2.60 – 2.95 |
| 5 | Sand mixtures – silty sand to sandy silt | 2.05 – 2.6 |
| 6 | Sands – clean sand to silty sand | 1.31 – 2.05 |
| 7 | Gravelly sand to dense sand | < 1.31 |
| 8 | Very stiff sand to clayey sand* | N/A |
| 9 | Very stiff, fine grained* | N/A |

* Heavily overconsolidated or cemented

Tabella 2. Valori dell'indice di classificazione dei terreni.

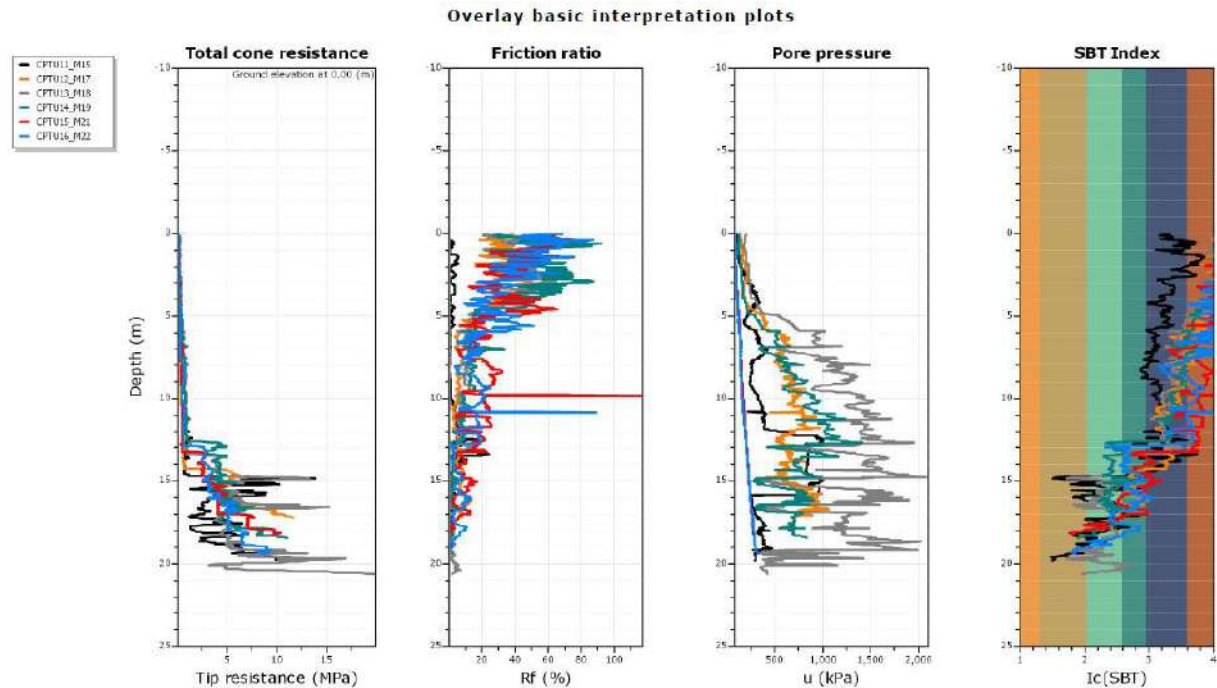


Figura 4 – Dati misurati lungo il lato AB e classificazione dei terreni secondo l'indice di classificazione $I_c(SBT)$.

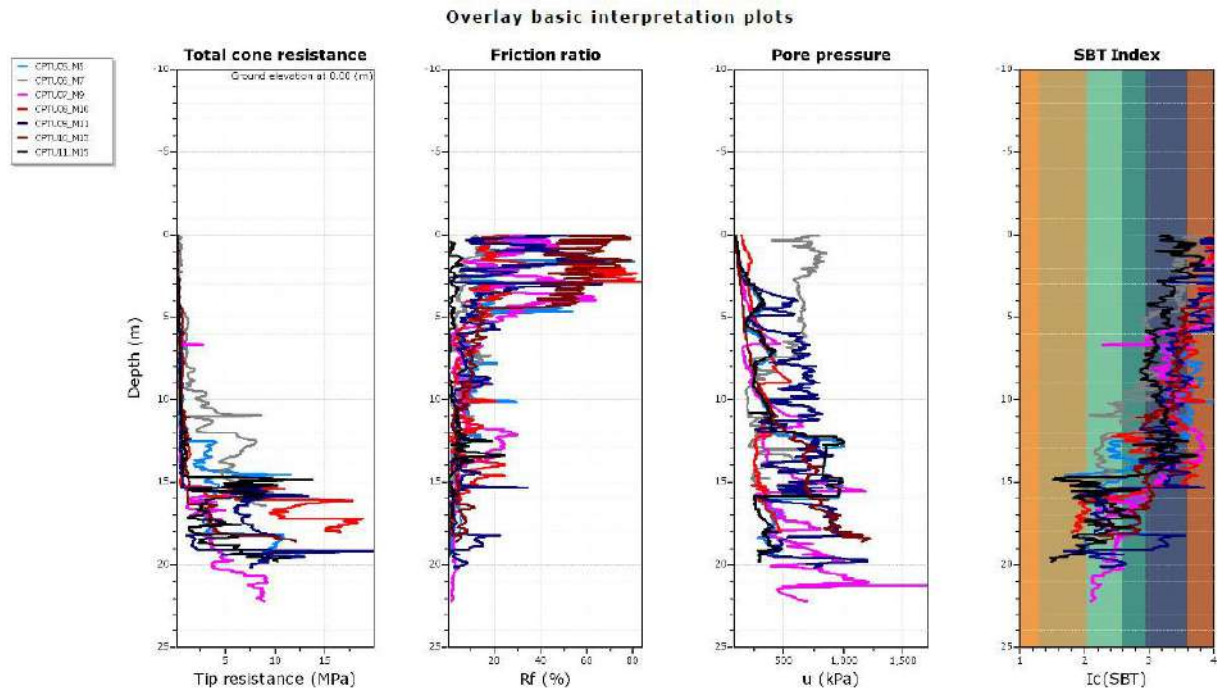


Figura 5 – Dati misurati lungo il lato BC e classificazione dei terreni secondo l'indice di classificazione I_c (SBT).

Al di là della ovvia dispersione dei dati derivante dall'interpretazione lungo la singola verticale indagata, appare evidente che:

- per profondità variabili tra 13 e 18-19 m circa dal fondale marino, I_c (SBT) > 2.60, ad indicare l'esistenza di terreni a grana fina di ridotta permeabilità;
- per profondità superiori e fino alle massime esplorate, i valori di I_c (SBT) > 2.05, tipici di materiali a granulometria mista (sabbie limose, limi sabbiosi, limi argillosi, argille limose).

Tale circostanza è confermata anche dai valori di permeabilità (Figura 6), a sostanziale conferma della ricostruzione stratigrafica riportata nel paragrafo 3.1.1.

Attesa la natura dei terreni, le successive elaborazioni sono state finalizzate all'individuazione di parametri non drenati per i terreni di ridotta permeabilità (coesione non drenata, c_u ; modulo di compressione edometrica, M o E_{ed} ; grado di sovraconsolidazione, OCR) e parametri drenati per i terreni di più elevata permeabilità (angolo di attrito, φ ; densità relativa, D_R ; modulo di rigidezza, E_s). In tutti i casi, invece, è stato possibile eseguire una stima della velocità delle onde di taglio V_s e, quindi, della rigidezza a taglio a bassi livelli di deformazione $G_0 = (\gamma/g) \cdot V_s^2$, con γ = peso dell'unità di volume del terreno, g = accelerazione di gravità.

I valori dei diversi parametri sopra elencati sono riportati nelle Figure 7 e 8 (con riferimento al lato AB) e nelle Figure 9 e 10 (con riferimento al lato BC).

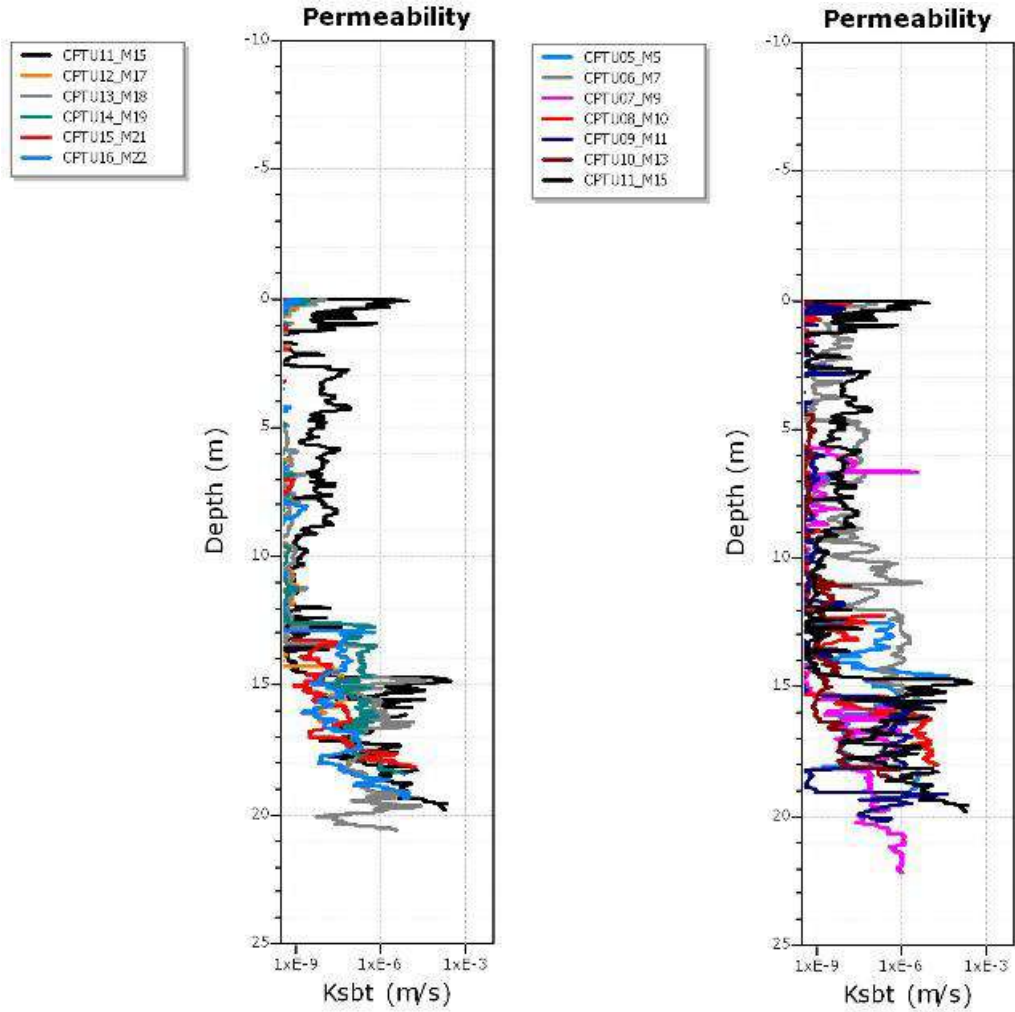


Figura 6 – Valori di permeabilità desunti dalle prove CPTU lungo i lati AB e BC.

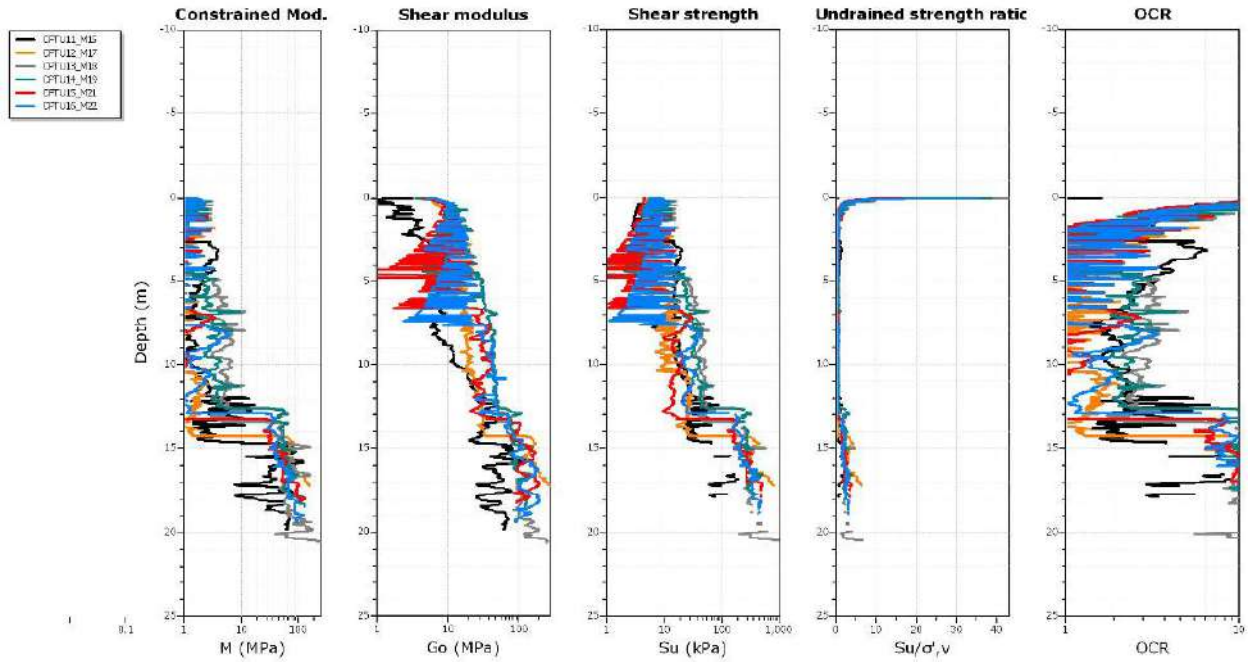


Figura 7 – Stima dei parametri per terreni prevalentemente a grana fina lungo il lato AB.

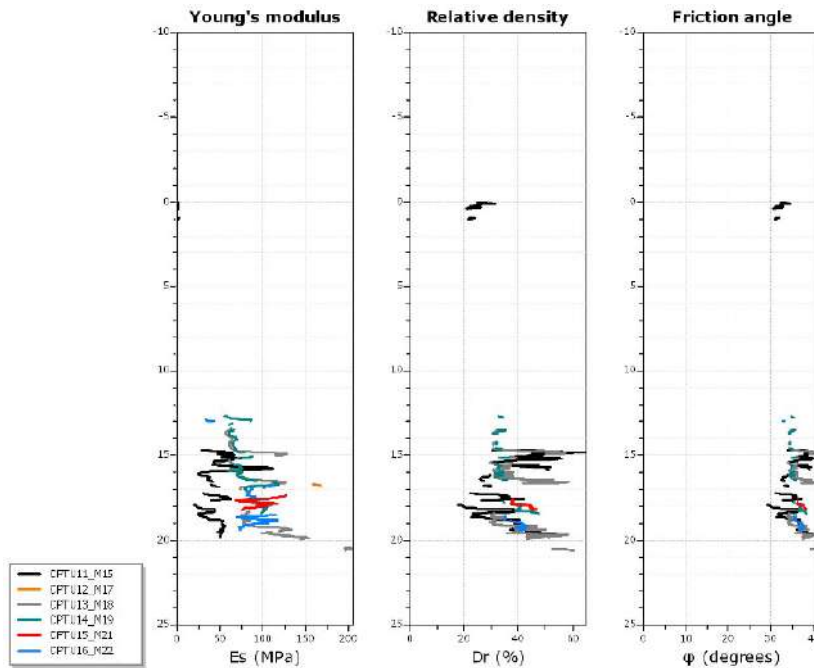


Figura 8 – Stima dei parametri per terreni prevalentemente a grana grossa lungo il lato AB.

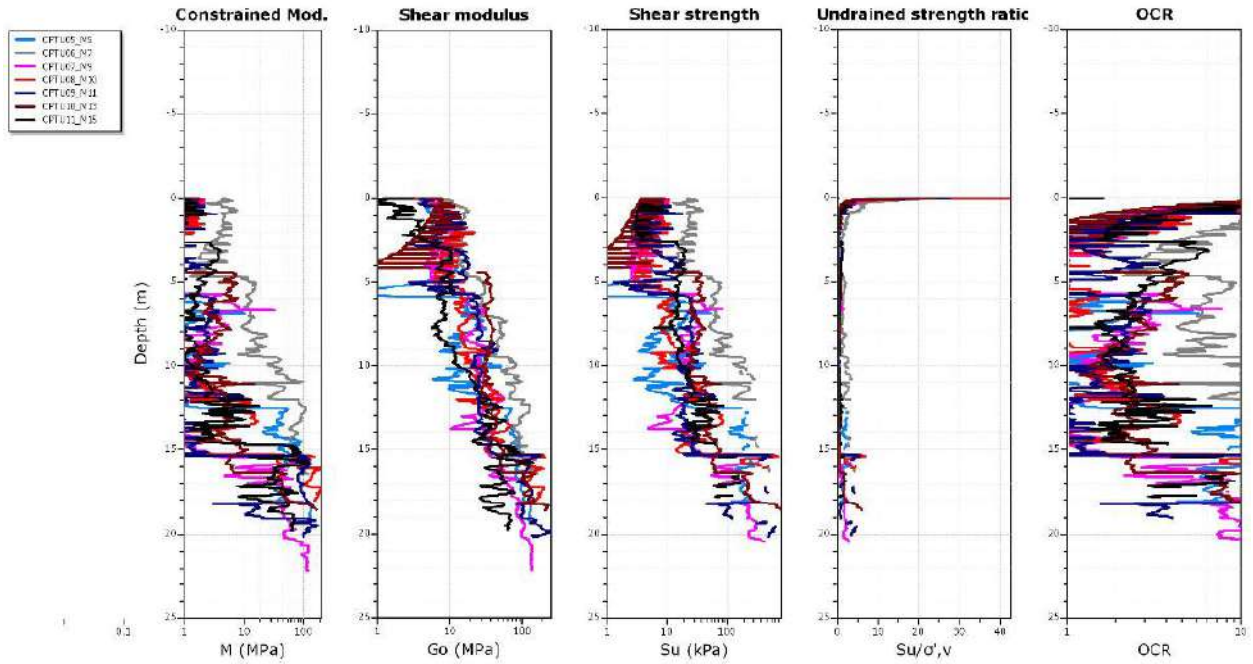


Figura 9 – Stima dei parametri per terreni prevalentemente a grana fina lungo il lato BC.

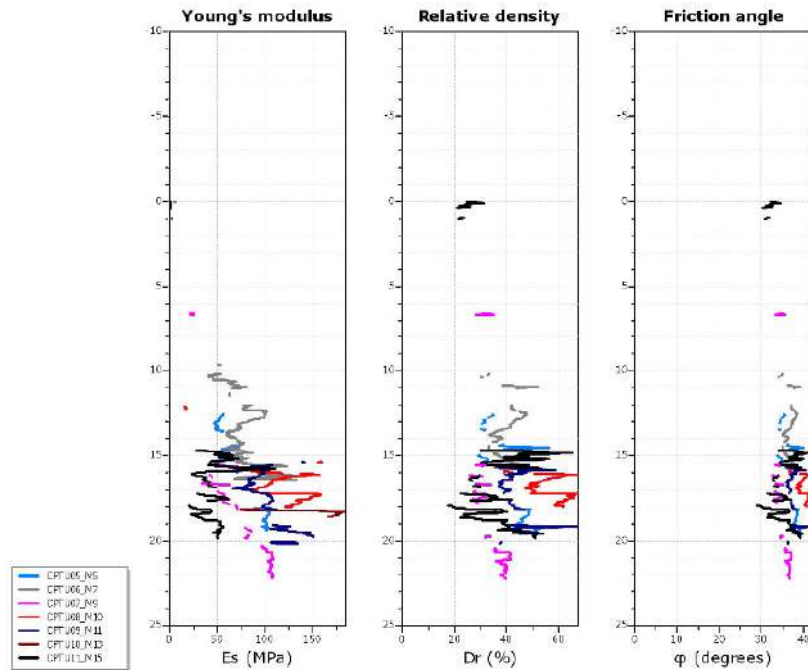


Figura 10 – Stima dei parametri per terreni prevalentemente a grana grossa lungo il lato BC.

Occorre precisare sin da ora che i dati relativi ai primi metri a partire dal fondale sono di scarso significato in quanto i valori in termini di resistenza alla punta q_c sono stati sempre inferiori al limite strumentale (100 kPa) il che ha determinato la registrazione di valori praticamente costanti con la profondità e pari proprio a 100 kPa. Di conseguenza, essi conducono a valori del tutto inattendibili circa i parametri geotecnici derivati attraverso le varie correlazioni utilizzate (si guardi, ad esempio, all'andamento totalmente irregolare della coesione non drenata c_u , cui poi corrispondono valori del grado di sovraconsolidazione OCR e del rapporto di resistenza non drenata c_u/σ'_{vo} alle stesse profondità totalmente privi di significato).

Tanto premesso, si sono desunte leggi di variazione di c_u e E_{ed} del tutto analoghe a quelle già ottenute mediante l'interpretazione delle prove DMT.

Per i terreni di più elevata permeabilità, le prove hanno restituito gradi di addensamento bassi (densità relativa D_R mediamente pari al 40%), valori dell'angolo d'attrito ϕ' sistematicamente superiori a 30° con valore medio rappresentativo di circa 35° , valori medi del modulo di rigidezza E_s quasi sempre contenuti nell'intervallo 50-100 MPa.

In Figura 11 è riportato un confronto tra i valori del modulo di rigidezza iniziale G_0 stimati a partire dalla velocità delle onde di taglio V_s misurate nel corso delle prove MASW (sovrapponendo i sismostrati individuati dalle prove sismiche alla stratigrafia descritta al paragrafo 3.1.1) e quelli stimati in funzione a partire dalle prove CPTU (andamento minimo, medio e massimo tra quelli riportati nelle precedenti Figure 7 e 9).

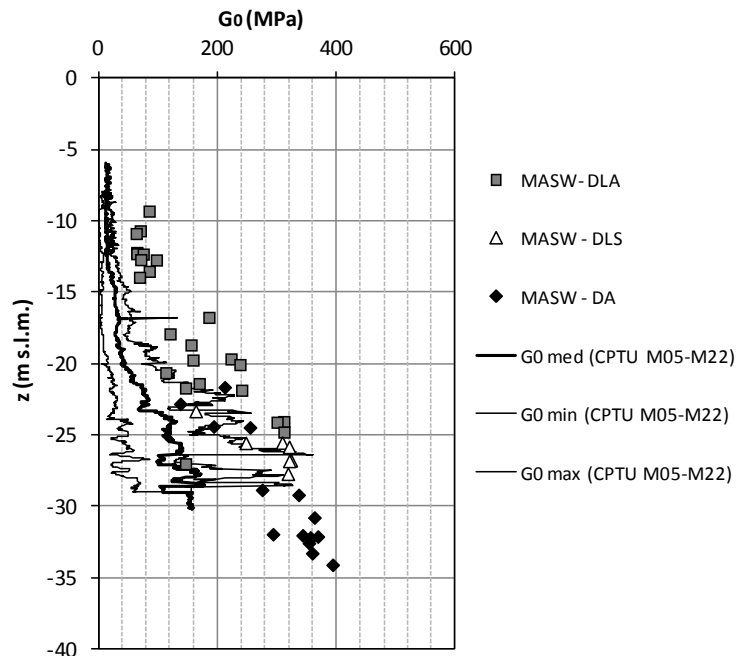


Figura 11 – Confronto tra i valori del modulo di rigidezza al taglio iniziale desumibile dalle prove MASW e CPTU.

Come si osserva, nell'ambito delle profondità dove si ha sovrapposizione di dati (essenzialmente per i terreni DLA e DLS) i valori di G_0 (MASW) risultano simili ai valori massimi ottenuti con le prove CPTU.

3.1.3 Risultati delle prove in laboratorio

Sui campioni prelevati nel corso delle perforazioni di sondaggio, quasi esclusivamente appartenenti ai depositi DLA e DA, sono state seguite le classiche prove per la determinazione delle **caratteristiche fisiche generali** (granulometria, limiti di Atterberg, pesi dell'unità di volume, contenuto d'acqua naturale, indice dei vuoti iniziale). I risultati ottenuti sono sintetizzati nelle Figure da 12 a 15.

Le Figure 12 e 13 riportano i fusi granulometrici individuati rispettivamente per i depositi DLA e DA: si osserva chiaramente che la componente granulometrica principale è costituita dalla parte fina (limo e argilla) con percentuali che solo occasionalmente sono inferiori al 70% circa nei DLA, quindi rendendoli in tal senso poco distinguibili dai terreni DA.

In termini di natura mineralogica (Figura 14), i terreni DLA sono caratterizzati da valori dell'indice di plasticità I_p raramente superiori al 30%, con valori spesso inferiori al 20%. Lo stesso dato nei terreni DA appare più disperso ma mediamente più elevato; anche in questo caso, però, raramente si eccede $I_p = 30\%$. In definitiva, quindi, **sia i terreni DLA sia i terreni DA sono classificabili come terreni dotati di bassa plasticità.**

Incrociando tale informazione con quella derivante dal contenuto naturale d'acqua (w) riportato in Figura 15, si perviene a valori dell'indice di consistenza I_c dispersi attorno ad un valore 0 per i terreni DLA, attorno ad un valore 1 per i terreni DA. Da questo si può quindi concludere che ci si trova in presenza di **terreni DLA a consistenza da fluida a fluido-plastica** e **terreni DA a consistenza da plastica a plastico-solida**, il che si riflette chiaramente anche sui pesi dell'unità di volume (γ) e sull'indice dei pori (e), rispettivamente più bassi e più alti per i terreni DLA rispetto ai terreni DA.

Per la valutazione della **resistenza al taglio**, in condizioni drenate e non drenate, o meglio in termini di parametri efficaci (coesione c' e angolo d'attrito φ') e totali (coesione non drenata c_u), i campioni prelevati sono stati sottoposti: a prove triassiali di tipo CIU (consolidate non drenate) e di tipo UU (non consolidate e non drenate); a prove di taglio diretto.

I valori di c' , φ' e c_u ottenuti sono diagrammati, con riferimento ai depositi DLA in Figura 16 e con riferimento ai depositi DA in Figura 17, in funzione della profondità di prelievo dei campioni esaminati.

Per completezza di informazioni, nei grafici sono riportati anche i dati relativi a prove eseguite nell'ambito di campagne di indagini precedenti, sempre però nell'ambito ristretto dell'area destinata alla costruzione della cassa di colmata (campagne a supporto del Progetto Definitivo a Base di Gara, PDBG).

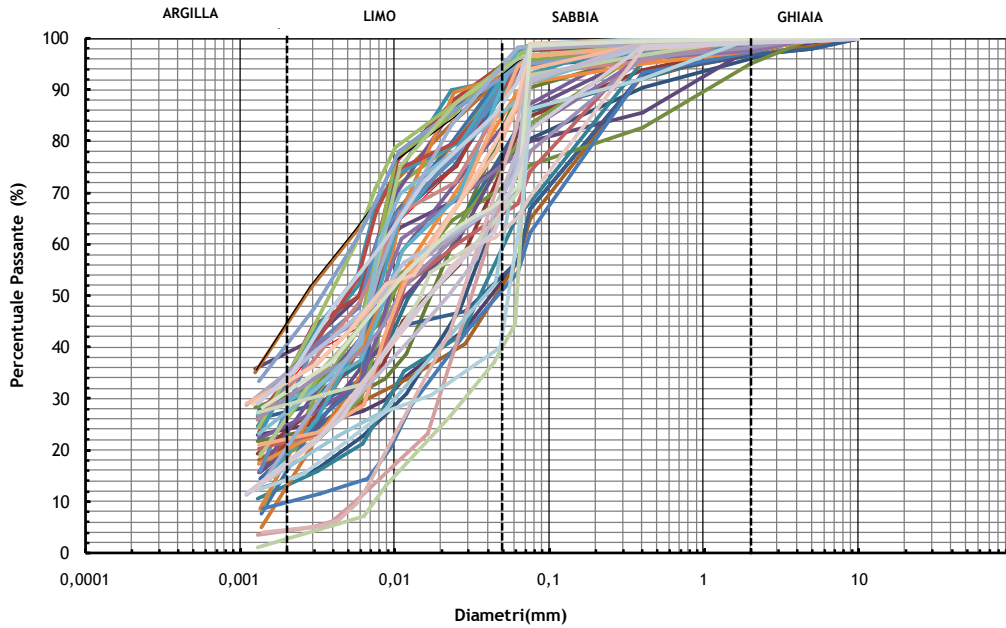


Figura 12 – Fuso granulometrico individuato per i depositi DLA.

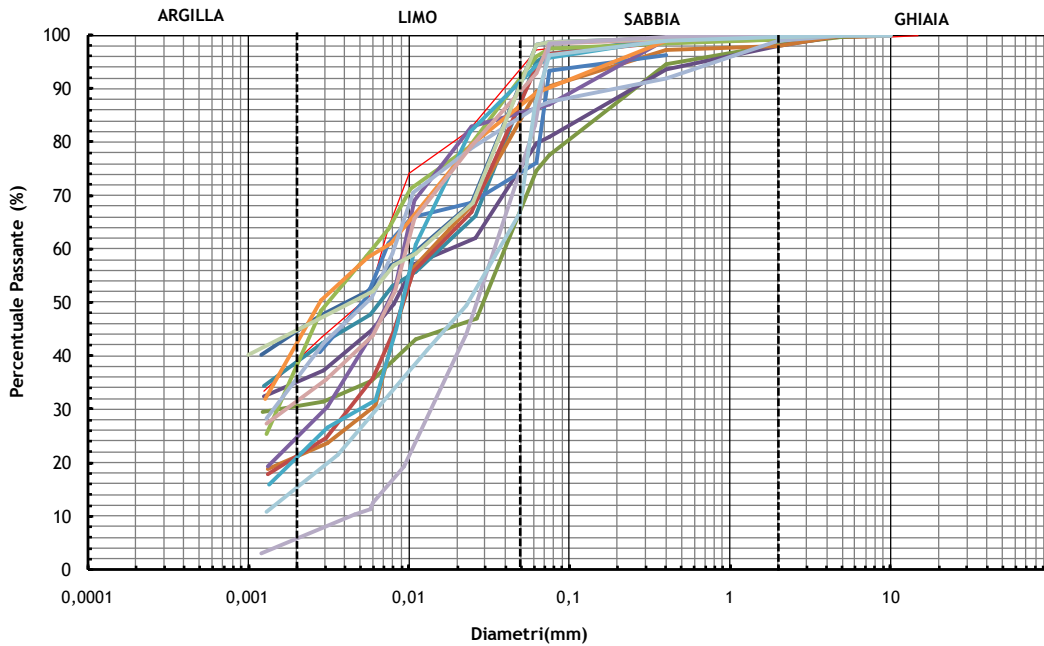


Figura 13 – Fuso granulometrico individuato per i depositi DA.

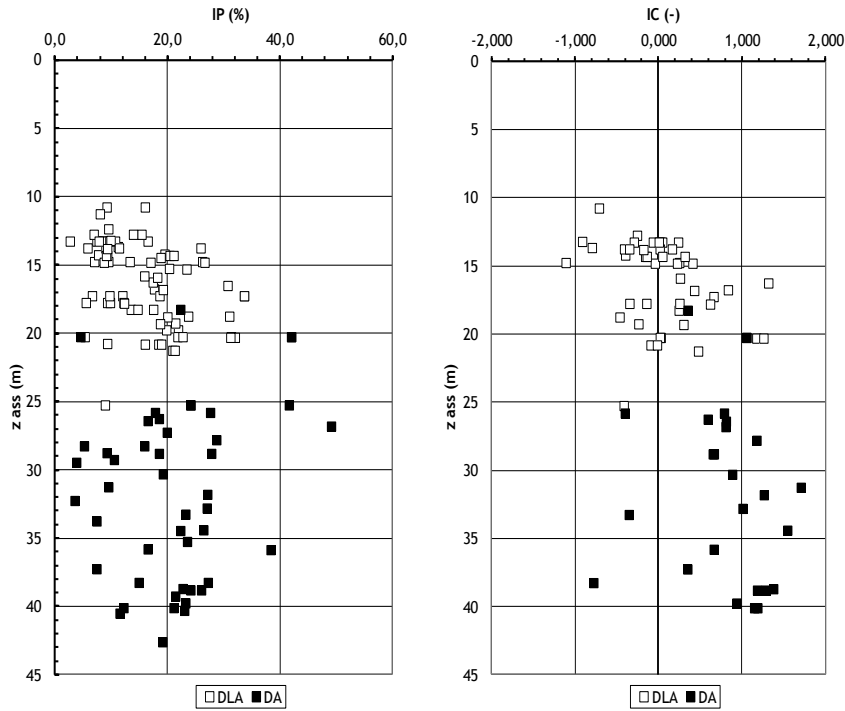


Figura 14 – Valori dell'indice di plasticità e dell'indice di consistenza dei campioni prelevati nei depositi DLA e DA.

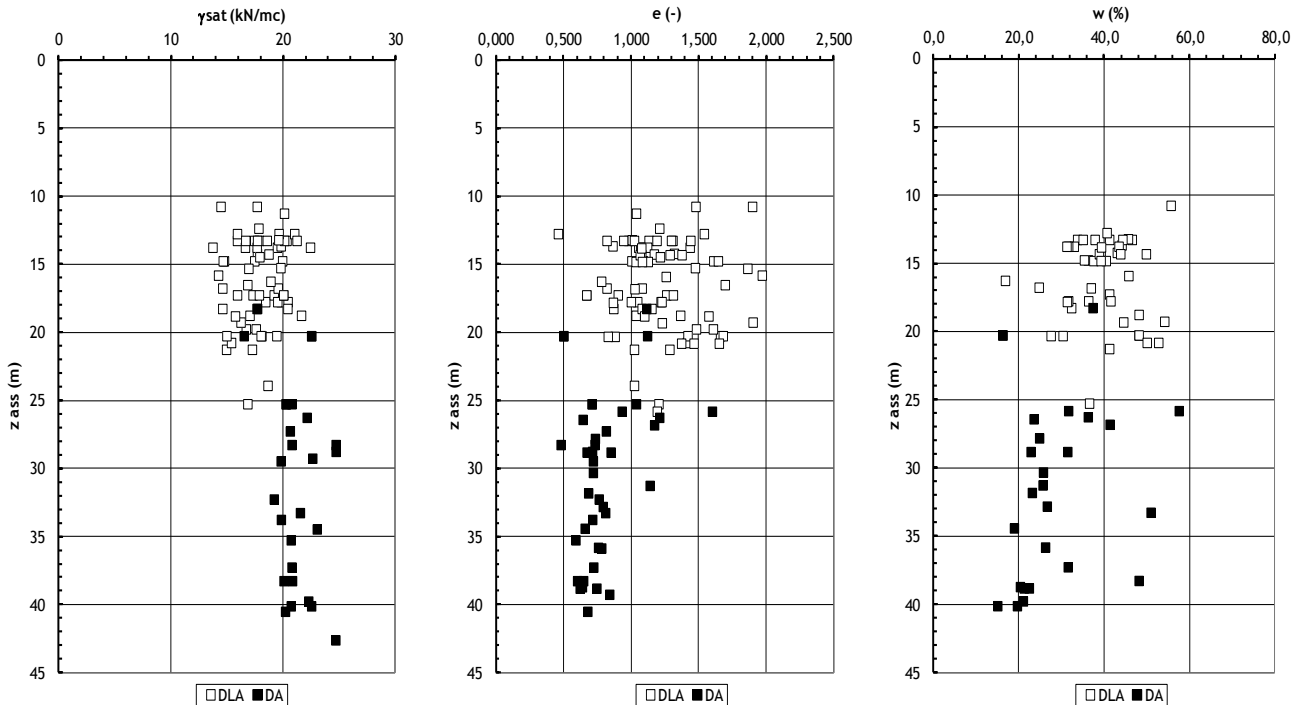


Figura 15 – Variazione con la profondità delle principali proprietà fisiche dei campioni prelevati nei depositi DLA e DA.

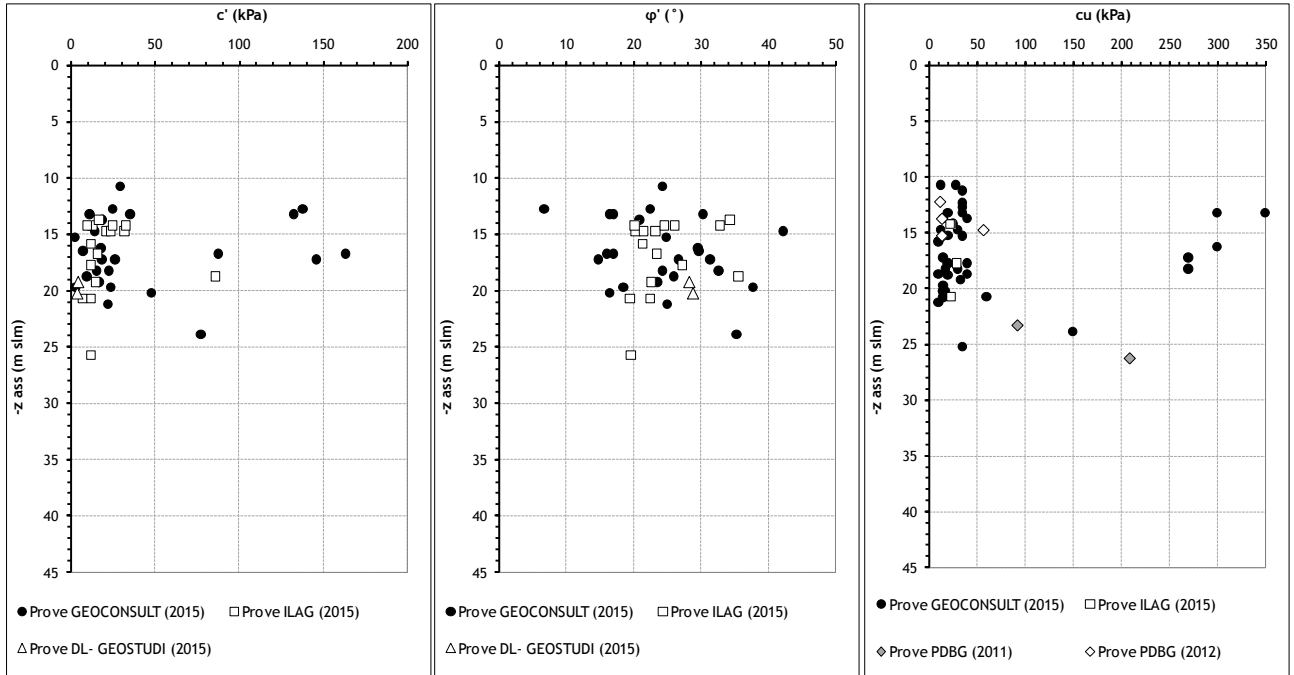


Figura 16 – Variazione con la profondità dei parametri di resistenza dei campioni prelevati nei depositi DLA.

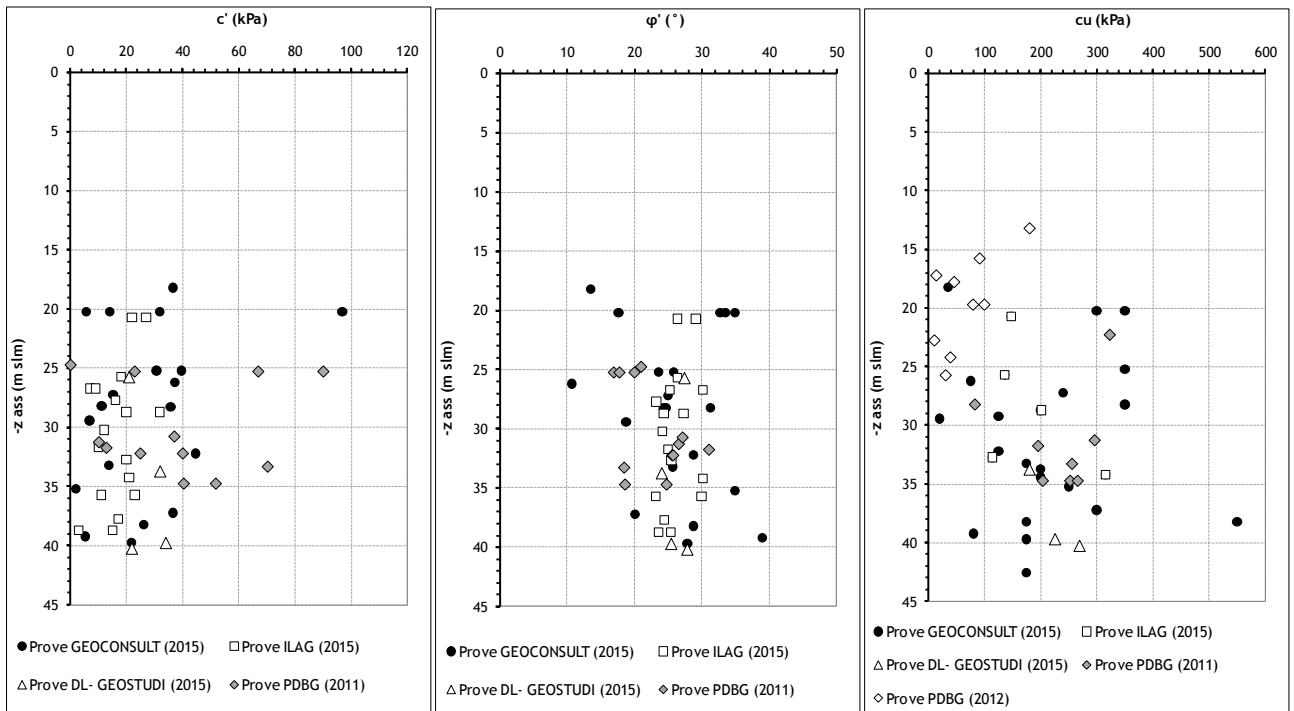


Figura 17 – Variazione con la profondità dei parametri di resistenza dei campioni prelevati nei depositi DA.

Con riferimento ai **terreni DLA**, in sede di Progetto Definitivo posto a Base di Gara risultavano disponibili solo i risultati di prove di compressione triassiale di tipo UU per complessivi:

- n. 7 valori di coesione non drenata (c_u)

La campagna di indagini condotta in sede di redazione del Progetto Esecutivo (PE) ha portato all'esecuzione di altre prove di laboratorio; di queste, le prove GEOCONSULT hanno fornito complessivamente:

- n. 25 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 40 valori di coesione non drenata (c_u)

Le prove GEOSTUDI (commissionate dalla Direzione Lavori) hanno fornito:

- n. 2 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- nessun valore di coesione non drenata (c_u)

Le prove ILAG, infine, hanno fornito:

- n. 16 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 4 valore di coesione non drenata (c_u)

Il totale è di 43 coppie di valori (c', φ') e di 51 valori di c_u , come riepilogato nella tabella seguente.

| | FASE | LABORATORIO | n. coppie (c', φ') | n. valori c_u |
|--------------------|------|---------------|------------------------------|-----------------|
| Terreni DLA | PDBG | --- | 0 | 7 |
| | PE | GEOCONSULT | 25 | 40 |
| | | GEOSTUDI | 2 | 0 |
| | | ILAG | 16 | 4 |
| | | TOTALE | 43 | 51 |

Una così notevole mole di dati, chiaramente arricchitasi grazie alla campagna di indagini svolte per il progetto esecutivo (da 7 a 51 valori di c_u , da 0 a 43 valori di c' e φ') ha consentito di ricorrere ad una analisi statistica dei dati al fine di compendiare in grandezze caratteristiche la distribuzione di tutti i valori disponibili.

In Figura 18 sono riportati i valori di frequenza cumulata dei diversi parametri di resistenza al taglio ottenuti con riferimento ai terreni DLA dalle diverse campagne di indagini sopra elencate. In particolare, poiché si sono avuti dei risultati a volte molto dispersi sui campioni sottoposti a prove di laboratorio dalla GEOCONSULT, si è ritenuto utile riproporre le curve di frequenza cumulata anche escludendo tali dati. Come si vede, i valori corrispondenti ad una frequenza cumulata del 50% sono praticamente coincidenti in termini di angolo di attrito φ' e coesione non drenata c_u mentre in termini di coesione efficace c' il valore complessivo del dato GEOCONSULT è significativamente superiore.

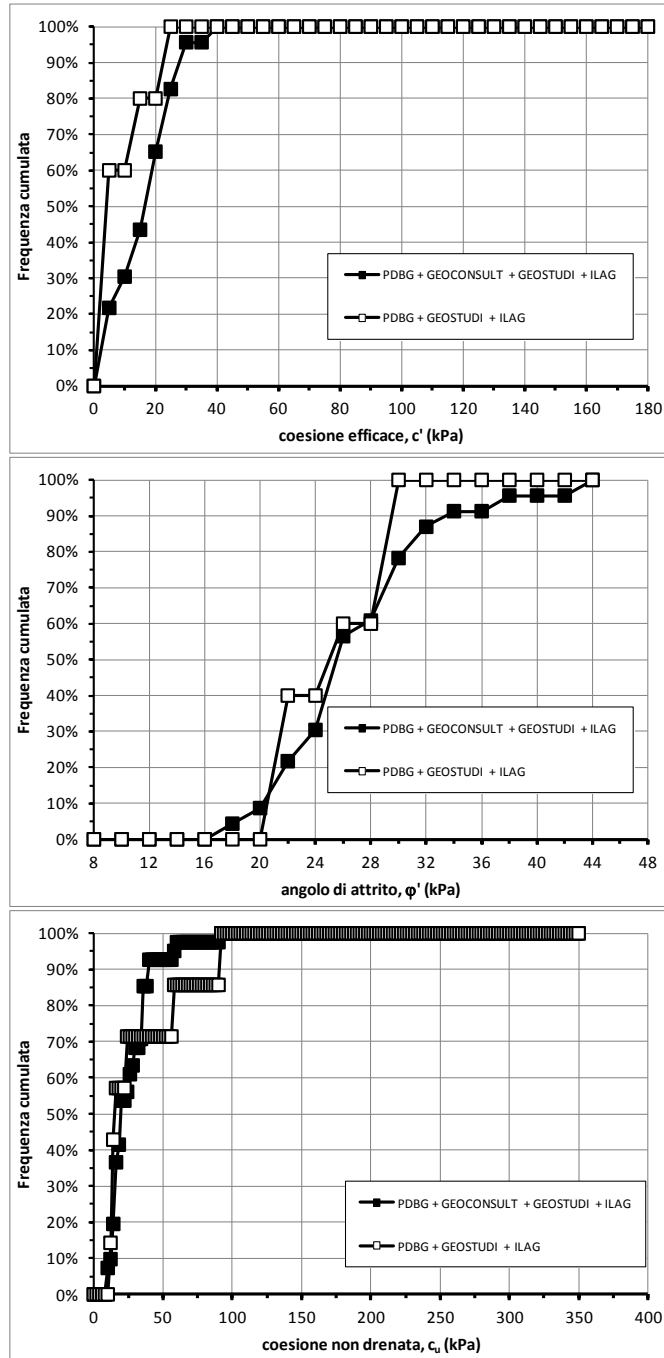


Figura 18 – Curve di frequenza cumulata per i diversi parametri di resistenza ottenuti dai campioni prelevati nei depositi DLA.

Nella tabella seguente sono riportati i valori medi μ e di scarto quadratico medio σ relativi ai vari parametri di resistenza al taglio.

| parametro | Media, μ | scarto quadratico medio |
|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| coesione efficace, c' : | 34,2 kPa | 40,9 kPa |
| angolo di attrito, φ' : | 24,7° | 7° |
| coesione non drenata, c_u : | 58,6 kPa | 87 kPa |

Come ovvio, visti i grafici di Figura 16 e 18, i valori dello scarto quadratico medio relativi alla coesione efficace e alla coesione non drenata eccedono i valori medi, il che corrisponde ad un coefficiente di variazione (scarto/media) superiore al 100%. Una minore dispersione si osserva per i valori dell'angolo di attrito (inferiore al 30%).

Con riferimento ai **terreni DA**, in sede di Progetto Definitivo posto a Base di Gara risultavano disponibili i risultati di prove di compressione triassiale di tipo CIU e di tipo UU per complessivi:

- n. 12 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 17 valori di coesione non drenata (c_u)

Le prove GEOCONSULT hanno fornito:

- n. 20 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 25 valori di coesione non drenata (c_u)

Le prove GEOSTUDI hanno fornito:

- n. 4 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 3 valori di coesione non drenata (c_u)

Le prove ILAG hanno fornito:

- n. 17 coppie di valori di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ')
- n. 5 valori di coesione non drenata (c_u)

Il totale è di 53 coppie di valori (c', φ') e di 50 valori di c_u , come riepilogato nella tabella seguente.

| | FASE | LABORATORIO | n. coppie (c', φ') | n. valori c_u |
|-------------------|------|---------------|------------------------------|-----------------|
| Terreni DA | PDBG | --- | 12 | 17 |
| | PE | GEOCONSULT | 20 | 25 |
| | | GEOSTUDI | 4 | 3 |
| | | ILAG | 17 | 5 |
| | | TOTALE | 53 | 50 |

Anche in questo caso si è avuta un significativo incremento di dati disponibili grazie alla campagna di indagini svolte per il progetto esecutivo (da 17 a 50 valori di c_u , da 12 a 53 valori di c' e φ').

In Figura 19 sono riportati i valori di frequenza cumulata dei diversi parametri di resistenza al taglio ottenuti con riferimento ai terreni DA dalle diverse campagne di indagini sopra elencate. Per le stesse ragioni esposte in precedenza, si è ritenuto utile predisporre le curve di frequenza cumulata sia in presenza sia in assenza dei dati GEOCONSULT. Come si vede, i valori corrispondenti ad una frequenza cumulata del 50% sono praticamente coincidenti; l'unica differenza apprezzabile, seppur modesta, è in questo caso relativa ai dati di coesione non drenata c_u .

Sebbene ancora dispersi, i dati risultano caratterizzati in termini statistici dai seguenti valori medi μ e di scarto quadratico medio σ :

| parametro | Media, μ | scarto quadratico medio |
|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| coesione efficace, c' : | 26,0 kPa | 20,2 kPa |
| angolo di attrito, φ' : | 25,4° | 5,3° |
| coesione non drenata, c_u : | 184,3 kPa | 110,7 kPa |

I valori dello scarto quadratico medio sono in questo caso sempre inferiori ai valori medi, il che corrisponde a coefficienti di variazione inferiori al 100%, con valori di circa 80% e 60% per quanto riguarda c' e c_u , pari a circa il 20% per quanto riguarda φ' .

In tale situazione, ai fini dell'individuazione dei valori caratteristici dei parametri di resistenza al taglio da utilizzare in progetto, ci si è riferiti alle indicazioni fornite dall'Eurocodice 7 (EN 1997-1: Geotechnical Design – Part 1: General Rules; ETC 10, 2009: ISSMGE European Technical Committee 10 “Evaluation of Eurocode 7”, www.eurocode7.com/etc10), secondo le quali il valore caratteristico di un parametro geotecnico viene scelto in corrispondenza del 50% di frattile (ovvero il valore medio) al 95% di livello di confidenza.

In ipotesi di distribuzione secondo la legge normale del caso, una stima cautelativa dei parametri caratteristici può essere eseguita mediante le seguenti espressioni (Bond & Harris, 2008: Decoding Eurocode 7. Taylor & Francis, London, 608 pp.):

$$c'_{k,inf} = c'_m - k_N \cdot \sigma_{c'}$$

$$\varphi'_{k,inf} = \varphi'_m - k_N \cdot \sigma_{\varphi'}$$

$$c_{u,k,inf} = c_{u,m} - k_N \cdot \sigma_{c_u}$$

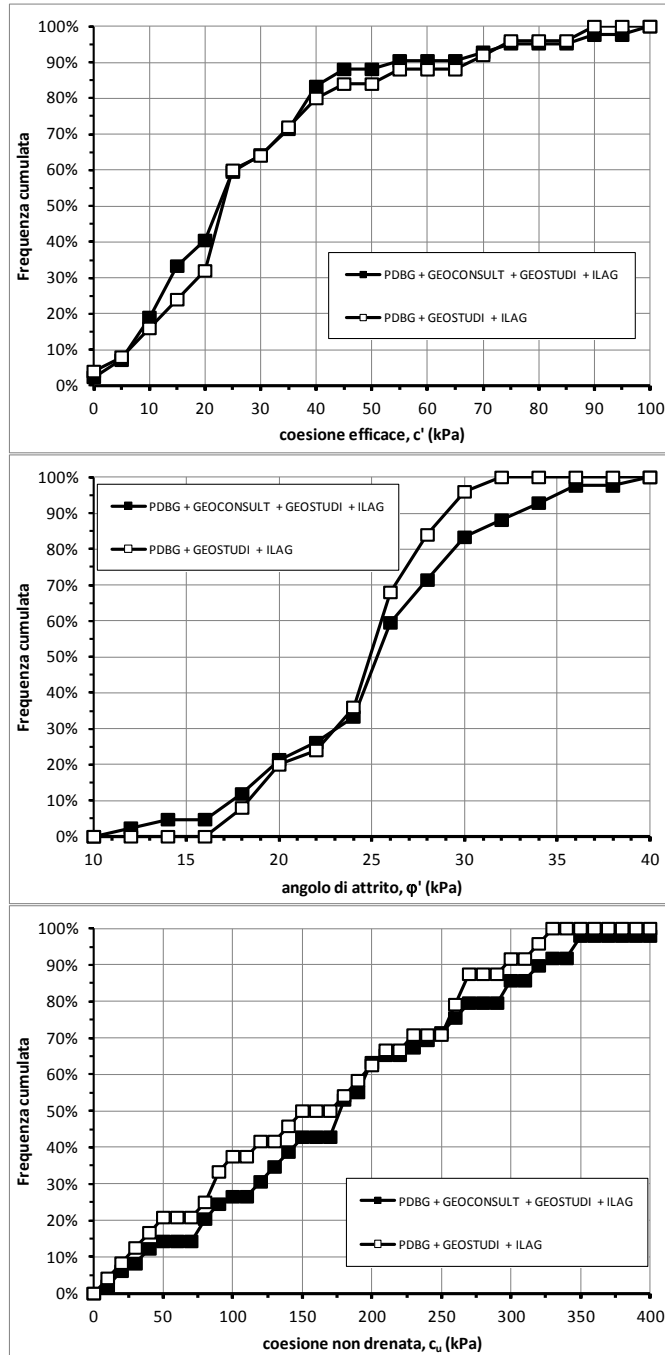


Figura 19 – Curve di frequenza cumulata per i diversi parametri di resistenza ottenuti dai campioni prelevati nei depositi DA.

in cui i termini con il pedice “m” rappresentano i valori medi in precedenza prima stimati; σ_c , σ_ϕ , σ_{cu} sono rispettivamente lo scarto quadratico medio dell’insieme di valori della coesione efficace, dell’angolo di attrito e

della coesione non drenata; k_N è il coefficiente statistico (riportato in Figura 20) che dipende dal numero di dati N dato dalla relazione:

$$K_N = t_{N-1}^{95\%} \cdot (1/N)^{0.5}$$

nella quale $t_{N-1}^{95\%}$ è il valore del coefficiente t di Student per $N-1$ gradi di libertà del campione di dati ad un livello di confidenza del 95%.

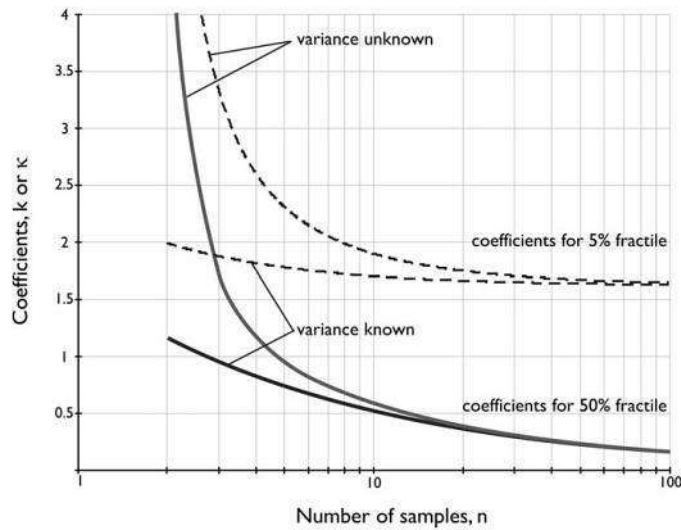


Figura 20 – Coefficiente statistico per determinare il 50% di frattile con il 95% di confidenza (da Bond & Harris, 2008)

Per poter applicare la procedura sopra descritta, è fortemente suggerito di eliminare i dati, per ciascuna formazione, ritenuti poco affidabili.

Per i depositi DLA, sono state escluse (Figura 21):

- le coppie di valori (c' , φ') con $c' > 50$ kPa ed esterne all'intervallo $\mu_{\varphi} \pm 5$
- i valori di c_u maggiori del doppio del valore corrispondente ad una frequenza cumulata pari al 50% (25 kPa) ovvero i valori maggiori di $2 \cdot \mu_{c_u} = 50$ kPa.

Per quanto riguarda i depositi DA (Figura 22), sono state escluse le coppie di valori (c' , φ') esterne agli intervalli $\mu_{c'} \pm 25$ kPa e $\mu_{\varphi} \pm 5$. Non si è ritenuto di dover escludere alcun dato dal campione di valori di c_u .

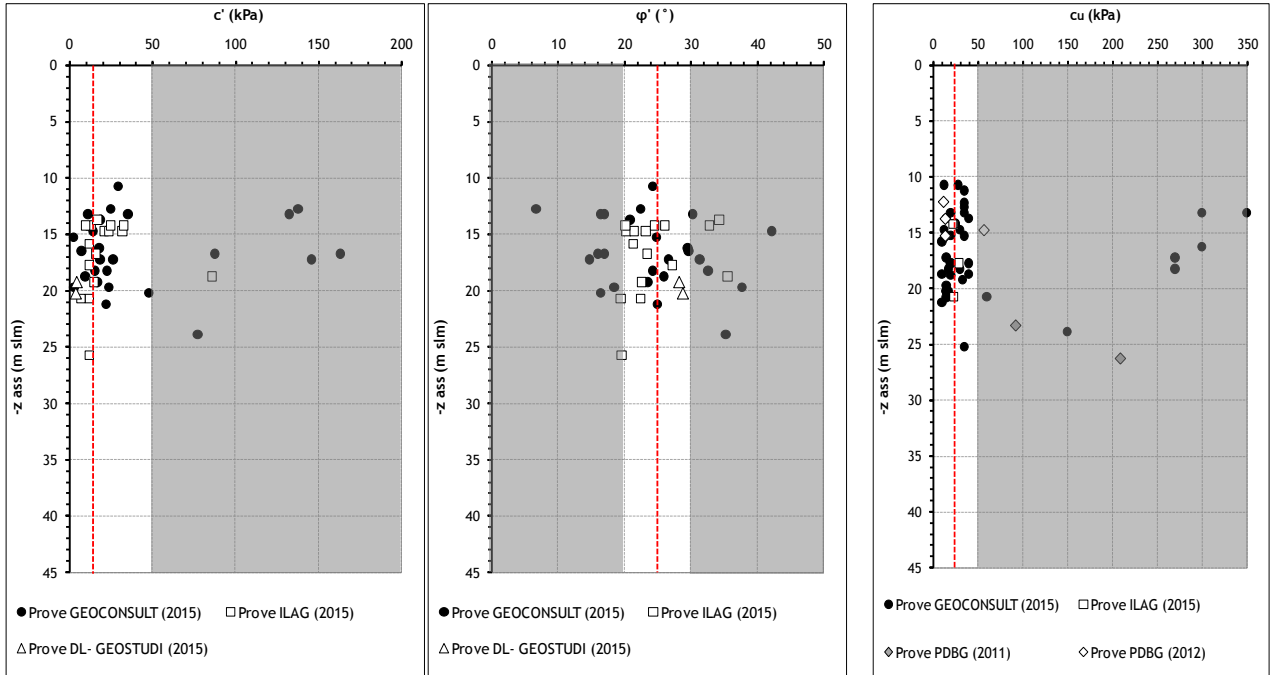


Figura 21 – Intervalli dei valori dei parametri di resistenza considerati per la stima dei valori caratteristici dei depositi DLA.

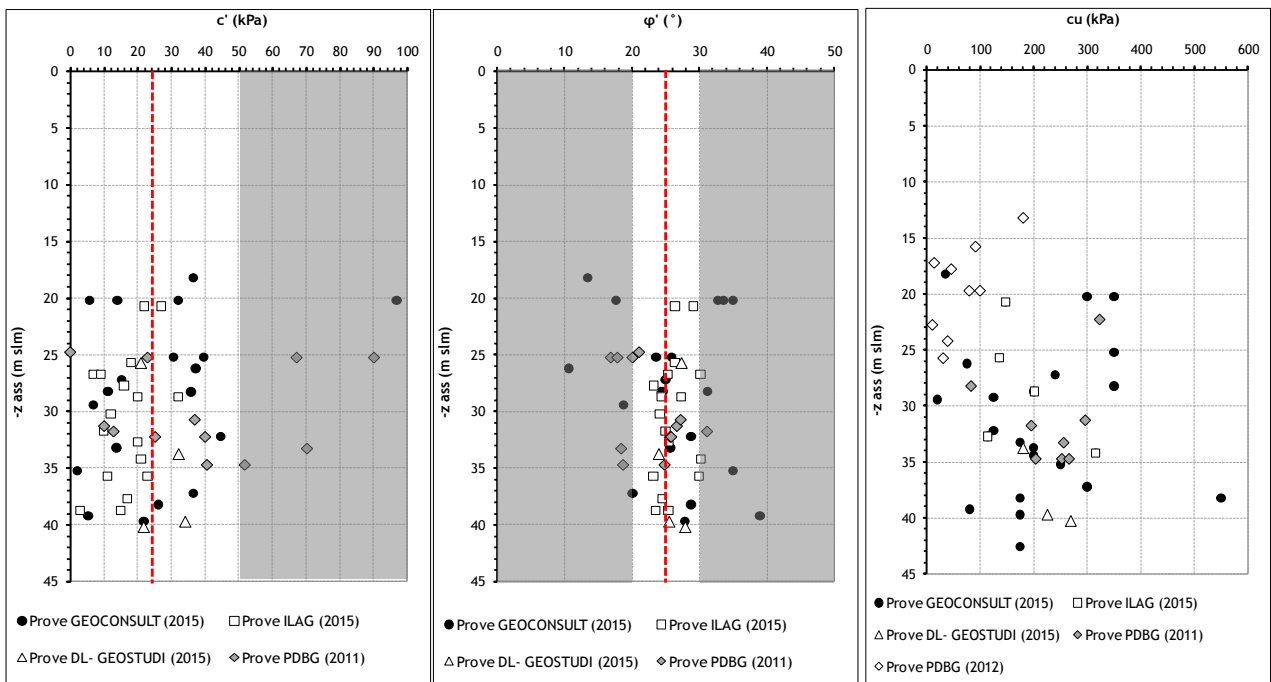


Figura 22 – Intervalli dei valori dei parametri di resistenza considerati per la stima dei valori caratteristici dei depositi DA.

Utilizzando i dati in termini di c_u ottenuti anche dall'interpretazione delle prove in sito (DMT e CPTU, paragrafo 3.1.2), limitati ai soli terreni DLA, si giunge alla stima dei valori caratteristici dei **parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate e non drenate** riassunti in Tabella 3.

| | | c' | φ' | c_u |
|-------------|------------------------------|---------------|------------|------------------|
| Terreni DLA | Numero dati | 27 | 27 | 632 ¹ |
| | Media | 16,3 kPa | 25,5° | 16,7 kPa |
| | Scarto quad. medio | 8,8 kPa | 4,1° | 27,8 kPa |
| | t di Student | 2,04 | 2,04 | 1,98 |
| | k_N | 0,39 | 0,39 | 0,08 |
| | Valore Caratteristico | 13 kPa | 24° | 15 kPa |
| Terreni DA | Numero dati | 53 | 53 | 50 |
| | Media | 26,1 kPa | 25,4° | 184,3 kPa |
| | Scarto quad. medio | 20,2 kPa | 5,3° | 110,7 kPa |
| | t di Student | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| | k_N | 0,28 | 0,28 | 0,29 |
| | Valore Caratteristico | 25 kPa | 25° | 150 kPa |

Tabella 3. Parametri di resistenza caratteristici dei depositi DLA e DA

Per quanto riguarda la **rigidezza operativa**, espressa attraverso il modulo edometrico E_{ed} stimato da tutte le prove di laboratorio disponibili in corrispondenza dello stato tensionale efficace corrispondente alla profondità di prelievo dei campioni (Figura 22), si sono ottenuti valori tipici di depositi molto comprimibili per quanto riguarda i terreni DLA (con valori di frequente inferiori a 2 MPa), chiaramente maggiori per i terreni DA e tipicamente compresi tra 5 e 10 MPa.

Tali valori sono stati opportunamente confrontati con quelli desunti dalle prove DMT e CPTU, queste ultime limitate ai terreni DLA, il che ha consentito di confermare l'elevata comprimibilità di tali terreni (Figura 24).

¹ Dati di sito e di laboratorio.

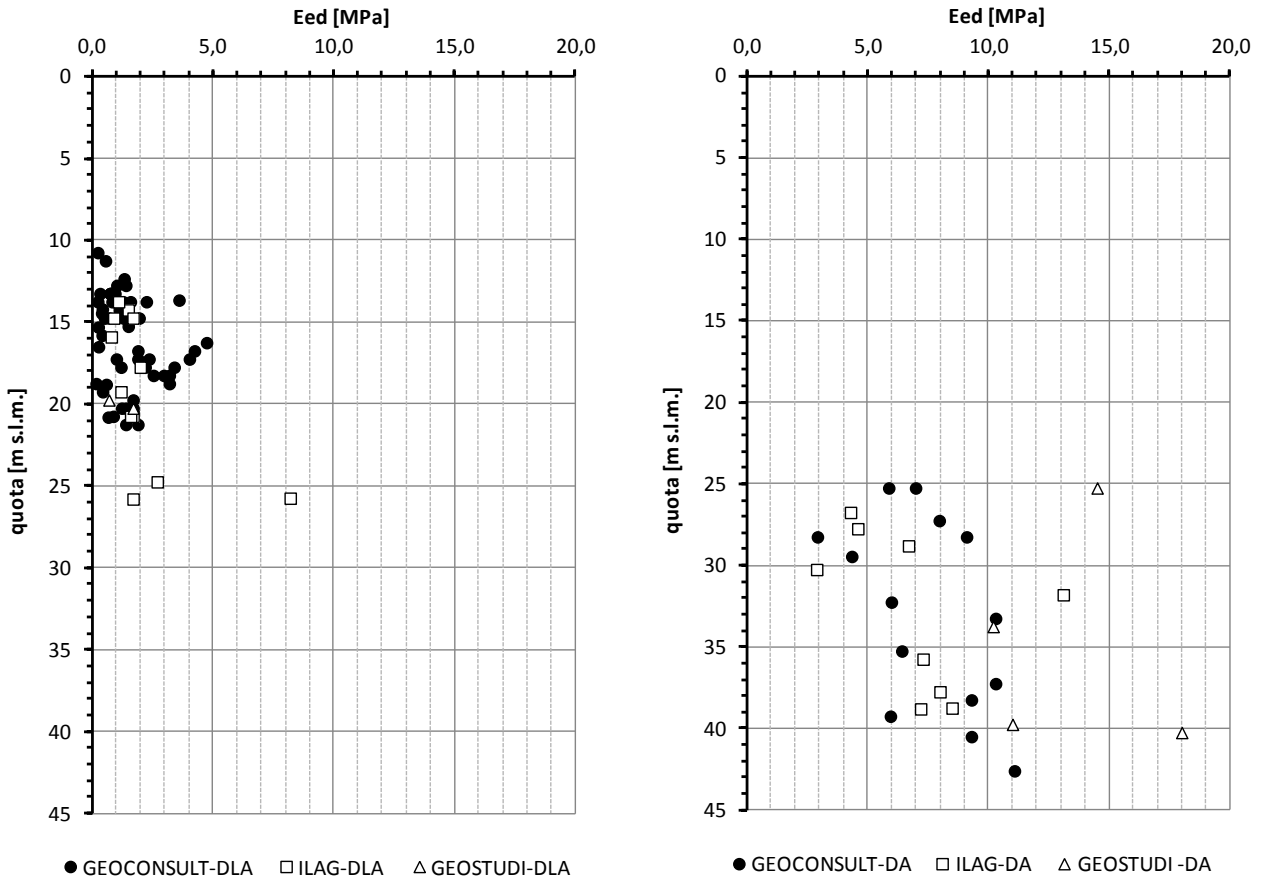


Figura 24 – Variazione con la profondità del modulo edometrico

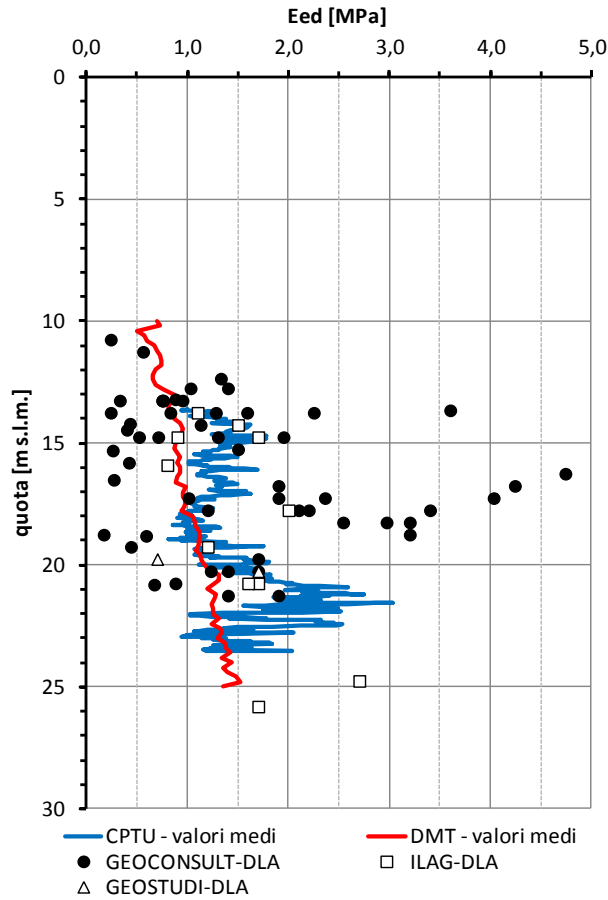


Figura 25 – Confronto tra i valori di E_{ed} desunto dalle prove di laboratorio e dalle prove in sito per i terreni DLA.

Chiaramente, in presenza di terreni a grana fina di ridotta permeabilità, è necessario operare anche una stima della rigidità in condizioni non drenate E_u . Attesa la non linearità della risposta dei terreni, essa dipende dal livello di deformazione cui si fa riferimento.

In tal senso, alcune indicazioni preliminari possono derivare da ampi studi disponibili in letteratura che forniscono i valori attesi del rapporto E_u/c_u al variare della storia tensionale del deposito (rappresentata sinteticamente dal grado di sovraconsolidazione OCR) e dalla natura mineralogica del terreno che lo costituisce (rappresentata sinteticamente dall'indice di plasticità I_p).

Per i terreni DLA normalmente consolidati ($OCR = 1$) e di bassa plasticità (I_p frequentemente compreso tra 10% e 30%), le indicazioni fornite da Duncan e Buchignani (1976), restituiscono valori di $E_u/c_u = 600 \div 1800$ (Figura 26). Con riferimento a valori corrispondenti ad un livello di sforzo pari al 50% di quello che determina la rottura dei terreni, per terreni con bassa plasticità ($I_p < 30\%$) e normalmente o debolmente sovraconsolidati ($OCR < 3$), Viggiani (2001) suggerisce un valore di $E_u/c_u = 800$ (Tabella 4).

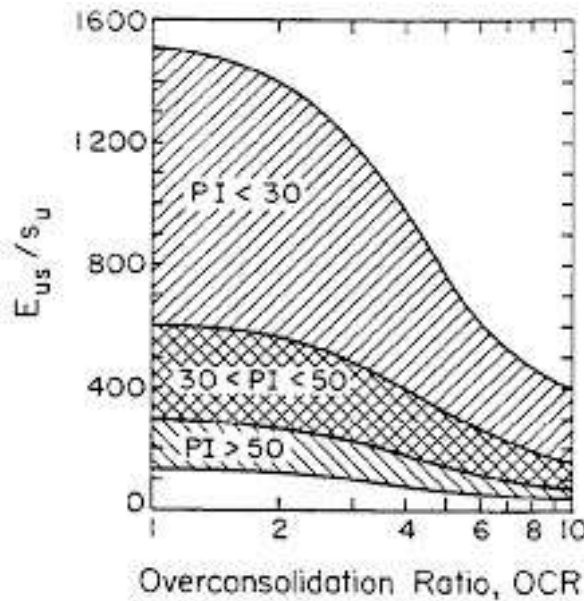


Figura 26 – Abaco per la stima del rapporto E_u/c_u (Duncan e Buchignani, 1976).

| OCR | E_u/c_u | | |
|-------|------------|-----------------|------------|
| | $I_p < 30$ | $30 < I_p < 50$ | $I_p > 50$ |
| < 3 | 800 | 400 | 200 |
| 3 ÷ 5 | 500 | 300 | 150 |
| > 5 | 300 | 200 | 100 |

Tabella 4 – Tipici valori del rapporto E_u/c_u (Viggiani, 2001).

Con riferimento al valore caratteristico $c_u = 15$ kPa riportato in Tabella 4, risulta quindi $9 \text{ MPa} < E_u < 27 \text{ MPa}$, con valore rappresentativo $E_u = 12 \text{ MPa}$ in base alle indicazioni di Tabella 4.

Se si guarda ai valori ottenuti dalle prove di laboratorio di tipo CIU e riportati in Figura 27, selezionati in corrispondenza di tensioni di cella comparabili con quelli esistenti in sito relativamente ai terreni in esame, l'accordo appare soddisfacente.

I terreni DA risultano certamente sovraconsolidati sia dalle prove di laboratorio sia dall'interpretazione delle prove in sito con valori di OCR mediamente pari a 7. Poiché anche i terreni DA sono caratterizzati da bassi valori di I_p (tipicamente 20%), assumendo $\text{OCR} = 7$ si otterrebbe un valore $E_u/c_u = 200 \div 700$ (Figura 26) con valore rappresentativo $E_u/c_u = 300$ (Tabella 4).

In base al valore caratteristico $c_u = 150$ kPa riportato in Tabella 3, risulta quindi $30 \text{ MPa} < E_u < 105 \text{ MPa}$, con valore rappresentativo $E_u = 45 \text{ MPa}$ in base alle indicazioni di Tabella 4.

Confrontando tali valori con quelli ottenuti dalle prove di laboratorio di tipo CIU e riportati in Figura 27, sempre selezionati in corrispondenza di tensioni di cella comparabili con quelli esistenti in sito relativamente ai terreni in esame (quindi più elevati dei precedenti utilizzati per i terreni DLA), l'accordo appare soddisfacente.

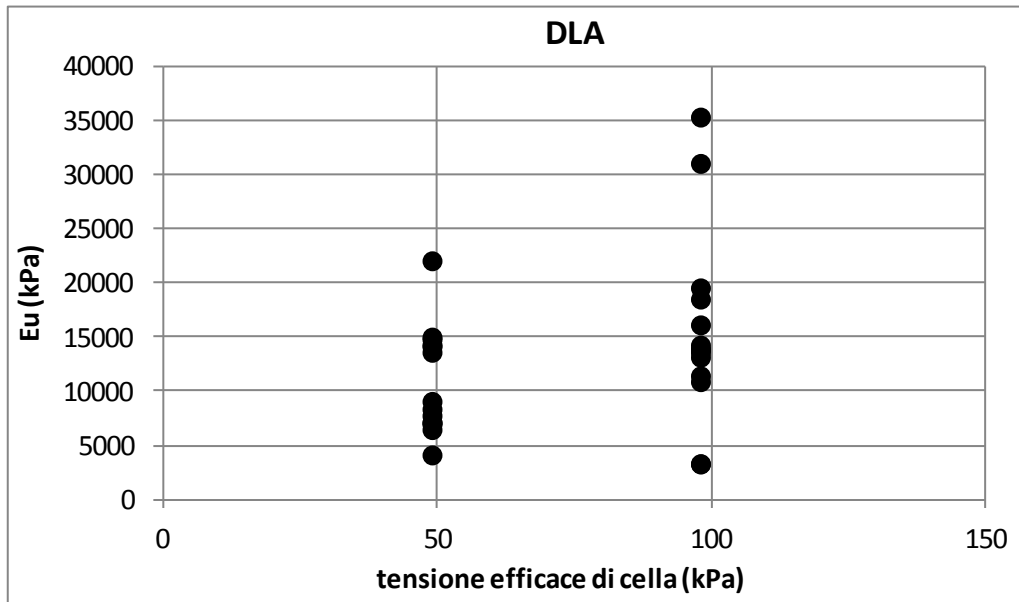


Figura 26 – Valori di E_u ottenuti dalle prove di laboratorio sui campioni prelevati nei terreni DLA.

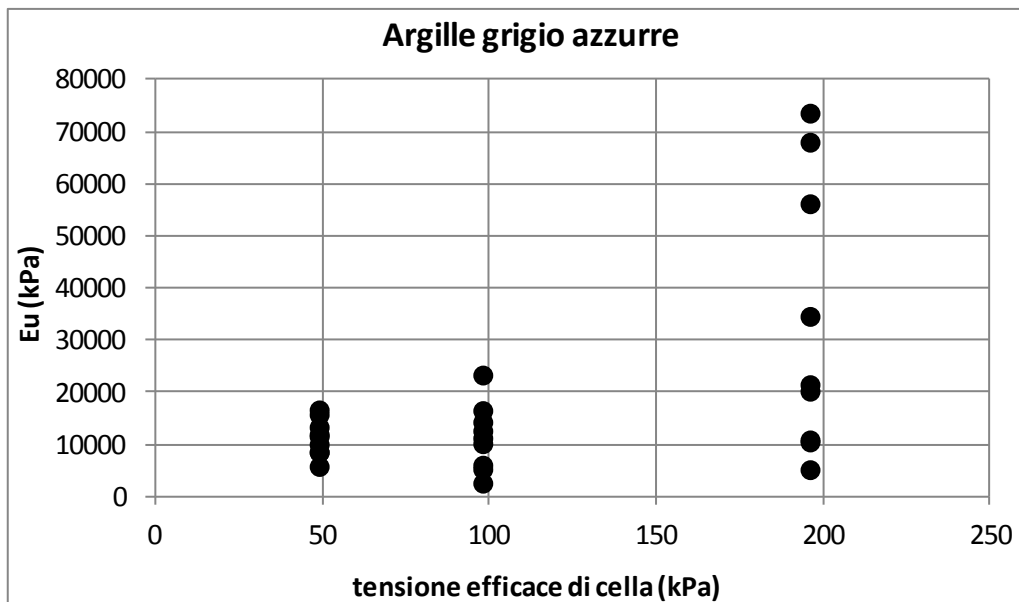


Figura 27 – Valori di E_u ottenuti dalle prove di laboratorio sui campioni prelevati nei terreni DA.

A valori del tutto paragonabili di rigidezza non drenata del terreno si giunge anche guardando ai risultati resi disponibili, in forma del tutto analoga, da Keaveny e Mitchell (1986). Essi sono stati forniti in termini di indice di rigidezza $I_R = G/c_u$, quindi con riferimento al modulo di rigidezza a taglio G operativo (ossia sempre corrispondente ad un livello di sforzo pari al 50% di quello che determina la rottura dei terreni) desunto da prove di compressione triassiale sempre consolidate non drenate ma la cui fase drenata di consolidazione è di tipo k_0 (ossia non isotropa, il che è più prossimo a quanto è nella realtà dei depositi di terreni naturali). Ulteriore vantaggio di questa elaborazione è relativa ad un maggior dettaglio circa la dipendenza del rapporto G/c_u dall'indice di plasticità I_p (Figura 28).

Utilizzando gli stessi valori di OCR e I_p riportati in precedenza a caratterizzare sinteticamente i terreni DLA (OCR = 1 e $I_p = 10\div30\%$) e DA (OCR = 7 e $I_p = 20\%$), si ottengono valori di G/c_u compresi tra 100 ($I_p = 10\%$) e 250 ($I_p = 30\%$) per i terreni DLA e pari a 70 per i terreni DA.

Considerando che tra il modulo G e il modulo E sussiste la semplice relazione derivante dalla Teoria dell'Elasticità $G = E/[2 \cdot (1 + \nu)]$ e che in condizioni non drenate $\nu = 0.5$ a causa dell'incomprimibilità volumetrica dell'acqua, una volta riconosciuto che l'acqua non è in grado di assorbire sforzi di taglio risulta $E_u = 3 \cdot G$ il che porta a valori del rapporto E_u/c_u pari a 3 volte quello desunto dal grafico di Figura 28, ossia compreso tra 300 e 750 per i terreni DLA e pari a 210 per i terreni DA, il che sostanzialmente conferma quanto già ricavato in precedenza.

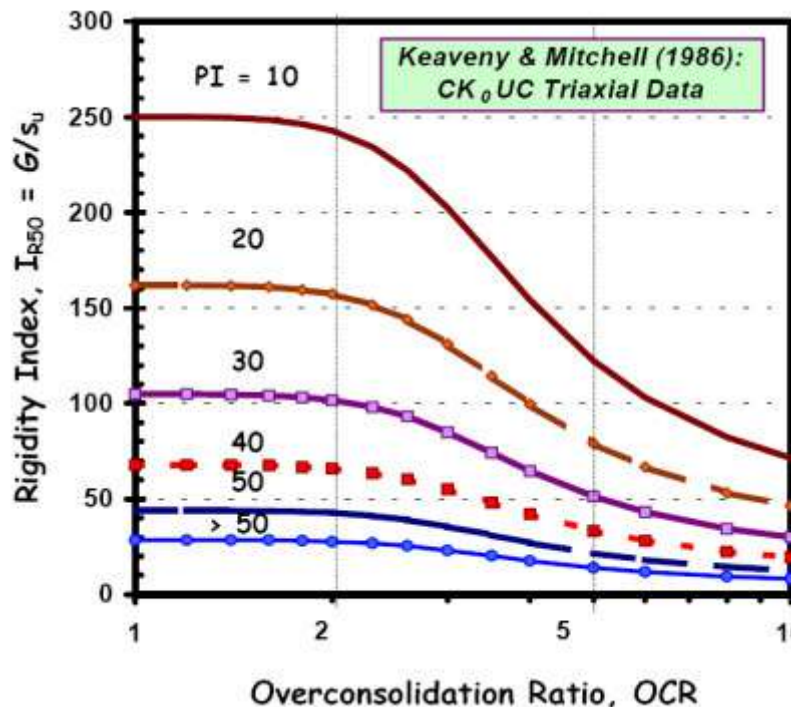


Figura 28 –Abaco per la stima del rapporto rapporto G/c_u (Keaveny e Mitchell, 1986).

3.1.4 Modello Geotecnico di Sottosuolo

Il punto 6.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni richiede che il modello geotecnico di sottosuolo sia “*uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e della caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzato all’analisi quantitativa di uno specifico problema geotecnico*”, al contempo chiarendo che “*per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato*”.

Alla luce di questa impostazione delle Norme e tenuto conto di tutti i risultati delle prove in sito e di laboratorio mostrati in precedenza e successivamente elaborati secondo metodi ampiamente riconosciuti e validati nella letteratura tecnica e scientifica al riguardo, si ritiene più che adeguato riferirsi nelle analisi delle opere in oggetto ai seguenti valori caratteristici dei diversi parametri geotecnici:

| Lato | Terreno | γ [kN/m ³] | c' [kPa] | ϕ' [°] | c_u [kPa] | OCR [-] | E' [MPa] | $E_{50,ref}$ [MPa] | $E_{ur,ref}$ [MPa] |
|------|---------|----------------------------------|---------------|----------------|----------------------------|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| AB | DLA | 17.5 | 13 | 24 | $10.5 + 1.5 \cdot (z - 9)$ | 1 | $5.7 + 0.82 \cdot (z - 9)$ | 24.0 | 60.0 |
| | DA | 19.0 | 25 | 25 | $120 + 9 \cdot (z - 20)$ | 7 | $33 + 7.5 \cdot (z - 20)$ | 48.0 | 120.0 |
| BC | DLA | 17.5 | 13 | 24 | $10.5 + 1.5 \cdot (z - 9)$ | 1 | $5.7 + 0.82 \cdot (z - 9)$ | 24.0 | 60.0 |
| | DLS | 18.0 | 0 | 35 | --- | --- | --- | 60.0 | --- |
| | DA | 19.0 | 25 | 25 | $120 + 9 \cdot (z - 20)$ | 7 | $33 + 7.5 \cdot (z - 20)$ | 48.0 | 120.0 |

Tabella 5. Modello di sottosuolo per il progetto esecutivo della struttura di marginamento a mare.

3.2 AREA DI COLMATA

Per la messa a punto di un modello geotecnico finalizzato alla caratterizzazione del comportamento tensio-deformativo del volume significativo di terreno strettamente interagente con il corpo della cassa di colmata, le grandezze da analizzare riguardano essenzialmente i parametri di compressibilità e permeabilità che, come noto, governano sono alla base dei processi di consolidazione attesi (entità dei cedimenti e loro decorso nel tempo).

Il modello geotecnico, ricostruito sulla base delle indagini condotte, consta essenzialmente di due principali litologie: **depositi limosi e argillosi (DLA)** normalmente consolidati e/o lievemente sottoconsolidati più superficiali, caratterizzati in generale da modestissime proprietà meccaniche, e **depositi argillosi (DA)** sovraconsolidati più profonde, caratterizzate da migliori proprietà meccaniche.

Per quanto concerne lo studio di compressibilità dei predetti materiali, sono stati analizzati i moduli di compressibilità edometrica (E_{ed}) e i relativi indici di compressibilità (C_c) e rigonfiamento (C_s) derivati

essenzialmente dall'analisi delle prove edometriche, interpretate rispetto all'effettivo grado di sovraconsolidazione dei materiali valutato rispetto alla effettiva tensione litostatica agente alla profondità di prelievo del campione.

Per quanto concerne, invece, la valutazione delle caratteristiche di permeabilità e dei coefficienti di consolidazione, ci si è avvalsi dei dati relativi alle prove di permeabilità in sito, alle prove di dissipazione CPTU e alle curve di consolidazione edometrica, valutando quindi, per ciascuno schema di prova rappresentativo dei processi di filtrazione, i relativi coefficienti di consolidazione e permeabilità, sia in direzione verticale che orizzontale (c_v - k_v , c_h - k_h).

3.2.1 Caratterizzazione dei depositi limosi e argillosi (DLA)

Come descritto nei precedenti paragrafi, la campagna di indagini geognostiche propedeutiche allo sviluppo del Progetto Esecutivo, ha portato all'esecuzione di prove in sito e prove di laboratorio condotte da ISOGEA, per quanto riguarda le indagini in sito, e da GEOCONSULT e ILAG per quanto riguarda le prove di laboratorio.

In riferimento alla campagna GEOCONSULT, per la stima dei parametri di compressibilità e permeabilità del deposito limoso, sono state analizzate complessivamente N. 61 prove edometriche, realizzate partendo da campioni indisturbati prelevati da sondaggi eseguiti a mare "M" e a terra "T". Sono state inoltre analizzate N. 11 prove di dissipazione CPTU e N. 10 prove di permeabilità Lefranc, realizzate in mare in prossimità del centro della vasca di colmata.

Delle prove integrative condotte da ILAG, sono state analizzate complessivamente N. 10 prove edometriche realizzate partendo da campioni indisturbati prelevati da sondaggi eseguiti a mare.

3.2.1.1 Compressibilità

Lo studio dei risultati ottenuti dalle prove edometriche condotte su campioni prelevati a diverse profondità, confermati pienamente dai risultati delle prove CPTU, ha mostrato come i terreni DLA, molto recenti dal punto di vista deposizionale, siano caratterizzati da valori di modulo edometrico alla profondità di fondale (≈ -9 m s.l.m.) molto bassi (pressochè nulli), con una tendenza incrementale con la profondità con valori compresi in un range di 0.5-3.0 MPa. Solo in rarissimi casi si riscontano valori superiori ai 3.0 MPa. In Figura 29 sono riportati i valori di E_{ed} diagrammati in funzione della profondità, rispetto al livello mare.

Nell'ambito delle valutazioni di compressibilità del materiale, l'analisi delle risultati delle prove edometriche ha permesso inoltre di effettuare una stima dei valori degli indici di compressibilità e rigonfiamento. In Figura 30 è illustrata la variazione dei dati in funzione della profondità, rispetto al livello mare. Per quanto attiene l'indice di compressibilità C_c , variabile in generale un range piuttosto ampio, è possibile valutare un valore medio di 0.29, mentre per l'indice di rigonfiamento C_s è possibile stimare un valore medio di 0.054.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

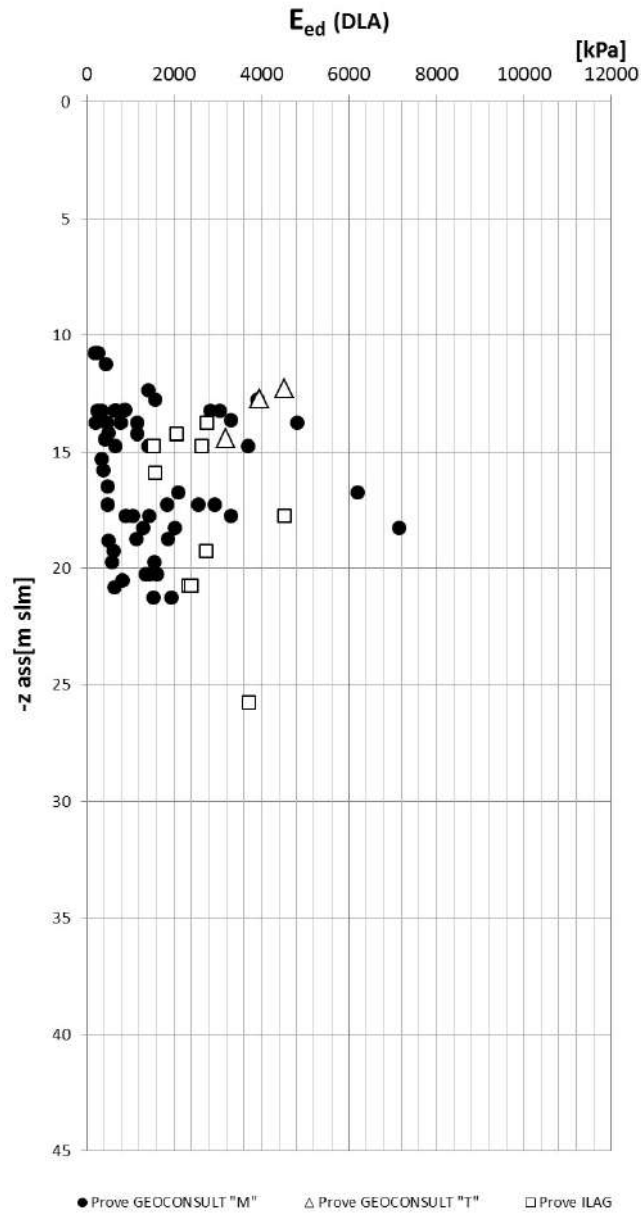


Figura 29 –DLA: andamento E_{ed} con la profondità

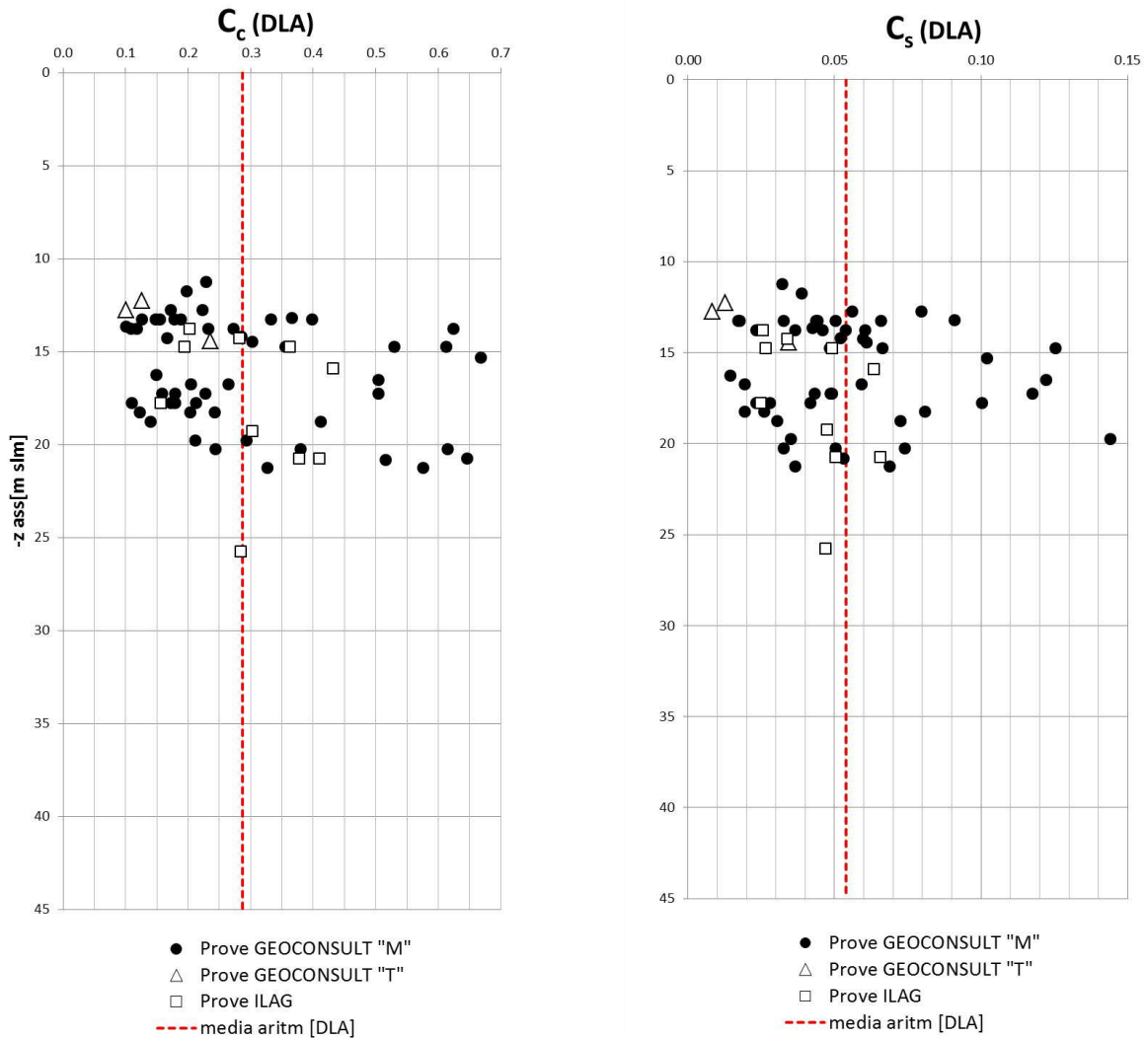


Figura 30 – DLA: andamento di C_c e C_s con la profondità

3.2.1.2 Proprietà idrauliche

La valutazione dei coefficienti di permeabilità e di consolidazione dei depositi limosi, molto variabili in generale rispetto alle condizioni macrostrutturali e microstrutturali del deposito, nonché rispetto alla tipica anisotropia di tali grandezze in termini di geometria del moto di filtrazione (legata essenzialmente ai processi deposizionali del banco), è stata svolta rispetto alle specifiche prove condotte.

In particolare, per quanto attiene i coefficienti di permeabilità e di consolidazione orizzontali, ci si è riferiti ai risultati delle prove Lefranc e delle prove di dissipazione CPTU, assolutamente rappresentative dei processi di filtrazione orizzontale rispetto allo schema di prova, nonché mutuamente complementari rispetto alla stima delle

permeabilità microstrutturali e macrostrutturali del banco rispetto alla diversa geometria caratteristica dei filtri nelle due tipologie di prova.

Per quanto attiene ai coefficienti di permeabilità e di consolidazione verticali, ci si è riferiti, come noto, alle curve di consolidazione edometrica relative alle prove di laboratorio, valutati rispetto alla tensione litostatica del campione alla profondità di prelievo.

Nelle Figure 31 e 32 sono sintetizzati i risultati ottenuti.

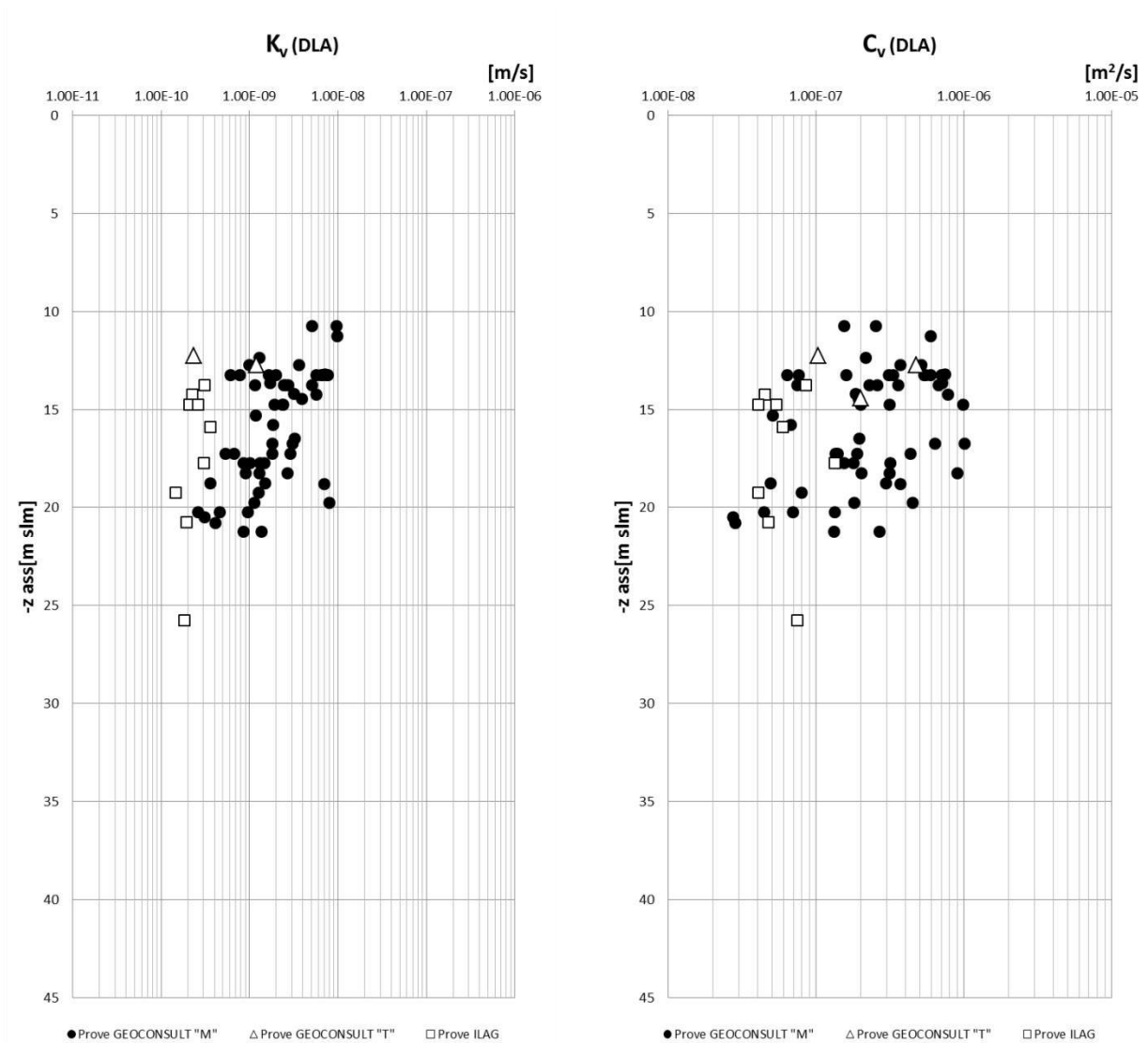


Figura 11 – DLA: andamento di K_v e C_v con la profondità.

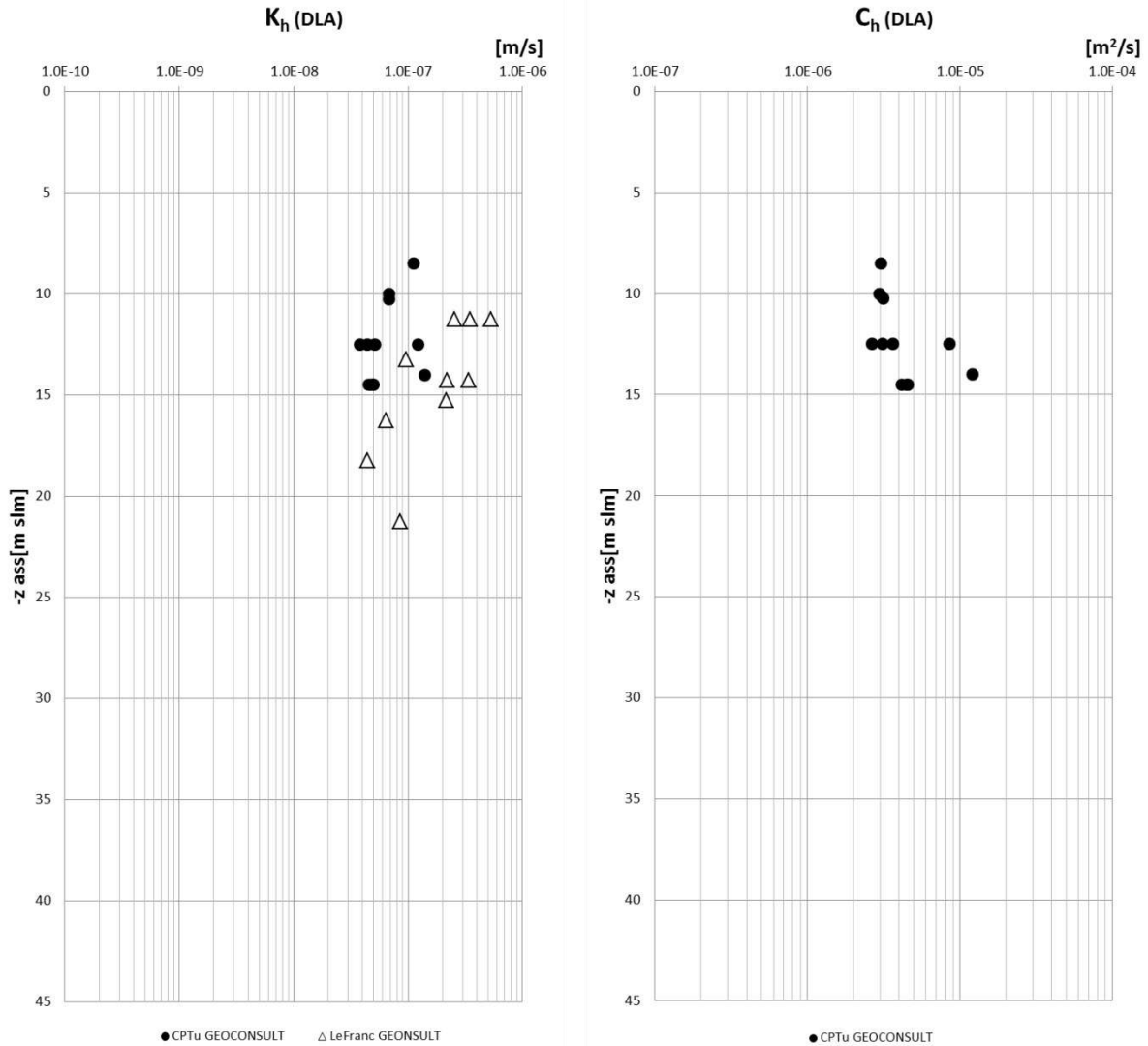


Figura 32 – DLA: andamento di K_h e c_h con la profondità.

I valori del coefficiente di permeabilità verticale sono variabili in un range di $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, con un valore mediato di circa $2 \cdot 10^{-9}$ m/s. Il coefficiente di consolidazione verticale varia in un range di $1 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-8}$ m²/s, con un valore medio di circa $2.8 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

In direzione orizzontale, il valore del coefficiente di permeabilità si attesta su un valore medio di circa $2 \cdot 10^{-7}$ m/s, con una dispersione di dati che varia nel range $5 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Il coefficiente di consolidazione orizzontale

medio può essere stimato in $4.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, con un range di oscillazione con la profondità compreso tra $2 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.2.2 Caratterizzazione dei depositi argillosi (DA)

In riferimento alla campagna GEOCONSULT, per la stima dei parametri di compressibilità e permeabilità dei terreni DA, sono state analizzate complessivamente N. 17 prove edometriche, realizzate partendo da campioni indisturbati prelevati da sondaggi eseguiti a mare "M". Sono state inoltre analizzate N. 8 prove di dissipazione CPTU e N. 1 prova di permeabilità Lefranc, realizzate in mare in prossimità del centro della vasca di colmata.

3.2.2.1 Compressibilità

Lo studio dei risultati ottenuti dalle prove edometriche condotte su campioni prelevati a diverse profondità, confermati pienamente dai risultati delle prove CPTU, ha mostrato che i terreni DA, meno recenti dal punto di vista deposizionale rispetto ai terreni DLA, sono caratterizzati da valori del modulo edometrico compresi in un range di 5-12 MPa. In Figura 33 sono riportati i valori di E_{ed} diagrammati in funzione della profondità, rispetto al livello mare.

Nell'ambito delle valutazioni di compressibilità del materiale, l'analisi dei risultati delle prove edometriche ha permesso inoltre di effettuare una stima dei valori degli indici di compressibilità e rigonfiamento. In Figura 34 è illustrata la variazione dei dati in funzione della profondità, rispetto al livello mare. Per quanto attiene l'indice di compressibilità C_c , è possibile valutare un valore medio di 0.21, mentre per l'indice di rigonfiamento C_s è stato possibile stimare un valore medio di 0.036.

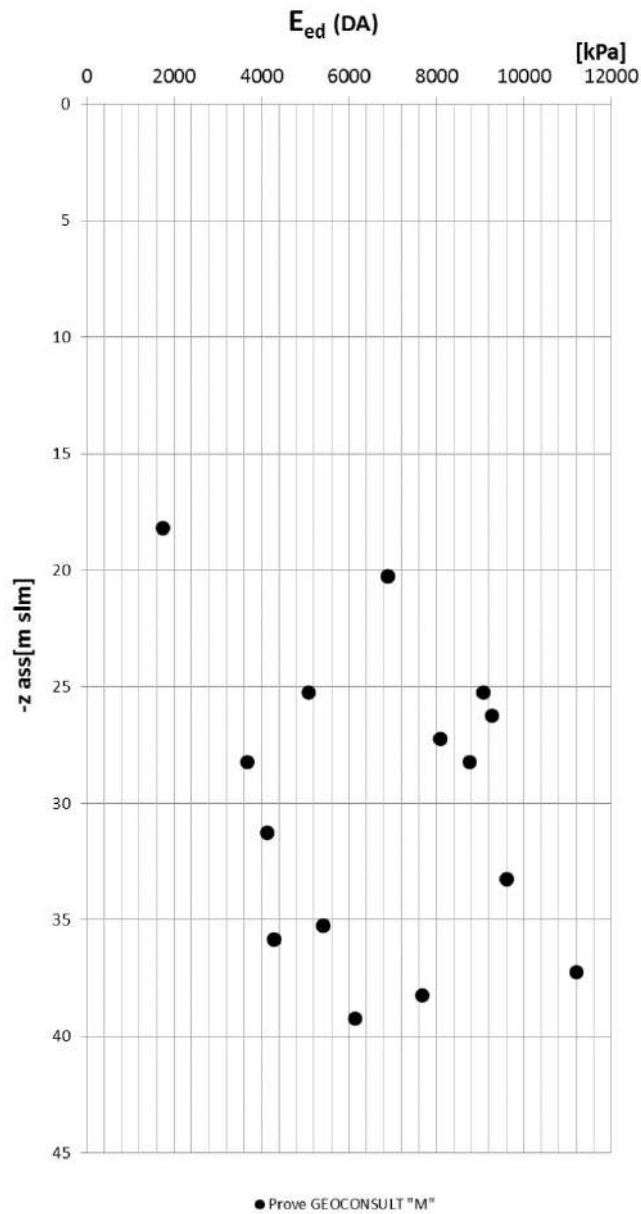


Figura 33 – DA: andamento di E_{ed} con la profondità.

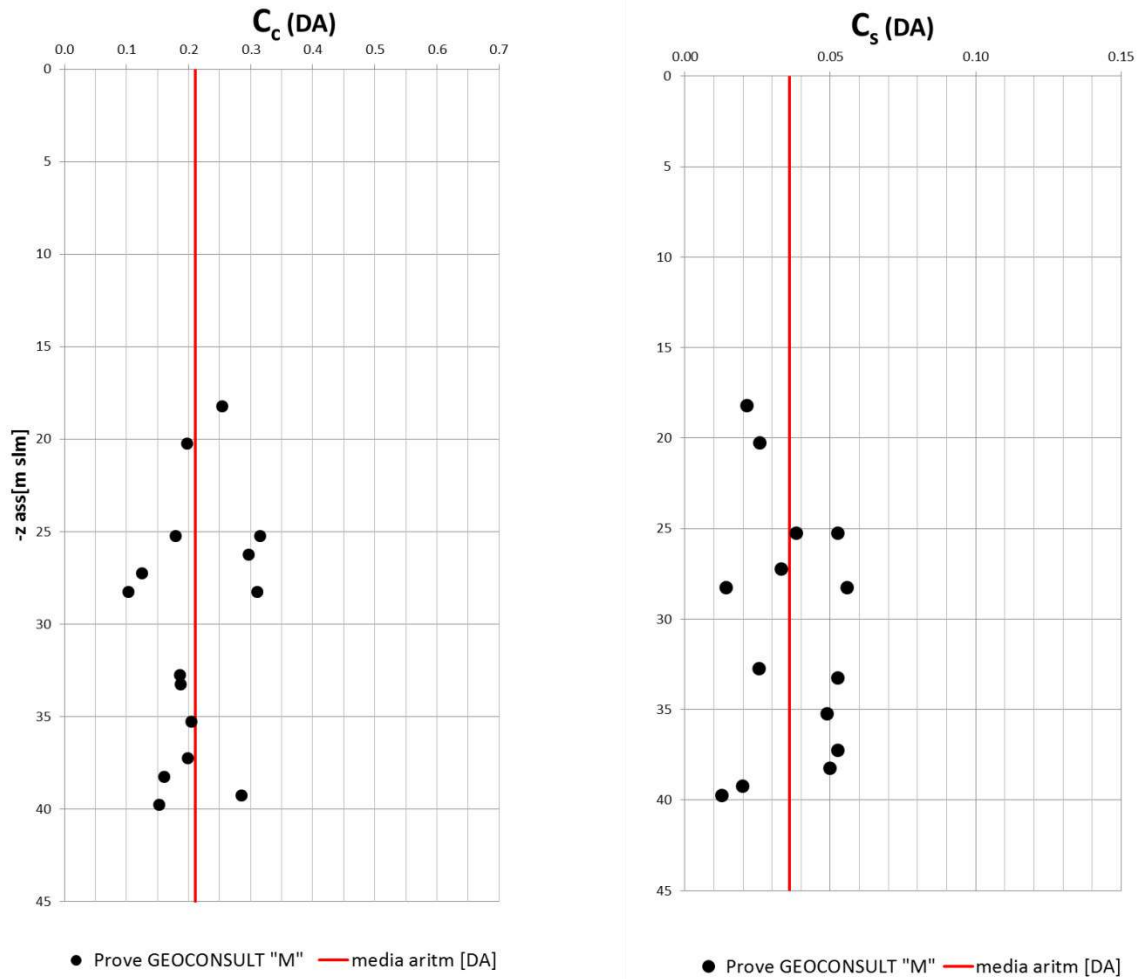


Figura 34 – DA: andamento di C_c e C_s con la profondità.

3.2.2.2 Proprietà idrauliche

La valutazione dei coefficienti di permeabilità e di consolidazione dei depositi limosi, molto variabili in generale rispetto alle condizioni macrostrutturali e microstrutturali del deposito, nonché rispetto alla tipica anisotropia di tali grandezze in termini di geometria del moto di filtrazione (legata essenzialmente alle processi deposizionali del banco), è stata svolta con riferimento alle specifiche prove condotte.

In particolare, per quanto attiene i coefficienti di permeabilità e di consolidazione orizzontali, ci si è riferiti ai risultati delle prove Lefranc e delle prove di dissipazione CPTU, assolutamente rappresentative dei processi di filtrazione orizzontale rispetto allo schema di prova, nonché mutuamente complementari rispetto alla stima delle

permeabilità microstrutturali e macrostrutturali del banco rispetto alla diversa geometria caratteristica dei filtri nelle due tipologie di prova.

Per quanto attiene ai coefficienti di permeabilità e di consolidazione verticali, ci si è riferiti, come noto, alle curve di consolidazione edometrica relative alle prove di laboratorio, valutati rispetto alla tensione litostatica del campione alla profondità di prelievo.

Nelle Figure 35 e 36 sono sintetizzati i risultati ottenuti.

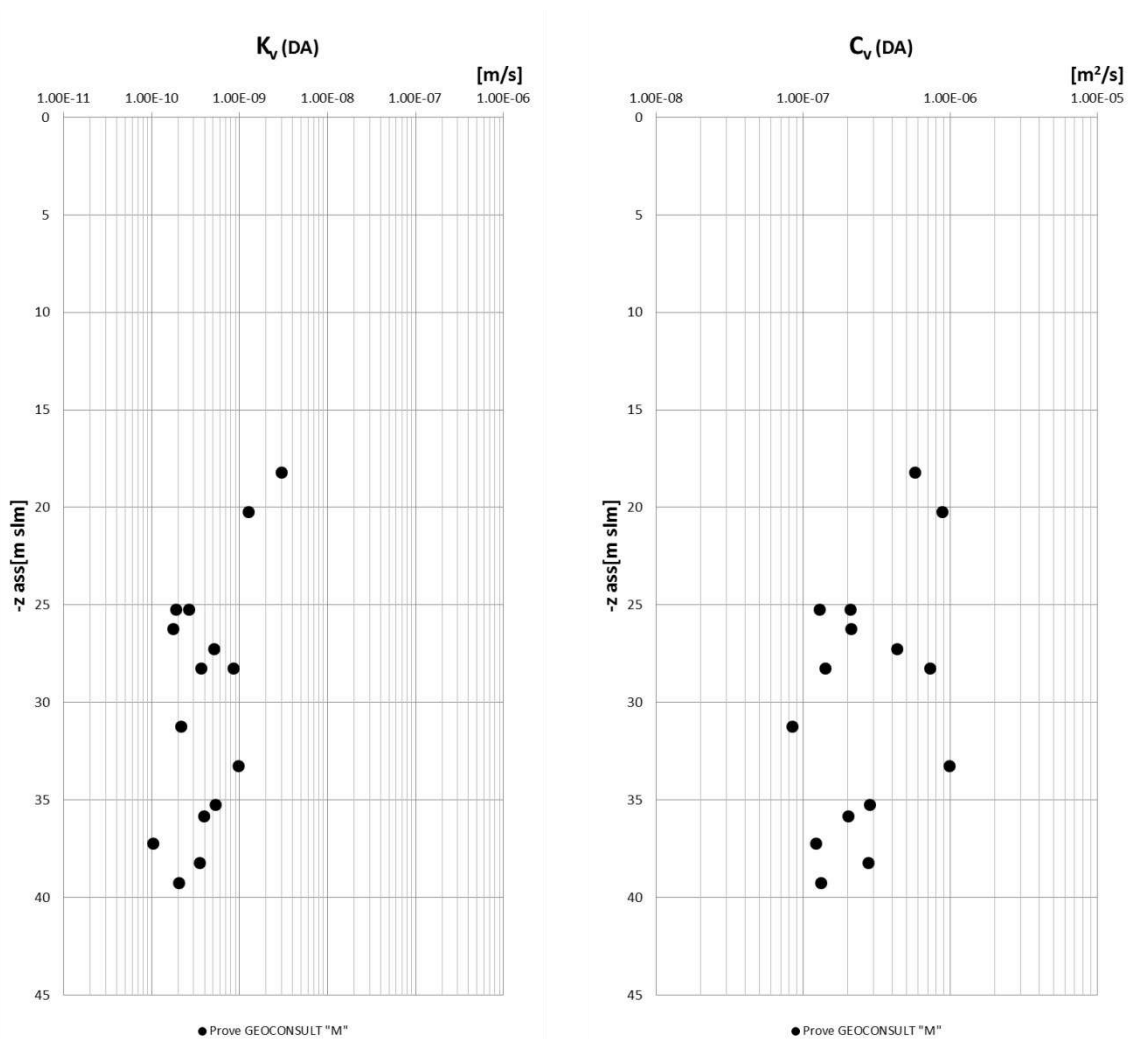


Figura 35 – DA: andamento di K_v e c_v con la profondità.

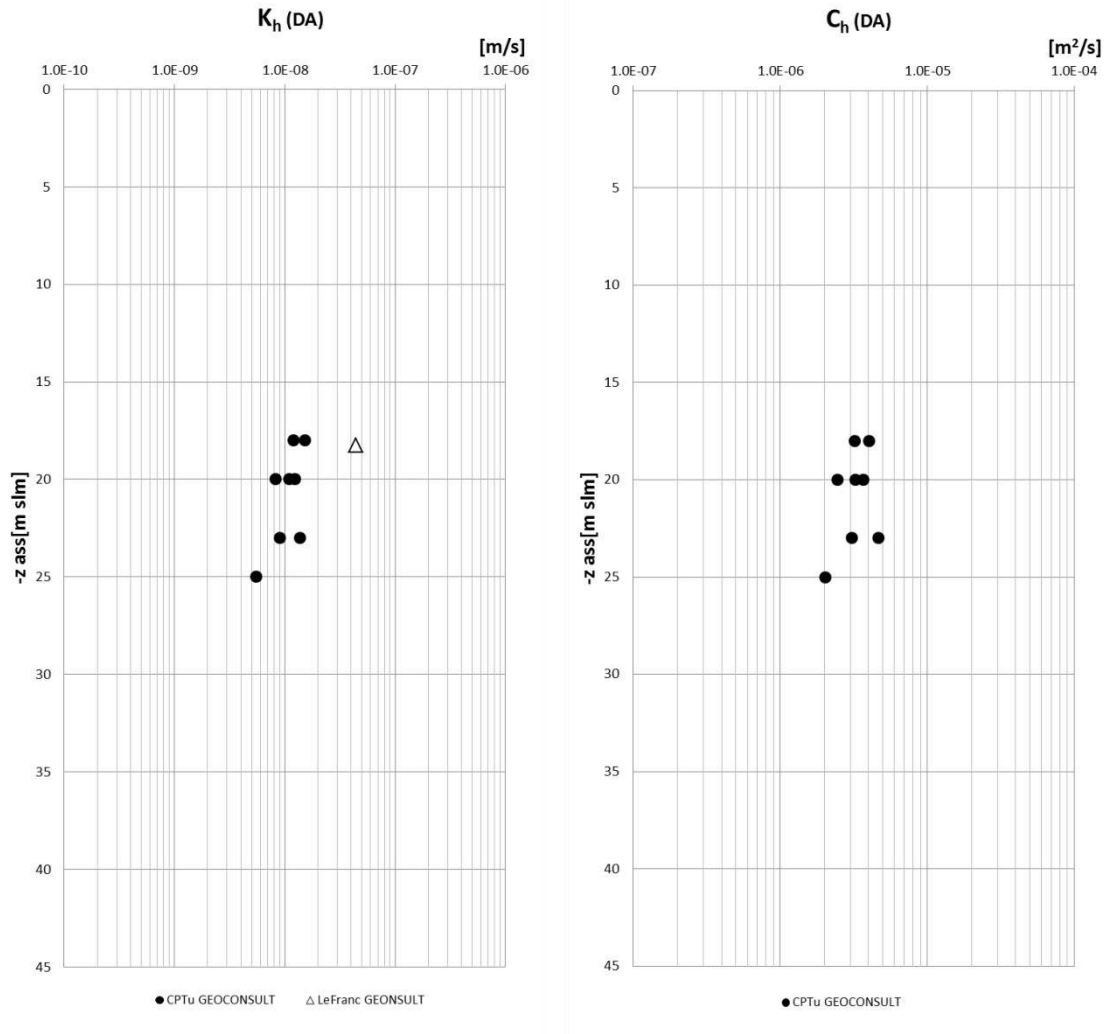


Figura 36 – DA: andamento di K_h e c_h con la profondità.

I valori del coefficiente di permeabilità verticale sono variabili in un range di $3 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, con un valore medio di circa $4.5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Il coefficiente di consolidazione verticale varia in un range di $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ m^2/s , con un valore medio di circa $3.5 \cdot 10^{-7}$ m^2/s .

In direzione orizzontale, il valore del coefficiente di permeabilità si attesta su un valore medio di circa $1.5 \cdot 10^{-8}$ m/s, con una dispersione di dati che varia nel range $5 \cdot 10^{-8}$ - $5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Il coefficiente di consolidazione orizzontale medio può essere stimato in un valore di $3.3 \cdot 10^{-6}$ m^2/s , con un range di oscillazione con la profondità compreso tra $5 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-6}$ m^2/s .

3.2.3 Modello Geotecnico di Sottosuolo per l'area di colmata

Alla luce di tutto quanto riportato nei precedenti paragrafi 3.2.1 e 3.2.2, lo studio dei processi di consolidazione attesi per il corpo di colmata (entità e decorso temporale dei cedimenti attesi) potrà essere svolto con riferimento ai valori dei parametri meccanici e idraulici dei due strati individuati (DLA e DA) riassunti nella seguente Tabella 6.

| Formazione | γ (kN/m ³) | OCR | c' (kPa) | ϕ' (°) | E_{ed} (MPa) | e_0 | C_c | C_s | K_v (m/s) | K_h (m/s) | C_v (m ² /s) | C_h (m ² /s) |
|------------|----------------------------------|-----|---------------|----------------|-------------------|-------|-------|-------|----------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| DLA | 18 | 1 | 13 | 24 | 0.5-3.0 | 1.25 | 0.29 | 0.054 | $2.0 \cdot 10^{-9}$ | $2.0 \cdot 10^{-7}$ | $2.8 \cdot 10^{-7}$ | $4.8 \cdot 10^{-6}$ |
| DA | 19 | 7 | 25 | 25 | 5-15 | 0.83 | 0.21 | 0.036 | $4.5 \cdot 10^{-10}$ | $1.5 \cdot 10^{-8}$ | $3.5 \cdot 10^{-7}$ | $3.3 \cdot 10^{-6}$ |

Tabella 6. Modello di sottosuolo dell'area di colmata per il progetto esecutivo.

3.3 MARGINAMENTO A TERRA

Al fine di isolare idraulicamente la cassa di colmata dall'ambiente circostante, il Progetto prevede l'esecuzione di diaframmi plastici di conterminazione a terra ammorsati per almeno due metri nei depositi argillosi DA, associati ad un substrato praticamente impermeabile.

Rispetto a quanto riscontrato nell'ambito della campagna di indagini geognostiche condotte a terra, lungo i due assi del marginamento a terra della cassa di colmata (profili litostratigrafici C-D e D-E in Figura 37) i depositi DLA, DLS e DA sono sovrastati da un potente deposito di materiale di origine antropica fortemente eterogeneo, costituito da elementi di natura e dimensioni molto differenti, e caratterizzato da spessori molto variabili lungo i due assi.

Rispetto ai profili stratigrafici a terra disponibili dal Progetto Definitivo, basati essenzialmente su N.4 sondaggi, distribuiti sull'intero sviluppo longitudinale del marginamento, si rese necessario, fin dalle prime valutazioni di progetto della campagna di indagini geognostiche a supporto della progettazione esecutiva, in accordo con le specifiche di CSA di Progetto Definitivo, e secondo il programma condiviso con Autorità Portuale e Direzione Lavori, di incrementare il livello di approfondimento delle indagini a terra con l'obiettivo principale di ricostruire un modello stratigrafico puntuale, con particolare riferimento:

- alla ricostruzione accurata dell'andamento del contatto tra i depositi antropici e i terreni naturali in posto (al fine di determinare lo spessore delle bonifiche da porre in opera per la realizzazione dei diaframmi);
- alla ricostruzione accurata dell'andamento del contatto tra i depositi limosi (DLA, DLS) e le argille DA (al fine di determinare con esattezza l'approfondimento della barriera di conterminazione).



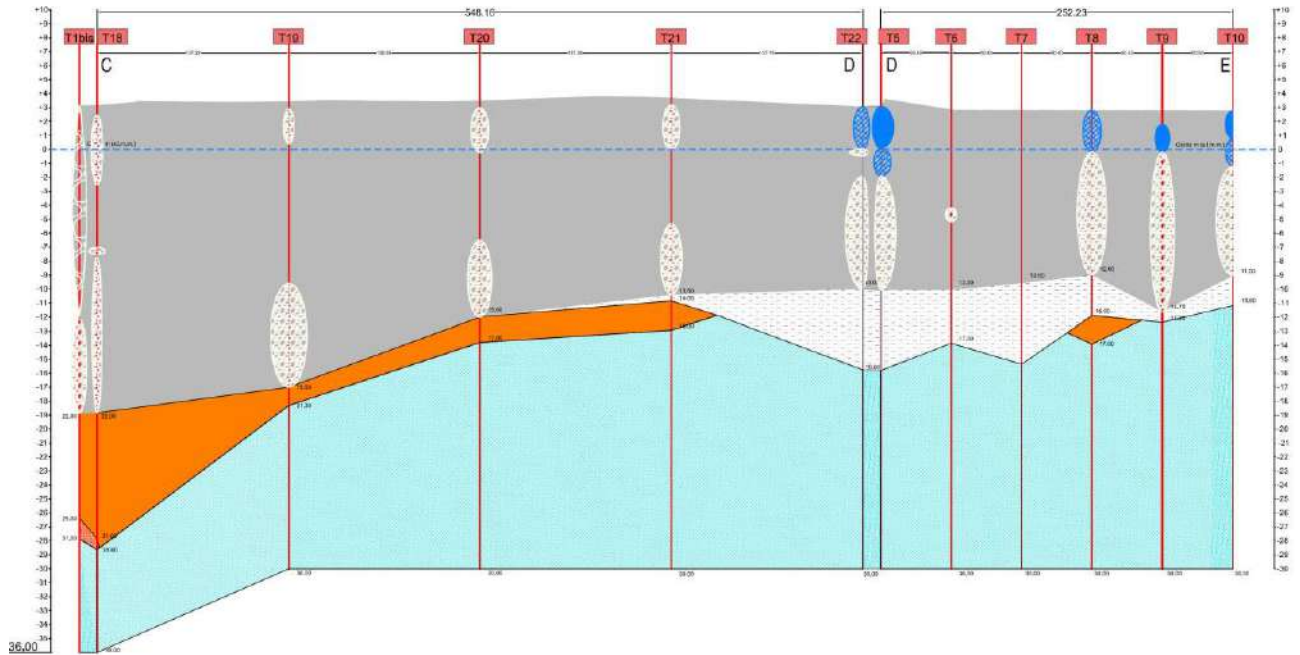
Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

L'area è stata, quindi, indagata attraverso N.16 perforazioni a carotaggio continuo distribuite lungo gli assi del marginamento, nell'ambito delle quali sono stati prelevati N.38 campioni indisturbati e N.4 campioni rimaneggiati per le prove di laboratorio geotecniche; sono stati inoltre prelevati N.24 campioni per analisi ambientali.



LEGENDA

PERFORAZIONI:

T Campagna Astaldi maggio - luglio 2015

STRATIGRAFIA RICAVATA DAI SONDAGGI










- | | |
|---|---|
|  Materiale di riempimento eterogeneo |  Deposito limoso - argilloso |
|  Materiale di riempimento eterogeneo con presenza di blocchi calcarei |  Deposito sabbioso - limoso |
|  Materiale di riempimento eterogeneo con presenza di clottoli calcarei |  Deposito ghiaioso |
|  Tracce di loppa |  Argille |
|  Loppa | |

Figura 37 – Profili geologici lungo gli assi del marginamento a terra (CD-DE)

Rispetto alla ricostruzione riportata nei profili stratigrafici, la profondità di imposta dei depositi antropici è stata individuata a profondità variabile tra -12 e -22 m s.l.m., mentre il tetto delle argille (unità DA) è stato individuato a profondità variabili tra -15 e -31 m s.l.m. Tali evidenze, soprattutto per quanto attiene alle elevate profondità riscontrate per il tetto delle argille in corrispondenza del vertice C della cassa di colmata, sono risultate piuttosto diverse dalle ricostruzioni basate sui dati disponibili in ambito di Progetto Definitivo che individuavano l'imposta dei riporti antropici a profondità comprese tra -10 e -16 m s.l.m. e il tetto delle argille a profondità comprese tra

-19 e -22 m s.l.m. (cfr. Elab. Progetto Definitivo - PUG102_PDEG012b_0). Tali risultanze hanno comportato le necessità di apportare alcuni correttivi di ordine tecnico e tecnologico rispetto alla realizzazione del marginamento a terra, descritte nell'ambito degli specifici elaborati, a cui si demanda.

Rispetto ai parametri geotecnici derivati dall'interpretazione delle prove geotecniche eseguite sui campioni prelevati, in virtù della funzione meramente impermeabilizzante dei diaframmi in progetto, è evidente come la caratteristica di maggiore interesse dei terreni rinvenuti sia la permeabilità.

Rispetto a tale grandezza, risulta opportuno precisare che, in ambito di Progetto Esecutivo non sono state eseguite specifiche prove di permeabilità in sito nell'area a terra. Le valutazioni sviluppate in ambito di Progetto Definitivo, infatti, con particolare riferimento alla bassissima permeabilità intrinseca della formazione argillosa DA, basate su un congruo numero di dati da prove di permeabilità a terra, nonché confrontate con la ricca bibliografia disponibile, e i relativi vincoli progettuali (CdS, Pareri, etc.) imposti per l'ammorsamento idraulico dei diaframmi plastici, non sono state ritenute oggetto di ulteriore approfondimento.

Ad integrazione di tutti i dati disponibili al riguardo in sede di Progetto Definitivo a base gara, al quale si rimanda per ogni dettaglio, si riportano i valori di permeabilità ricavati dalle curve di consolidazione ricavate dalle prove edometriche eseguite sui campioni prelevati (Figura 38). Tali dati, seppur poco rappresentativi rispetto alle specifiche modalità di prova, confermano valori molto bassi delle permeabilità dei terreni argillosi.

**Autorità Portuale di Taranto**

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

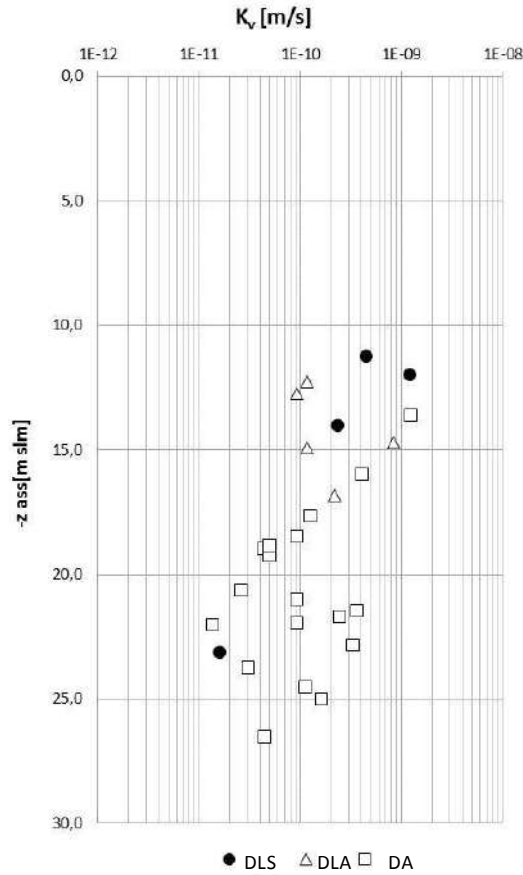


Figura 38 – Profili di permeabilità da prove edometriche eseguite sui campioni prelevati a terra.

Per completezza, nelle Figure 39-40-41-42 sono riportate le principali proprietà fisiche e dei parametri di compressibilità e resistenza determinati attraverso le prove di laboratorio sui campioni prelevati a terra.

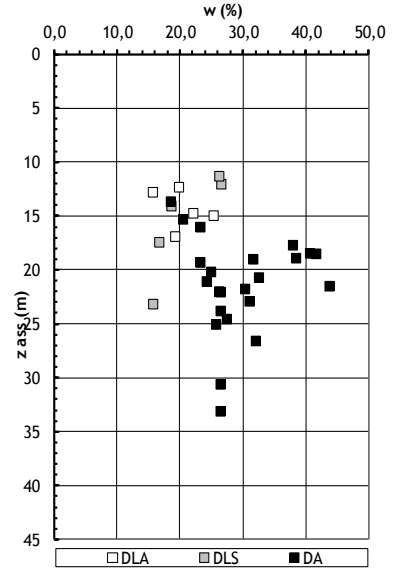
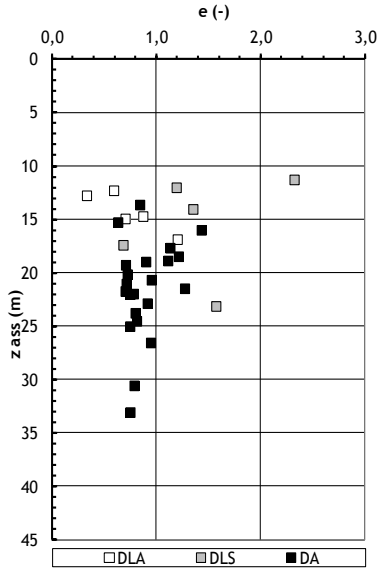
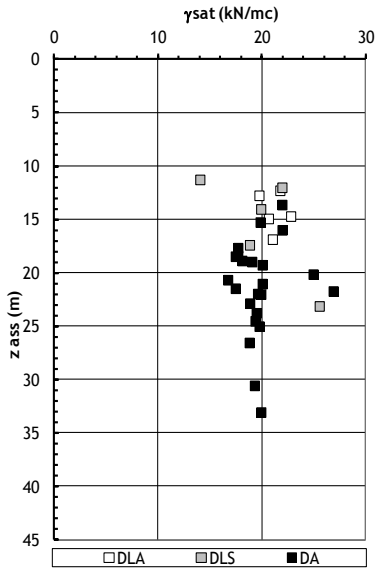
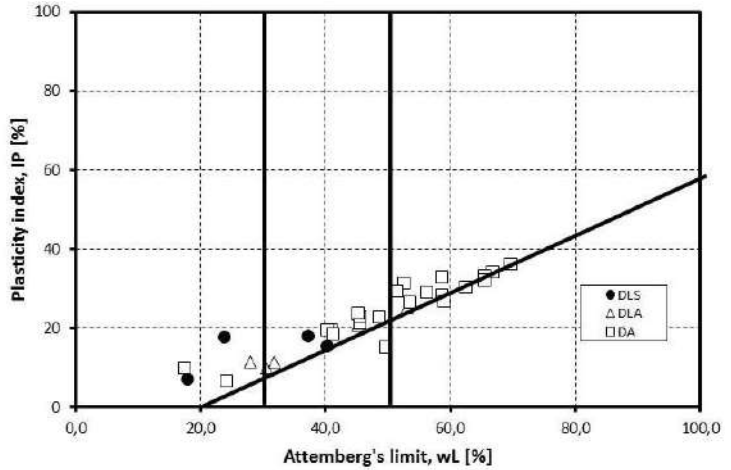
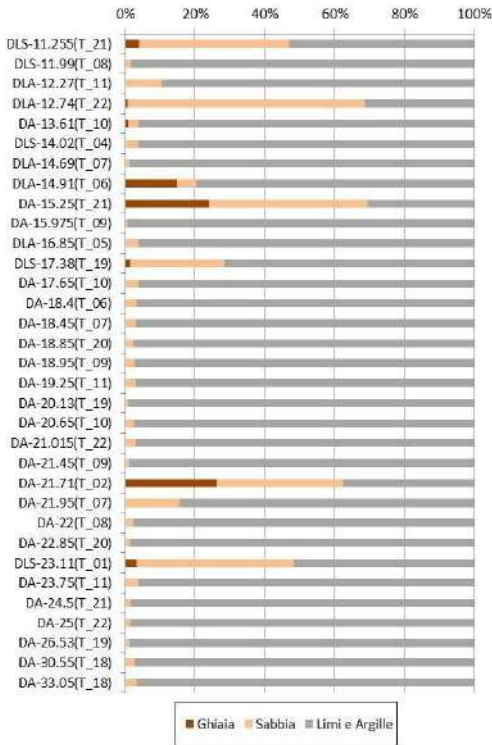


Figura 39 – Variazione con la profondità delle principali proprietà fisiche dei campioni prelevati a terra.

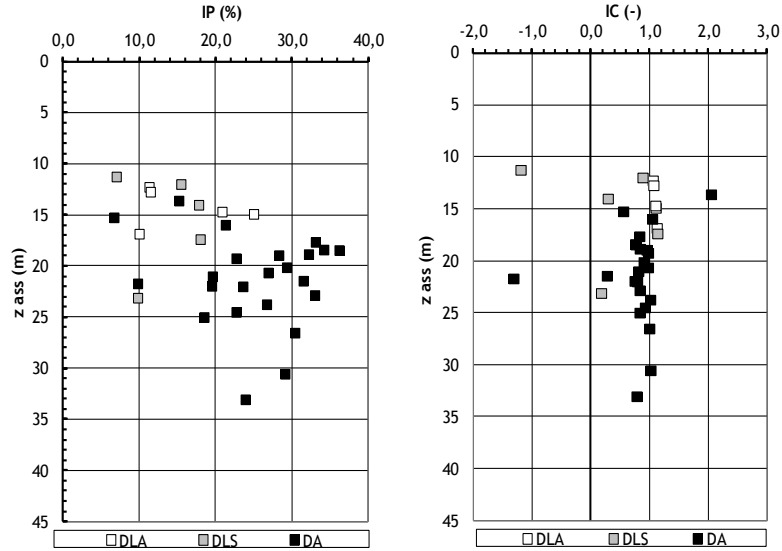


Figura 40 – Variazione con la profondità dell'indice plastico e dell'indice di consistenza dei campioni prelevati a terra.

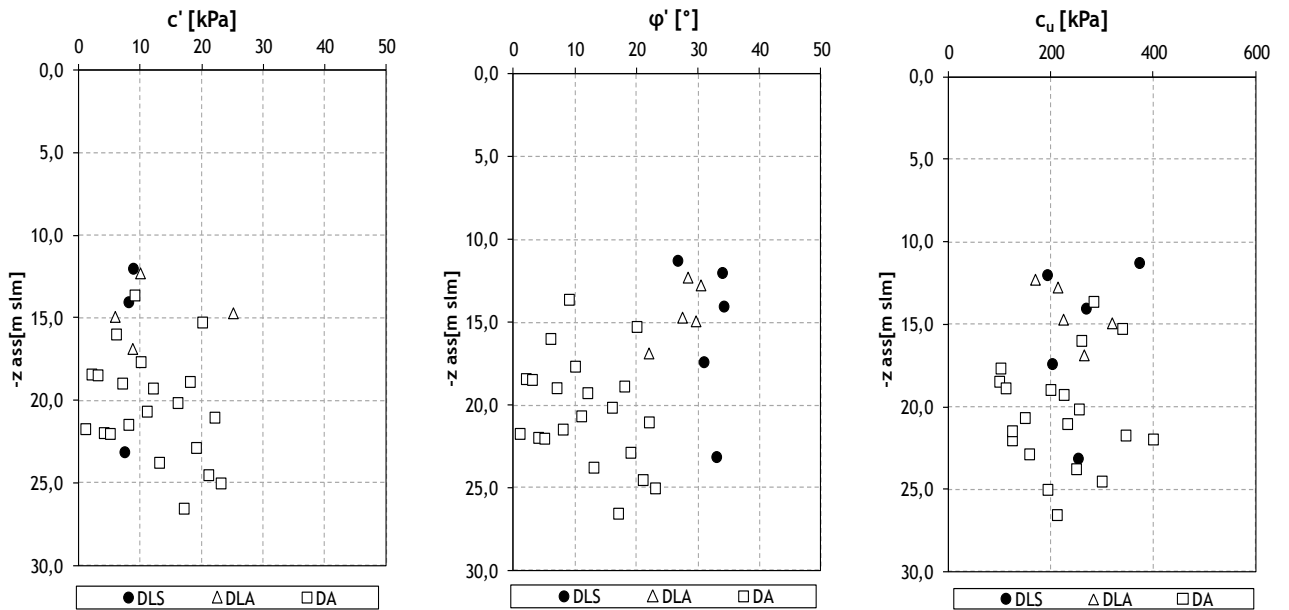


Figura 41 – Variazione con la profondità dei parametri di resistenza dei campioni prelevati a terra.

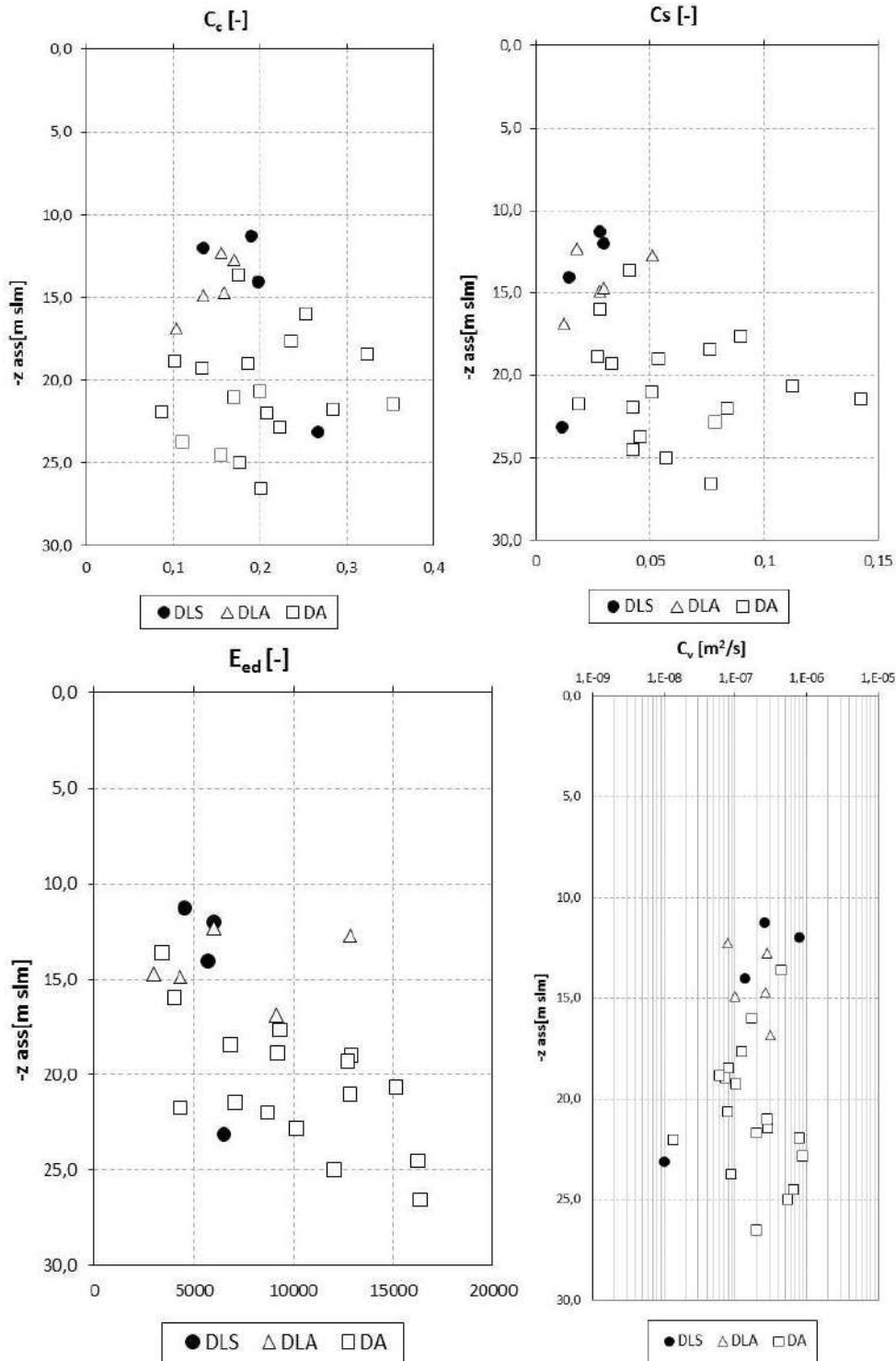


Figura 42 – Variazione con la profondità dei parametri di compressibilità dei campioni prelevati a terra.

3.4 AREA DI DRAGAGGIO

Le indagini propedeutiche al Progetto Esecutivo hanno previsto l'esecuzione nell'area di dragaggio di un rilievo batimetrico, di un rilievo stratigrafico e di perforazioni di sondaggio, spinte fino a circa 20 m di profondità, con prelievo di campioni da sottoporre a prove geotecniche di laboratorio.

Occorre precisare che le suddette indagini non erano state inizialmente preventivate in quanto la campagna geognostica propedeutica alla progettazione esecutiva, in linea con quanto prescritto al Capo 16 - Parte Seconda del CSA del Progetto Definitivo e secondo il programma condiviso con Autorità Portuale e Direzione Lavori (Relazione tecnico-illustrativa delle indagini propedeutiche, Elab. n.PUG102-PE-GET-IG-00-00-IN-01-A), prevedeva, in termini di indagini relative all'area di dragaggio in area Molo Polisettoriale, solo i rilievi batimetrici.

Con riferimento ai dati disponibili in ambito di Progetto Definitivo, in corrispondenza della darsena polisettoriale risultavano eseguiti meramente indagini di tipo ambientale, condotte mediante vibrocarotiere e spinte fino a profondità non superiori ai primi 3 metri di profondità dal fondale.

Al fine di approfondire il quadro di conoscenze del Progetto Definitivo, Astaldi ha ritenuto opportuno, dandone comunicazione a DLL ed AP, di eseguire tre sondaggi lungo lo sviluppo dell'area da dragare (S01 ÷ S03 spinti fino a quota -18.00).

L'esame delle carote ottenute da tali perforazioni ha evidenziato la presenza di depositi argillosi, il che ha reso necessario approfondire ulteriormente le conoscenze al fine di rendere una mappatura completa e puntuale dell'intero volume da dragare.

È stata pertanto condotta una campagna geognostica mirata, incrementato il numero dei riscontri diretti (complessivamente 20 sondaggi S01 ÷ S20), prelevando campioni rappresentativi delle diverse litologie per le prove in laboratorio ed eseguendo i rilievi stratigrafici.

Sulla base di due campagne di rilievo geomorfologico, eseguite nell'ambito delle indagini propedeutiche al Progetto Esecutivo lungo una serie di transetti (Figura 43) mediante SUB-bottom profiler opportunamente tarato rispetto a 20 verticali di sondaggio precedentemente indagate, è stato possibile ricostruire un modello stratigrafico tridimensionale dell'area di dragaggio.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

 Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

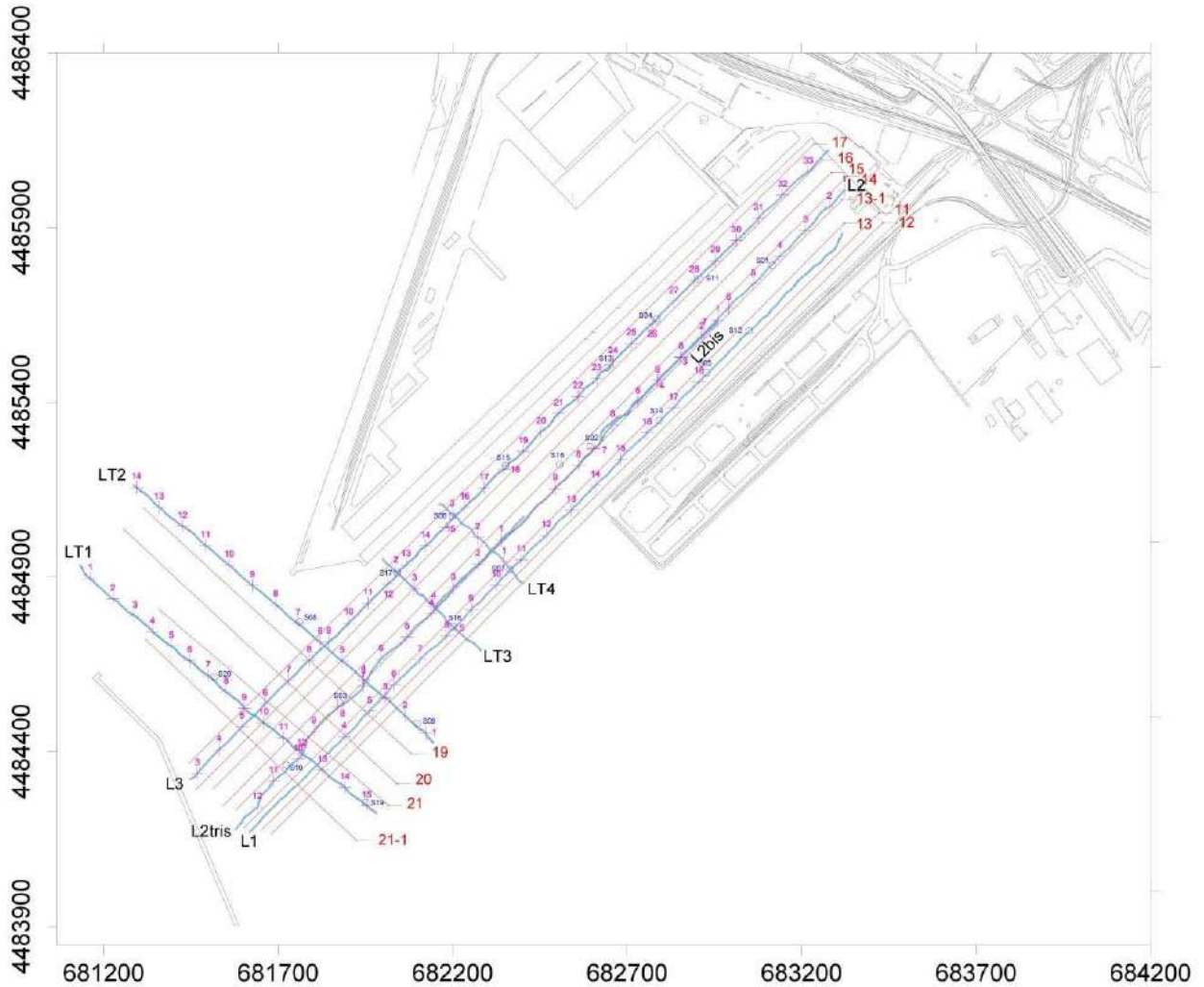


Figura 43 – Planimetria indagini area di dragaggio e allineamenti SUB-bottom profiler

In Figura 44 si riporta la ricostruzione del tetto delle argille per curve “iso-altimetriche”. La porzione di fondale argilloso interessato dallo scavo è stata evidenziata in grigio, con tonalità sempre più scura al crescere delle quote altimetriche e, conseguentemente, dello spessore di volume da dragare.

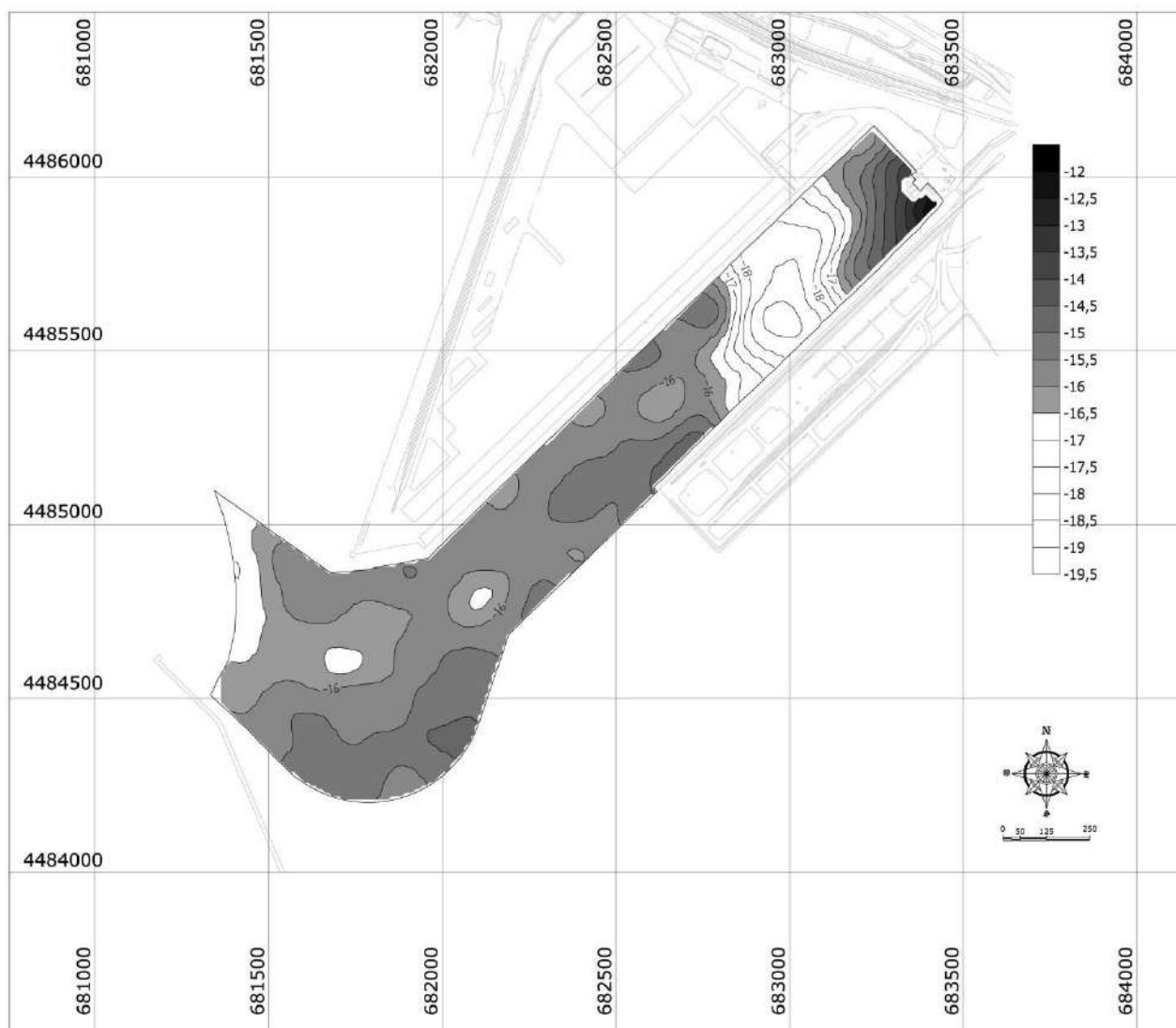


Figura 44 - Ricostruzione del tetto delle argille

Nelle Figure 45-46-47-48-49-50 si riportano alcune sezioni orizzontali del modello stratigrafico dei terreni di fondale (eseguite rispetto a piani di giacitura paralleli dalla quota -12,50 alla -16,50 m s.l.m.), nelle quali è rappresentata la natura dei terreni che saranno interessati con il progressivo approfondimento degli scavi. Si osservi in particolare come negli ultimi 50 cm di approfondimento (dalla quota -16,00 a -16,50 m s.l.m.), praticamente quasi l'intero volume di dragaggio – a meno di una zona limosa all'interno della darsena - sia costituito da argilla.

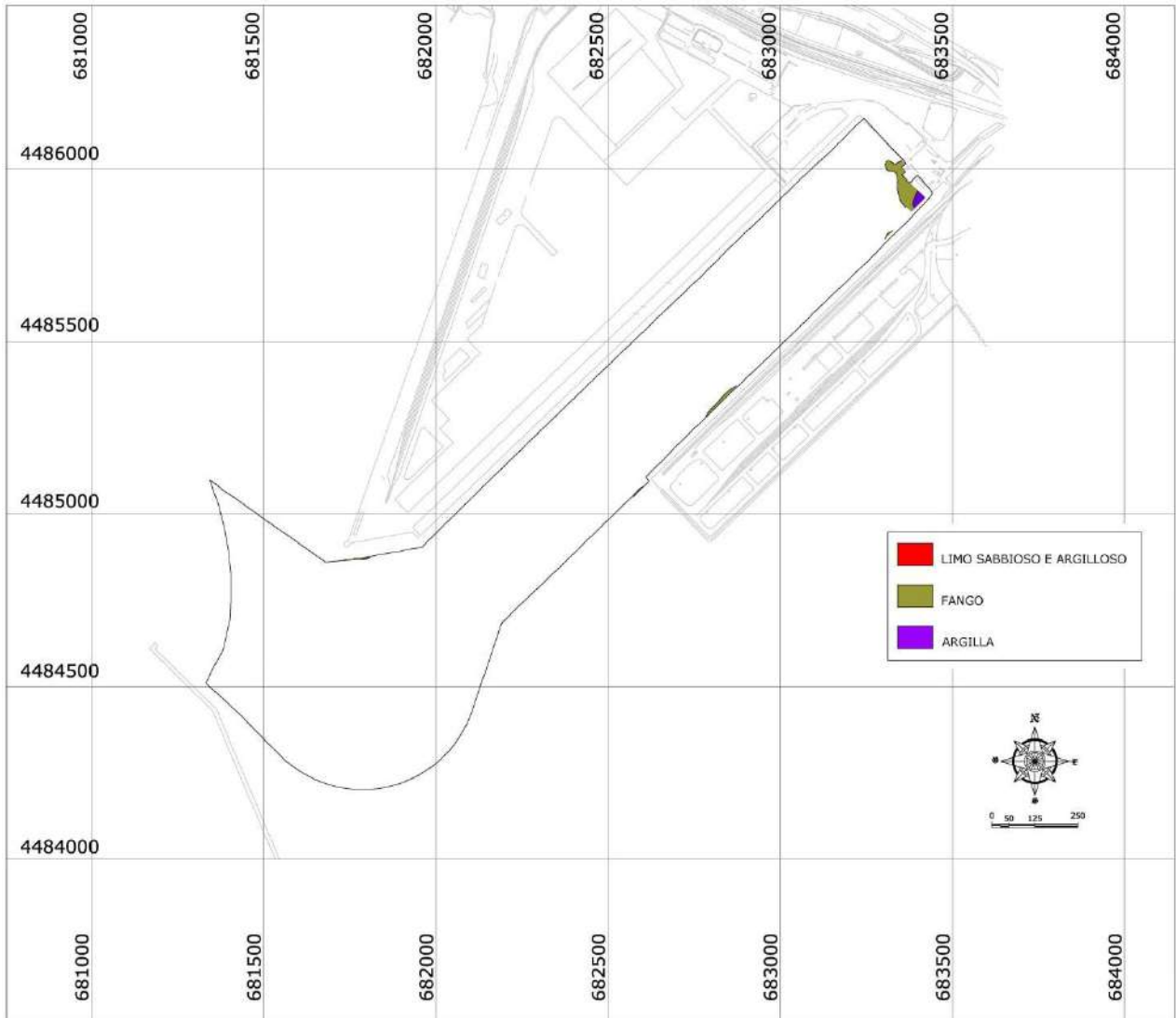


Figura 45 – Sezione stratigrafica alla quota -12,50 m s.l.m.

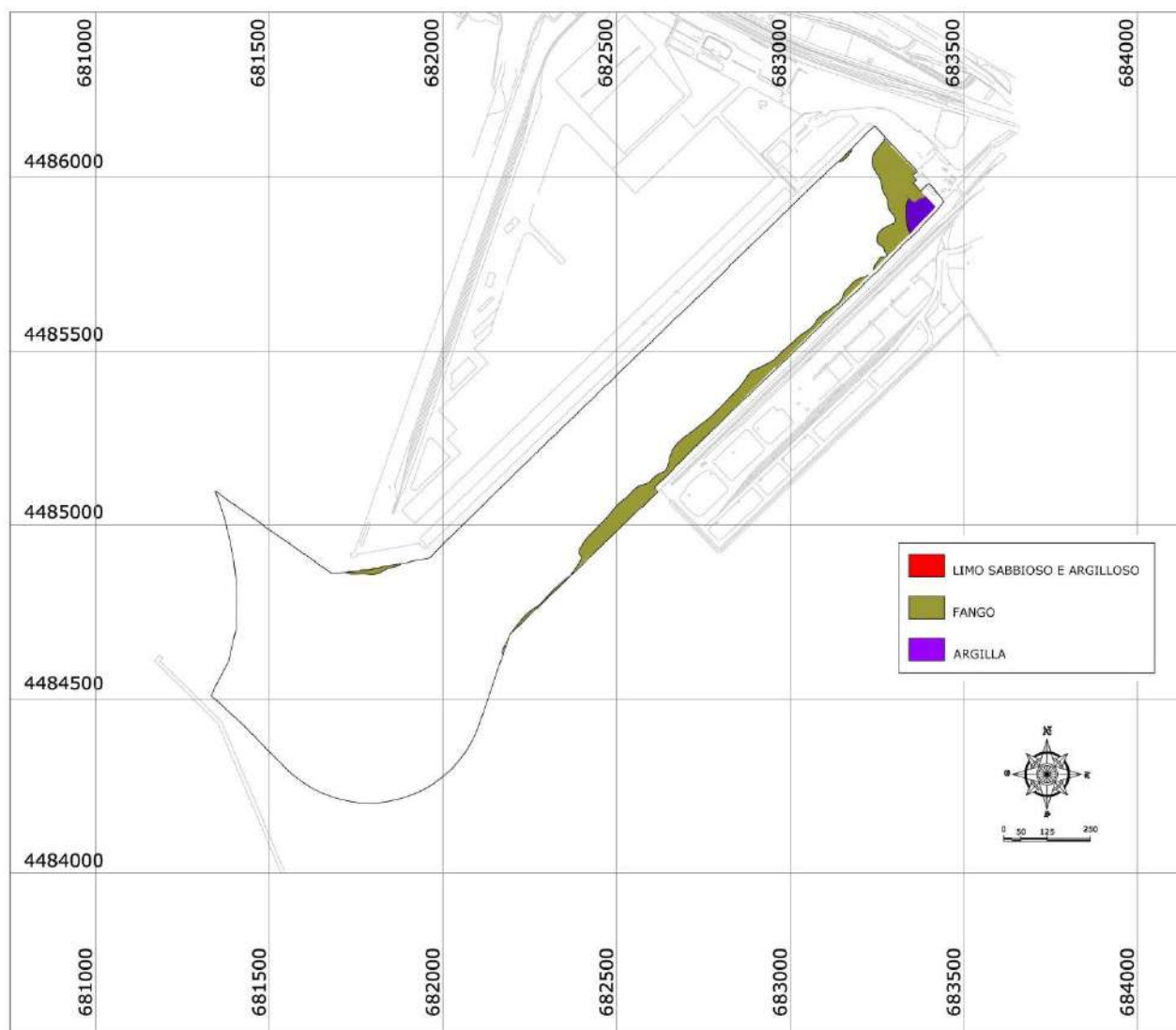


Figura 46 – Sezione stratigrafica alla quota -13,50 m s.l.m.

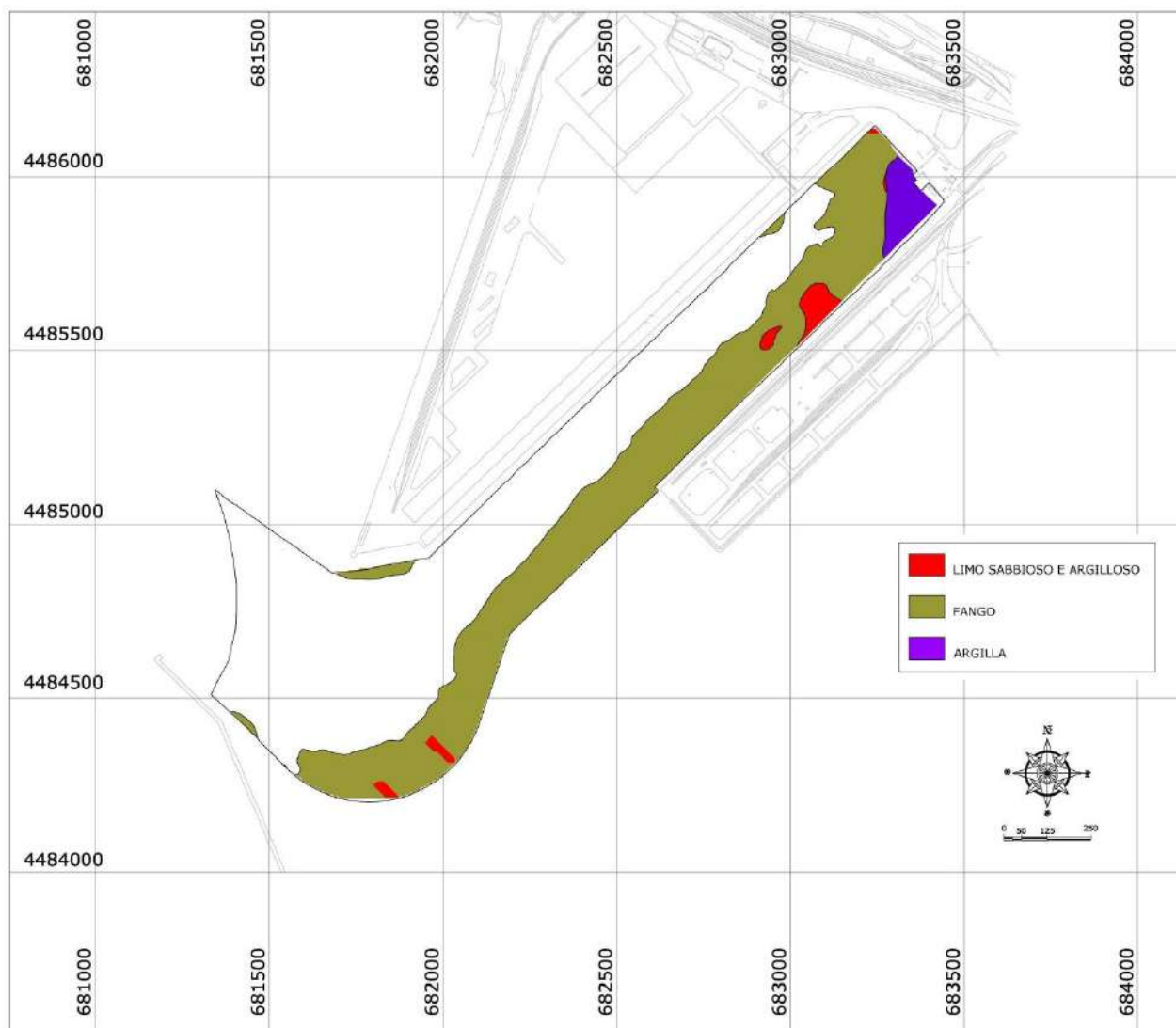


Figura 47 – Sezione stratigrafica alla quota -14,50 m s.l.m.

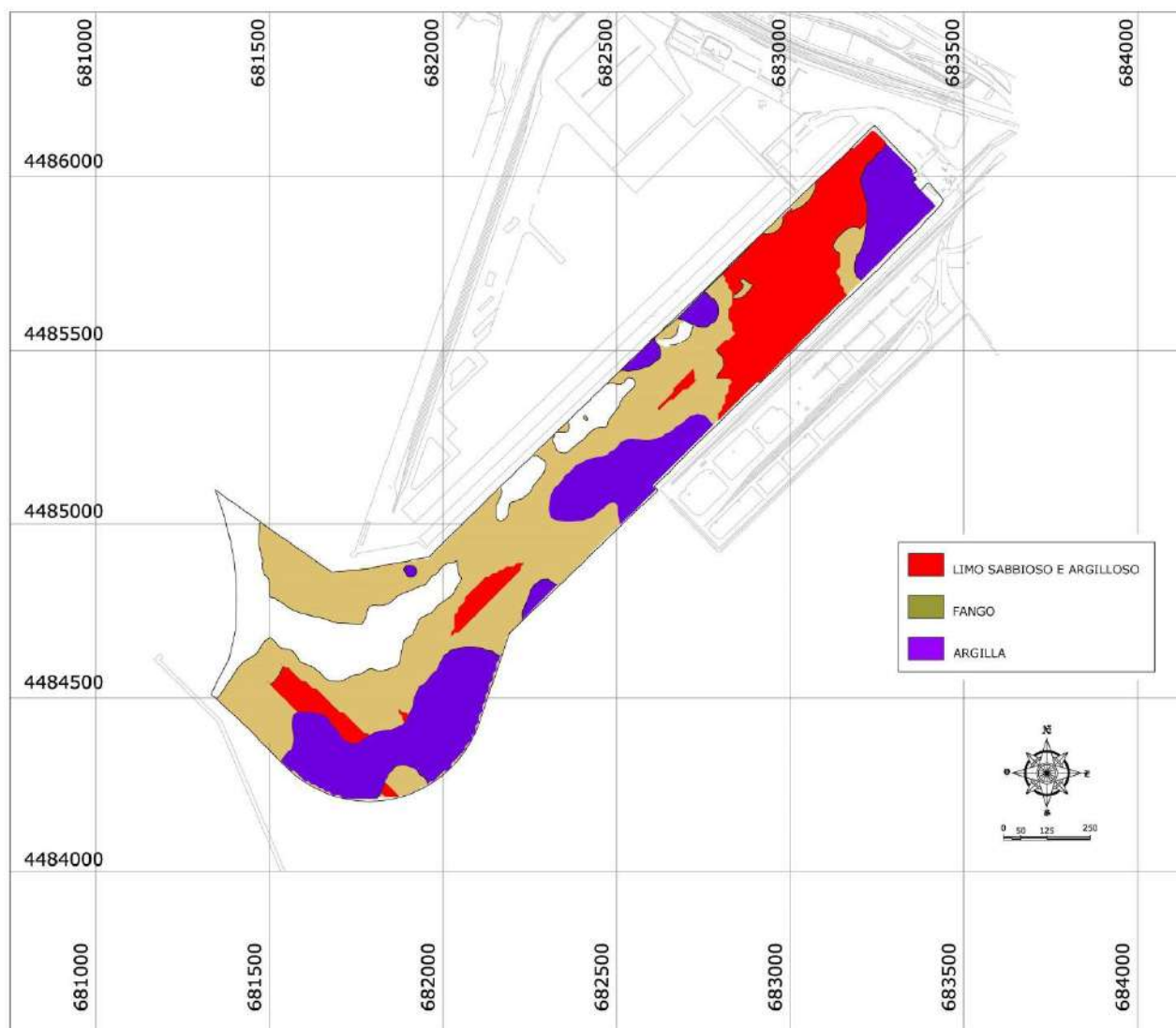


Figura 48 – Sezione stratigrafica alla quota -15,50 m s.l.m.

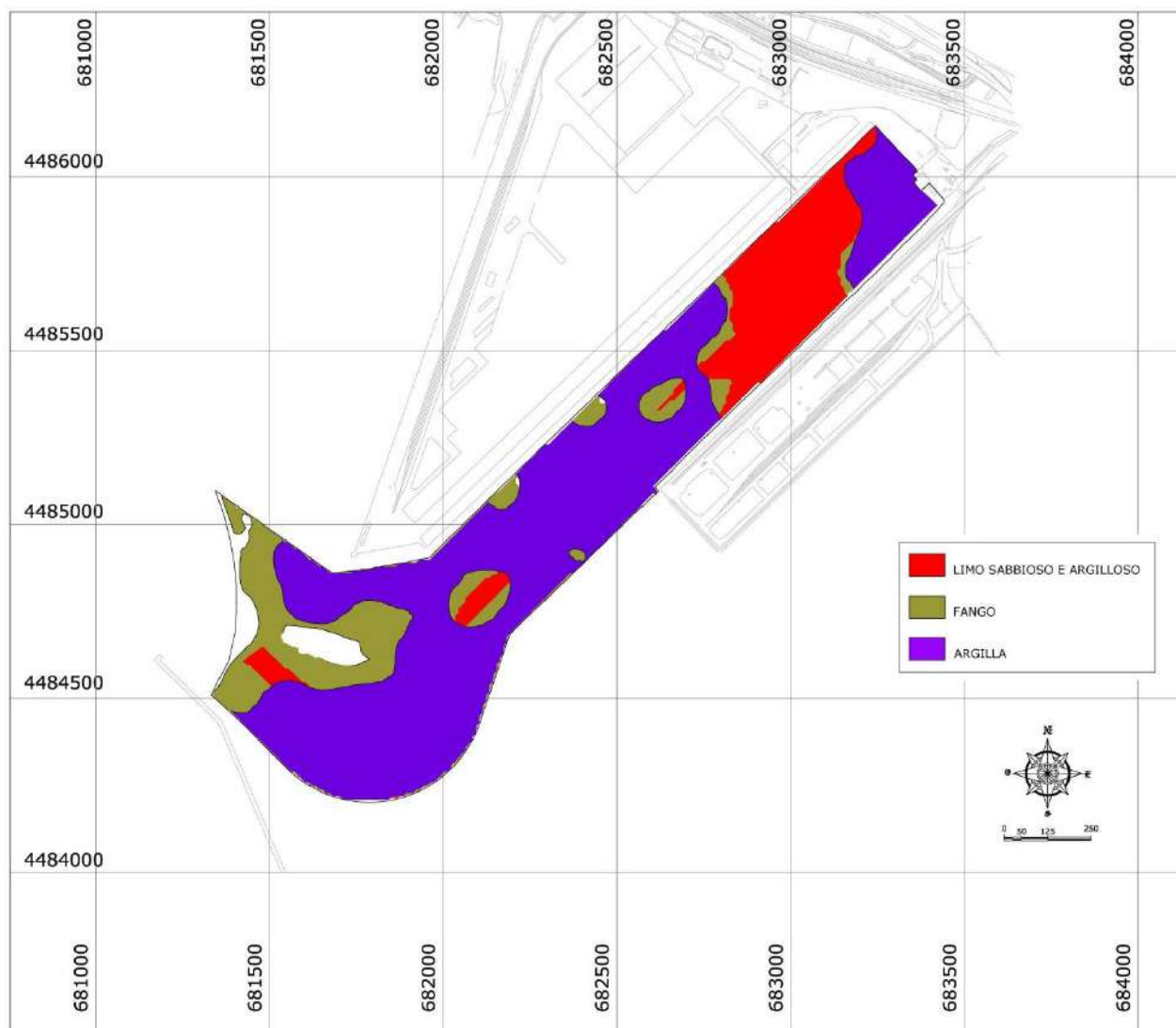


Figura 49 – Sezione stratigrafica alla quota -16,00 m s.l.m.

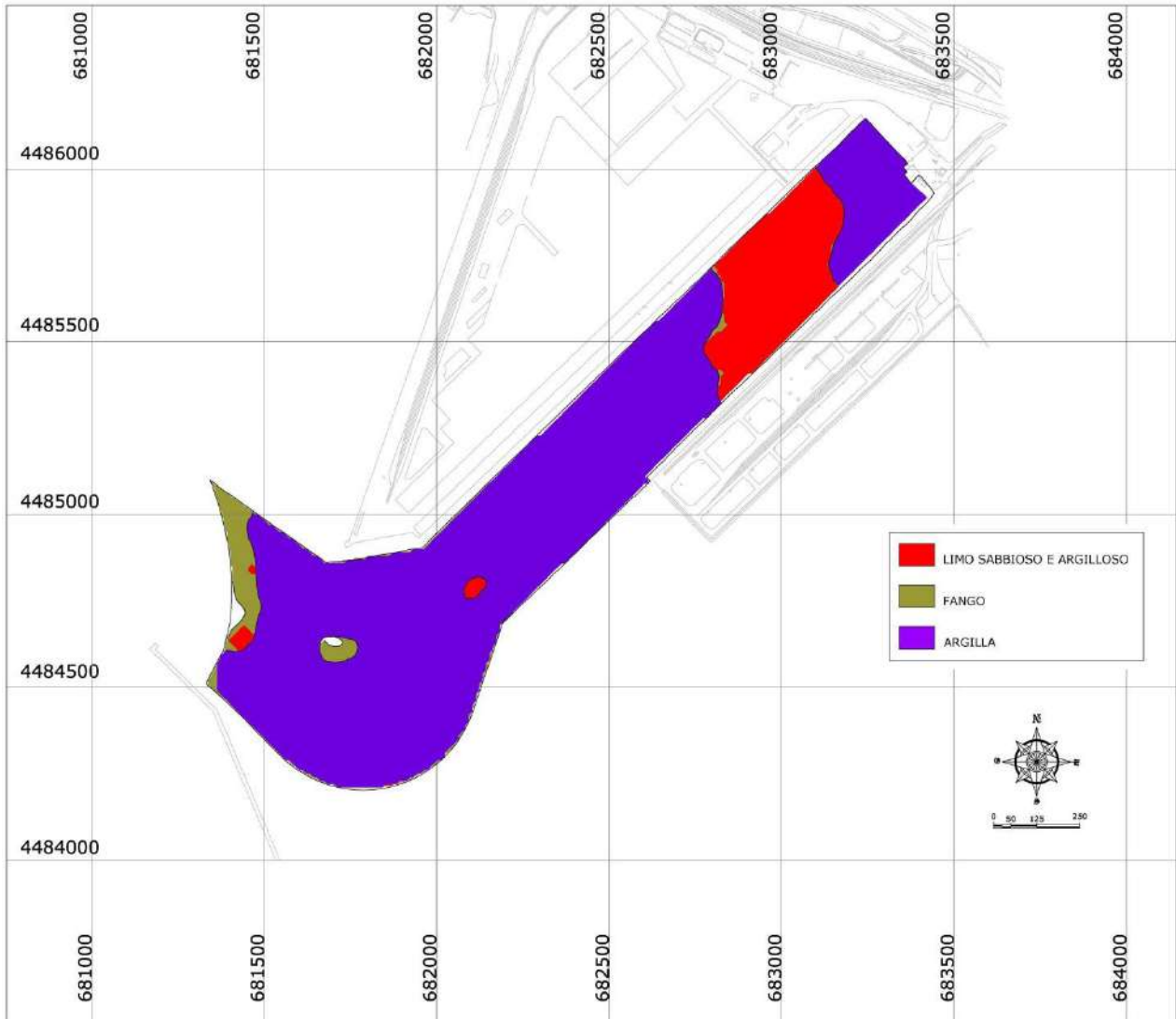


Figura 50 – Sezione stratigrafica alla quota -16,50 m s.l.m.

Il dato saliente che emerge, quindi, sulla base delle indagini eseguite, consiste nel fatto che l'area del Polisettoriale, rispetto alle quote da dragare, è caratterizzata essenzialmente dalla presenza di depositi argillosi (unità DA) affioranti in minima parte, ricoperti da spessori variabili ma comunque piuttosto limitati (dell'ordine di un paio di metri) di depositi fangosi e limi sabbiosi ed argillosi.

Ciò è in contrasto con quanto indicato nella Relazione Geotecnica del Progetto Definitivo (PUG102_PDED008_REV. 0), con particolare riferimento alla tabella di riepilogo dei risultati delle prove di laboratorio effettuate sui campioni ottenuti dai sondaggi in area di dragaggio, nella quale i terreni da dragare

erano caratterizzati con litotipi limo-sabbiosi, a meno di una superficie di area limitata (circa 15.000 mq, tra i sondaggi S005-S006-S007) in cui si segnalava la presenza in affioramento del substrato argilloso.

Nelle Figure 51 e 52 si riportano le principali proprietà fisiche e i parametri di resistenza determinati in laboratorio sui campioni prelevati nell'area di dragaggio nell'ambito dei depositi limosi al tetto delle argille consistenti di base.

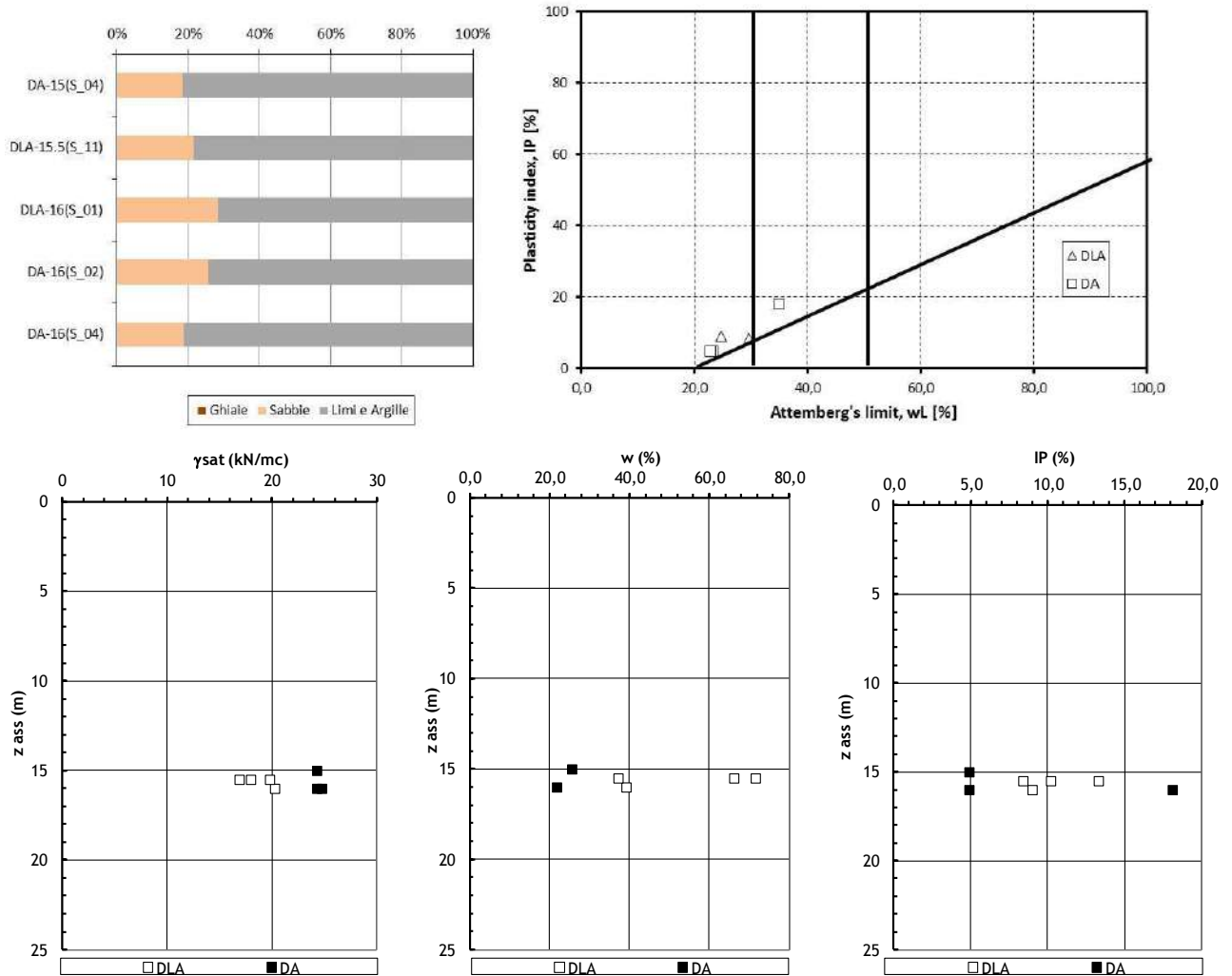


Figura 51 – Proprietà fisiche determinate in laboratorio sui campioni prelevati in area di dragaggio.

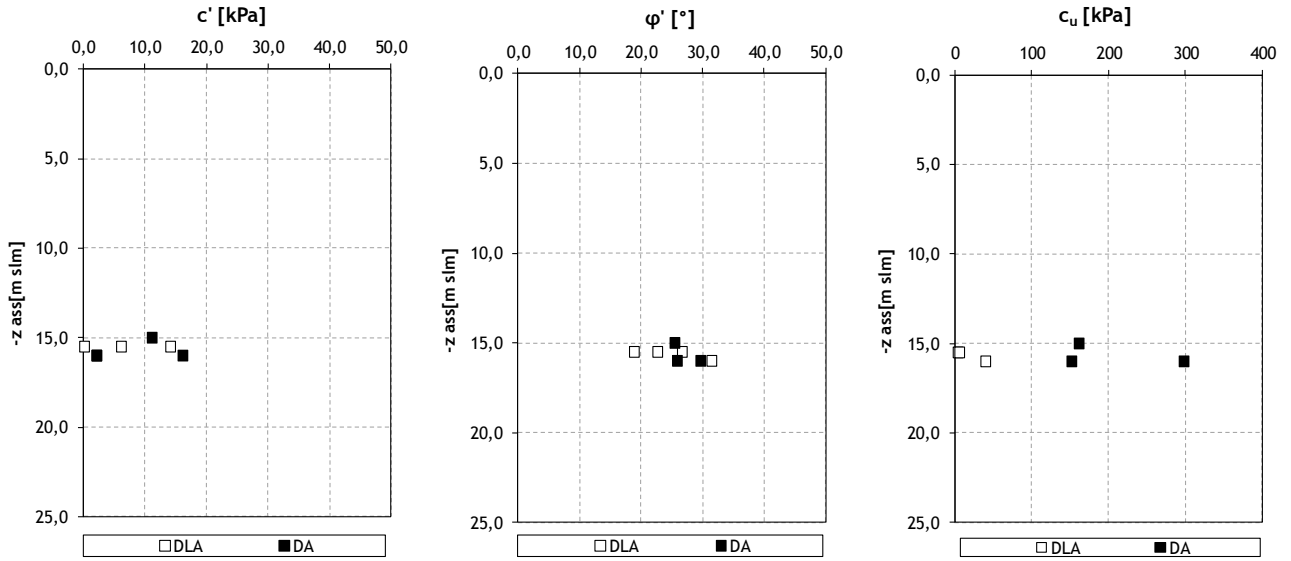


Figura 52 – Variazione con la profondità dei parametri di resistenza dei campioni prelevati in area di dragaggio.

4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente relazione sono stati presentati e discussi i principali risultati della campagna di indagini eseguita nell'area di intervento nel periodo maggio-settembre 2015 a supporto della progettazione esecutiva degli *Interventi per il dragaggio di 2,3 Mm³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto*.

Rimandando ai diversi paragrafi per quel che concerne gli aspetti di dettaglio circa i risultati delle indagini e la loro relativa interpretazione in termini di parametri fisici, meccanici ed idraulici dei terreni rinvenuti nei diversi ambiti di intervento (3.1 per il marginamento a mare; 3.2 per l'area di colmata; 3.3 per il marginamento a terra; 3.4 per l'area di dragaggio), il quadro complessivo che è emerso ha evidenziato alcune significative differenze rispetto alle informazioni disponibili nella Relazione Geotecnica (PUG102PDED008_rev. 0) a corredo del Progetto Definitivo a base gara.

Con riferimento alle **opere di marginamento a mare**, è emersa una **situazione stratigrafica diversa** in conseguenza di:

- una quasi sistematica presenza (14 sondaggi su 18) di un deposito fangoso (F) di spessore significativo (con valori medi dell'ordine di 1.5÷2.0 m che, localmente, giunge ad oltre 5 m) ai fini progettuali e di caratteristiche meccaniche molto scadenti (le prove CPTU hanno restituito valori inferiori al minimo strumentale di 100 kPa per molti metri di avanzamento delle attrezzature; tale presenza appariva invece saltuaria nei sondaggi a supporto del Progetto Definitivo a base gara al punto da non dare luogo alla necessità di considerare un fondale "ribassato");
- l'assenza di Depositi Limosi e Sabbiosi (DLS) sul lato **AB**, contrariamente a quanto indicato nel Progetto Definitivo a base gara;
- la presenza di Depositi Limosi e Sabbiosi (DLS) sul lato **BC**, ma sottoposti ai Depositi Limosi e Argillosi (DLA) e non sovrapposti, come invece indicato nel Progetto Definitivo a base gara.

Per quanto riguarda i parametri geotecnici di riferimento, la notevole mole di dati resasi disponibili grazie alla campagna di indagini integrative condotte in ottemperanza al CSA, ha consentito una più chiara ed oggettiva definizione dei valori caratteristici dei parametri di resistenza al taglio dei terreni. Le elaborazioni svolte con metodi statistici riconosciuti dalla comunità scientifica e che costituiscono riferimento per la Normativa Italiana (Norme Tecniche per le Costruzioni) e Europea (Eurocodice 7) hanno evidenziato **valori caratteristici di coesione efficace (c') e angolo di attrito (φ') inferiori a quelli riportati nei documenti posti a base di gara**. Tale osservazione è valida soprattutto con riferimento alla coesione efficace dei Depositi Argillosi (DA), ossia dei terreni nei quali si approfondisce l'opera di marginamento a mare.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

Da quanto sopra, deriva un **evidente aggravio** delle condizioni di lavoro delle opere di marginamento a mare rispetto a quanto in precedenza ipotizzabile, chiaramente da imputare alla presenza di un fondale “ribassato” a partire dal quale si immergono le opere strutturali (quindi maggiori altezze di ritenuta) che, attraversati i Depositi Limosi e Argillosi (DLA) e, benché solo sul lato BC, anche i Depositi Limosi e Sabbiosi (DLS), andranno ad immergersi in un Deposito Argilloso (DA) di peggiori caratteristiche meccaniche in termini di resistenza al taglio. A questo si aggiunge che la composizione granulometrica di tutti i terreni indagati (DLA, DLS e DA) è in maniera preponderante rappresentata dalla componente fina (argille e limi, con percentuali che solo occasionalmente sono inferiori al 70% circa nei DLA, quindi rendendoli in tal senso poco distinguibili dai terreni DA), con conseguenti ridotti valori di permeabilità.

Questo impone la **necessità di condurre analisi numeriche a supporto del Progetto Esecutivo che contemplino anche la risposta non drenata dei DLA e dei DA**, aspetto invece ritenuto secondario nel Progetto Definitivo a base gara (cfr. PUG102-PD-ED-009-2).

Anche con riferimento alle **opere di marginamento a terra** è emersa una **situazione stratigrafica diversa**, con particolare riferimento alle profondità di imposta dei Riporti antropici (R) e di rinvenimento del tetto dei Depositi Argillosi (DA).

Il necessario incremento del livello di approfondimento delle indagini a terra (imposto peraltro dal CSA rispetto ai dati disponibili dal Progetto Definitivo) ha evidenziato, infatti, in generale, maggiori potenze dei depositi antropici ed, in alcuni casi, maggiori profondità di rinvenimento del tetto della formazione argillosa, profondità assunte come riferimento ai fini dell’ammorsamento idraulico dei diaframmi plastici, previsto pari a 2m all’interno della formazione argillosa (vincolo progettuale imposto dal Progetto Definitivo e confermato dal DM 80 di Compatibilità Ambientale).

Tali risultanze, con particolare riferimento alle **elevate profondità da raggiungere** per l’ammorsamento del marginamento a terra (in alcuni casi **>30m**) hanno comportato le **necessità di apportare alcuni correttivi di ordine tecnico e tecnologico rispetto alla realizzazione dei diaframmi plastici**, descritte nell’ambito degli specifici elaborati di progetto, a cui si demanda per ogni dettaglio.

Rispetto ai parametri geotecnici derivati dall’interpretazione delle prove geotecniche eseguite sui campioni prelevati a terra, in virtù della funzione meramente impermeabilizzante dei diaframmi in progetto, è evidente come la caratteristica di maggiore interesse dei terreni rinvenuti sia la permeabilità.

Rispetto a tale grandezza, risulta opportuno precisare che, in ambito di Progetto Esecutivo, non sono state eseguite specifiche prove di permeabilità in sito nell’area a terra. Le valutazioni sviluppate in ambito di Progetto Definitivo, infatti, con particolare riferimento alla bassissima permeabilità intrinseca della formazione argillosa DA, basate su un congruo numero di dati da prove di permeabilità a terra eseguite in ambito di PD, nonché

**Autorità Portuale di Taranto**

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all’ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

confrontate con la ricca bibliografia disponibile, non sono state ritenute oggetto di ulteriore approfondimento. Ad ogni modo, comunque, ancorché non strettamente significativi, i valori di permeabilità ricavati in via indiretta dalle curve di consolidazione edometrica ricavate dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati a terra nell'ambito del Progetto Esecutivo, risultano in generale in linea con quanto documentato in ambito di Progetto Definitivo.

Infine, con riferimento all'**area di dragaggio**, rispetto all'approfondimento delle indagini eseguito in ambito di progettazione esecutiva, basato su due campagne di rilievo geomorfologico, eseguite nell'ambito delle indagini propedeutiche al Progetto Esecutivo lungo una serie di transetti mediante SUB-bottom profiler opportunamente tarato rispetto a 20 verticali di sondaggio precedentemente indagate, con relativa ricostruzione di un accurato modello stratigrafico tridimensionale dell'area di dragaggio, emerge un quadro sostanzialmente diverso da quanto previsto in ambito di Progetto Definitivo. Il dato saliente emerso consiste nel fatto che l'area del Polisettoriale è essenzialmente caratterizzata, rispetto alle quote da dragare, dalla **importante presenza di Depositi Argillosi (DA), ancorché affioranti solo in minima parte**, ricoperti da spessori variabili, ma in generale piuttosto limitati (dell'ordine di un paio di metri) di depositi fangosi e limi sabbiosi ed argillosi. Tale evidenza non è riscontrabile nella Relazione Geotecnica (PUG102PDED008_rev. 0) del Progetto Definitivo a base gara e più in generale all'interno di quest'ultimo. Le indagini infatti, svolte in fase di redazione del PD esclusivamente ai fini della caratterizzazione ambientale dei fondali, furono eseguite mediante vibrocarotiere, e quindi necessariamente limitate ai primissimi metri di fondale.

**Autorità Portuale di Taranto**

Interventi per il dragaggio di 2,3 M³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

APPENDICE

CPTU INTERPRETATION



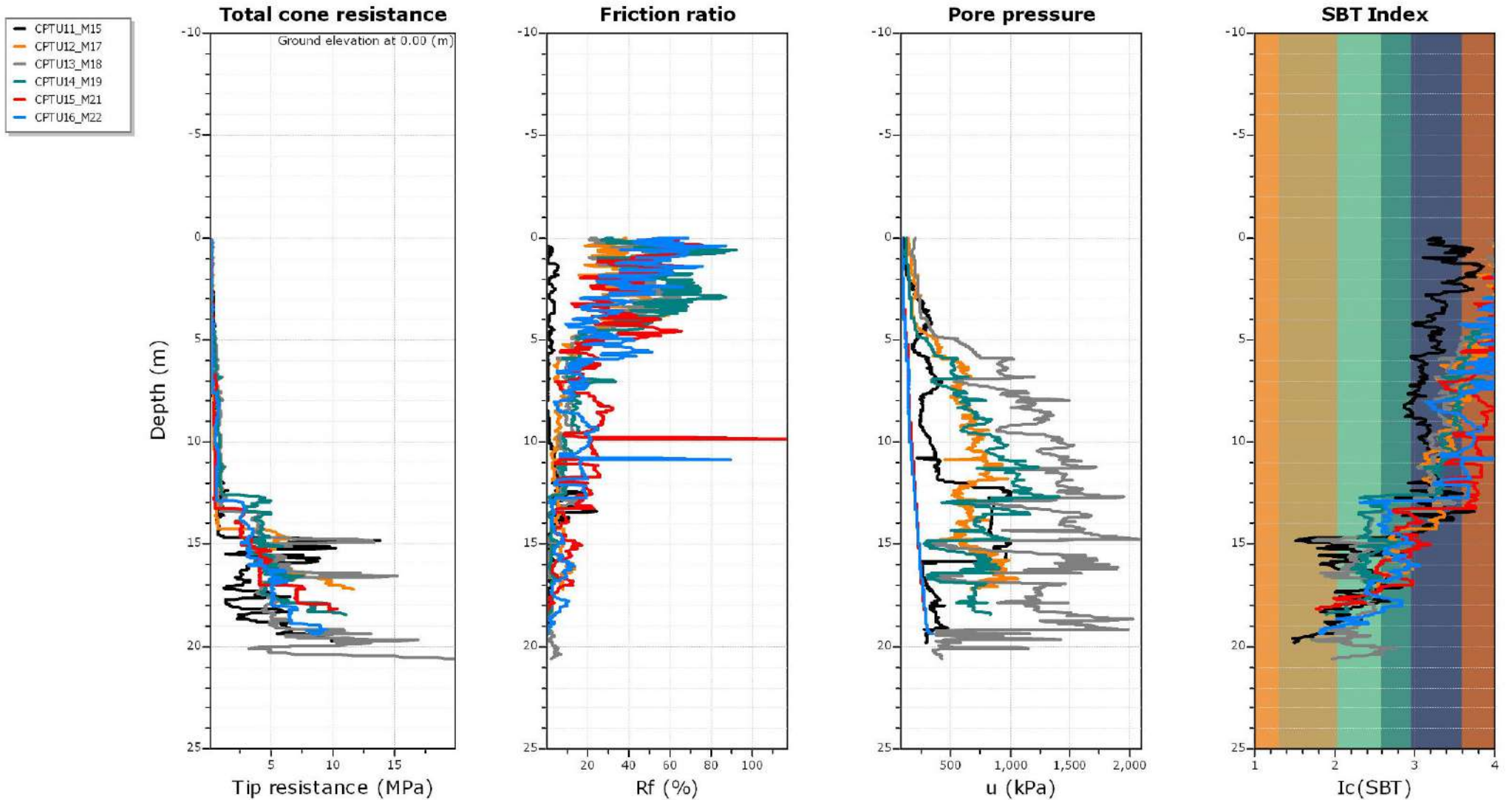
Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

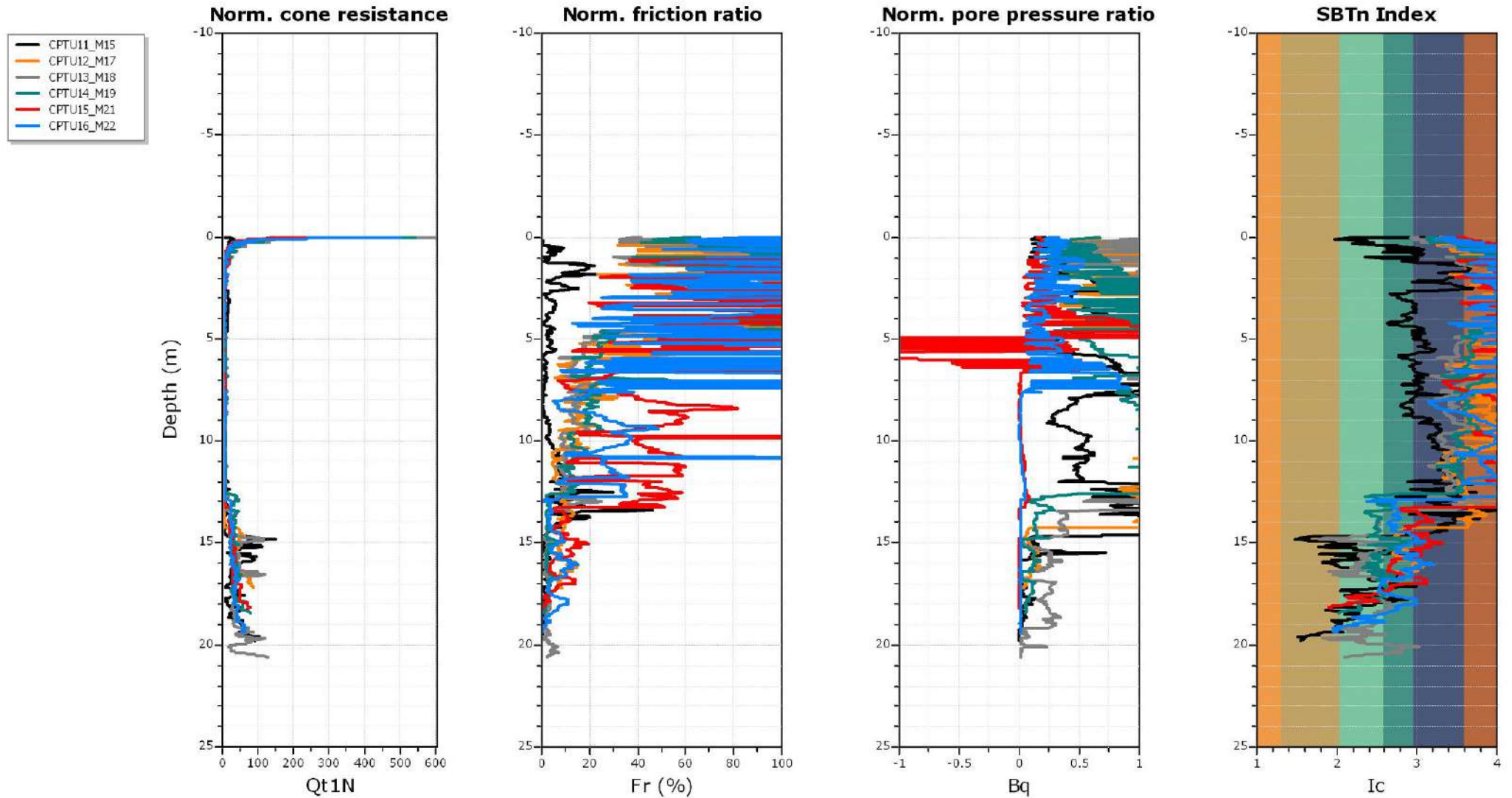
Relazione Geotecnica

Data: 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296A
361B.docx

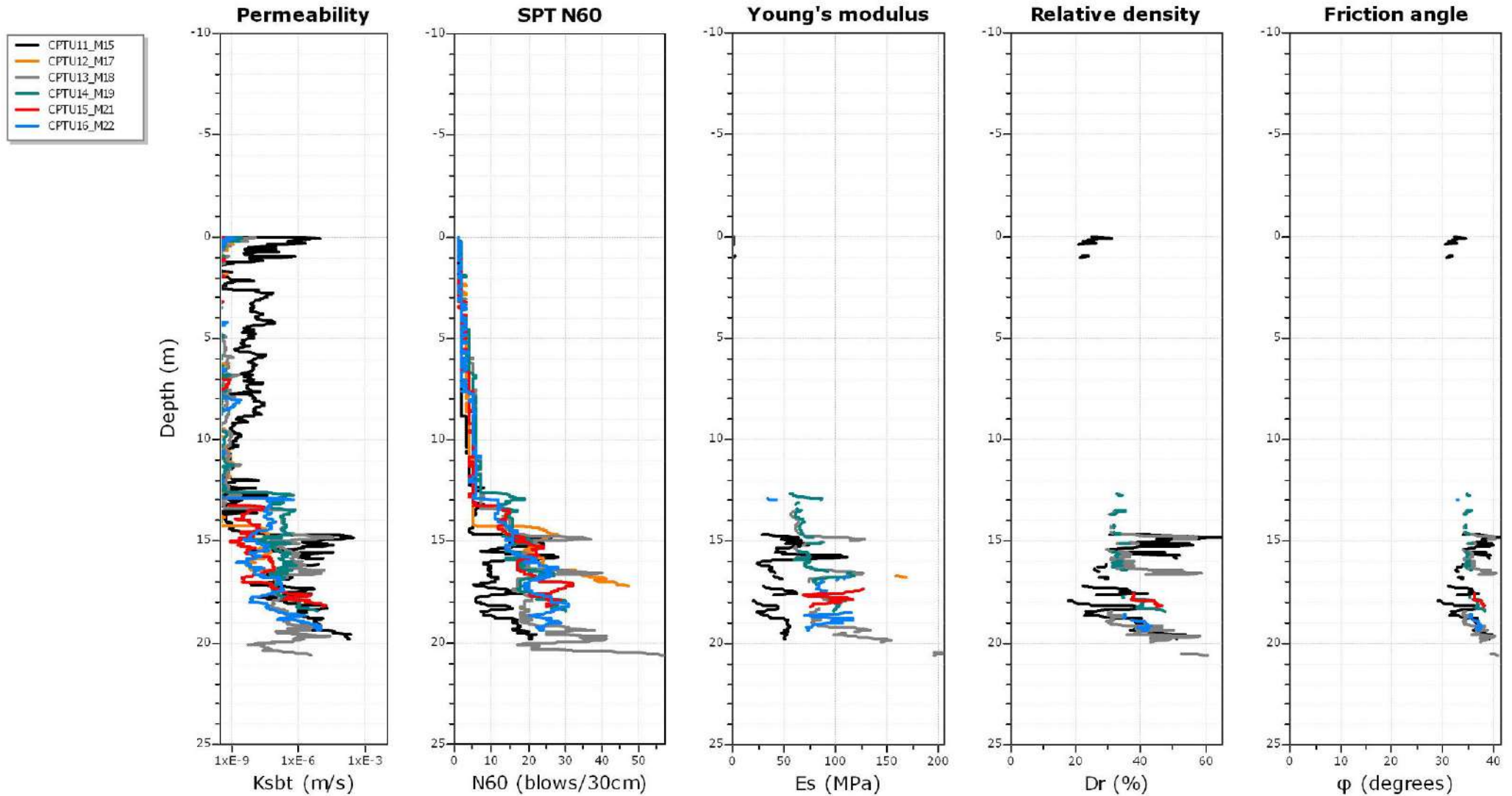
Overlay basic interpretation plots



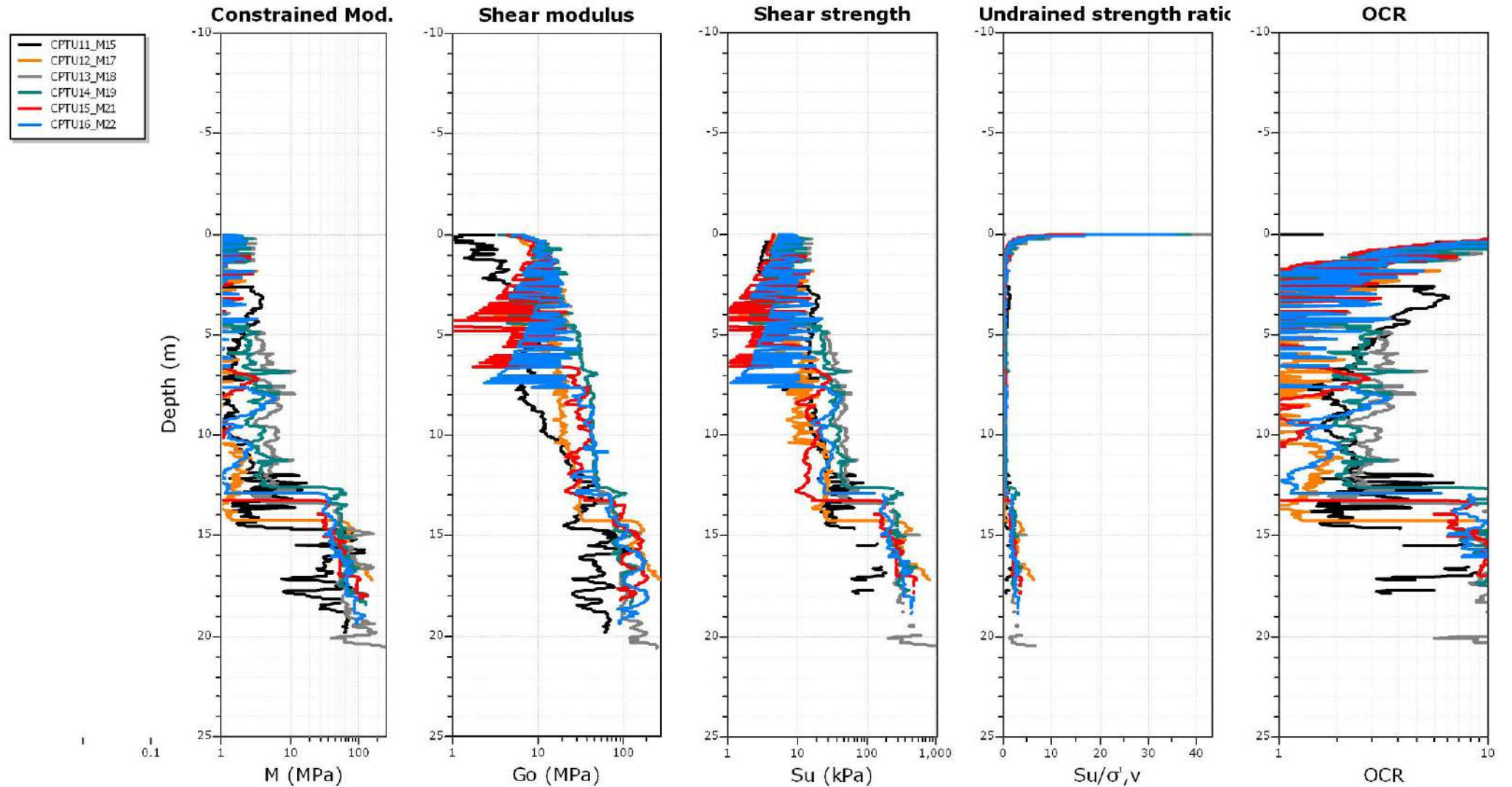
Normalized basic plots



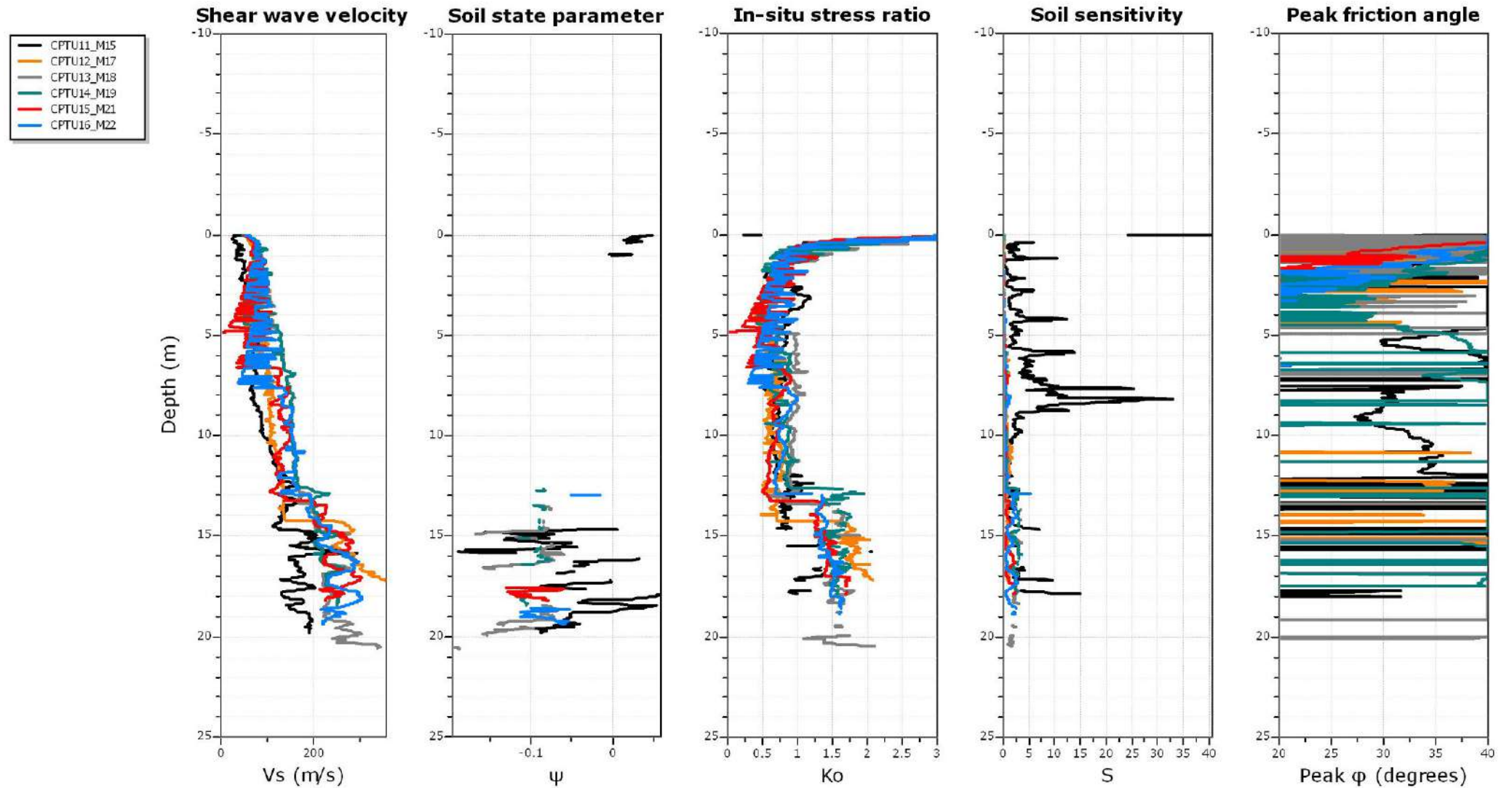
Overlay estimation plots (1)



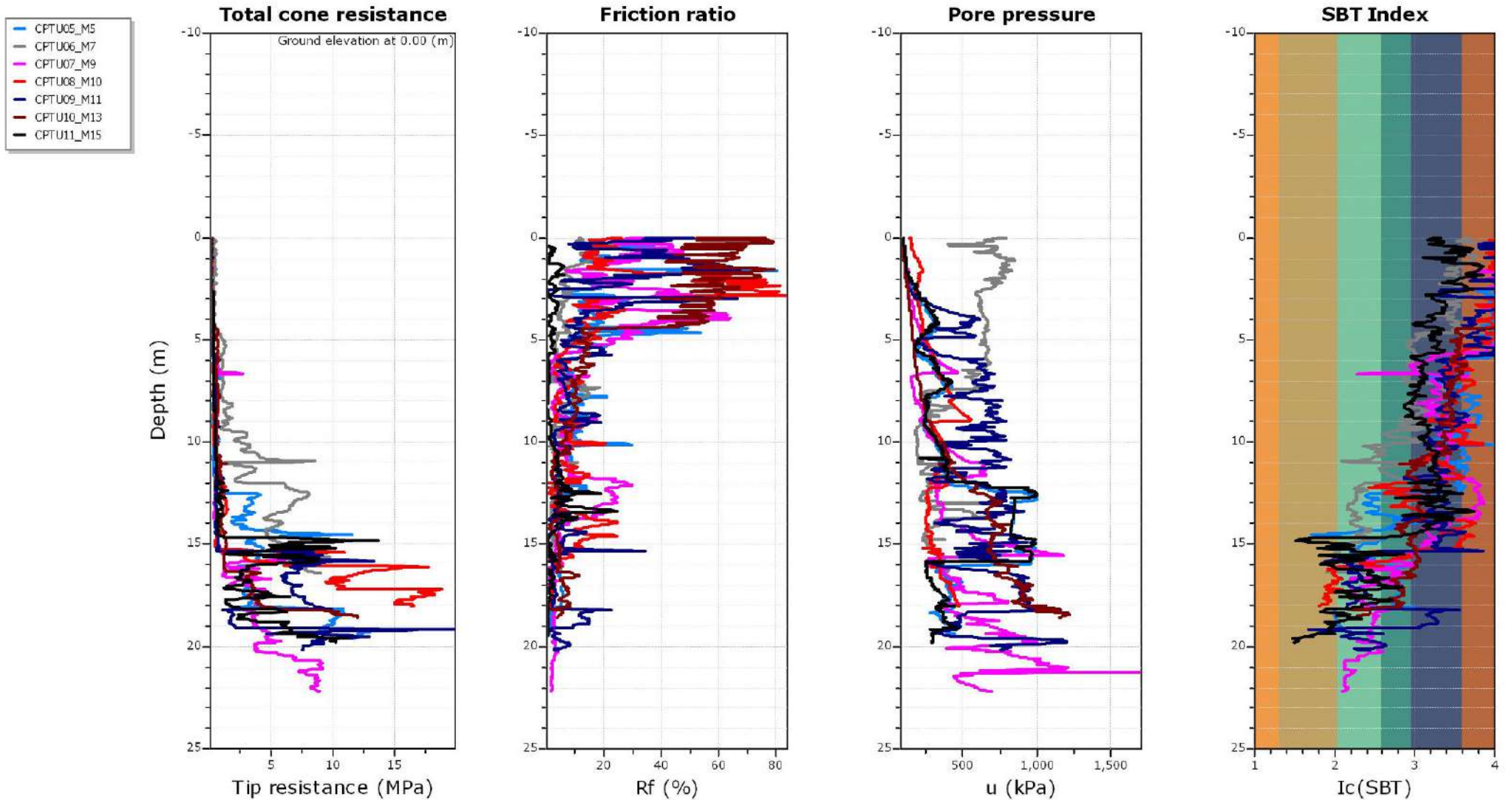
Overlay estimation plots (2)



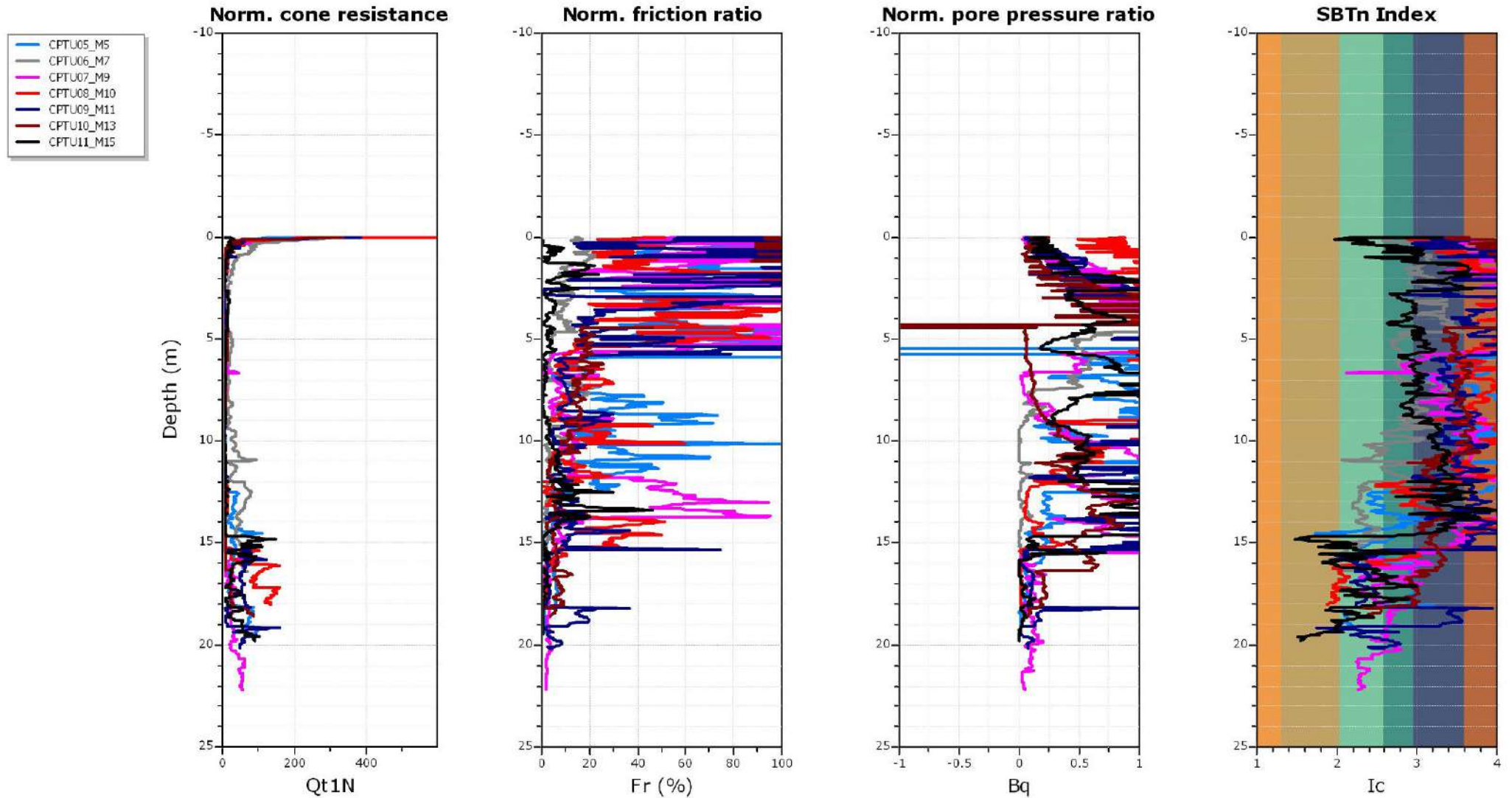
Overlay estimation plots (3)



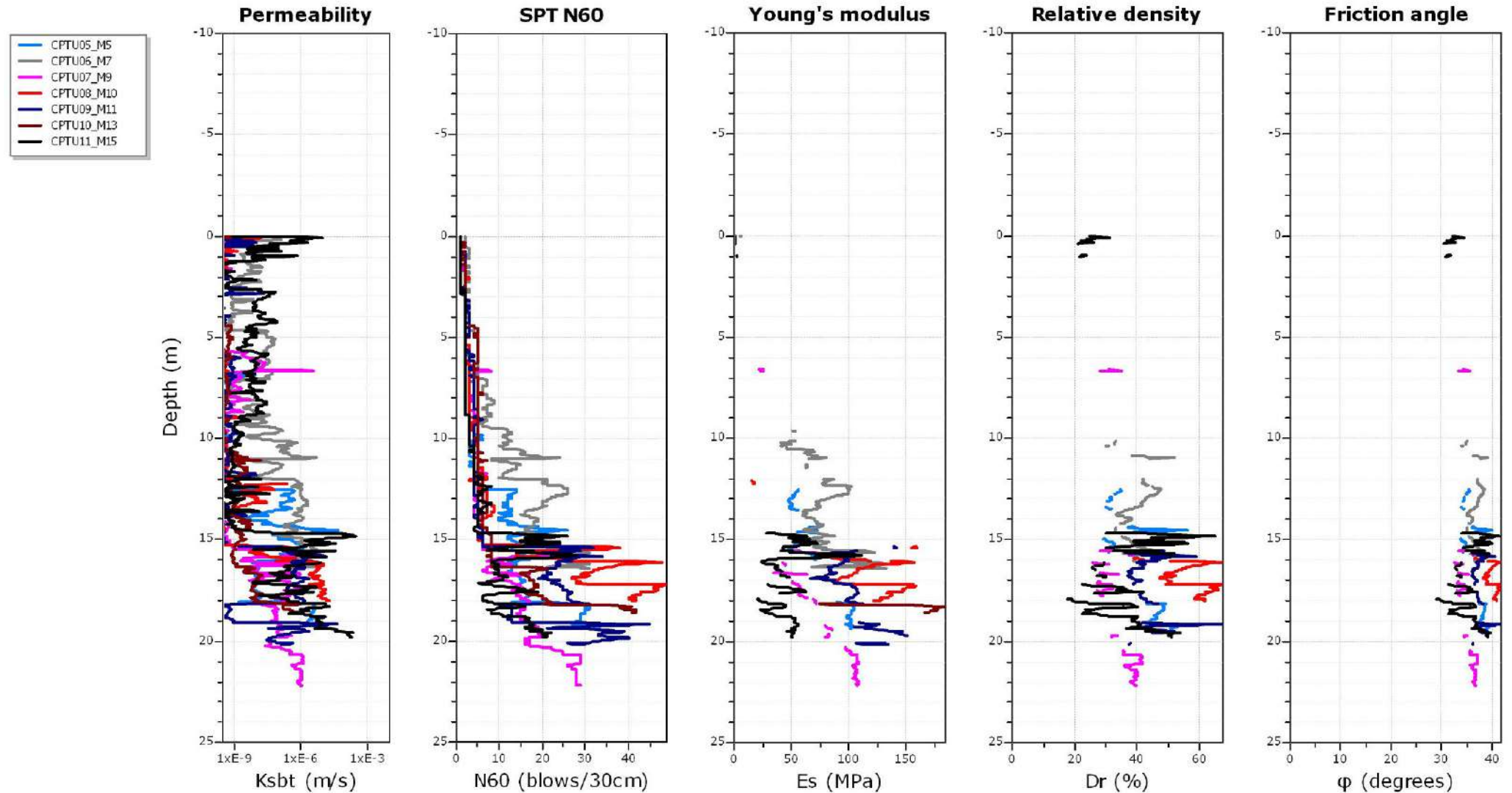
Overlay basic interpretation plots



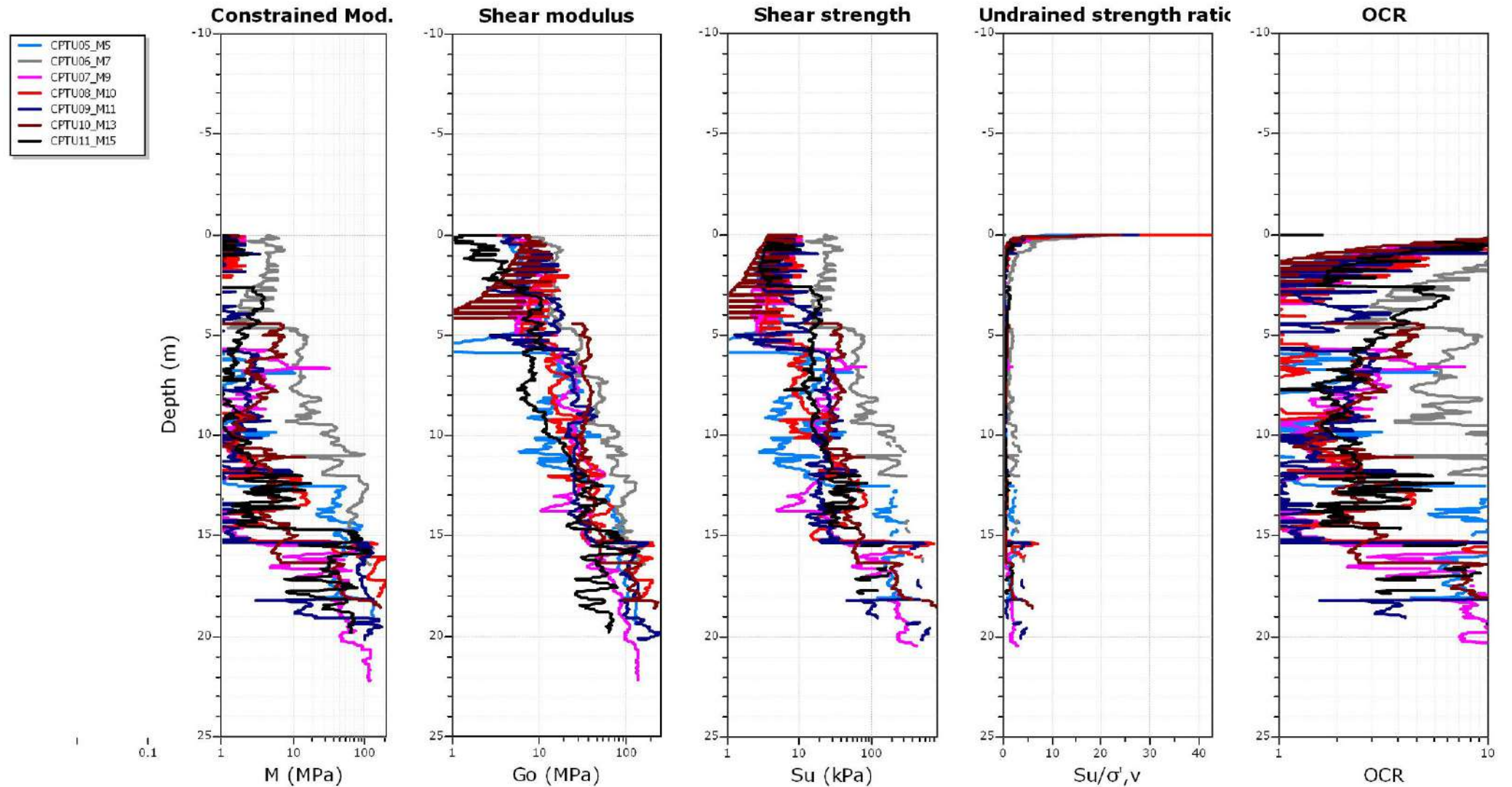
Normalized basic plots



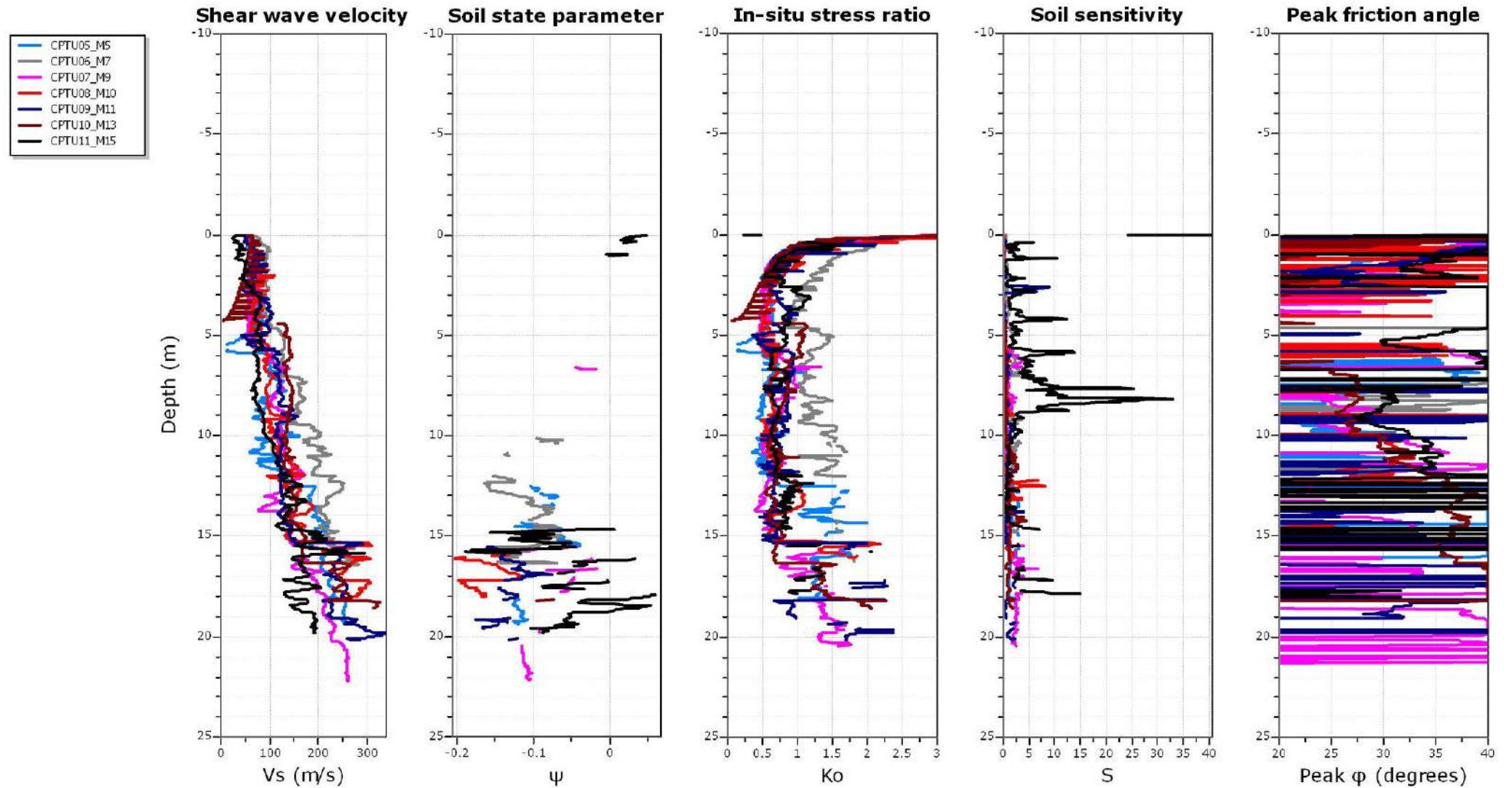
Overlay estimation plots (1)

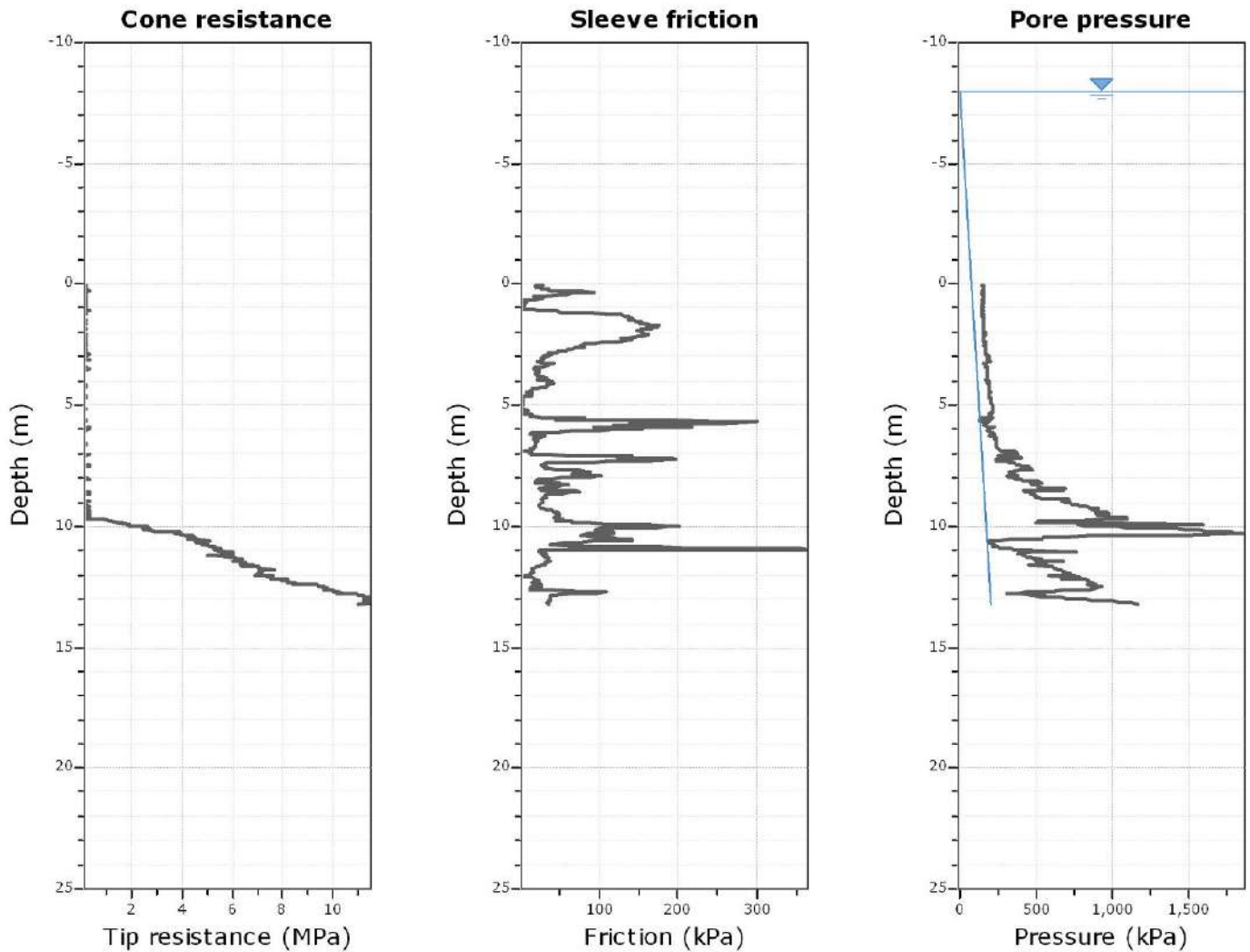


Overlay estimation plots (2)



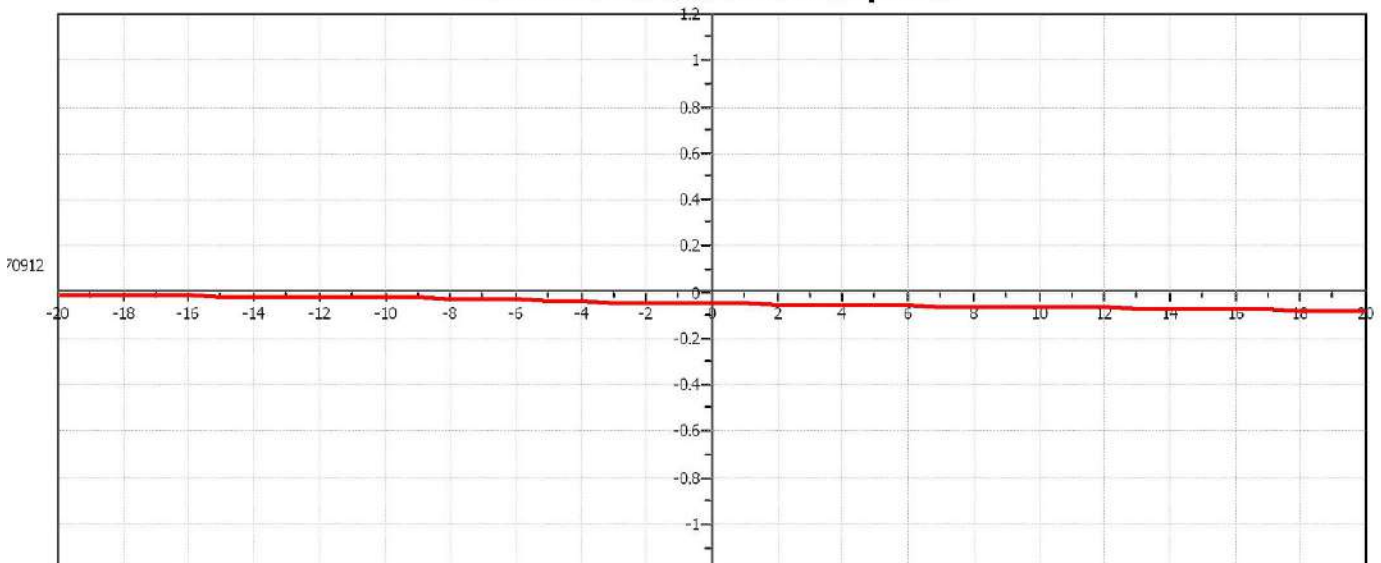
Overlay estimation plots (3)



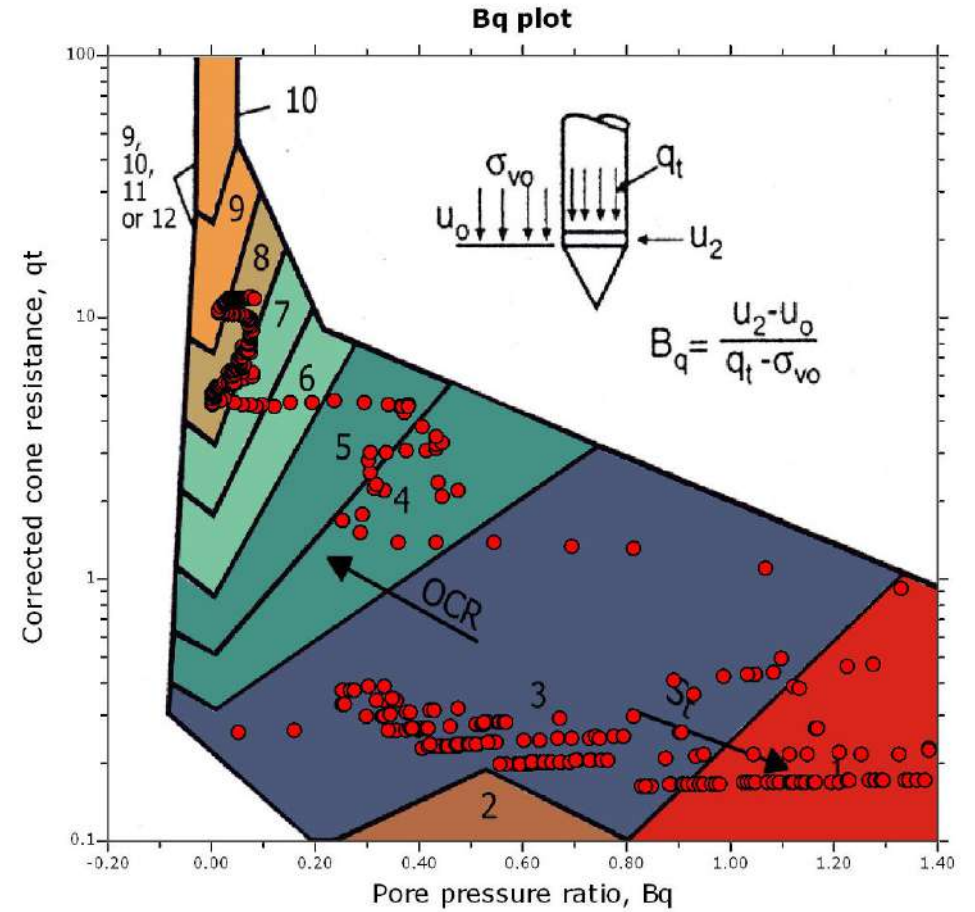
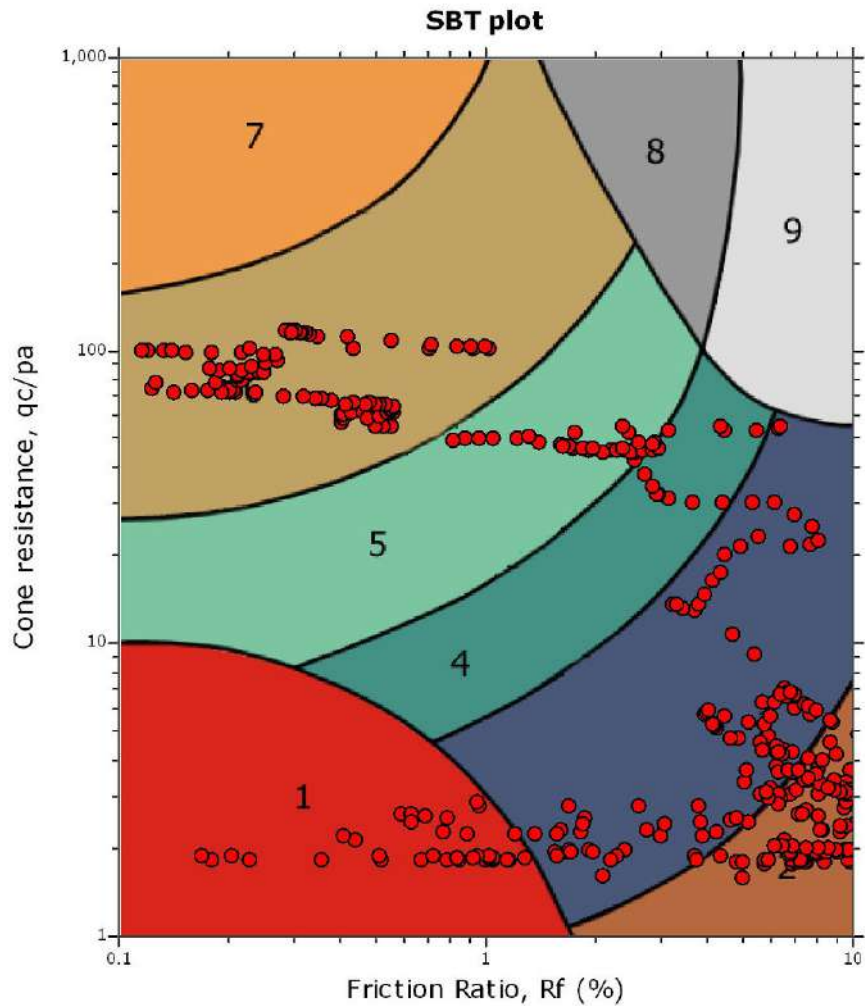


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



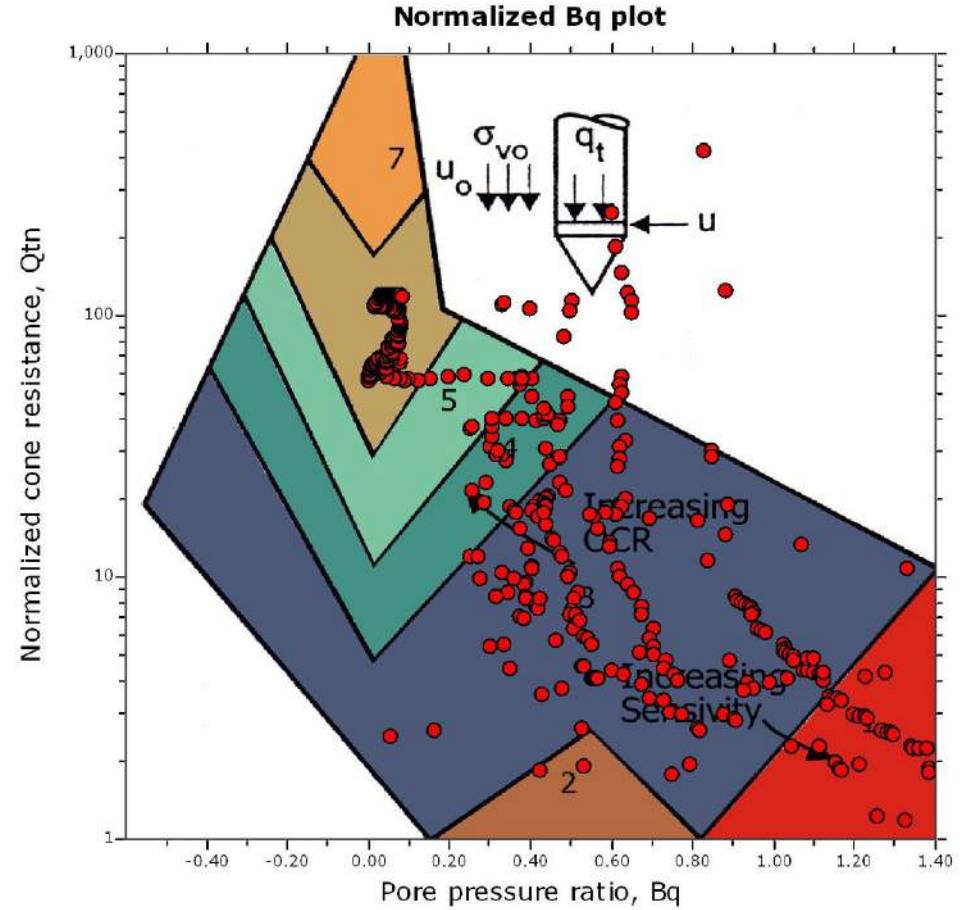
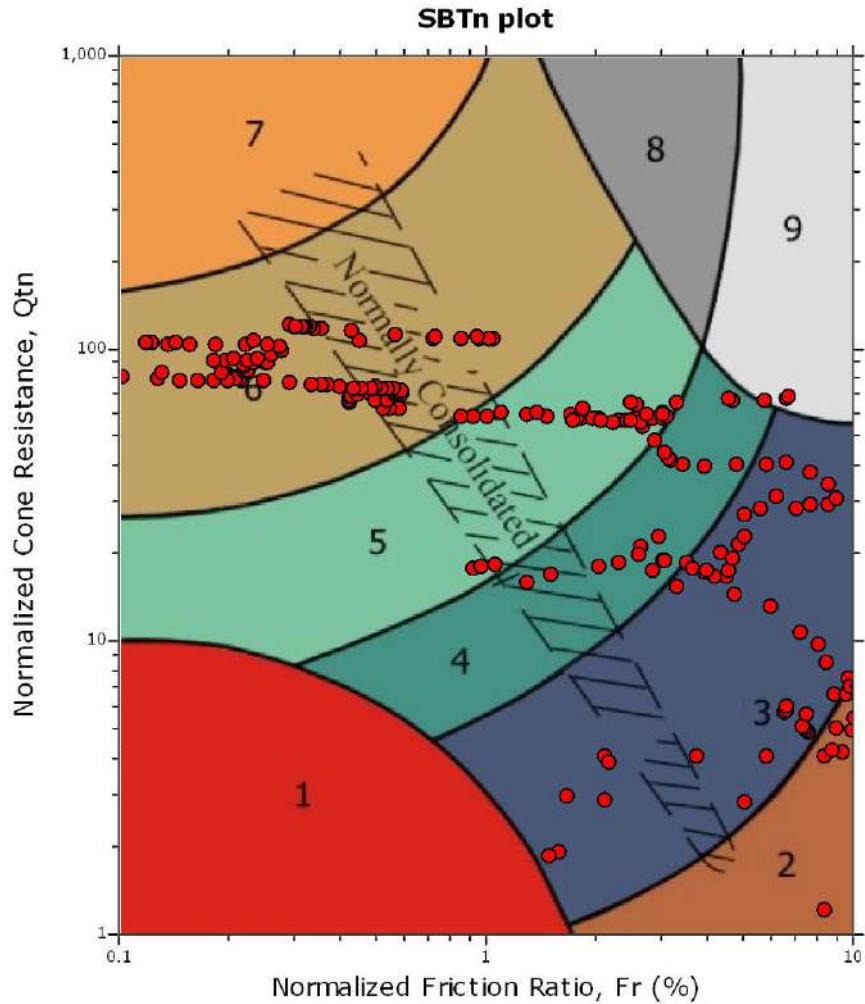
SBT - Bq plots



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 |

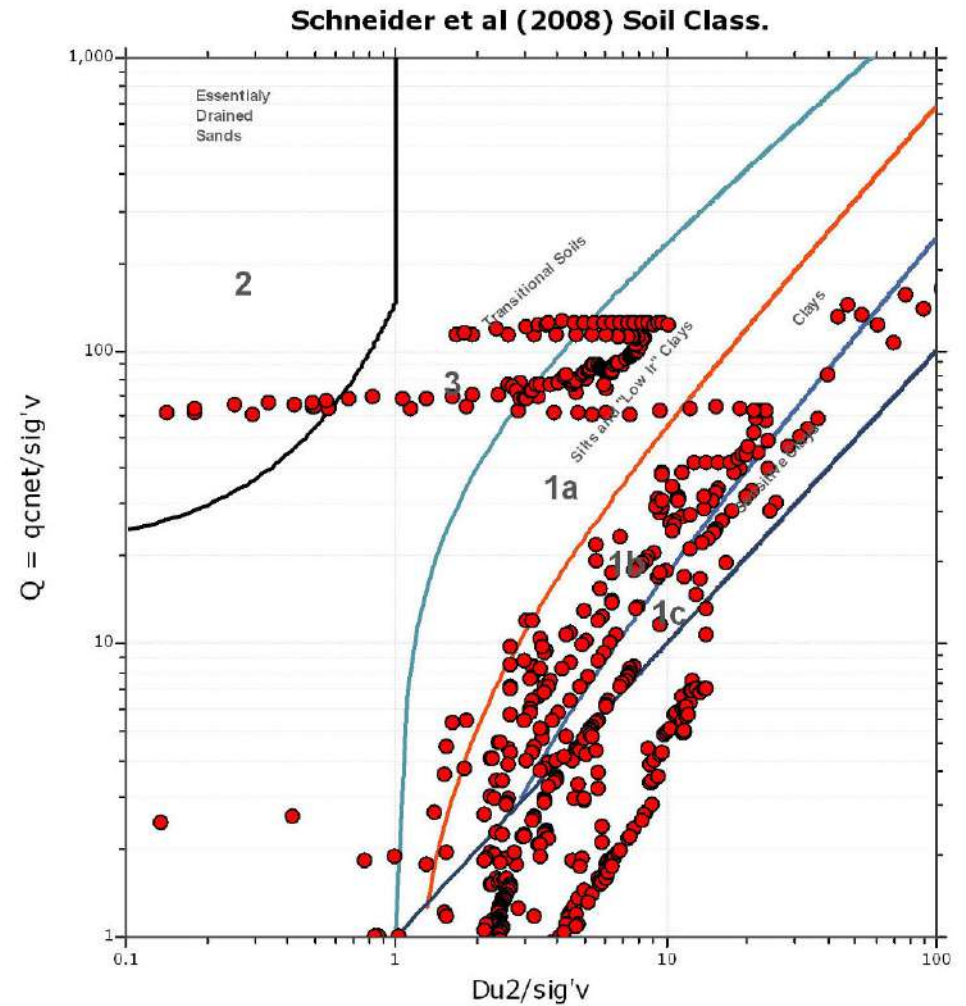
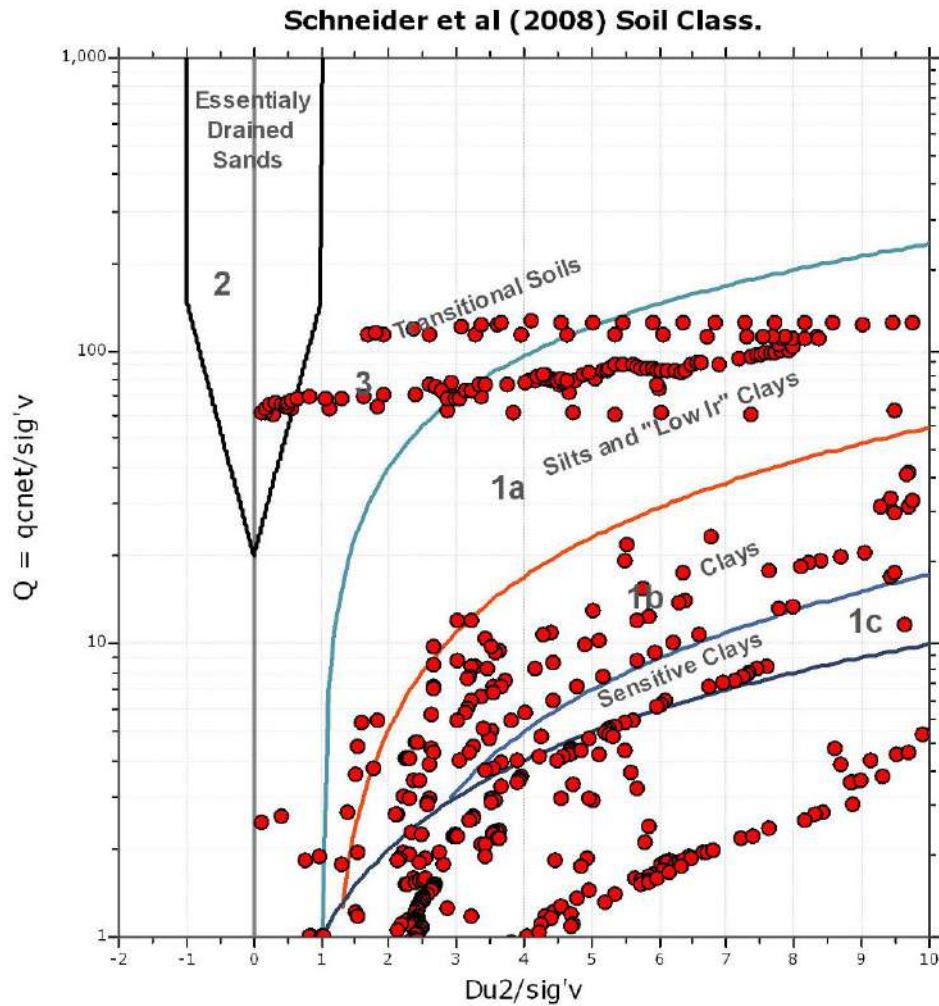
SBT - Bq plots (normalized)

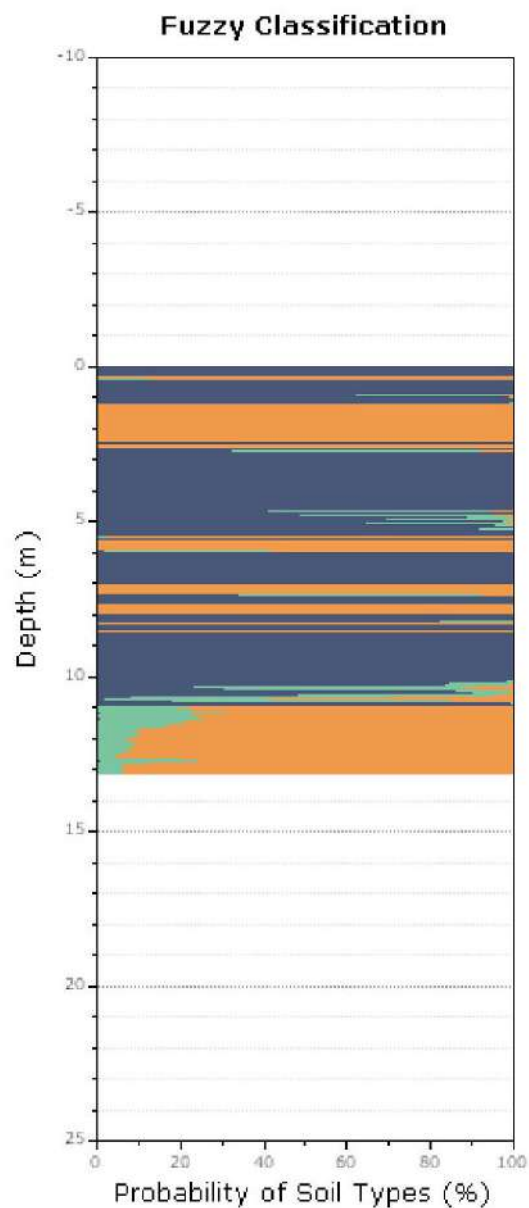
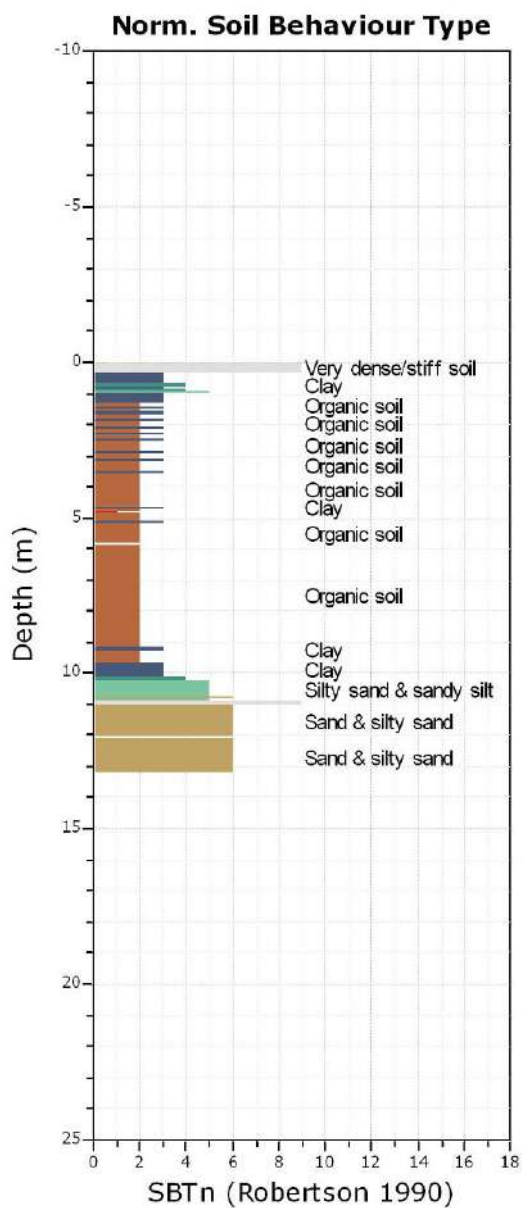


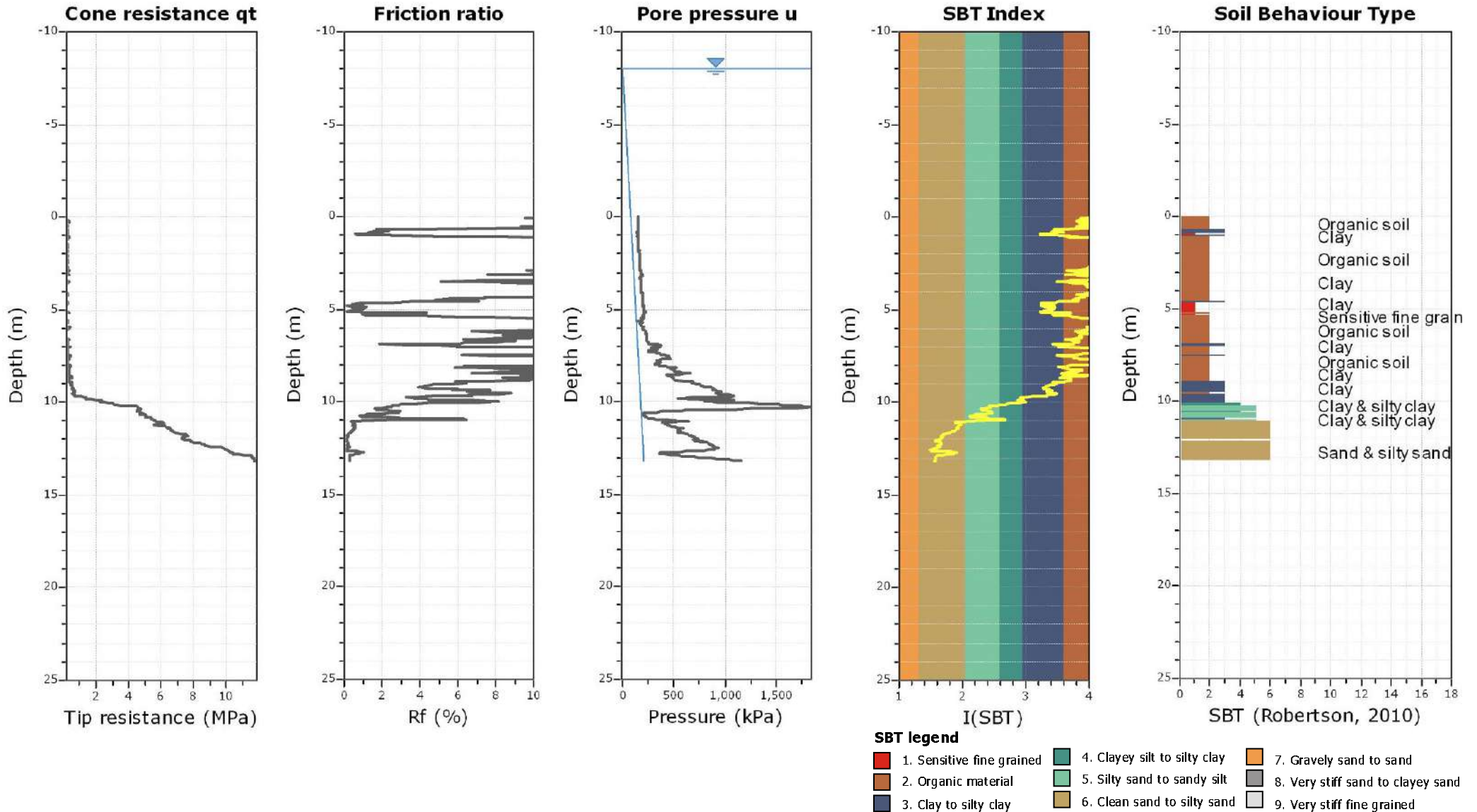
SBTn legend

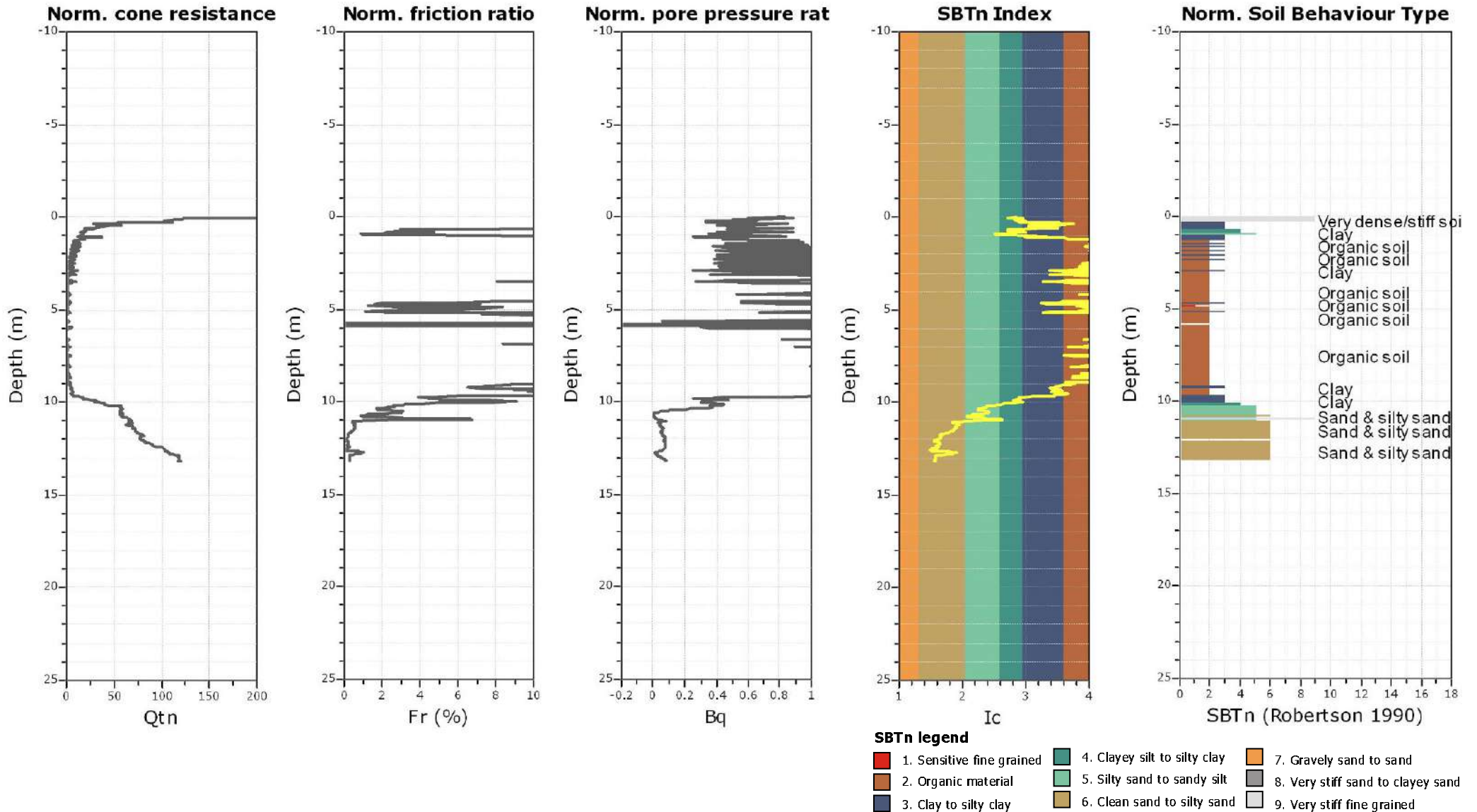
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

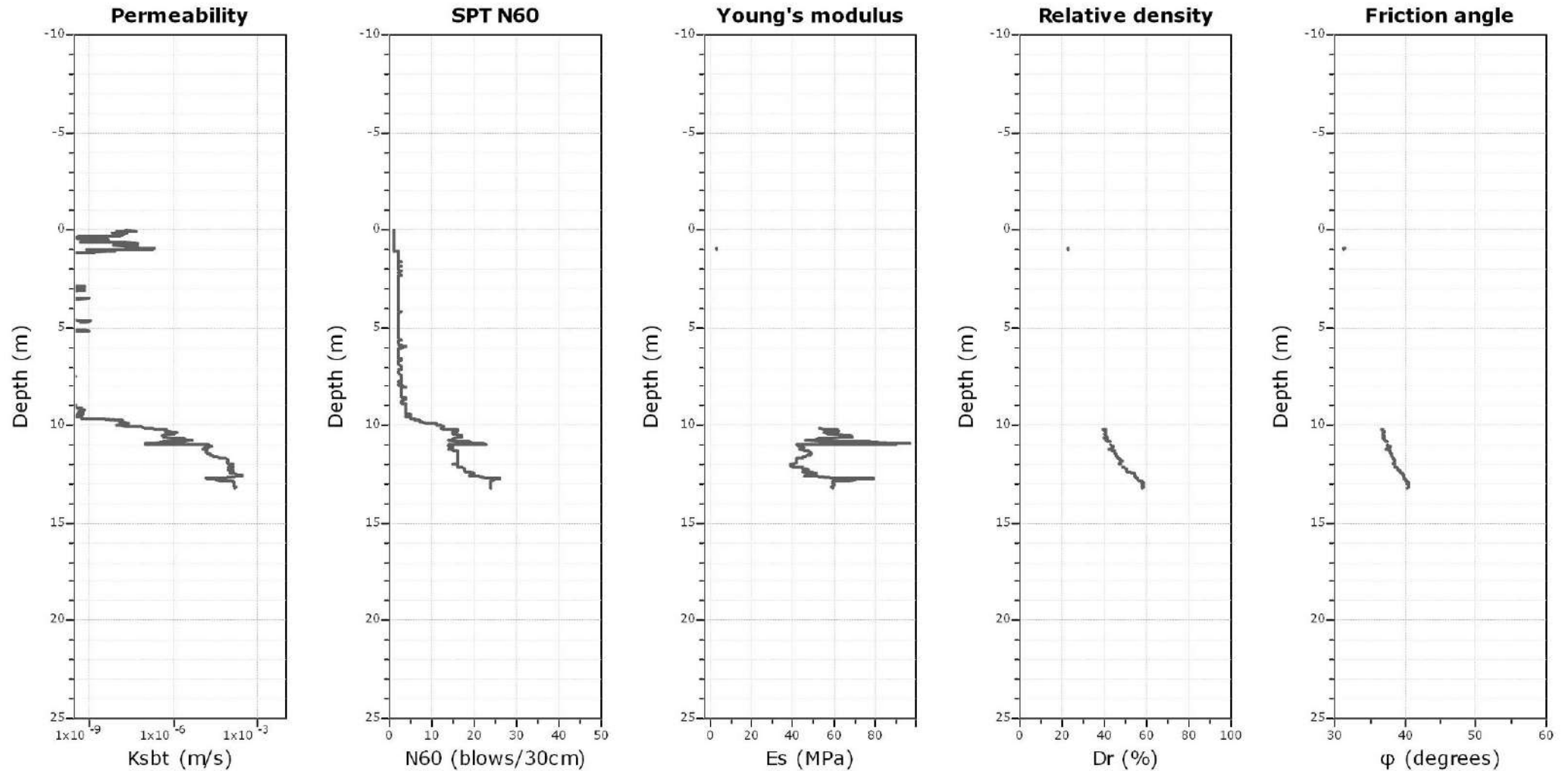
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

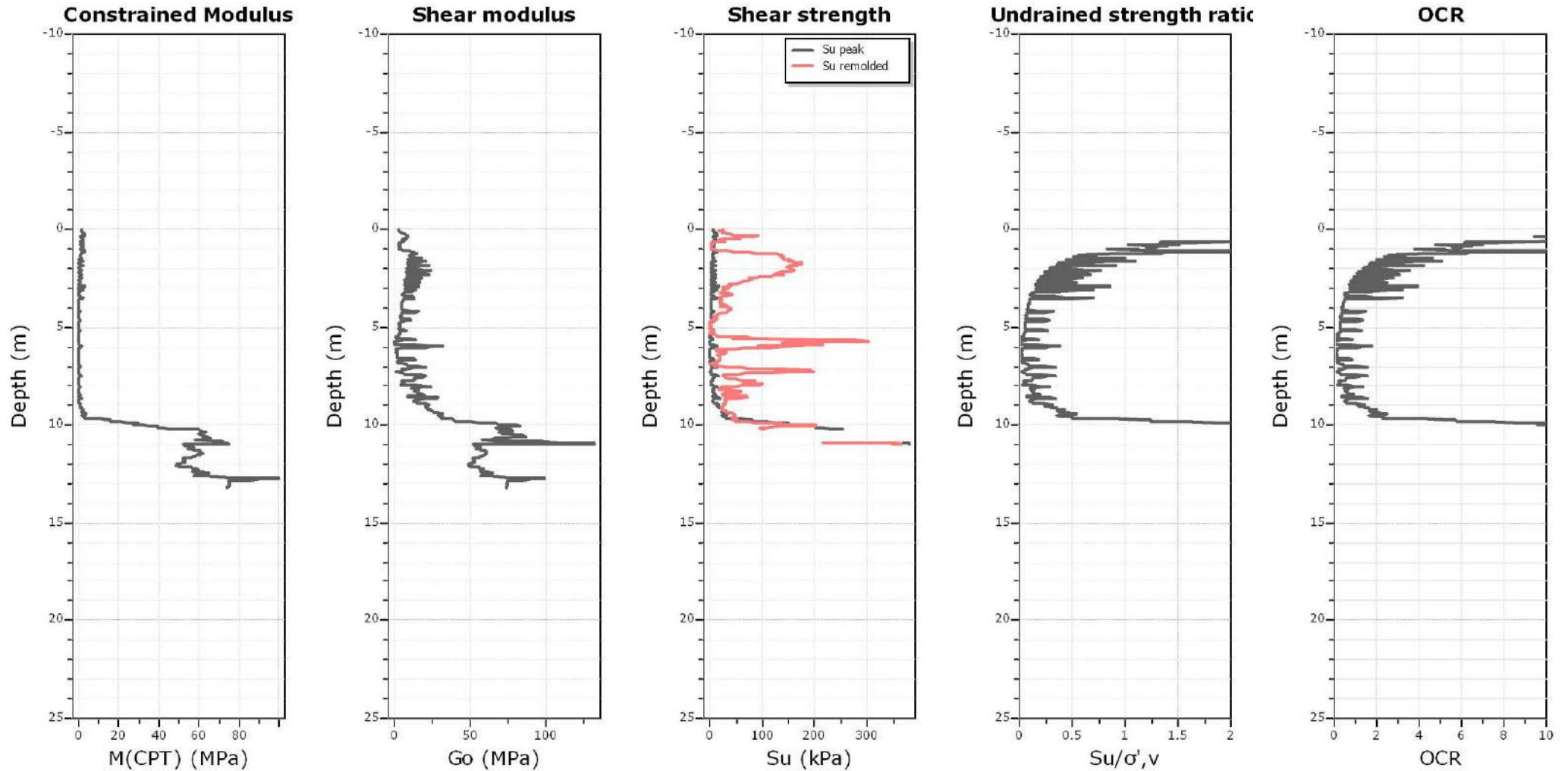
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

●— User defined estimation data



Calculation parameters

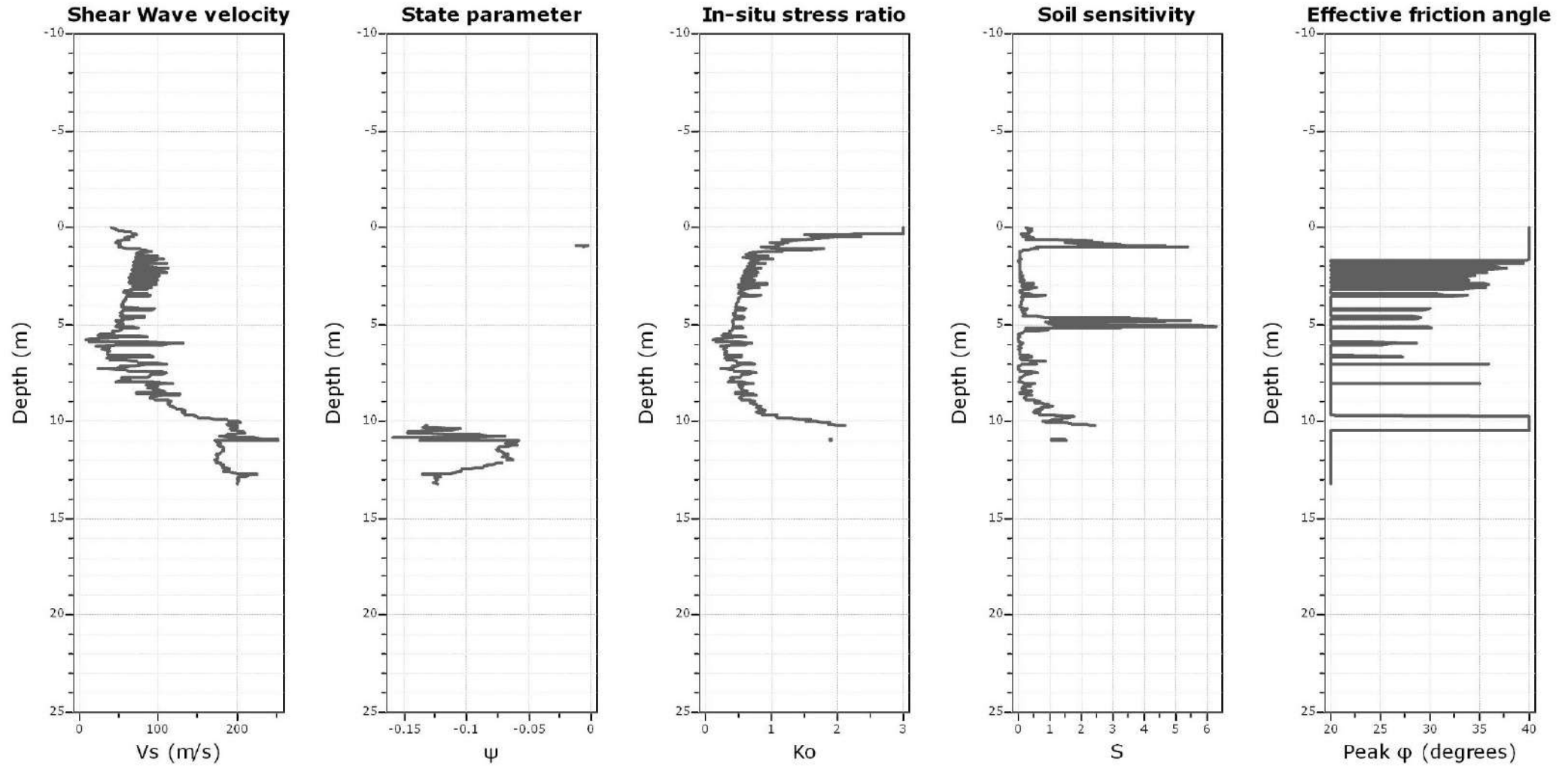
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

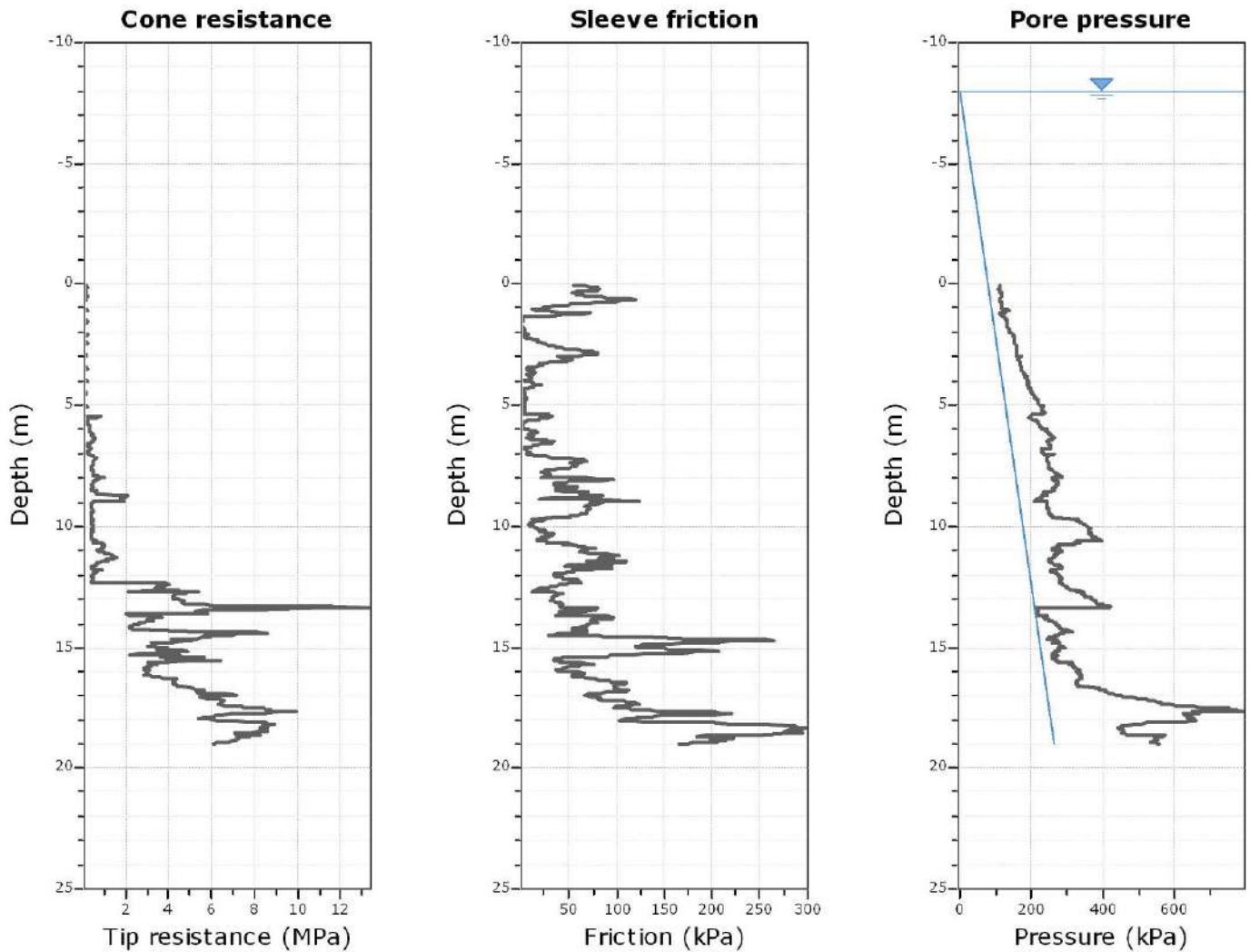
● — User defined estimation data



Calculation parameters

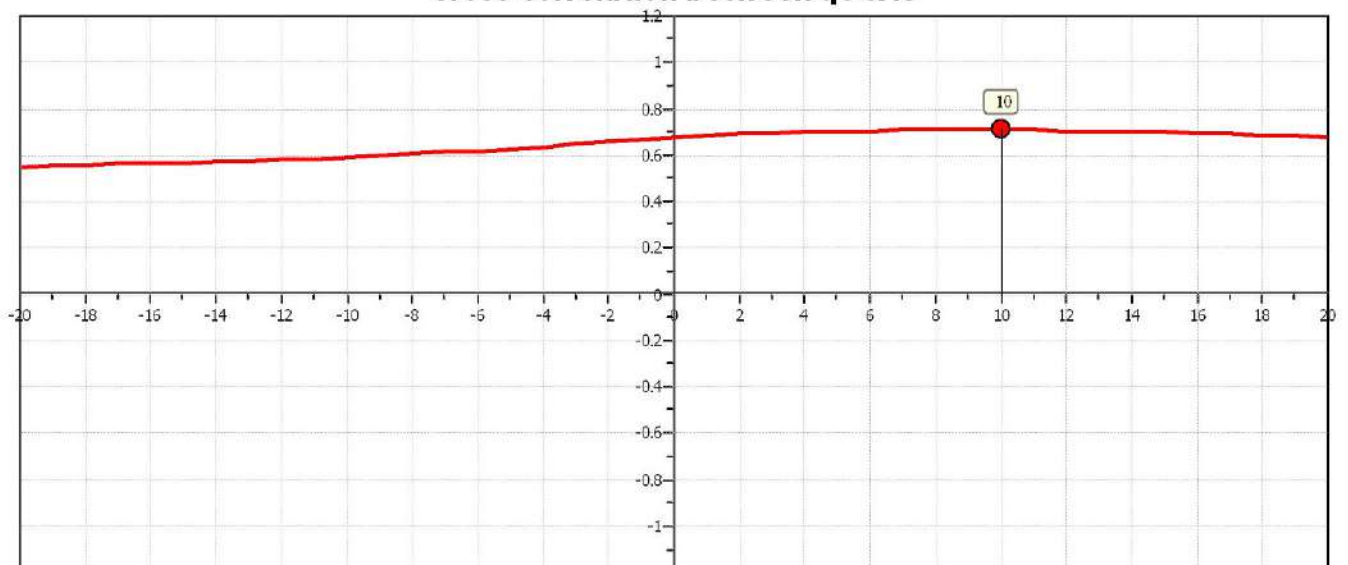
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

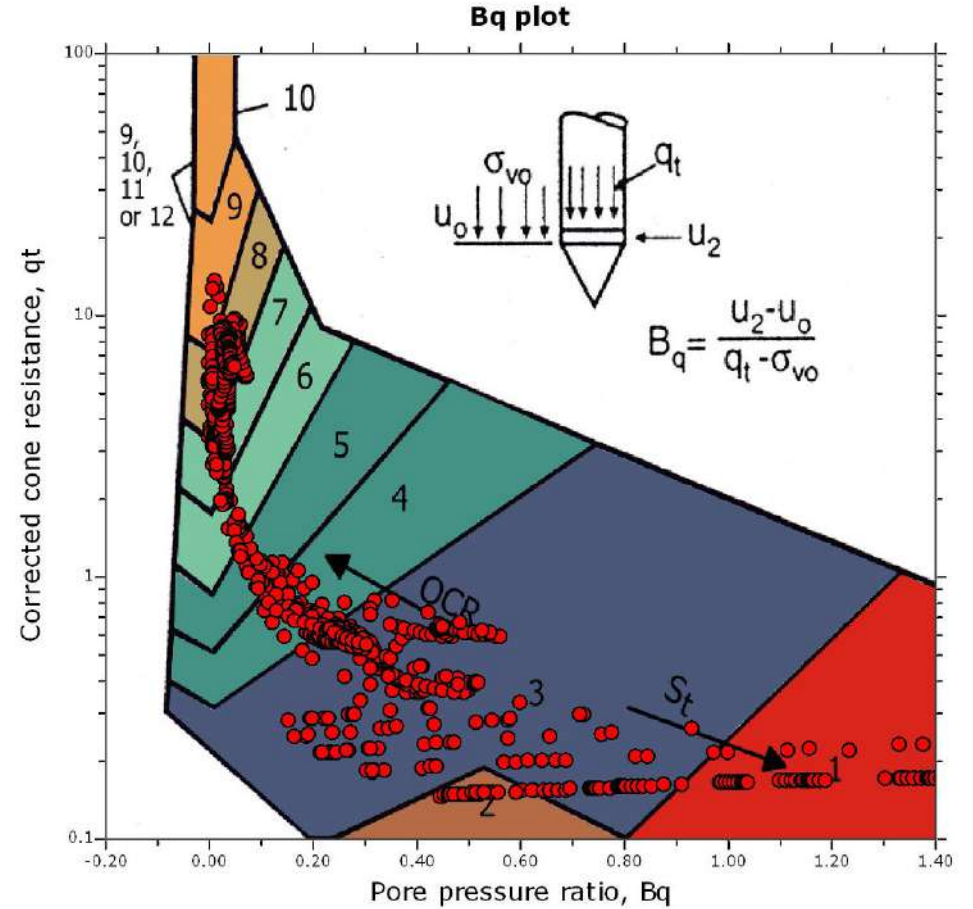
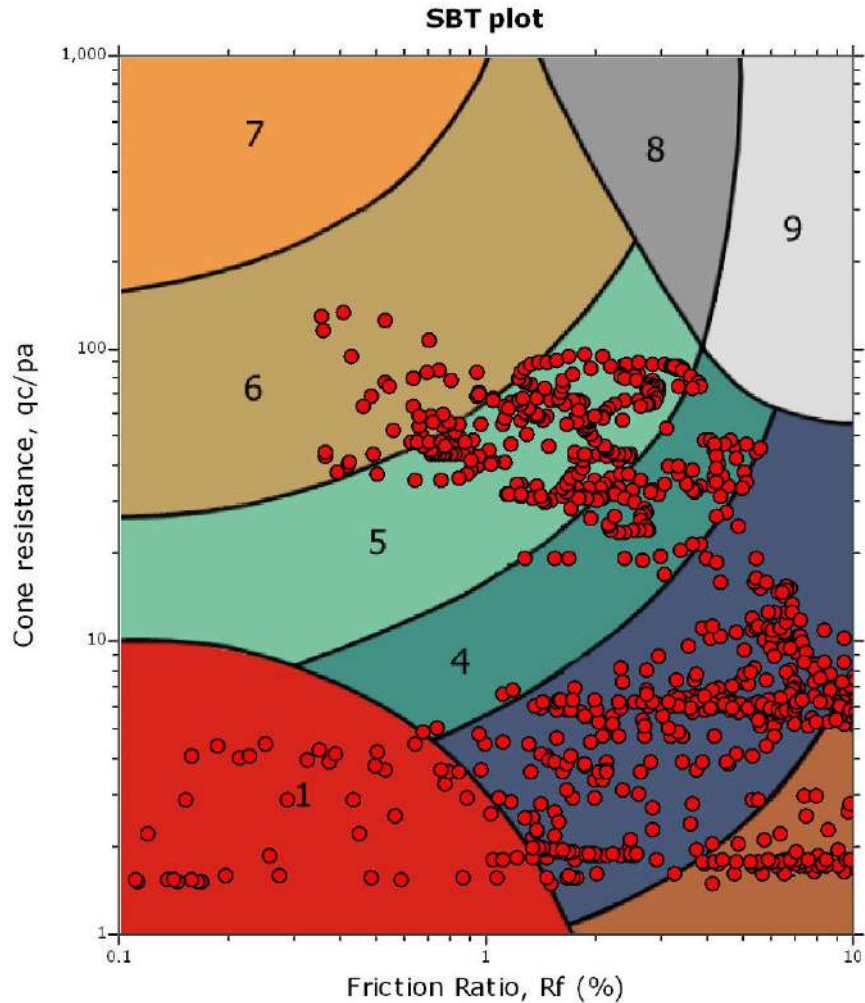


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



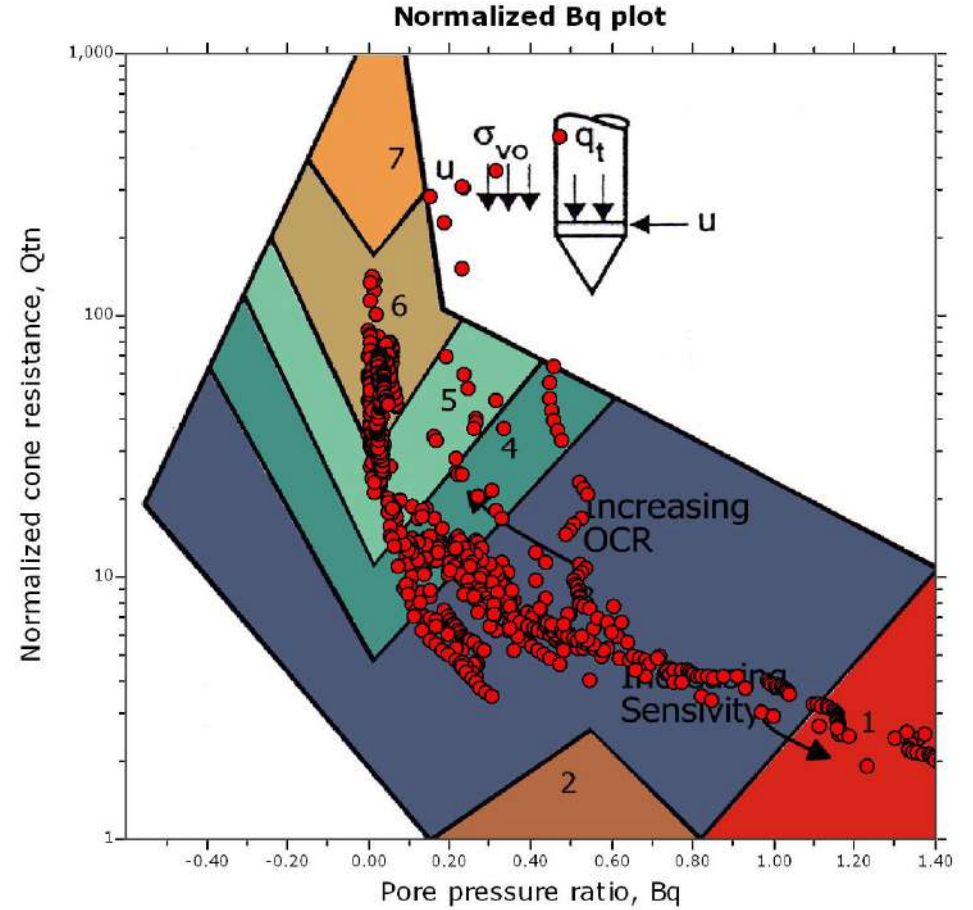
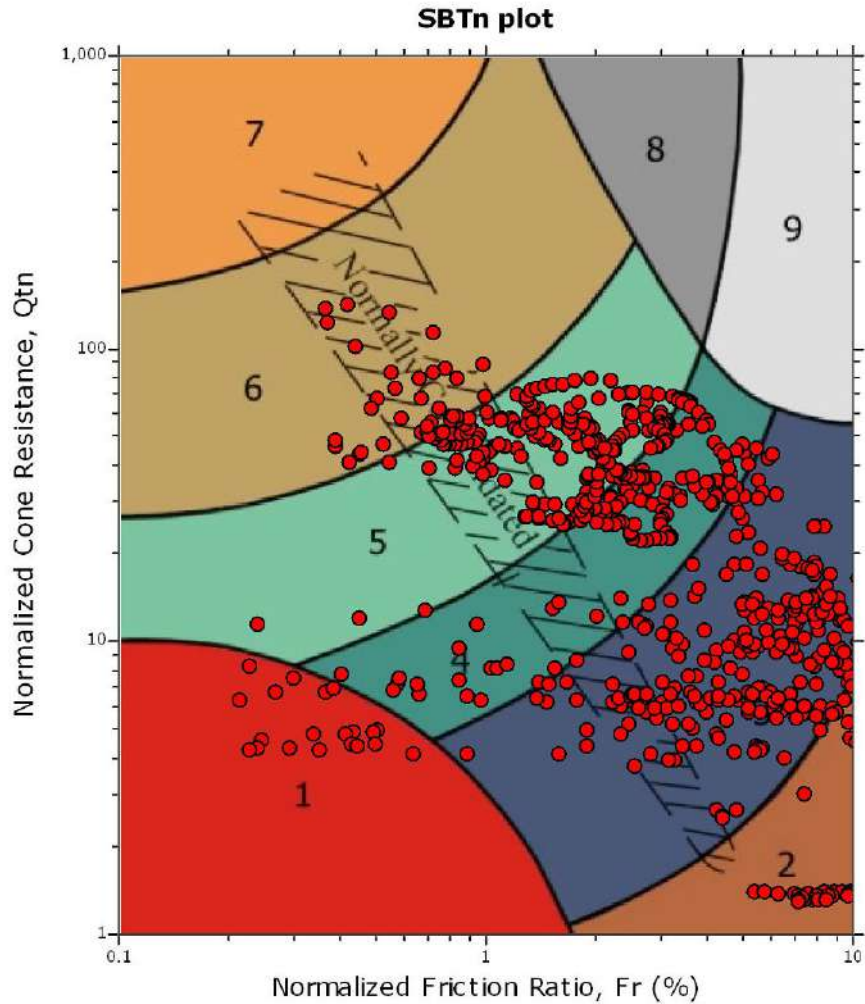
SBT - Bq plots



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 |

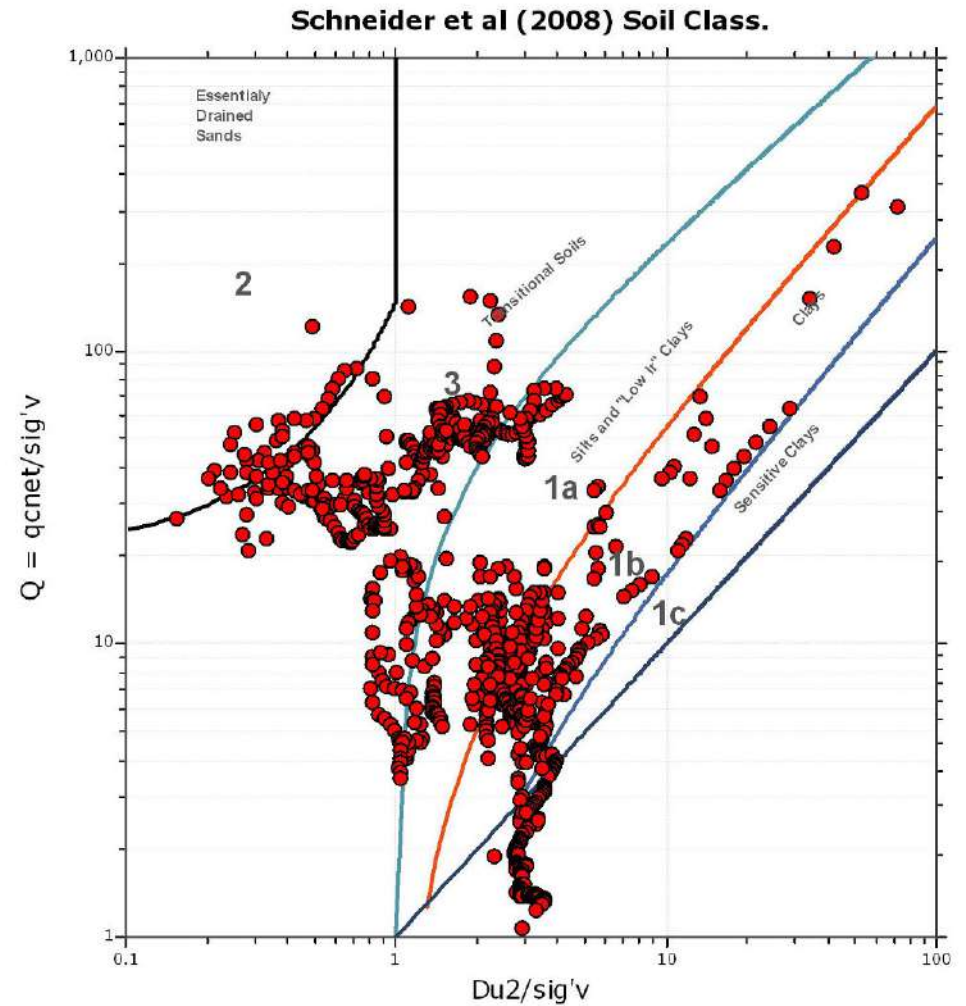
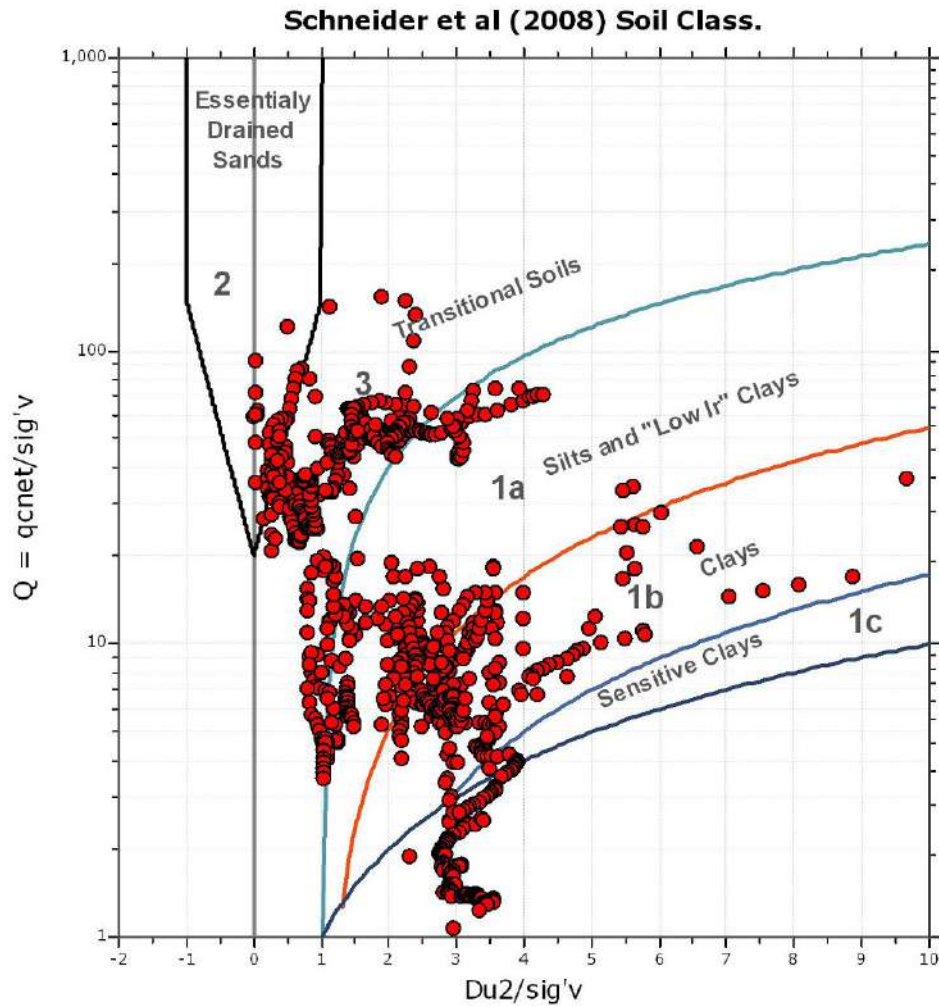
SBT - Bq plots (normalized)

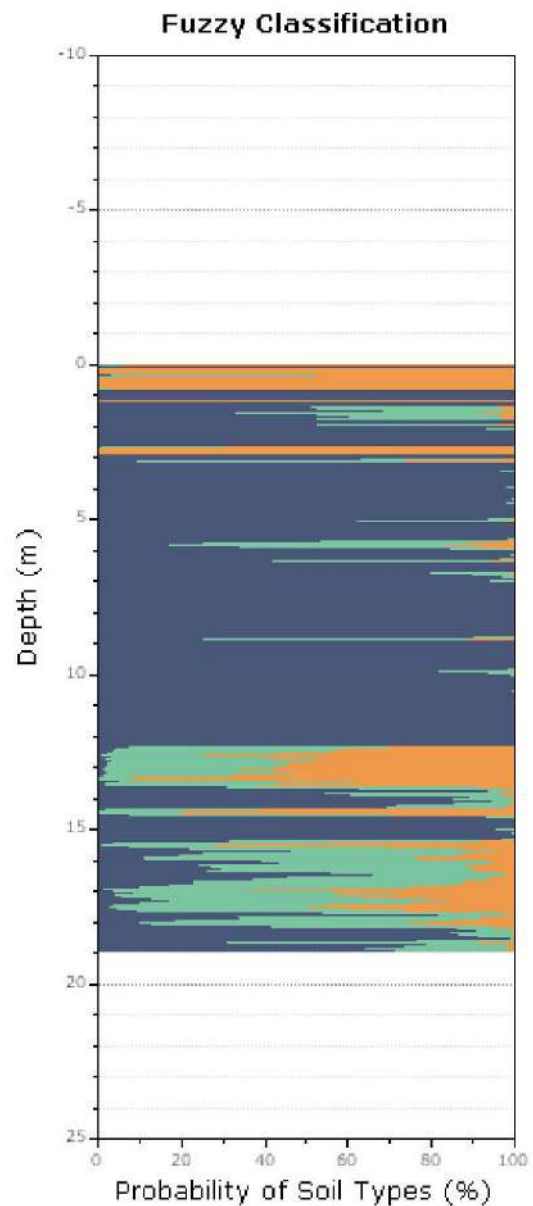
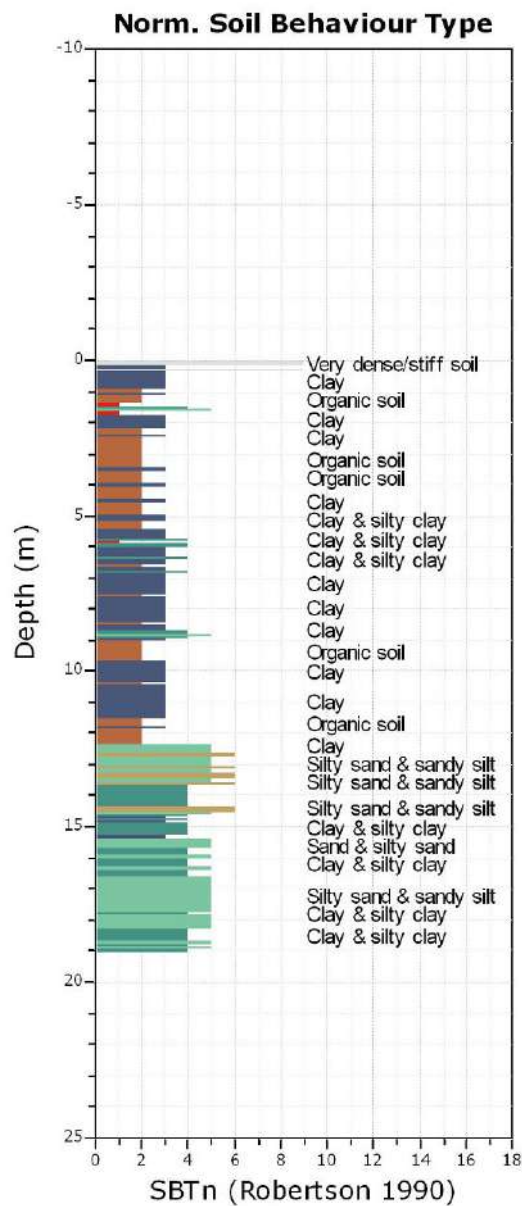


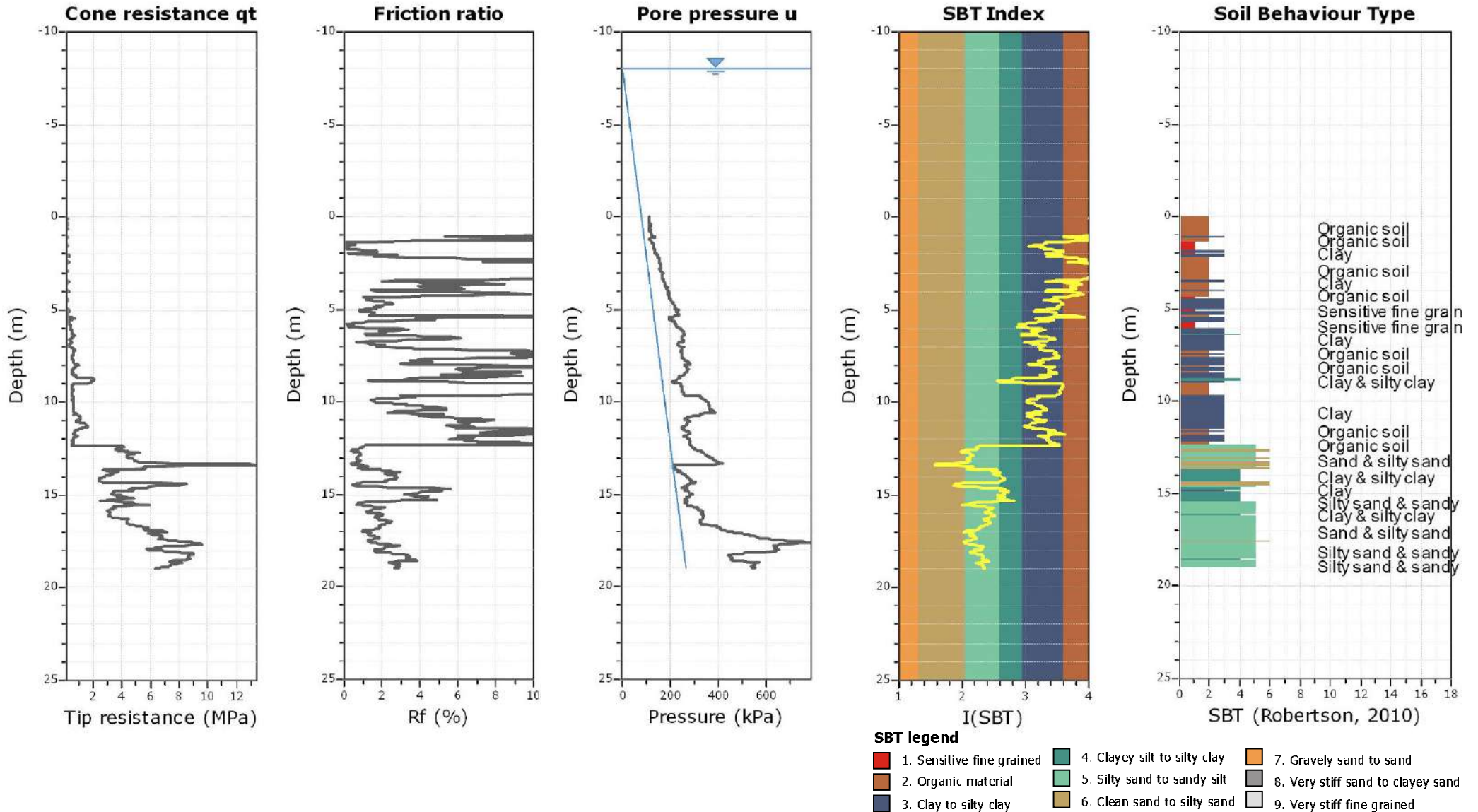
SBTn legend

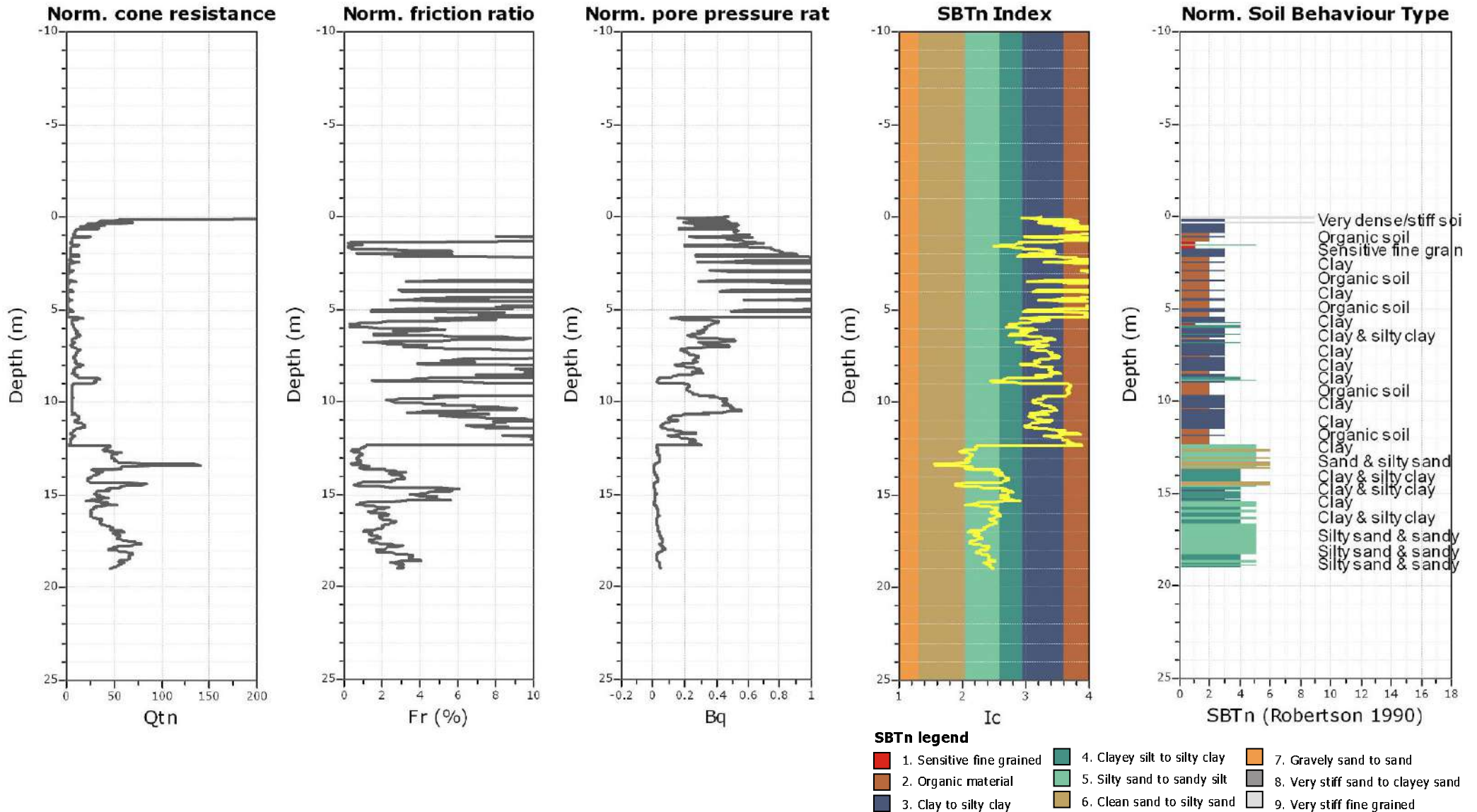
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

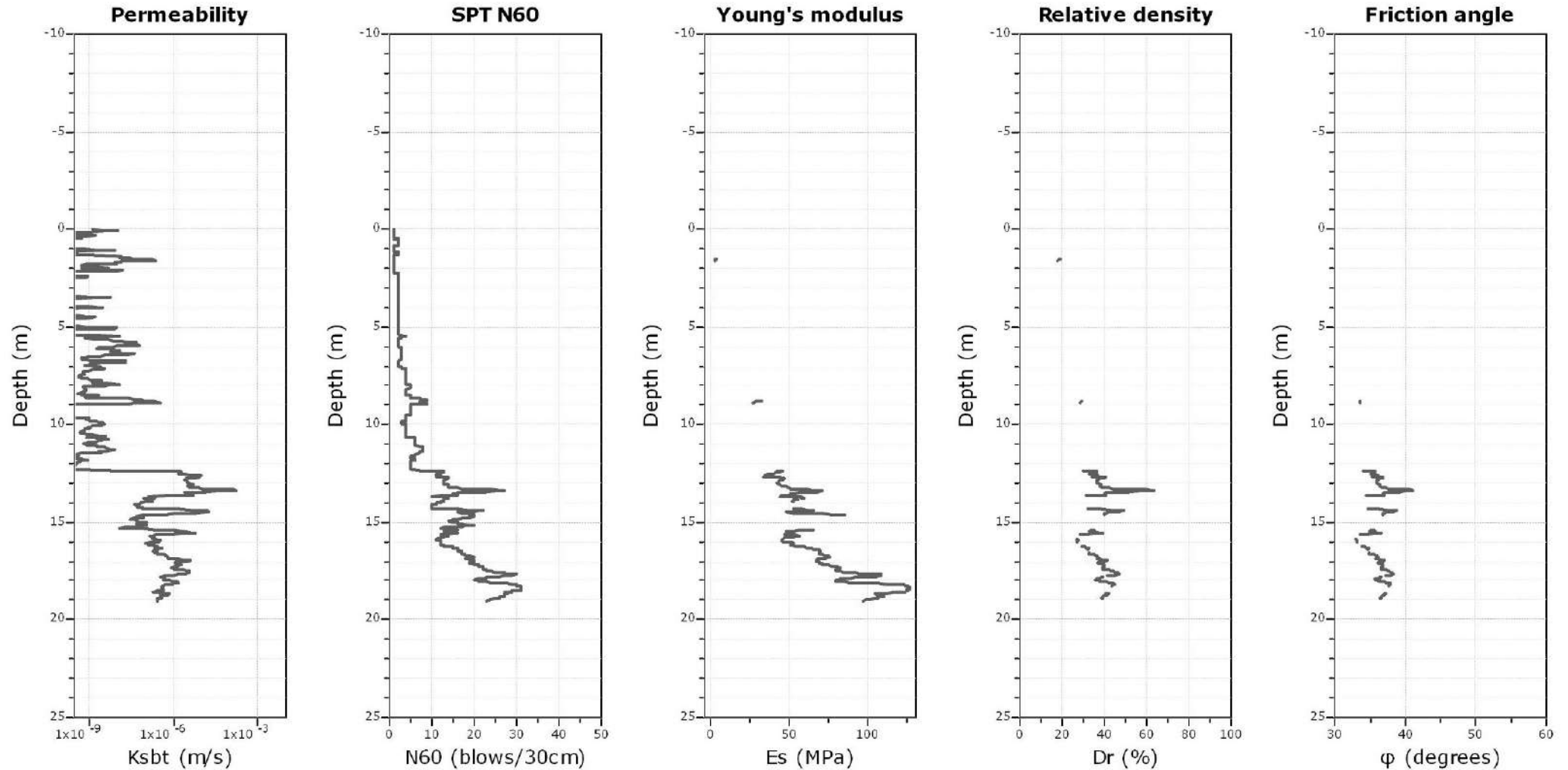
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

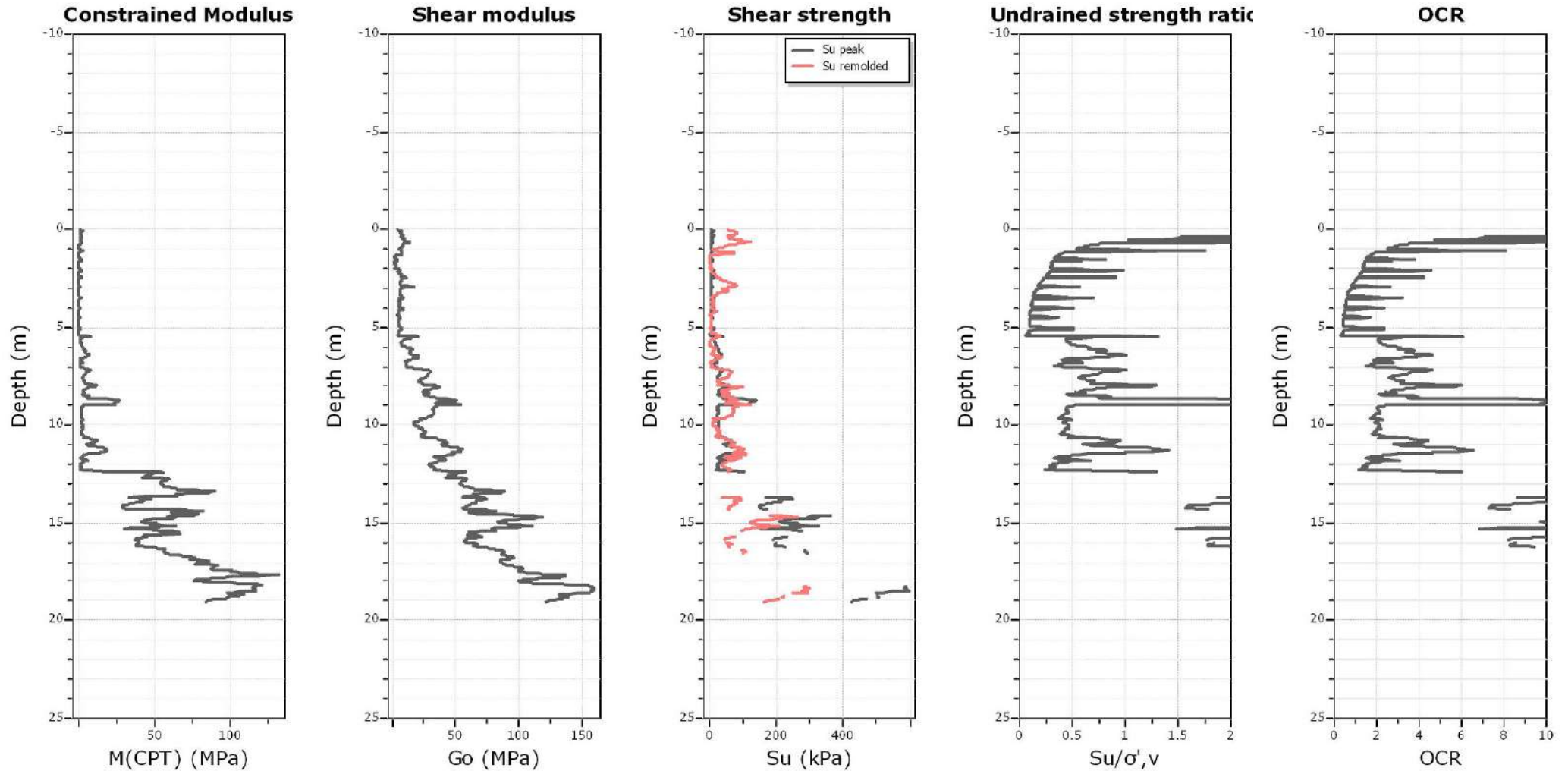
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

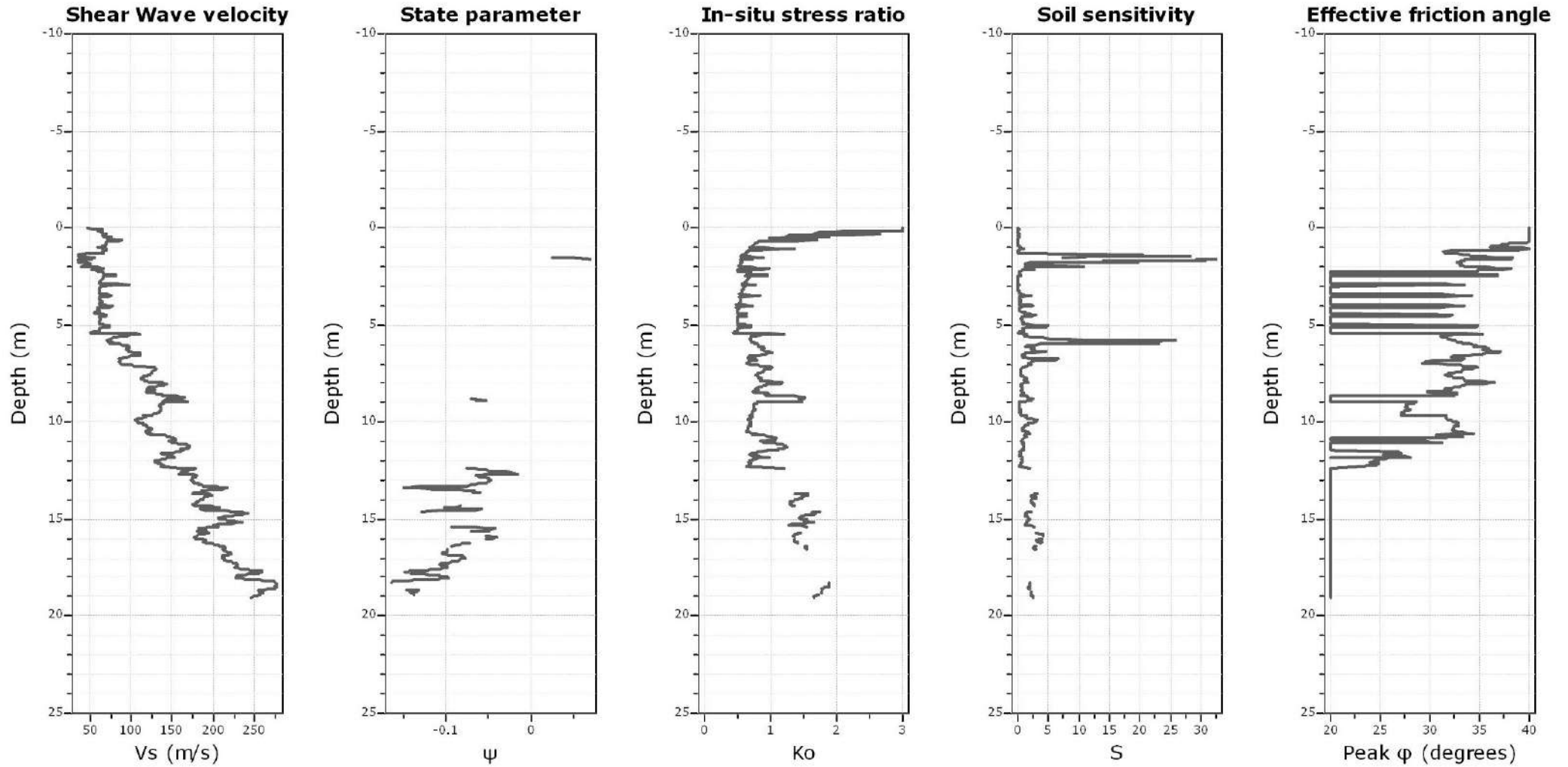
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

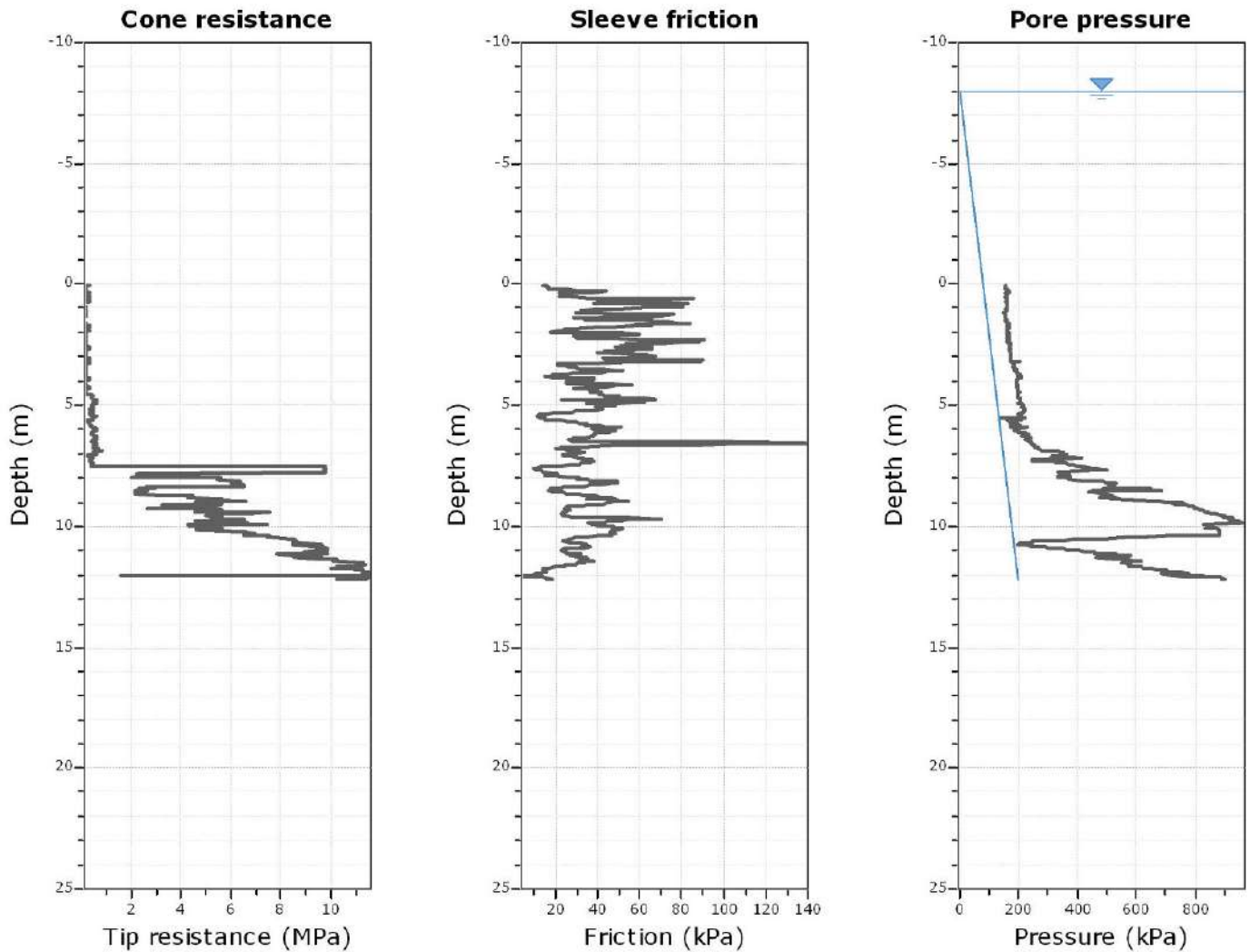
● — User defined estimation data



Calculation parameters

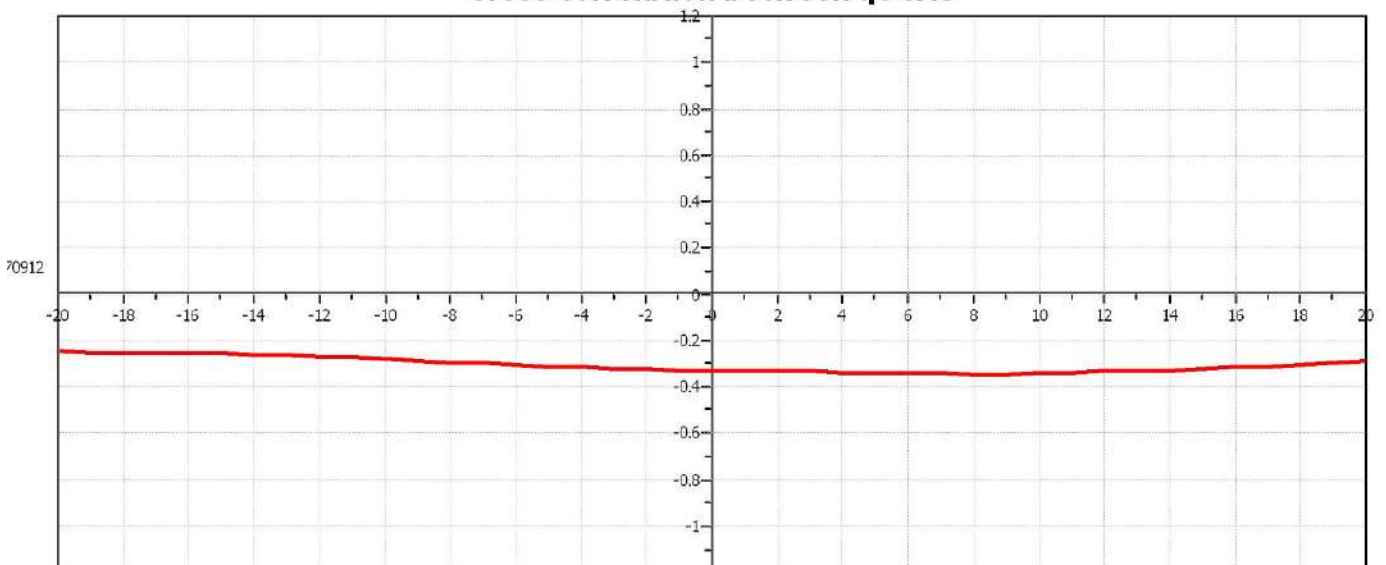
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

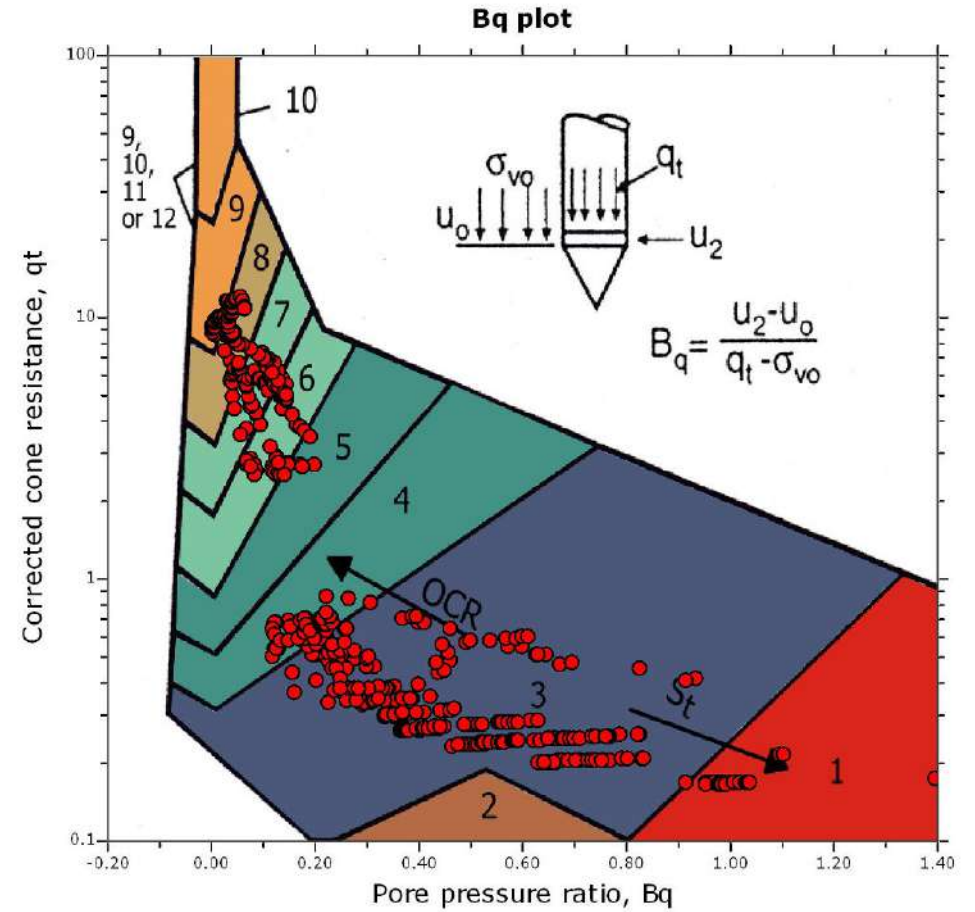
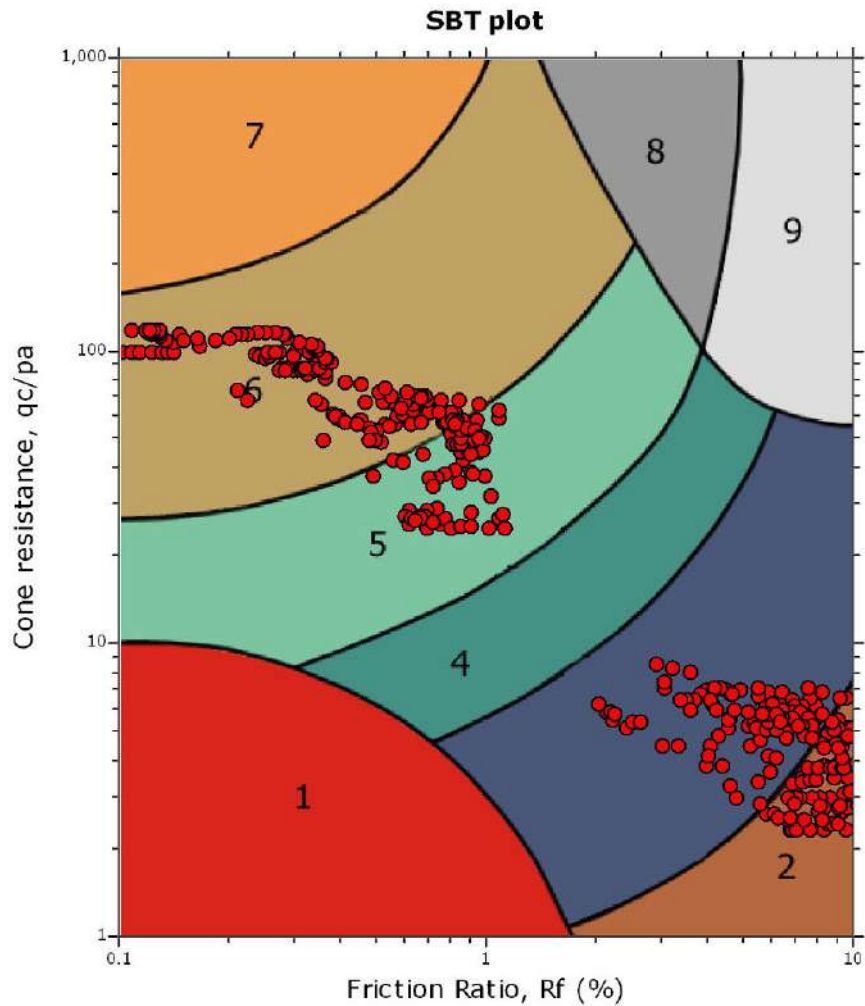


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



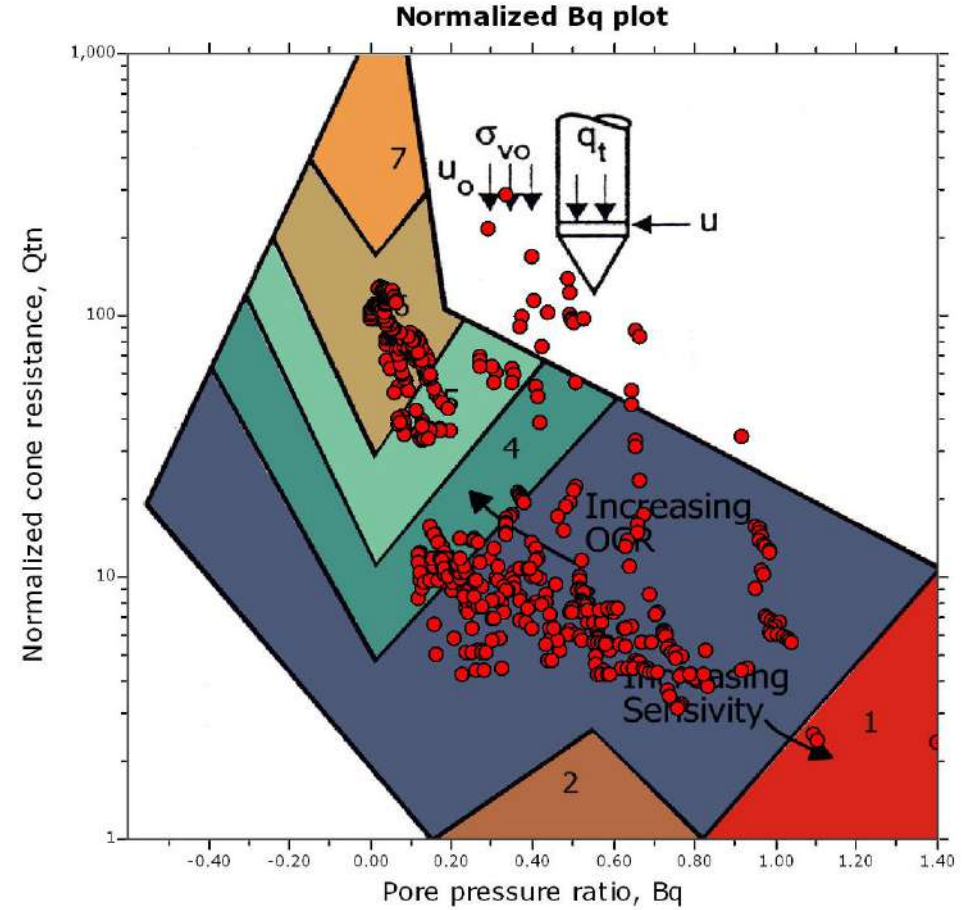
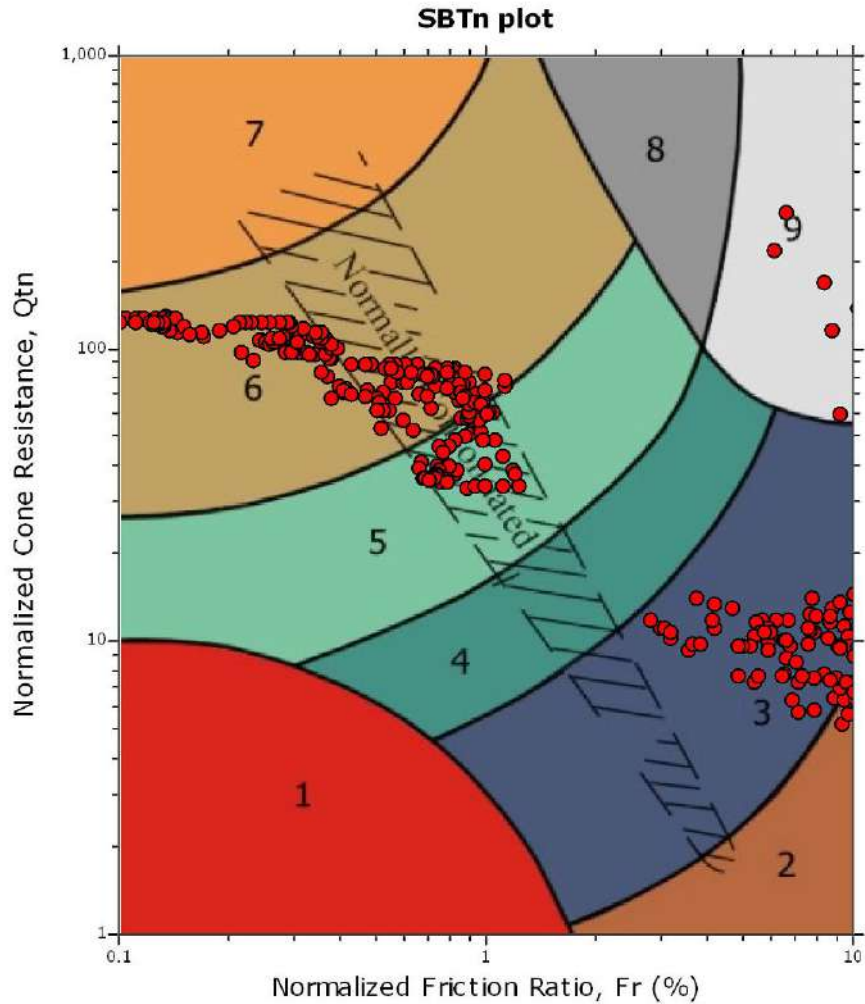
SBT - Bq plots



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 |

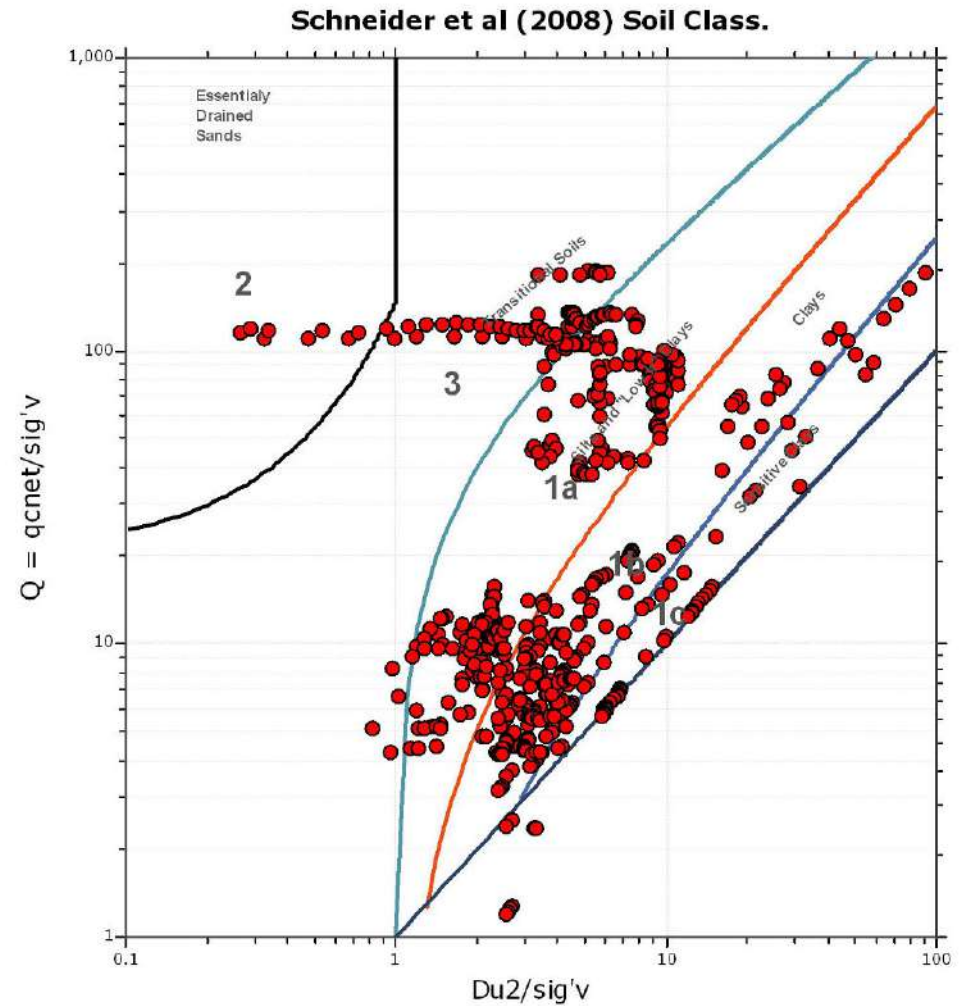
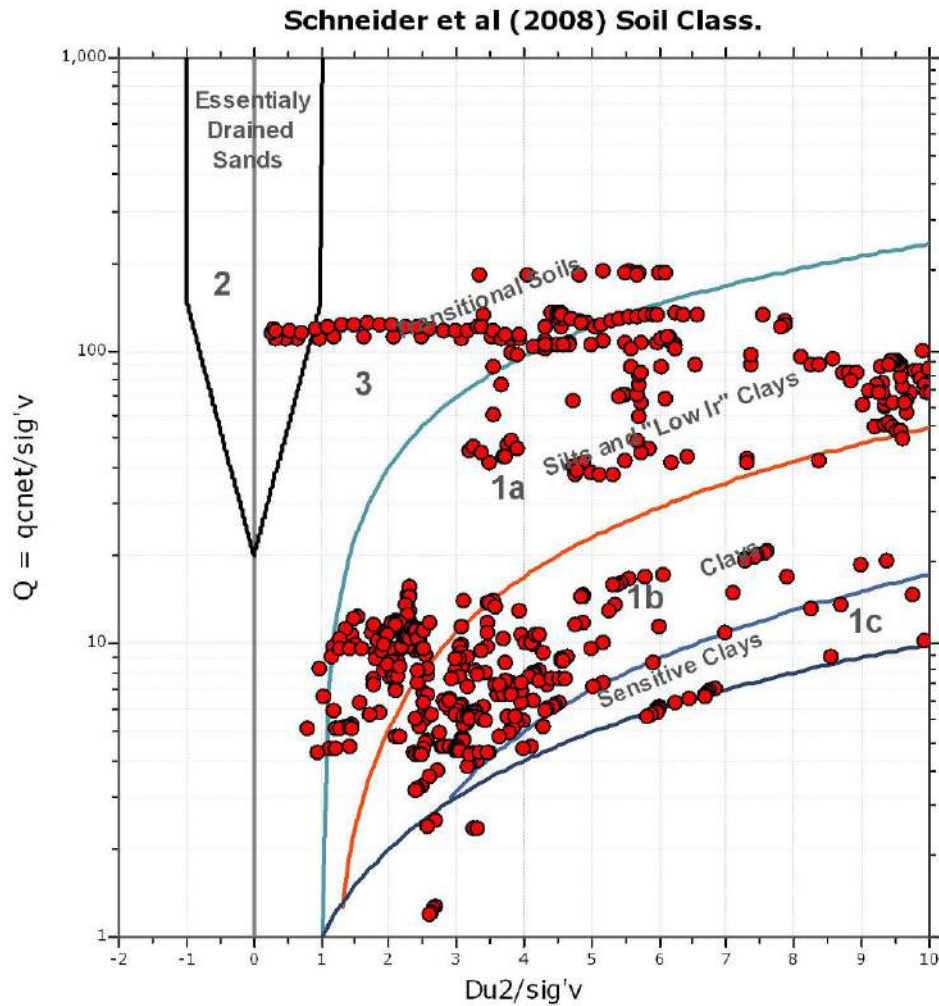
SBT - Bq plots (normalized)

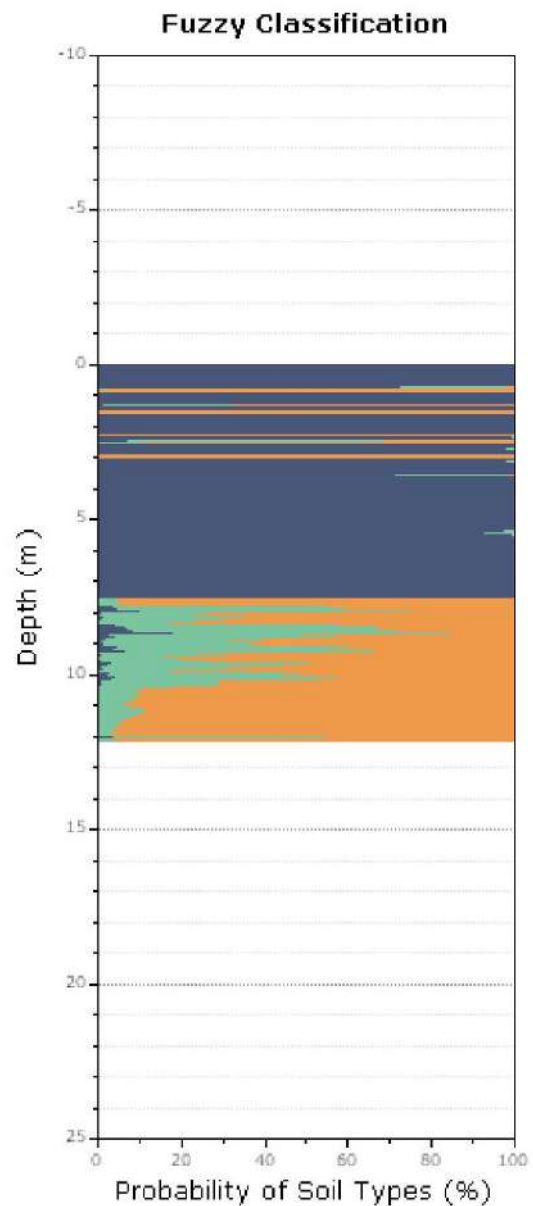
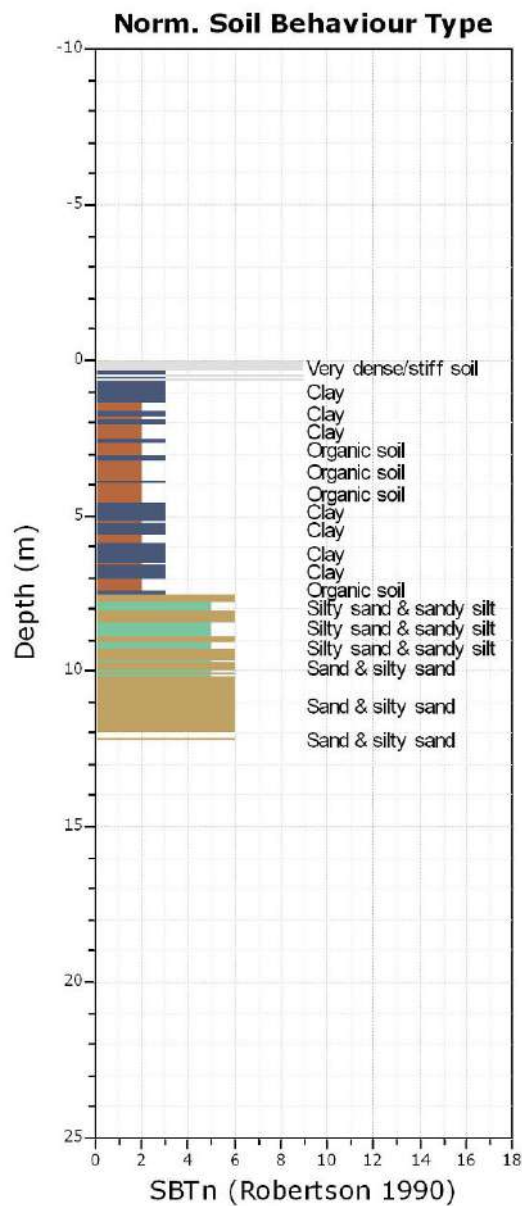


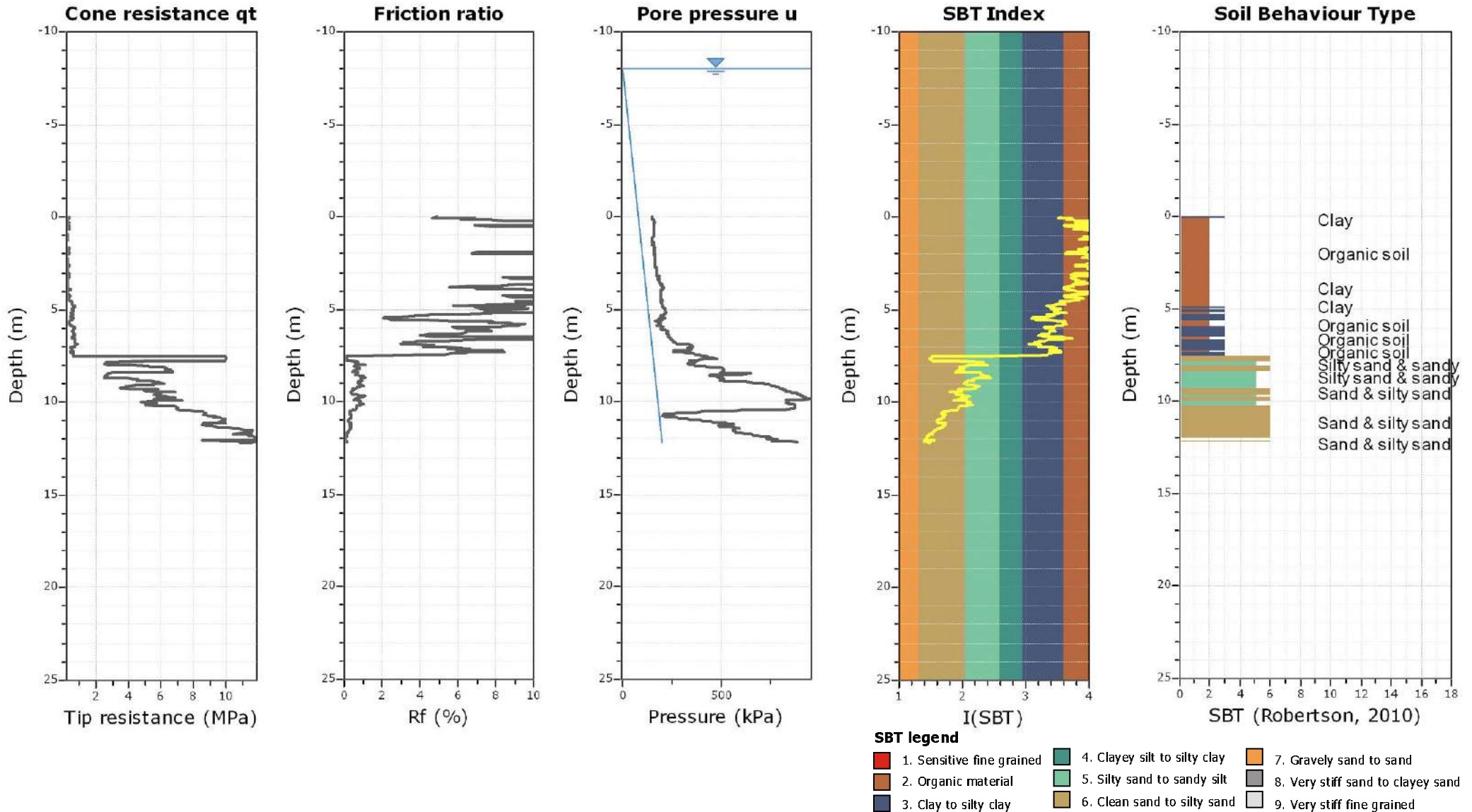
SBTn legend

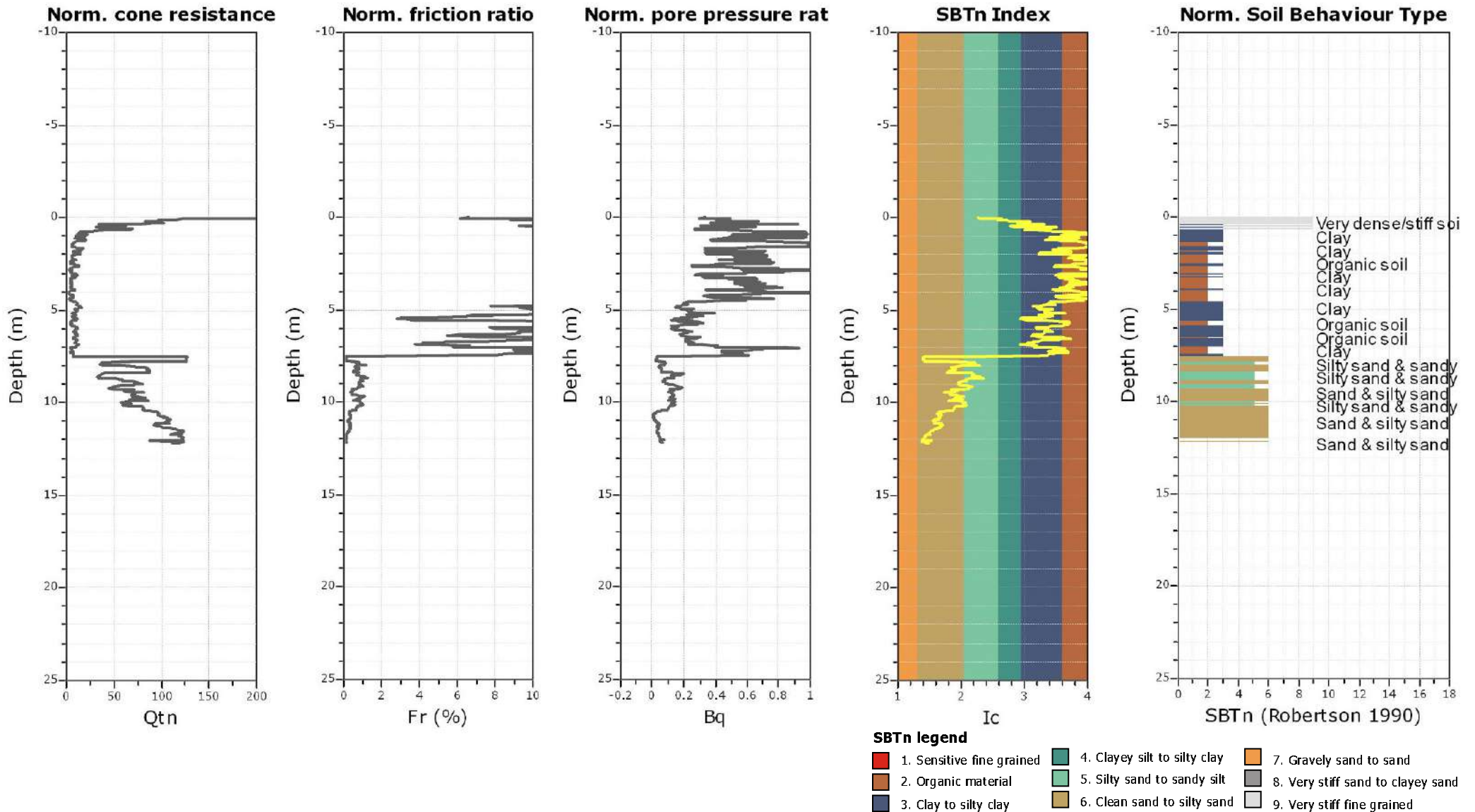
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

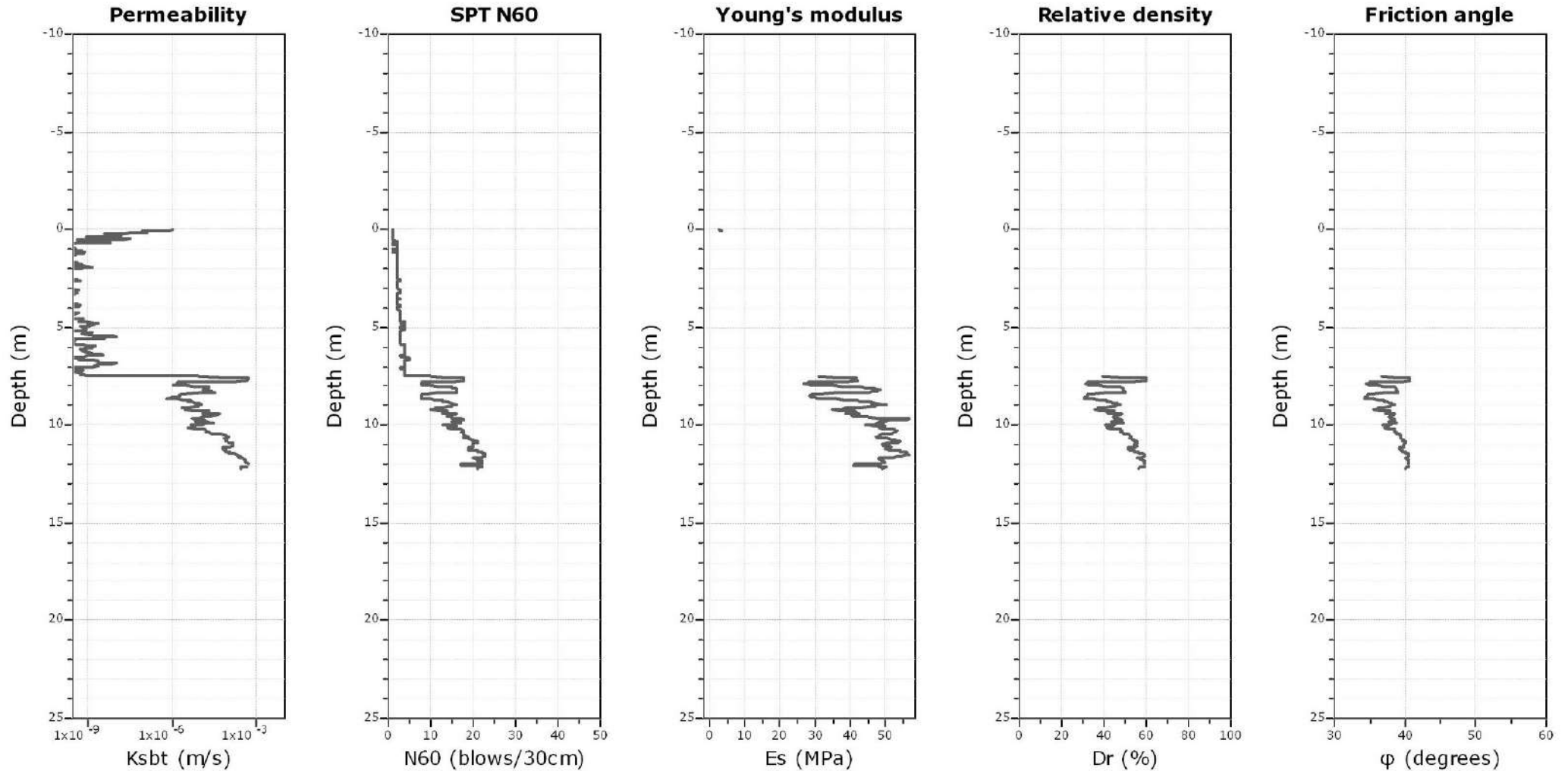
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

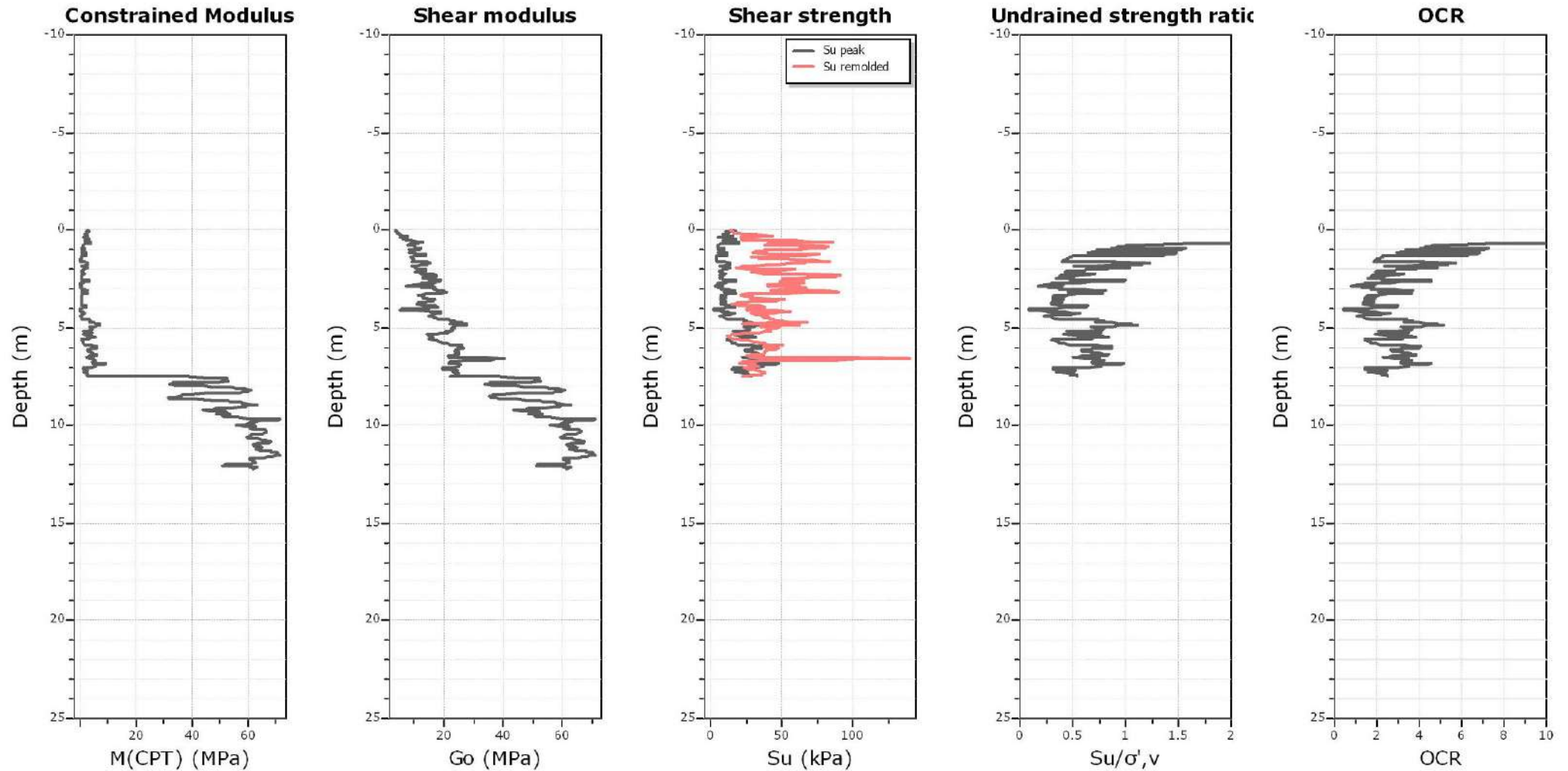
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

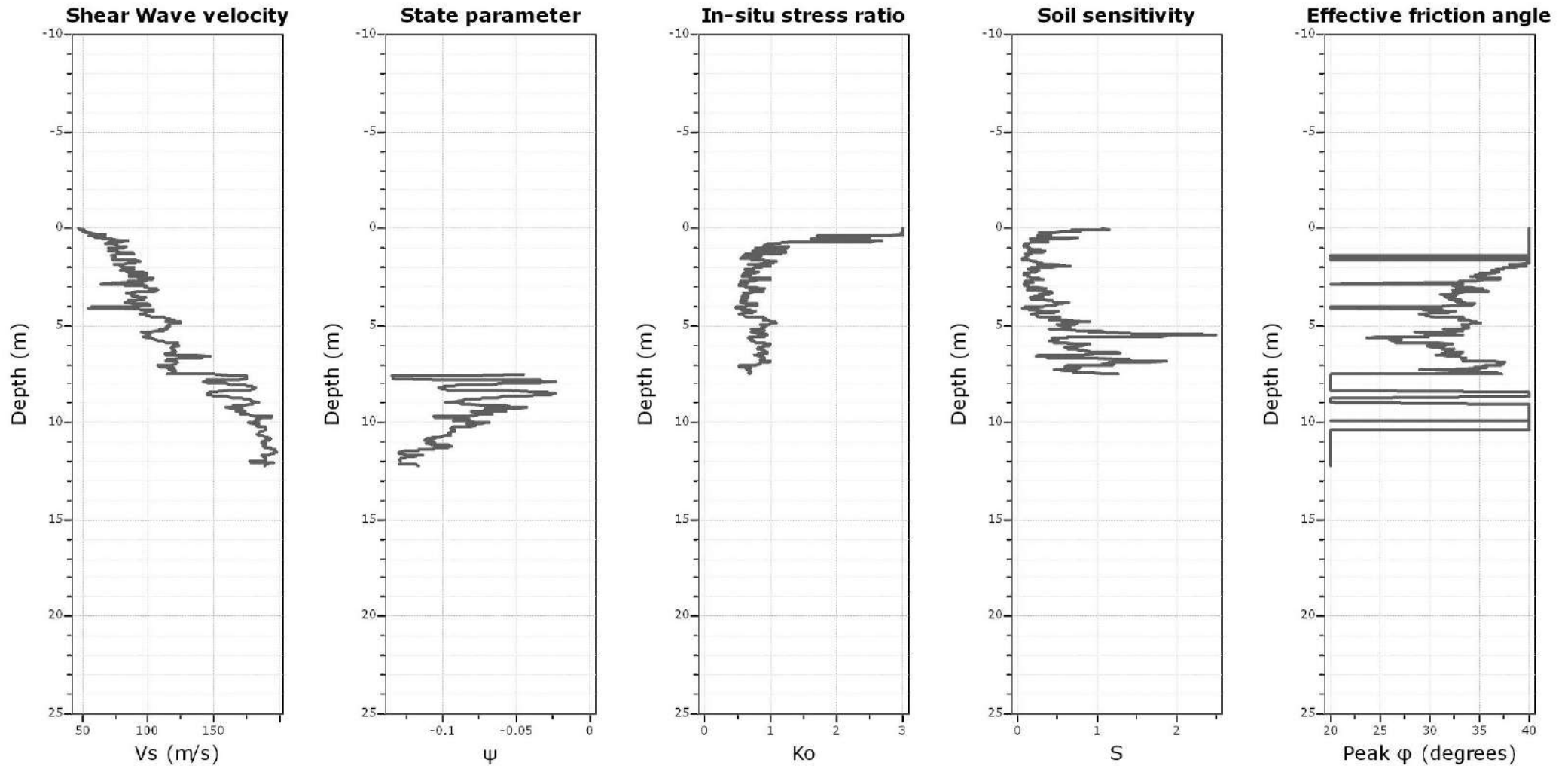
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

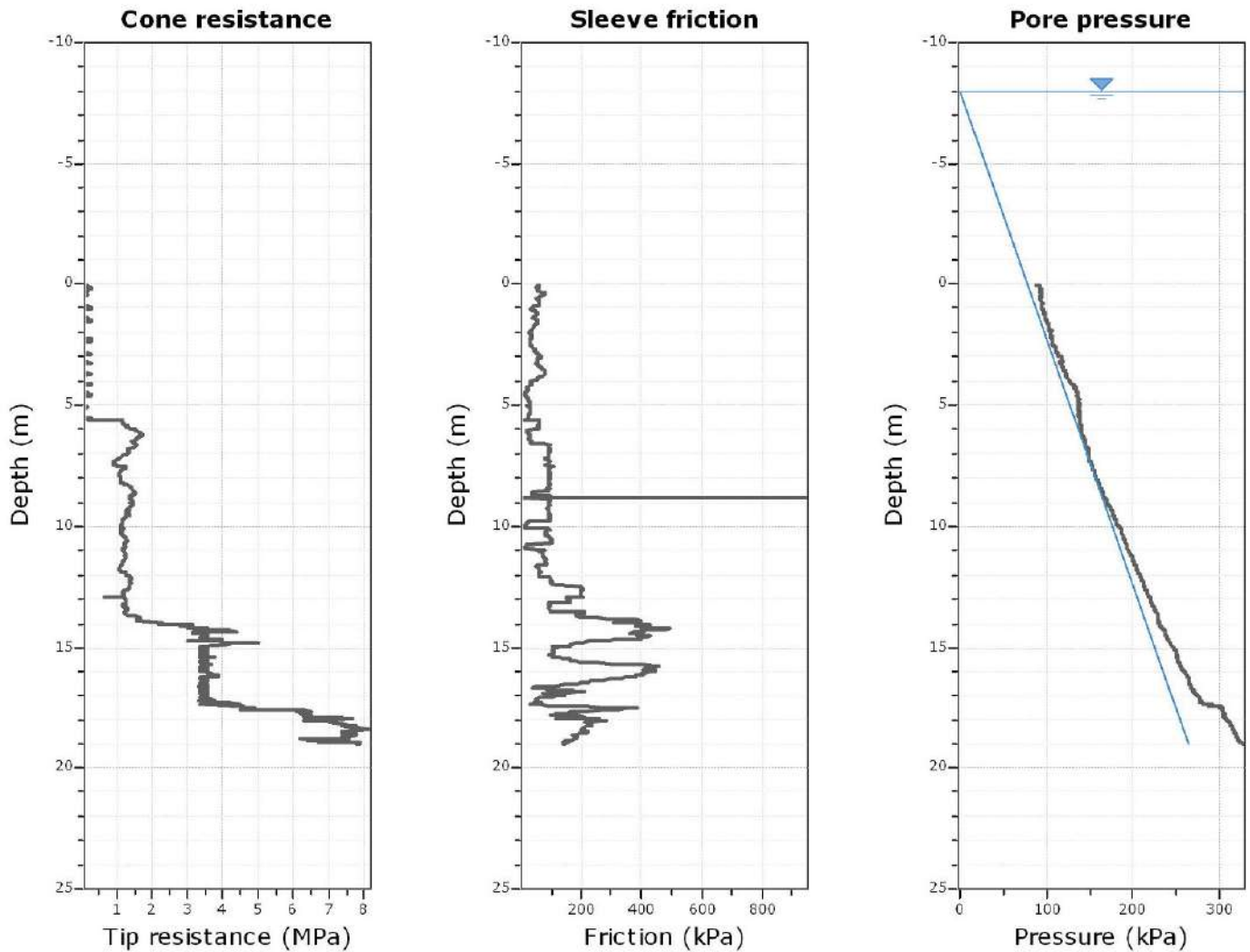
● — User defined estimation data



Calculation parameters

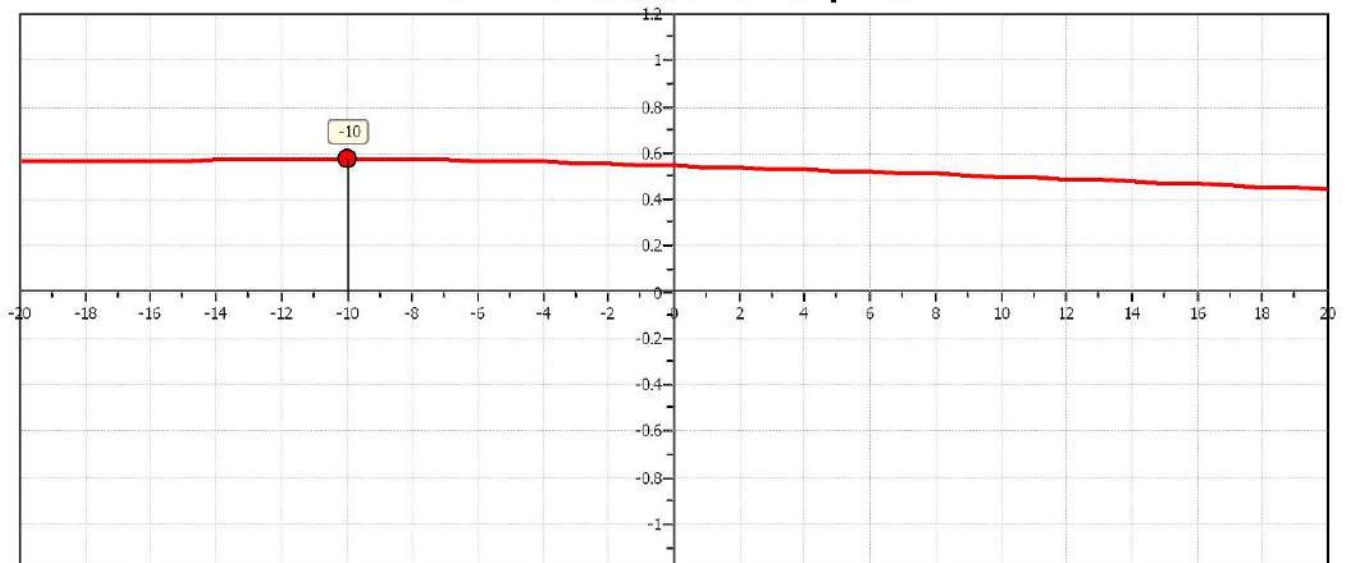
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data

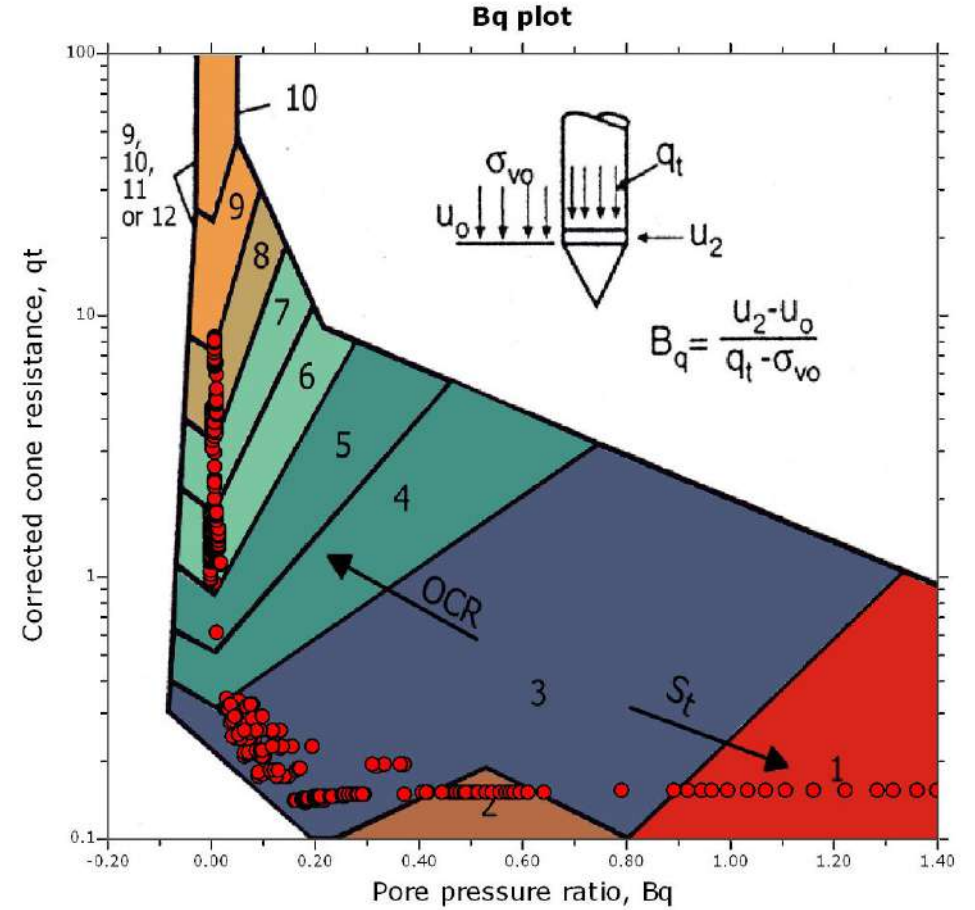
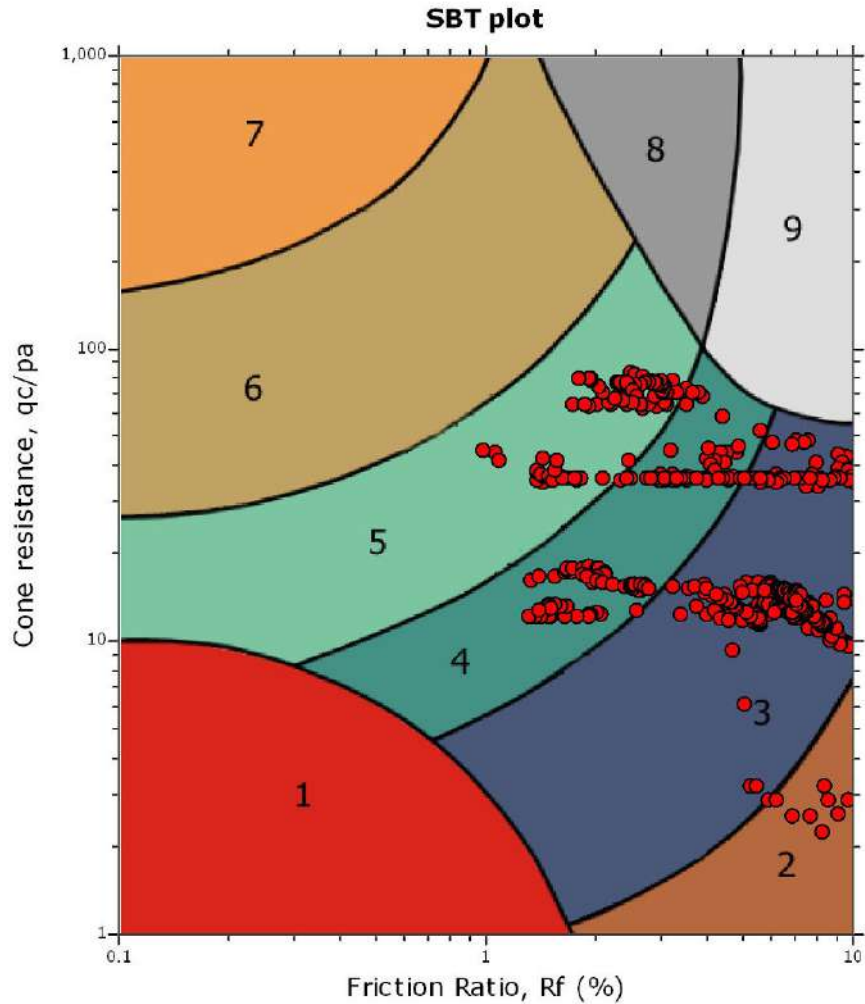


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



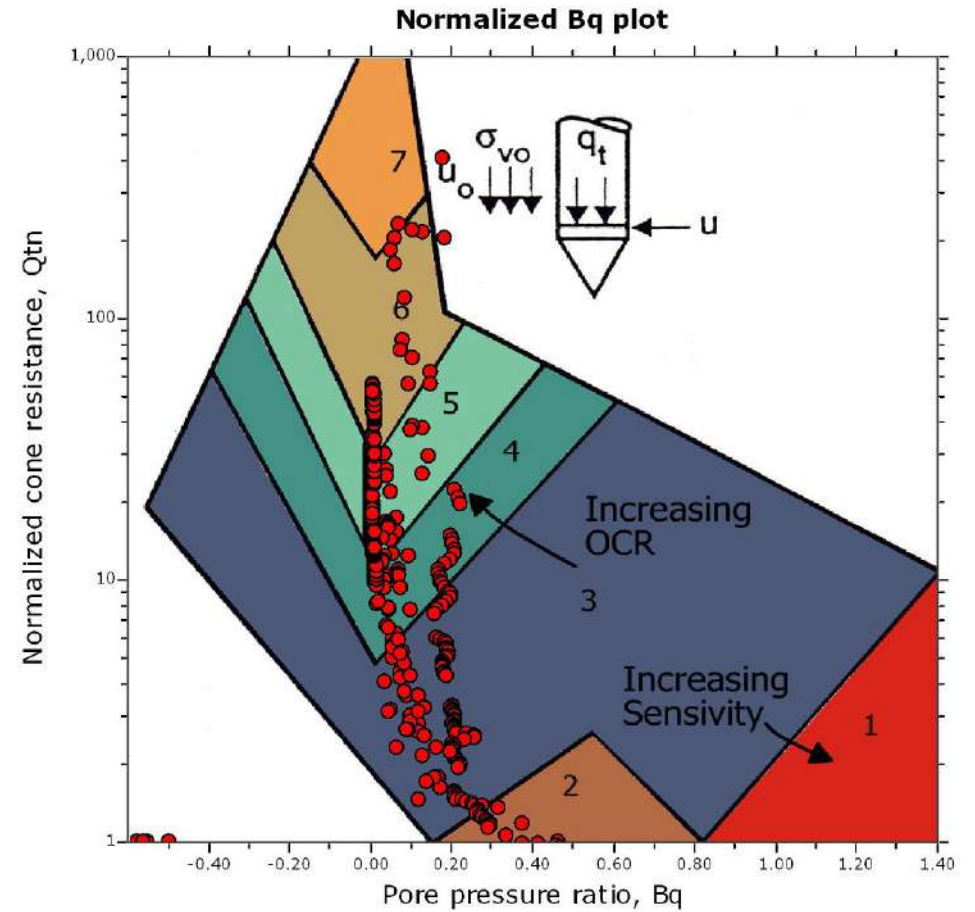
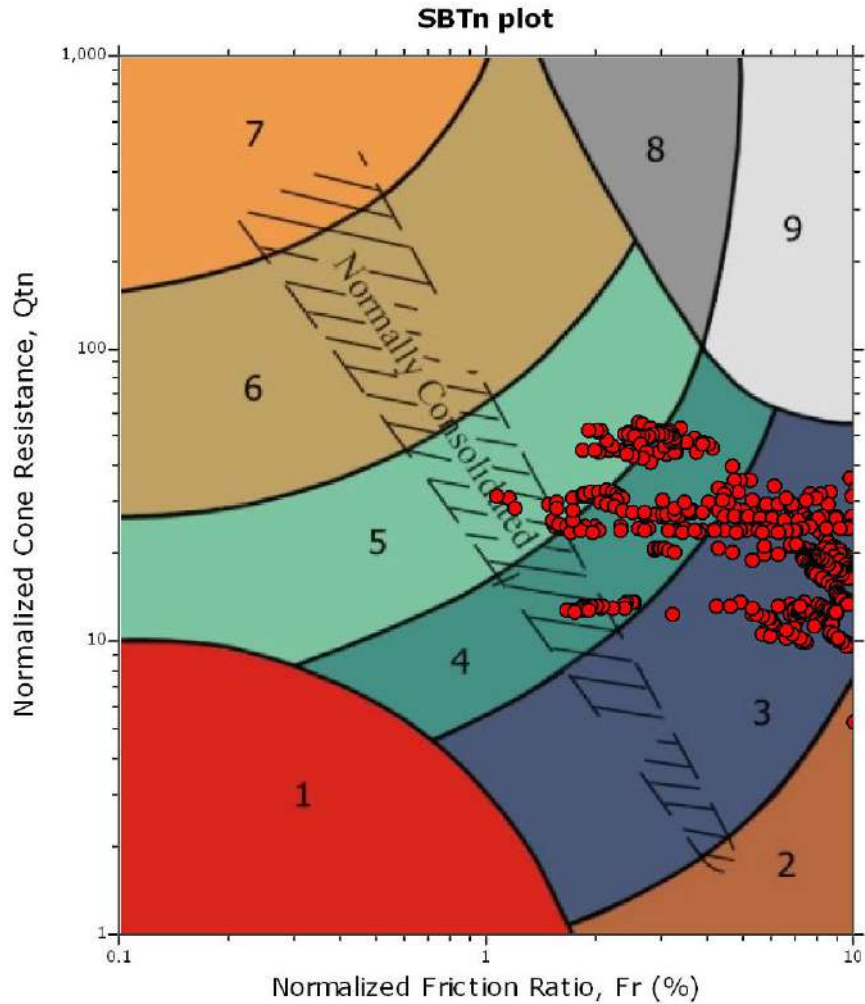
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

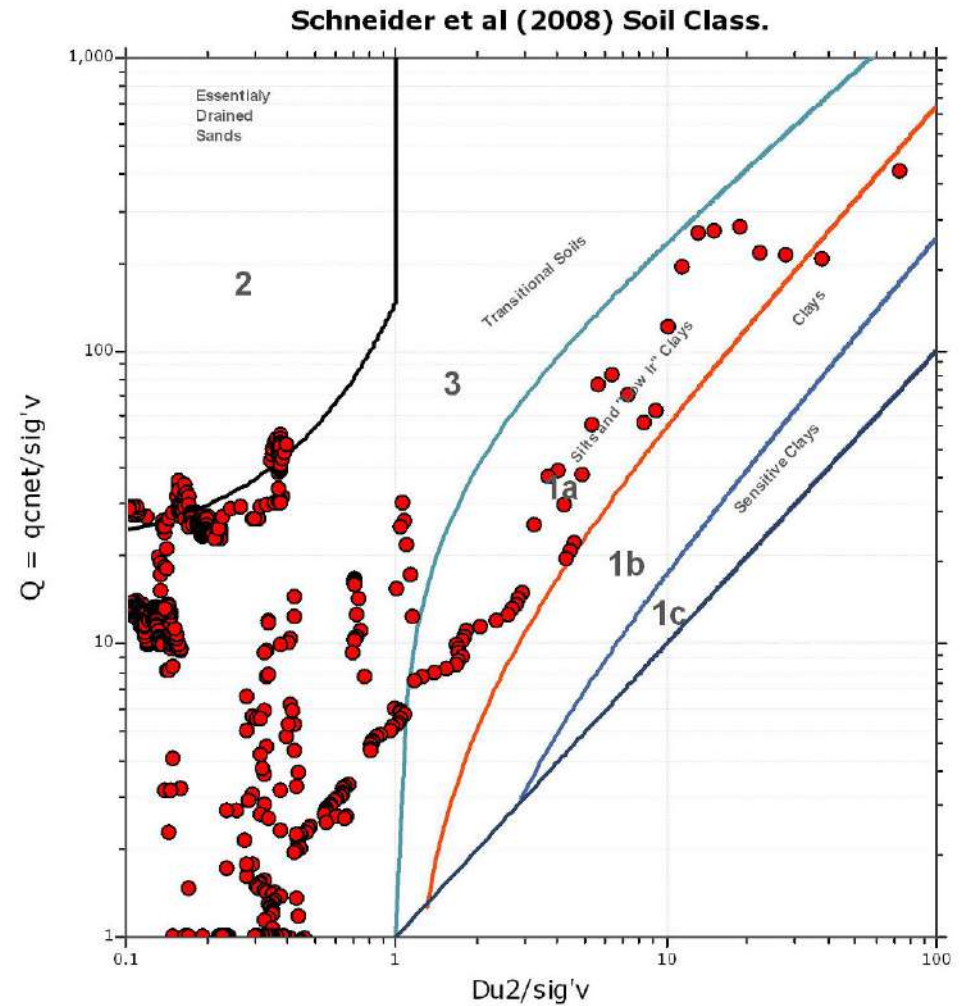
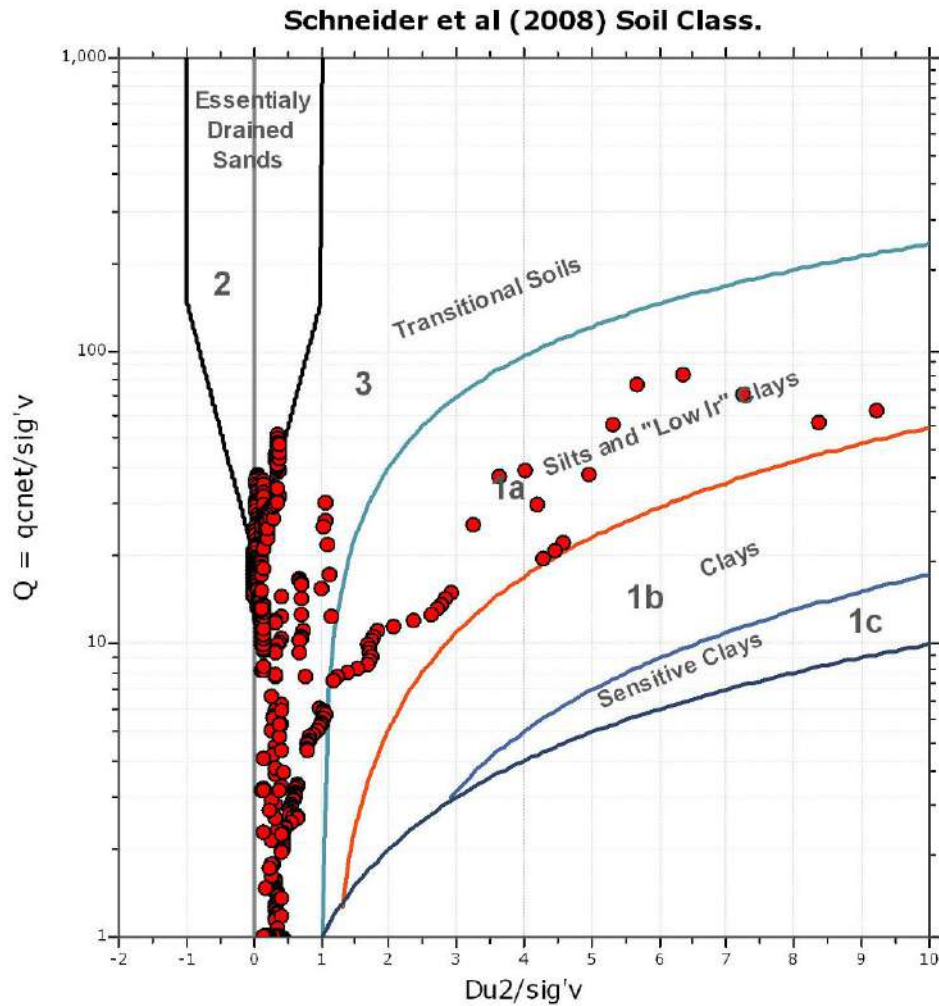
SBT - Bq plots (normalized)

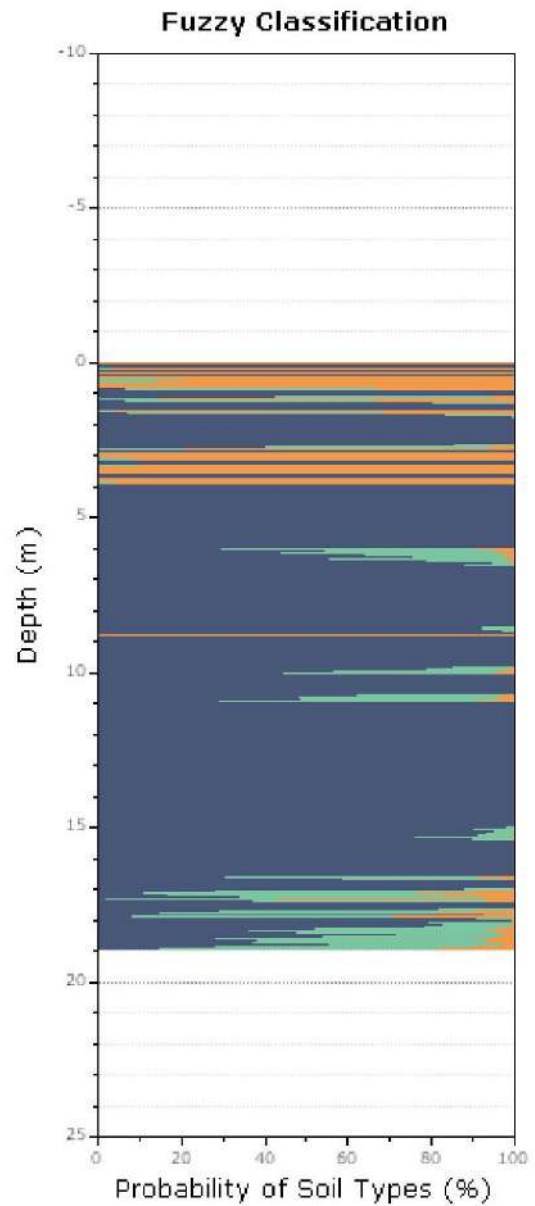
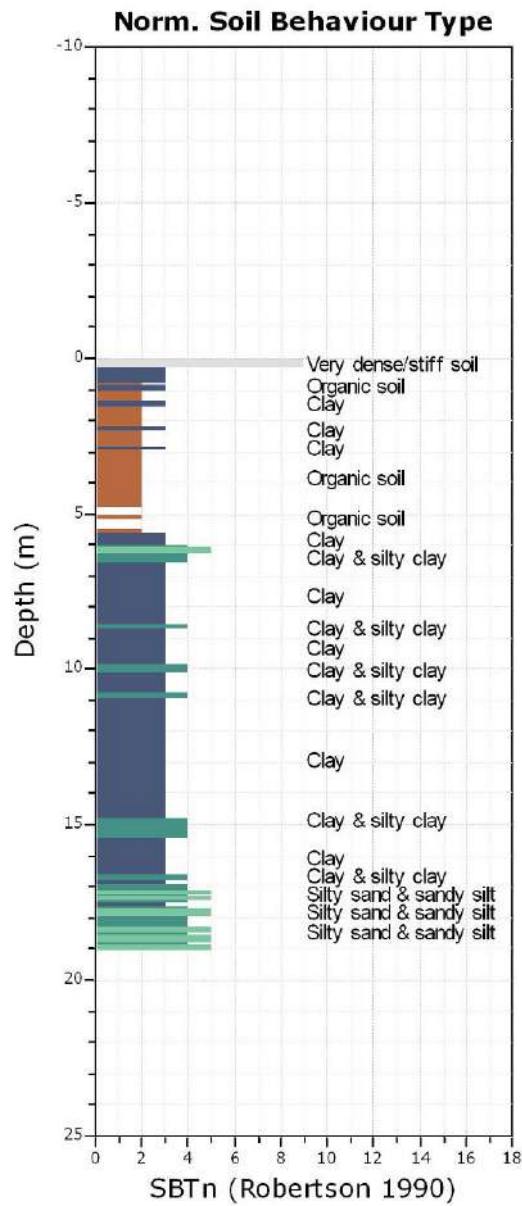


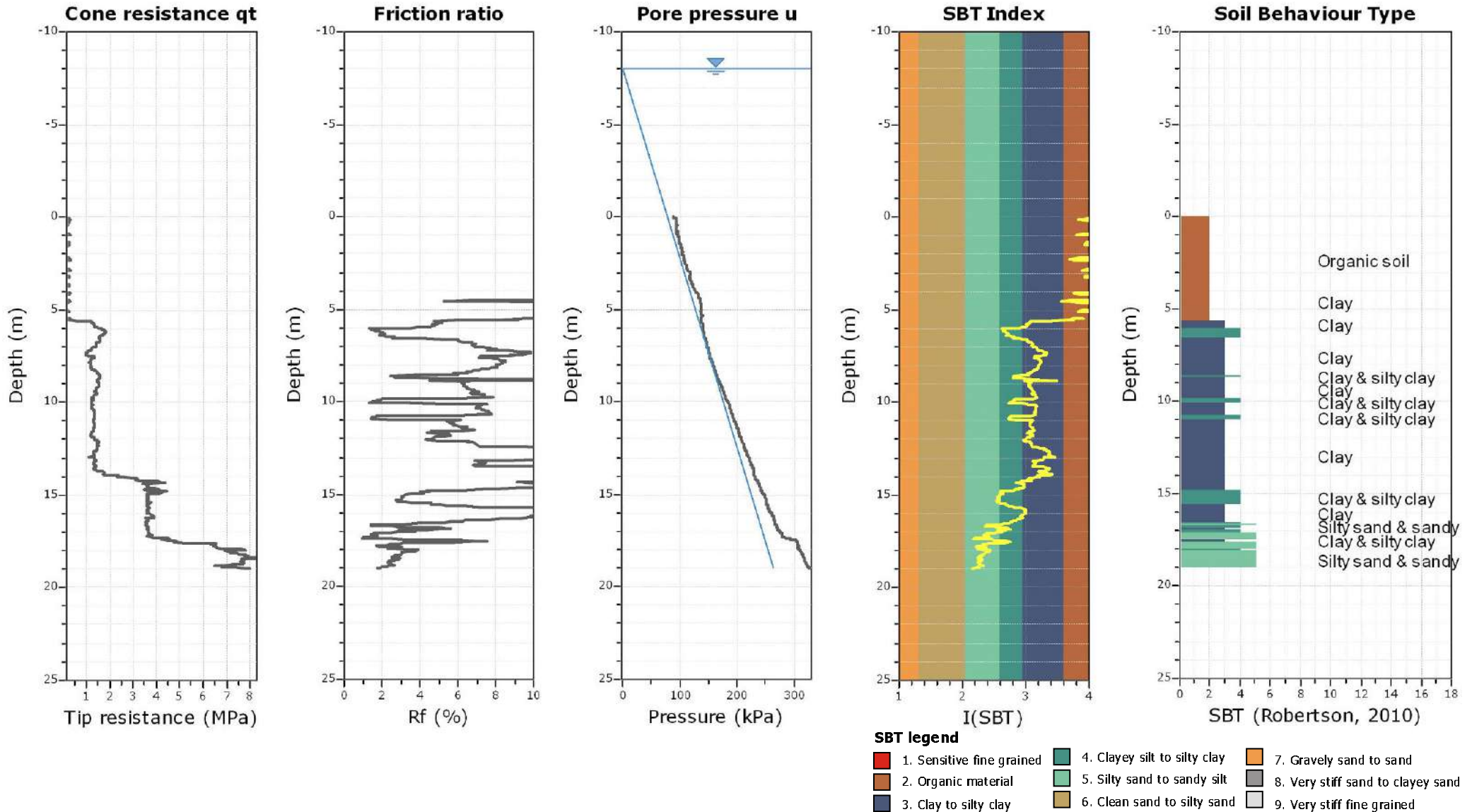
SBTn legend

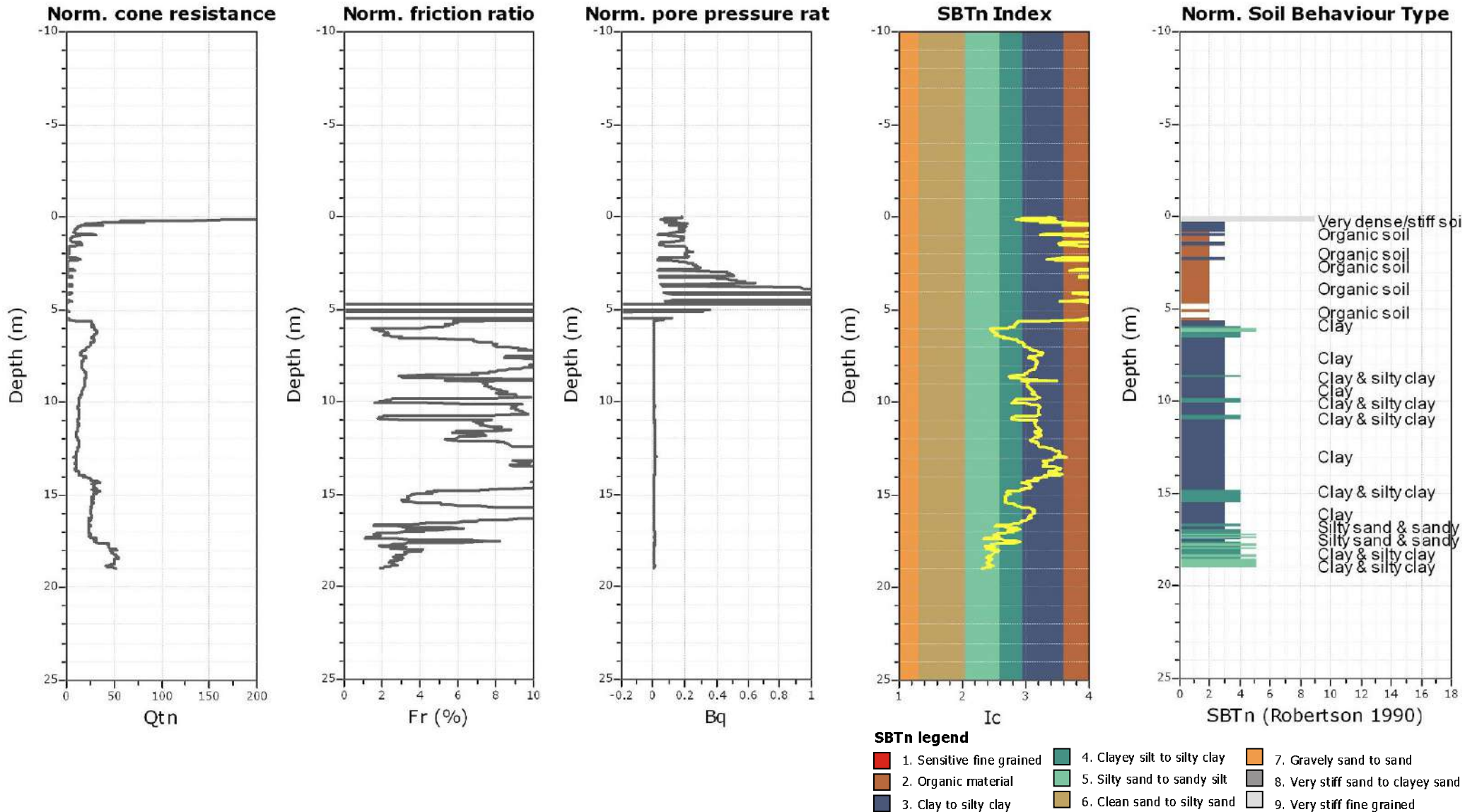
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

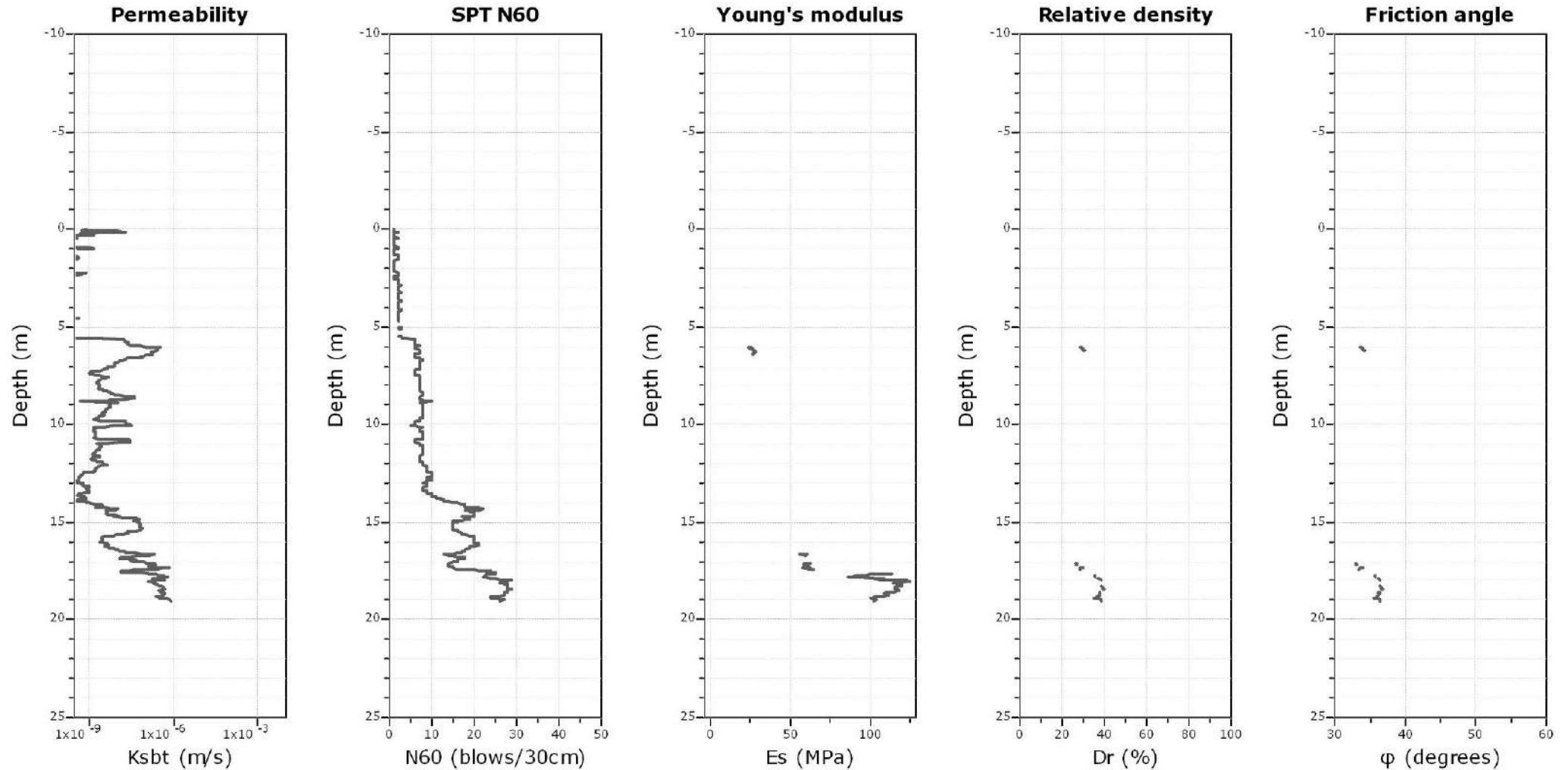
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

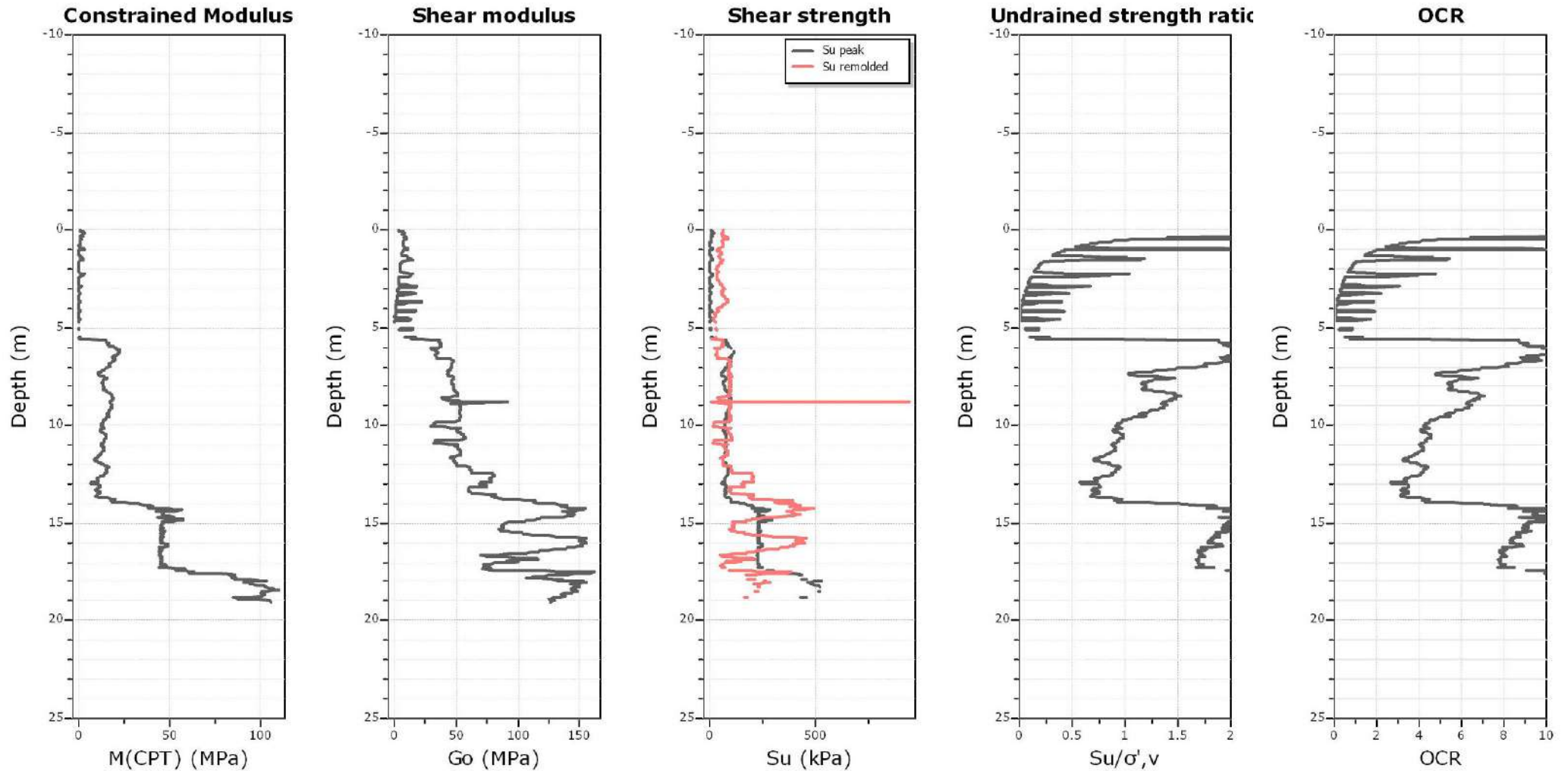
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

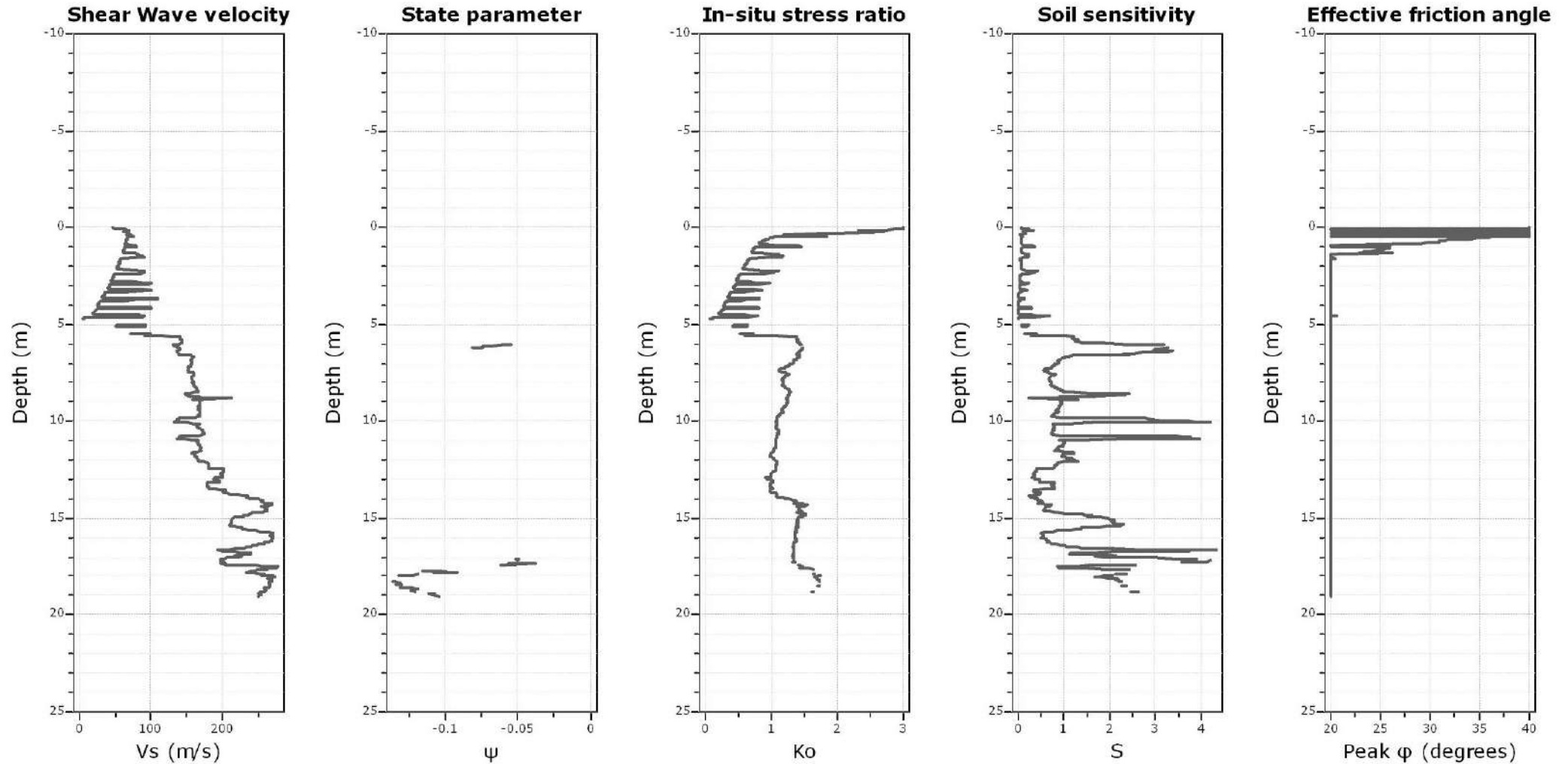
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

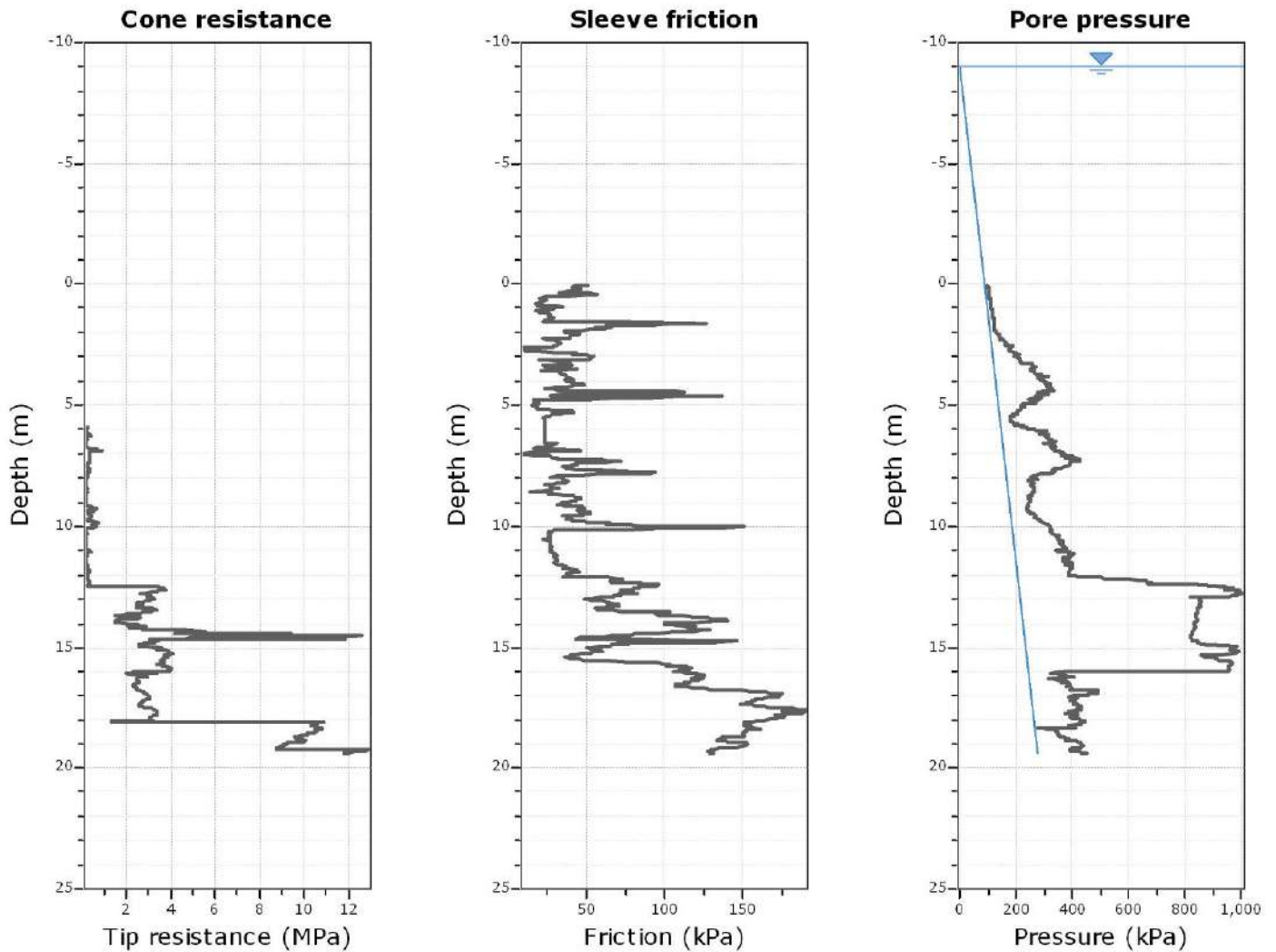
● — User defined estimation data



Calculation parameters

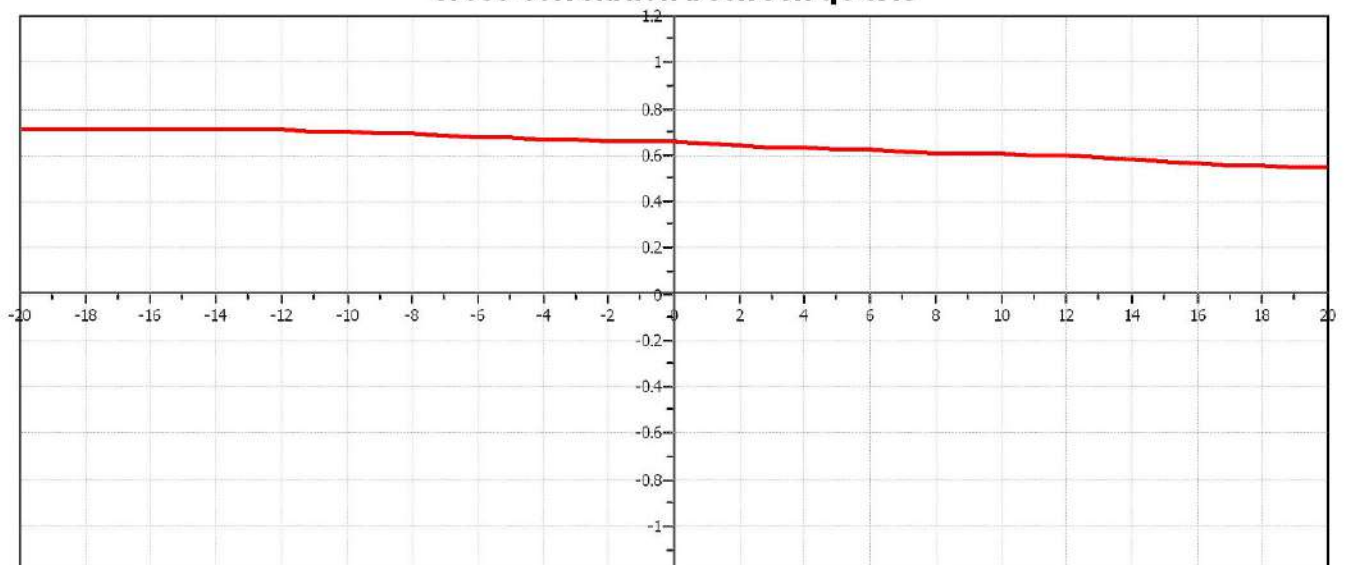
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

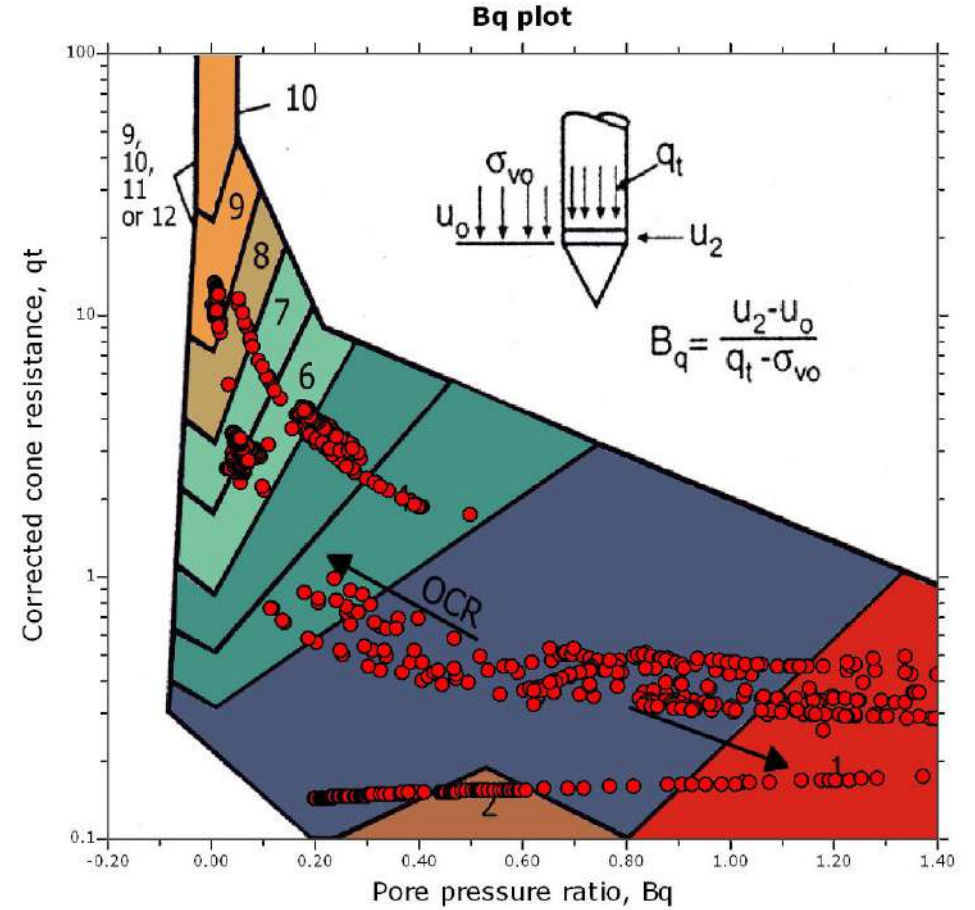
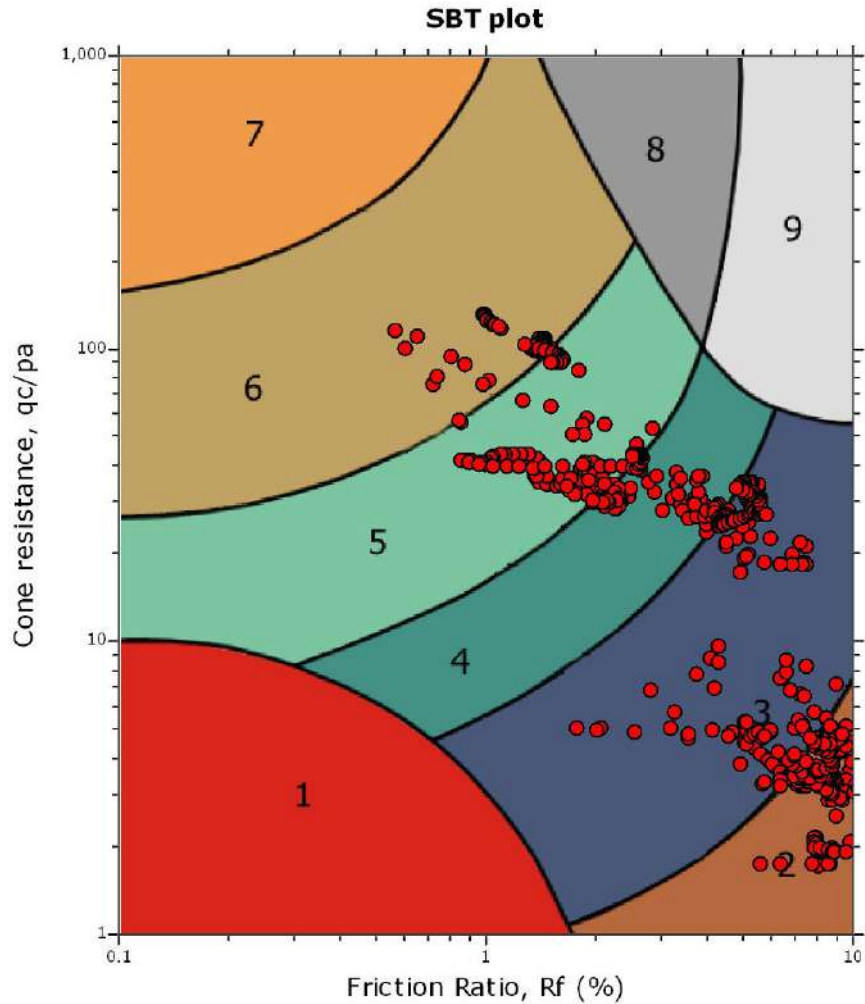


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



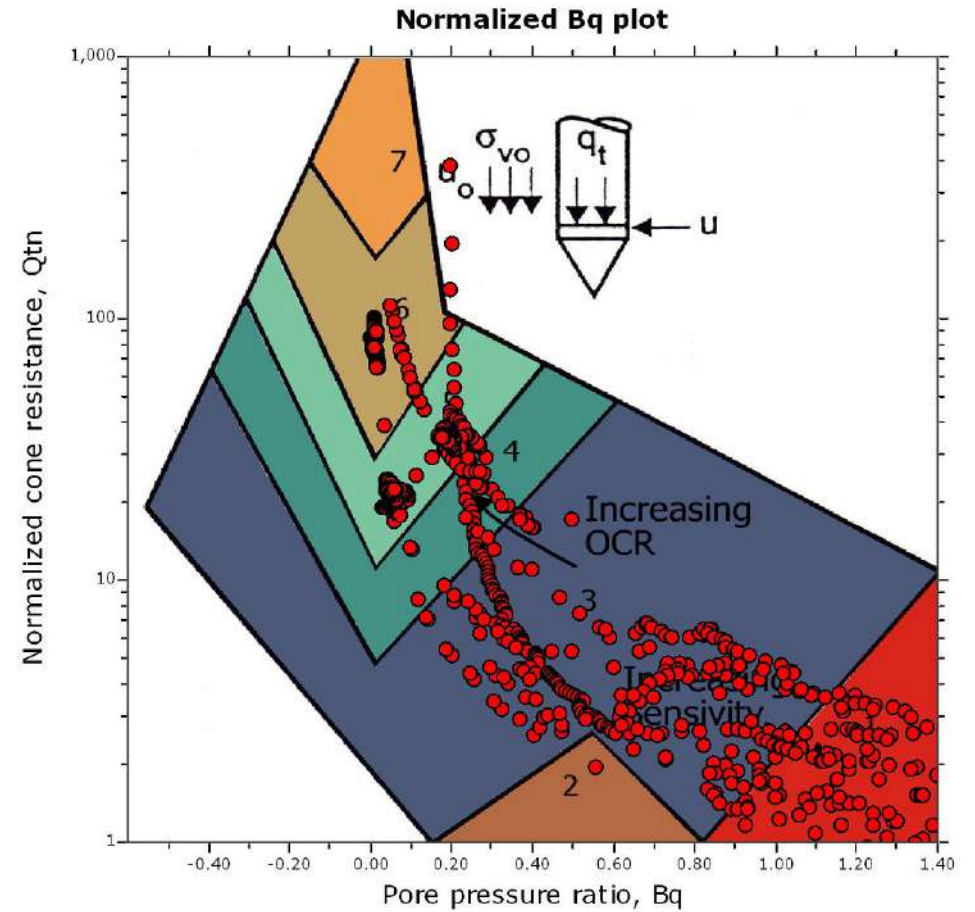
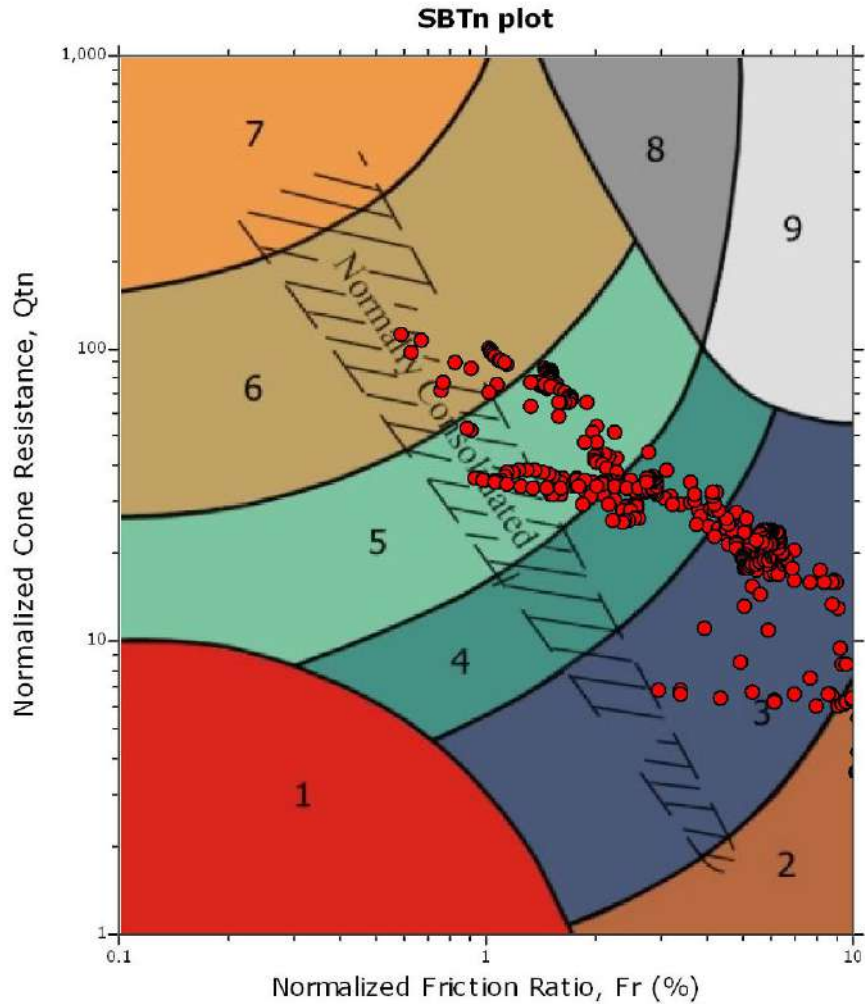
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

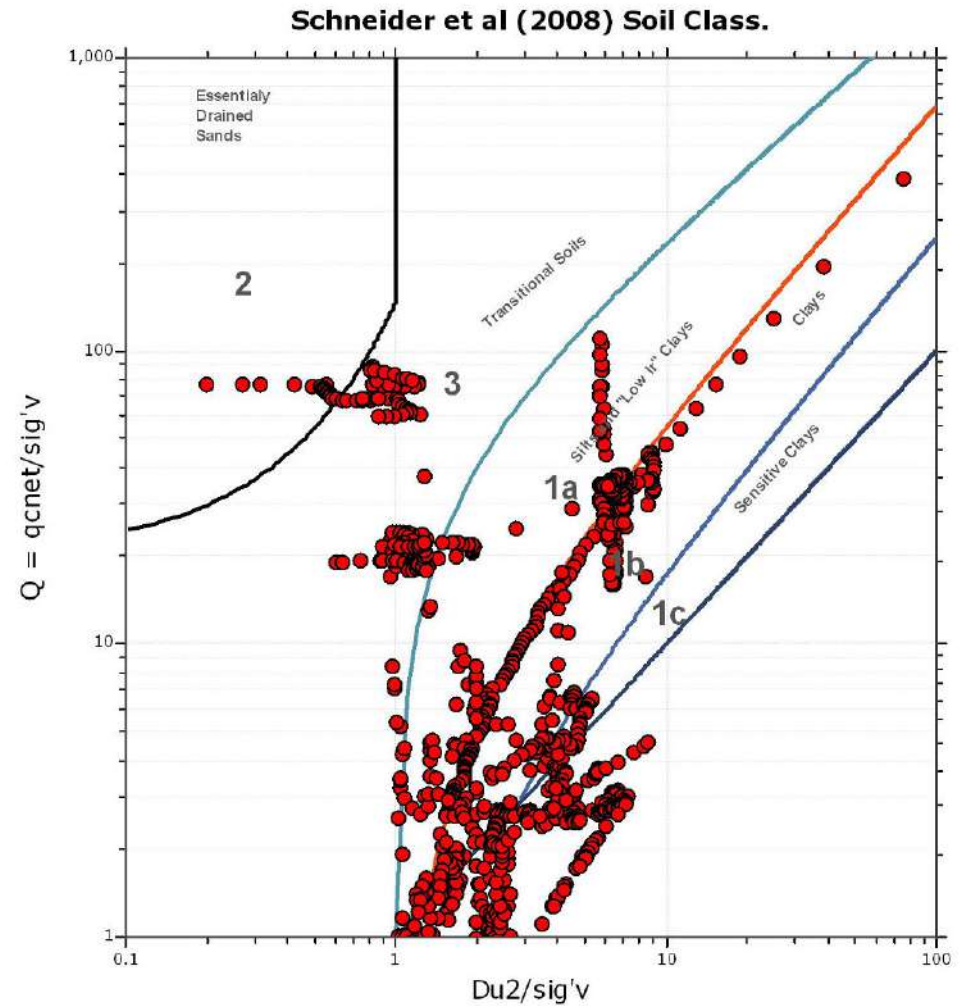
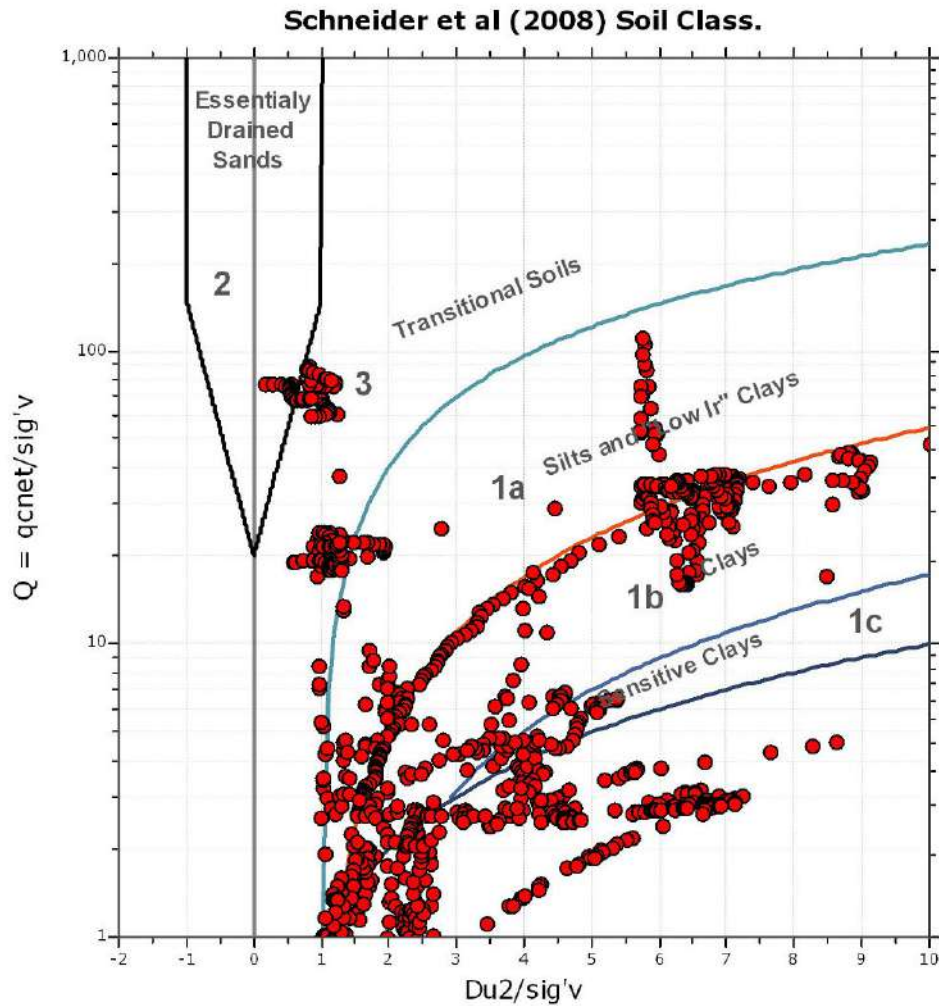
SBT - Bq plots (normalized)

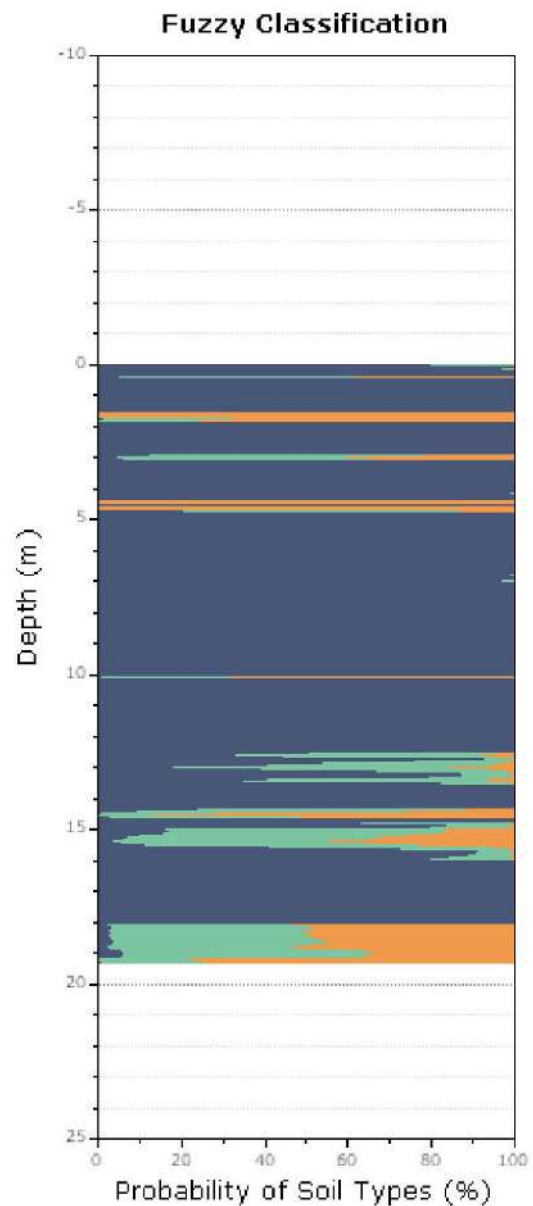
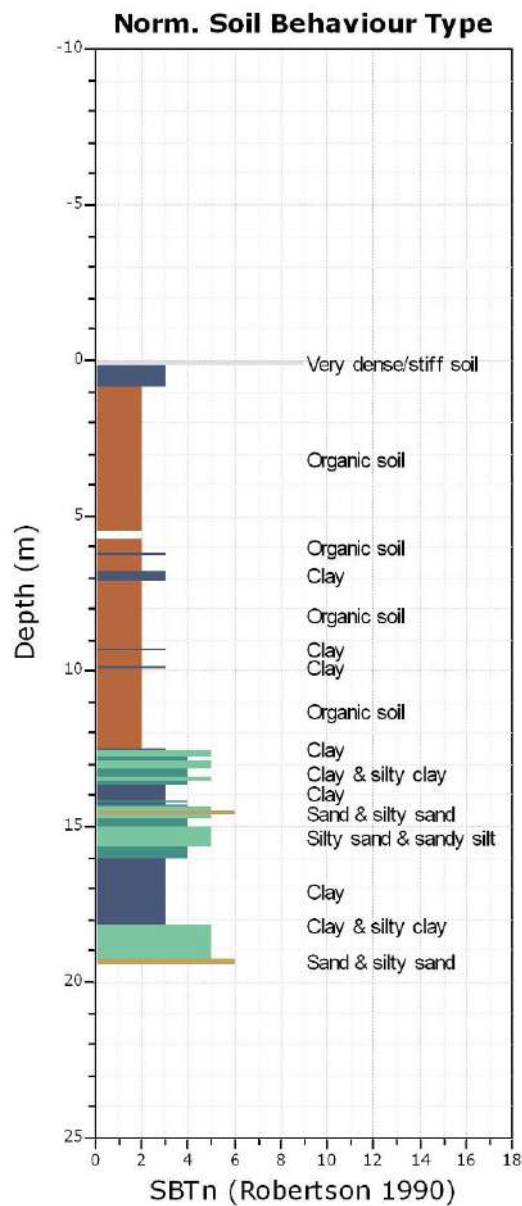


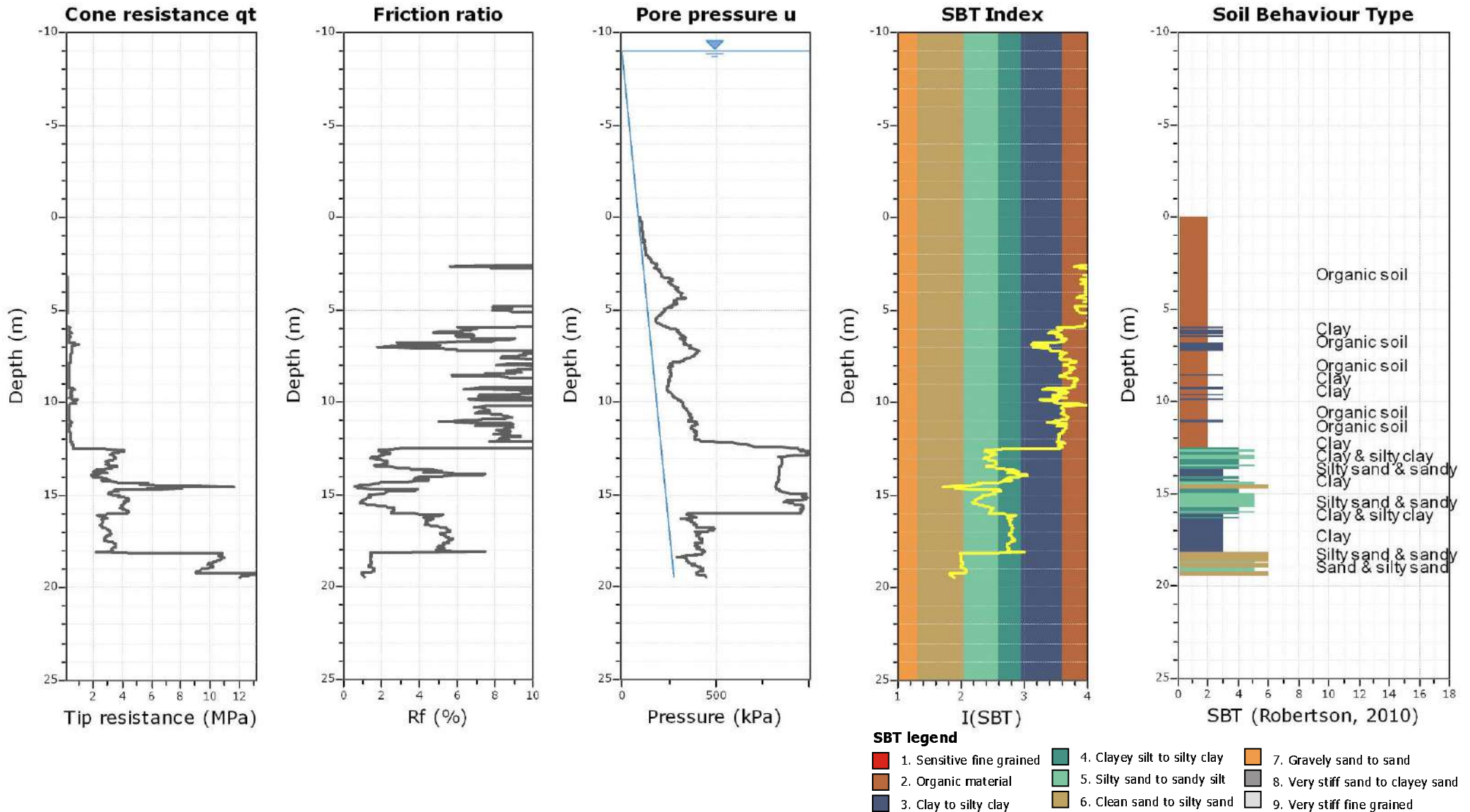
SBTn legend

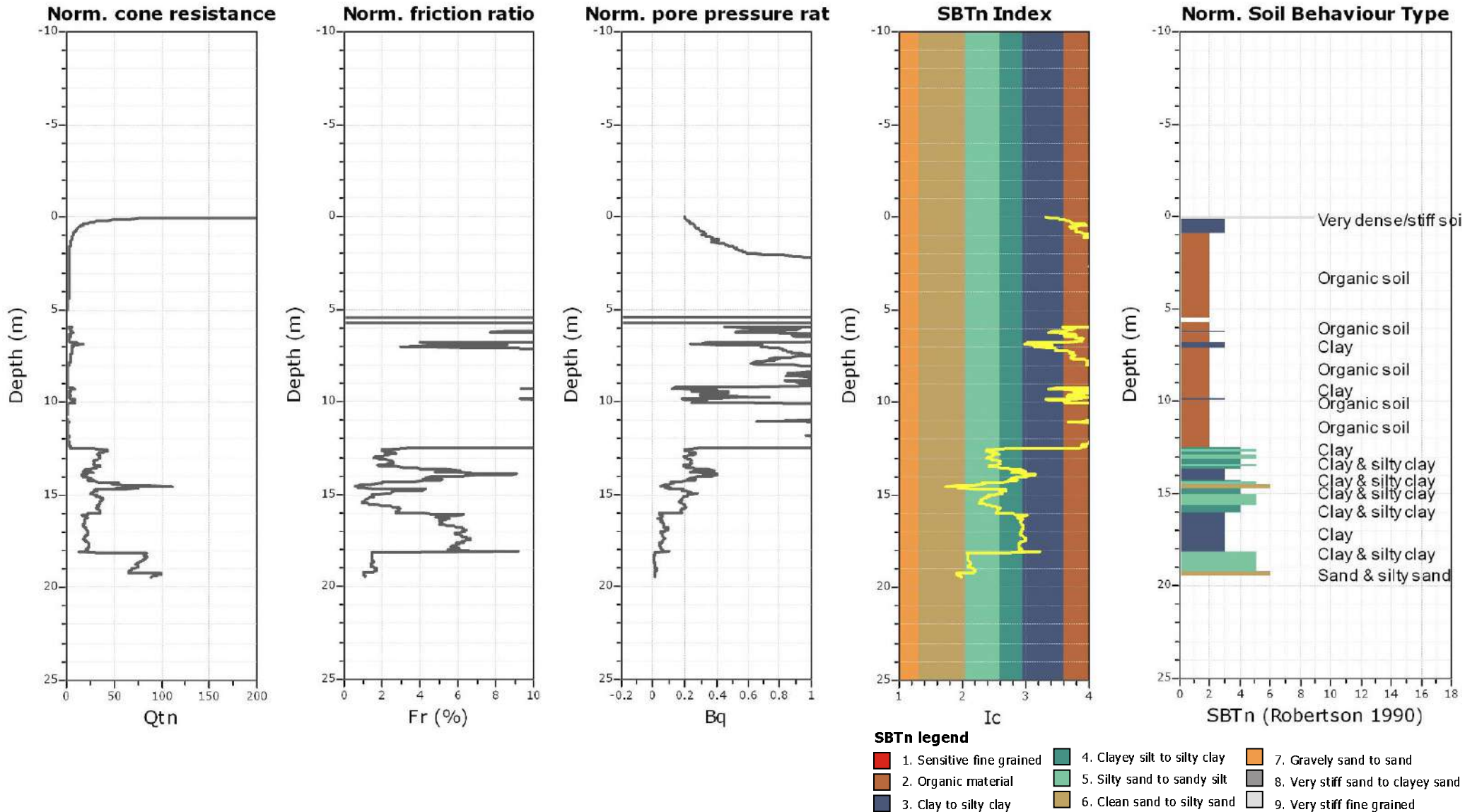
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

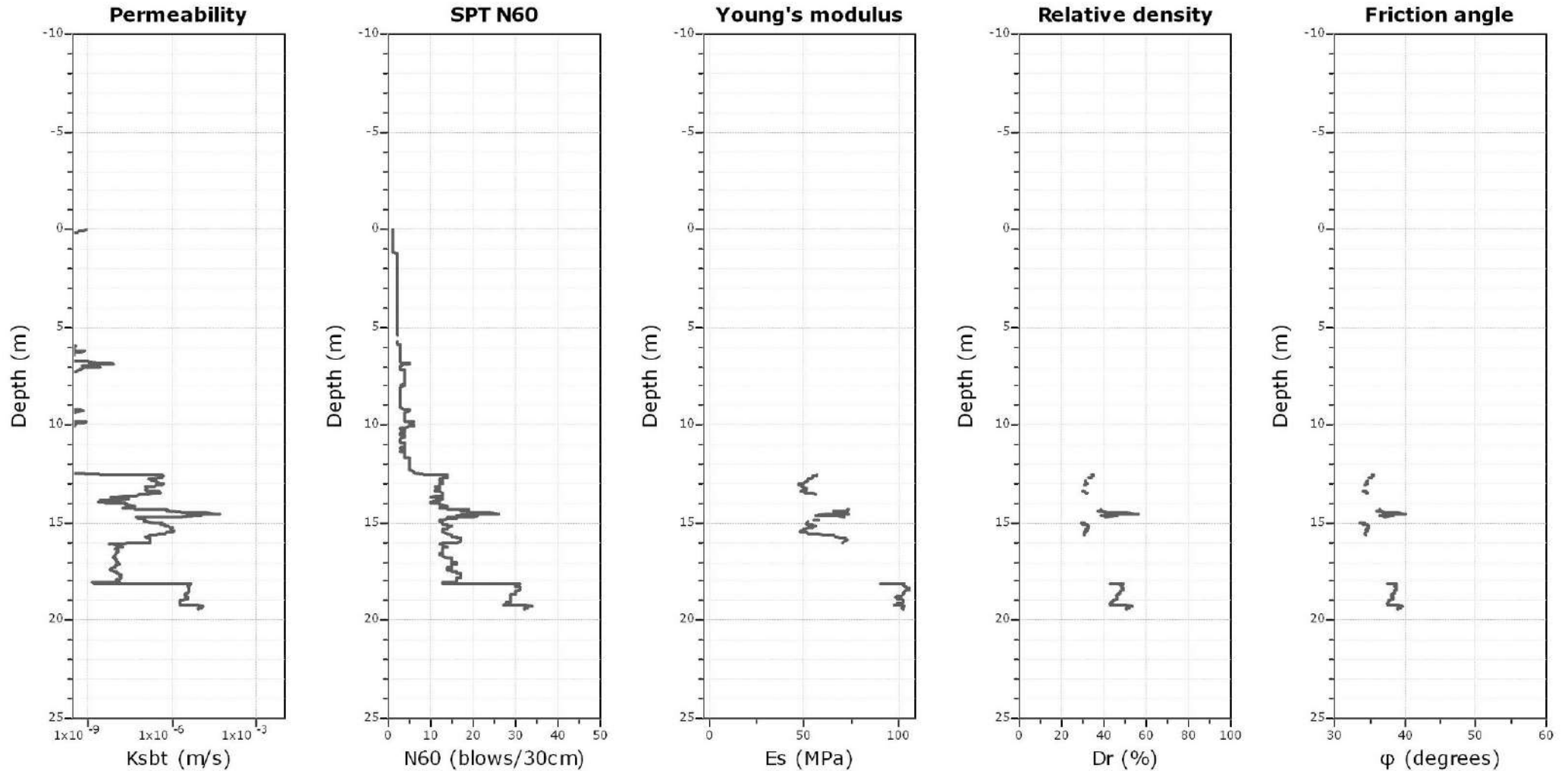
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

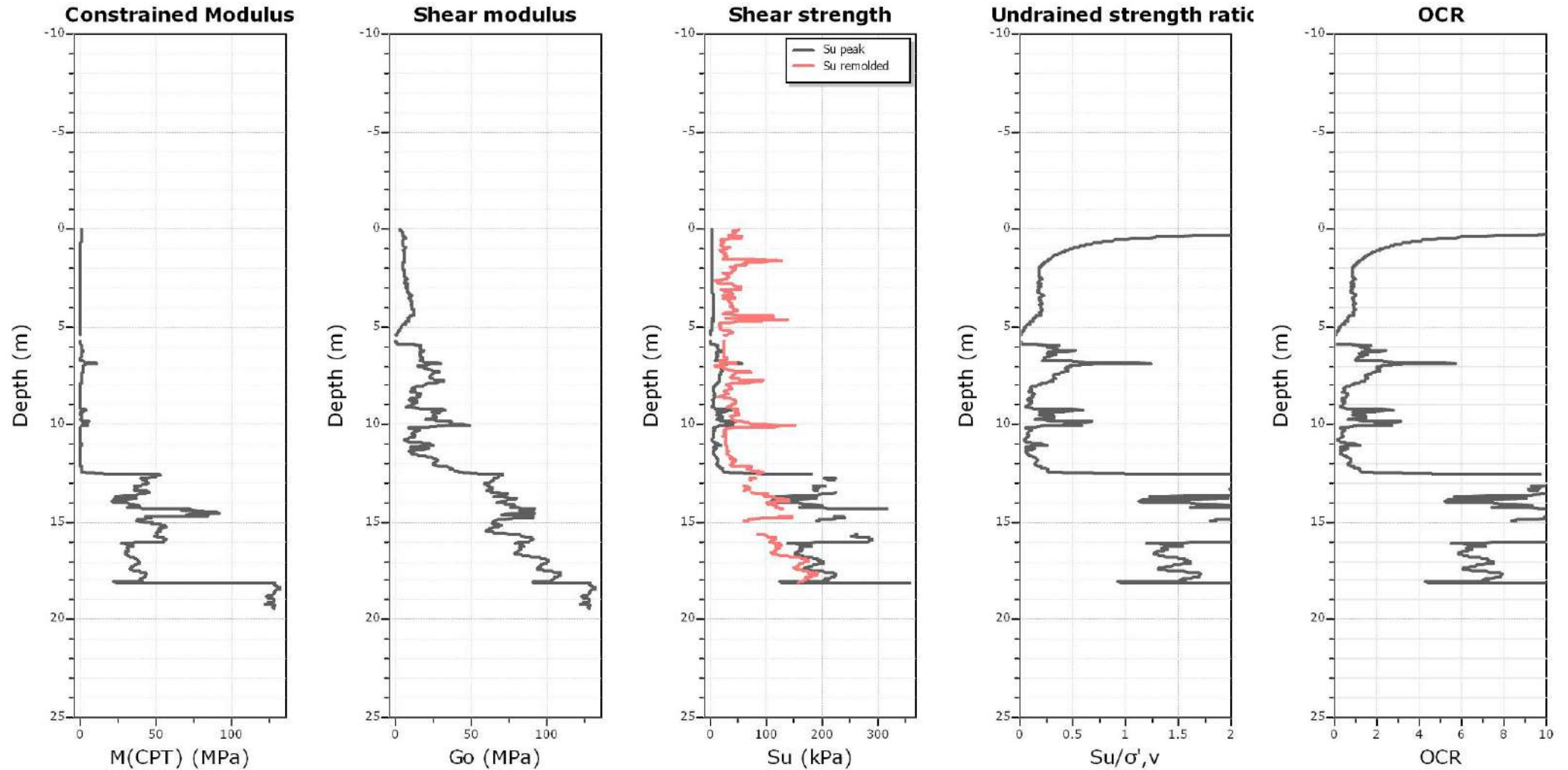
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

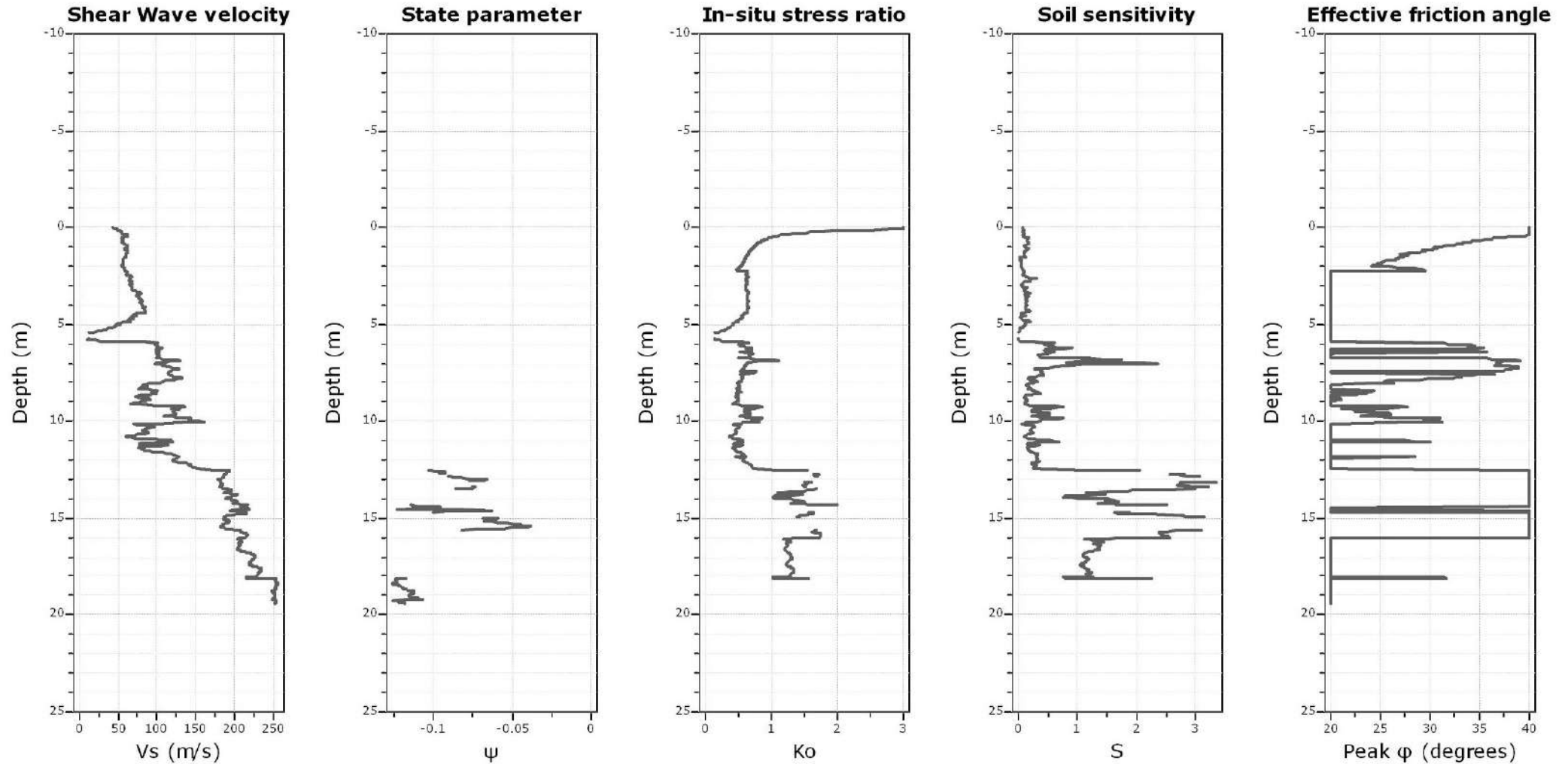
Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

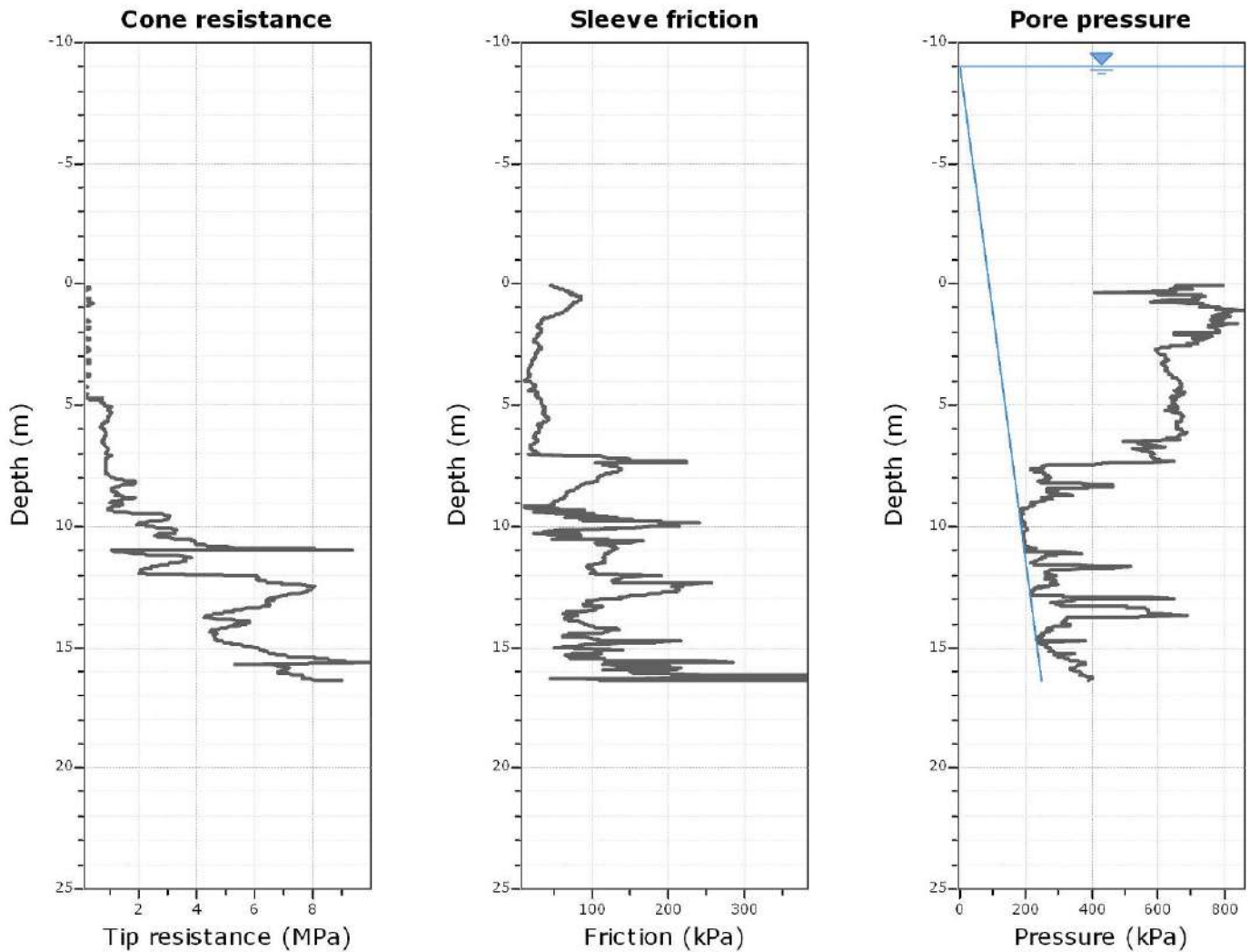
● — User defined estimation data



Calculation parameters

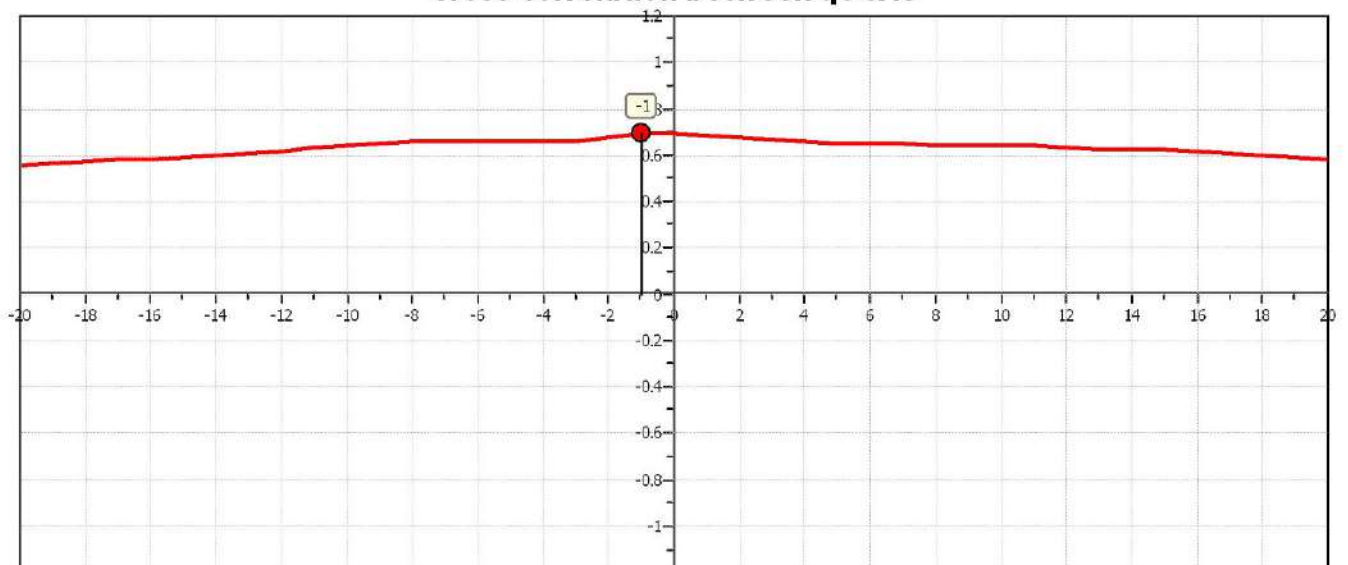
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

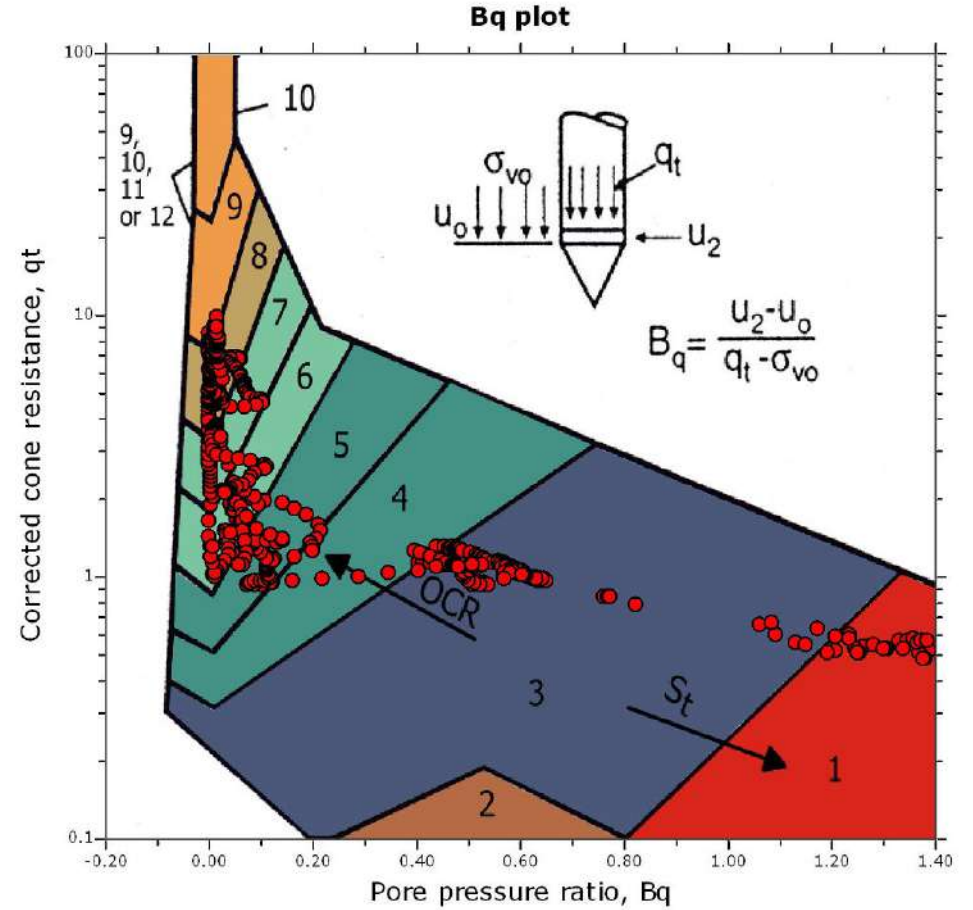
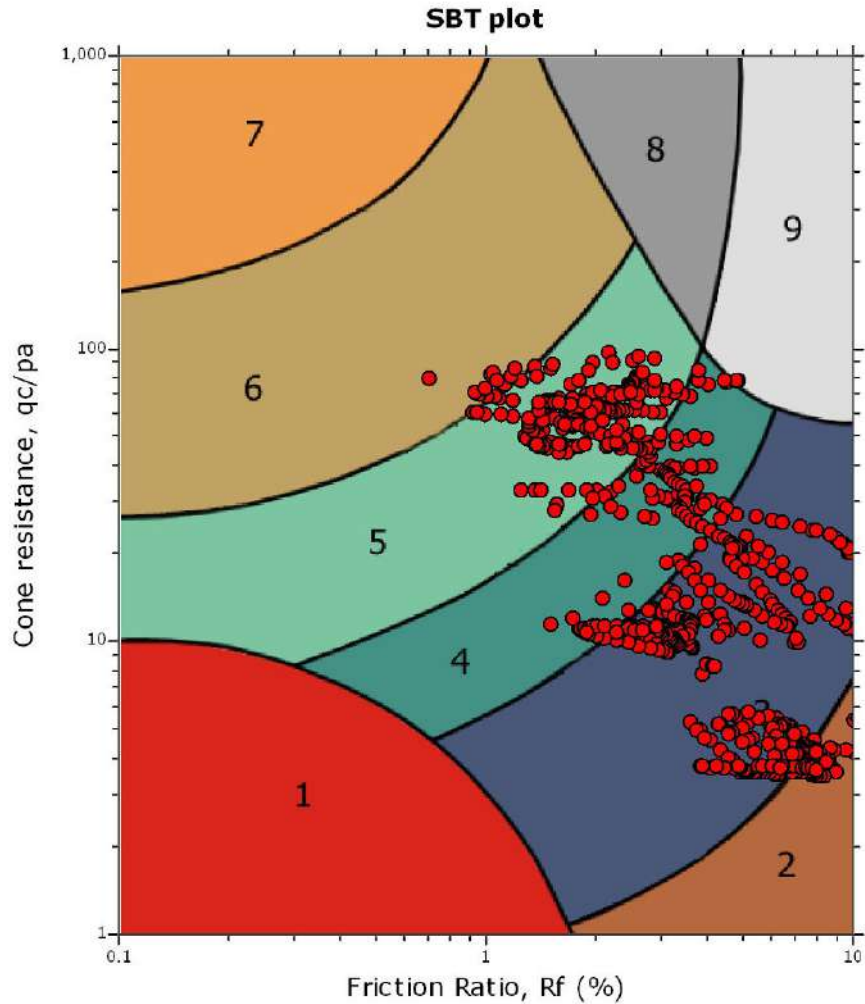


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



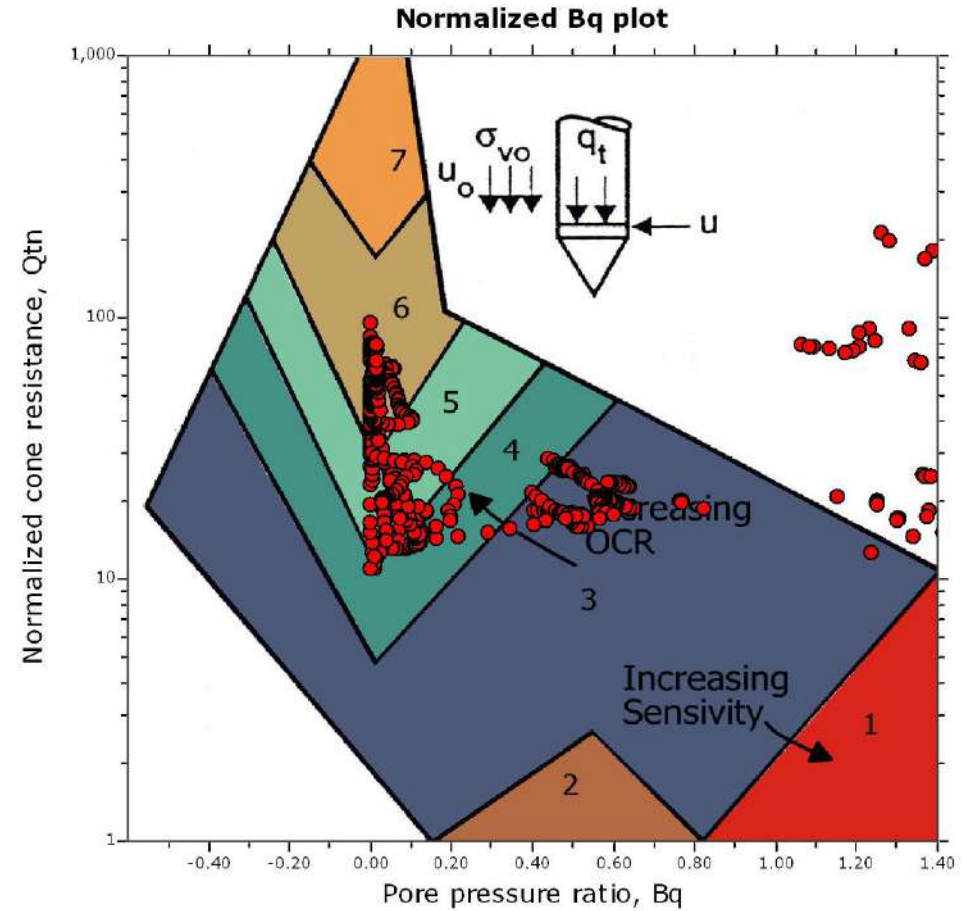
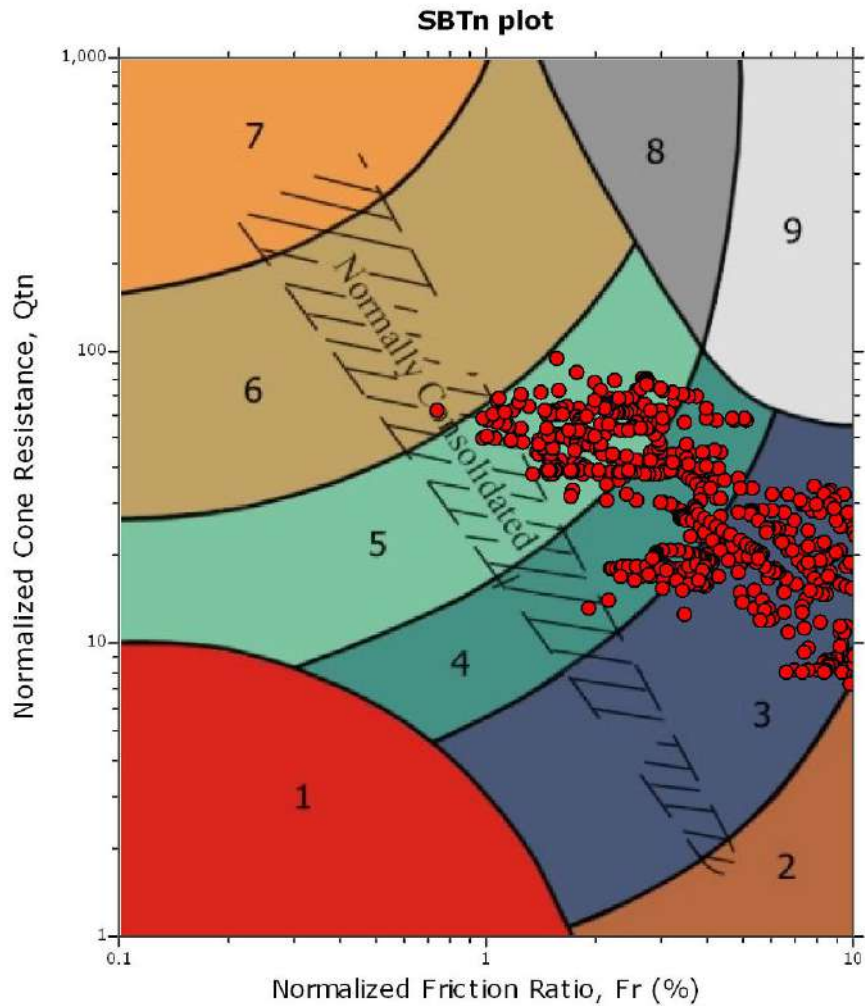
SBT - Bq plots



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 |

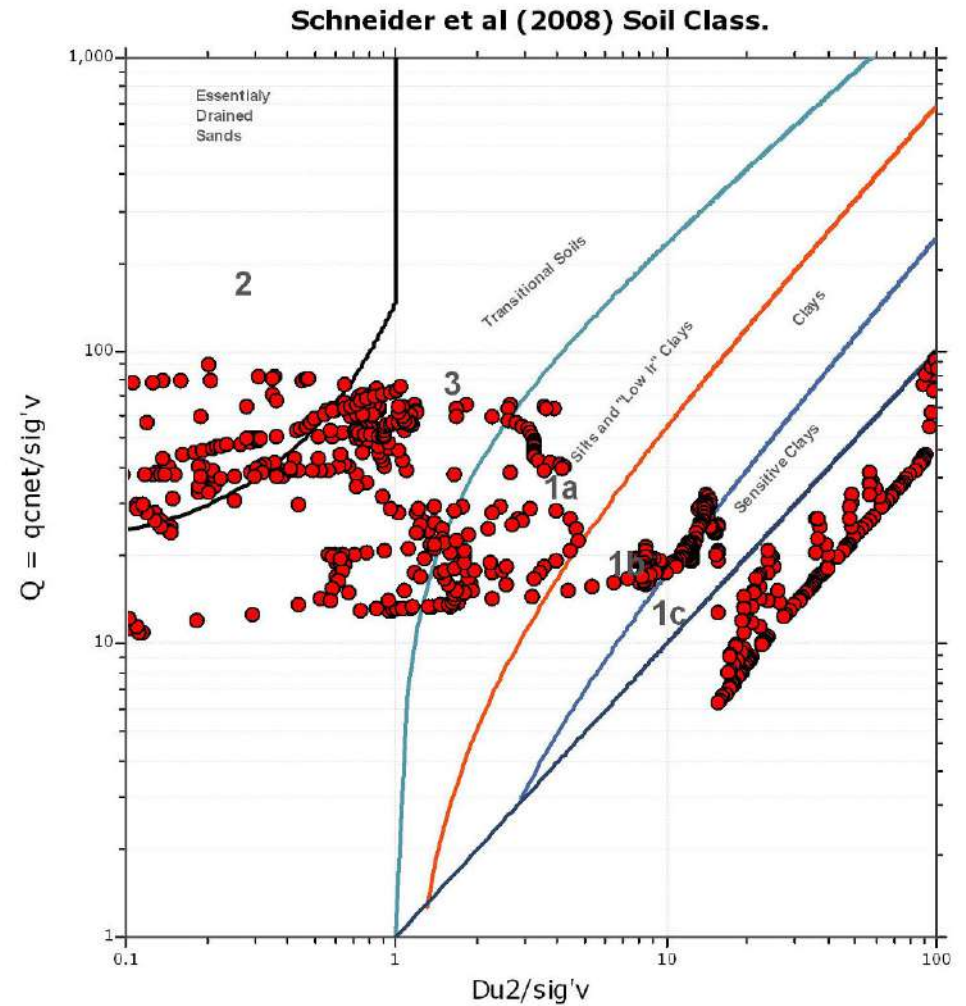
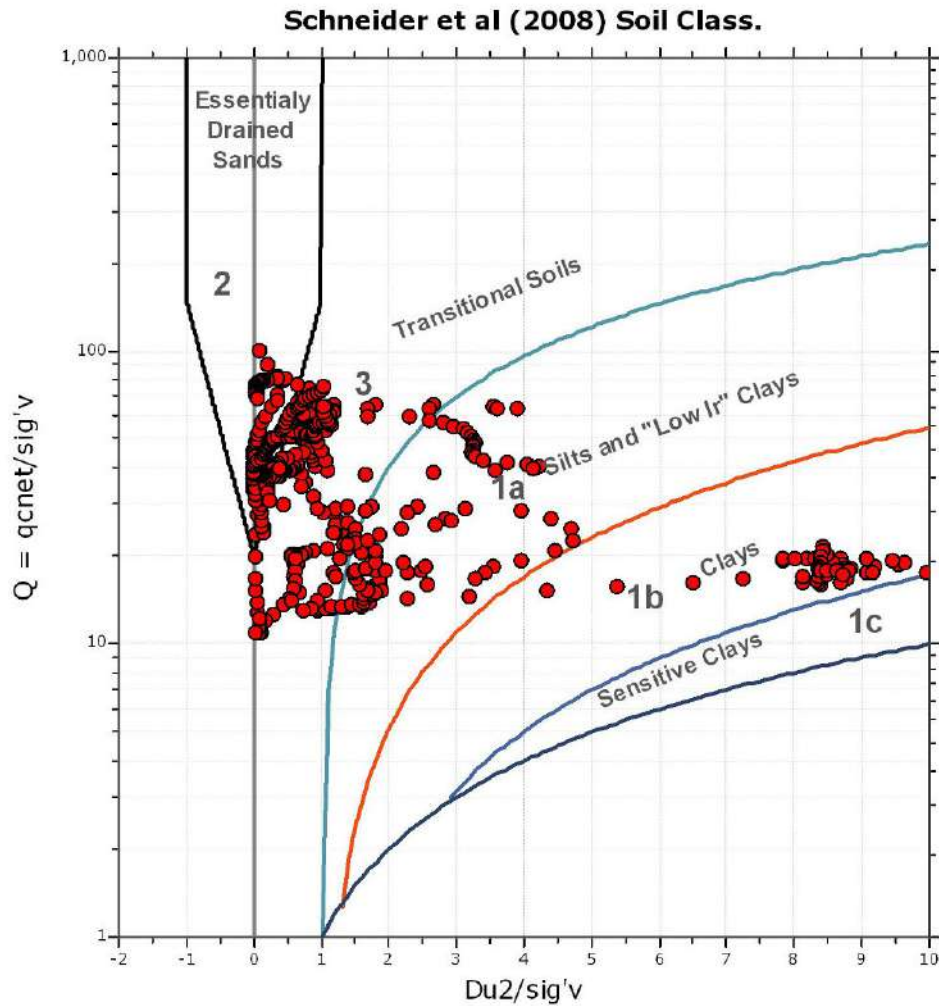
SBT - Bq plots (normalized)

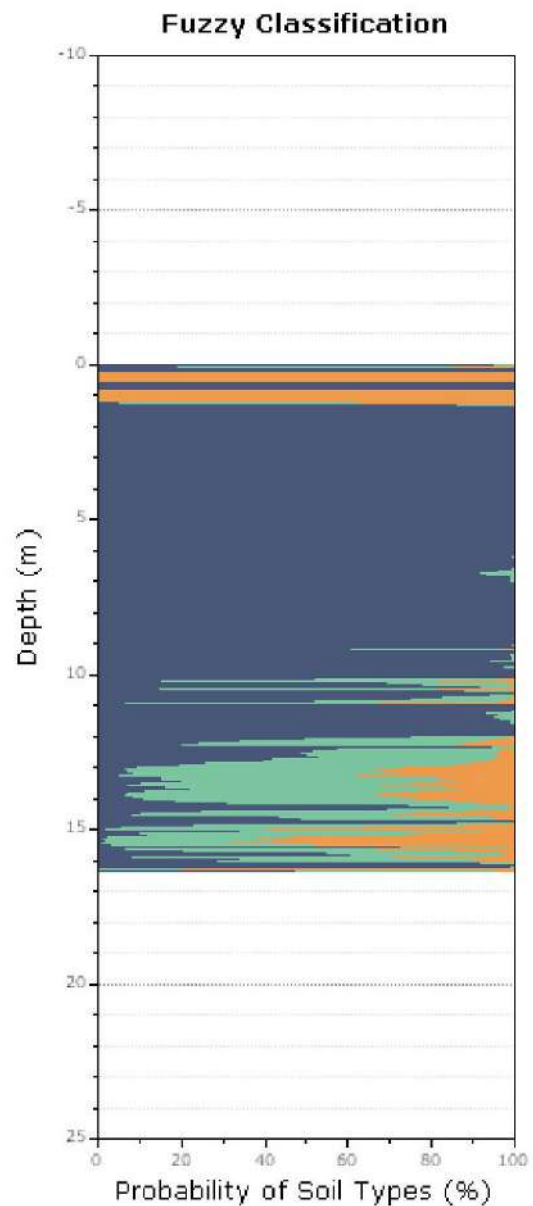
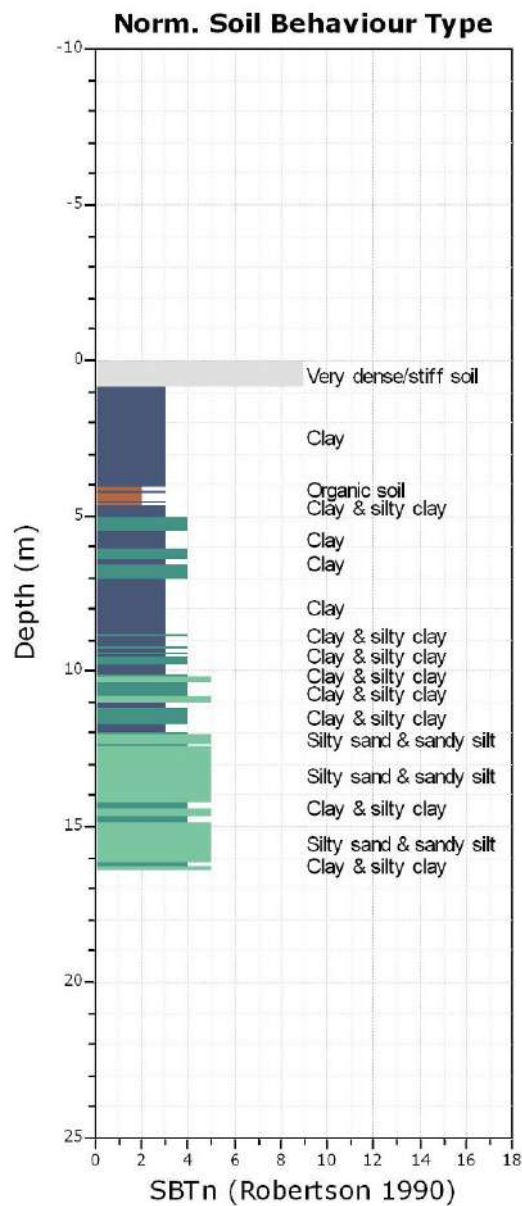


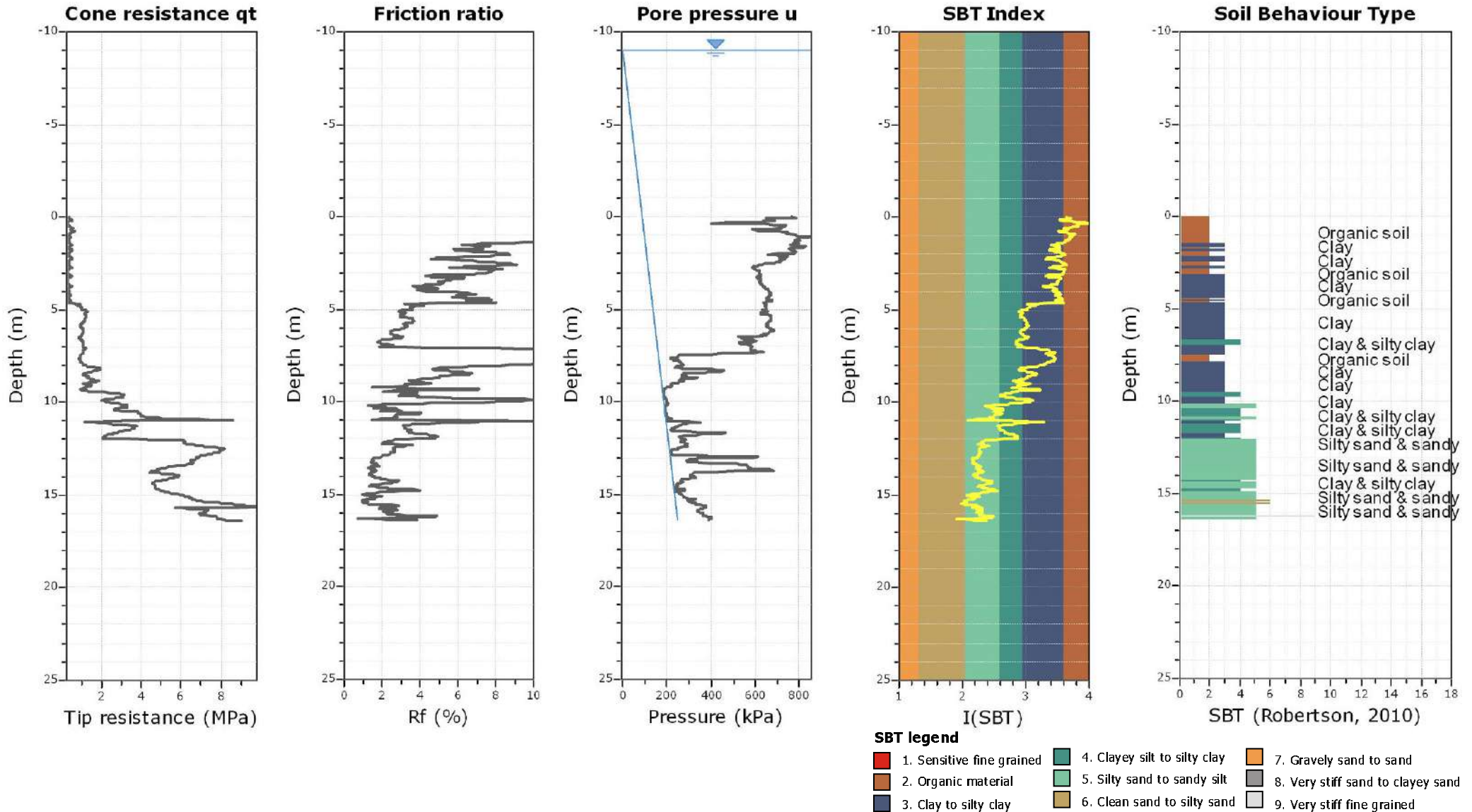
SBTn legend

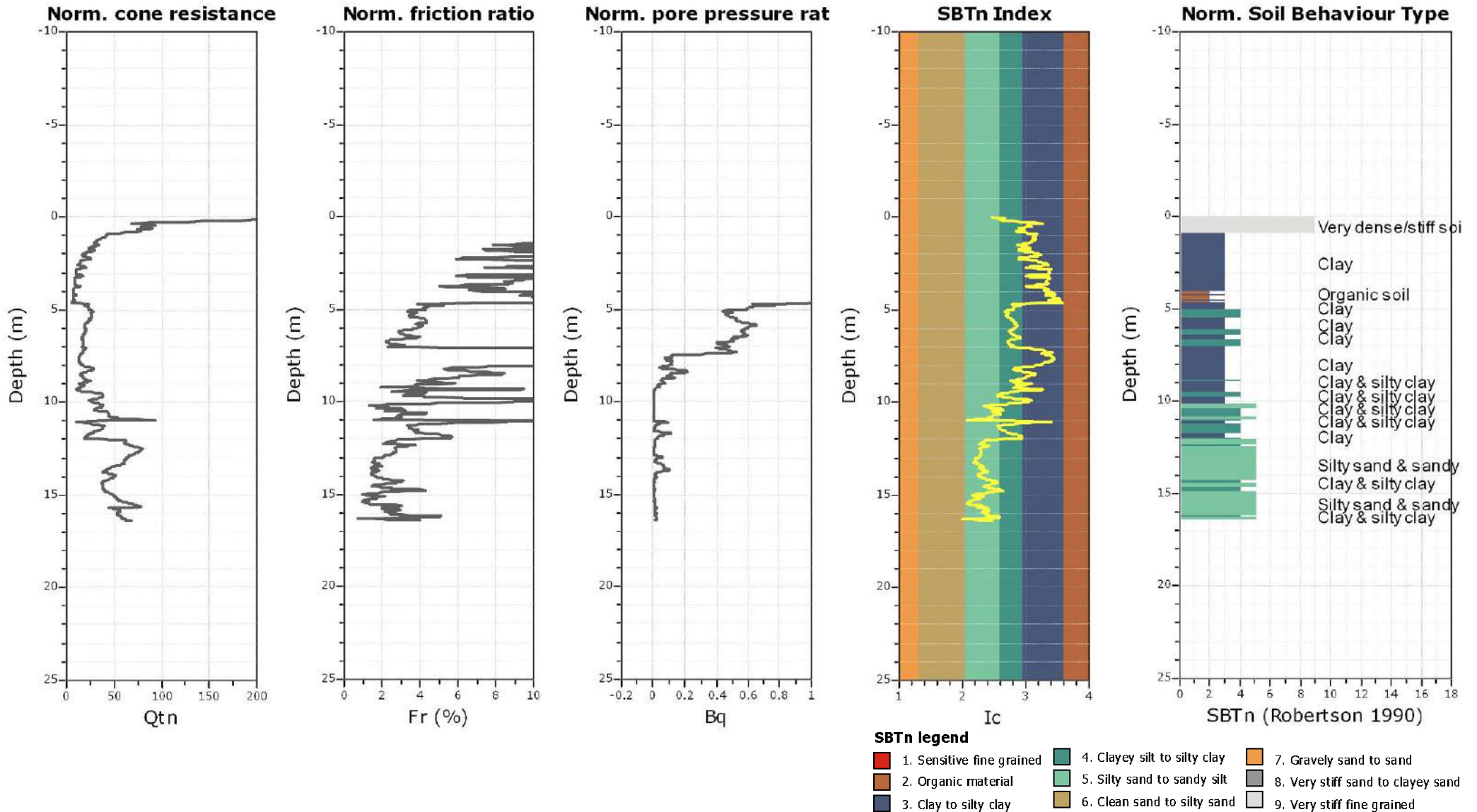
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

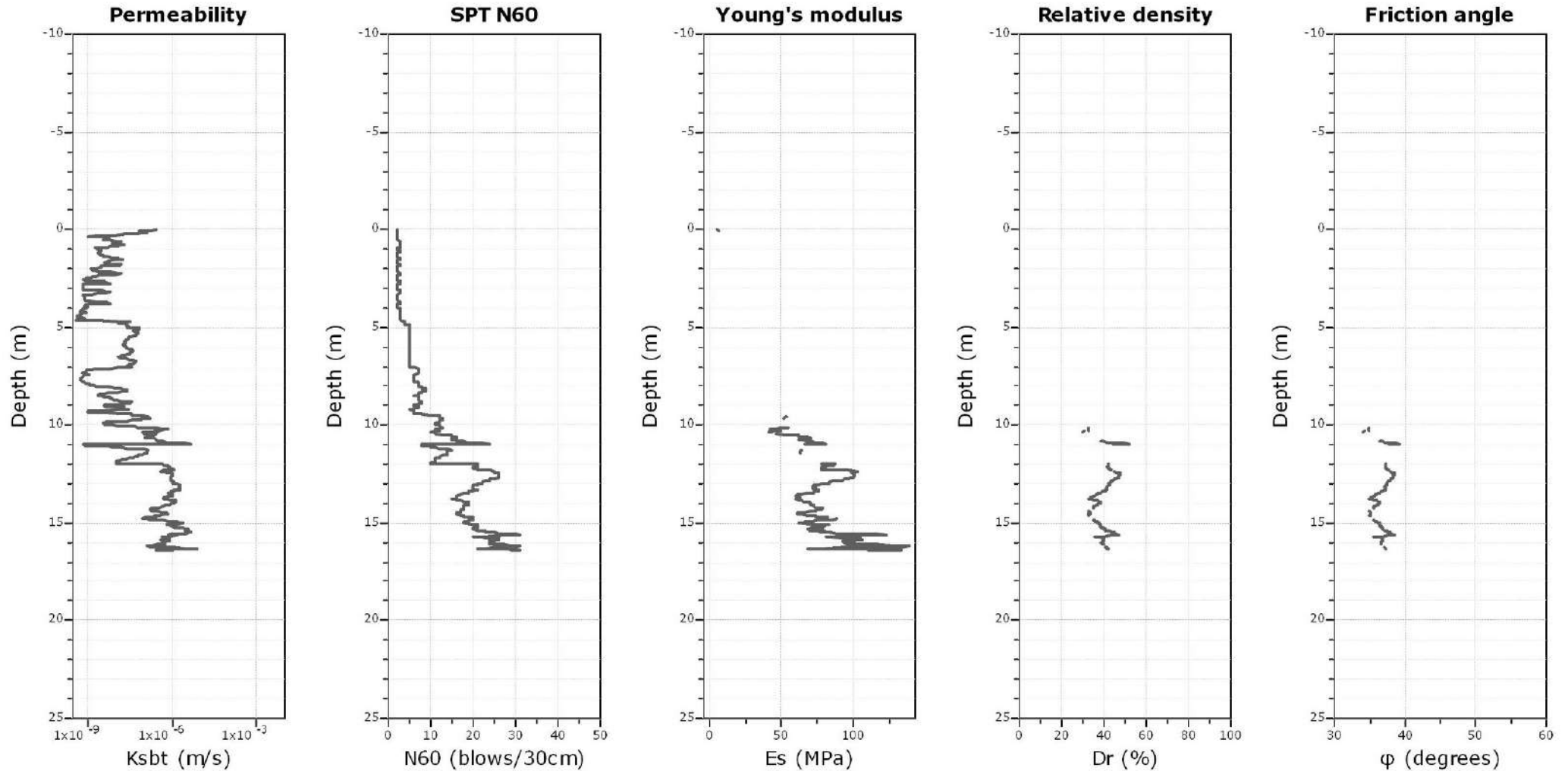
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

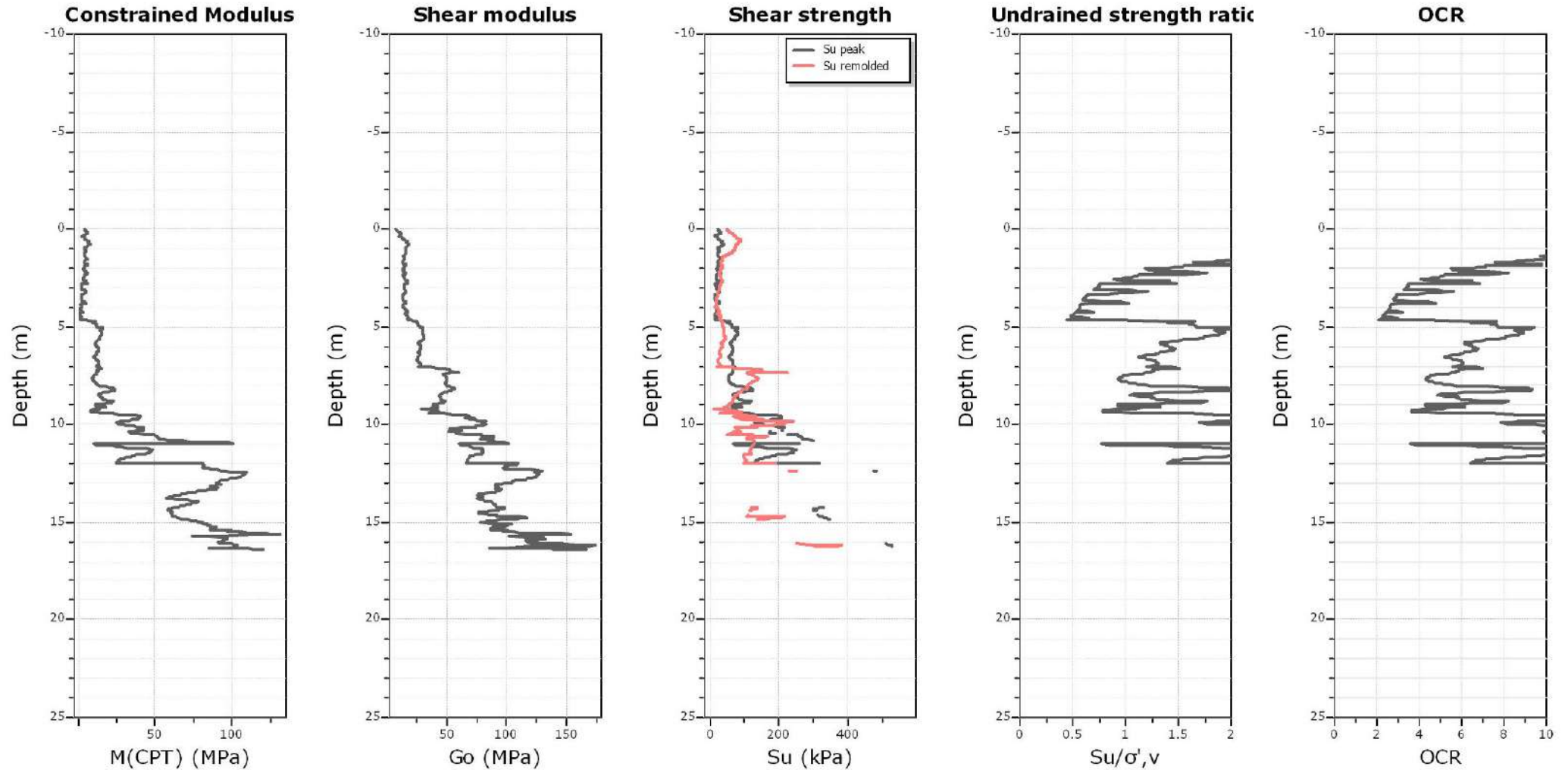
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

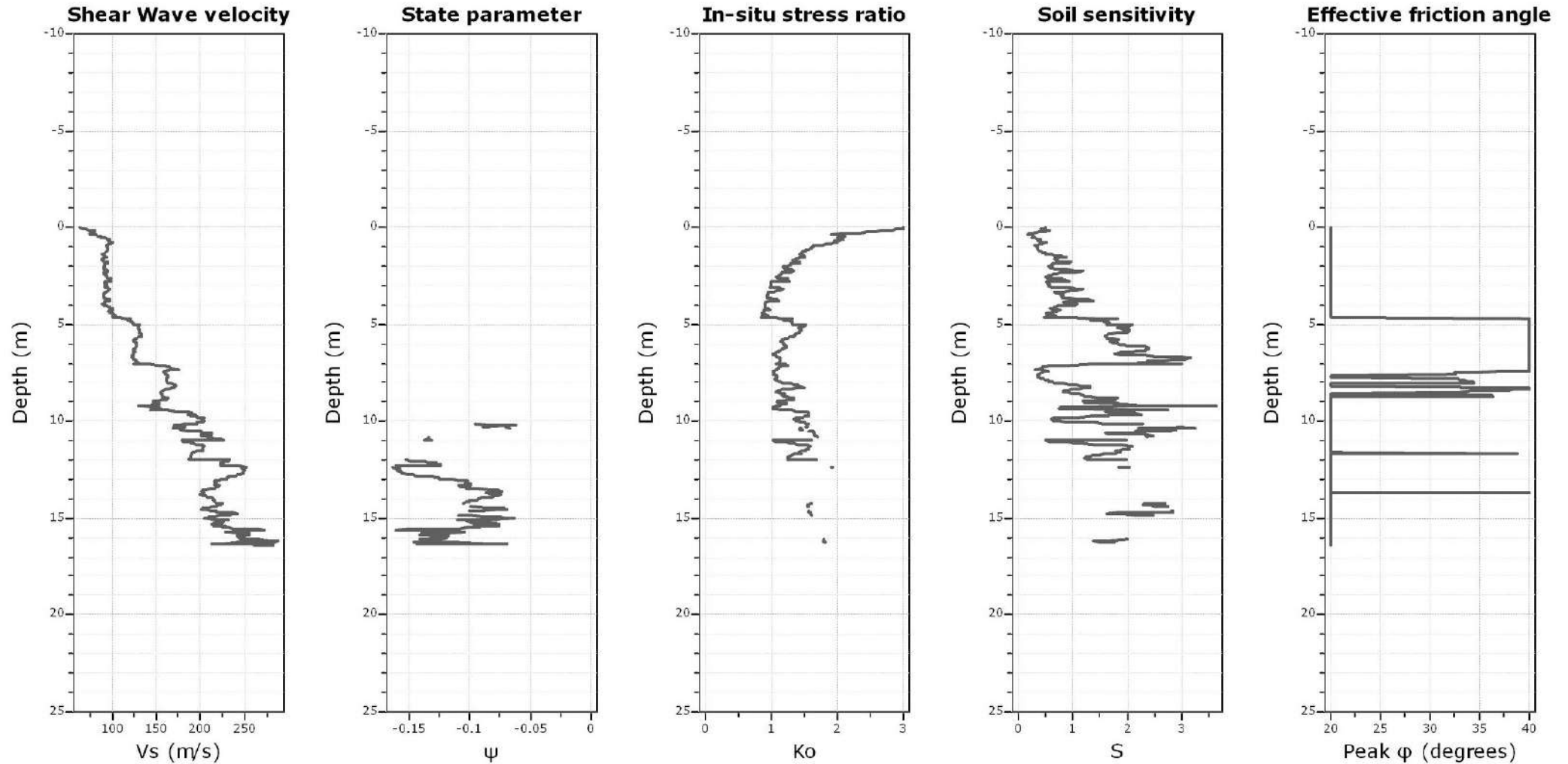
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

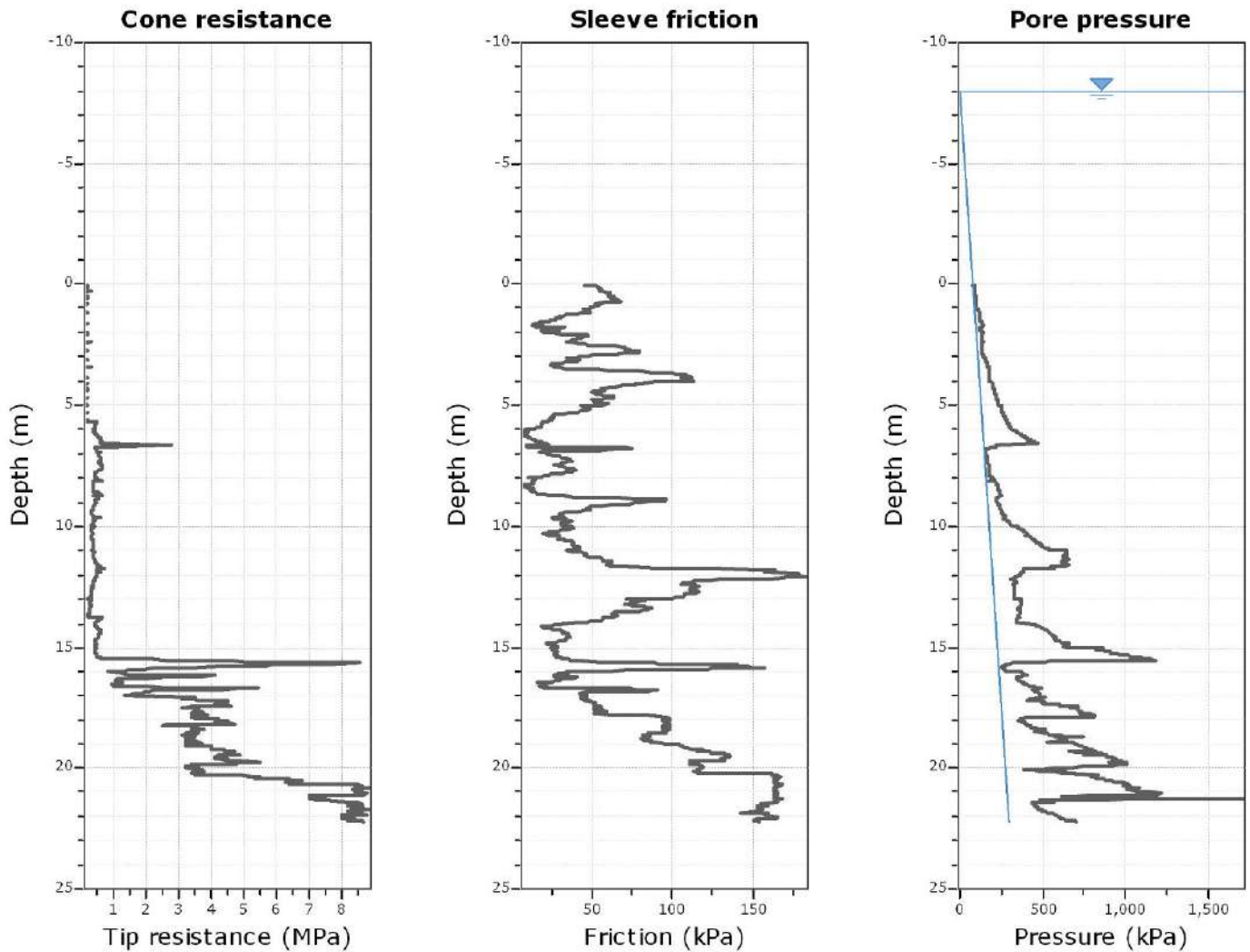
● — User defined estimation data



Calculation parameters

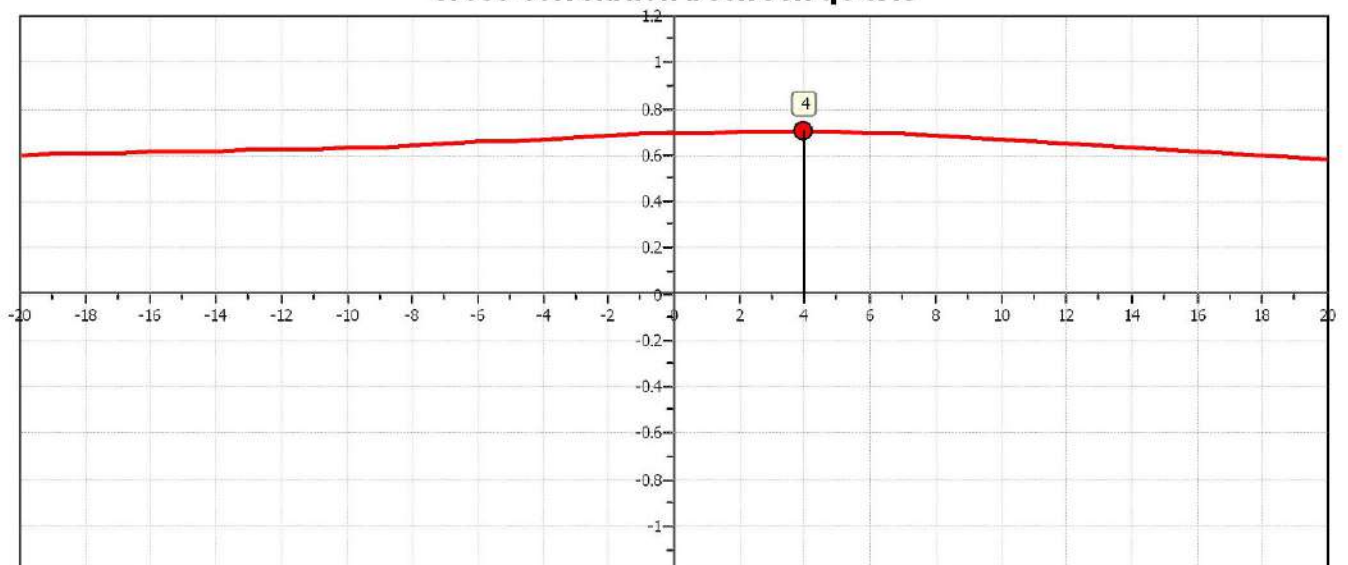
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

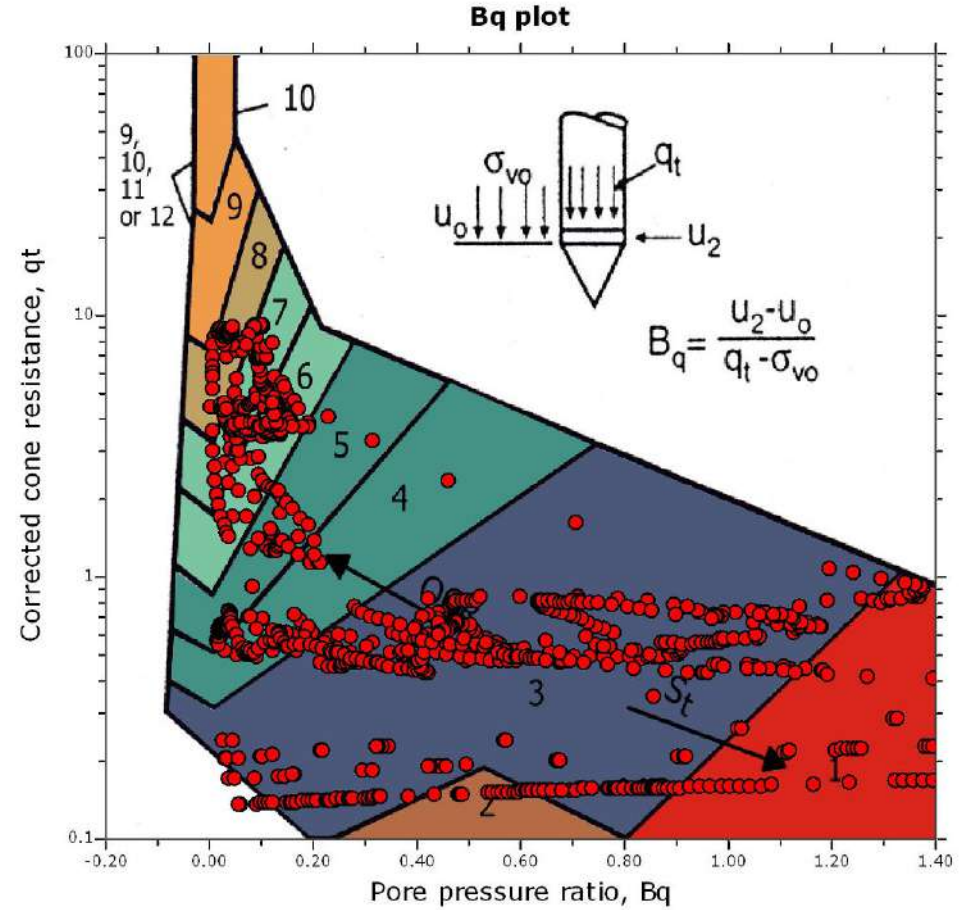
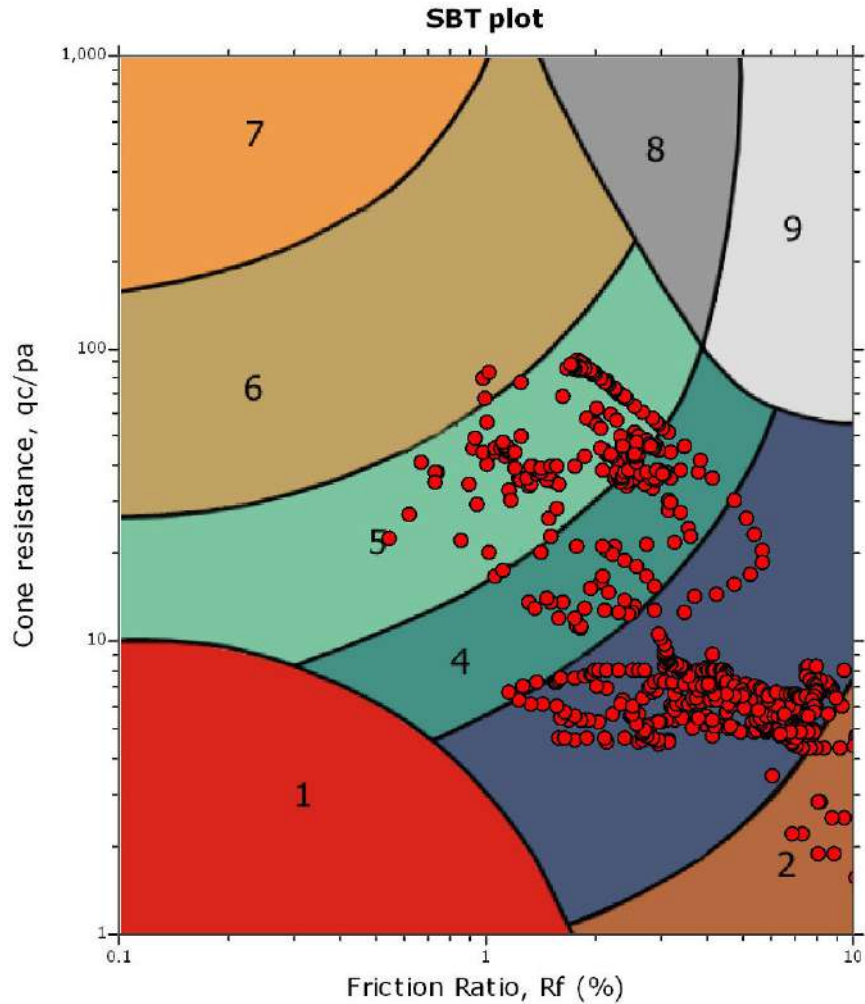


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



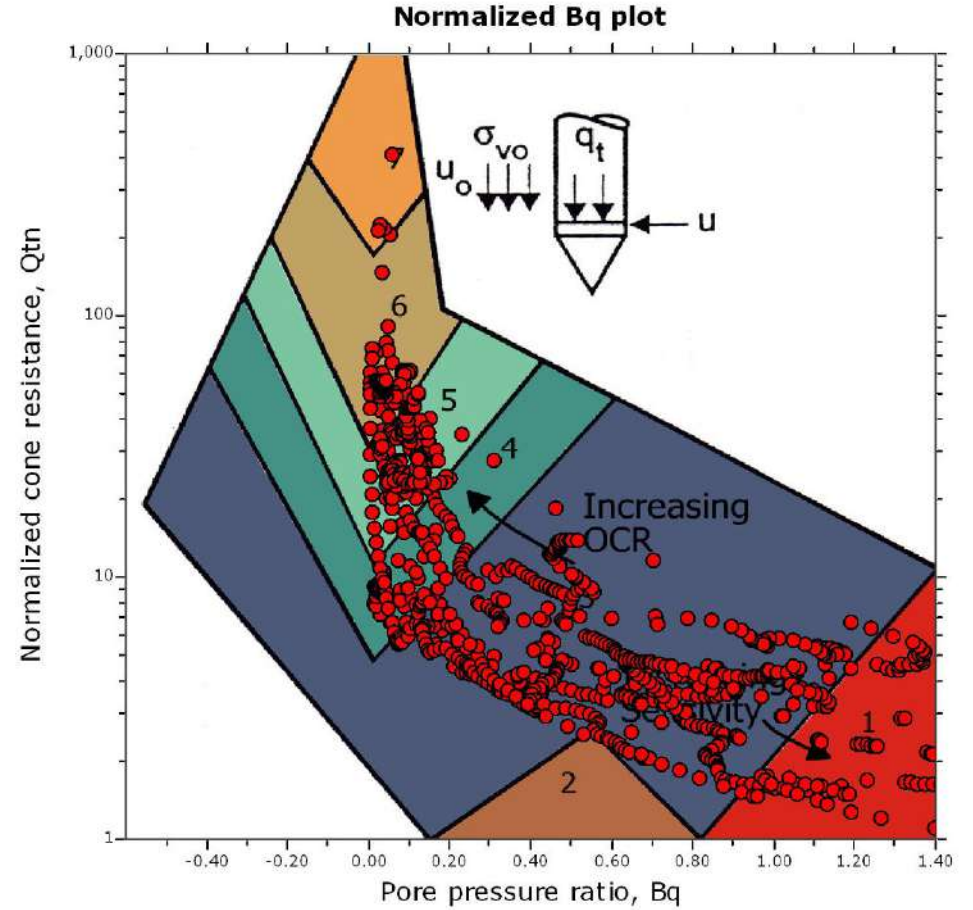
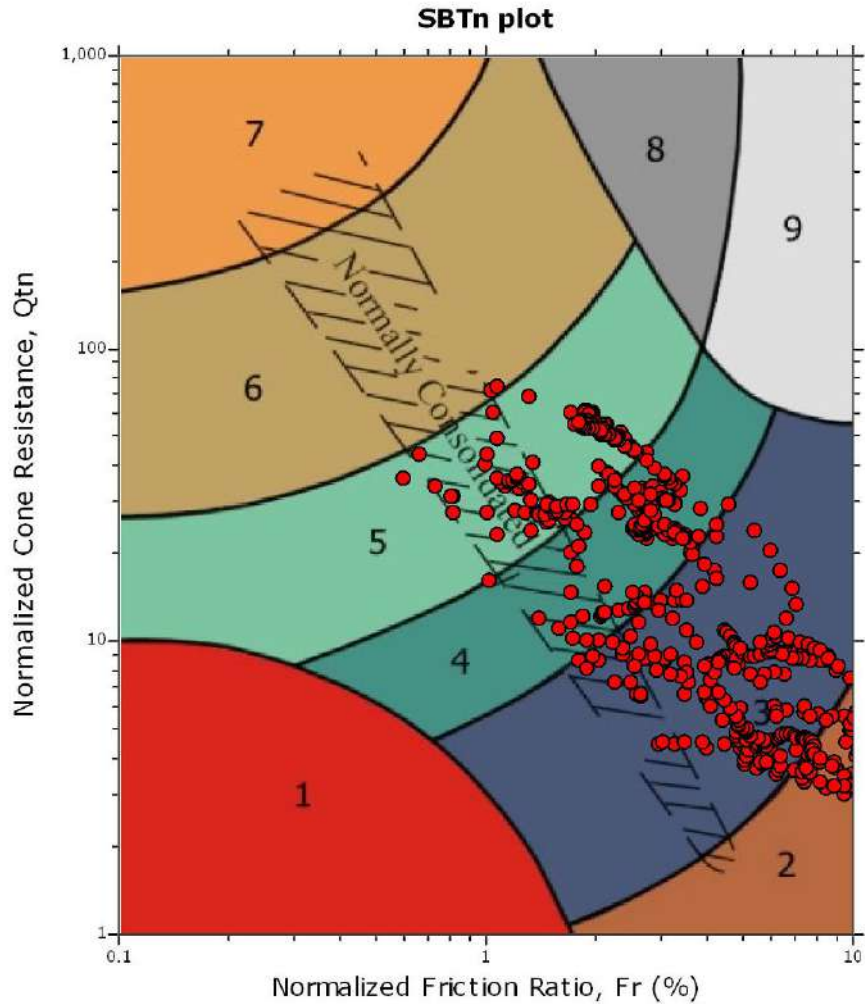
SBT - Bq plots



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 |

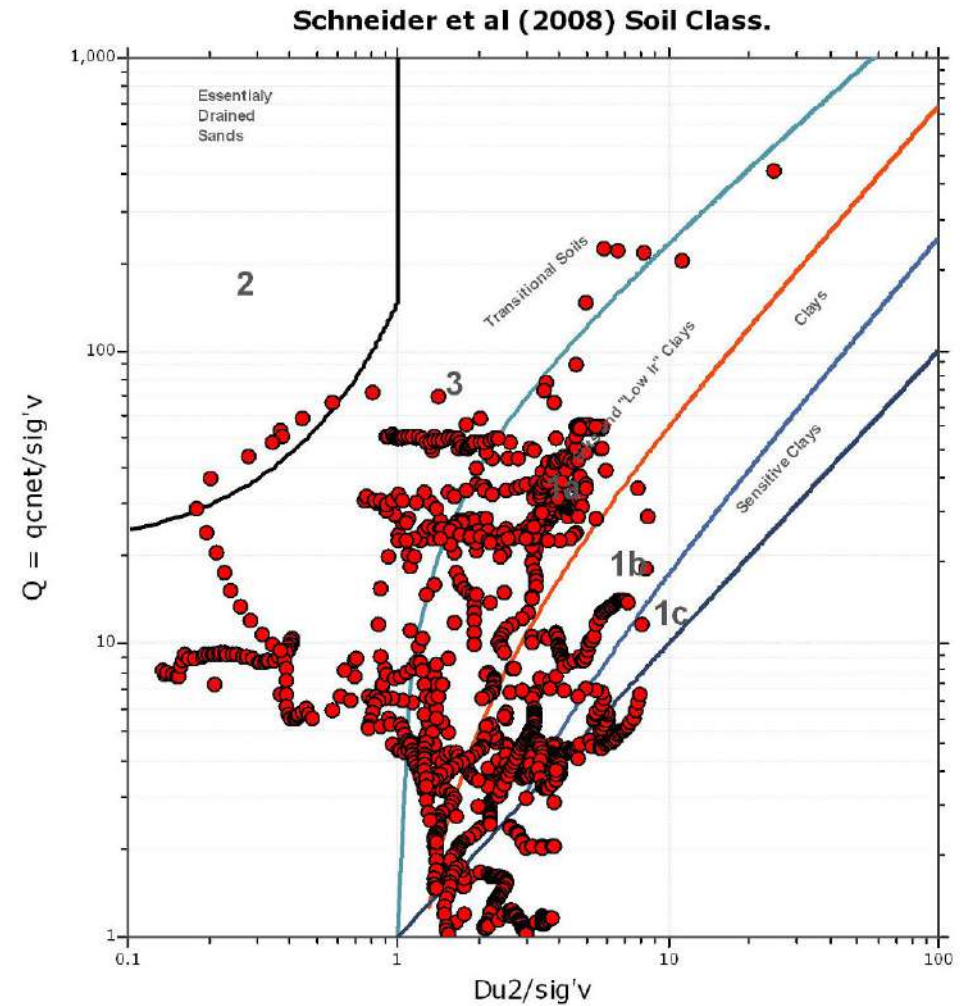
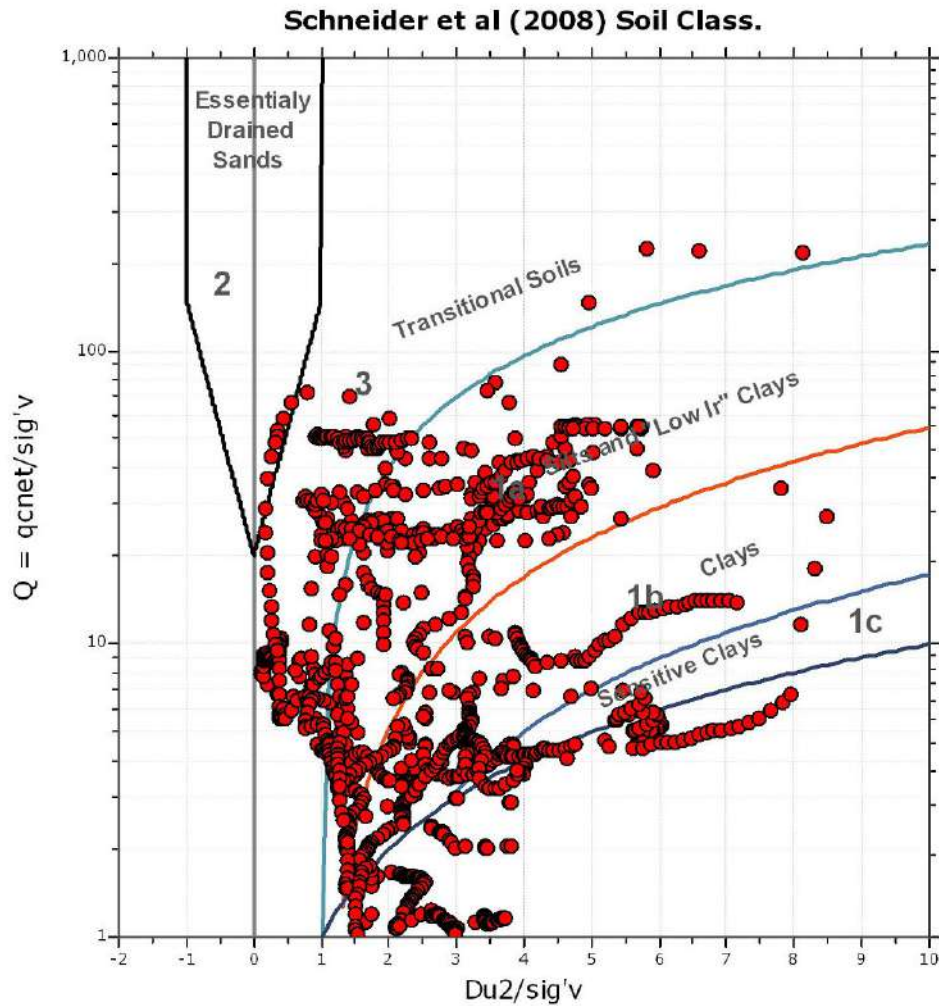
SBT - Bq plots (normalized)

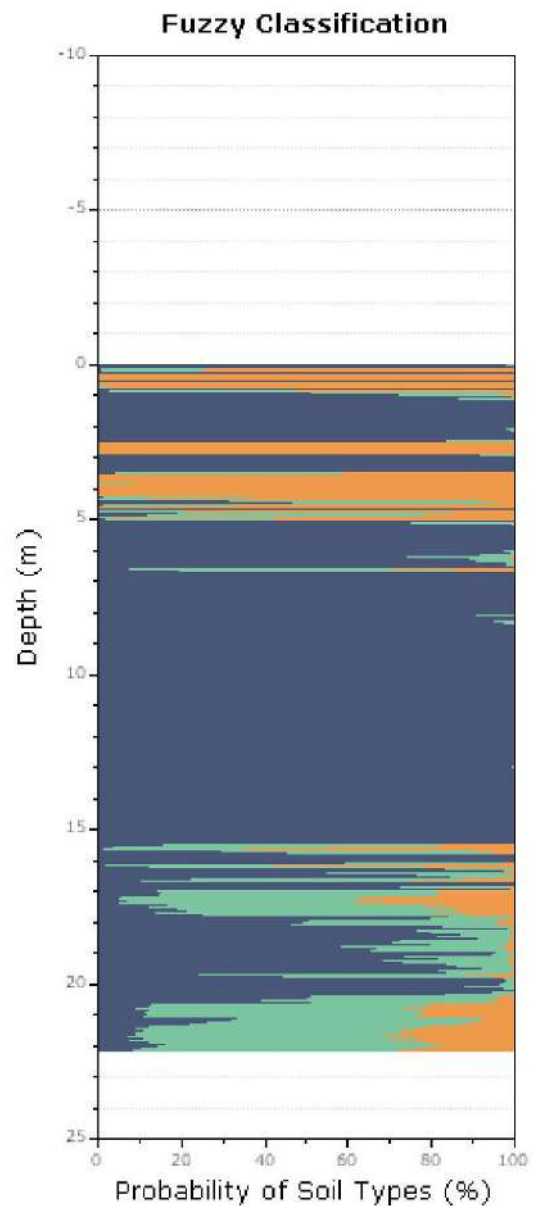
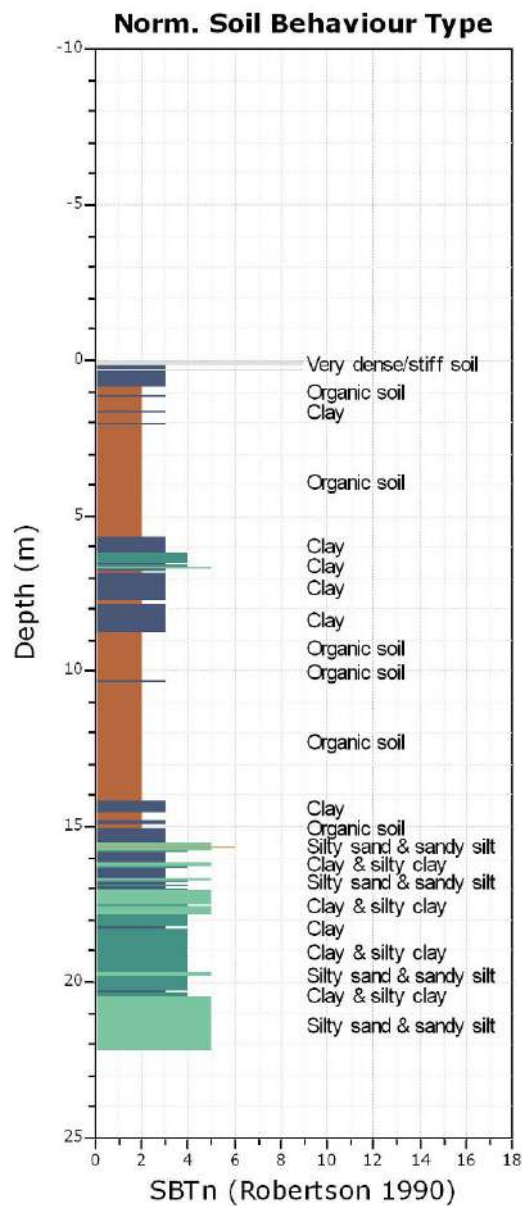


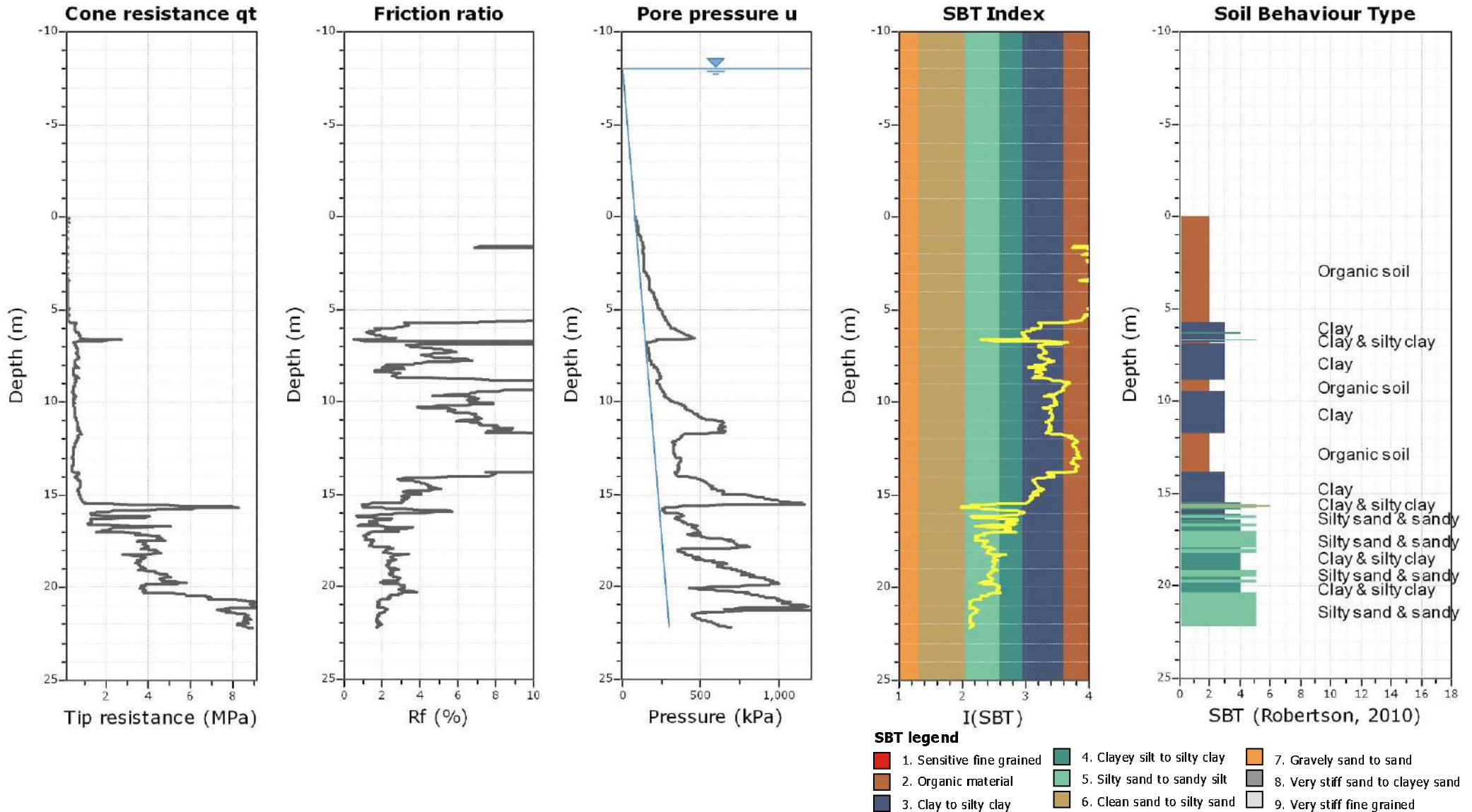
SBTn legend

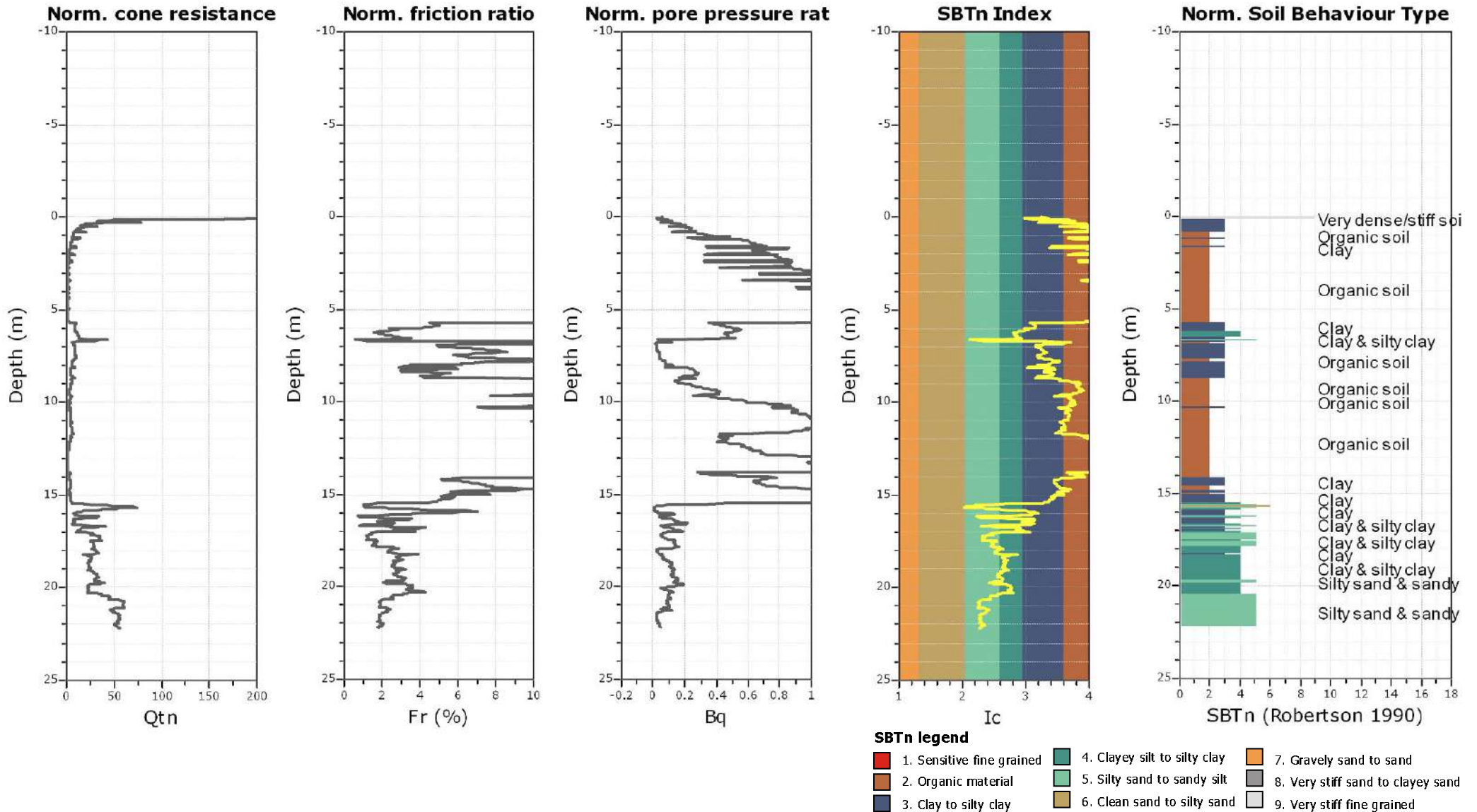
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

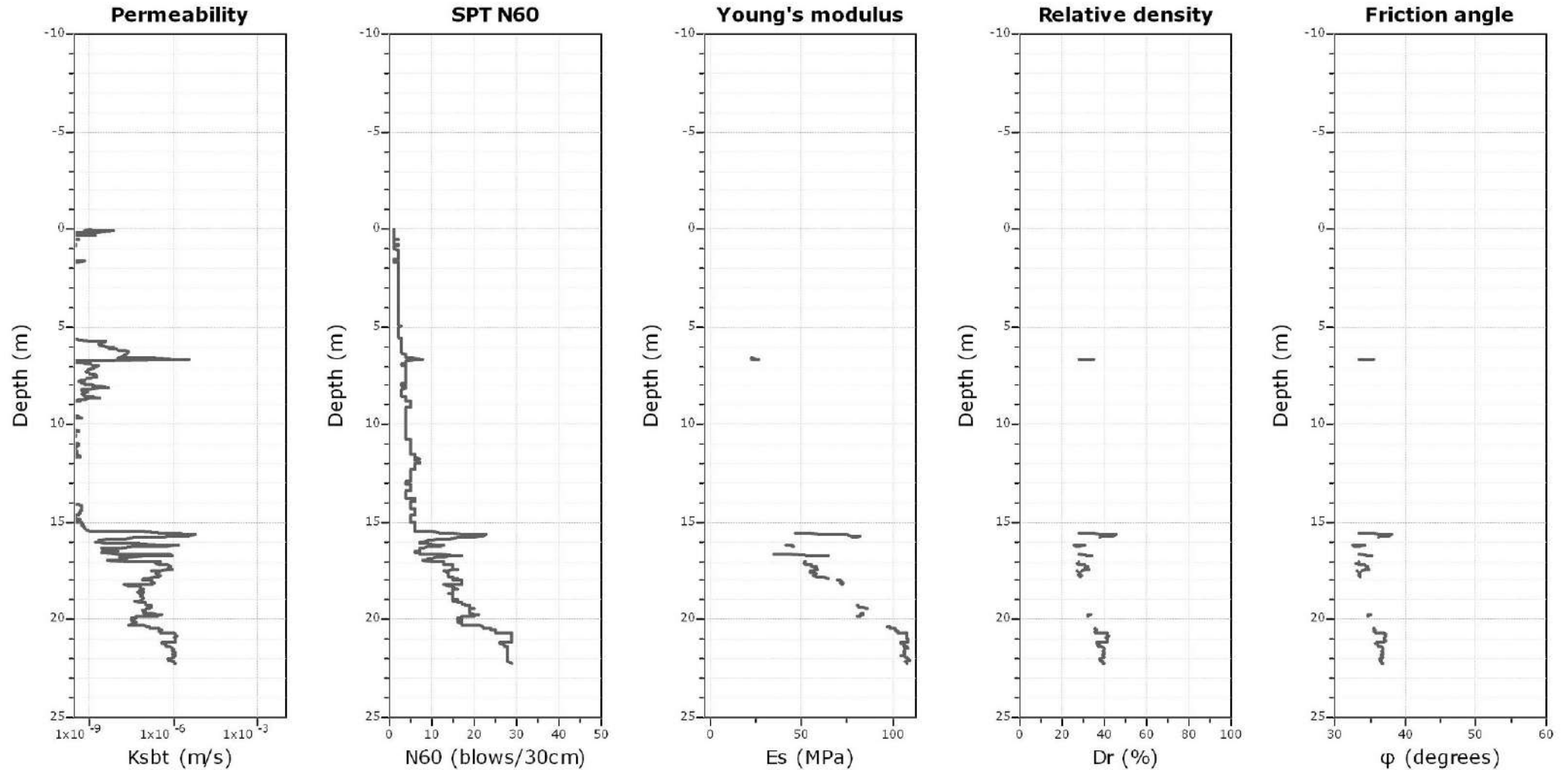
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

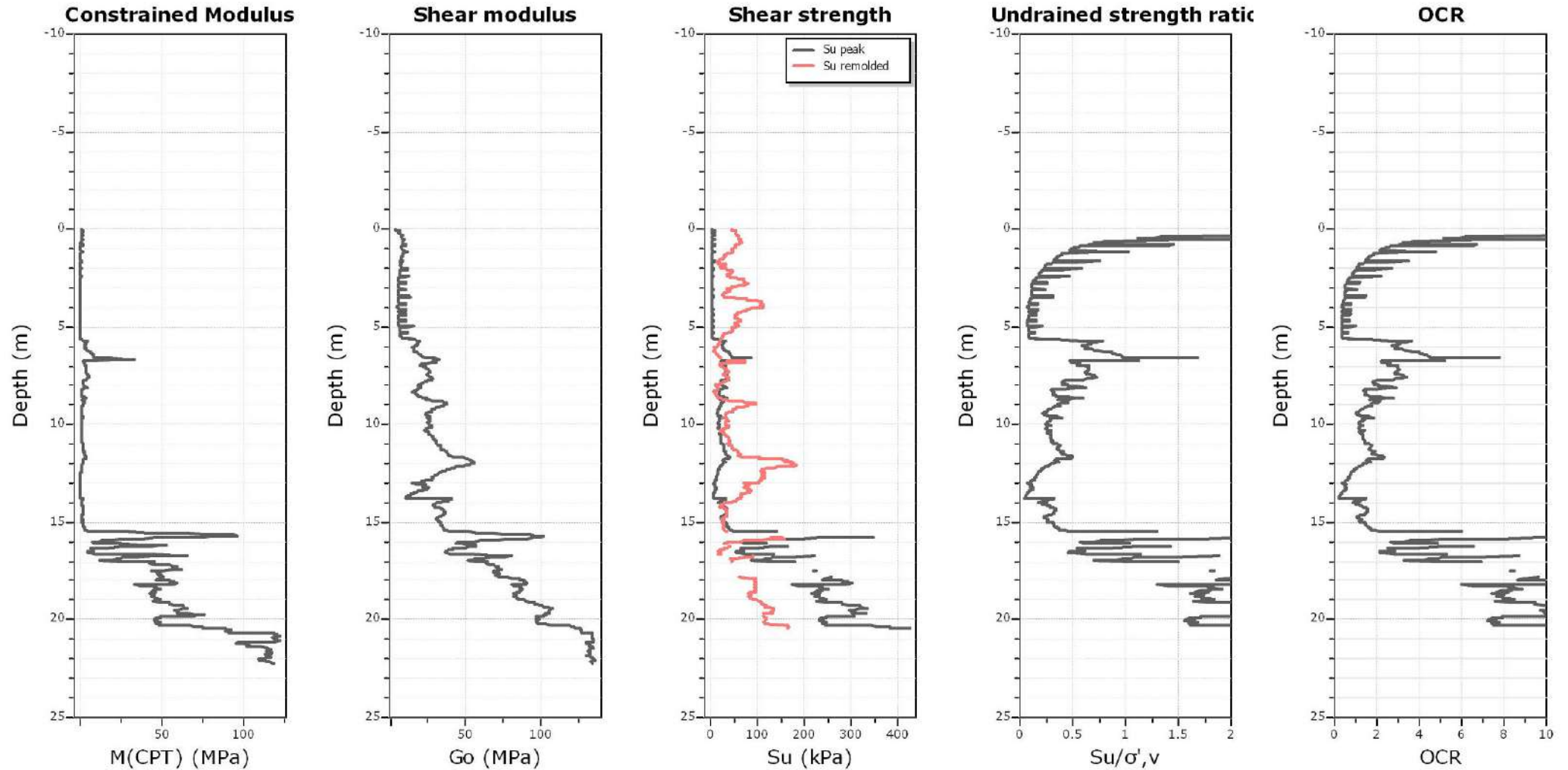
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

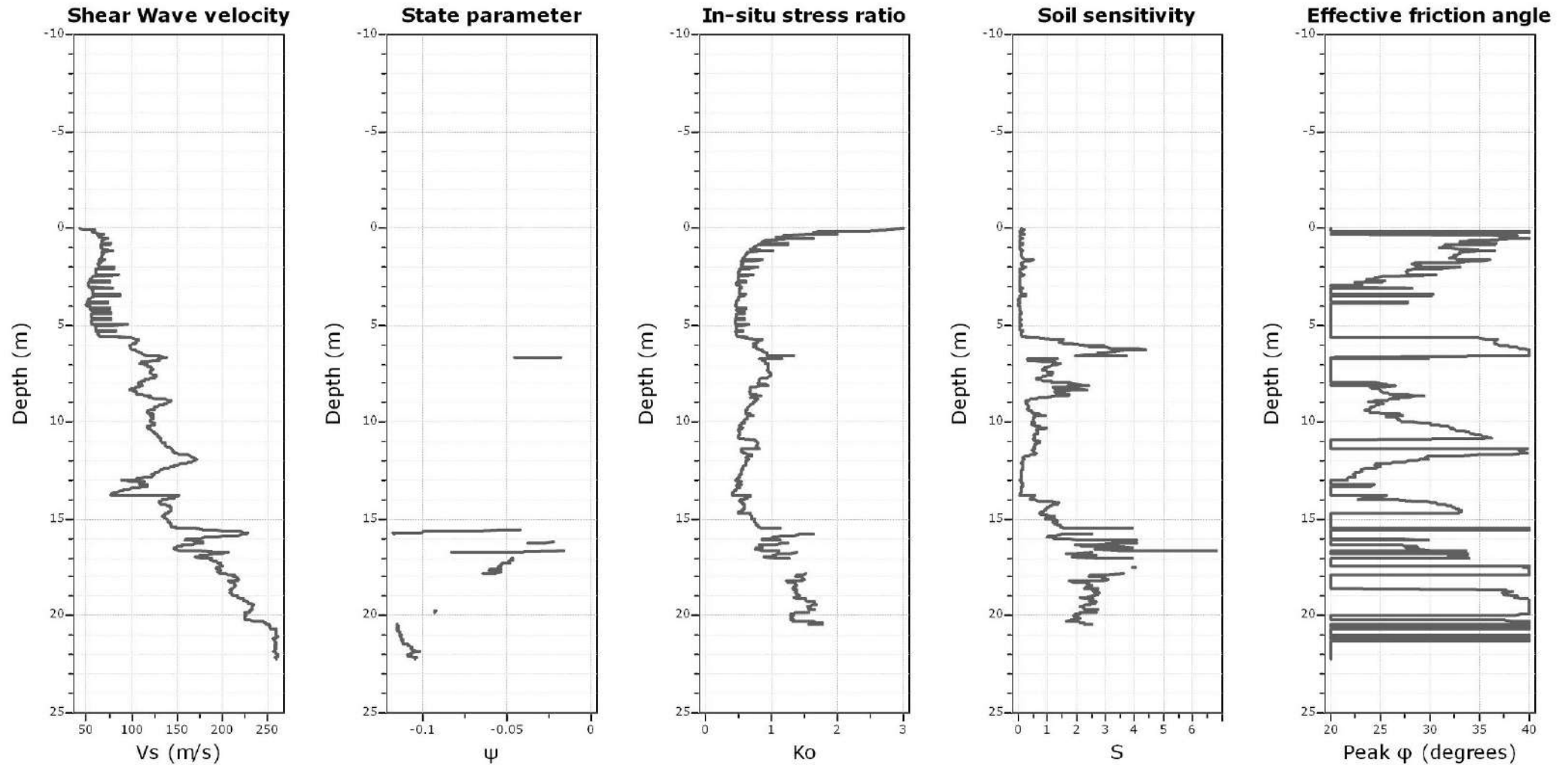
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

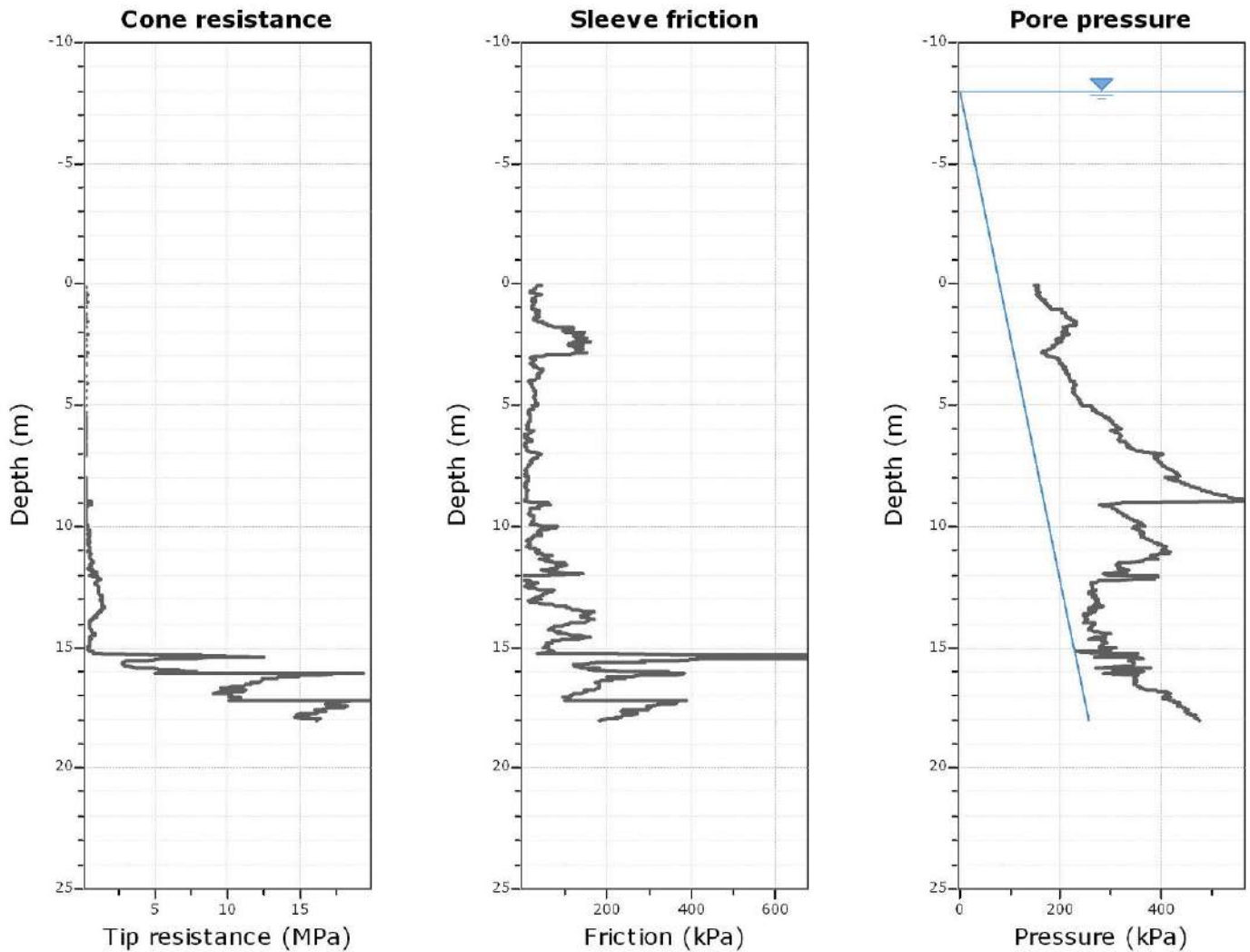
● — User defined estimation data



Calculation parameters

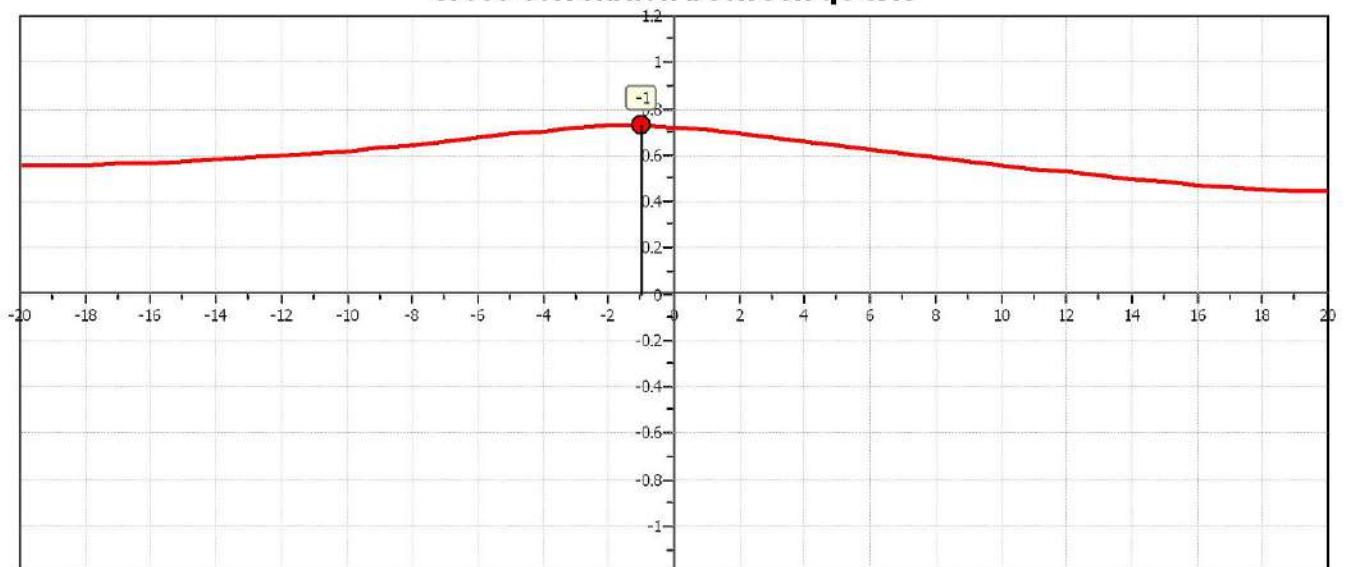
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

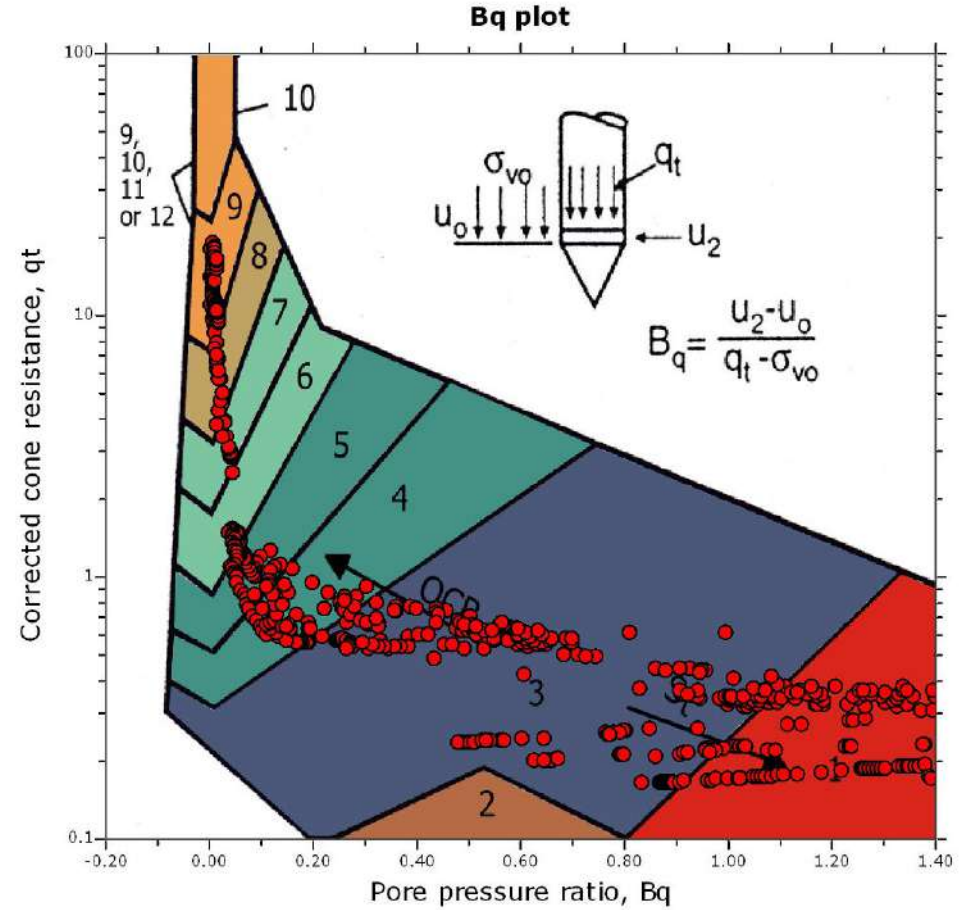
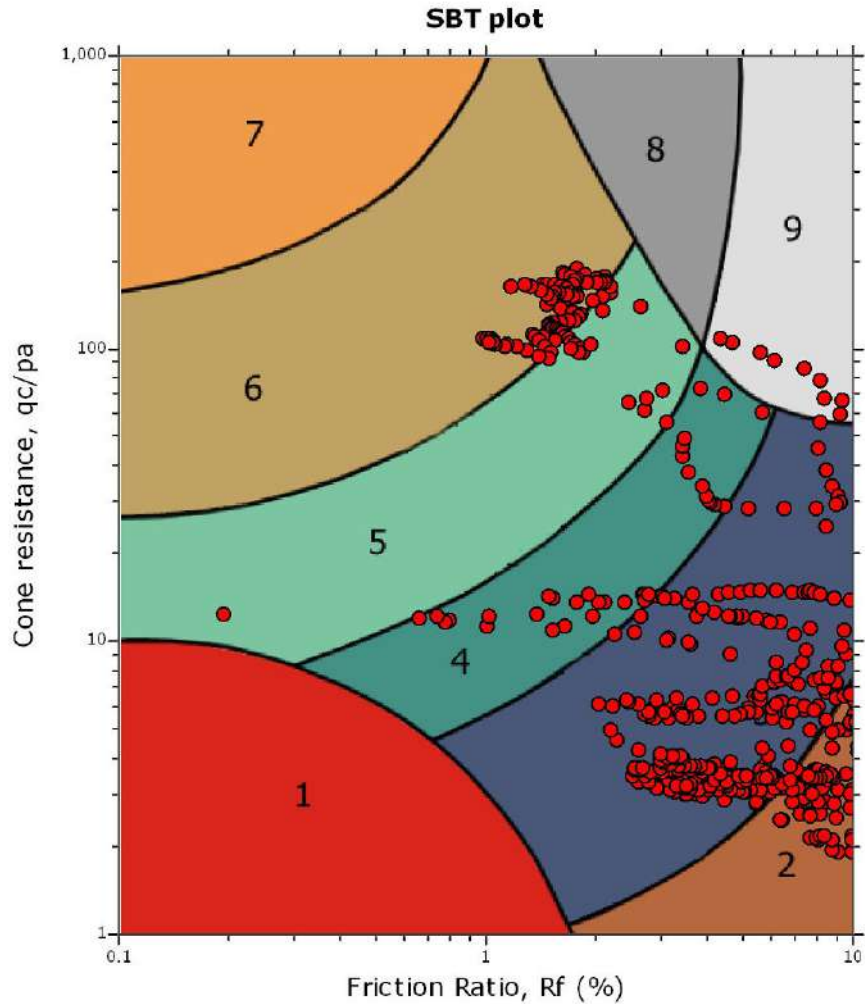


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



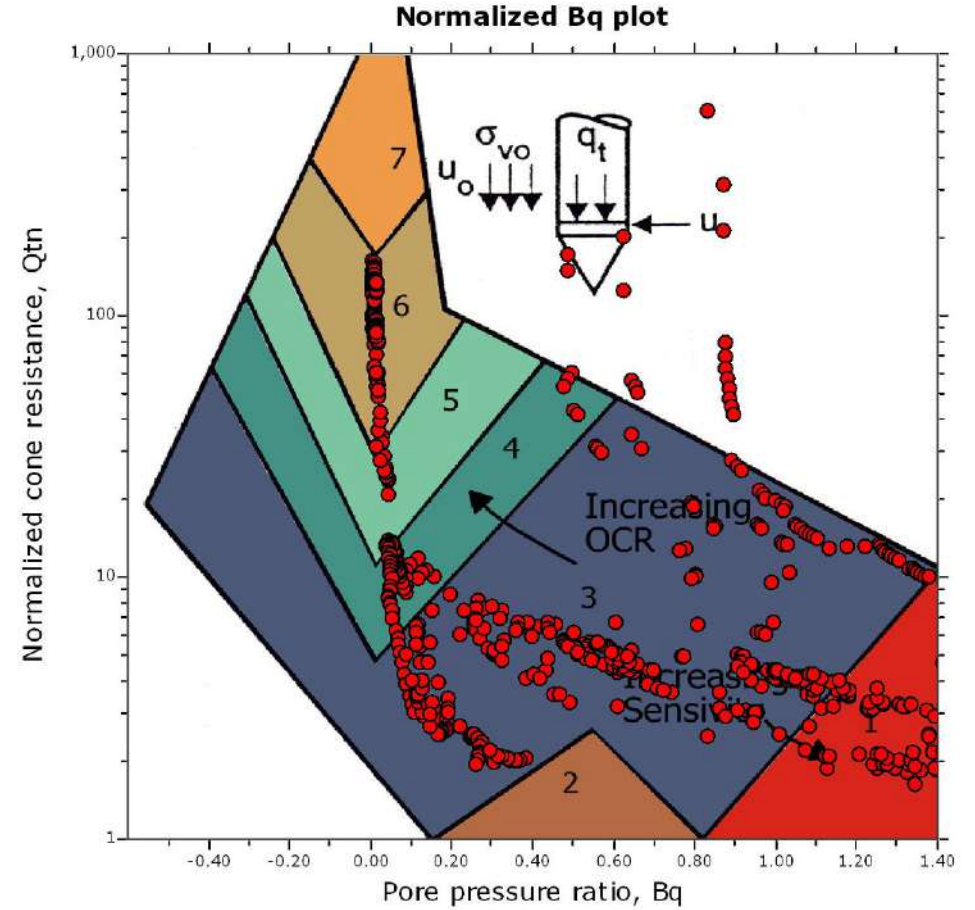
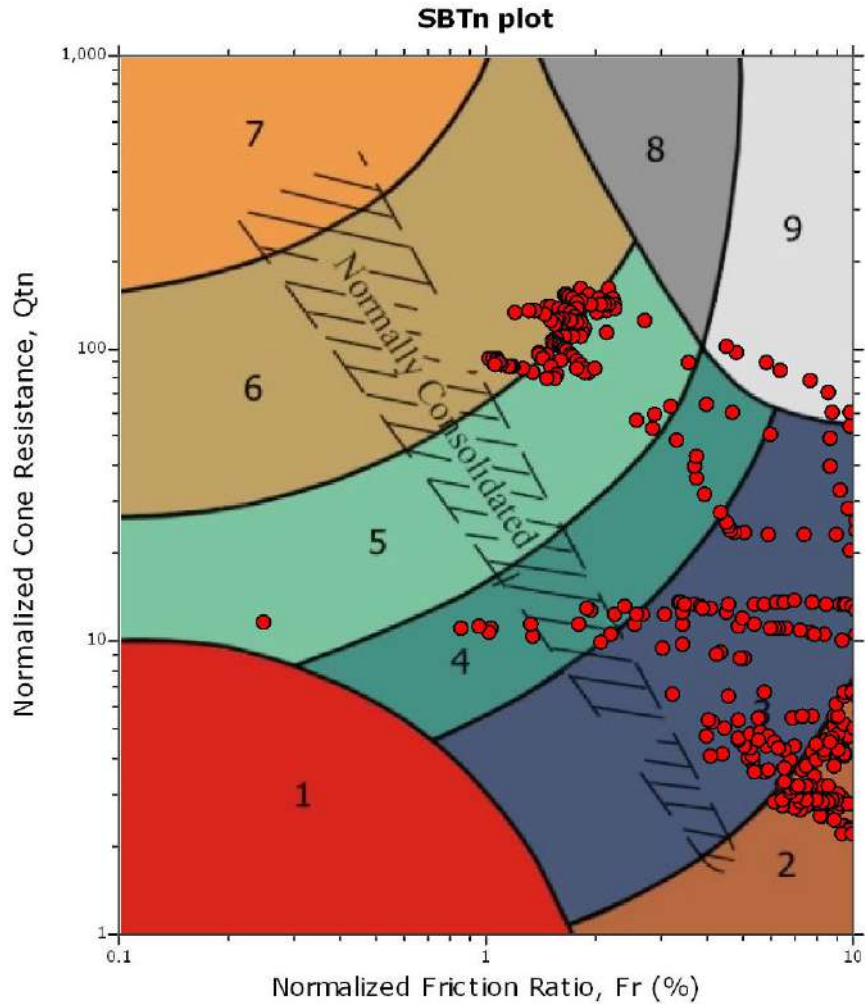
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

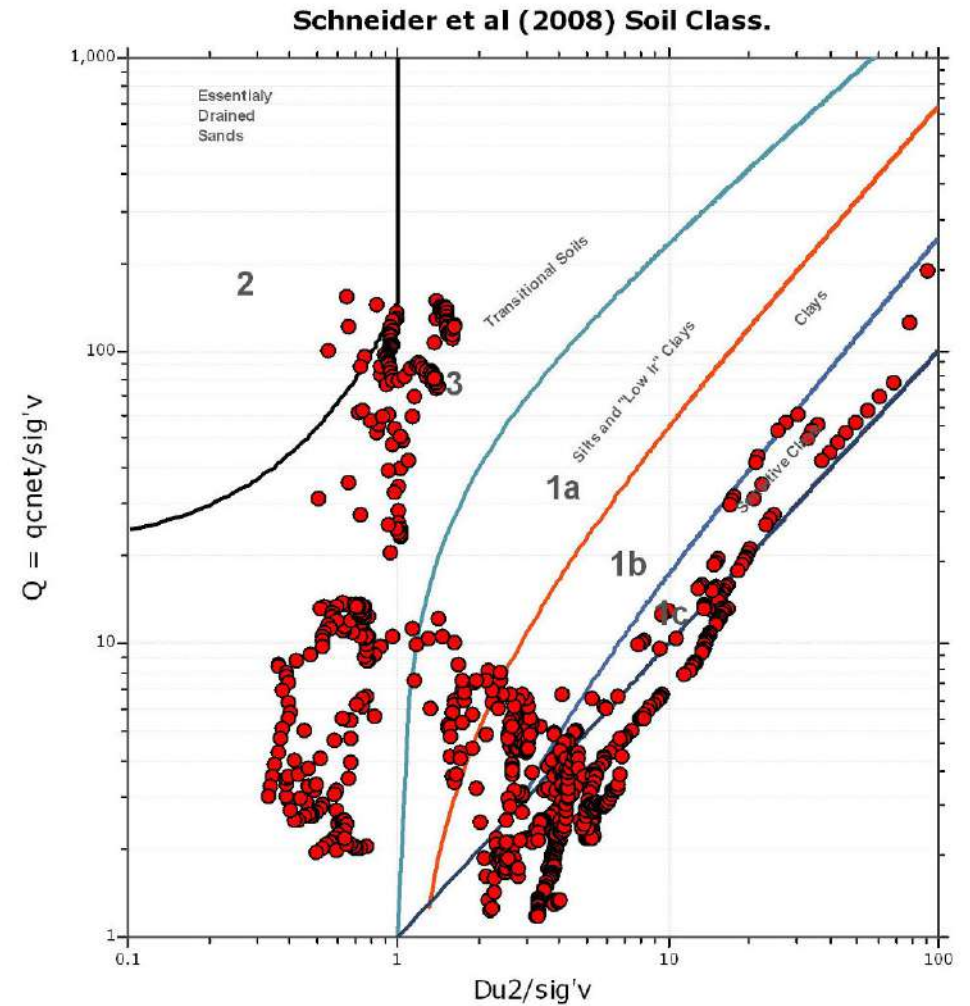
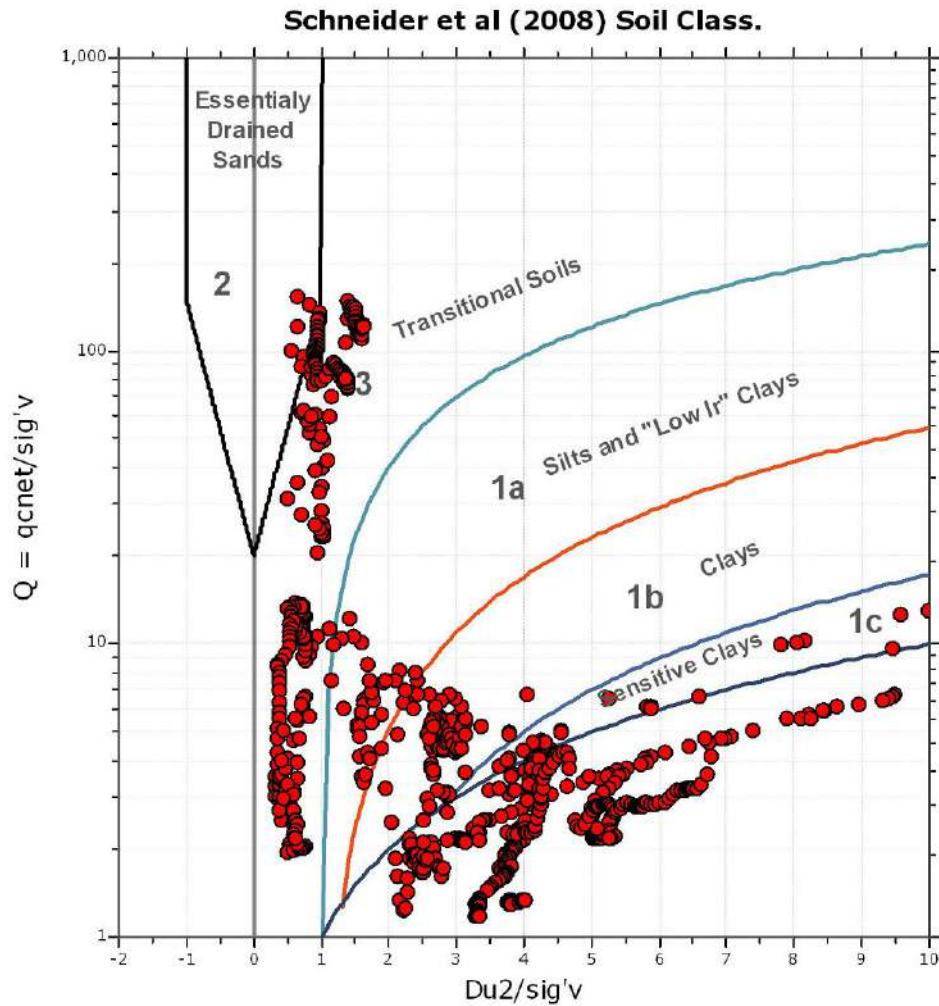
SBT - Bq plots (normalized)

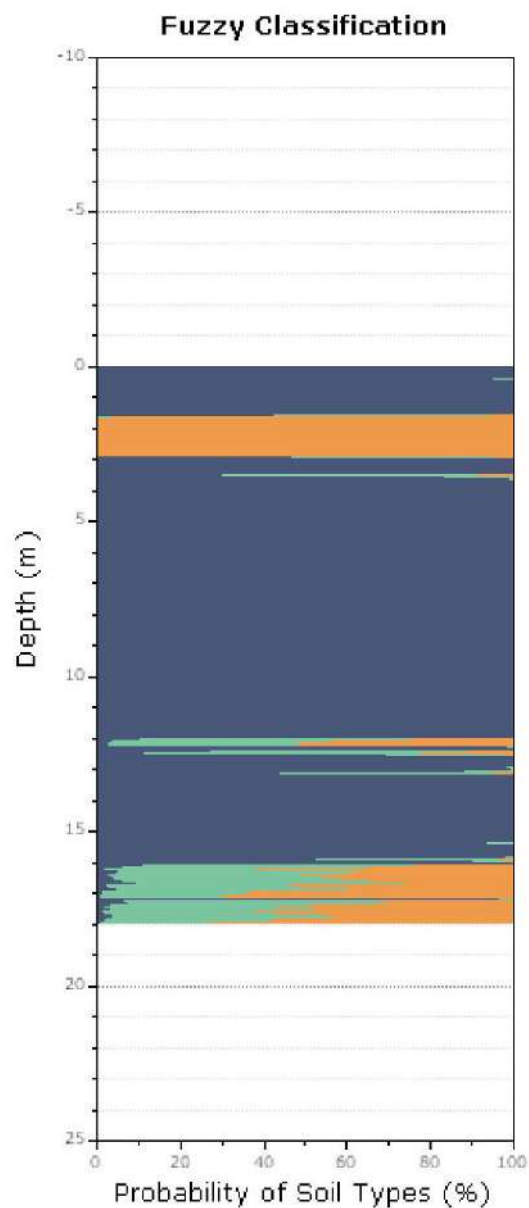
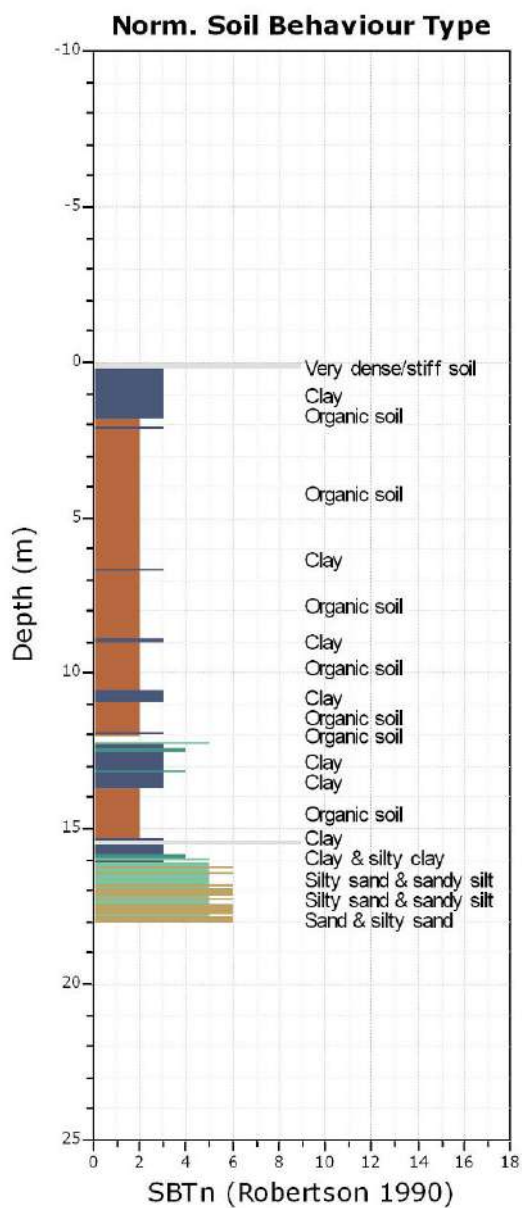


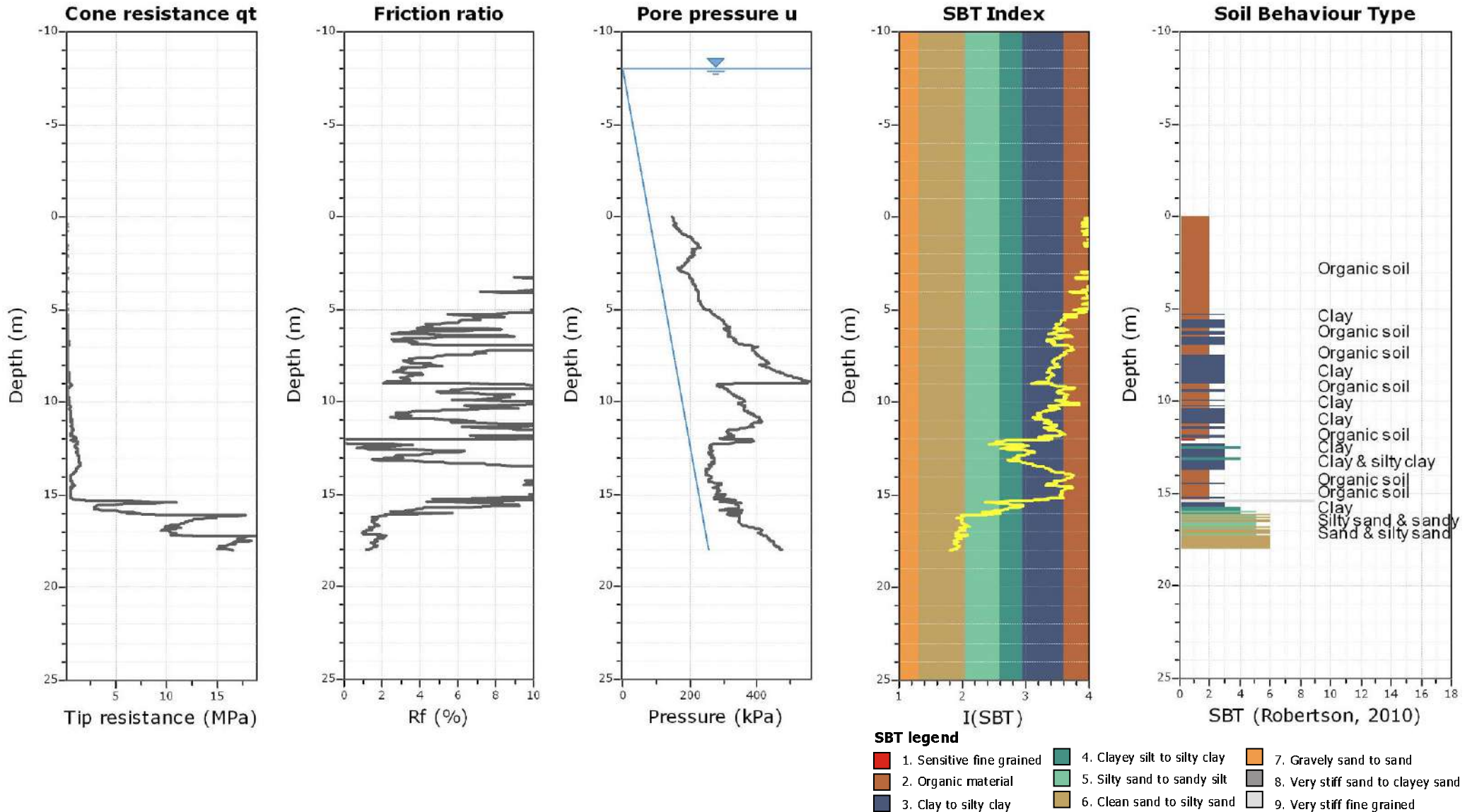
SBTn legend

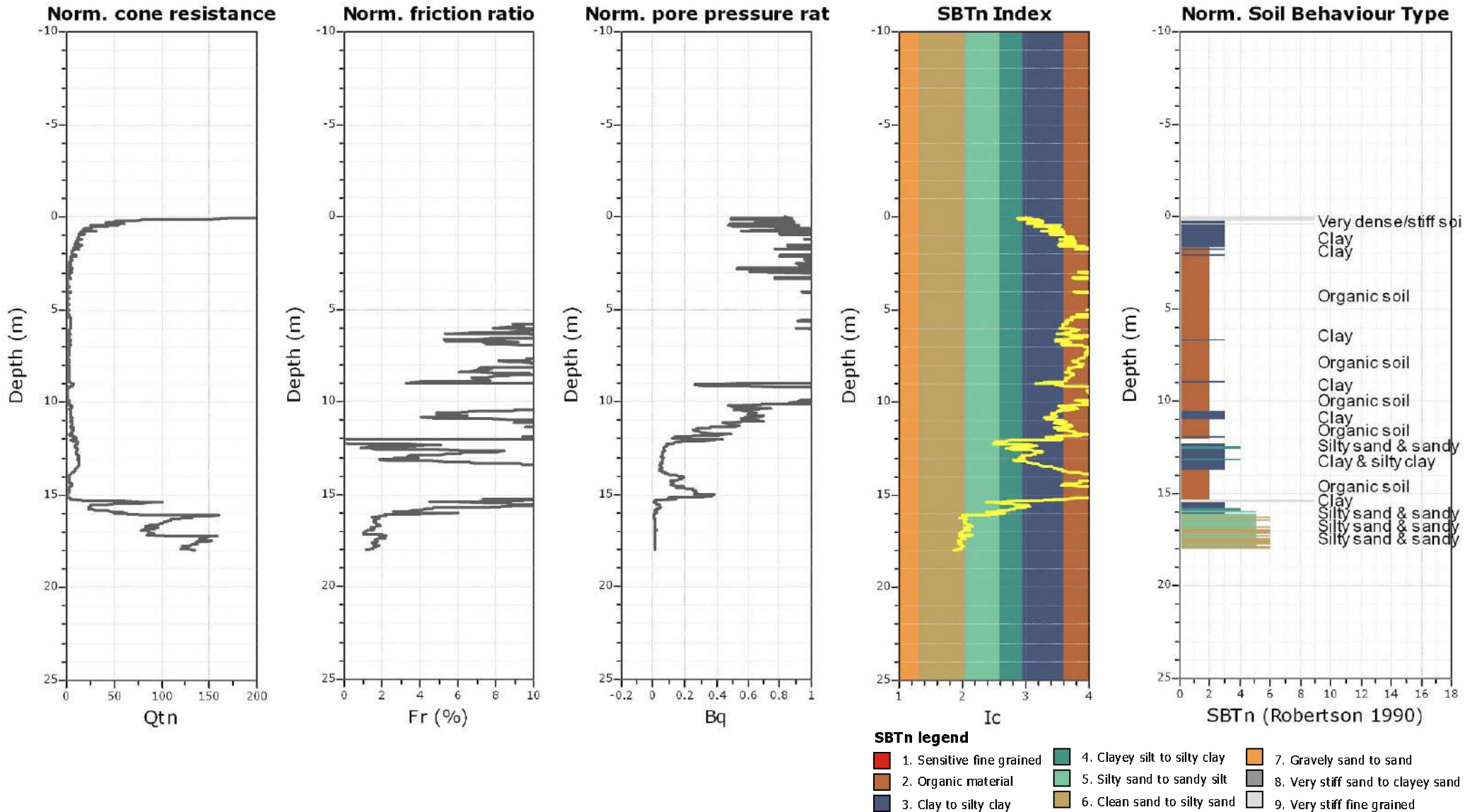
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

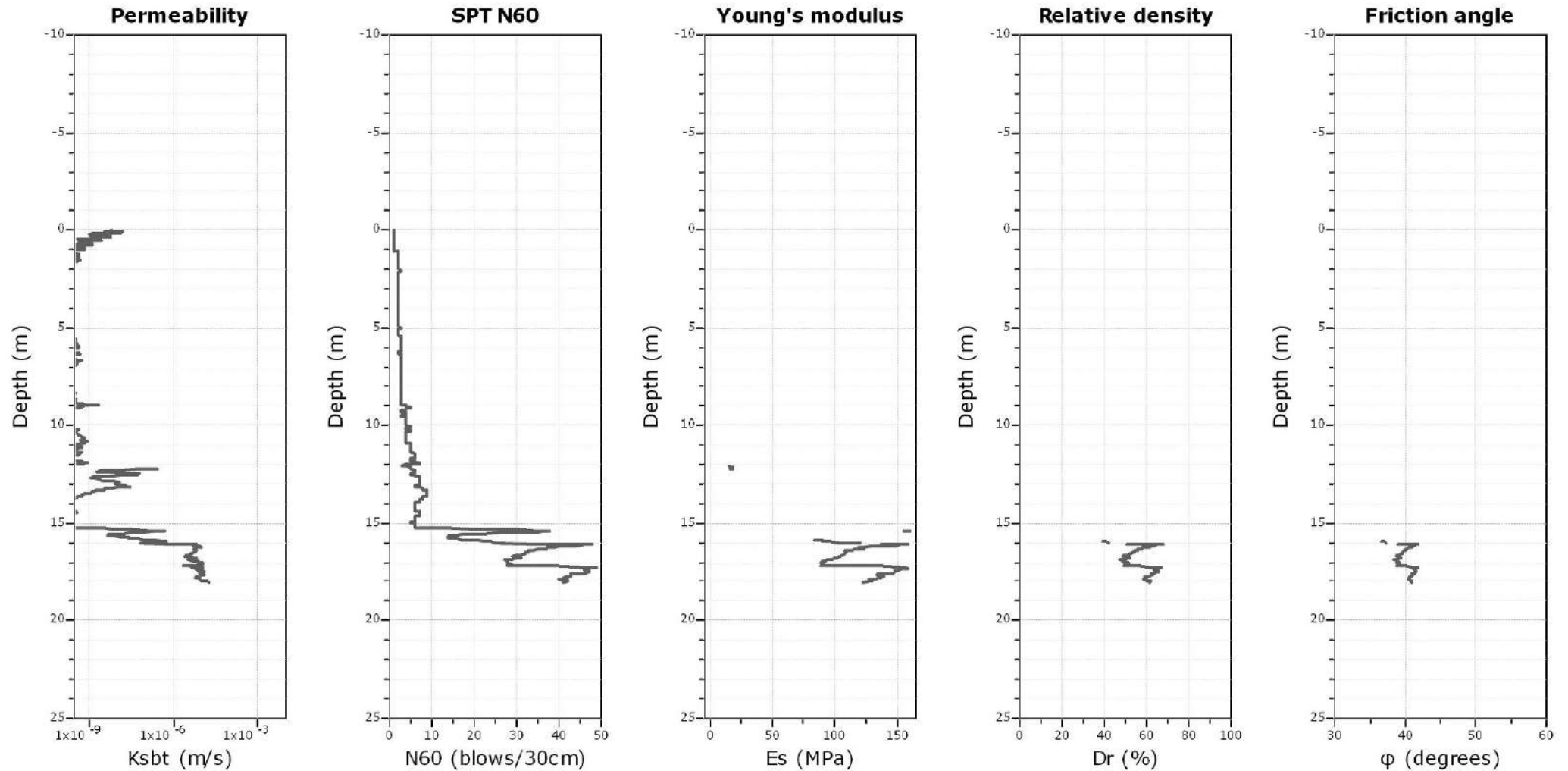
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

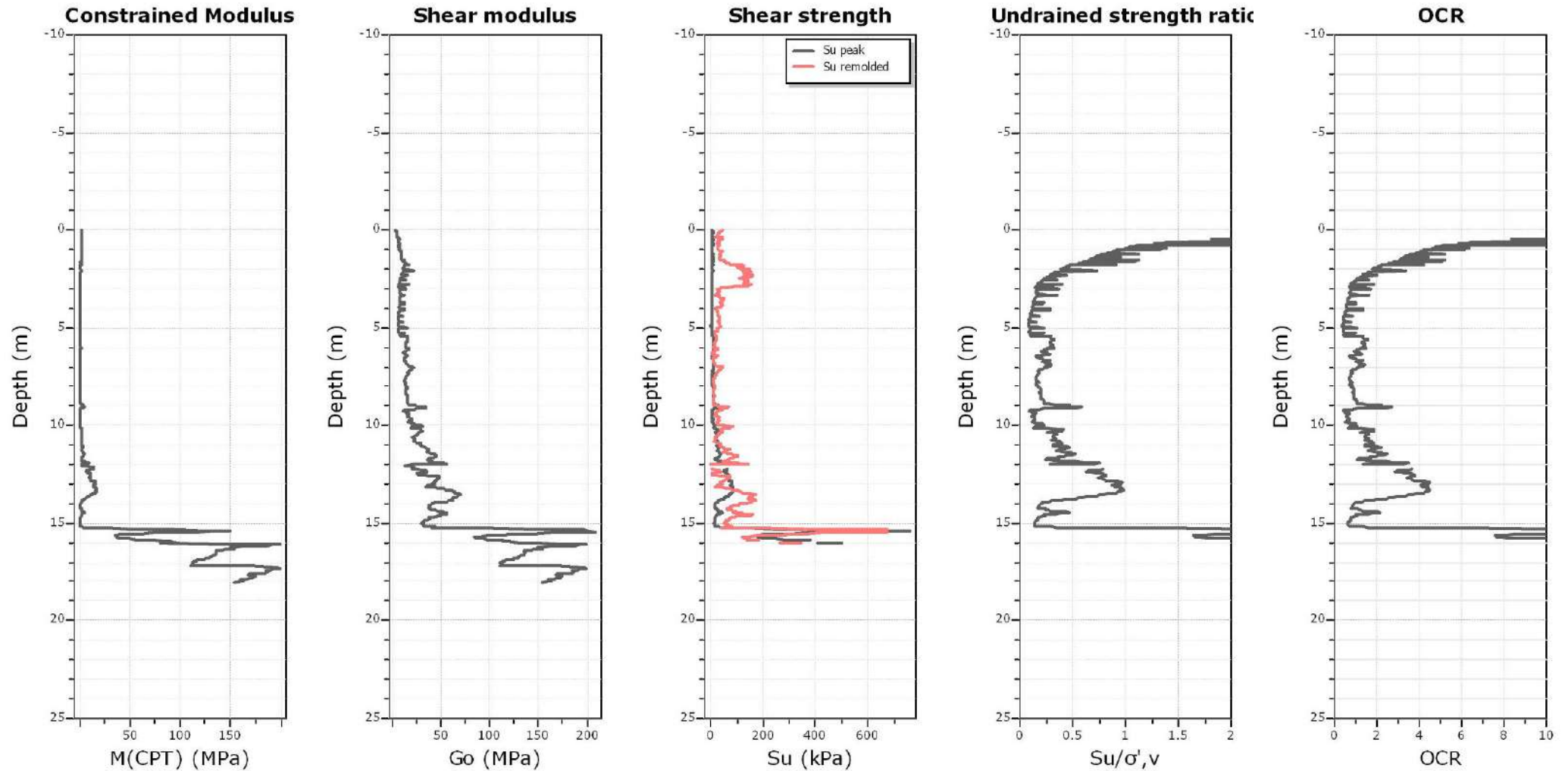
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative desnisty constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

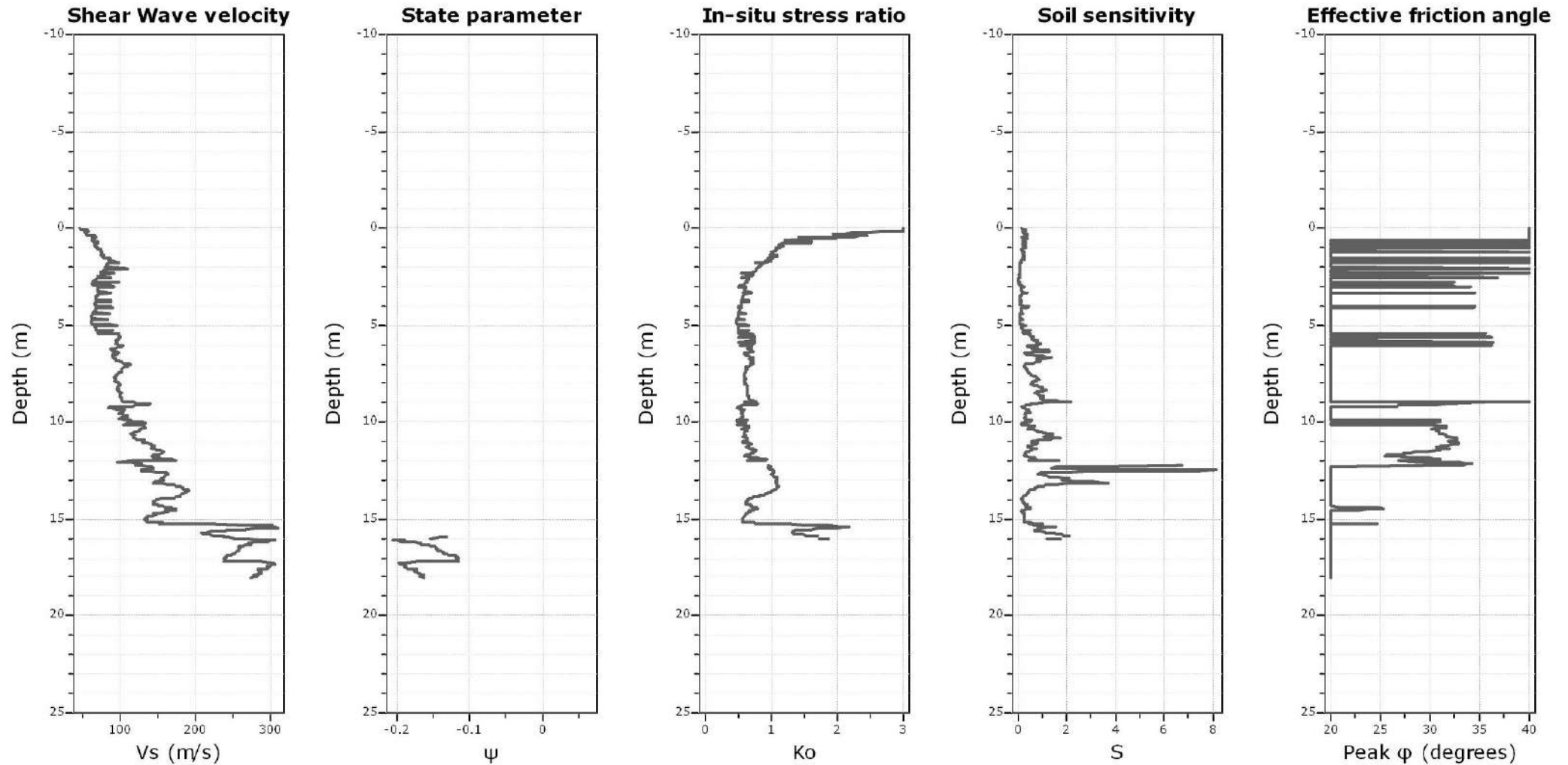
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tm} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

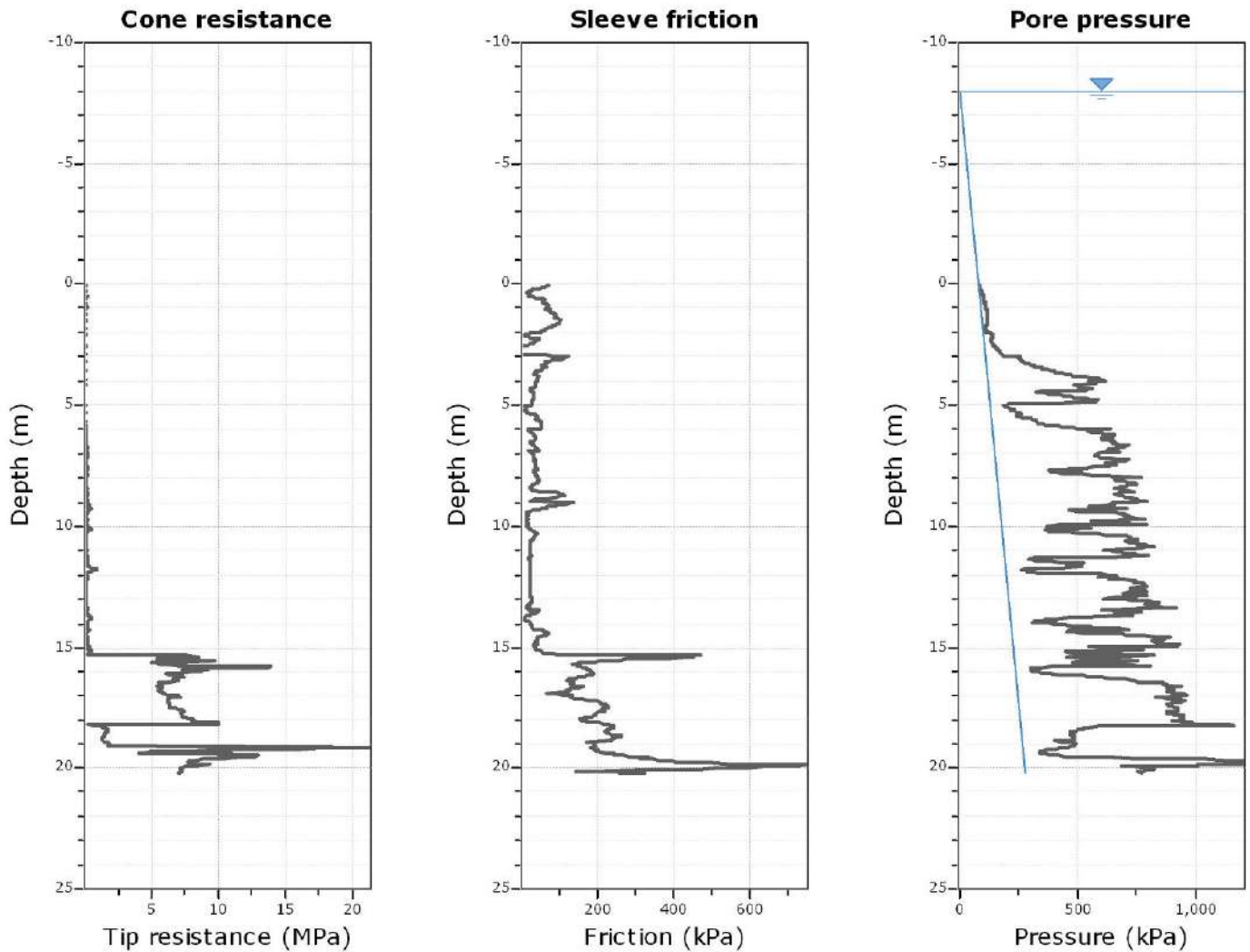
● — User defined estimation data



Calculation parameters

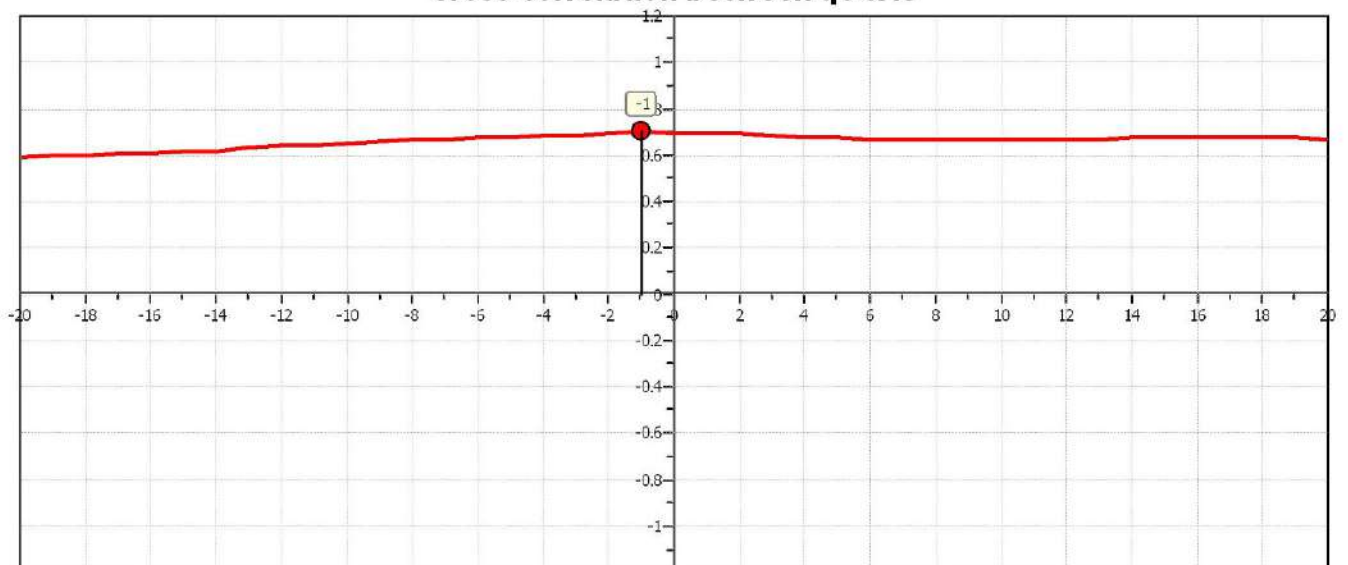
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

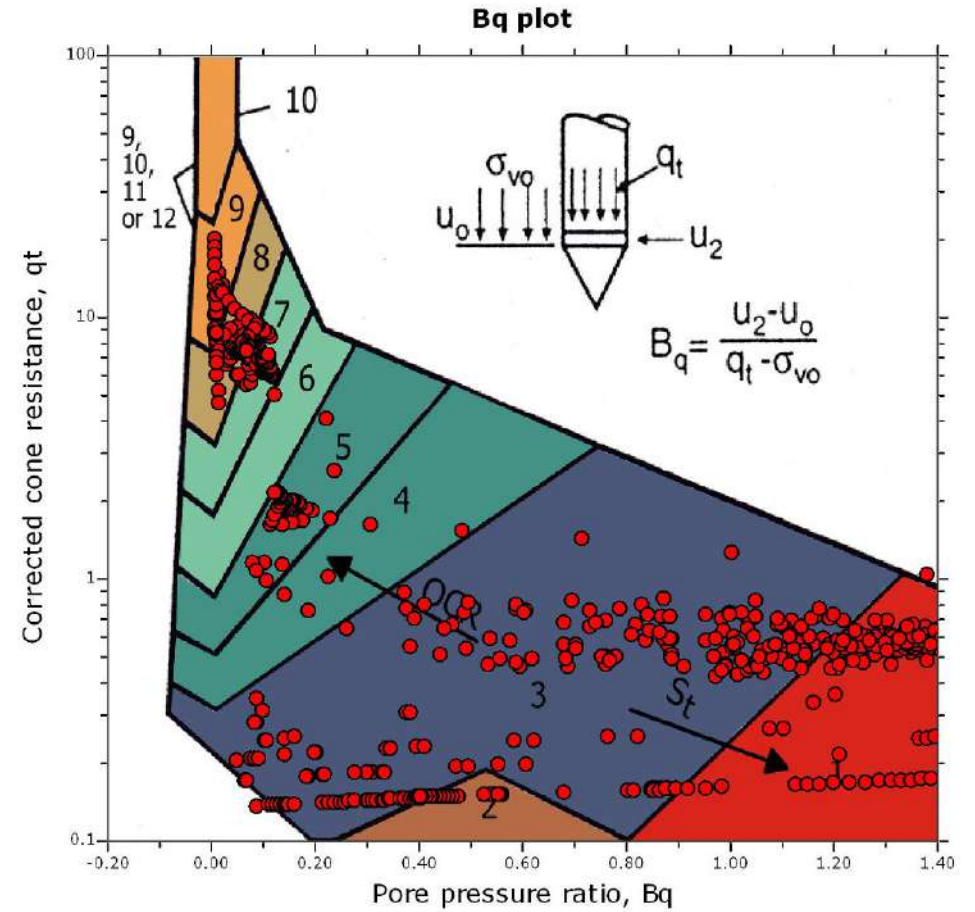
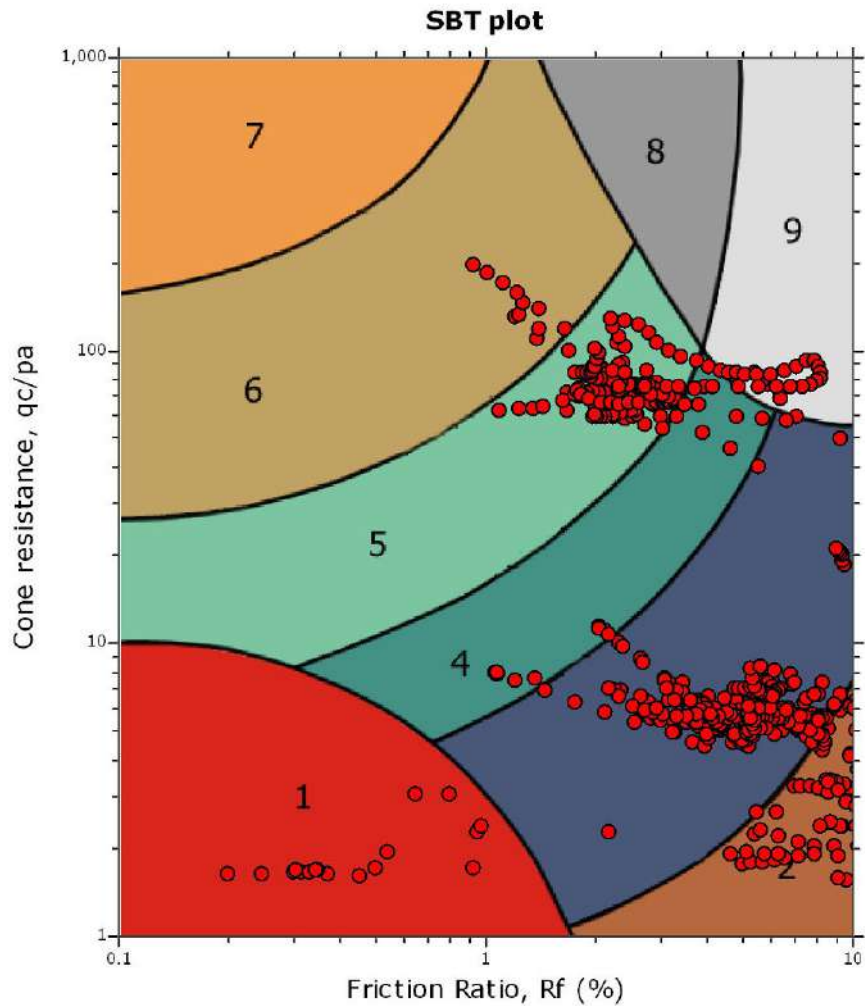


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



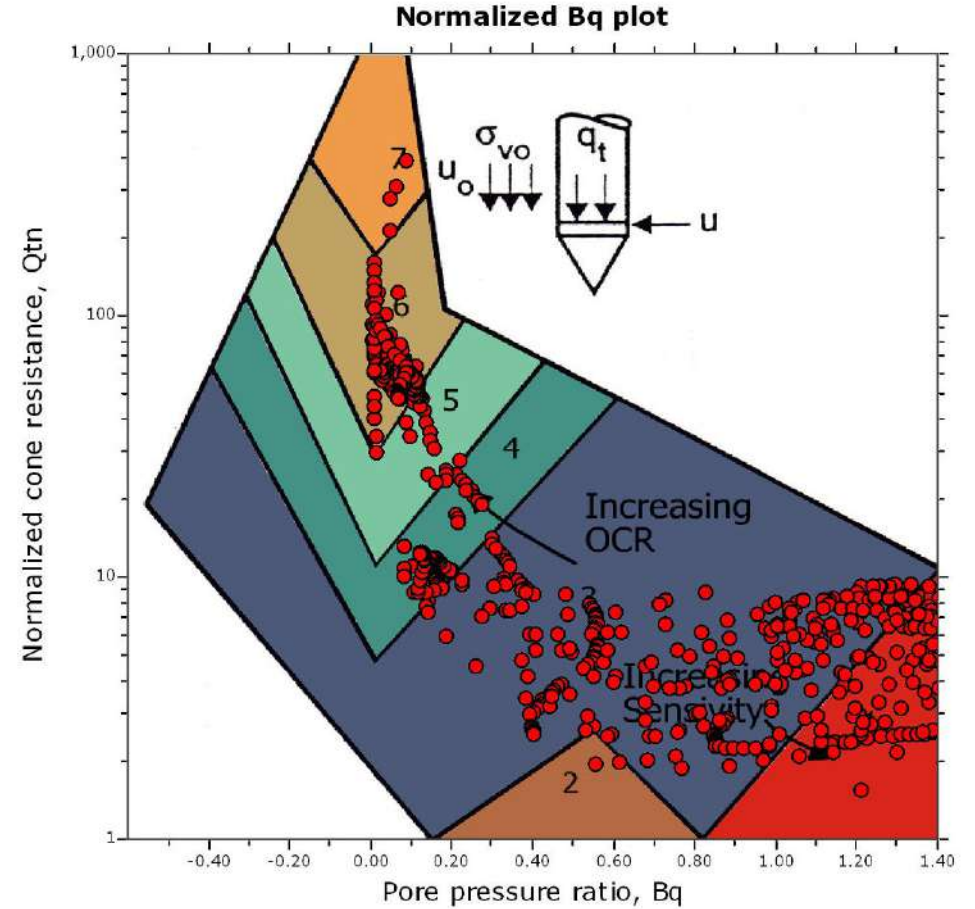
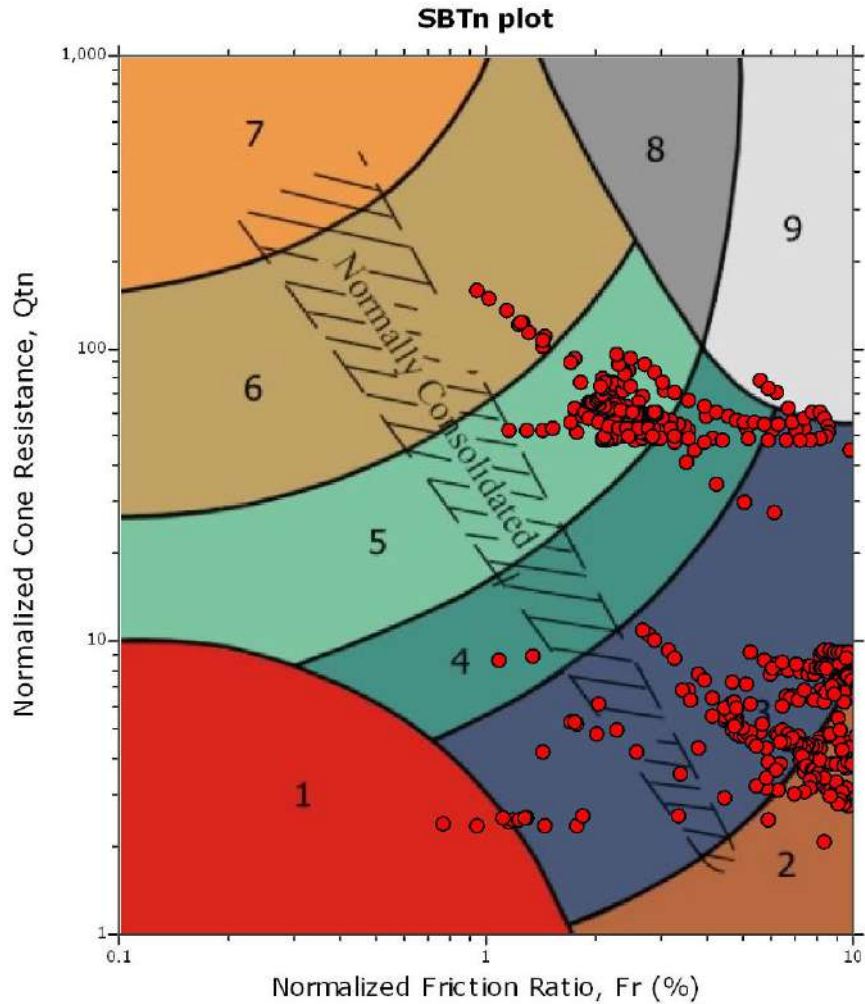
SBT - Bq plots



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 |

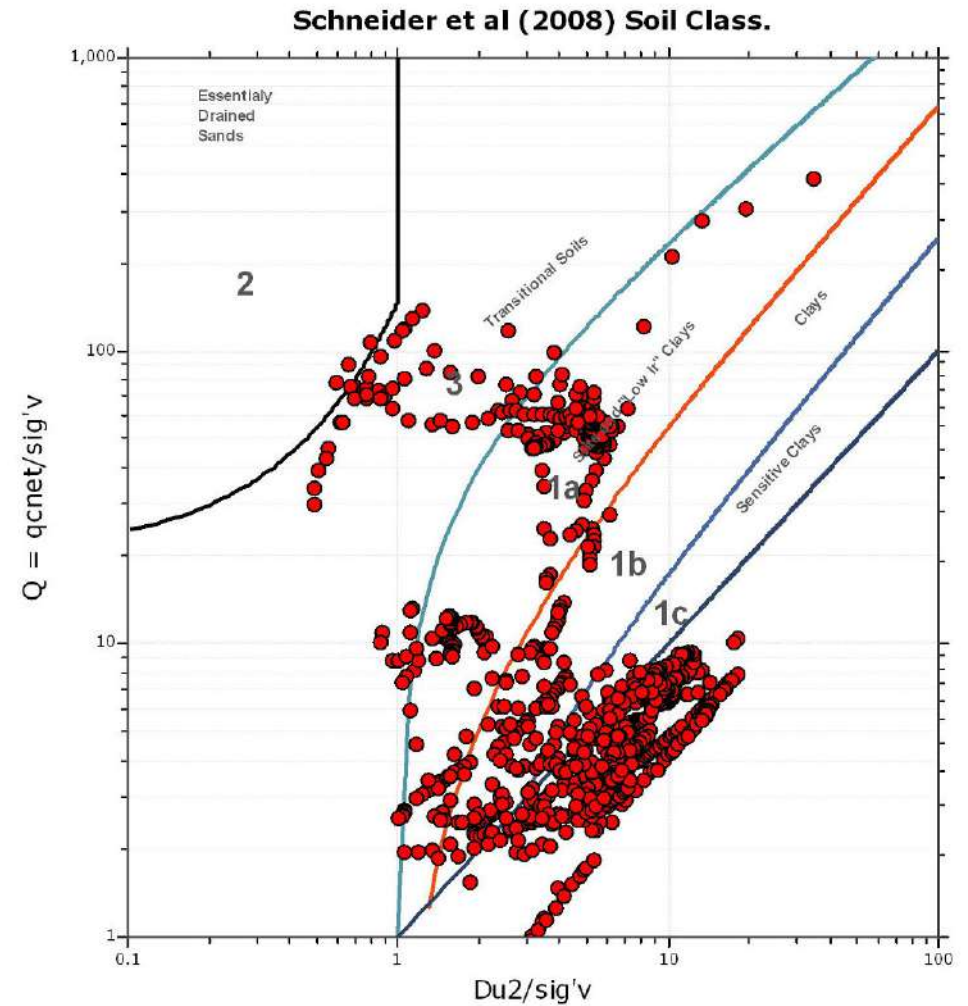
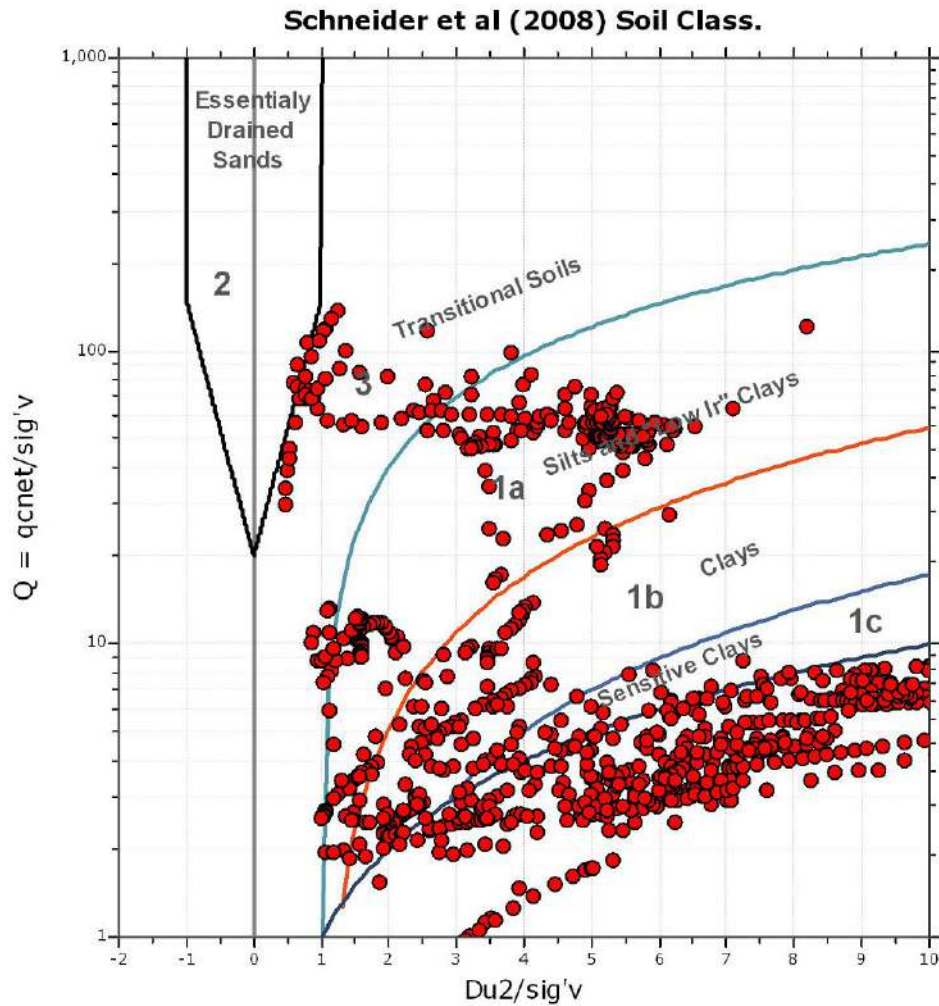
SBT - Bq plots (normalized)

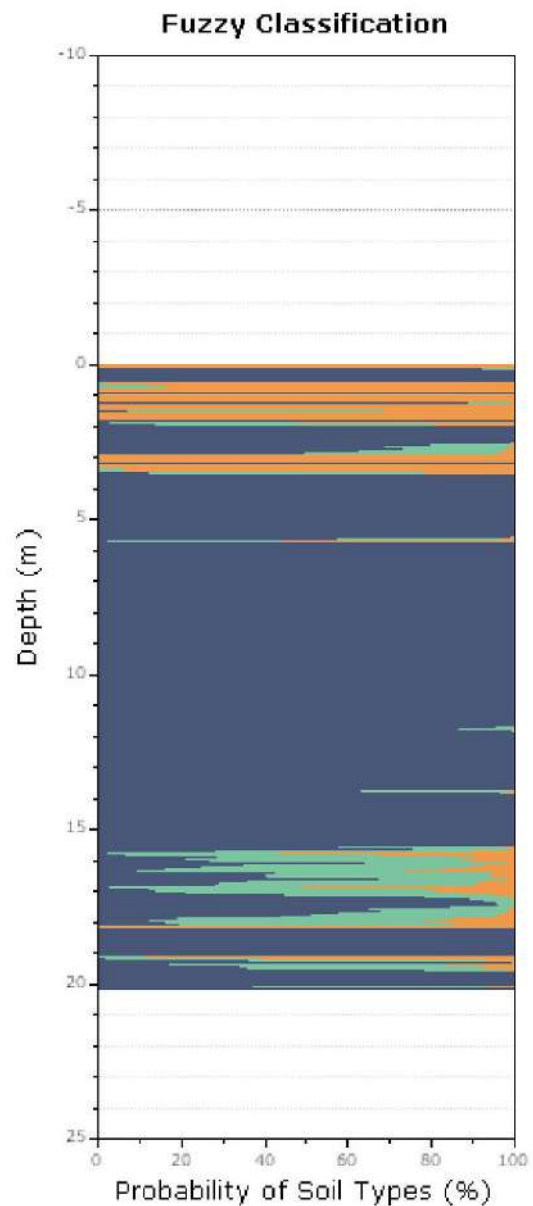
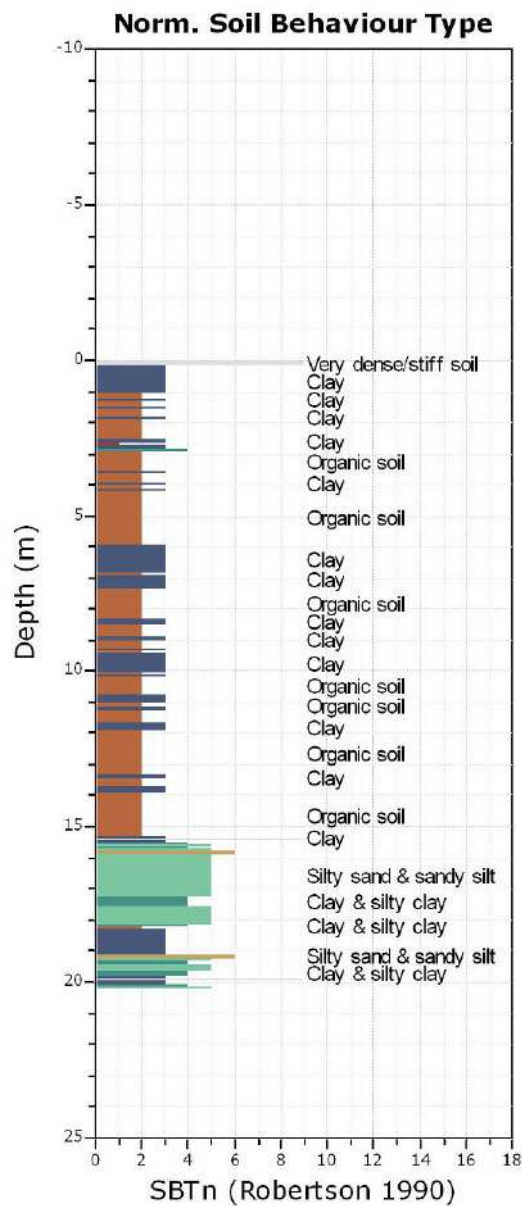


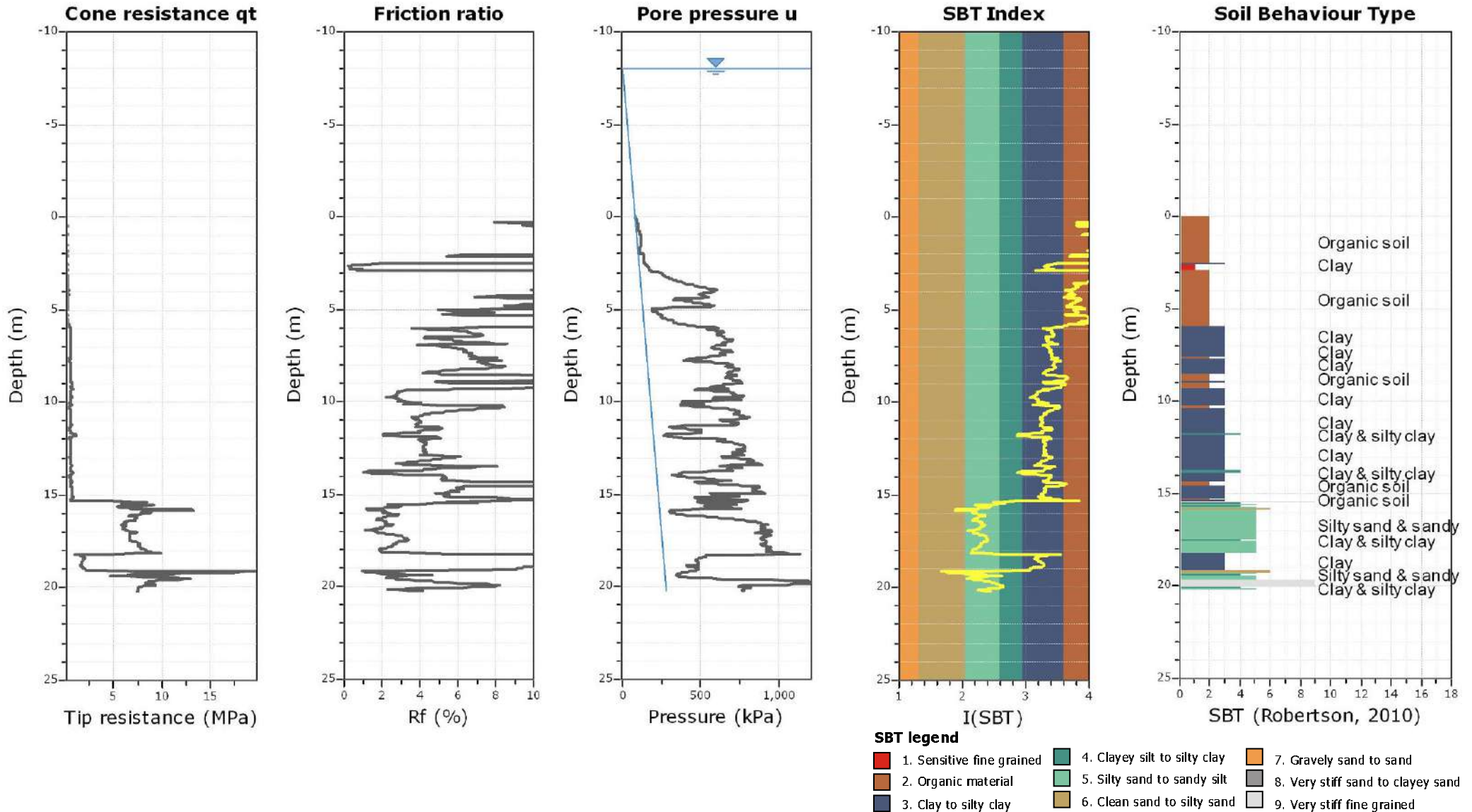
SBTn legend

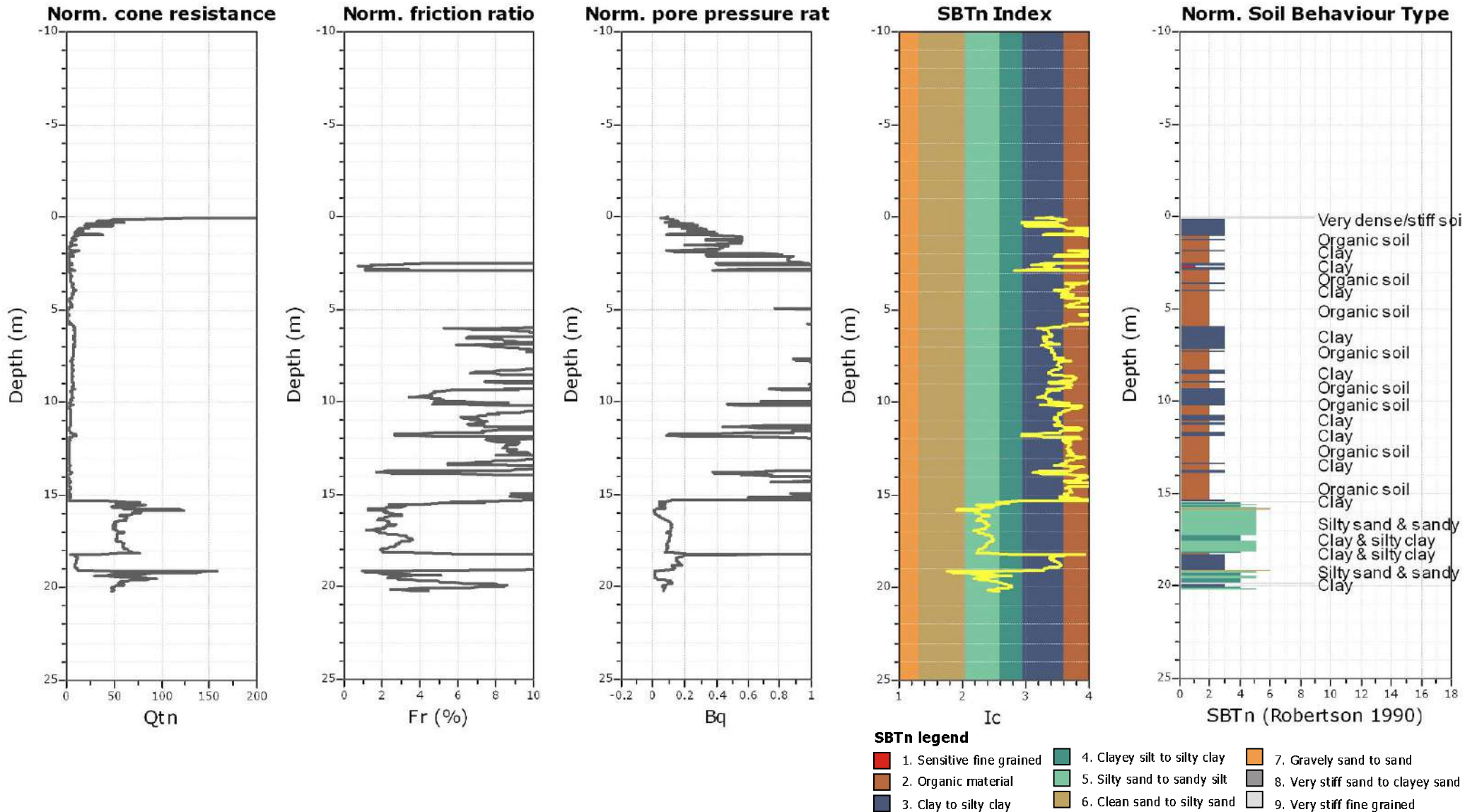
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

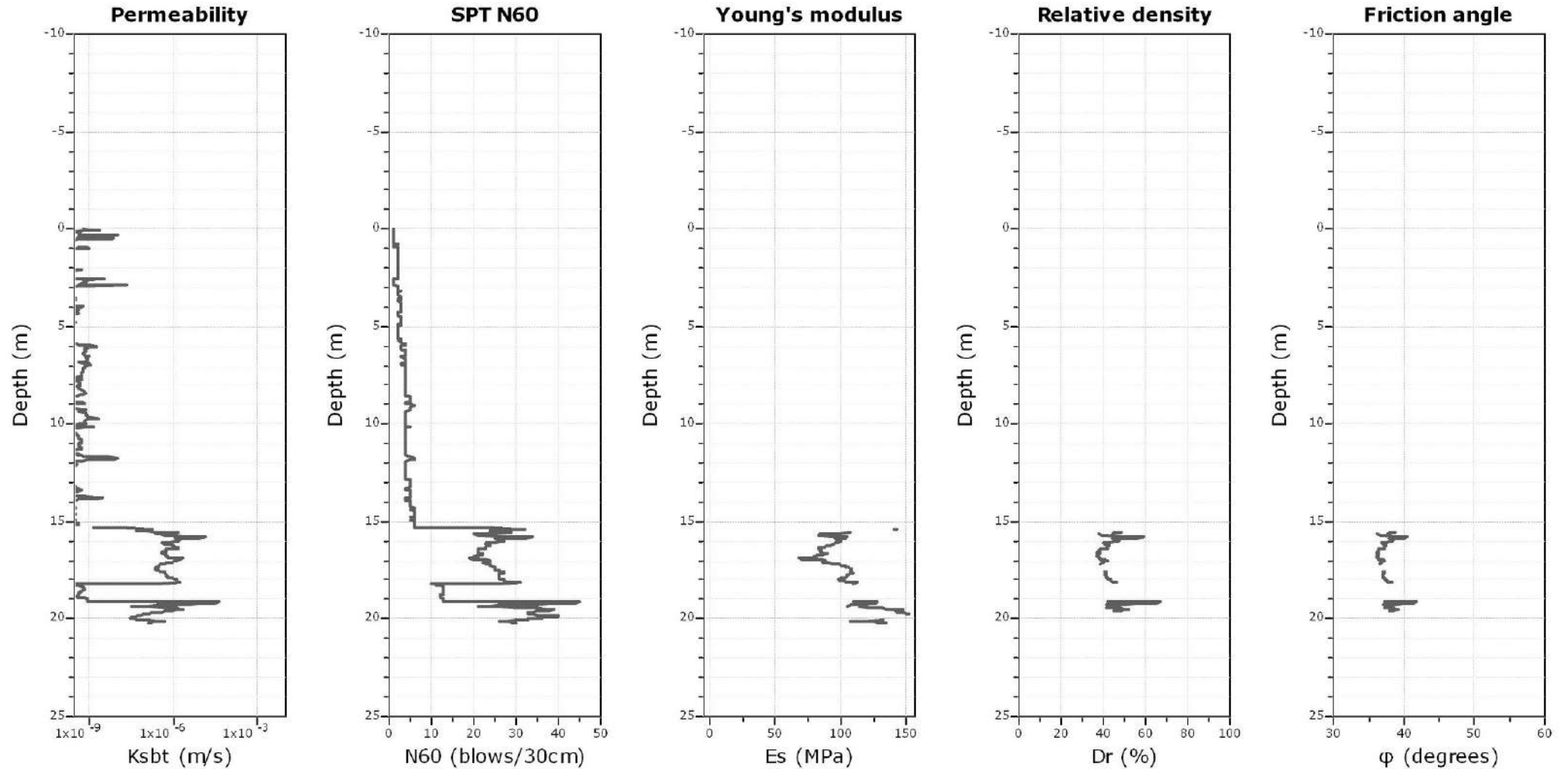
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

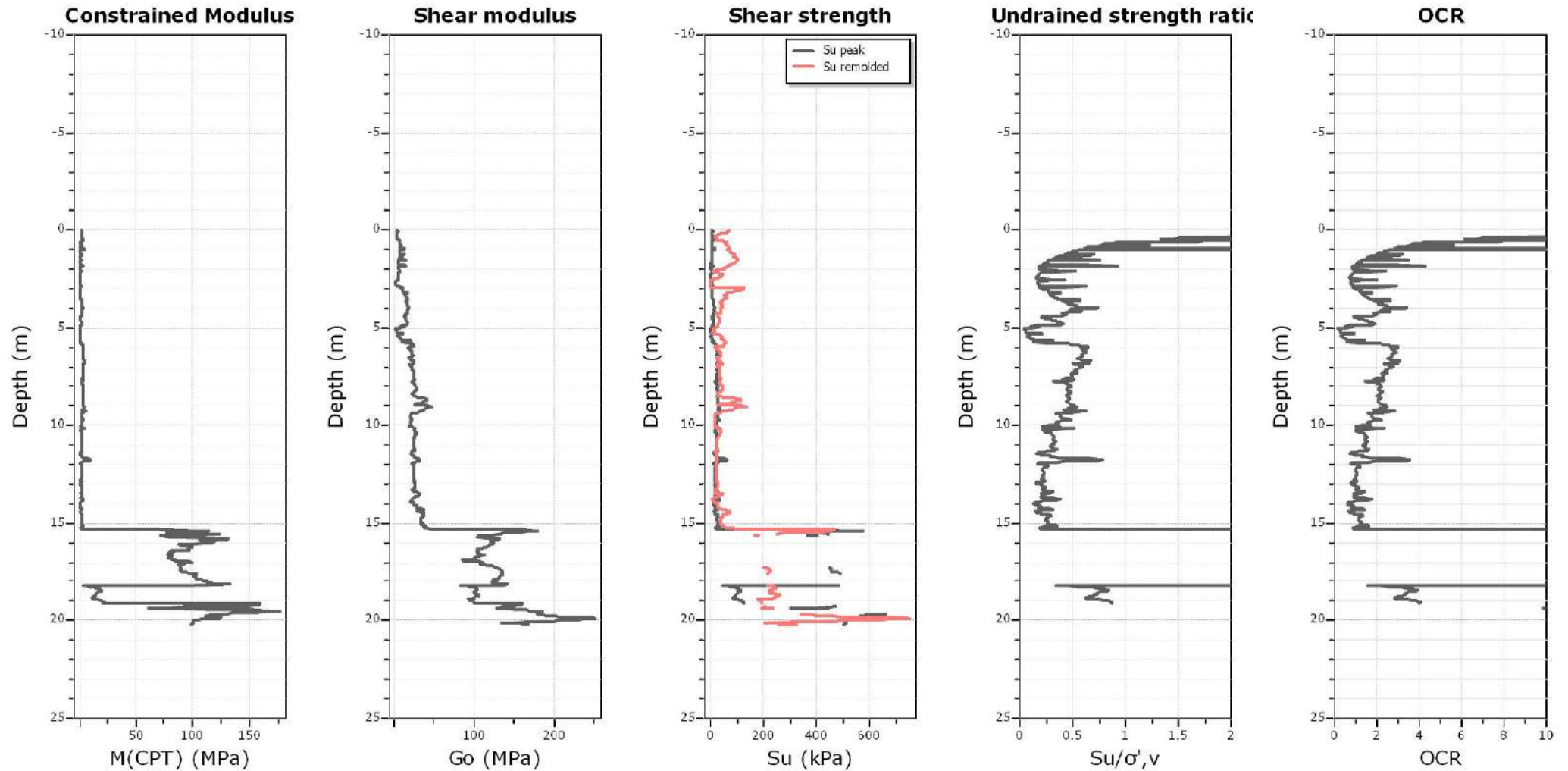
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

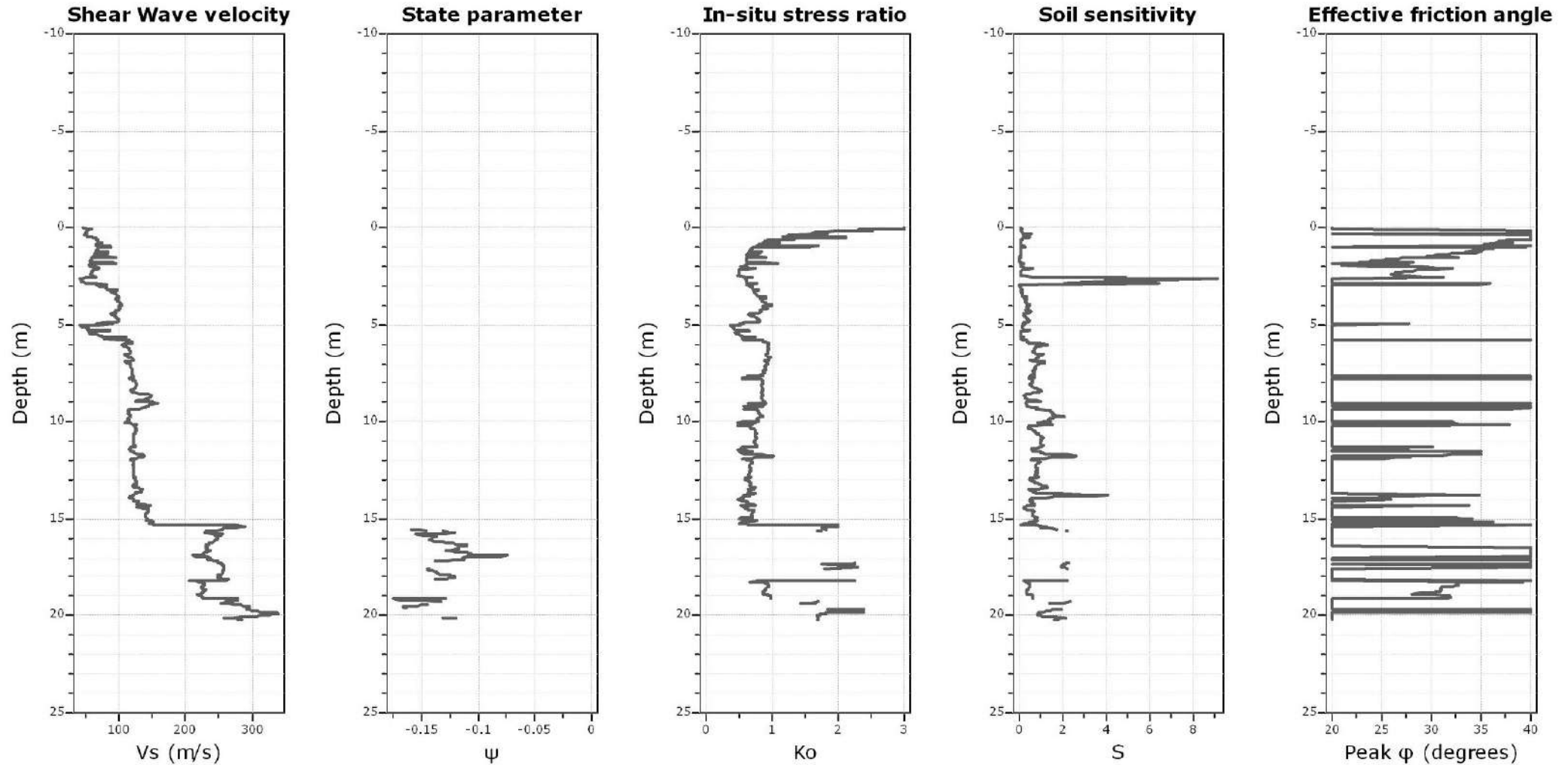
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

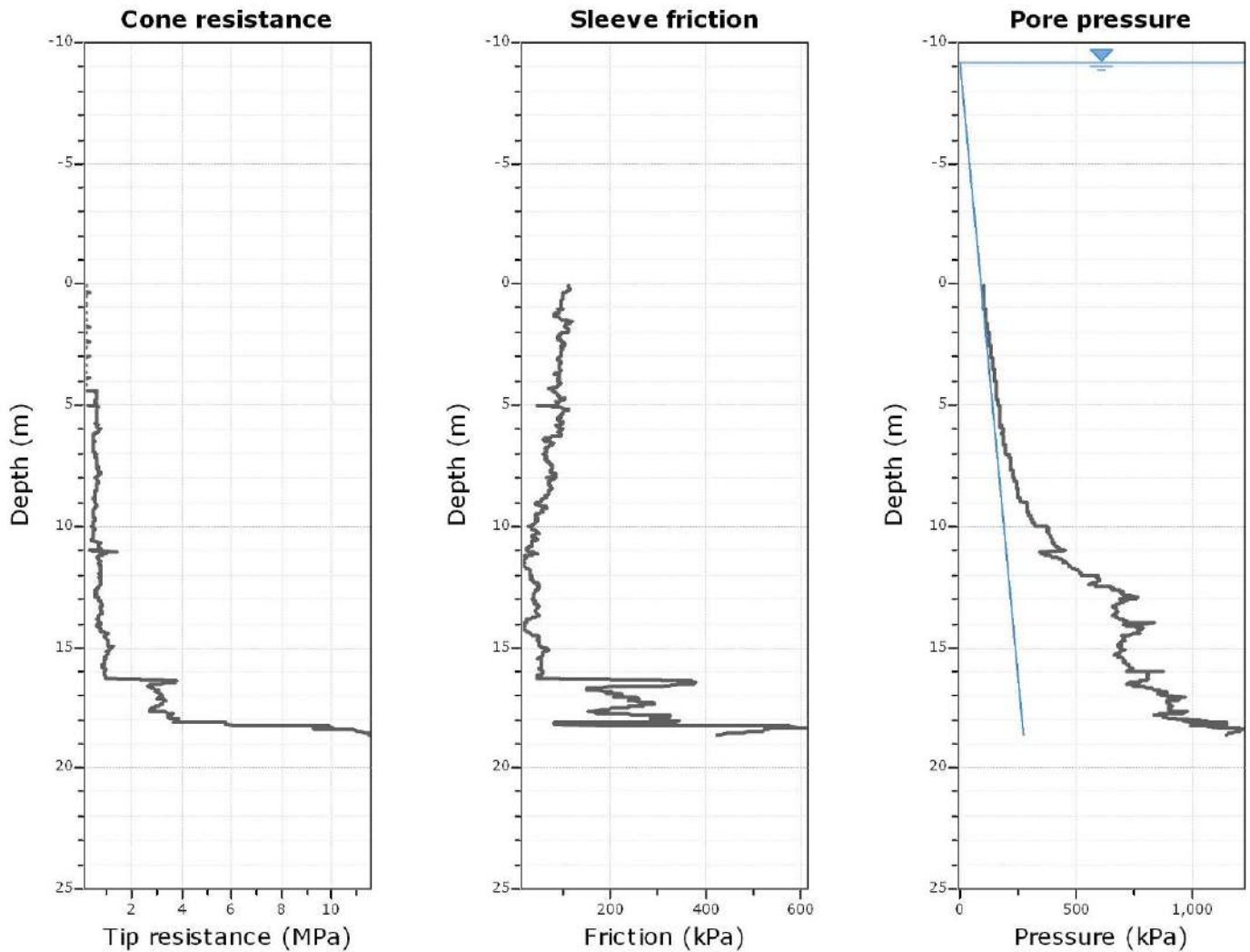
● User defined estimation data



Calculation parameters

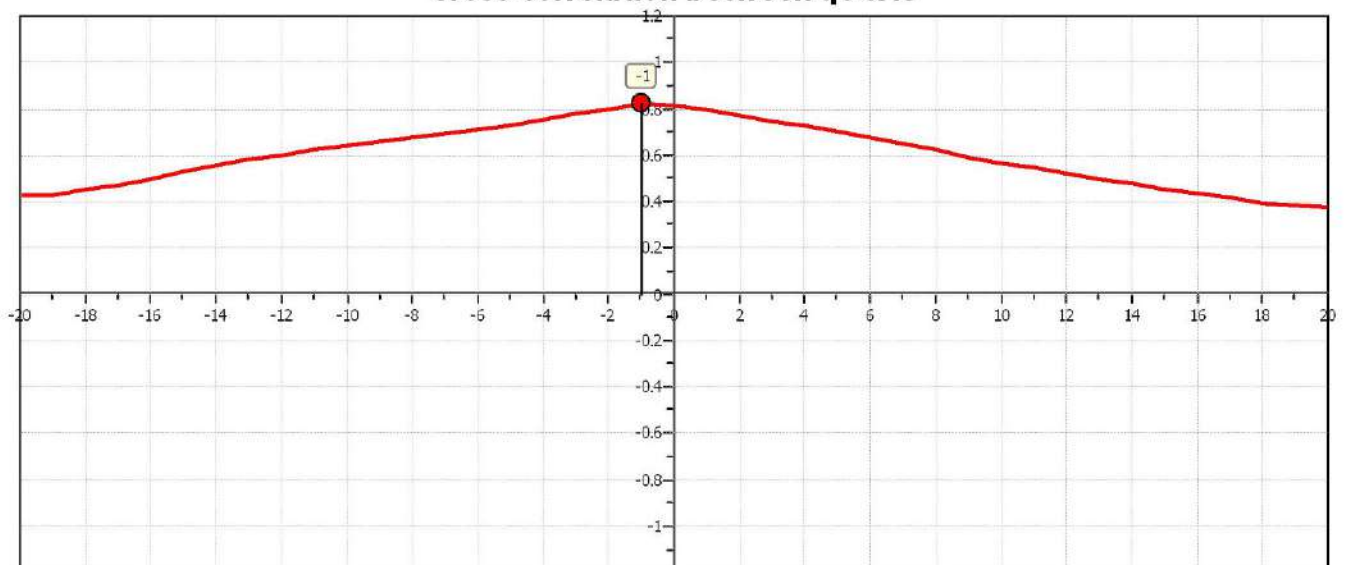
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

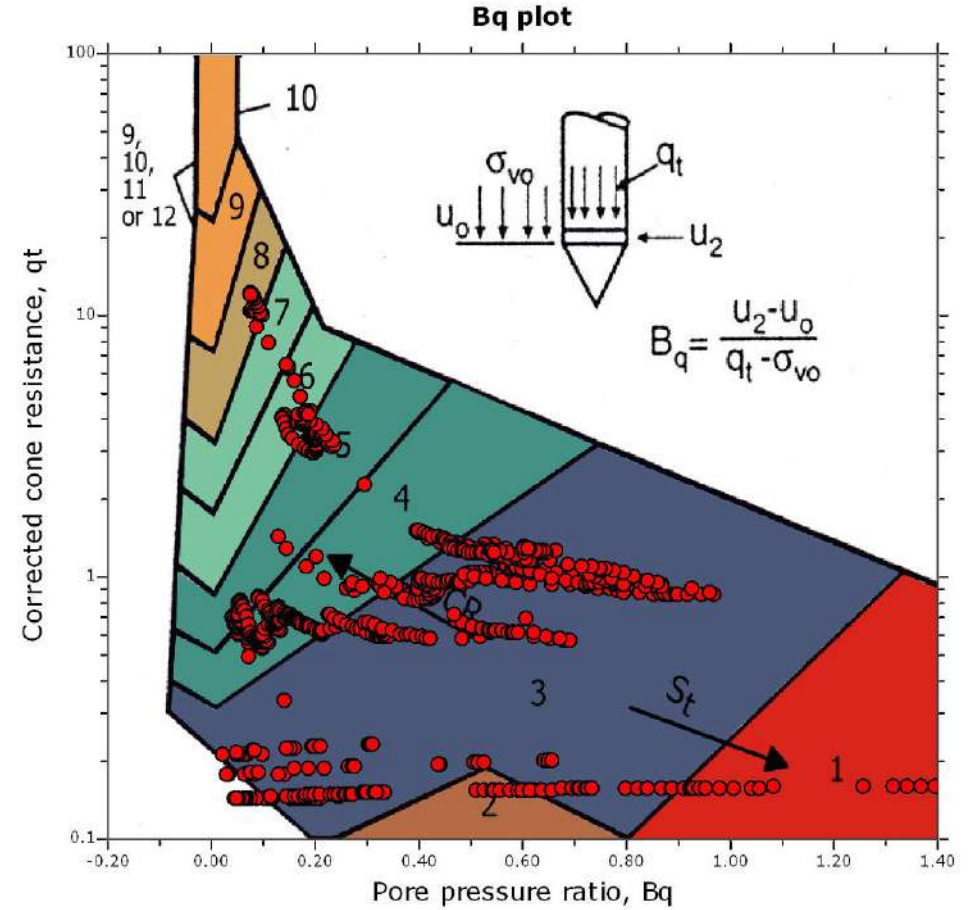
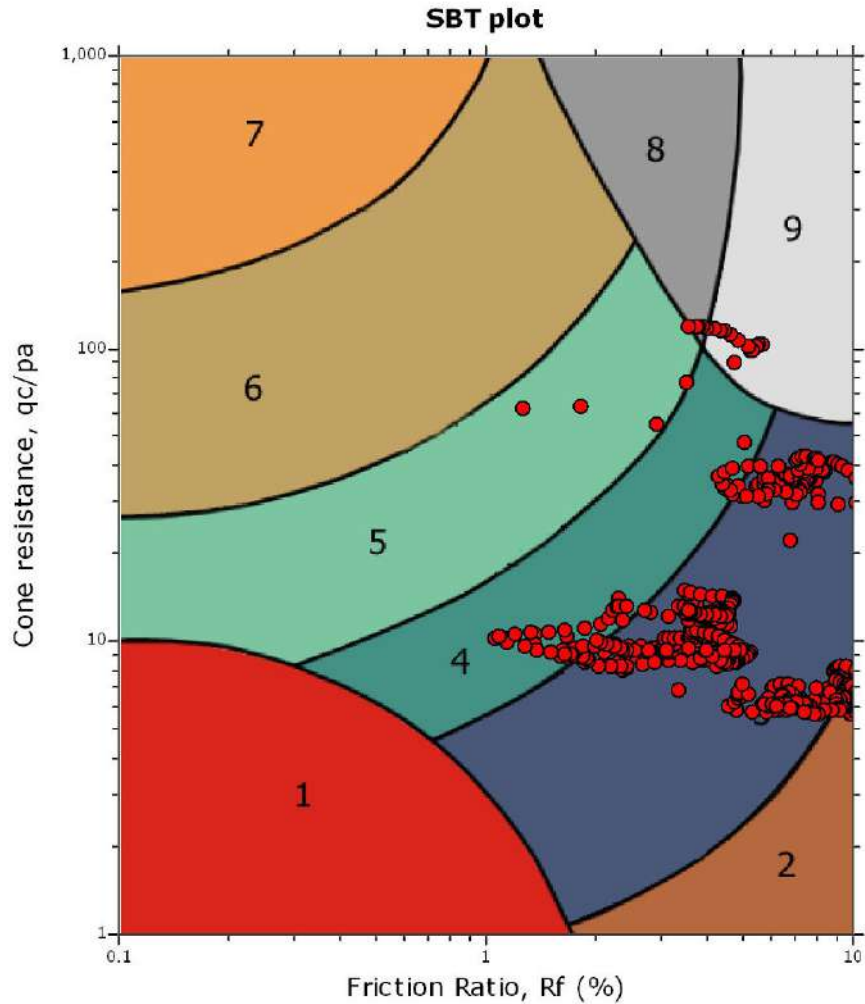


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



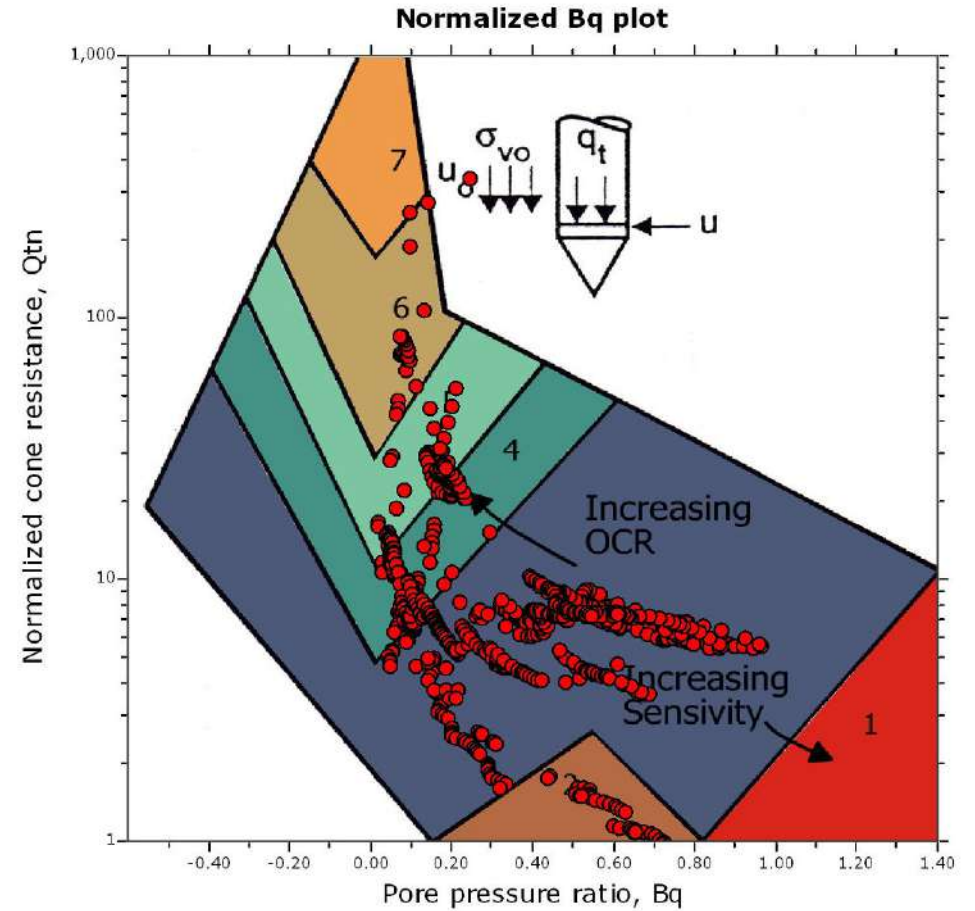
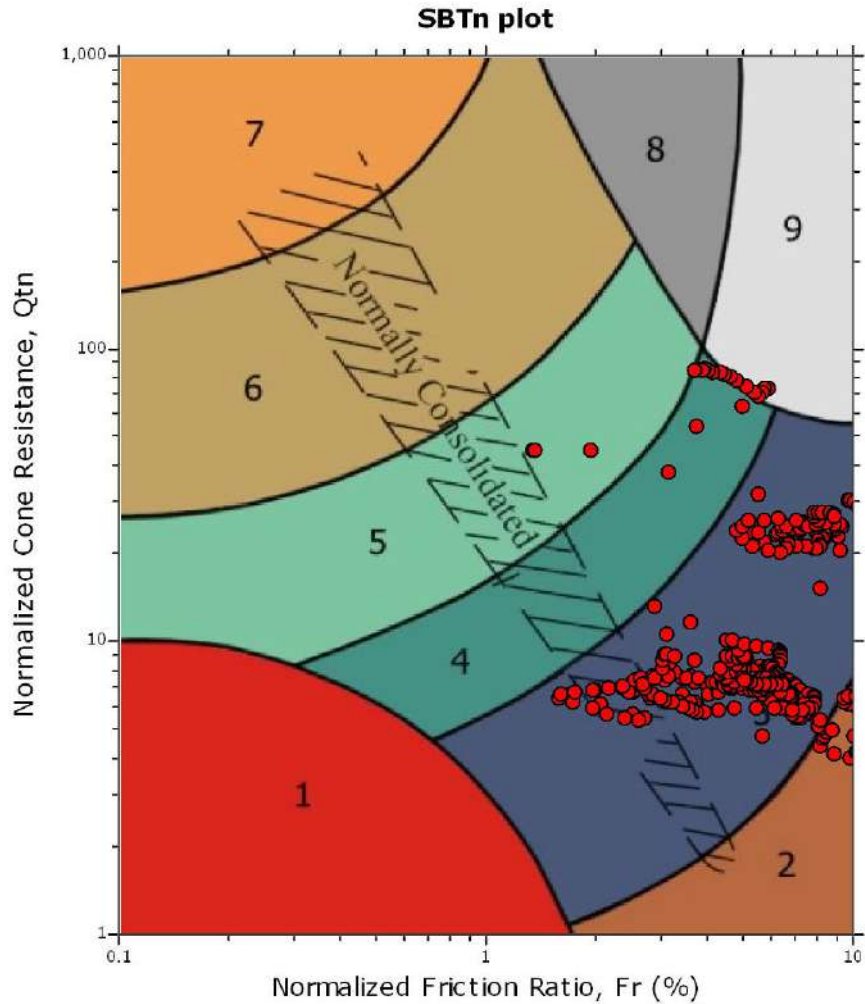
SBT - Bq plots



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 |

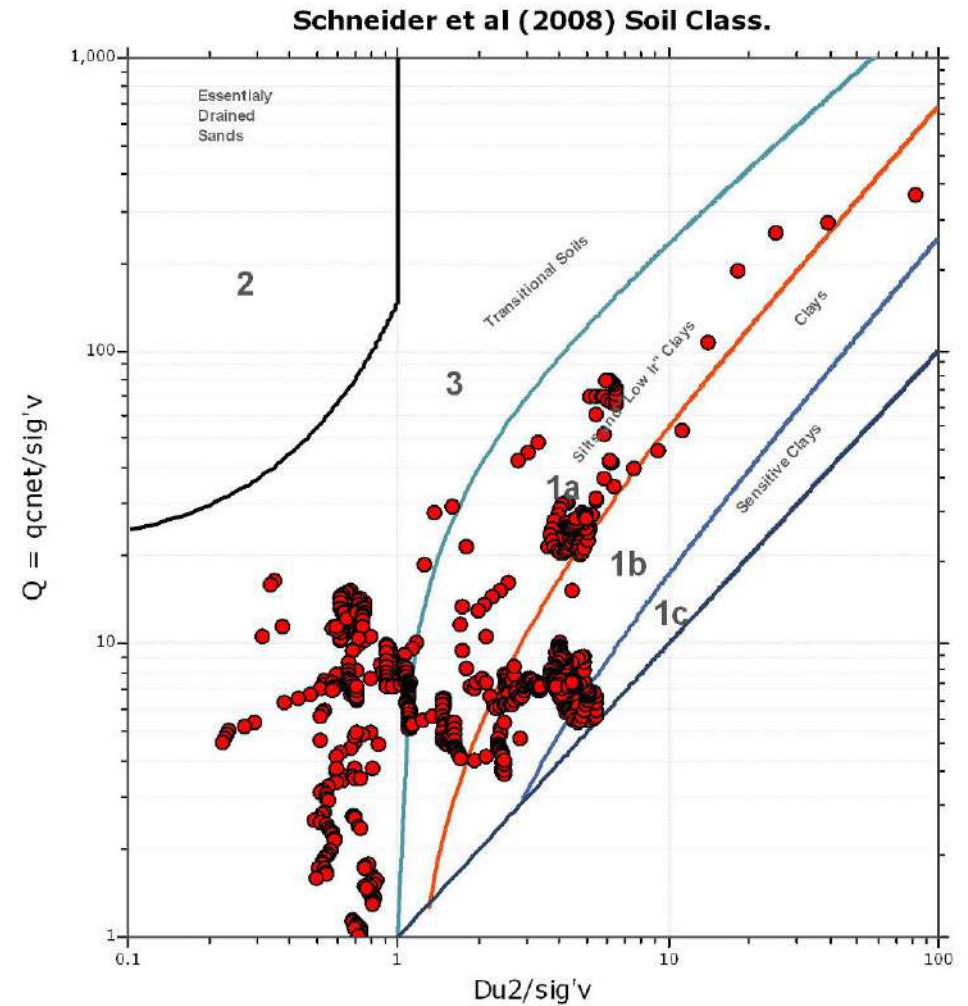
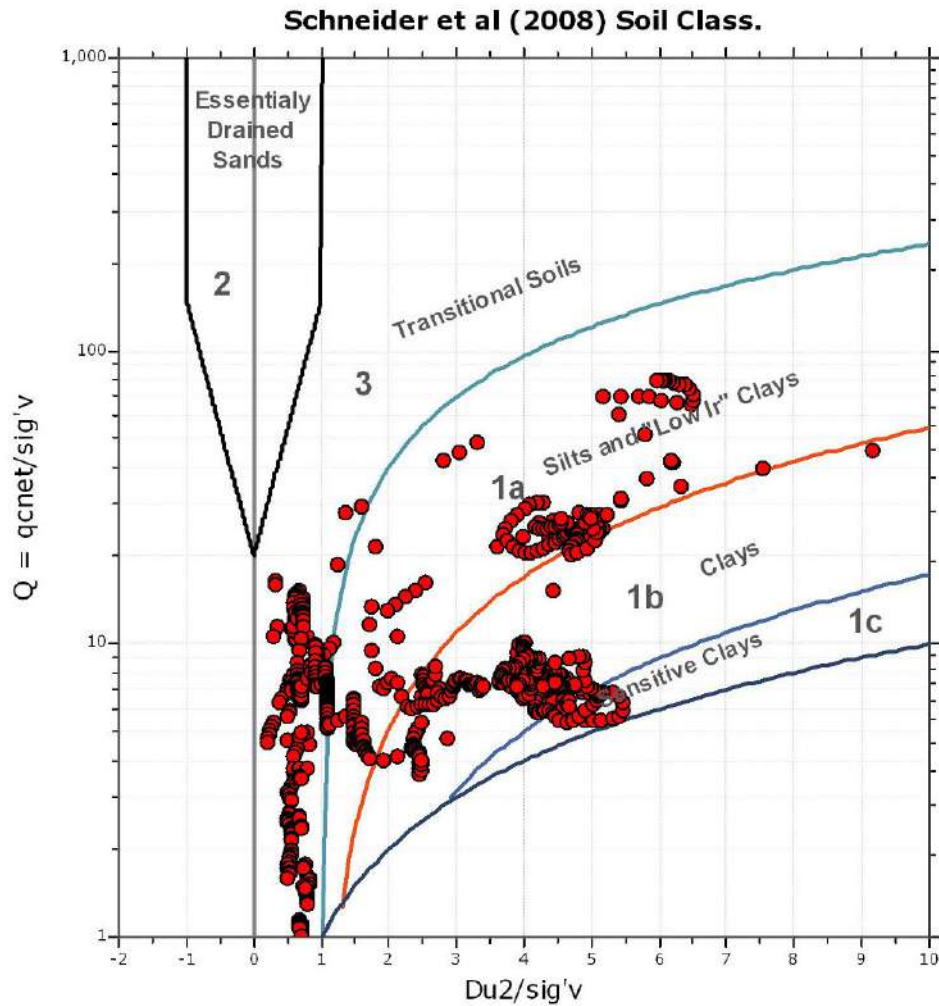
SBT - Bq plots (normalized)

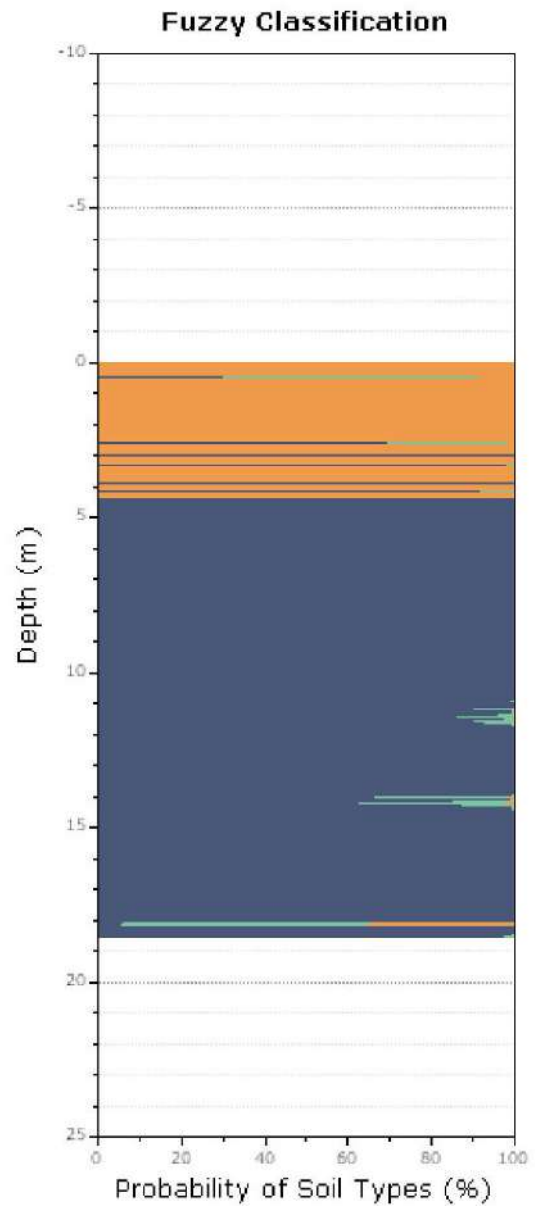
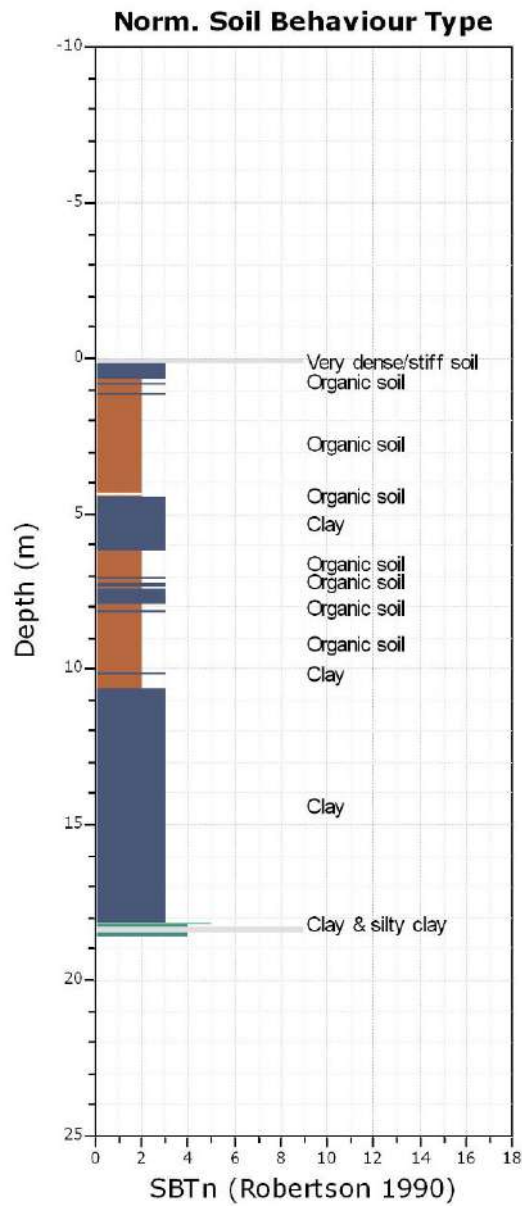


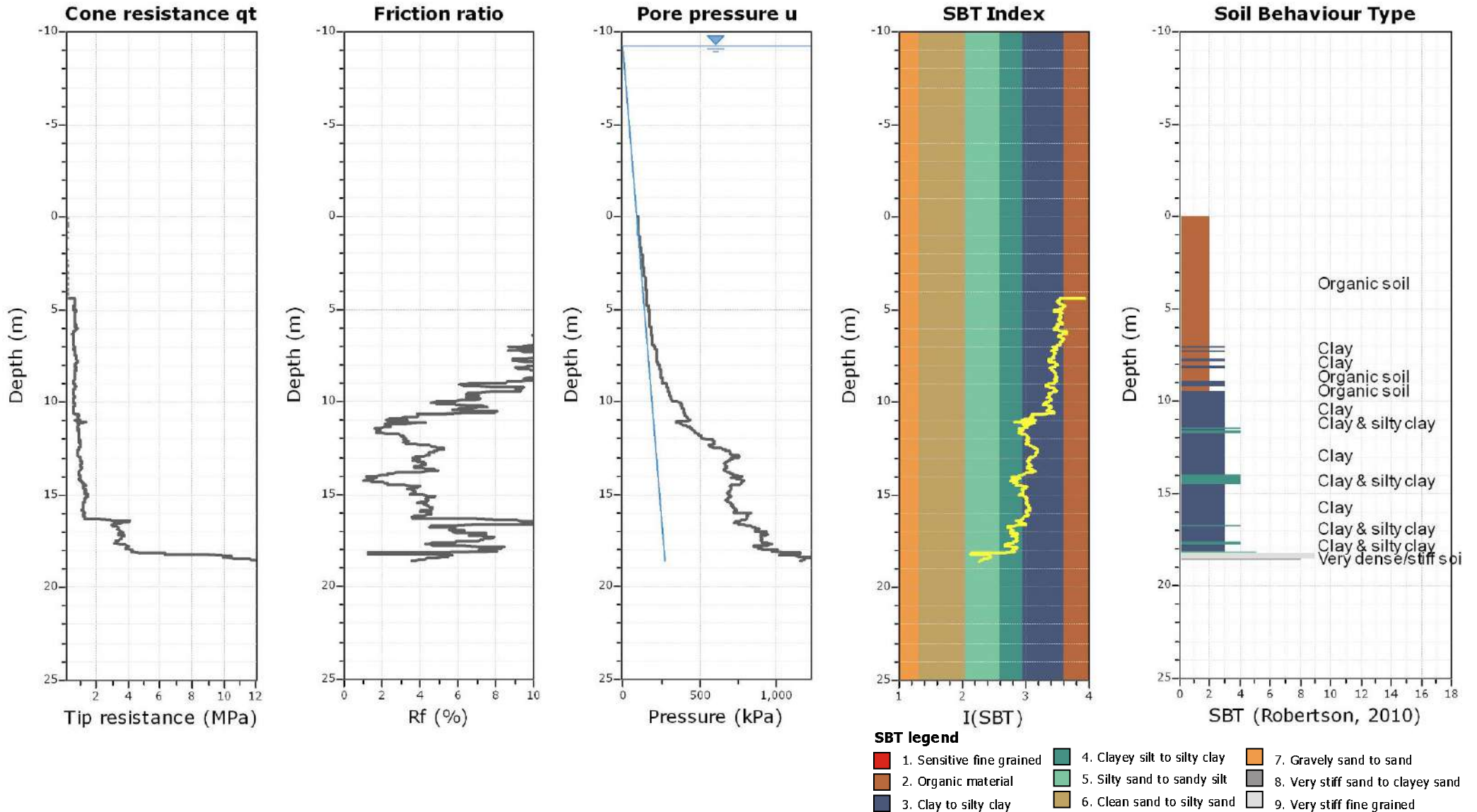
SBTn legend

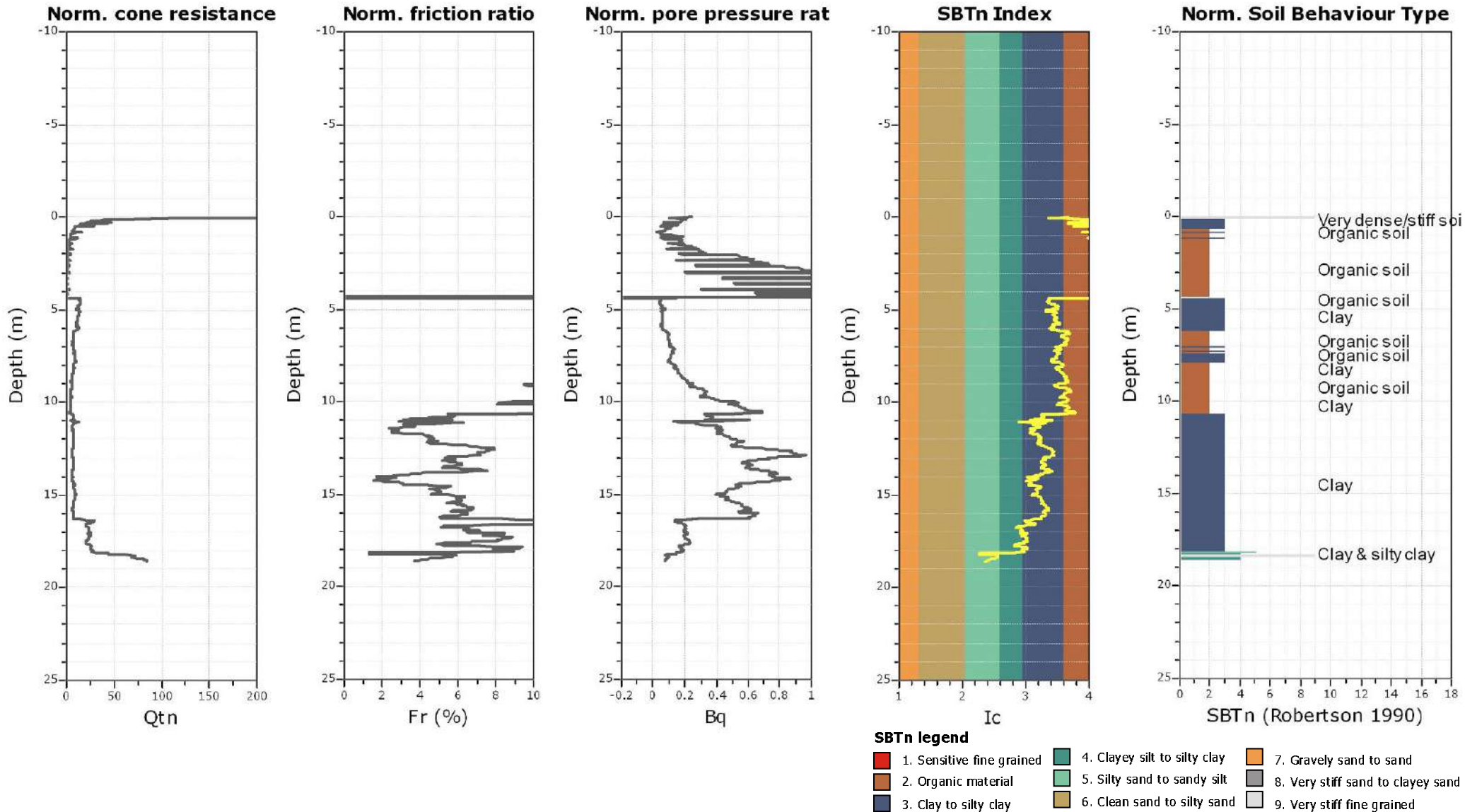
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

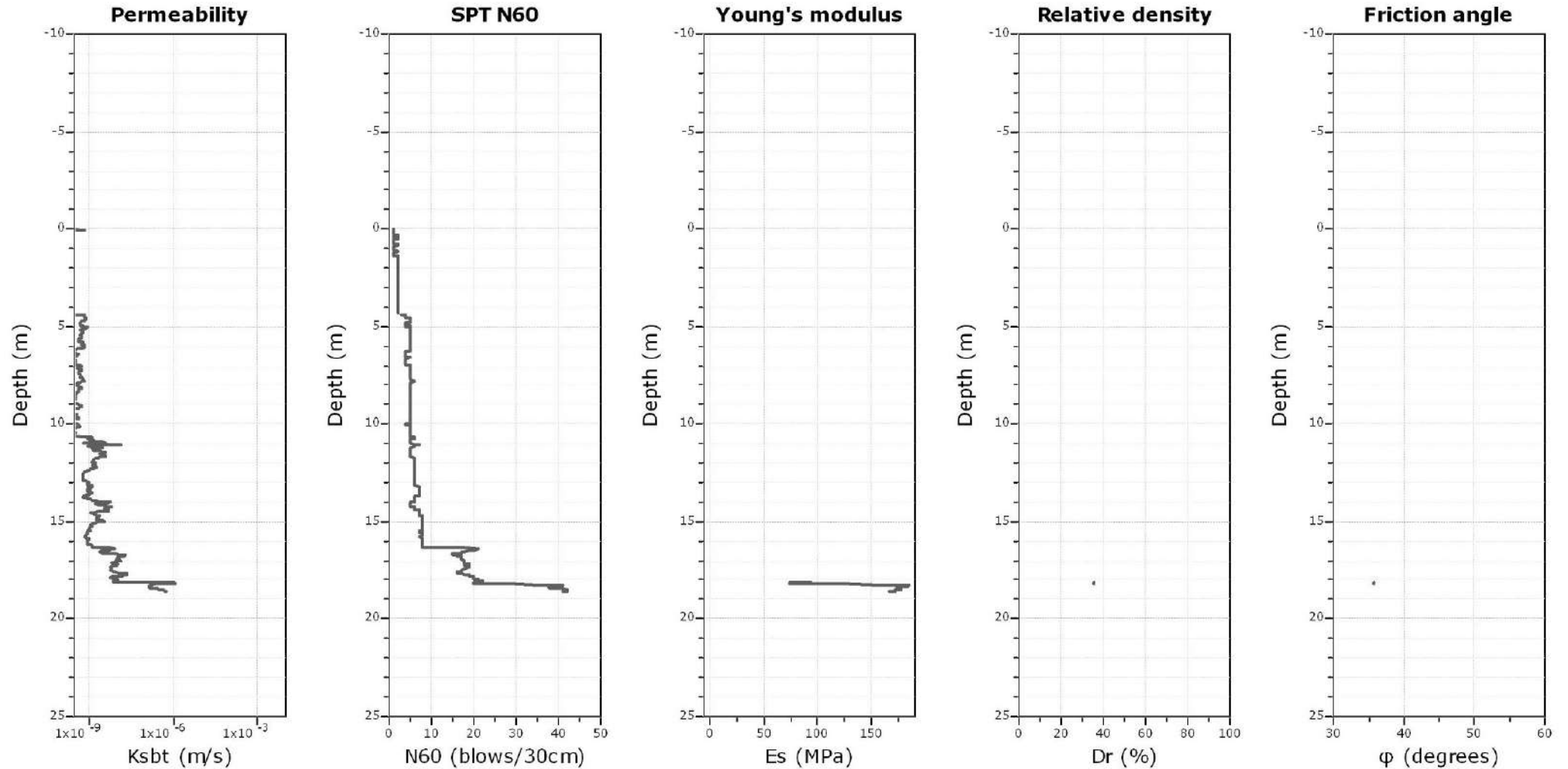
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

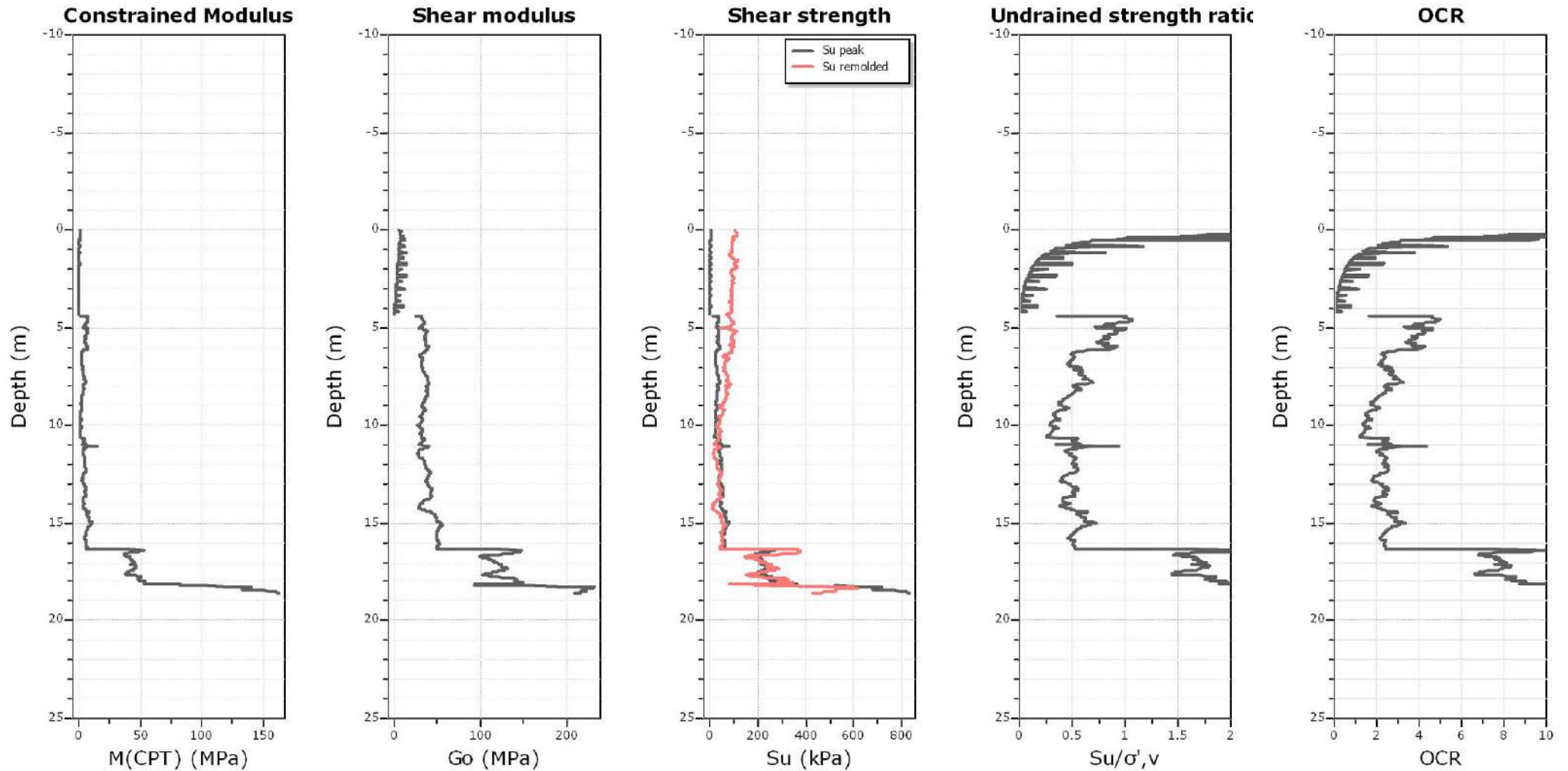
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative desnisty constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

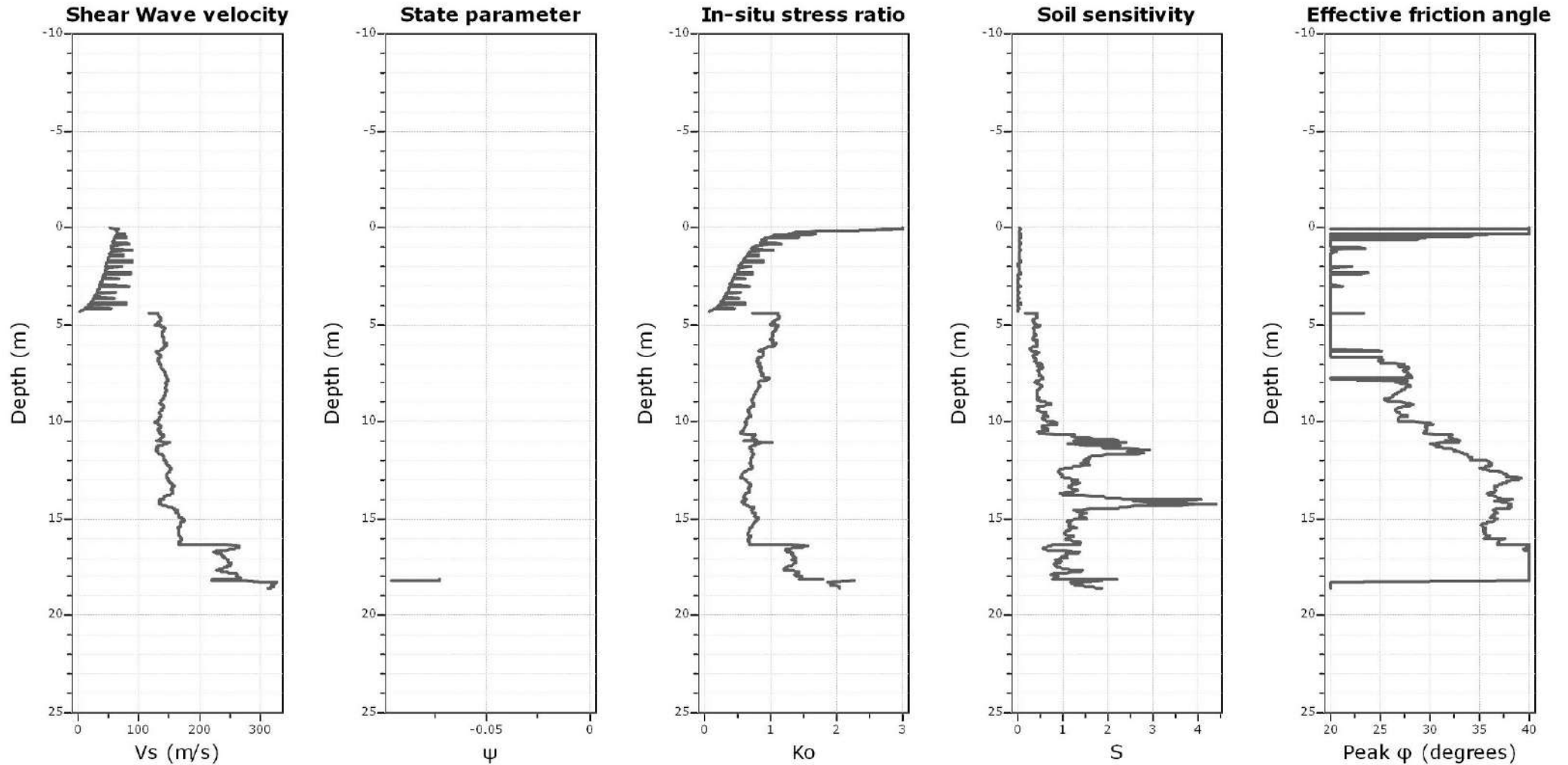
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

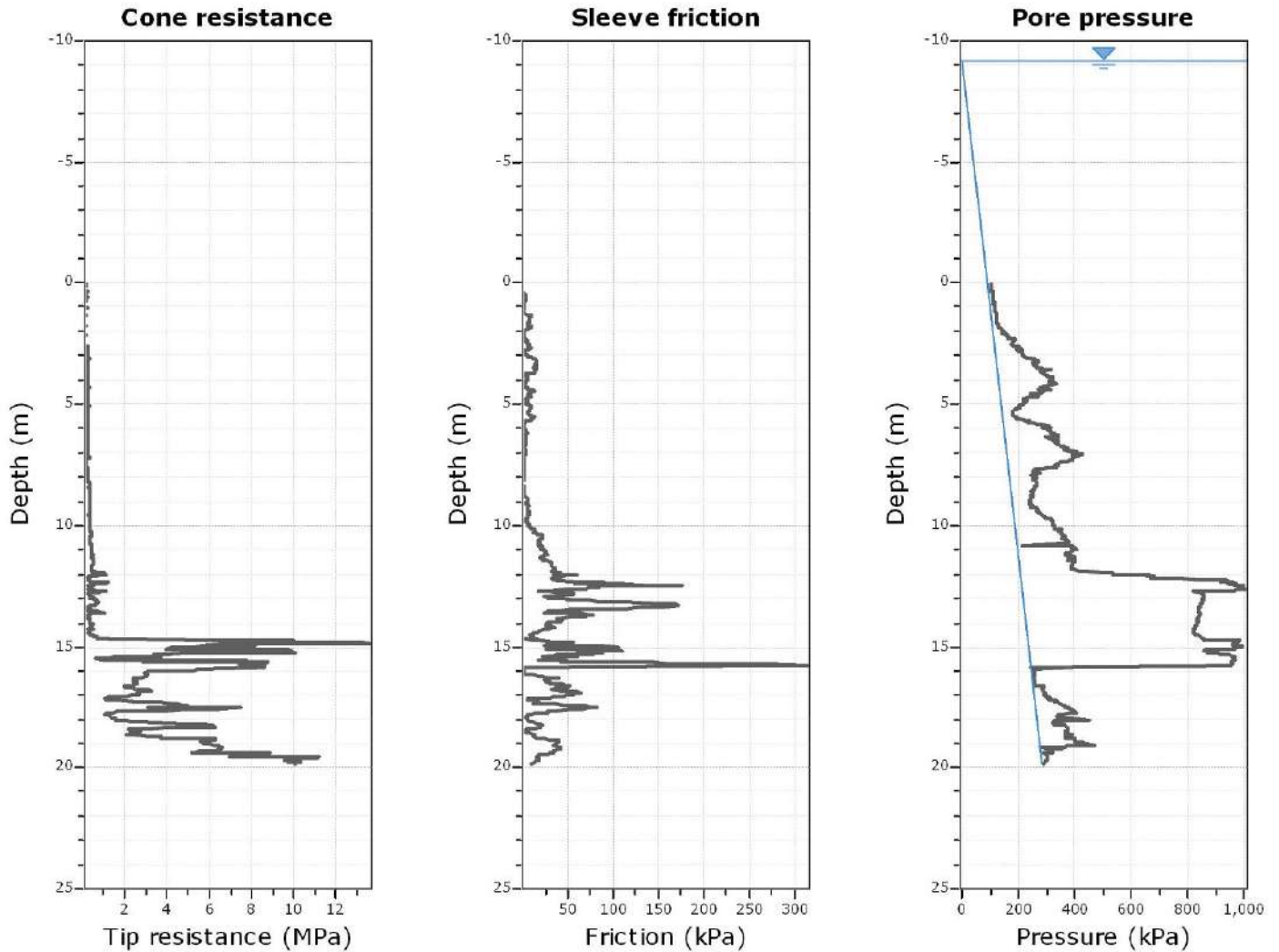
● — User defined estimation data



Calculation parameters

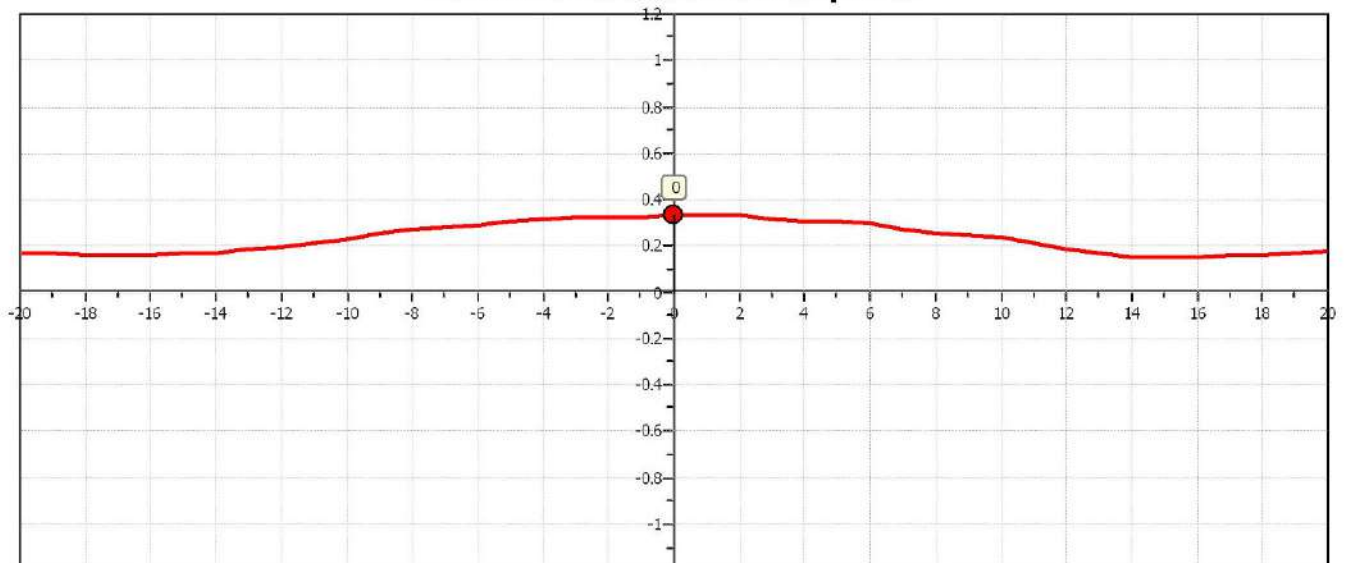
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

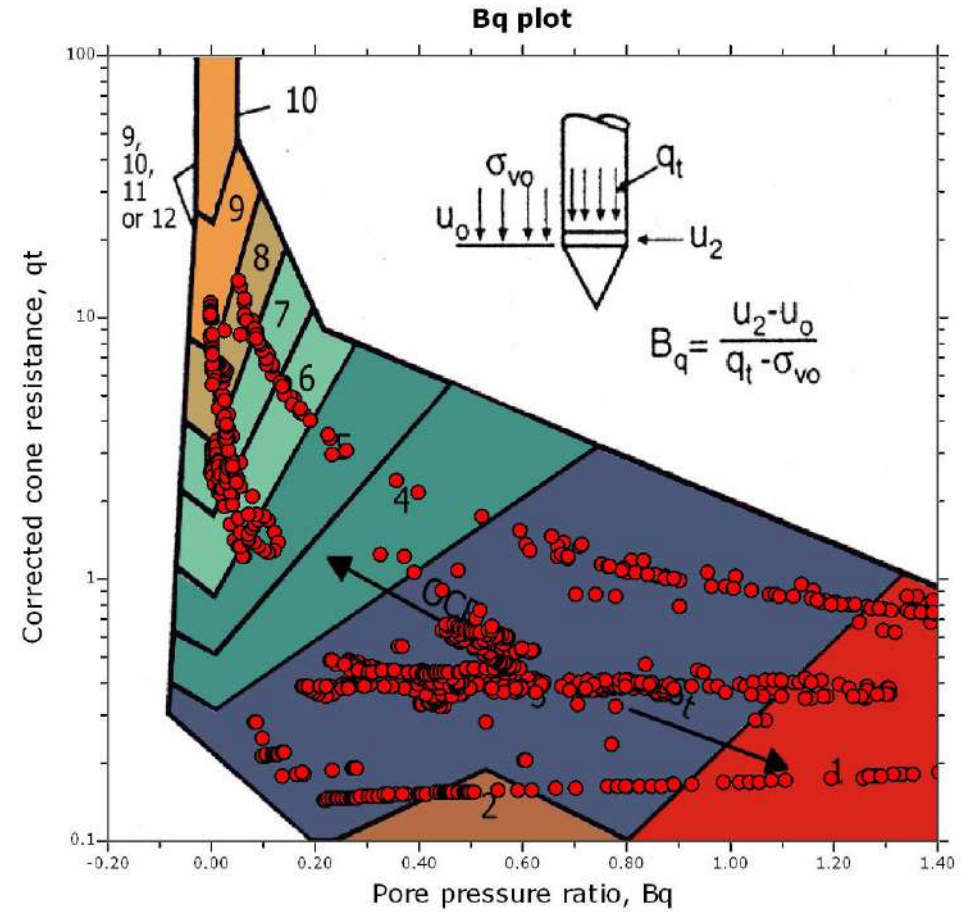
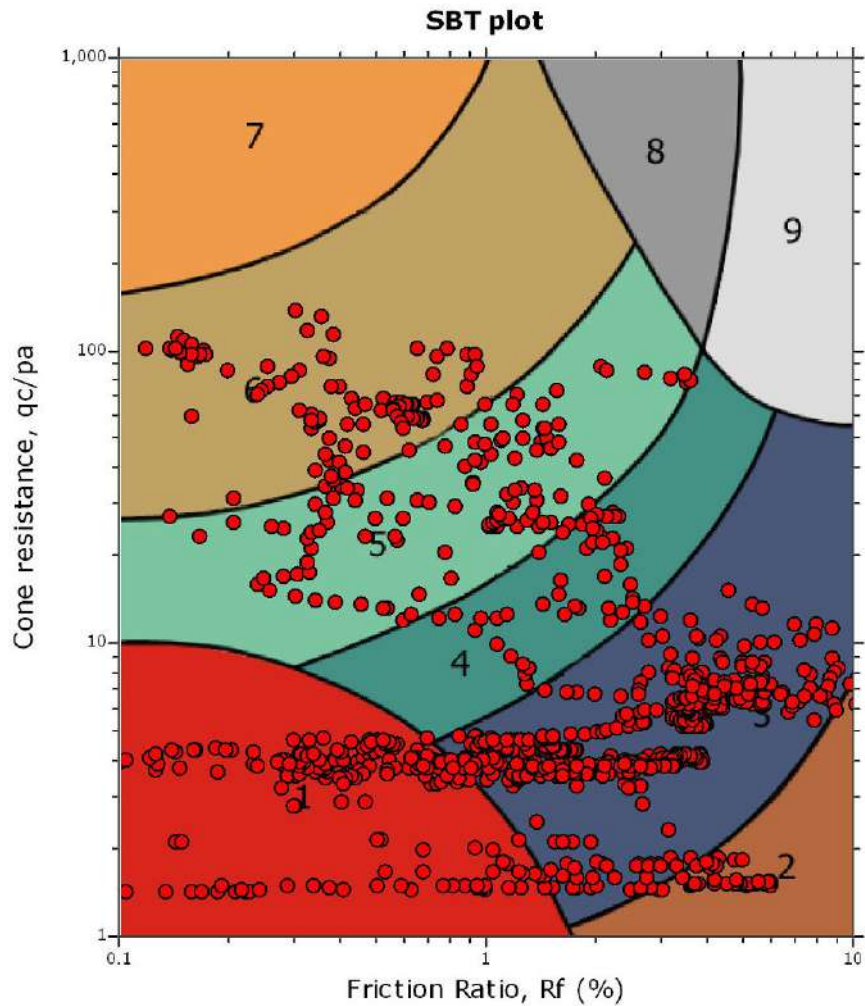


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



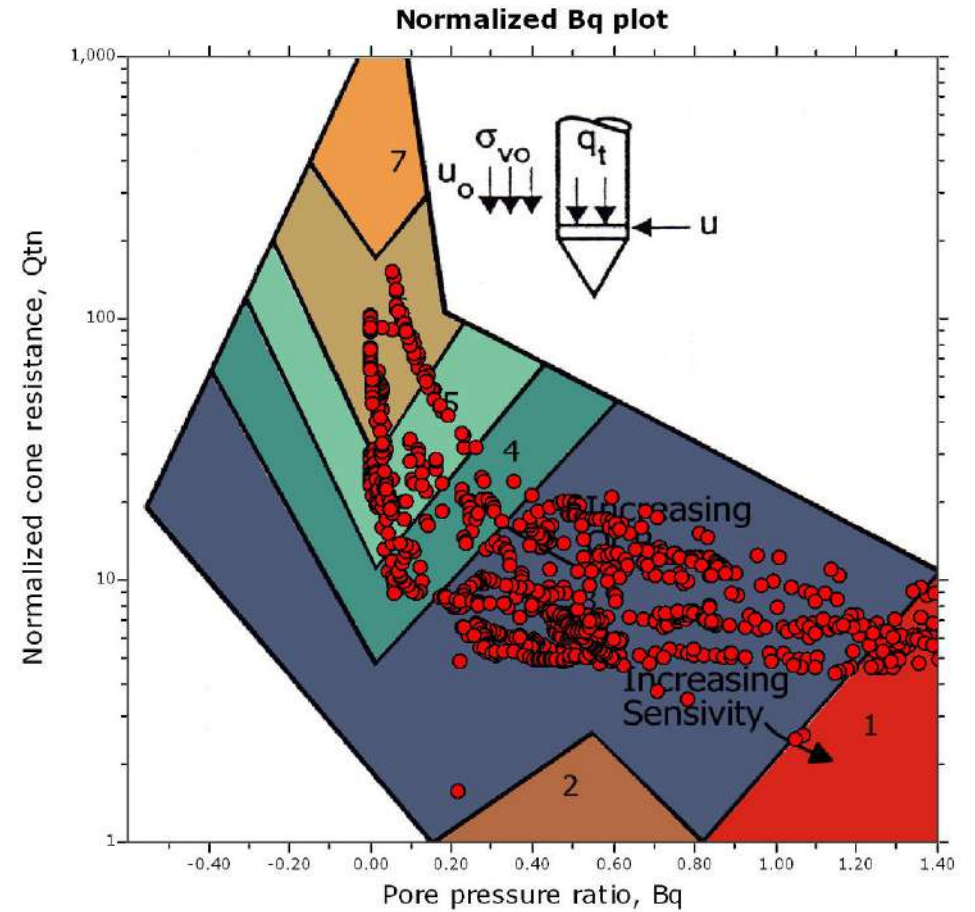
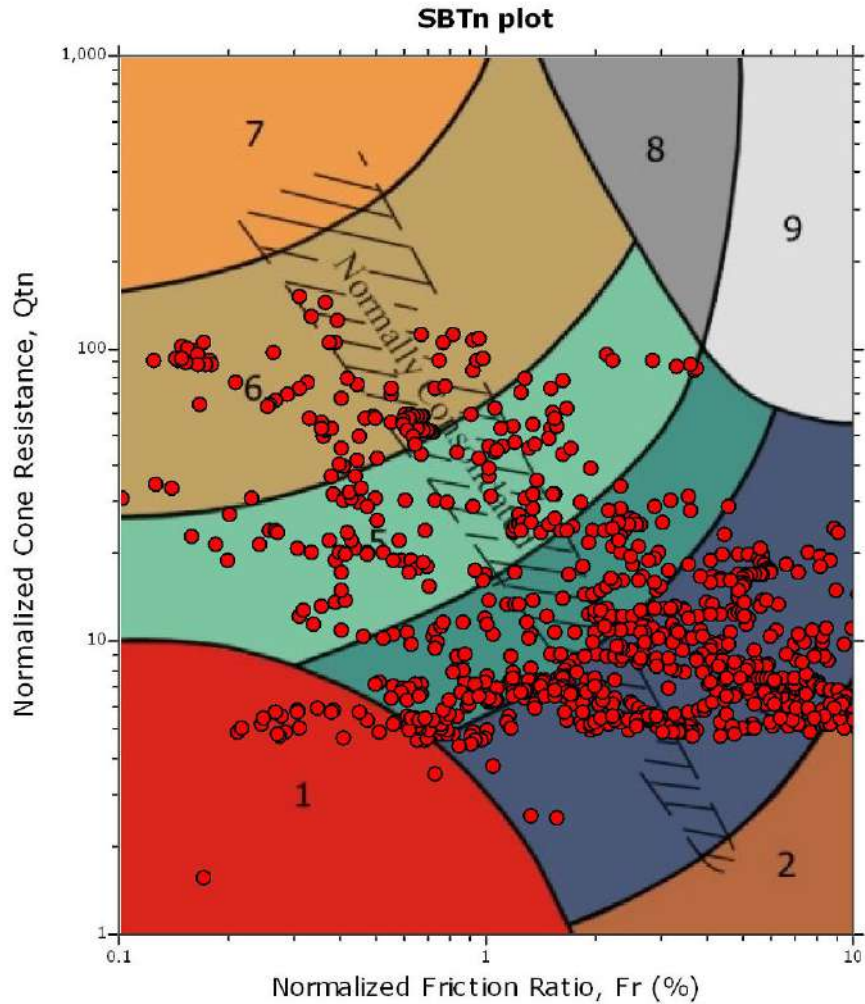
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

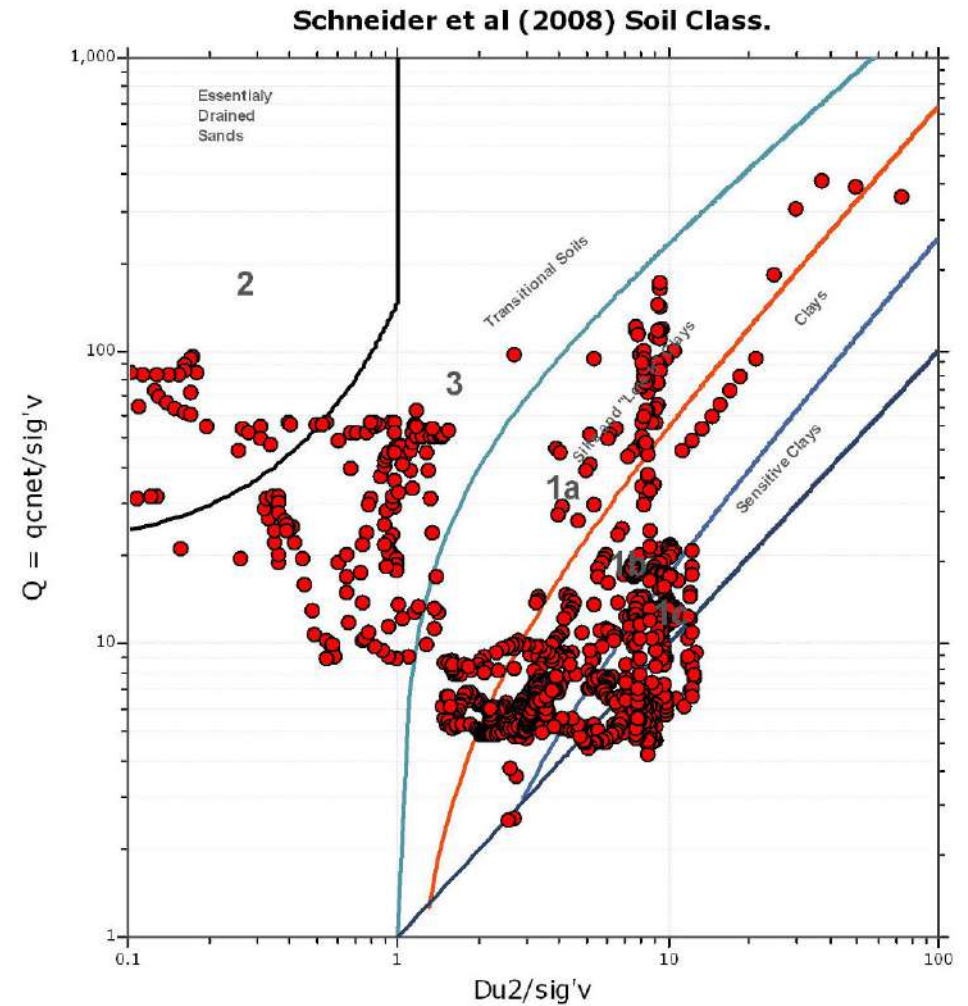
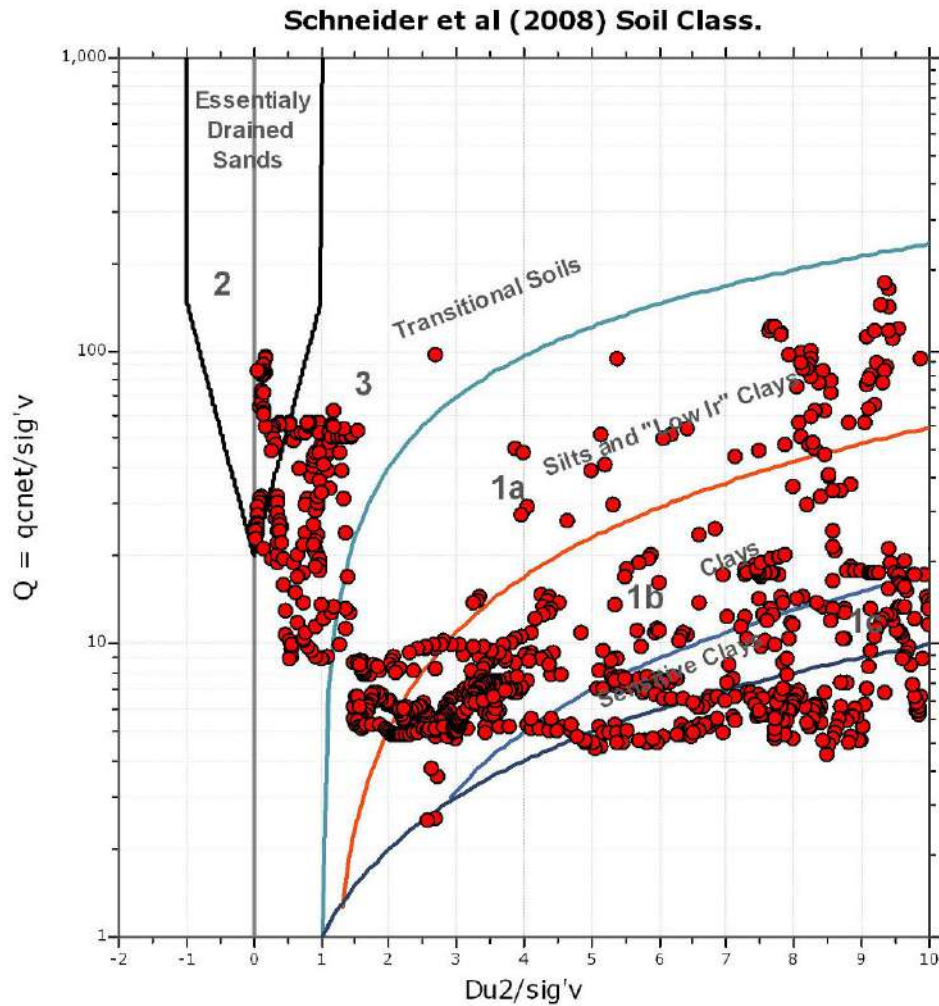
SBT - Bq plots (normalized)

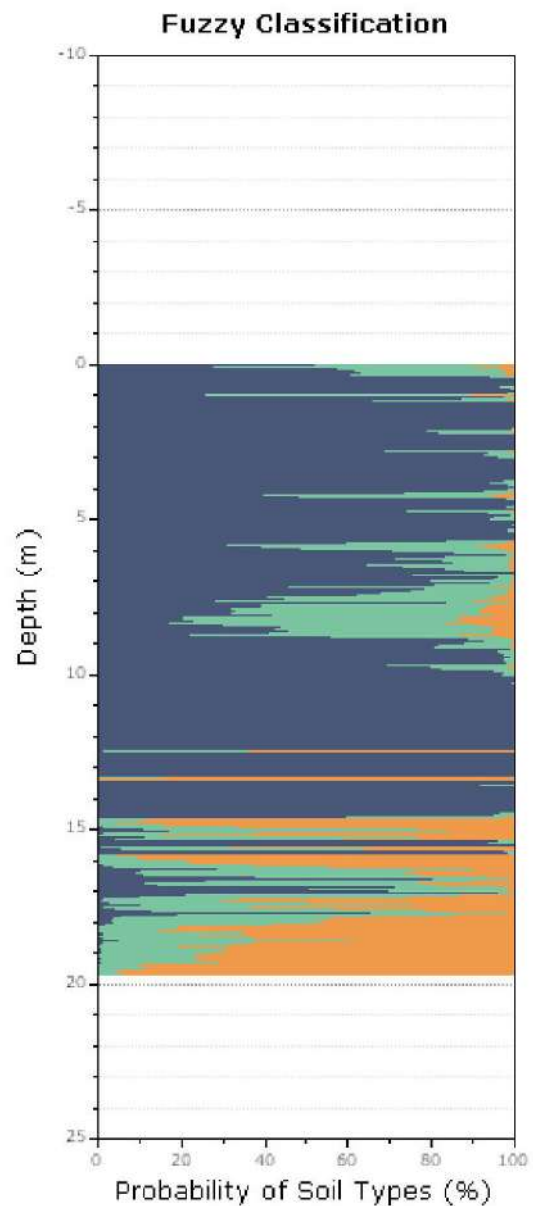
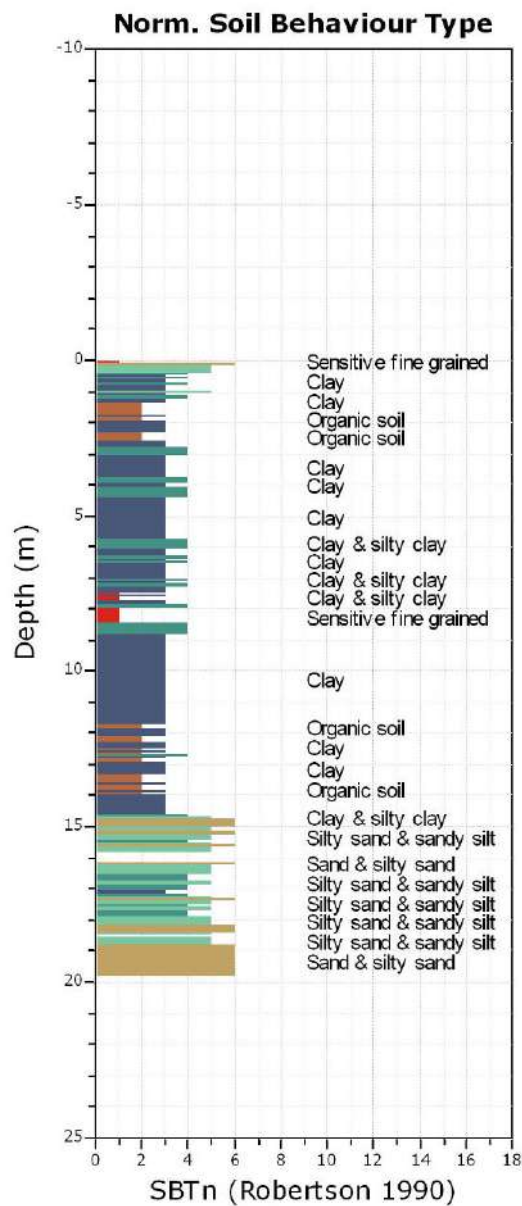


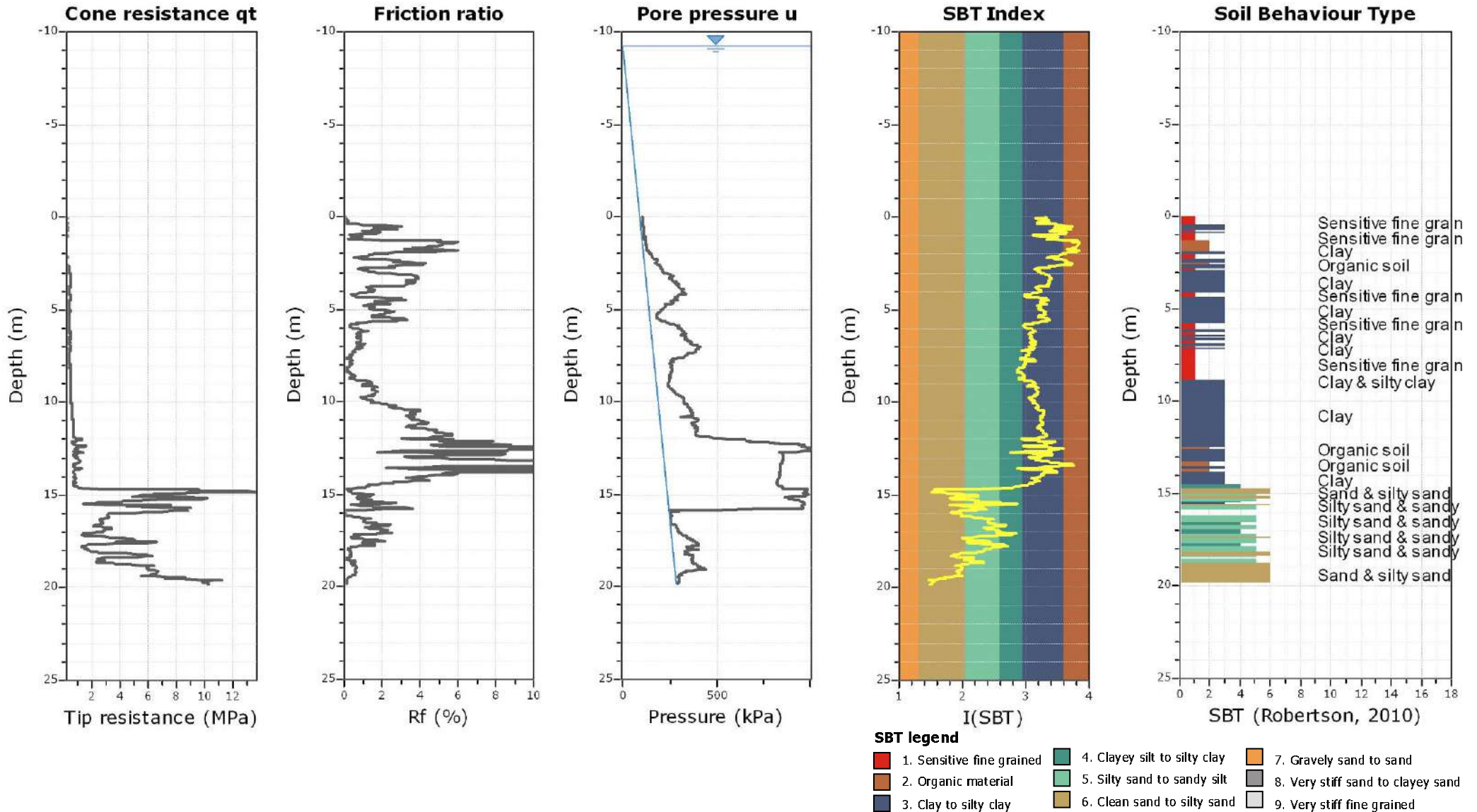
SBTn legend

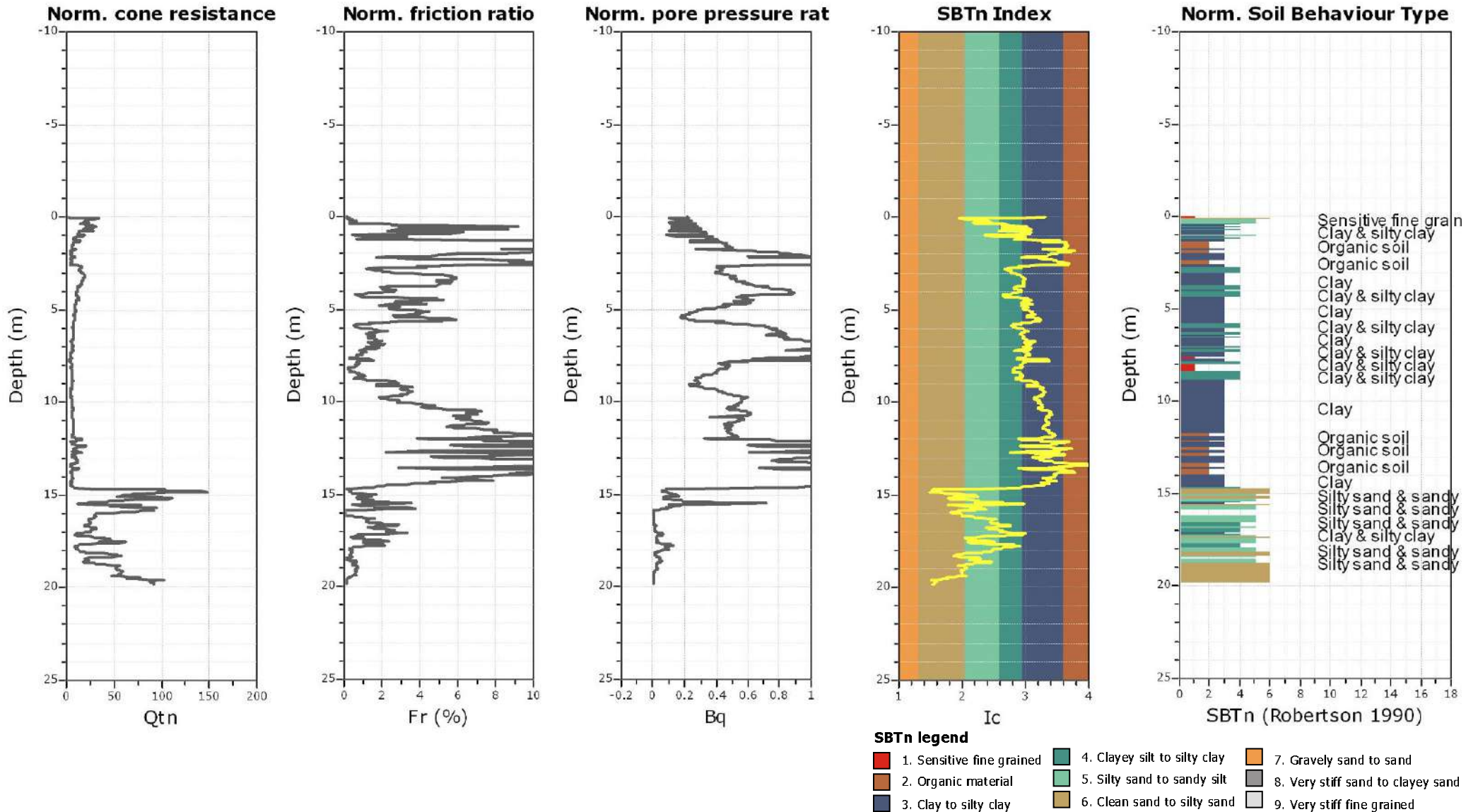
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

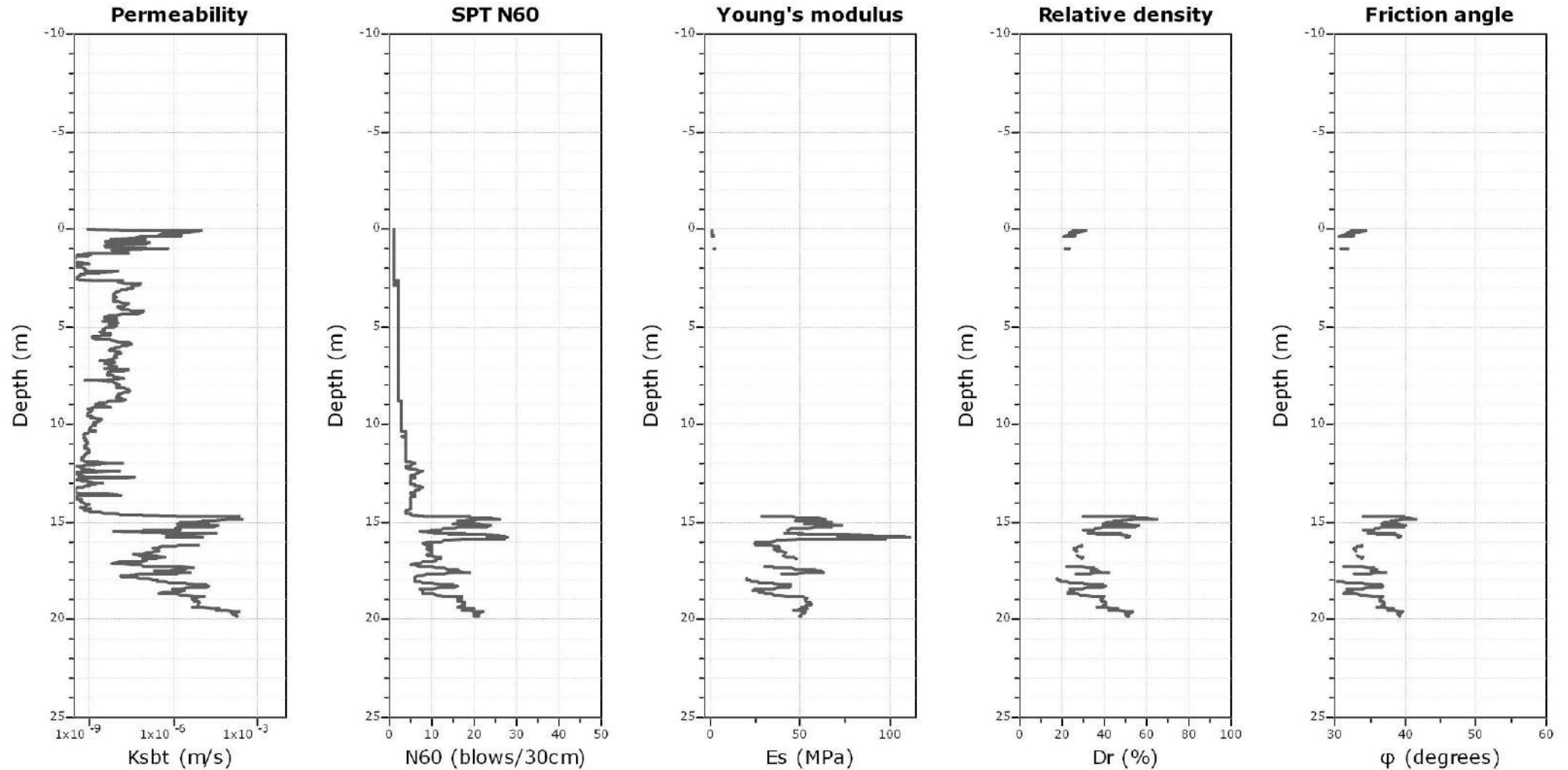
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

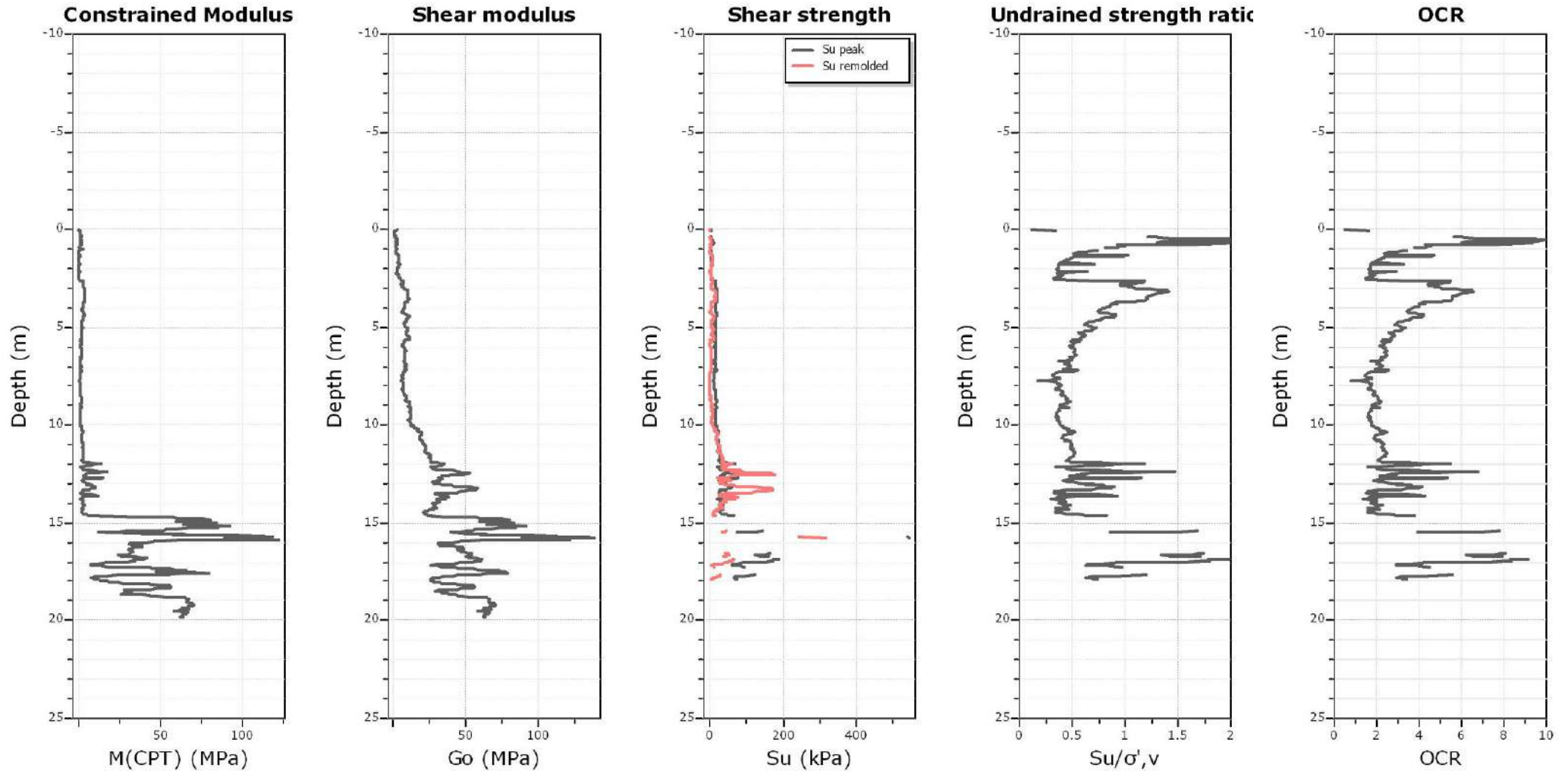
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative desnisty constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

●— User defined estimation data



Calculation parameters

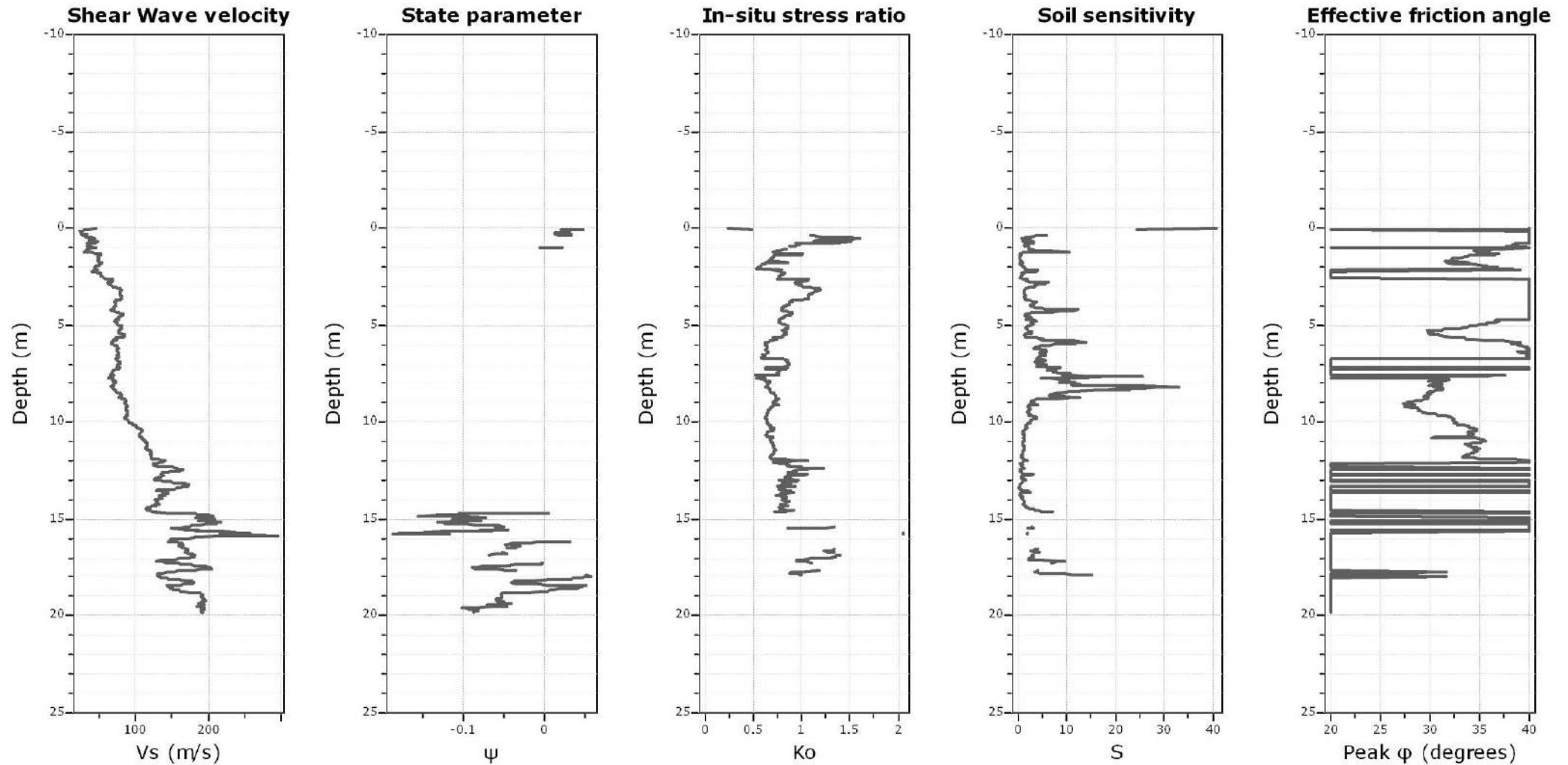
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

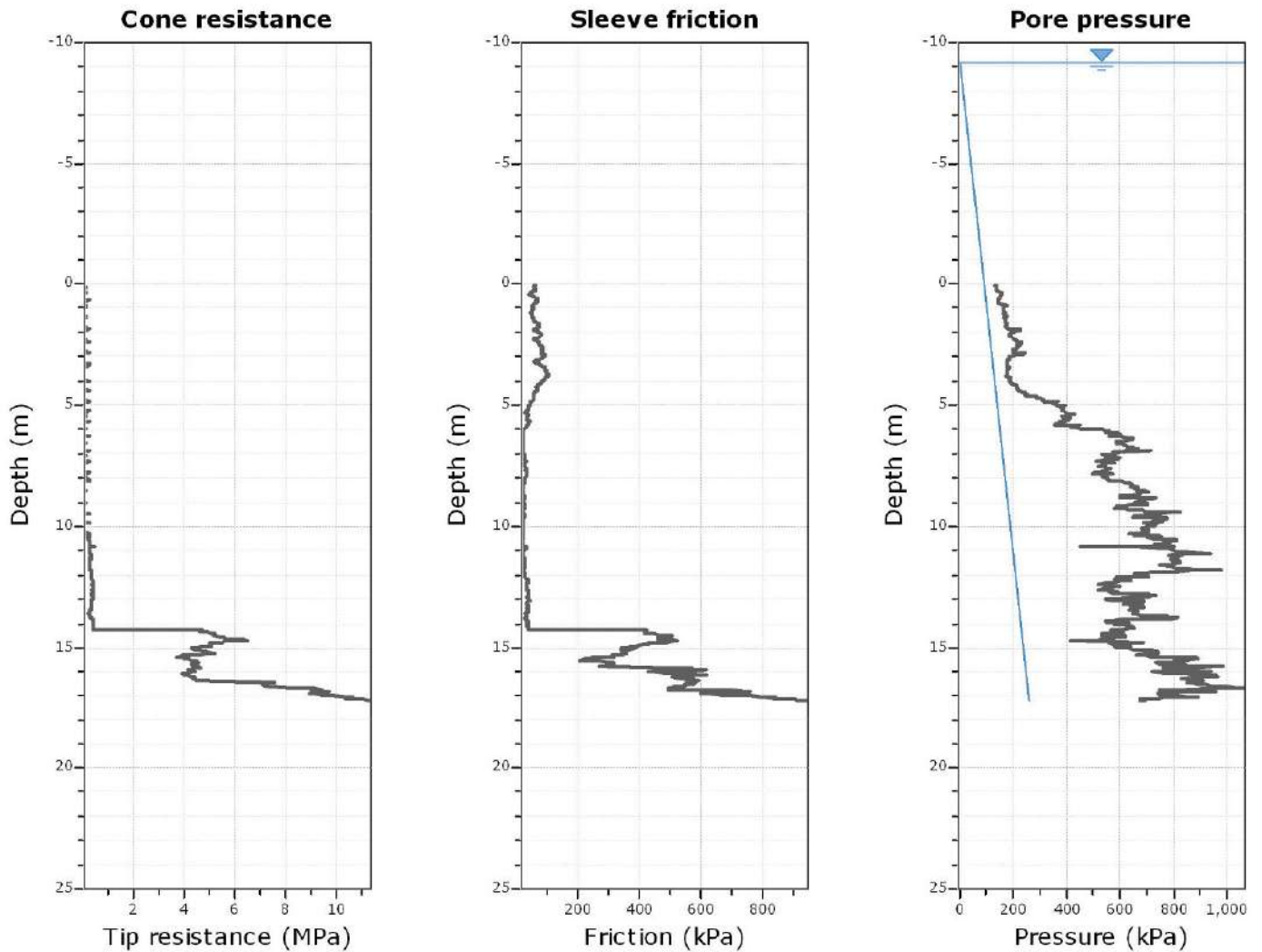
● — User defined estimation data



Calculation parameters

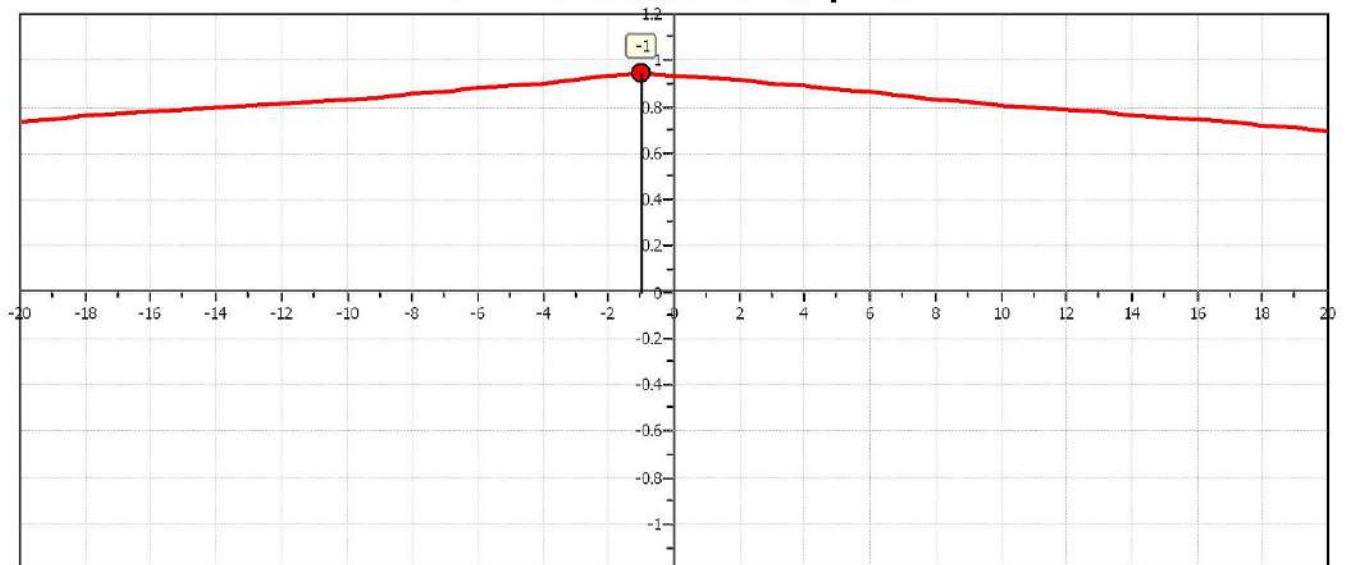
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

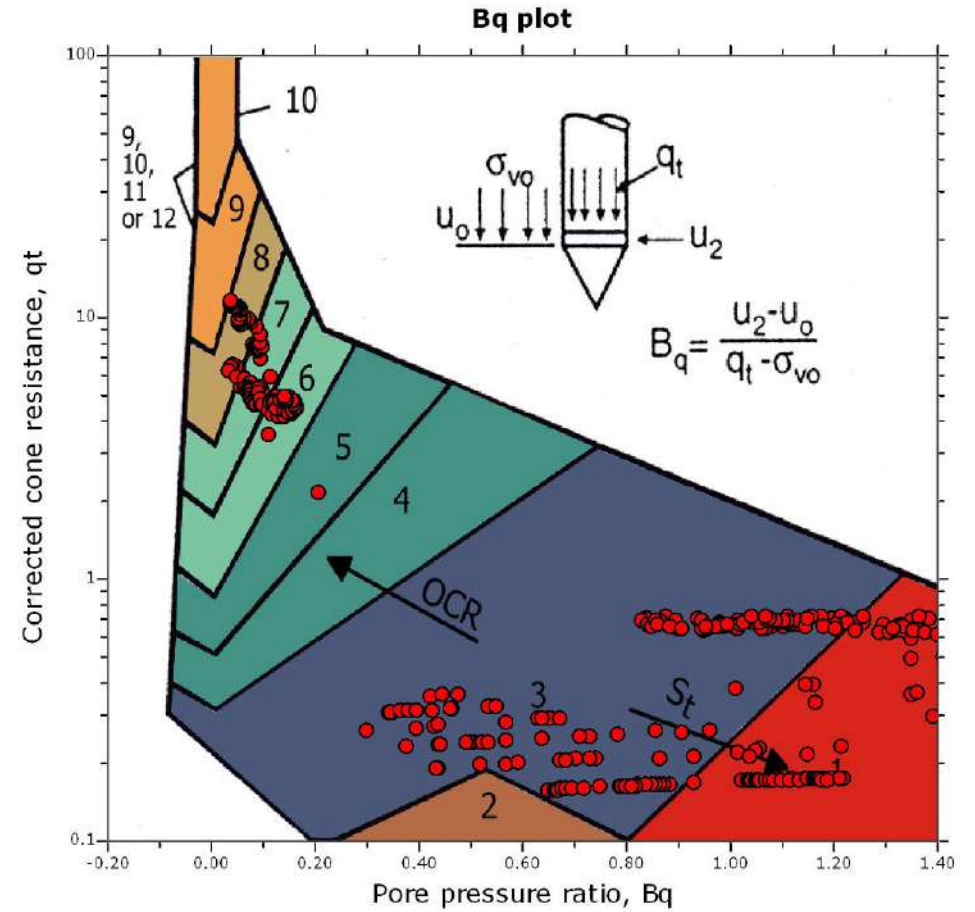
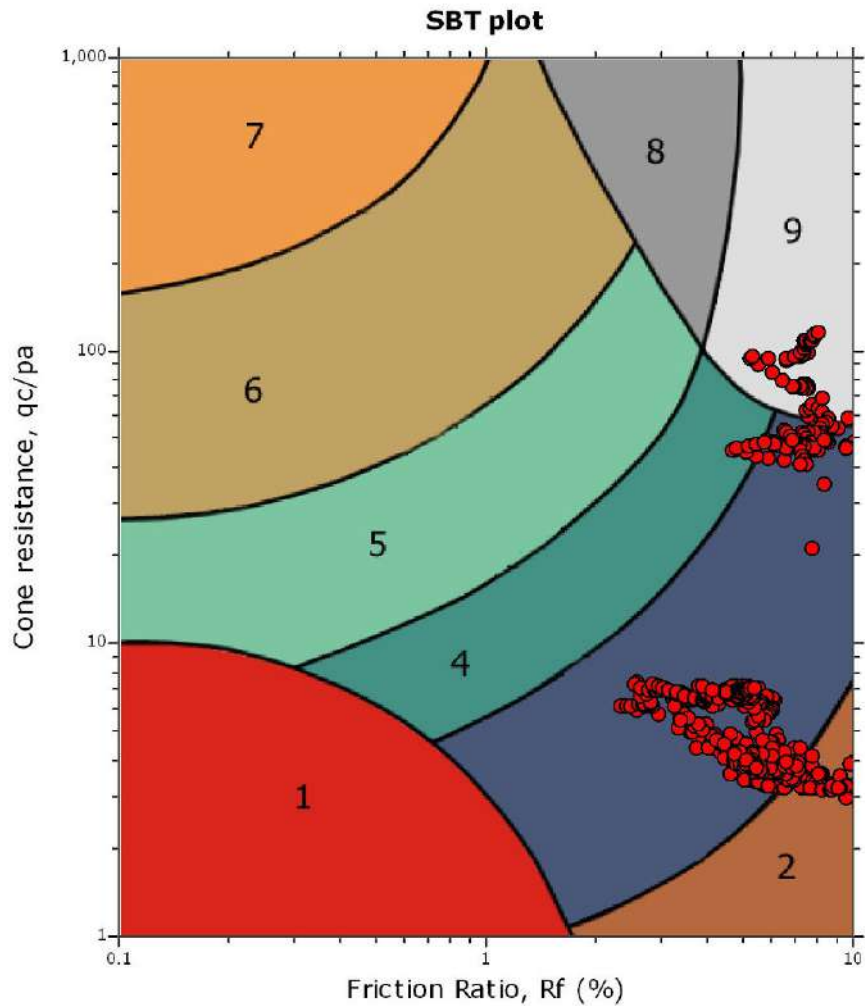


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



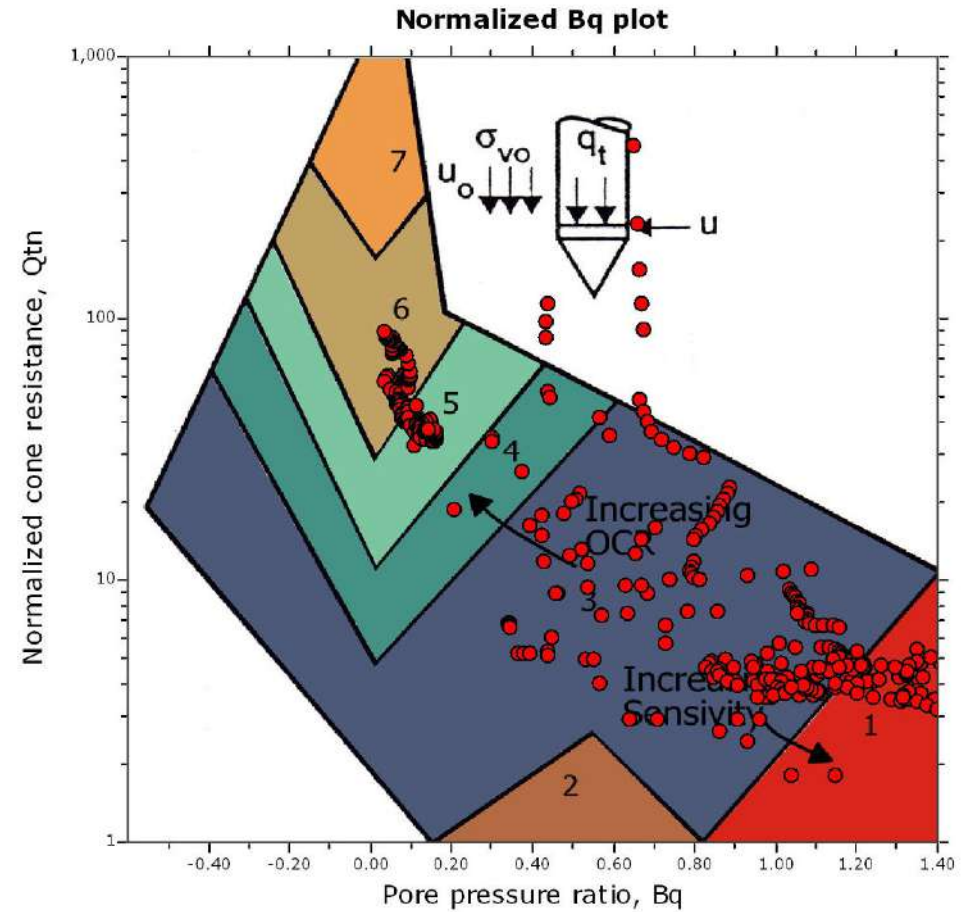
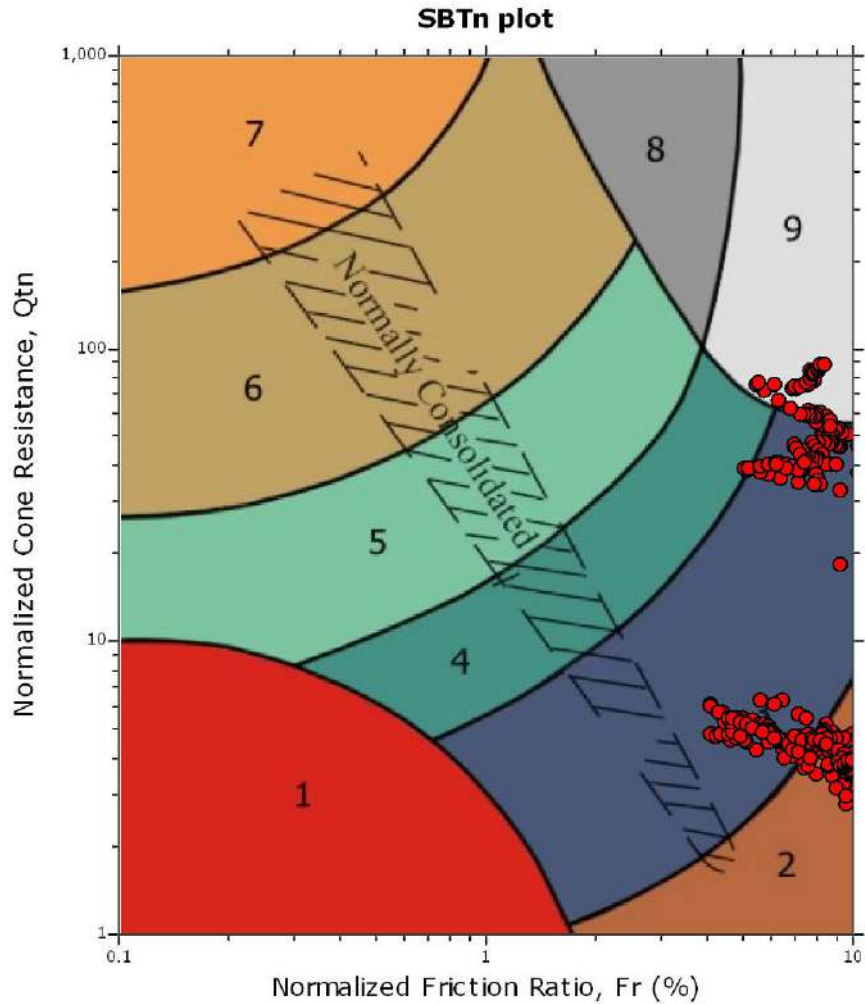
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

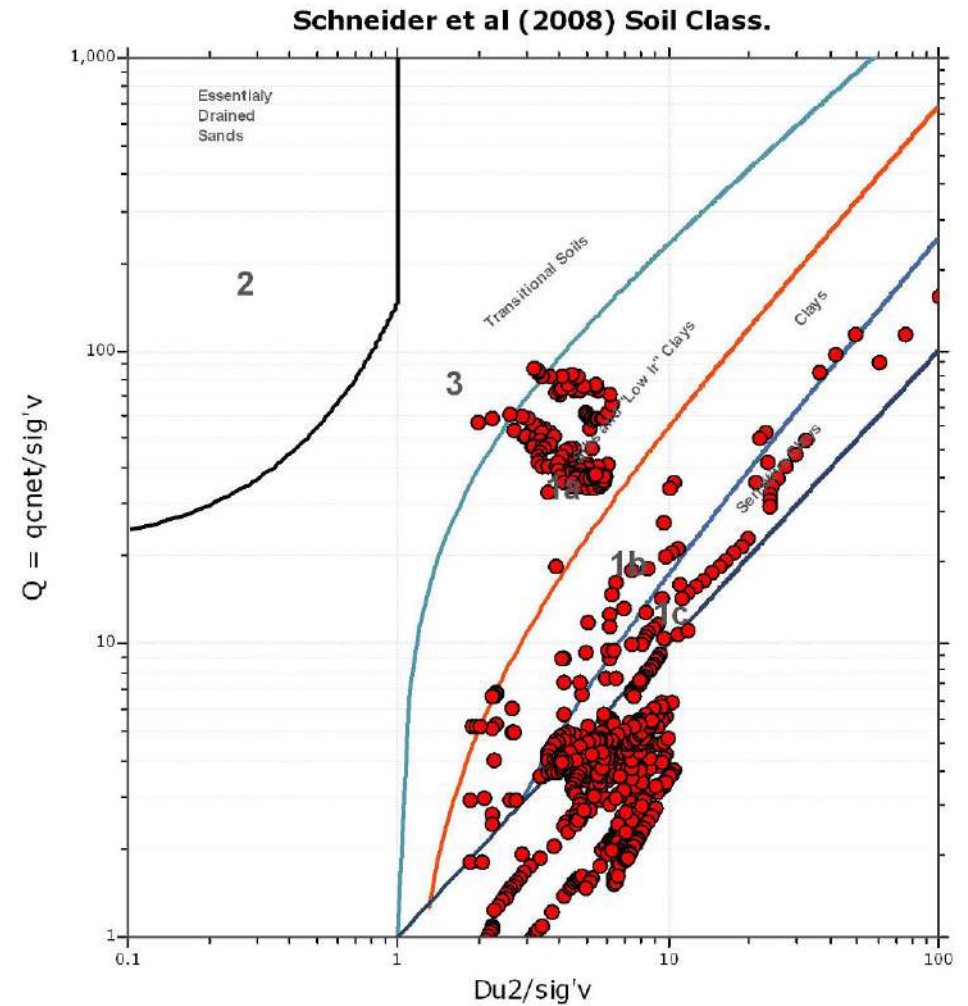
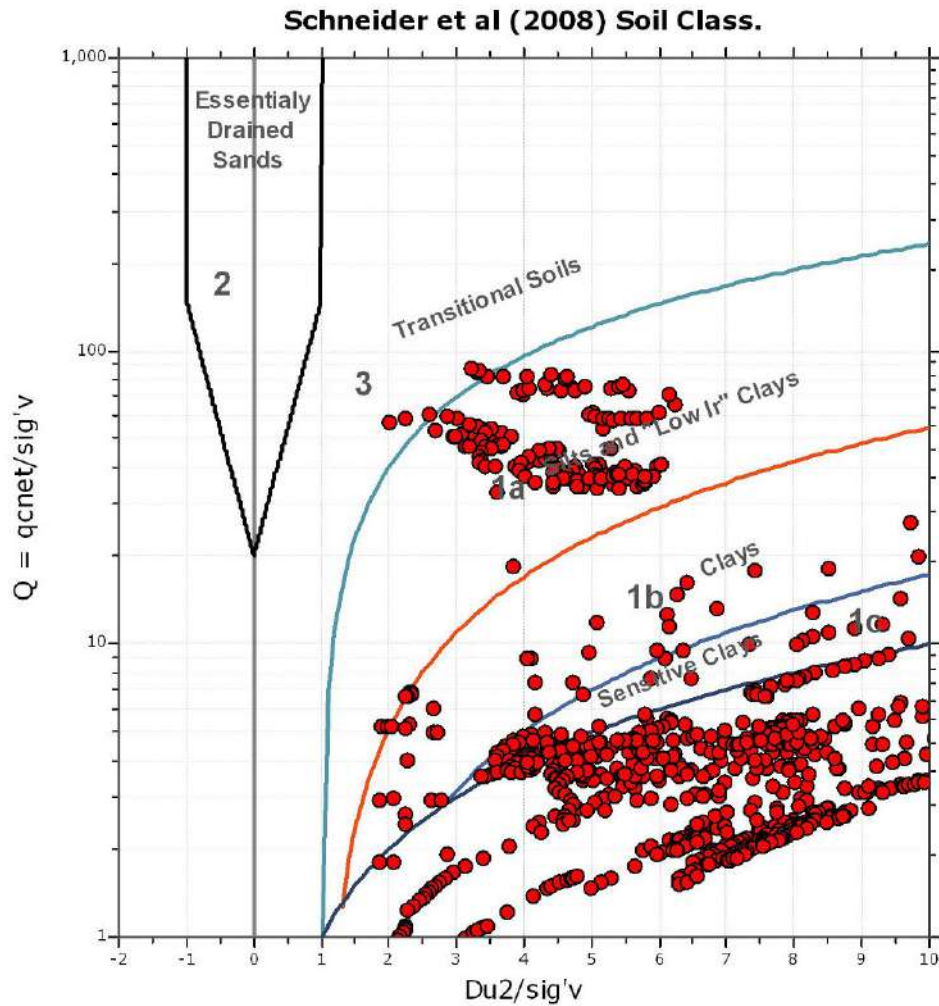
SBT - Bq plots (normalized)

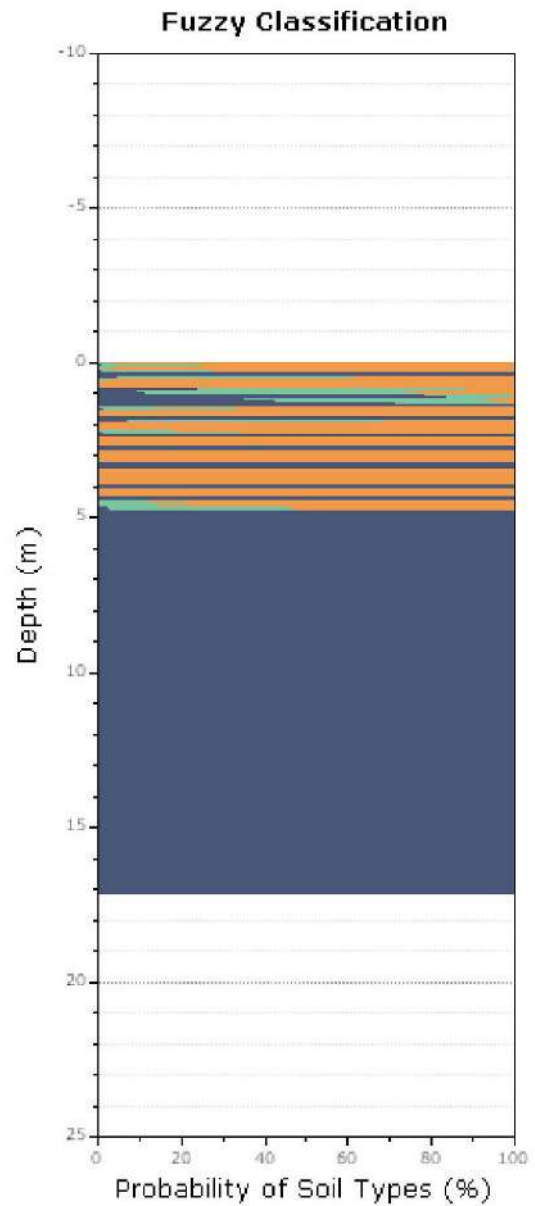
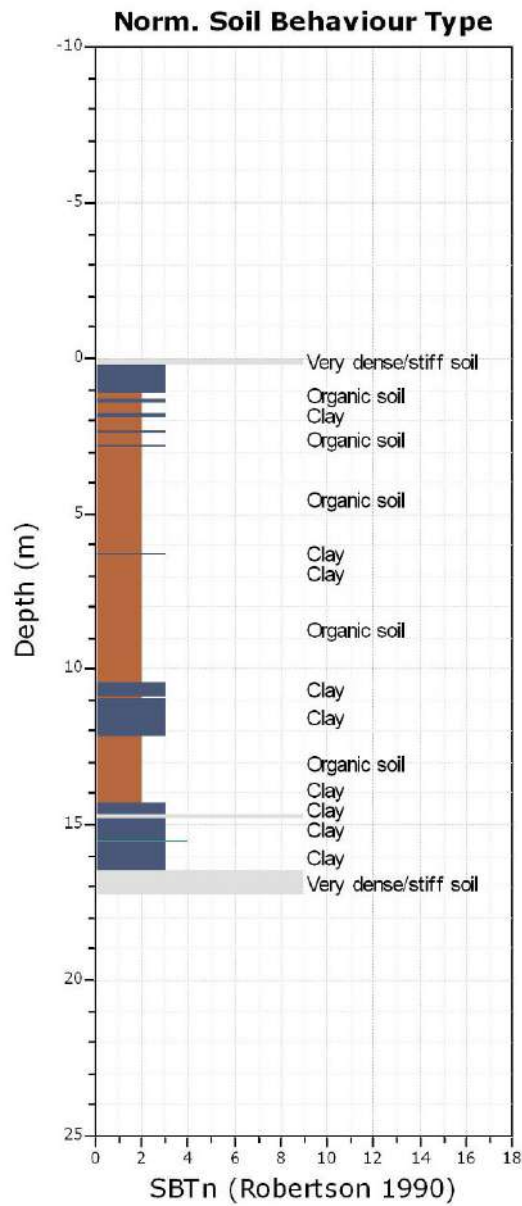


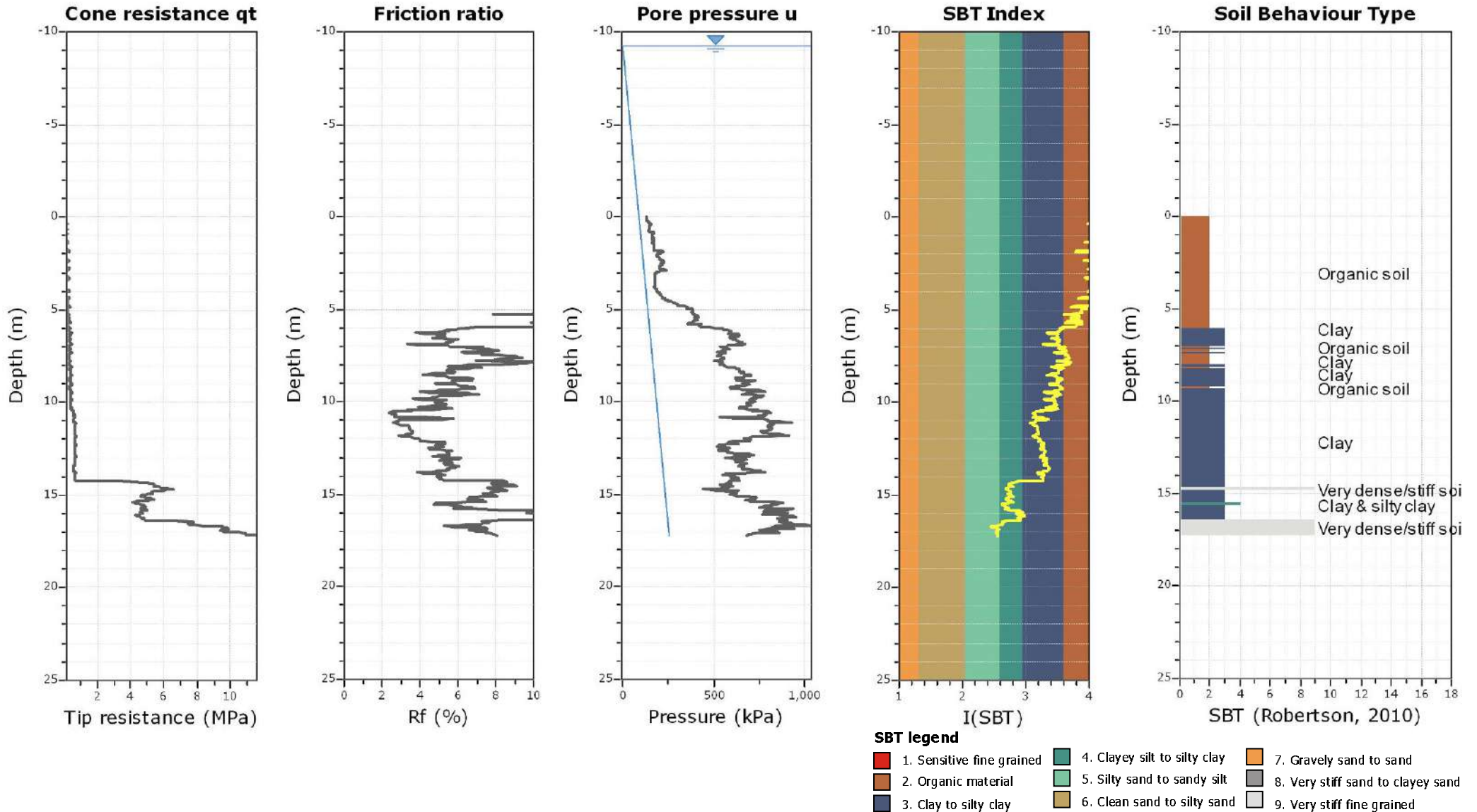
SBTn legend

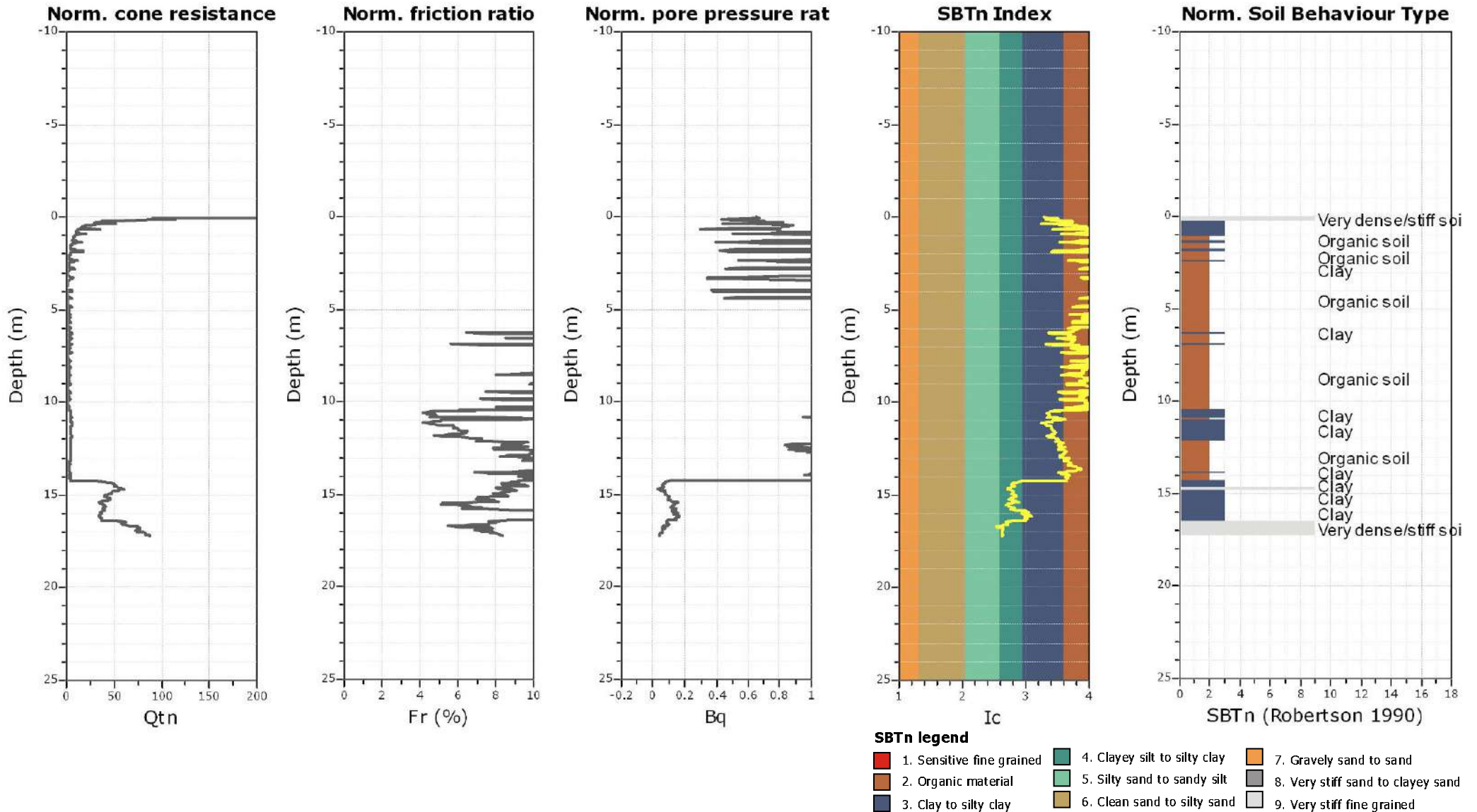
- 1. Sensitive fine grained
- 4. Clayey silt to silty clay
- 7. Gravely sand to sand
- 2. Organic material
- 5. Silty sand to sandy silt
- 8. Very stiff sand to dayey sand
- 3. Clay to silty clay
- 6. Clean sand to silty sand
- 9. Very stiff fine grained

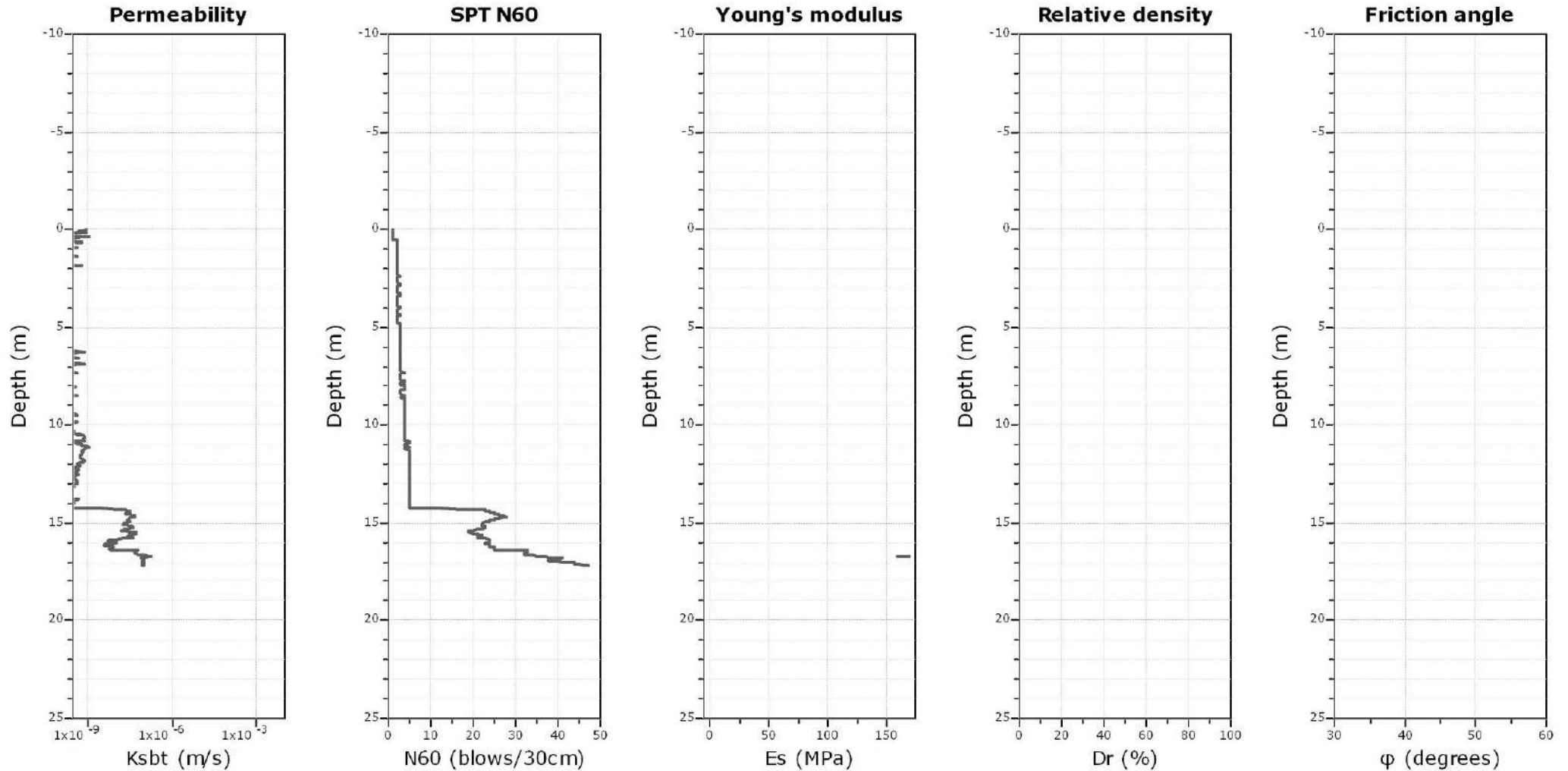
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

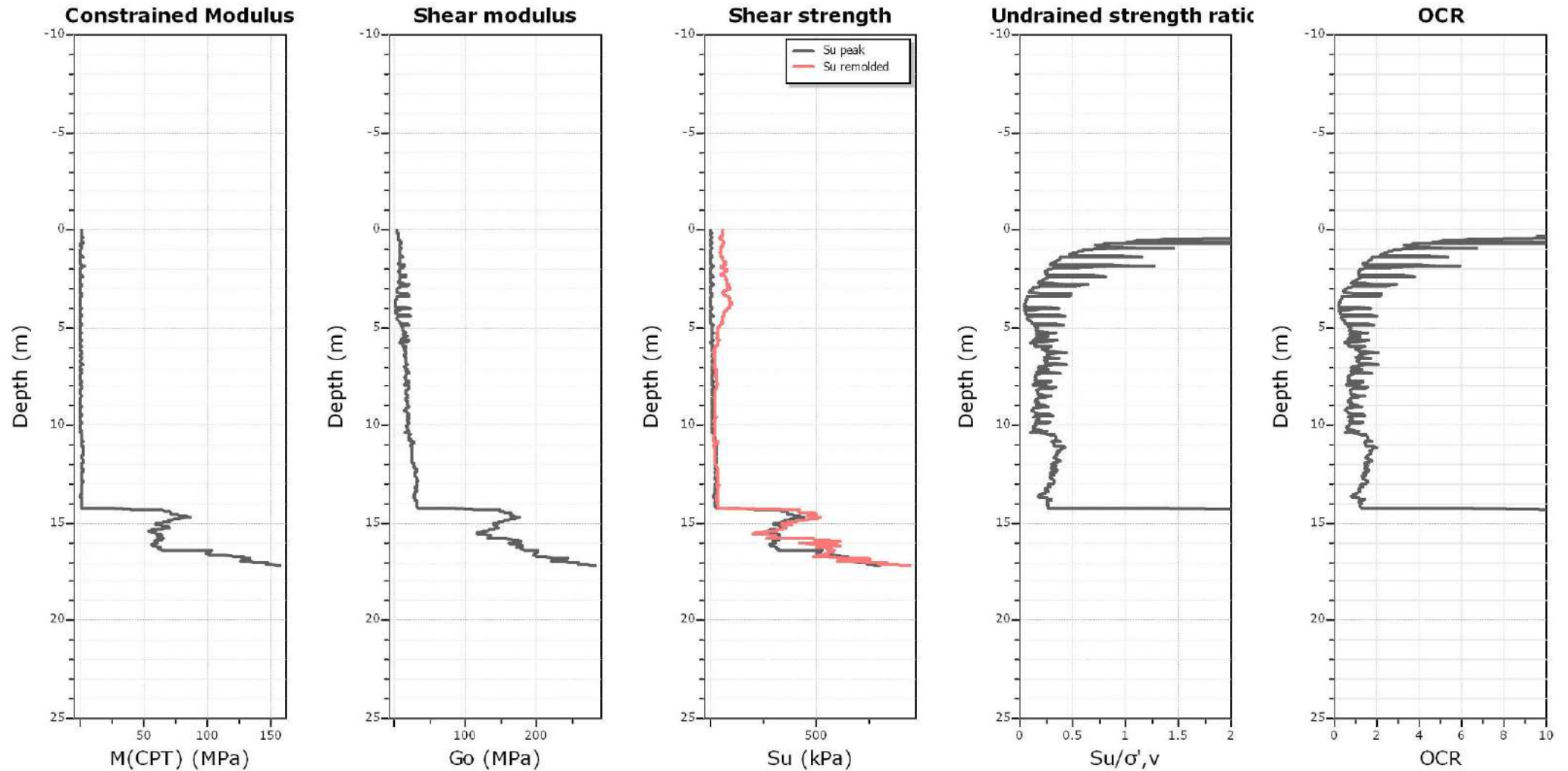
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative desnisty constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

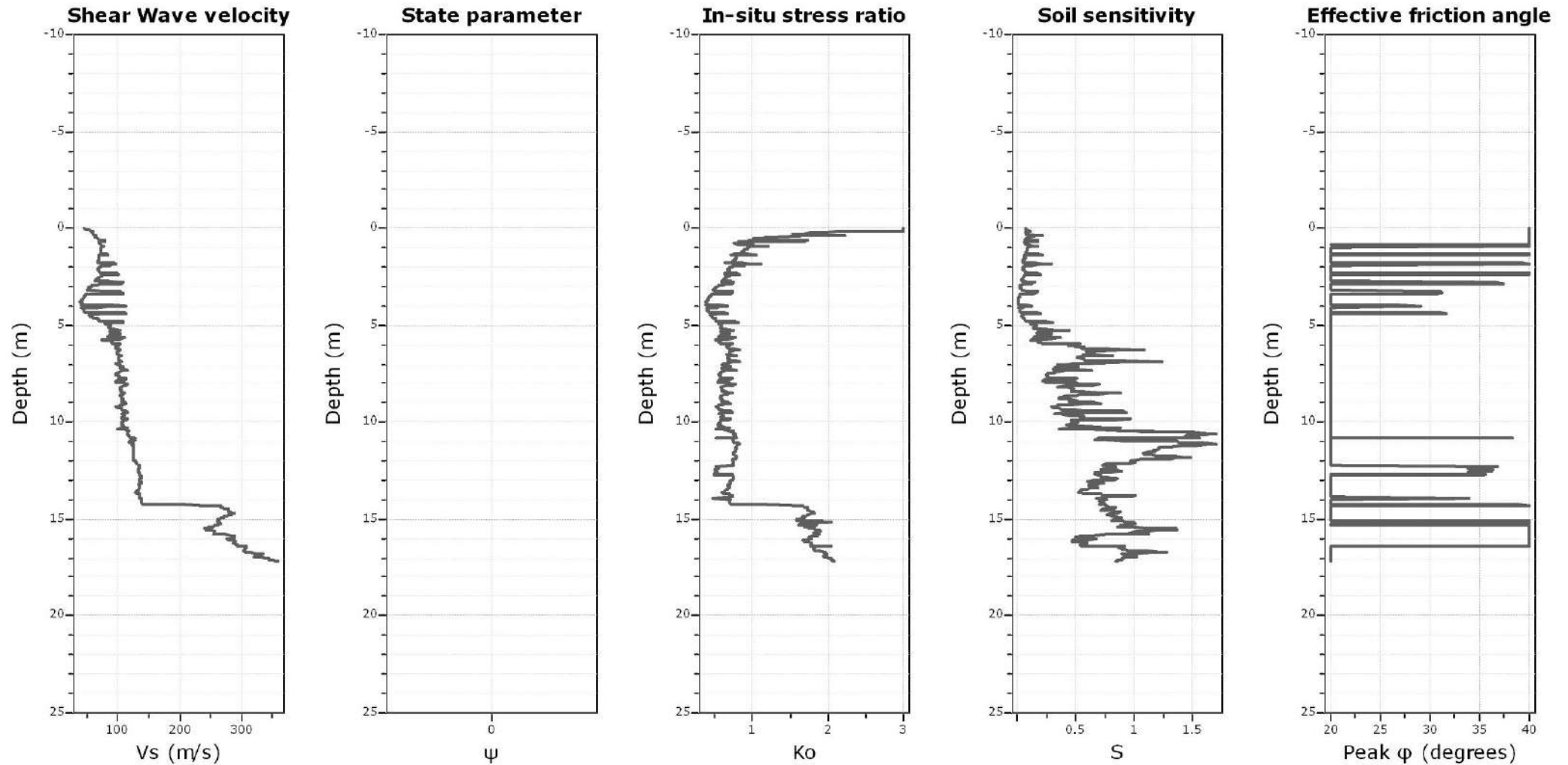
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

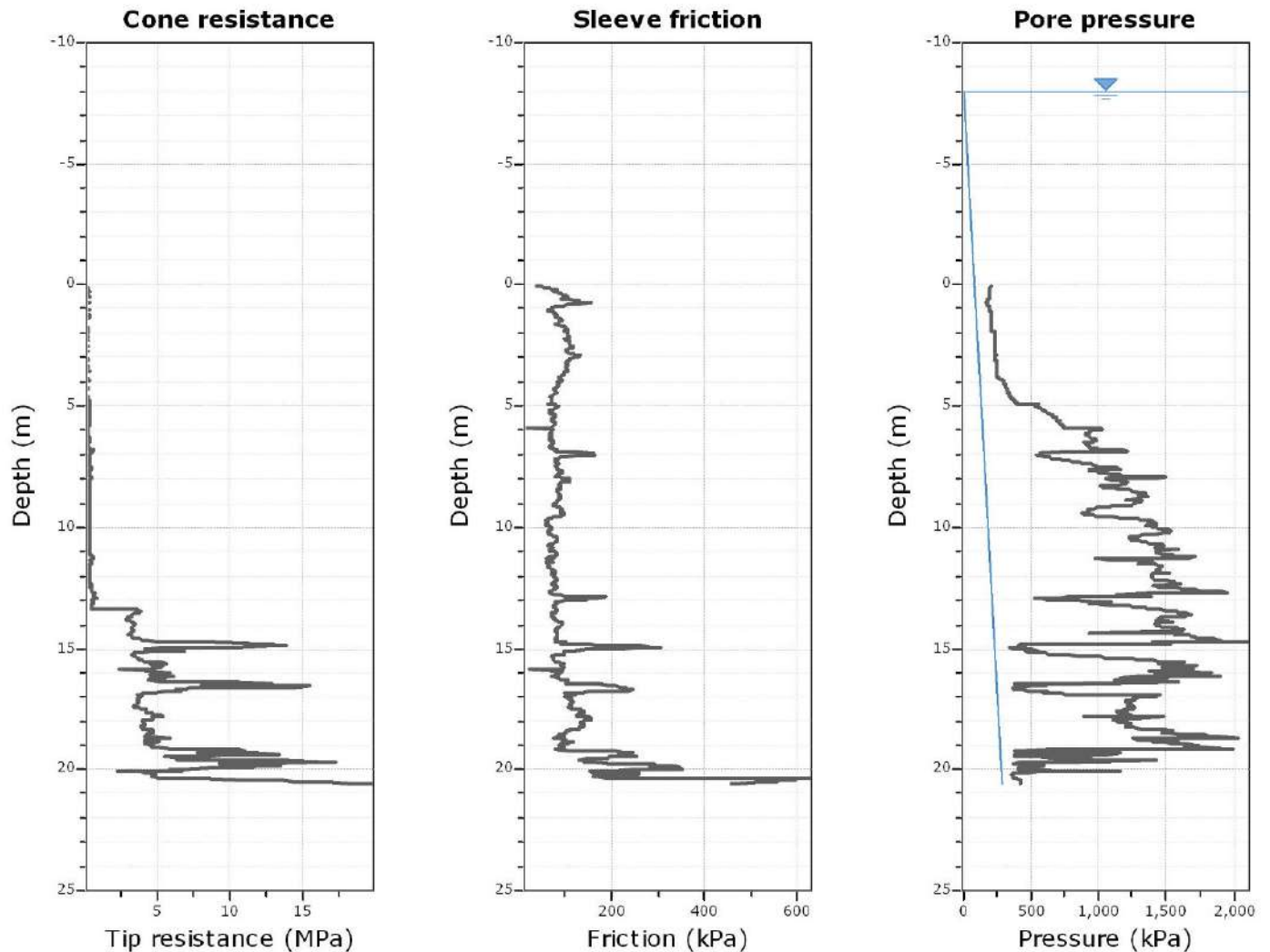
● User defined estimation data



Calculation parameters

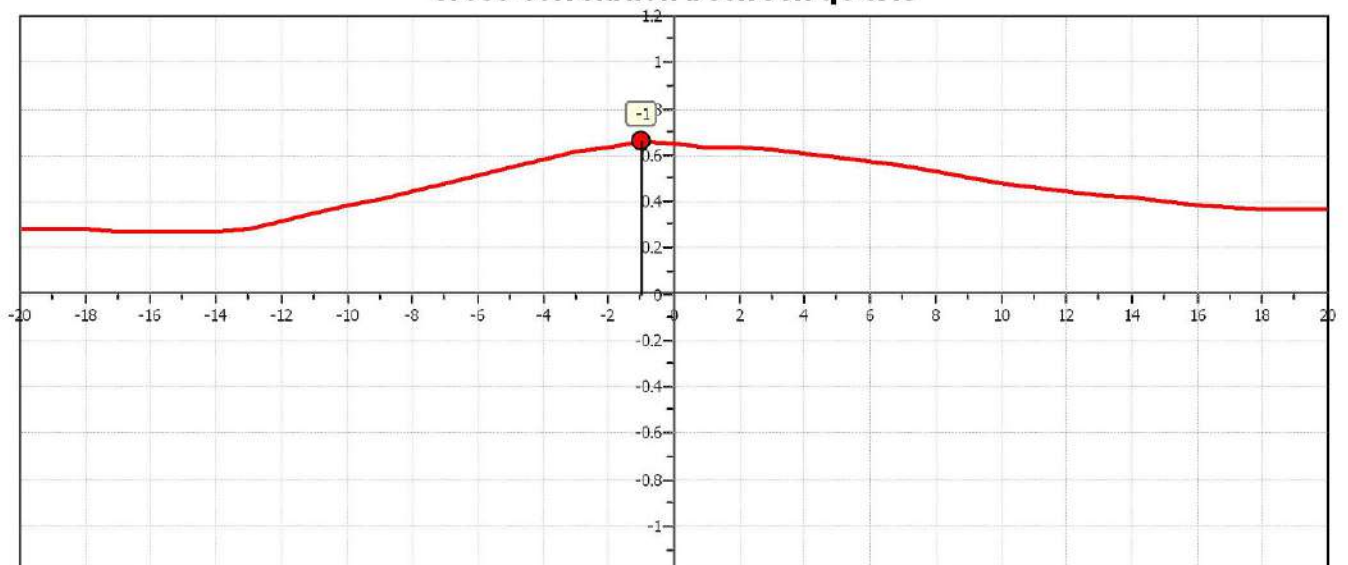
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

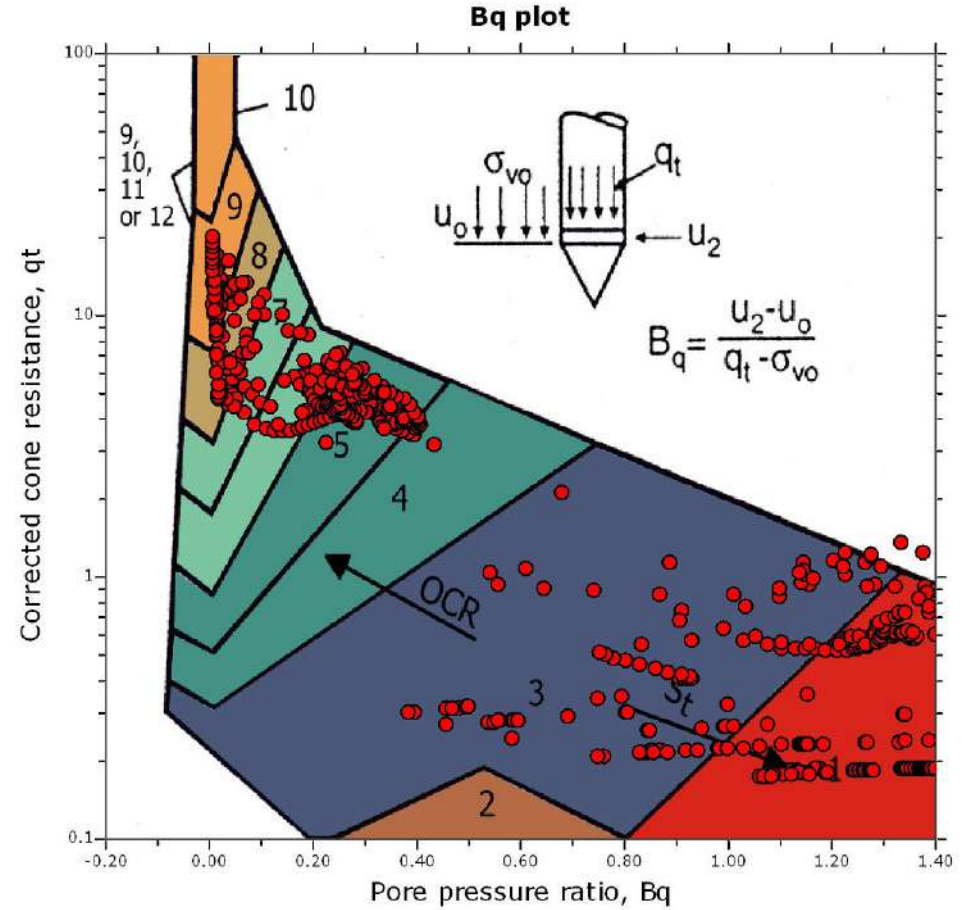
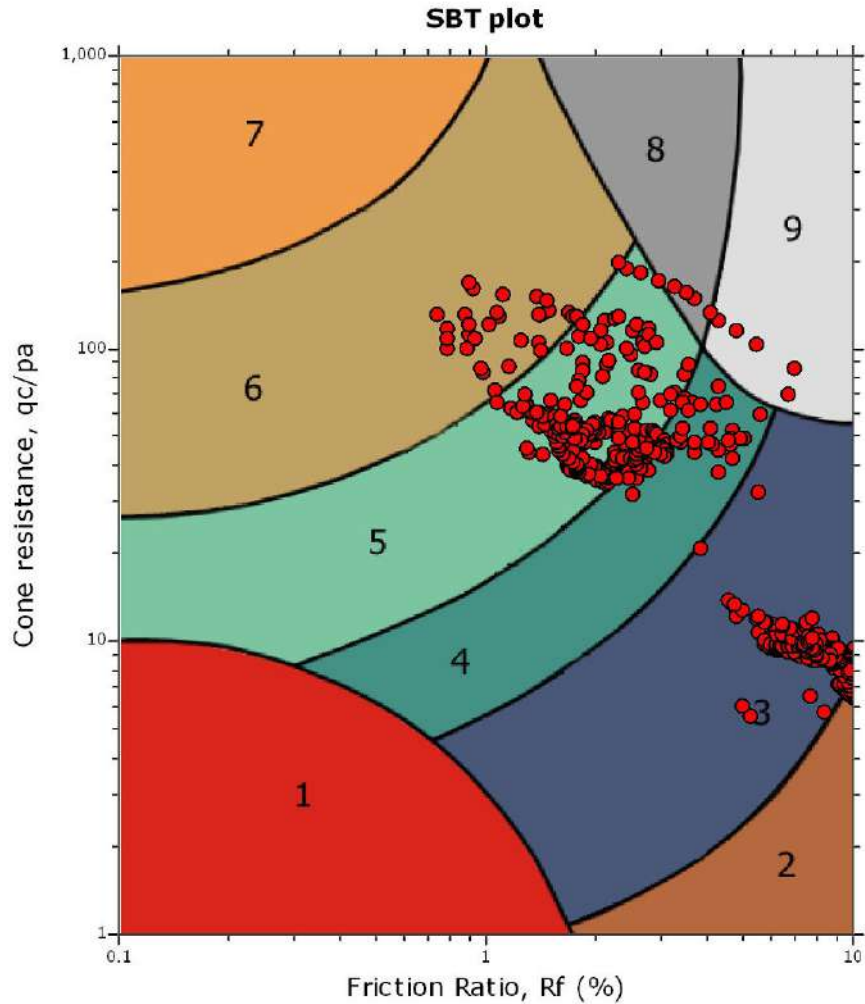


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



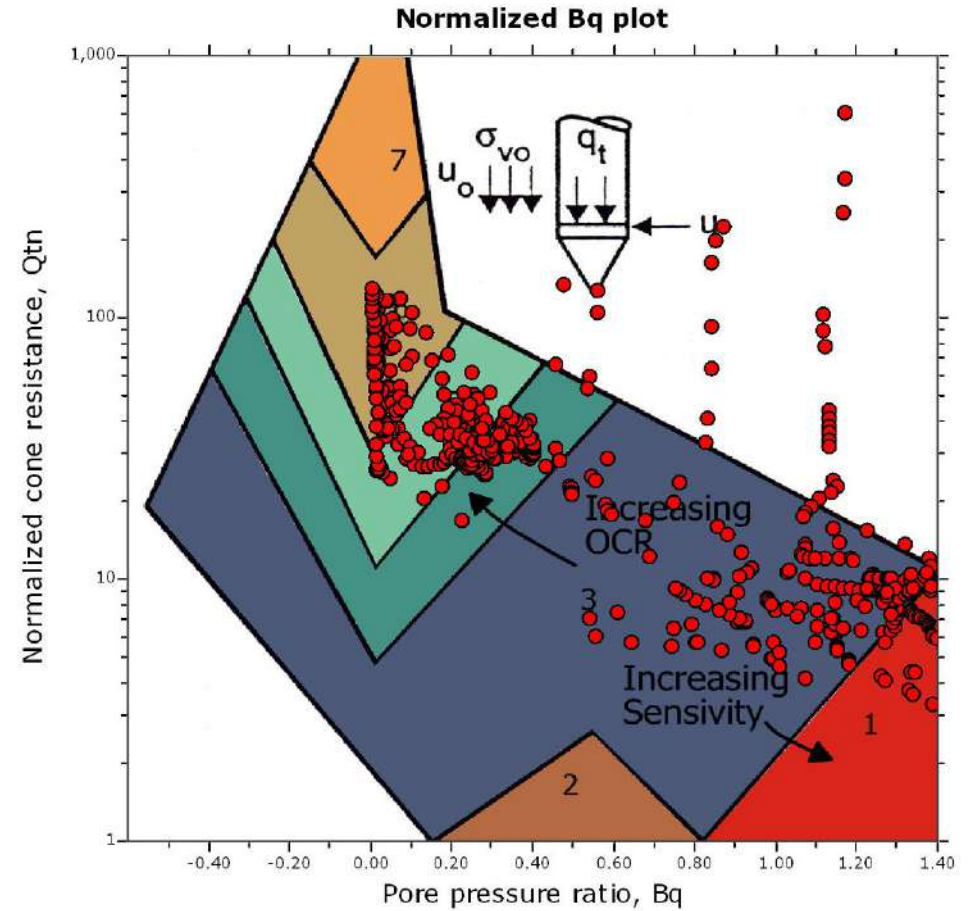
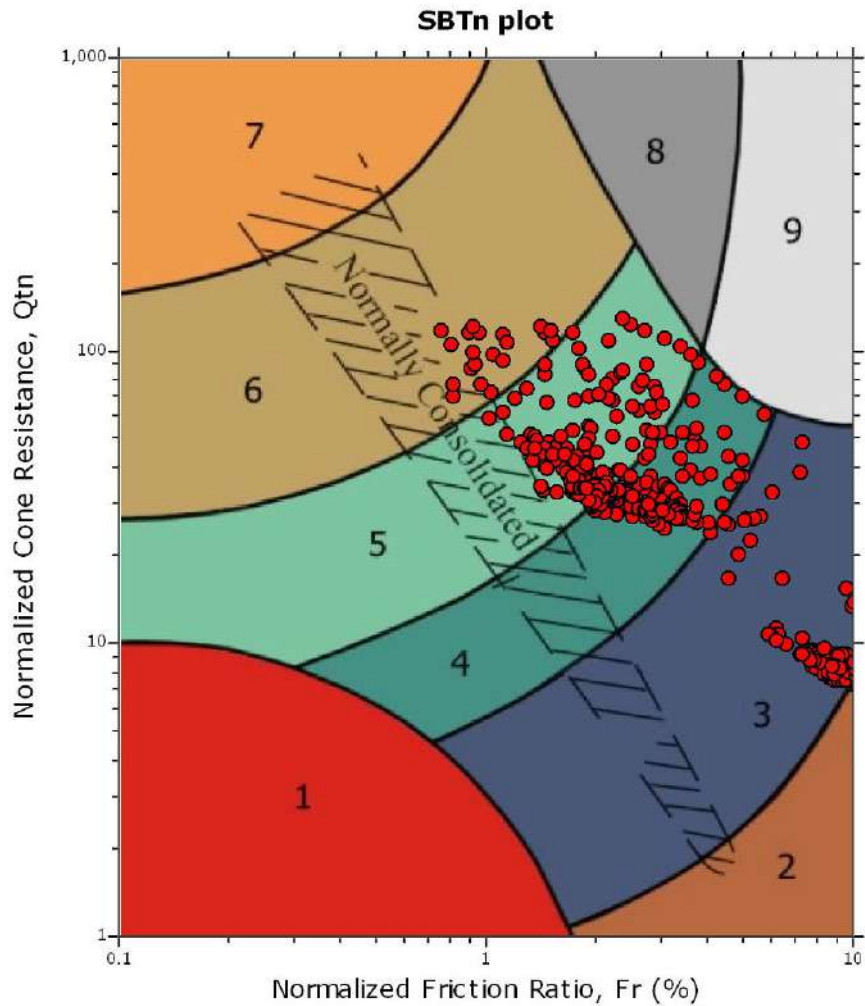
SBT - Bq plots



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 |

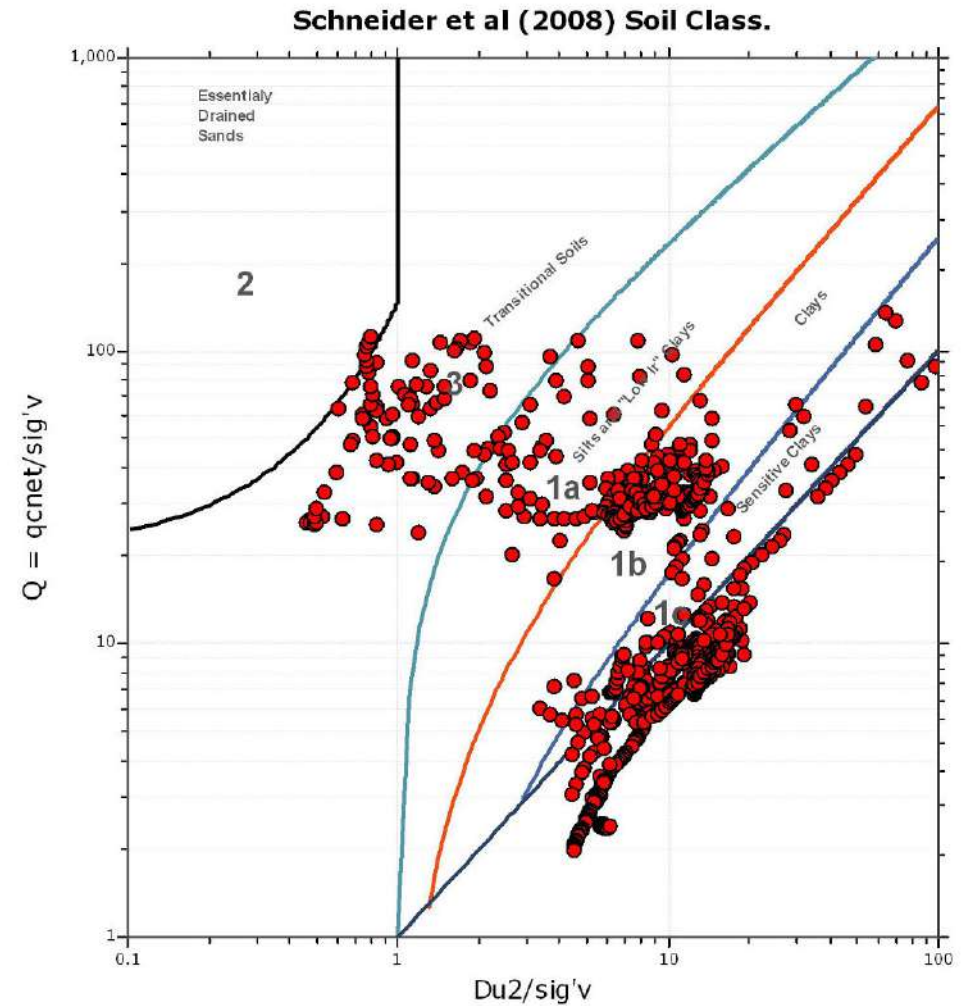
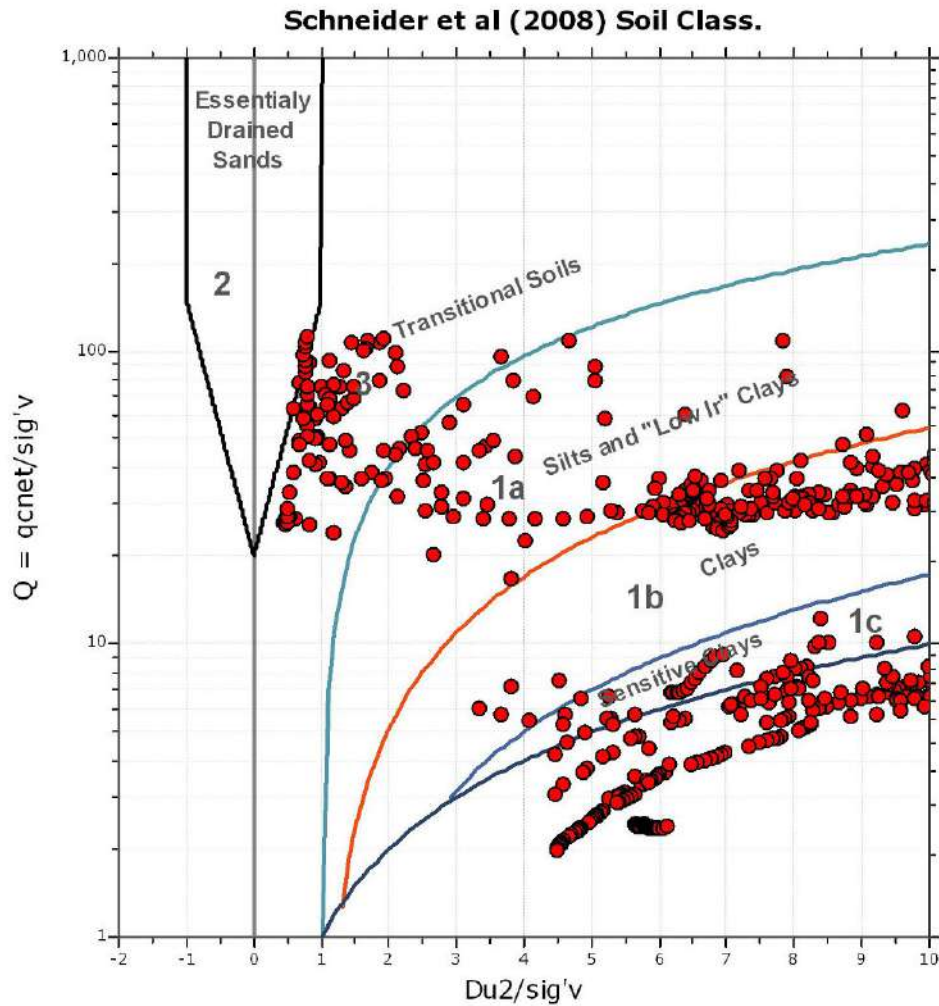
SBT - Bq plots (normalized)

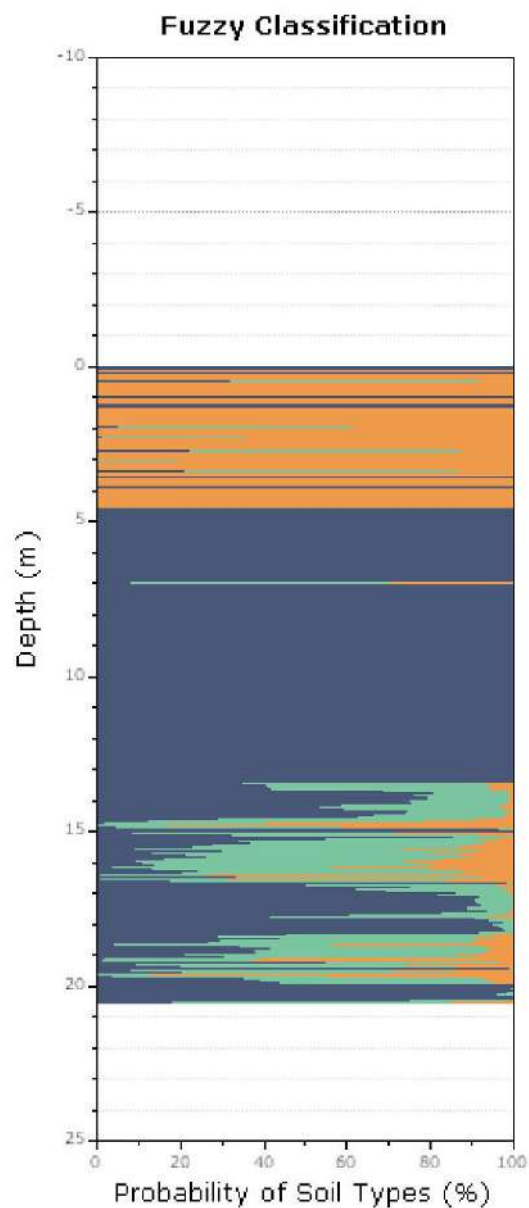
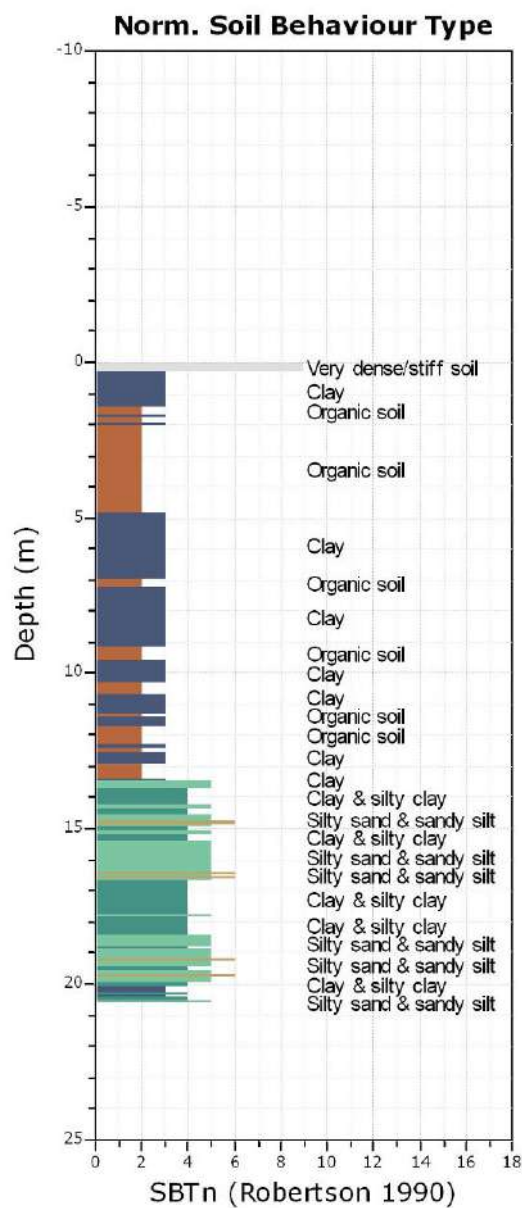


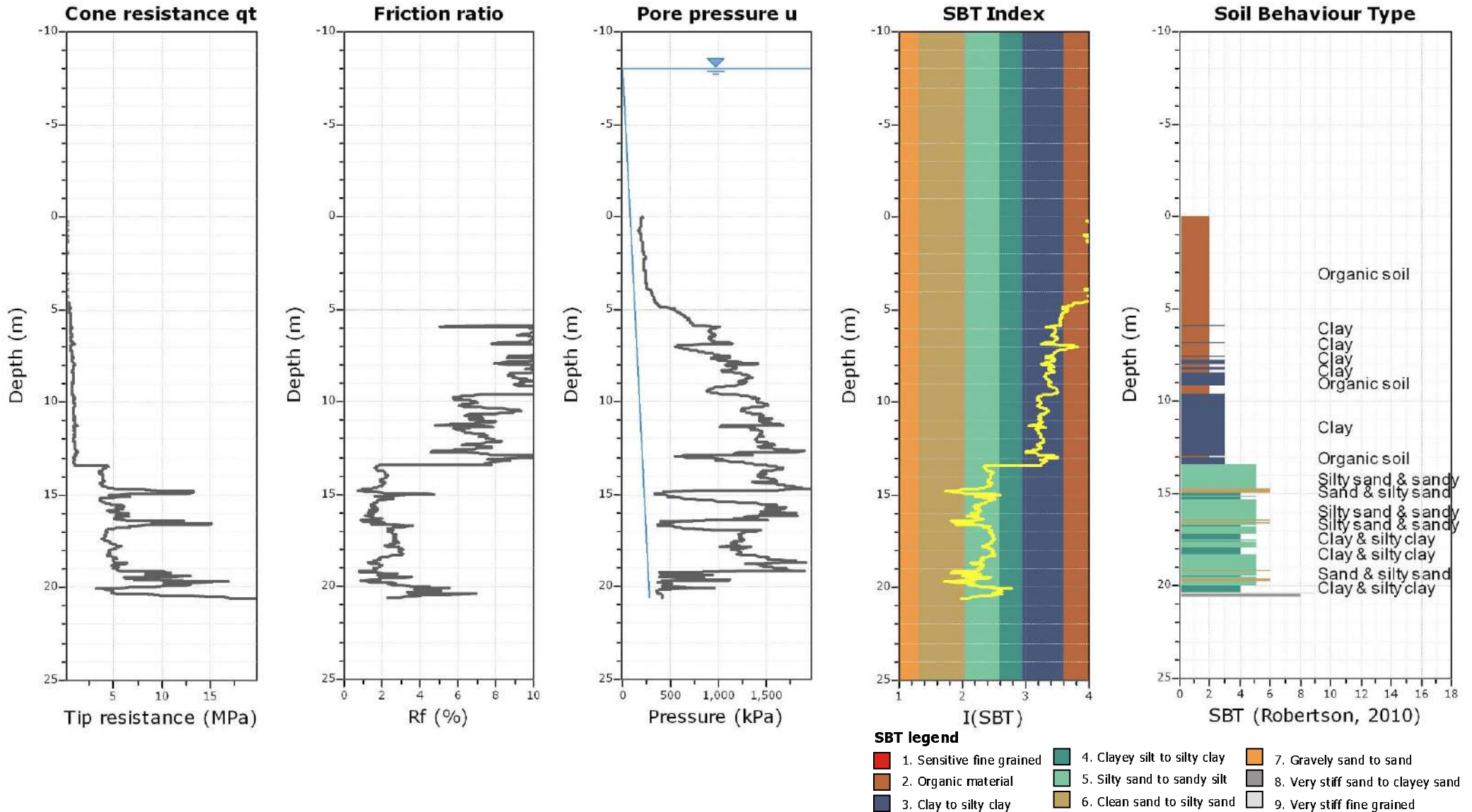
SBTn legend

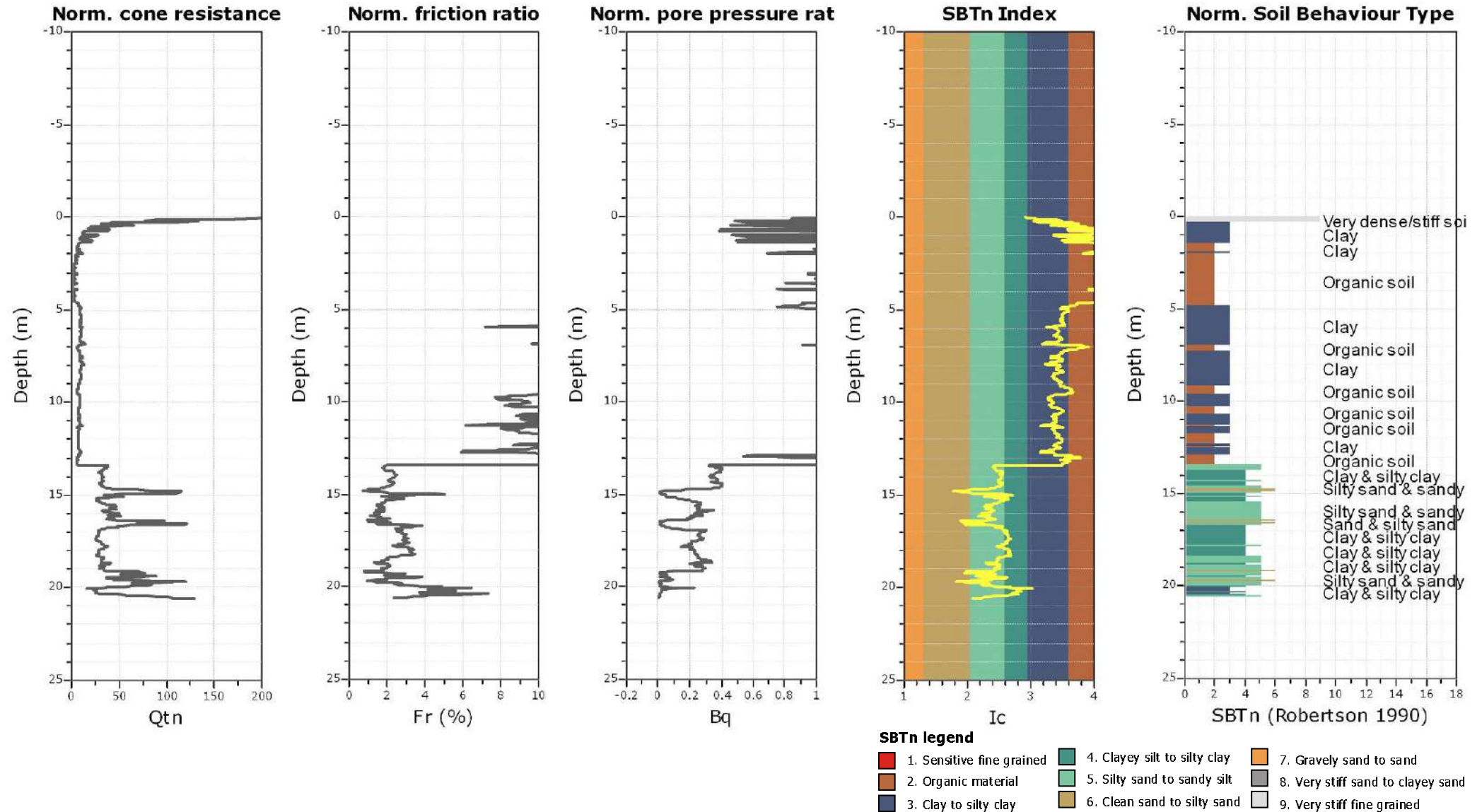
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

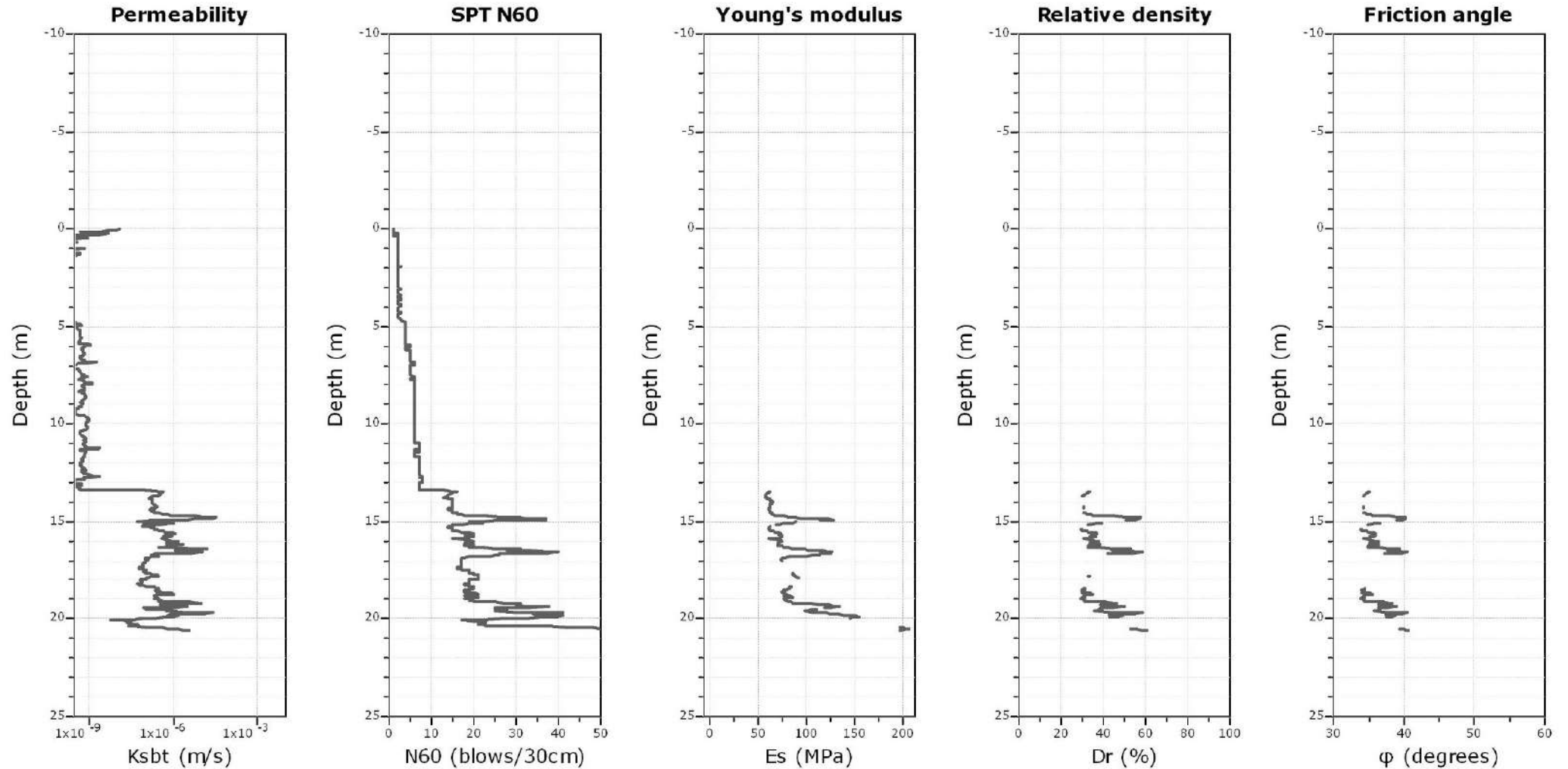
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

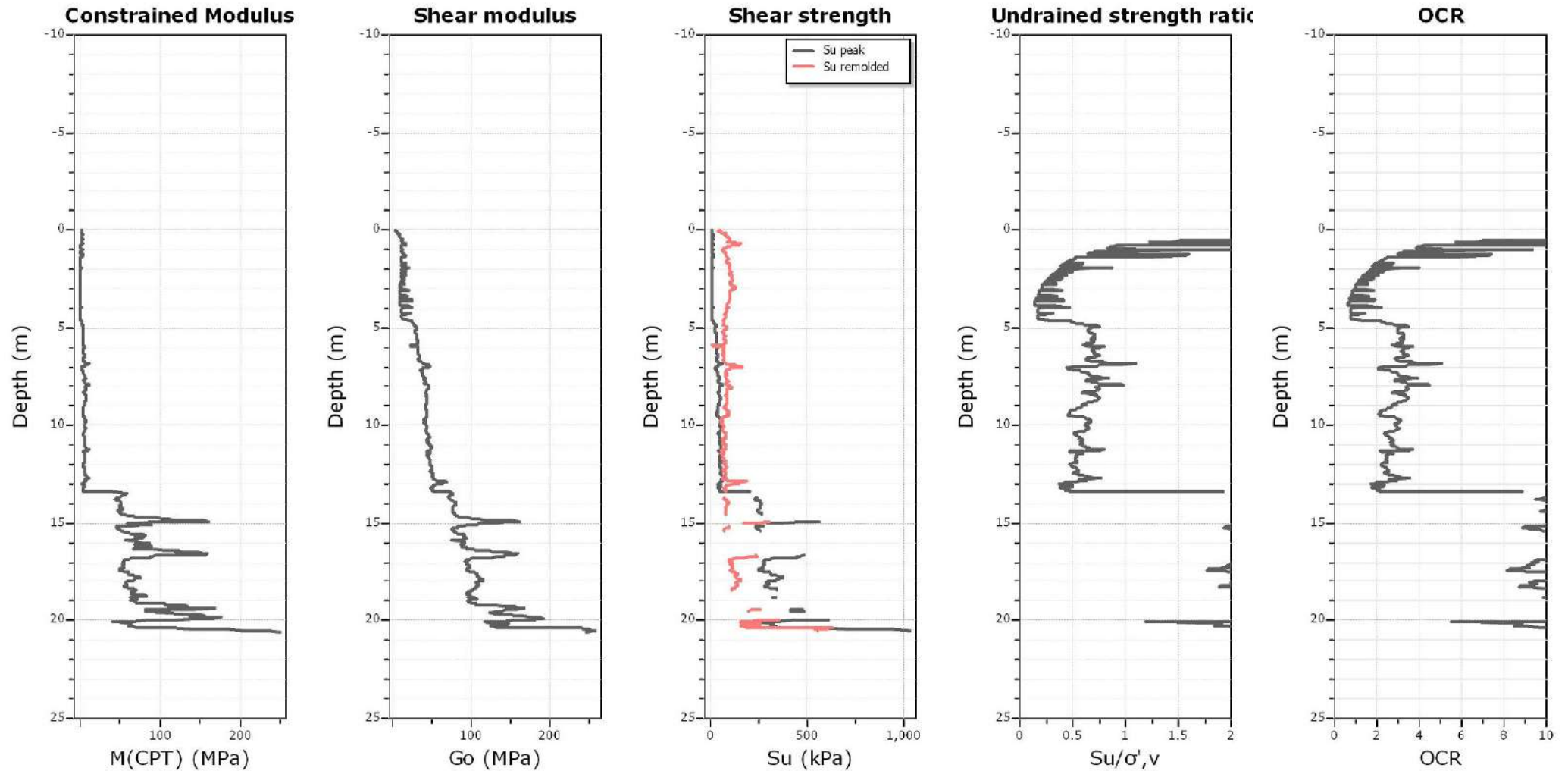
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

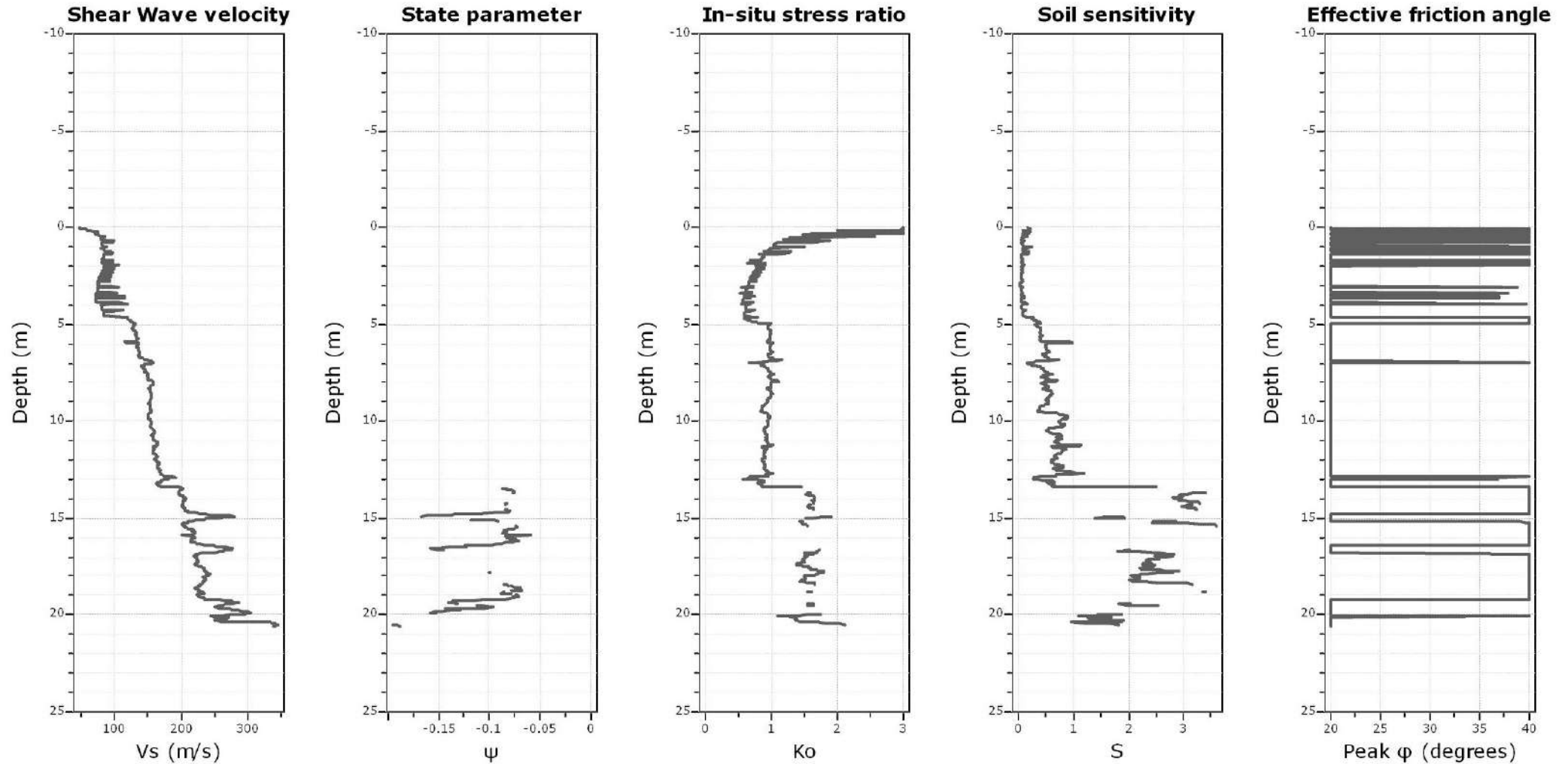
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

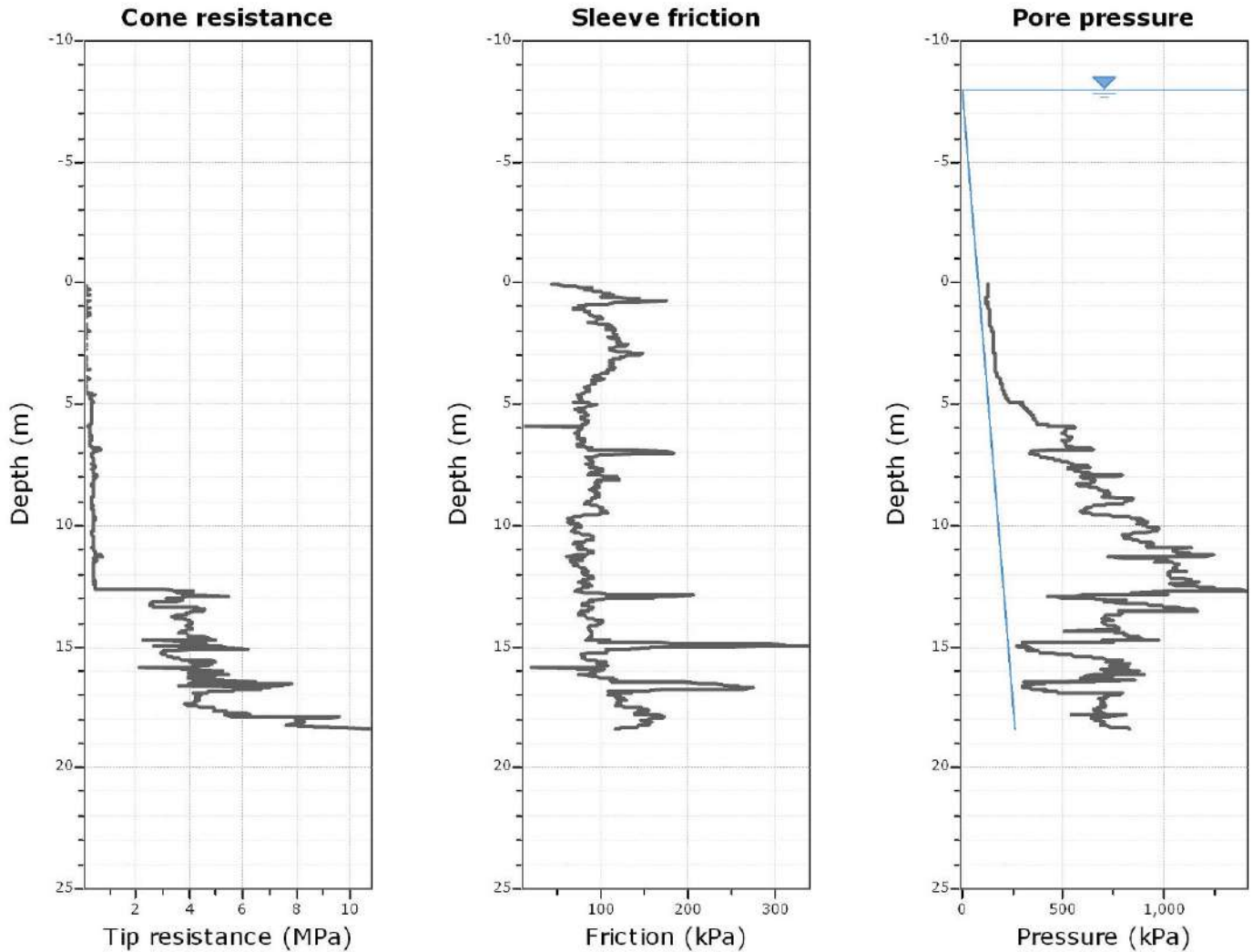
● — User defined estimation data



Calculation parameters

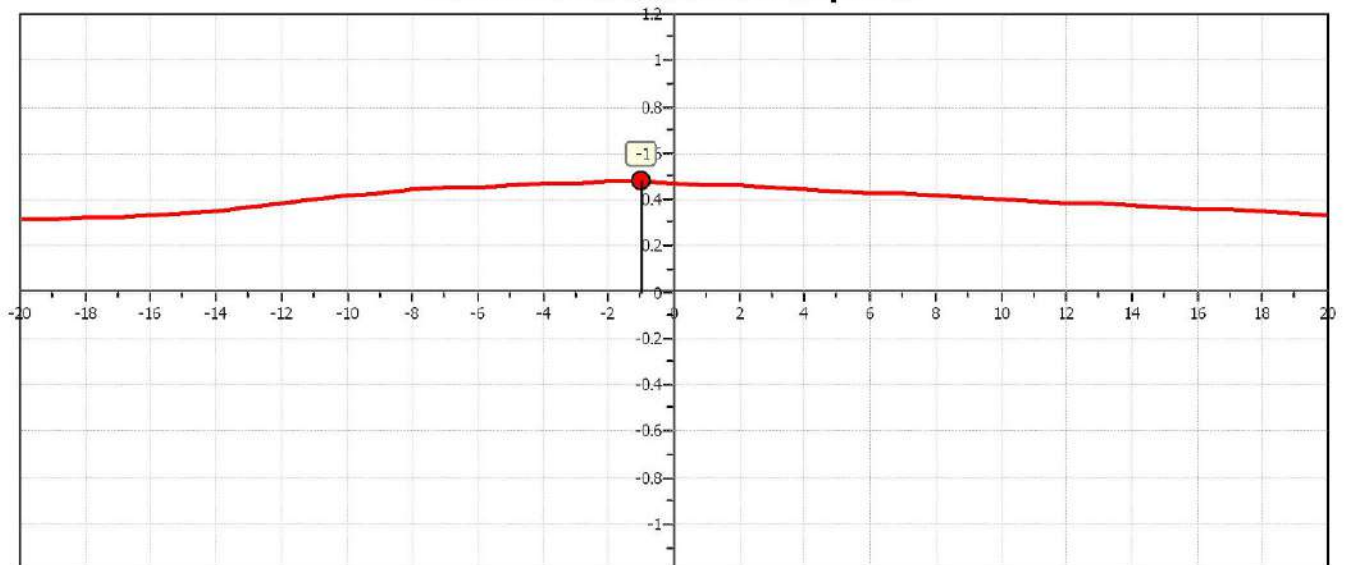
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data

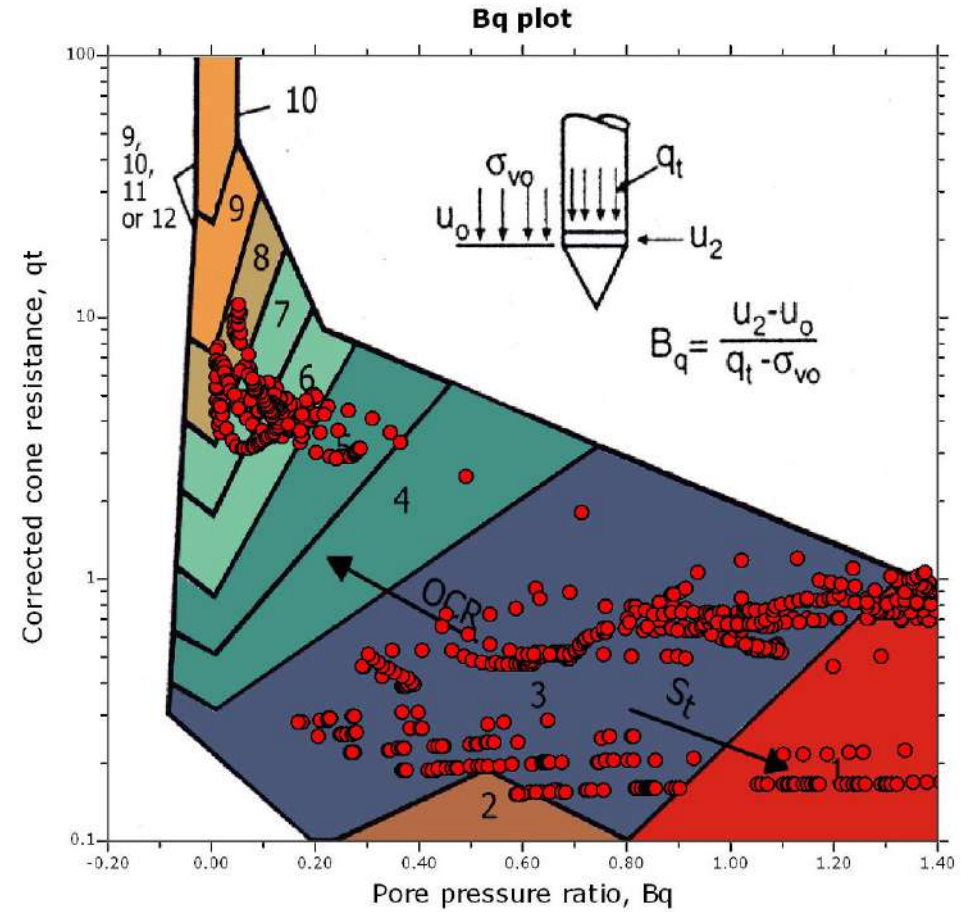
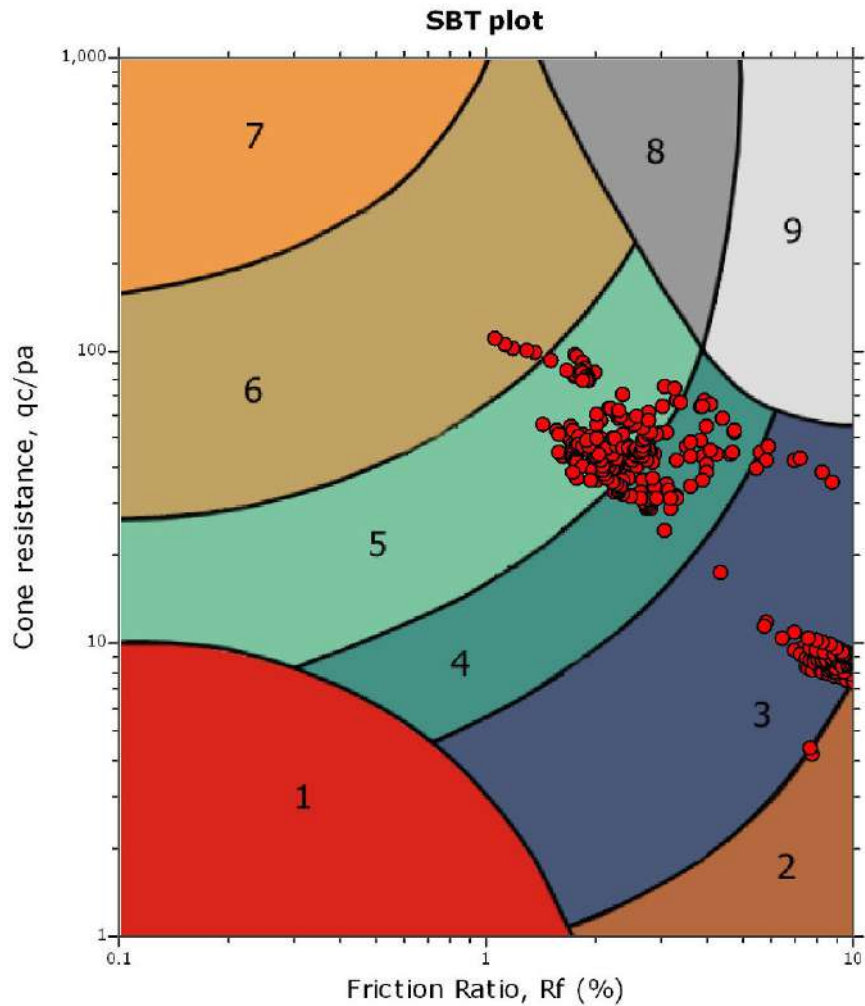


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw qc and fs values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between qc & fs



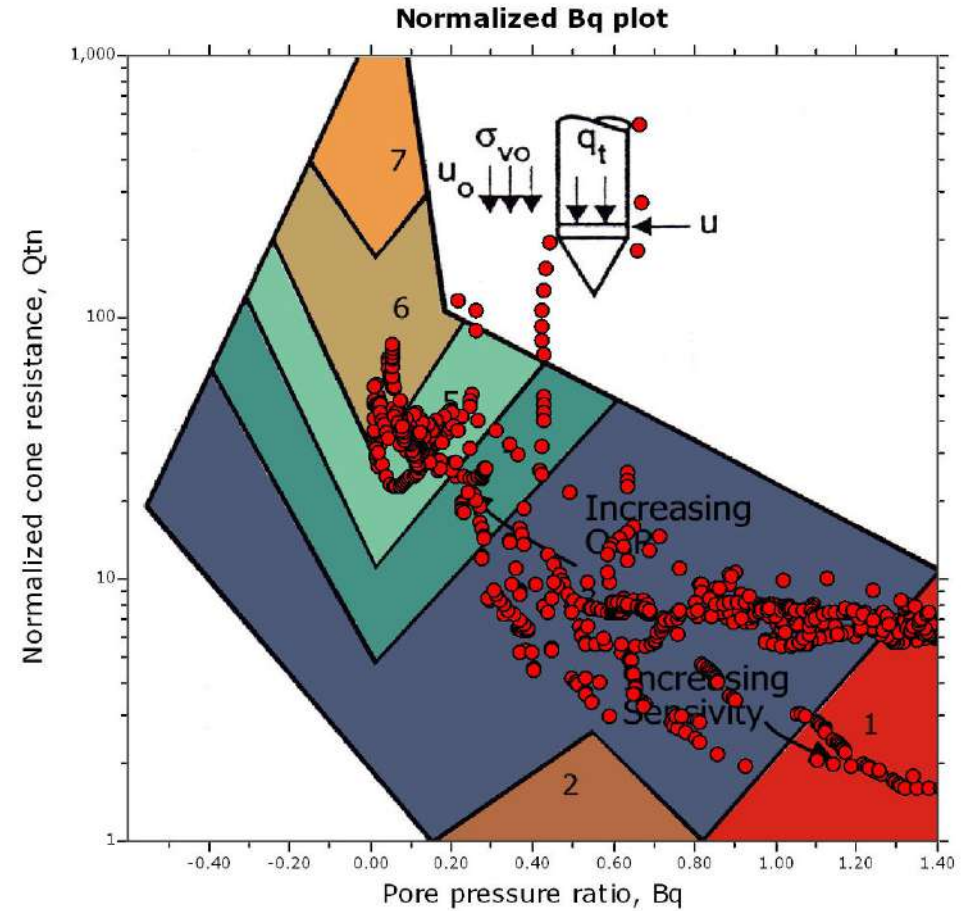
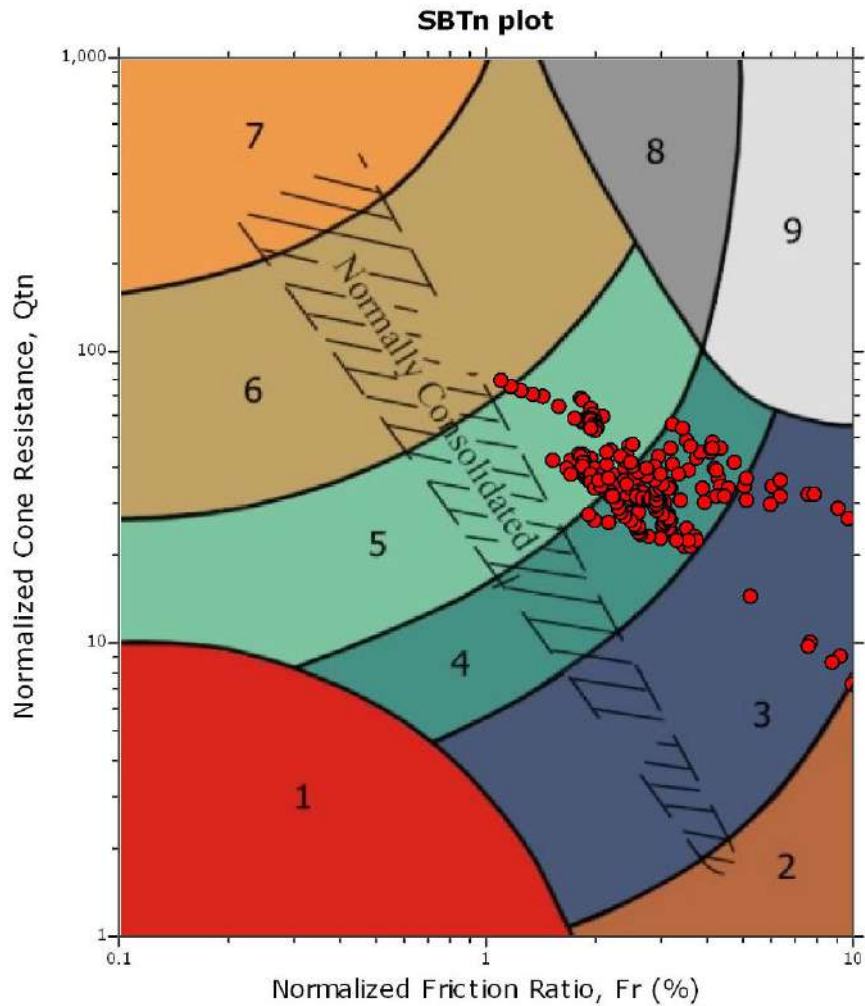
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

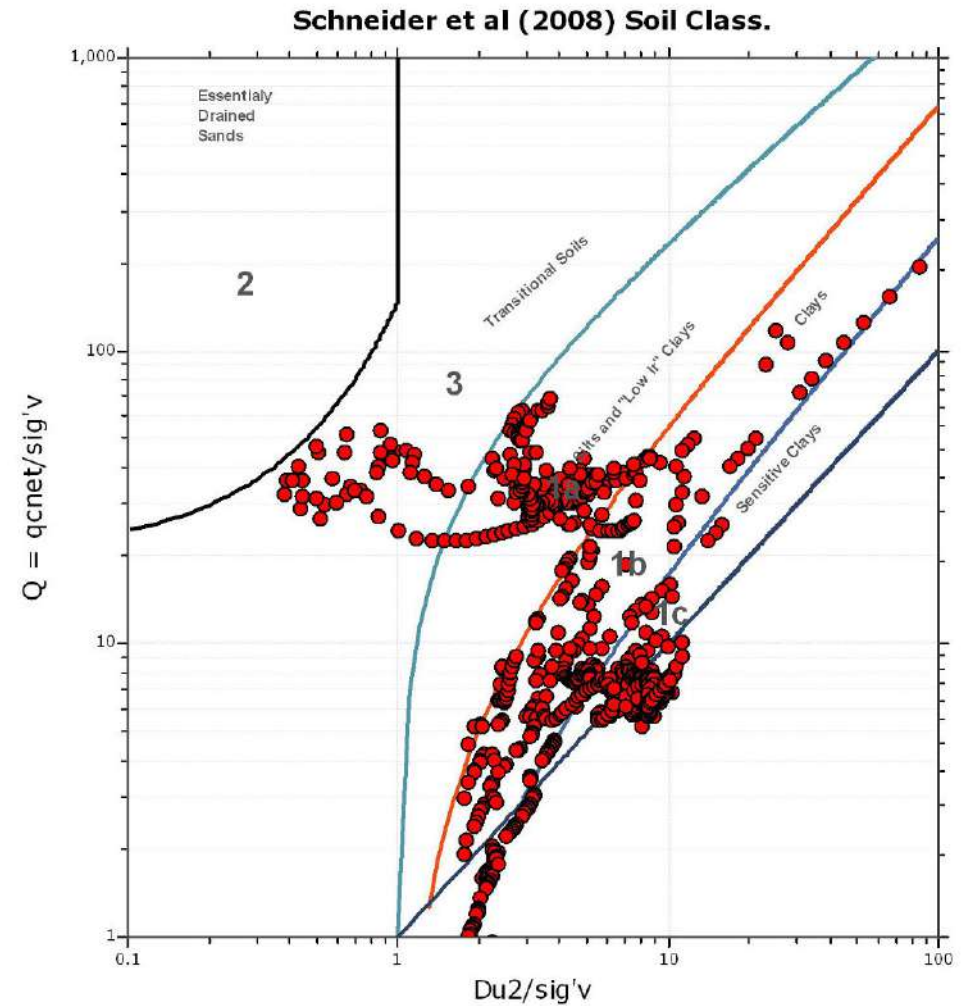
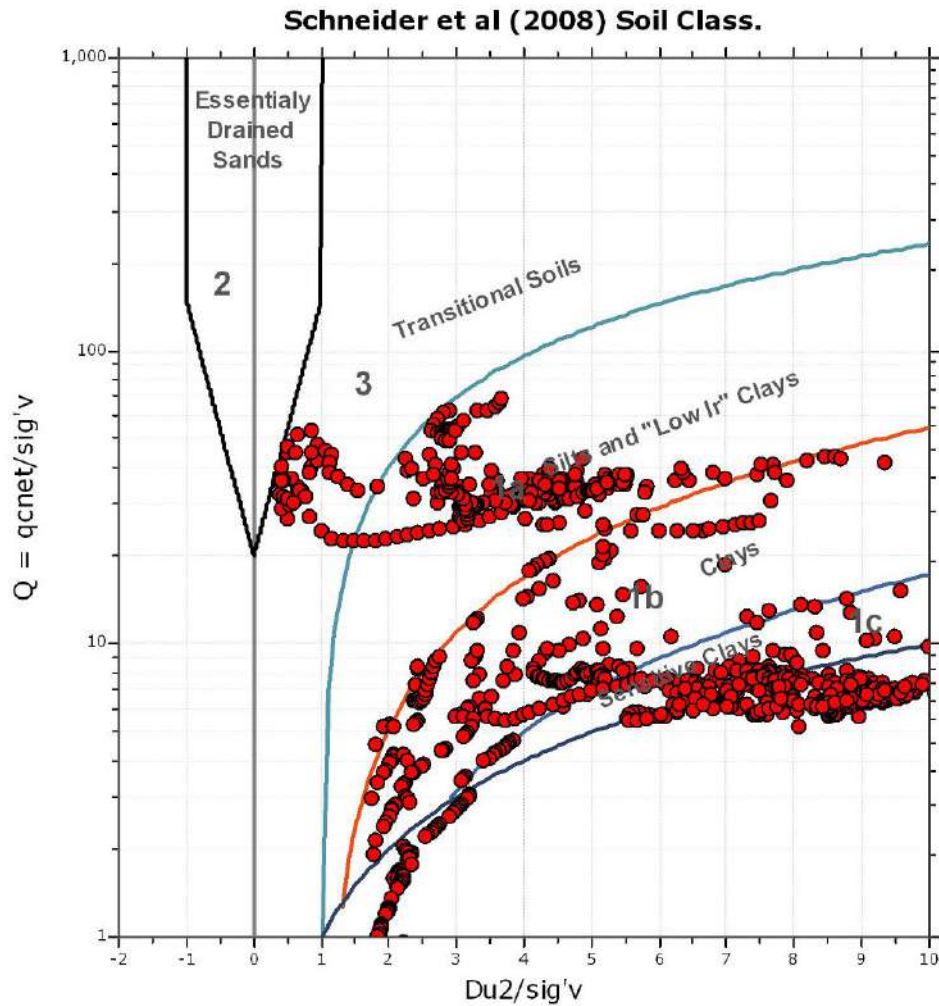
SBT - Bq plots (normalized)

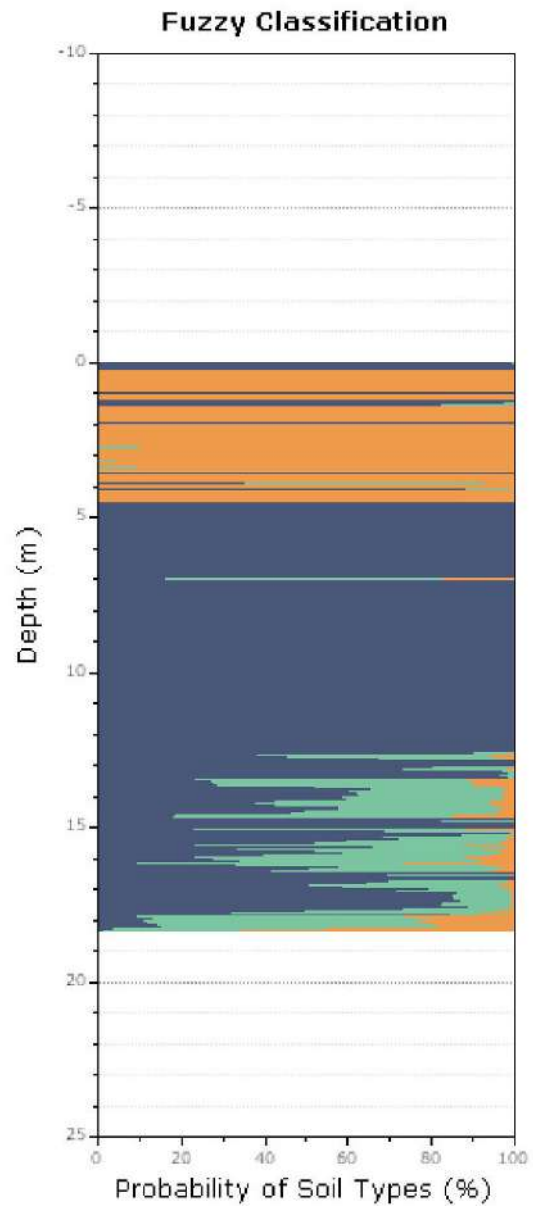
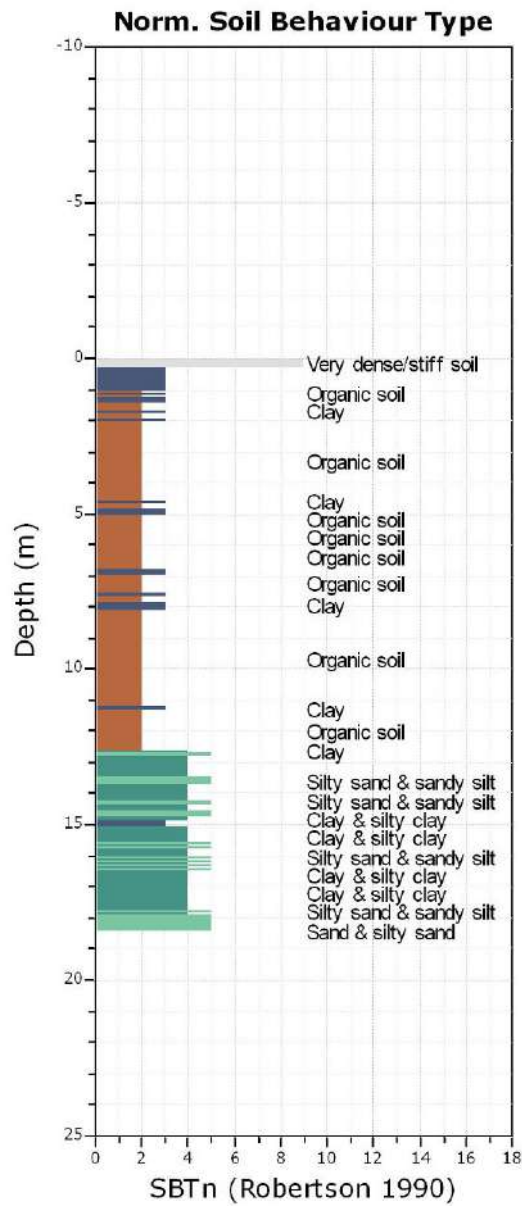


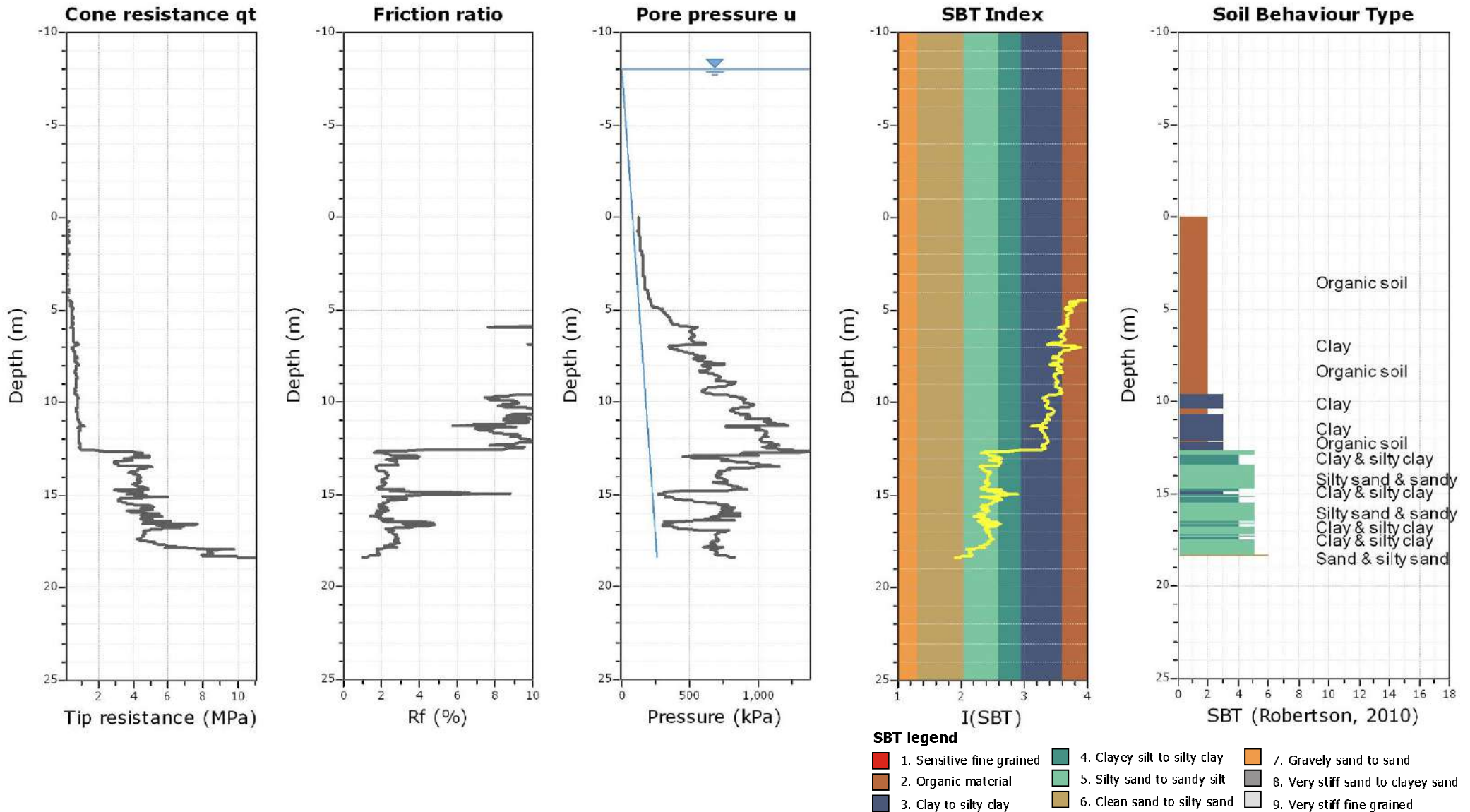
SBTn legend

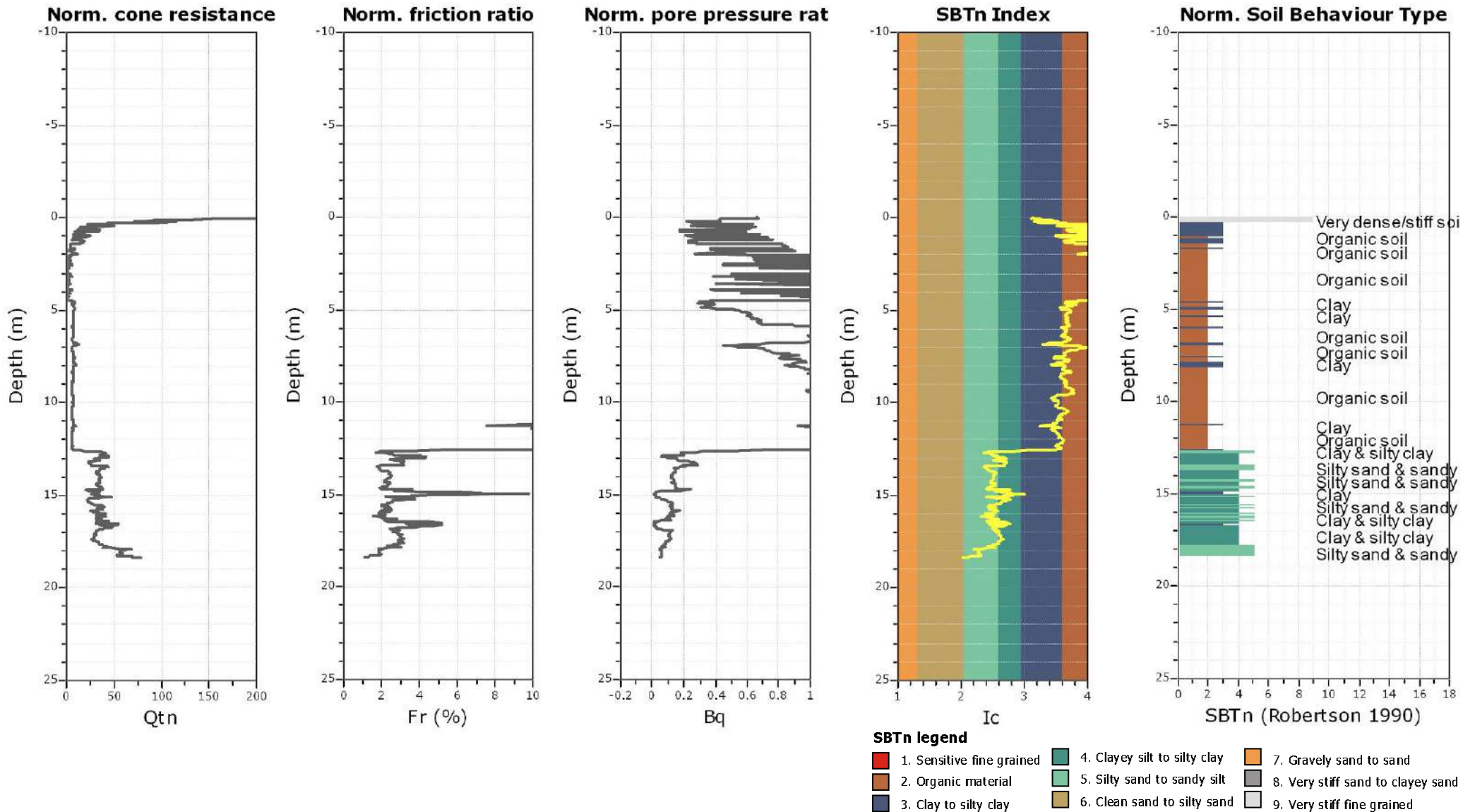
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

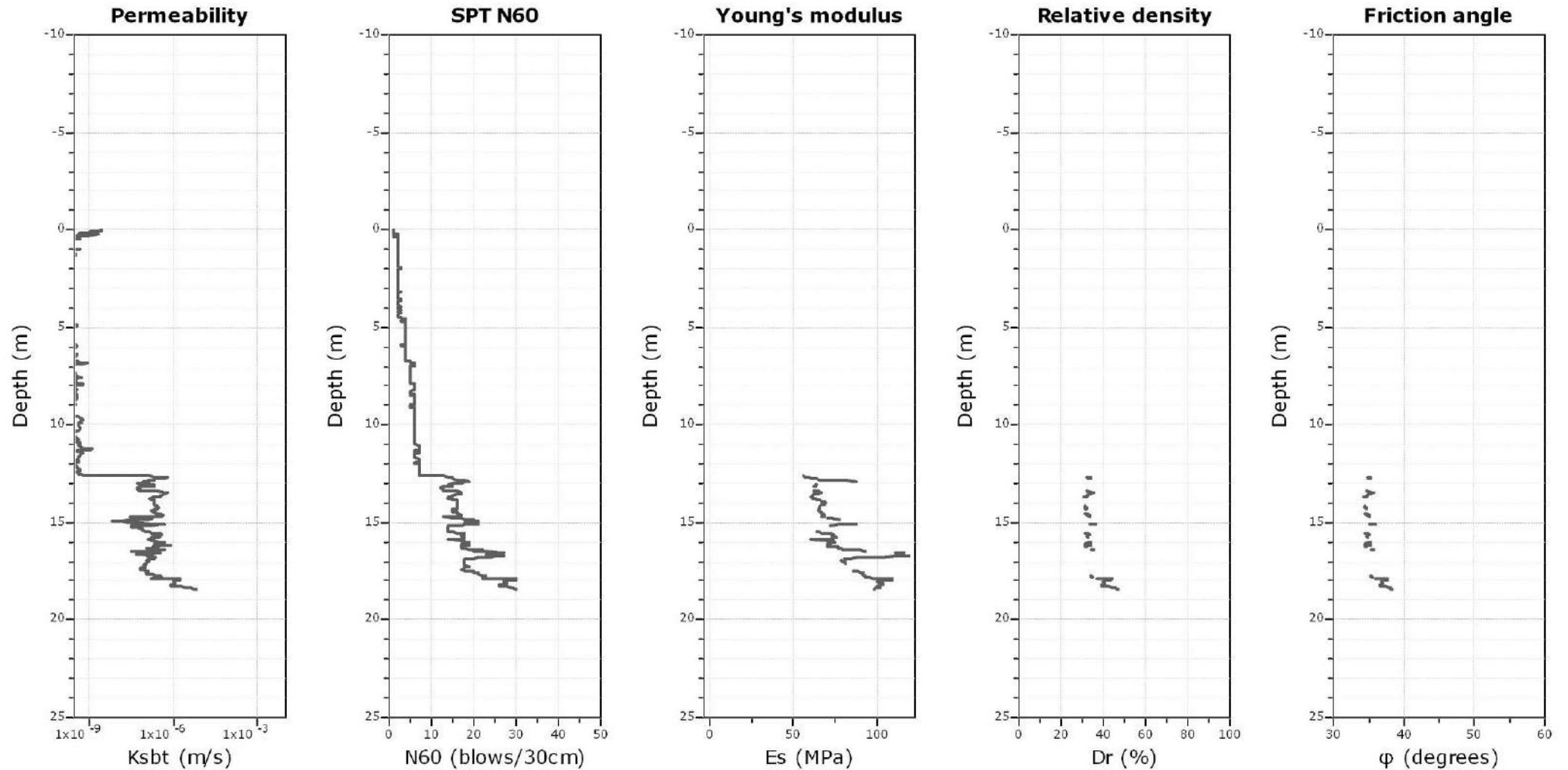
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

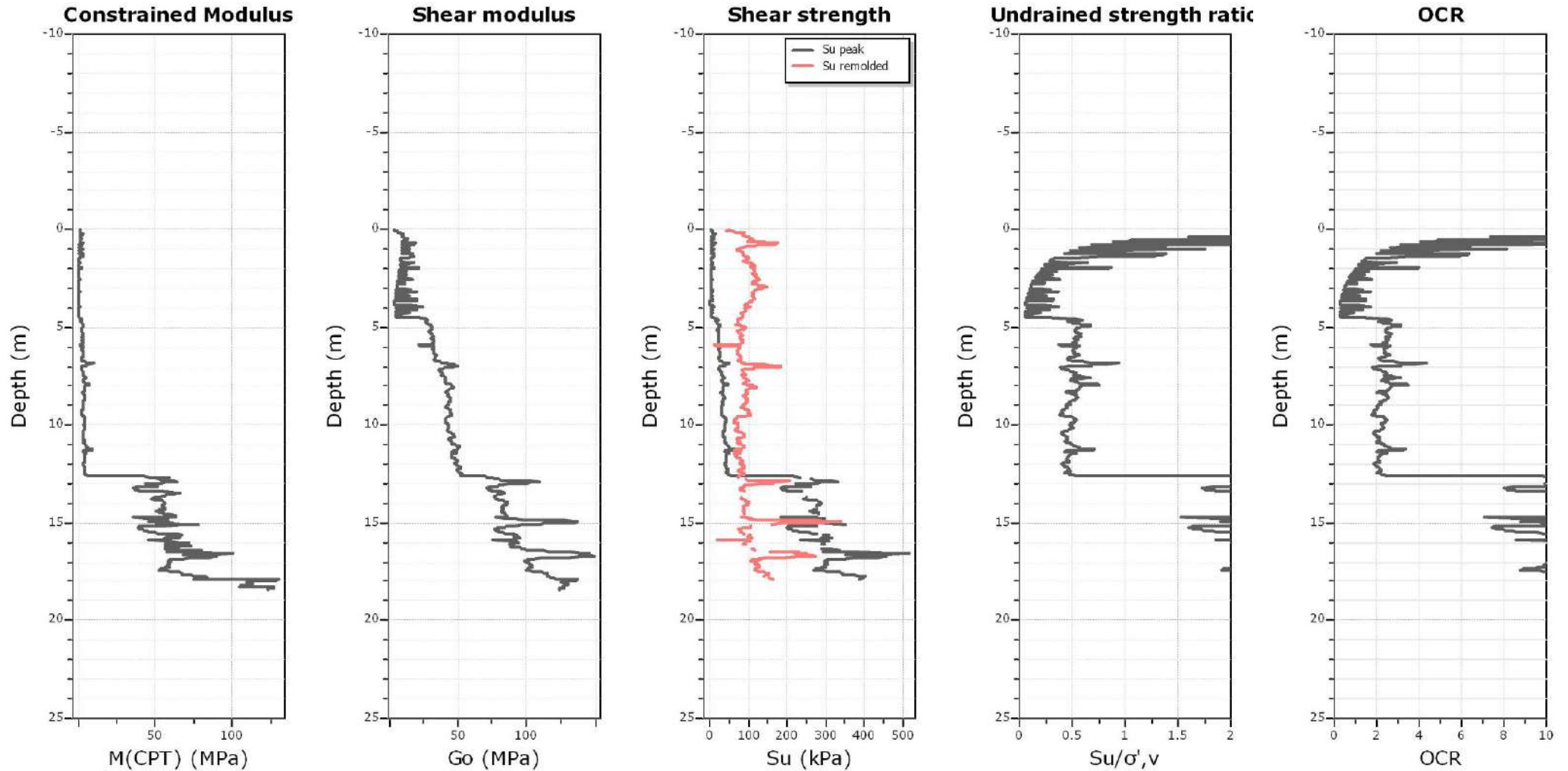
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

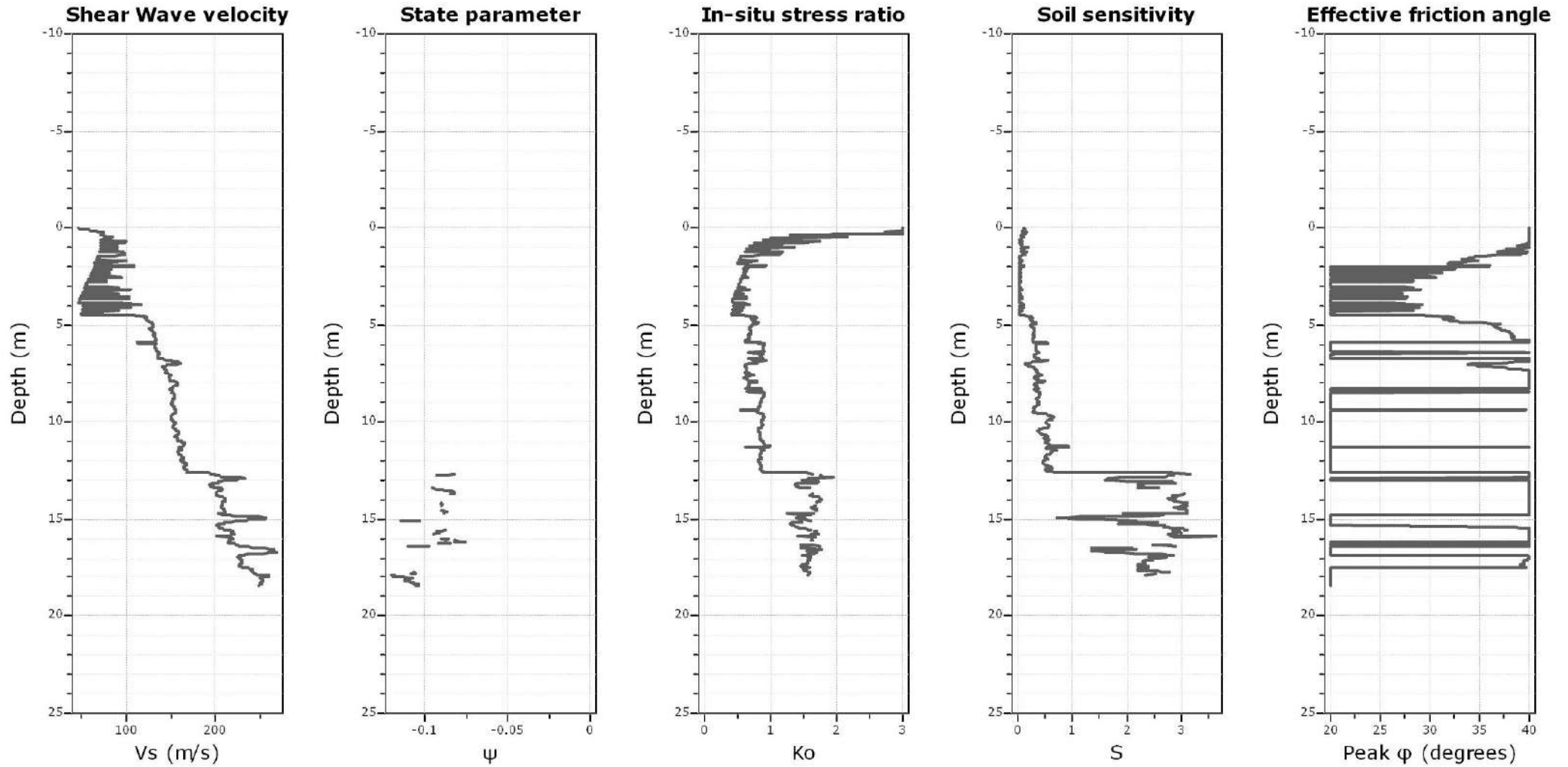
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

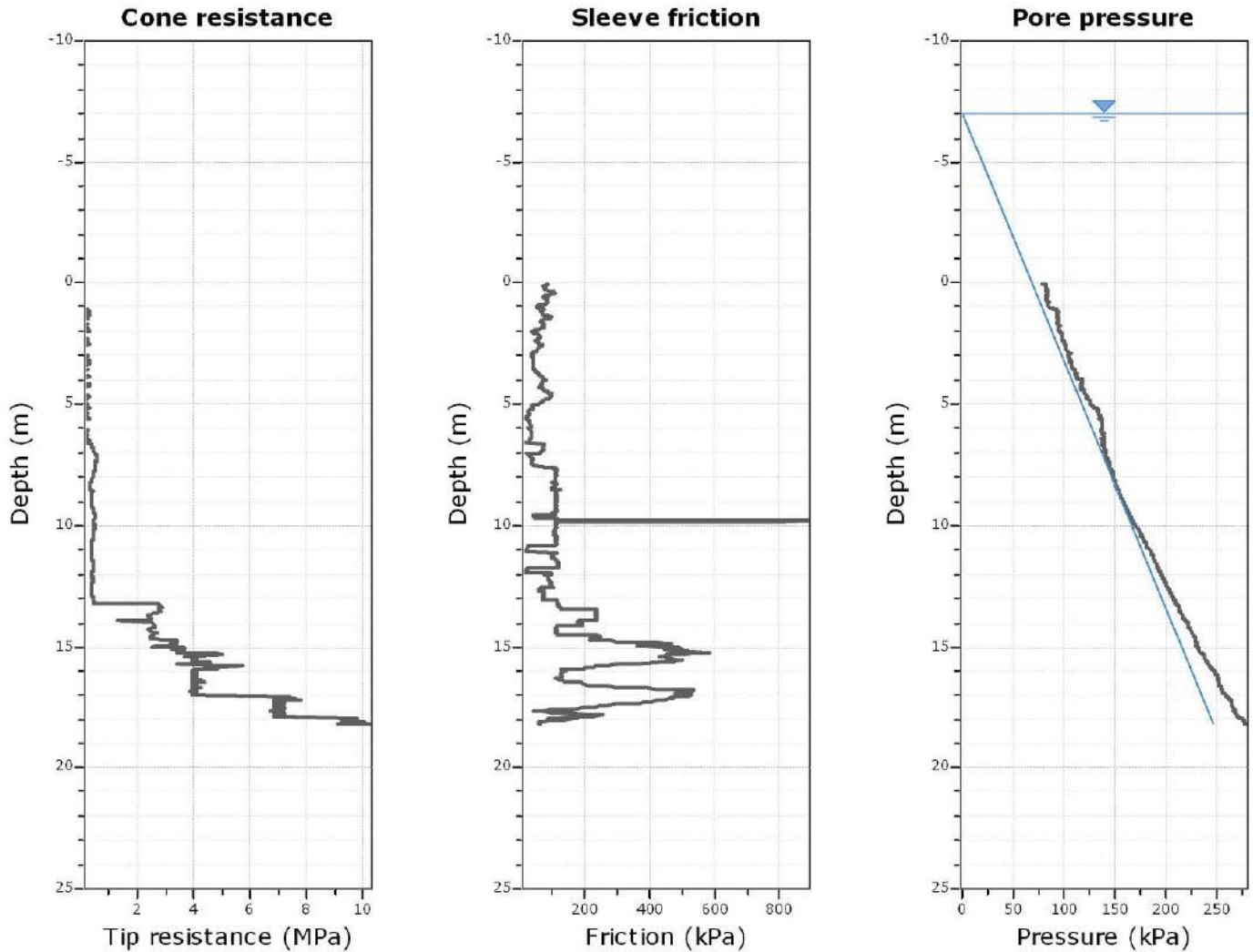
● — User defined estimation data



Calculation parameters

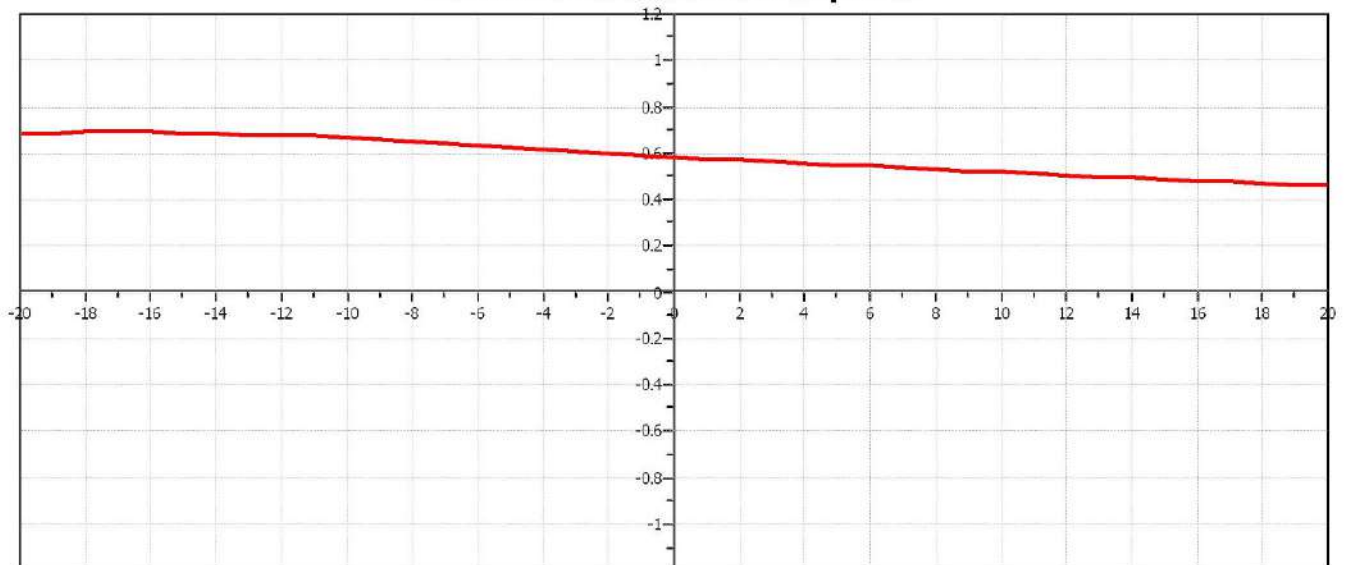
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

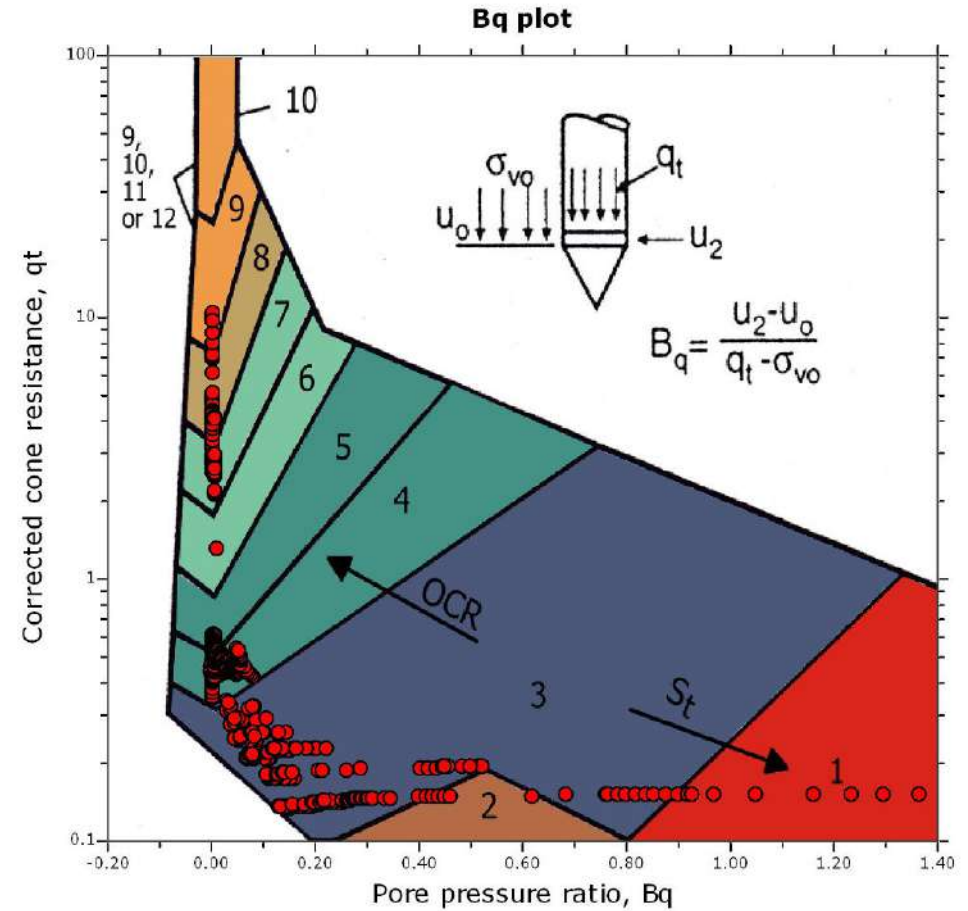
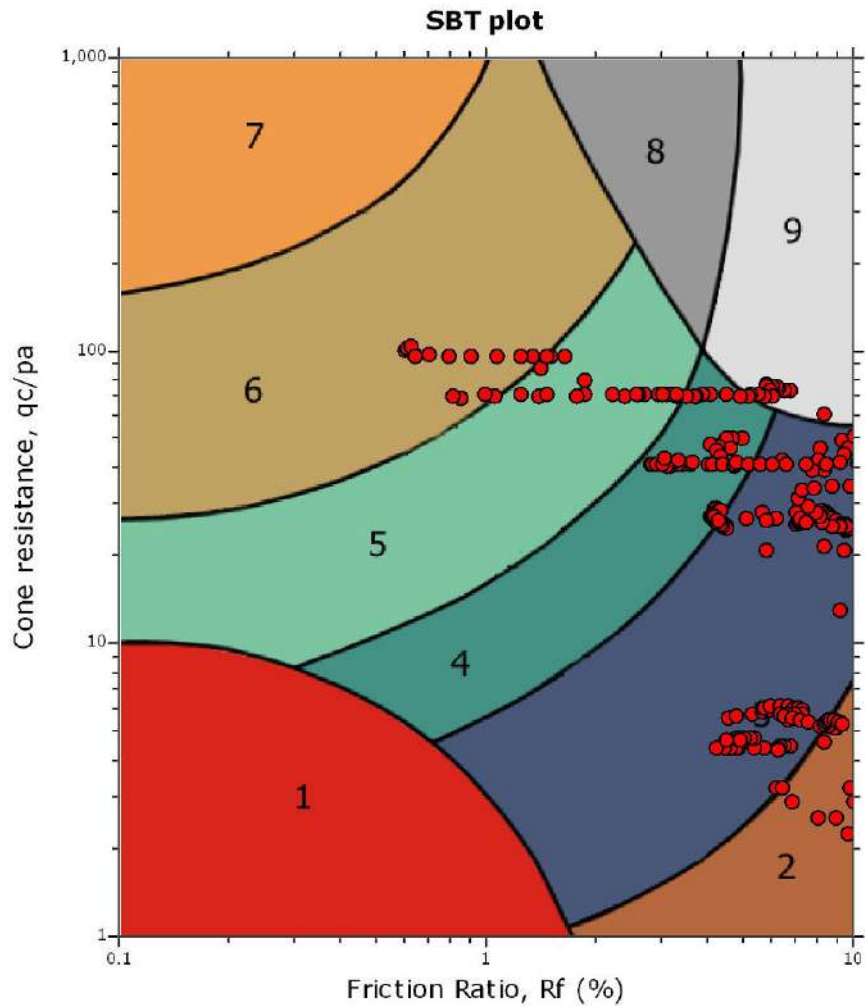


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



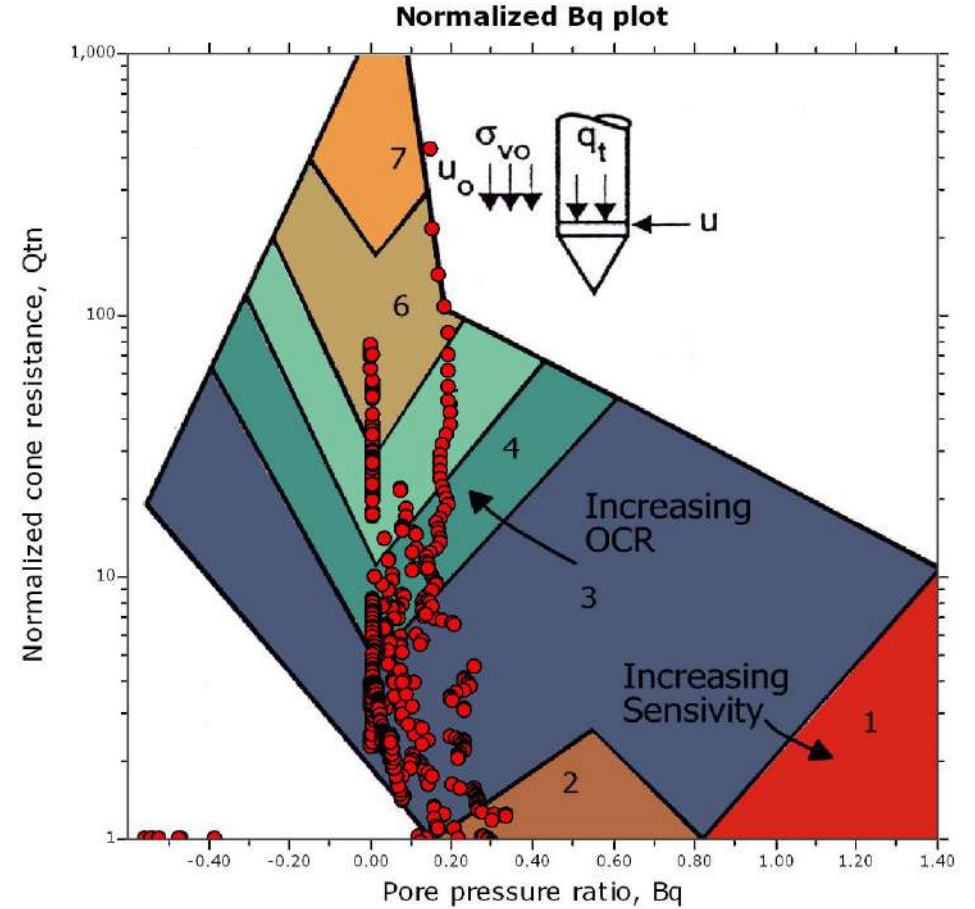
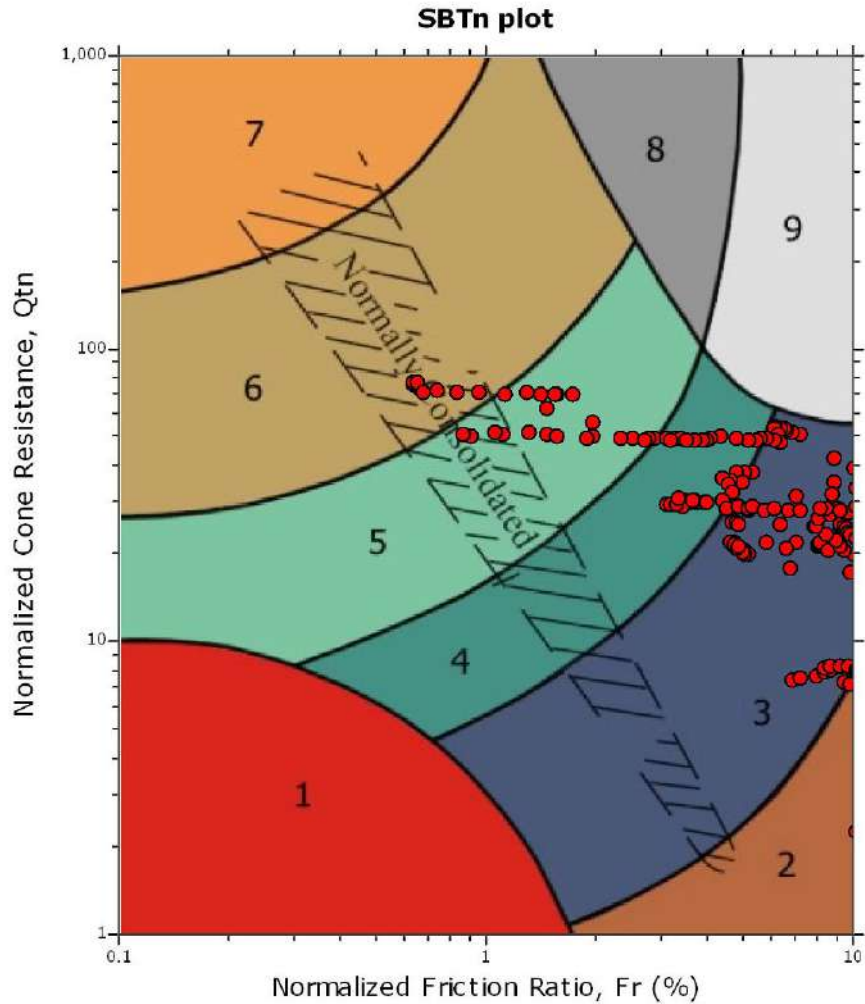
SBT - Bq plots



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 dayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |

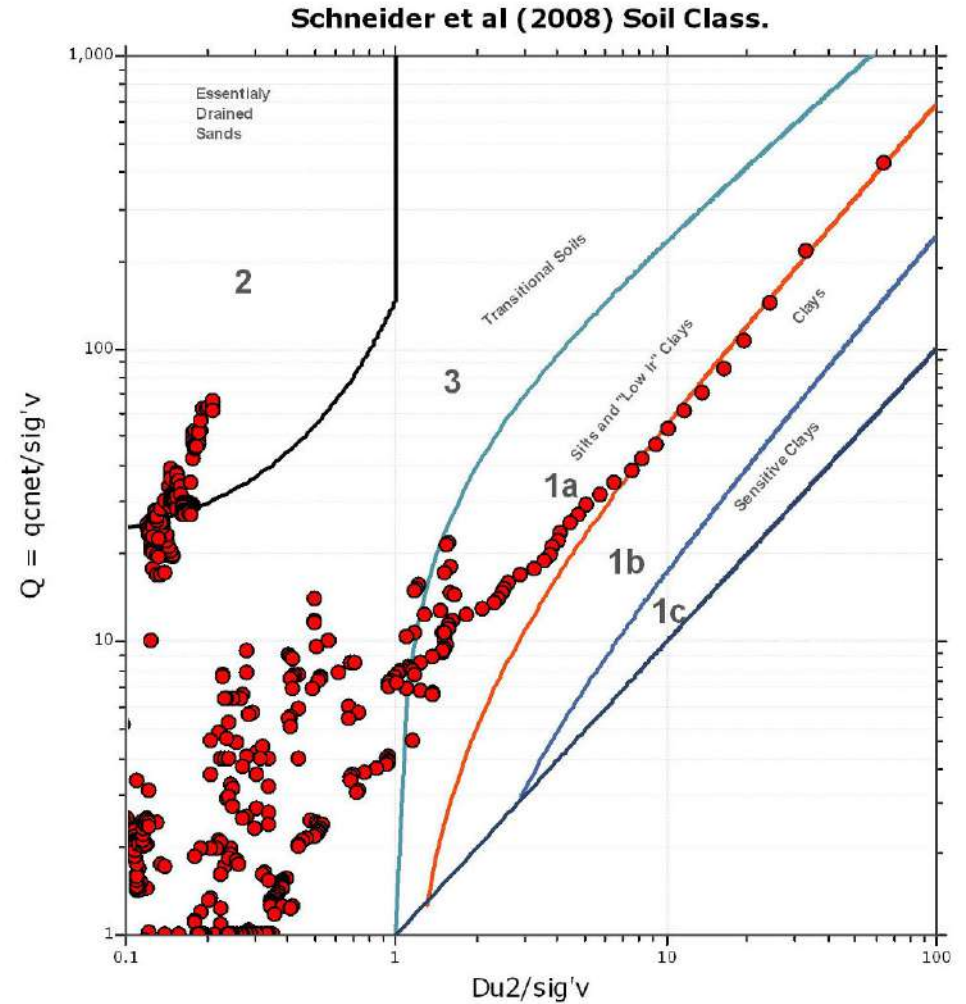
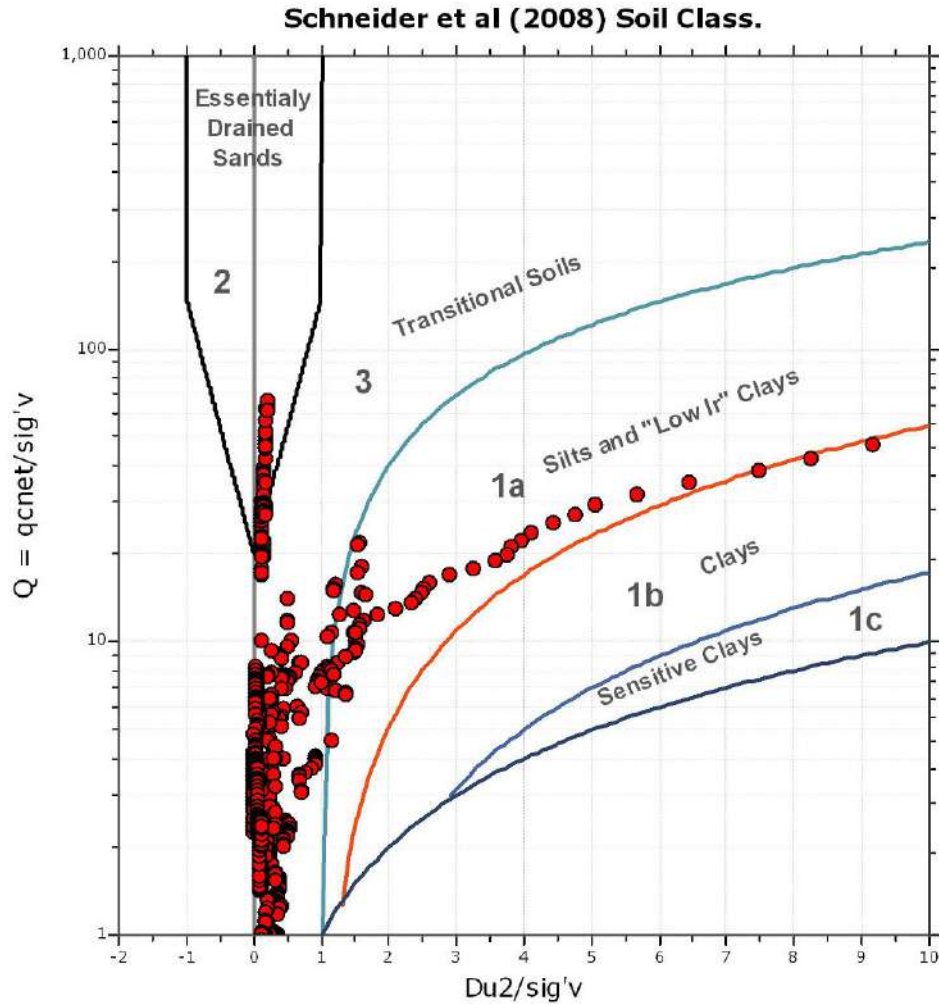
SBT - Bq plots (normalized)

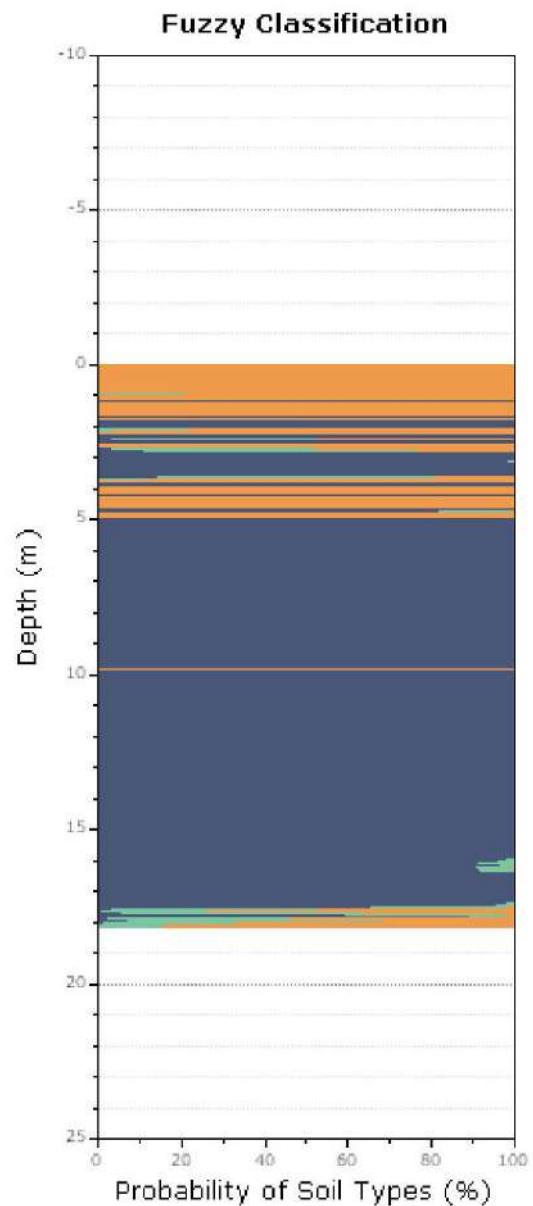
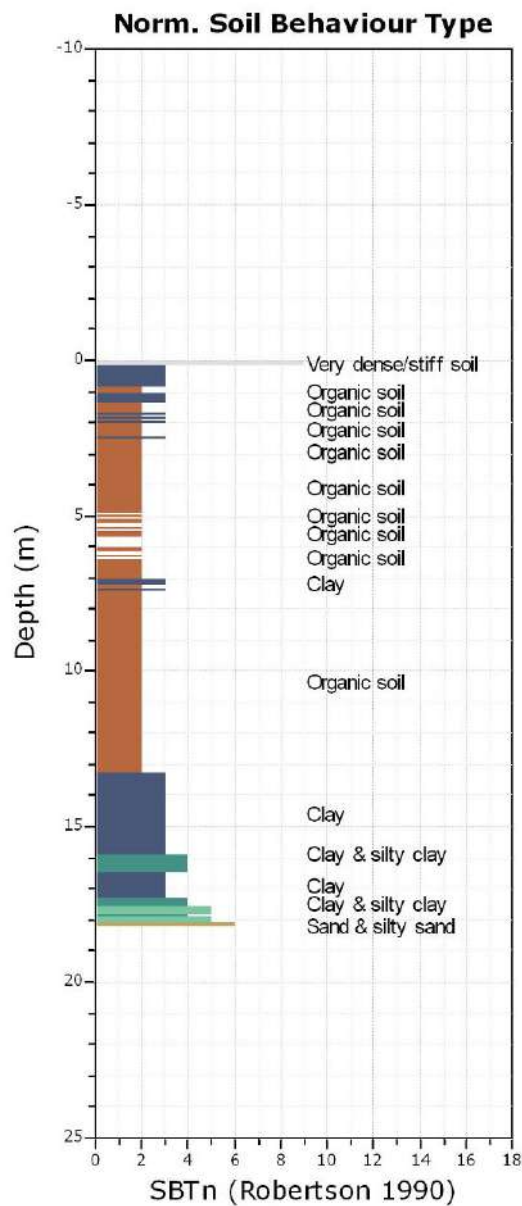


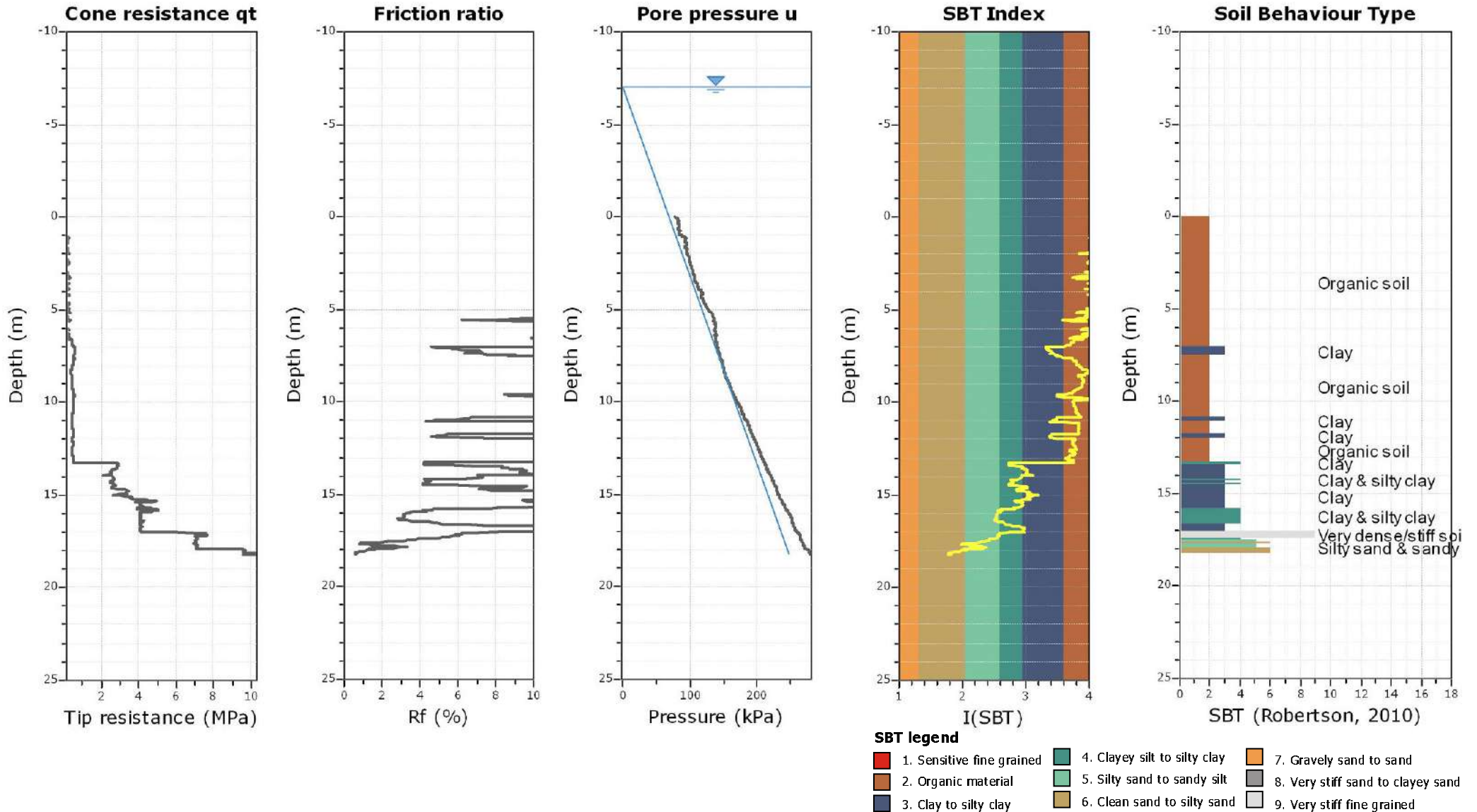
SBTn legend

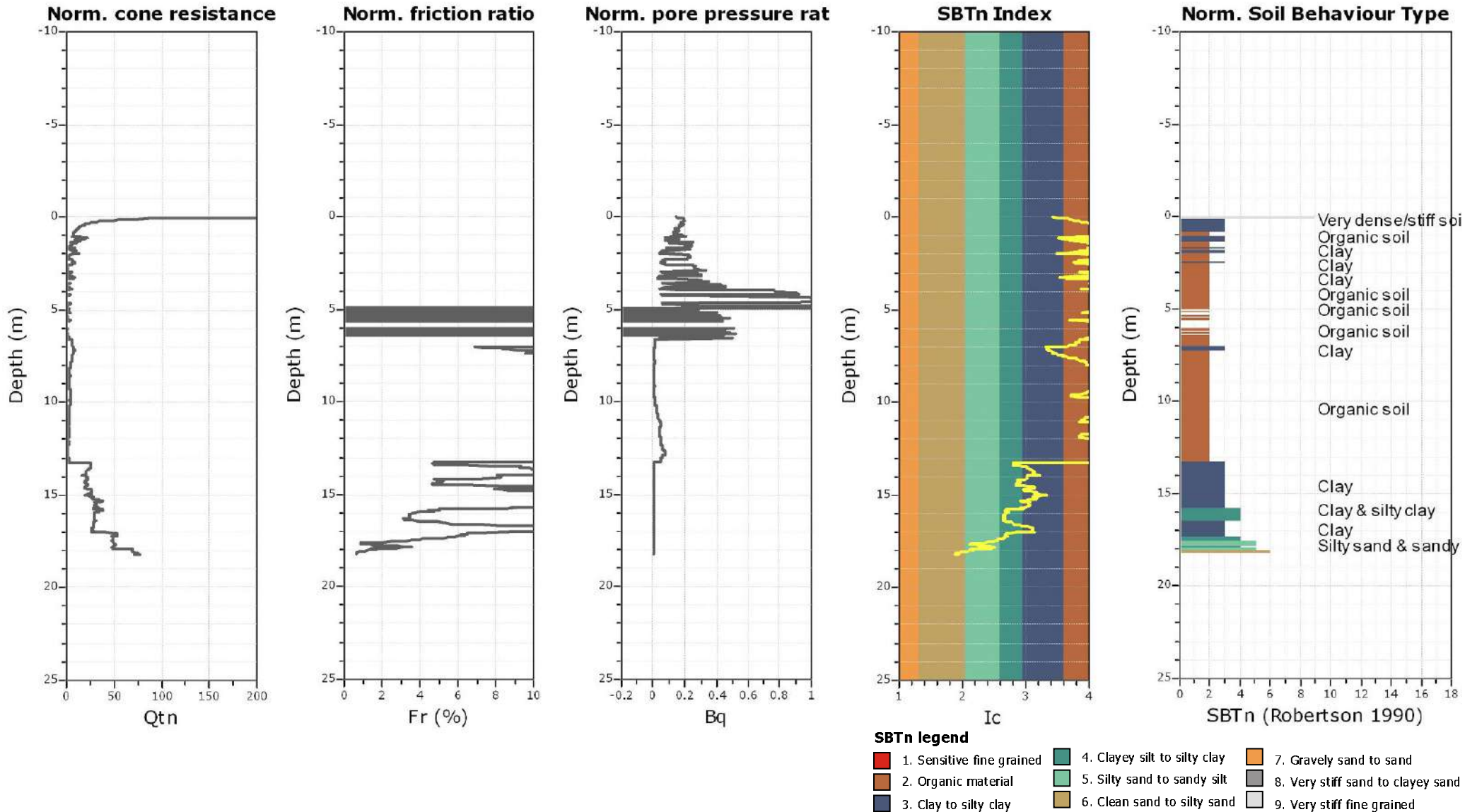
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

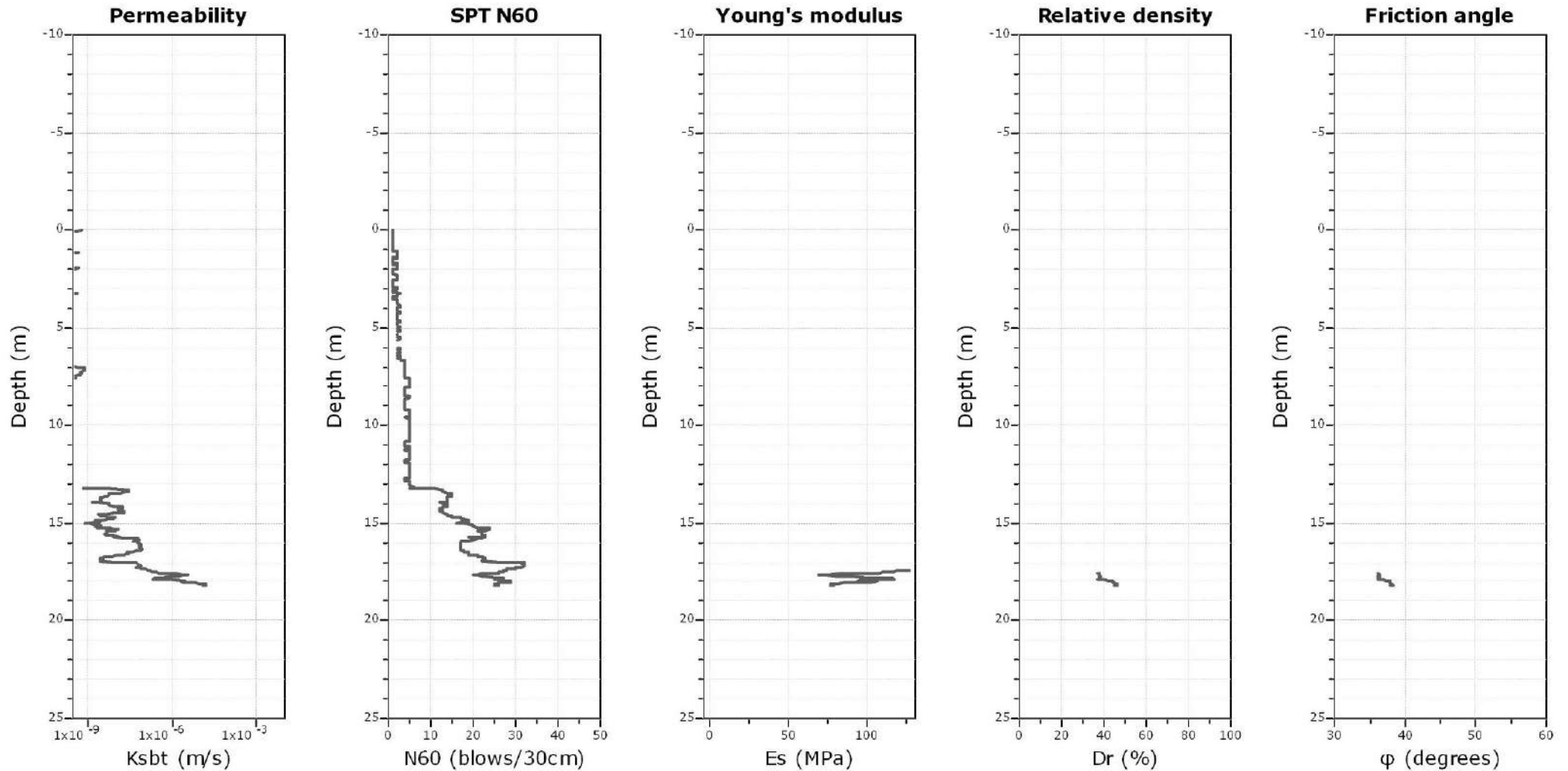
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

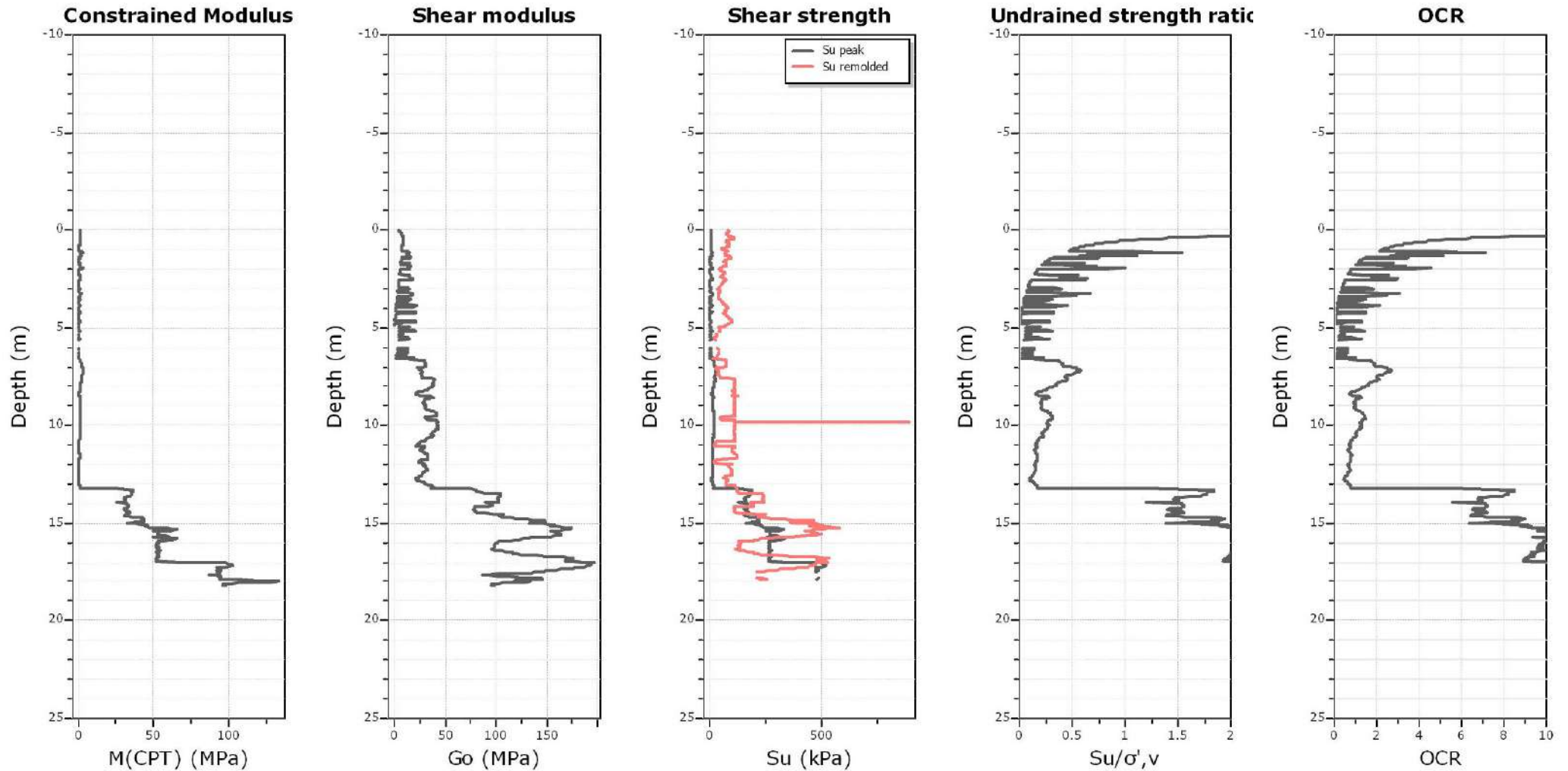
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

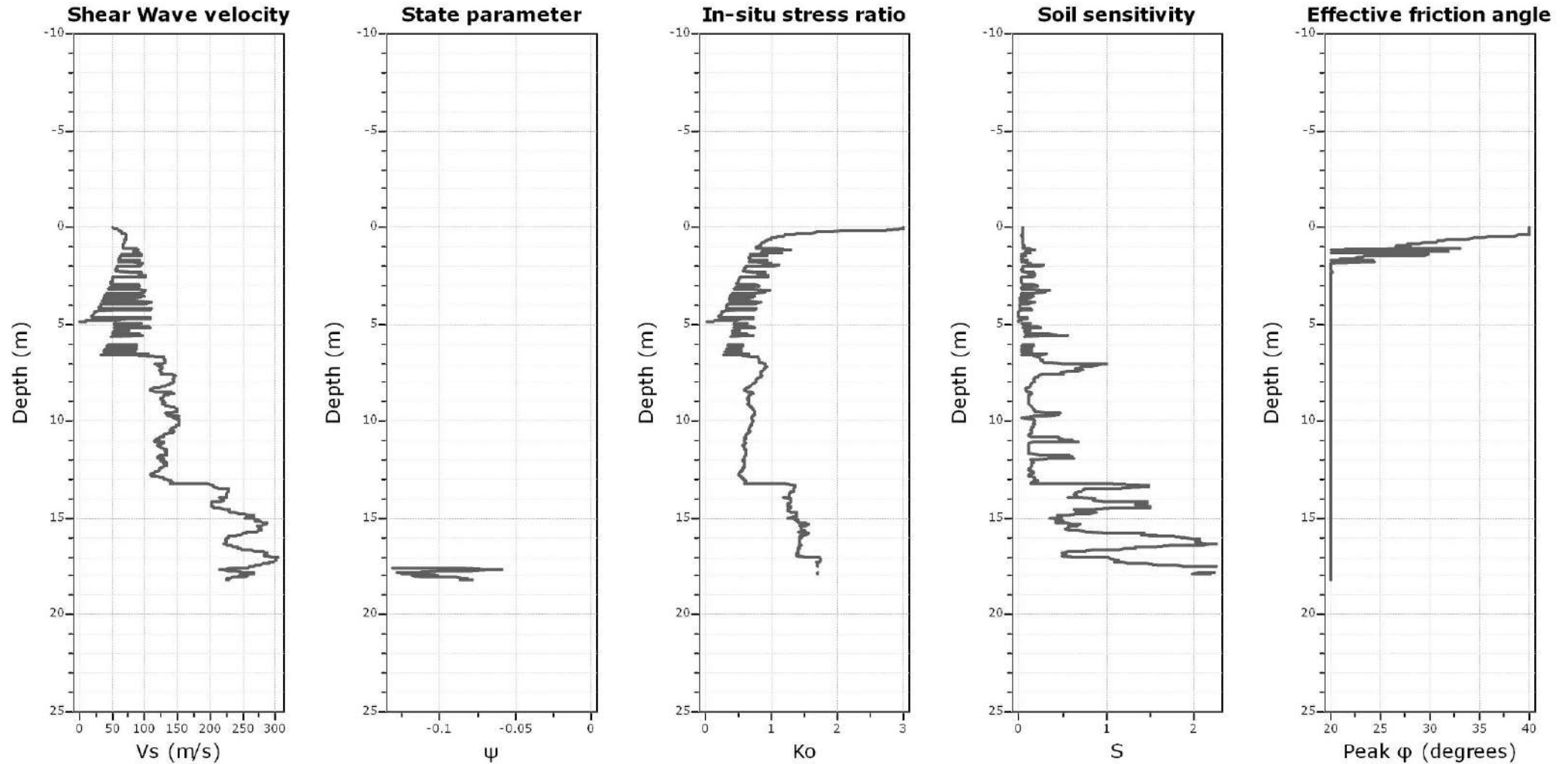
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

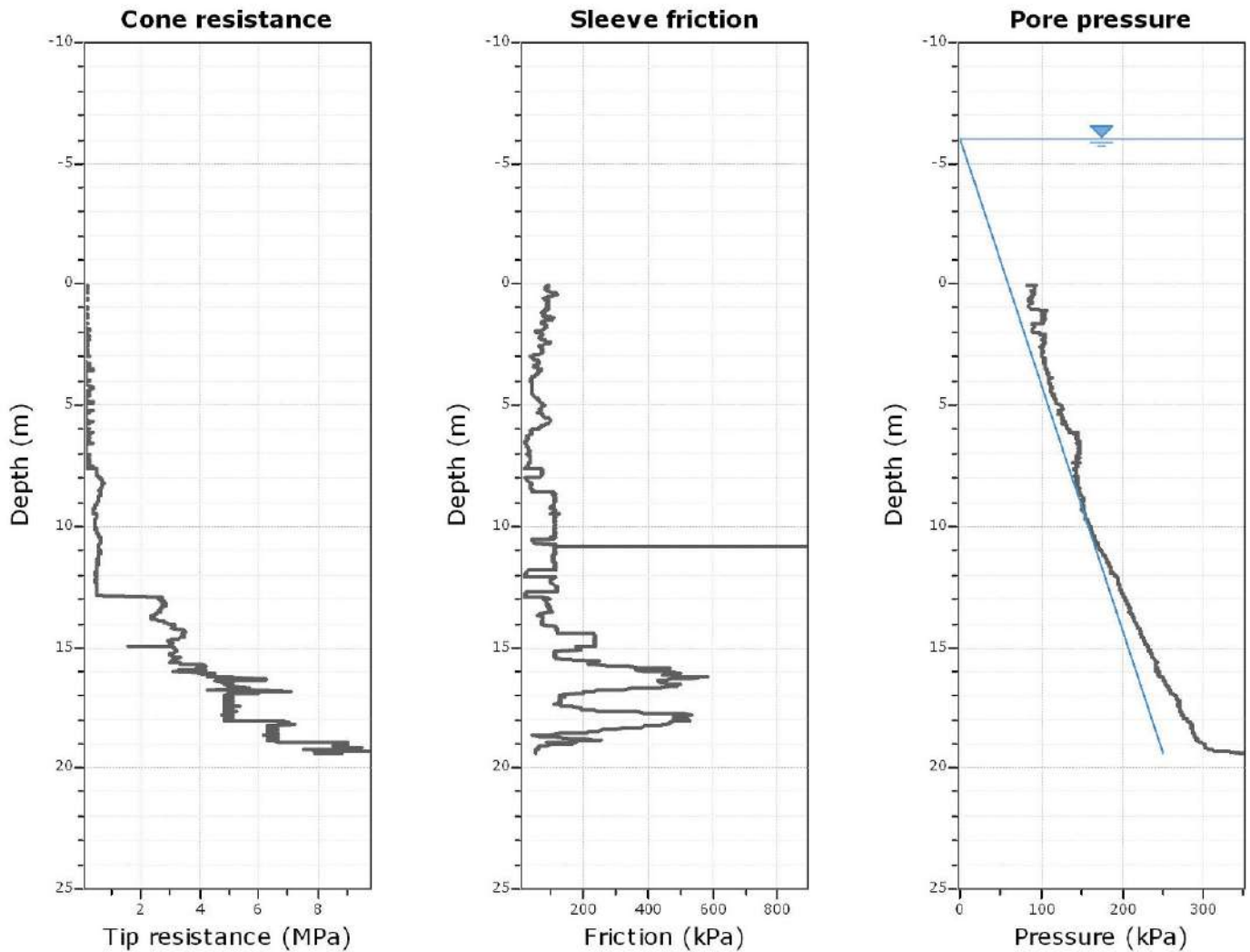
● — User defined estimation data



Calculation parameters

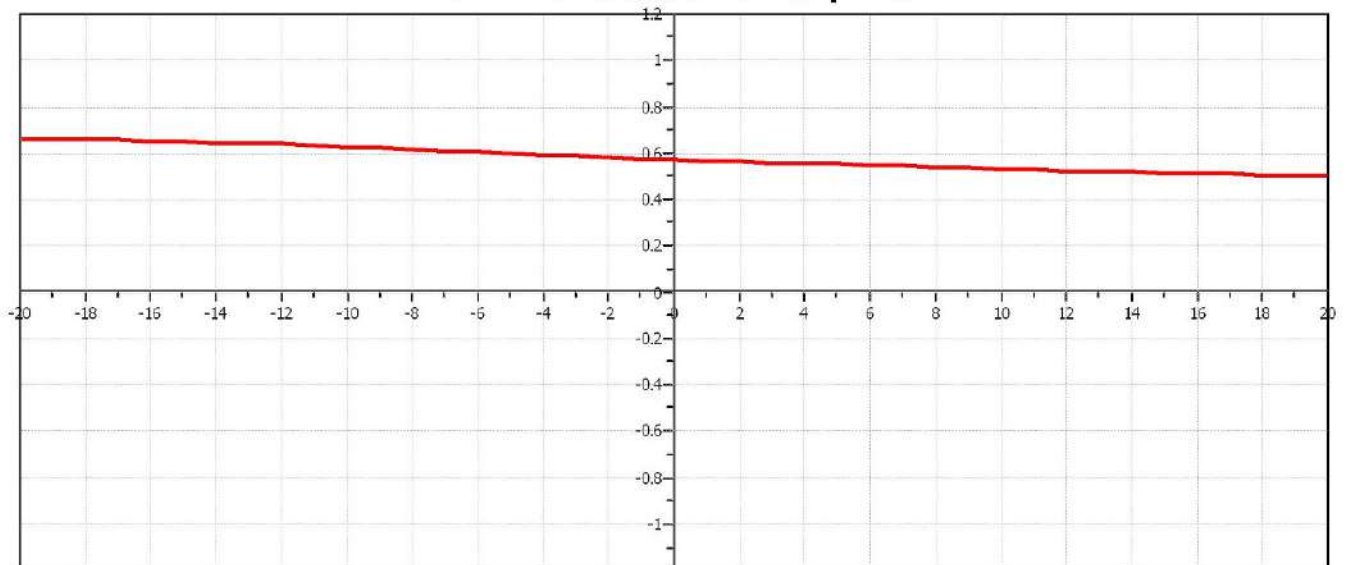
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

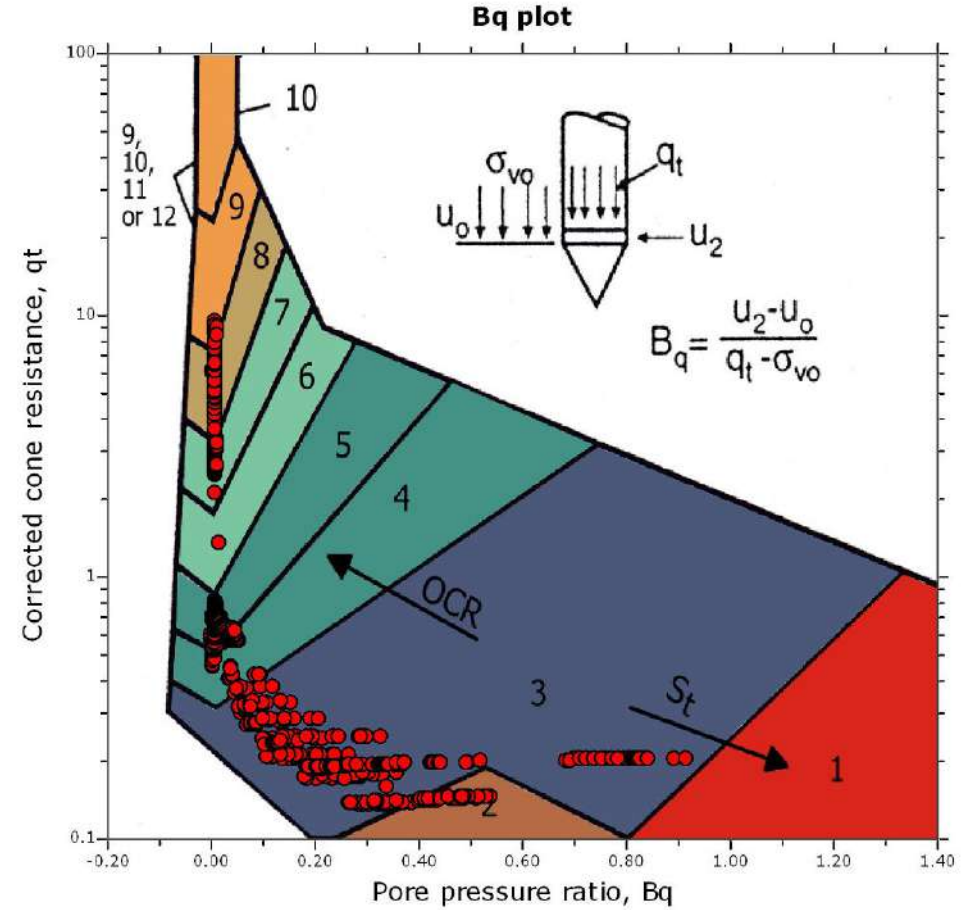
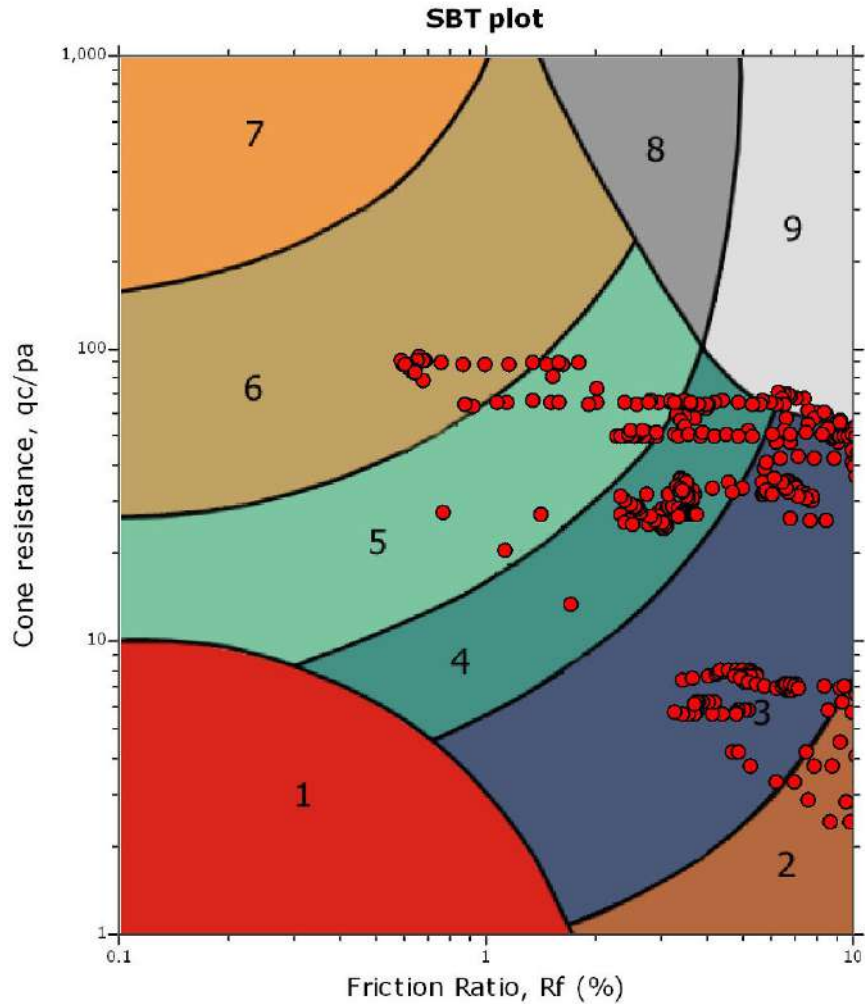


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s



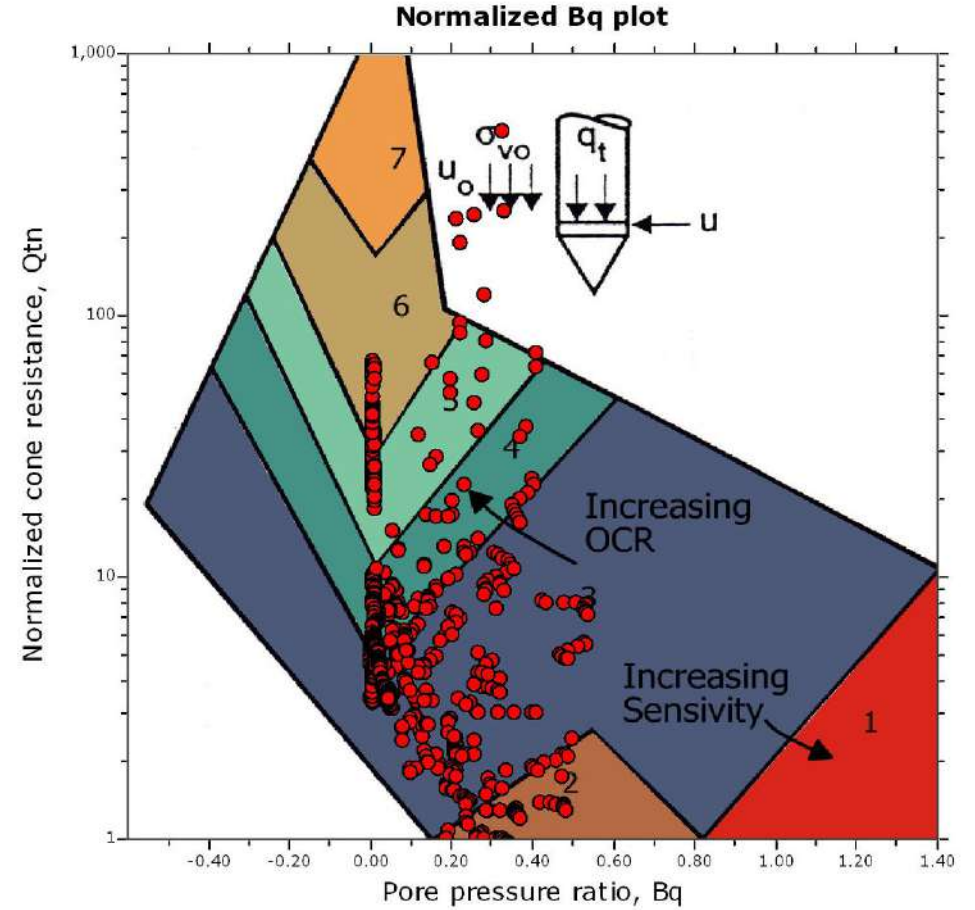
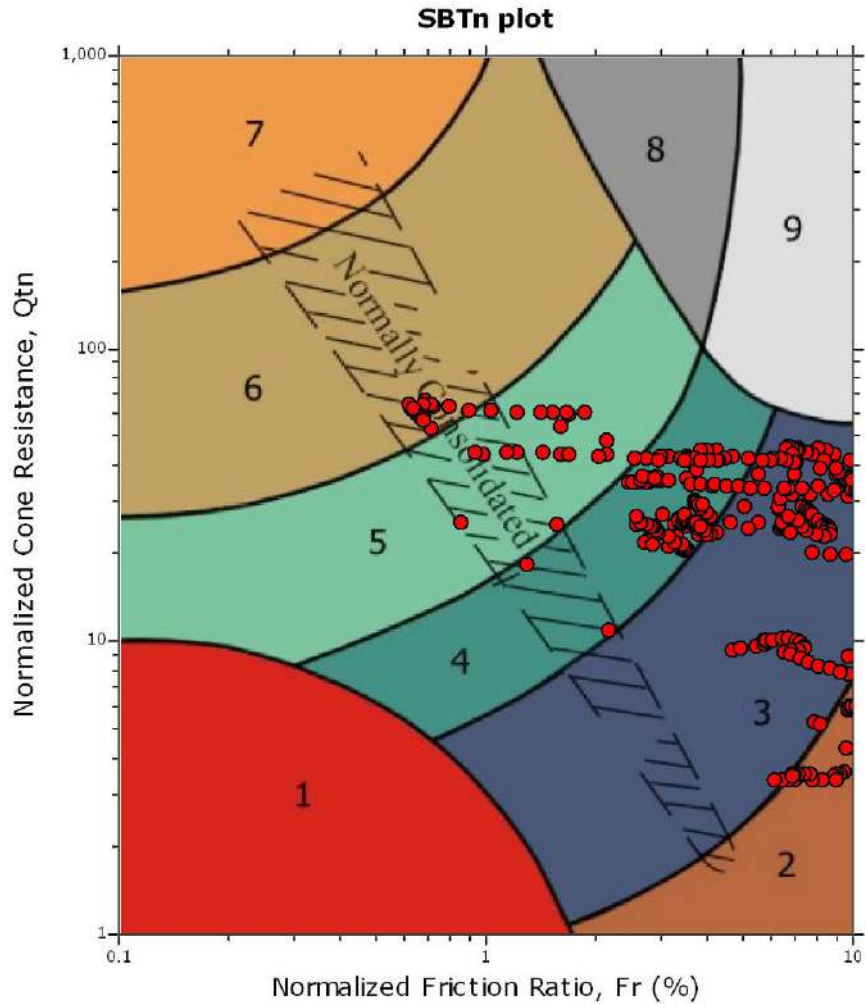
SBT - Bq plots



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 |

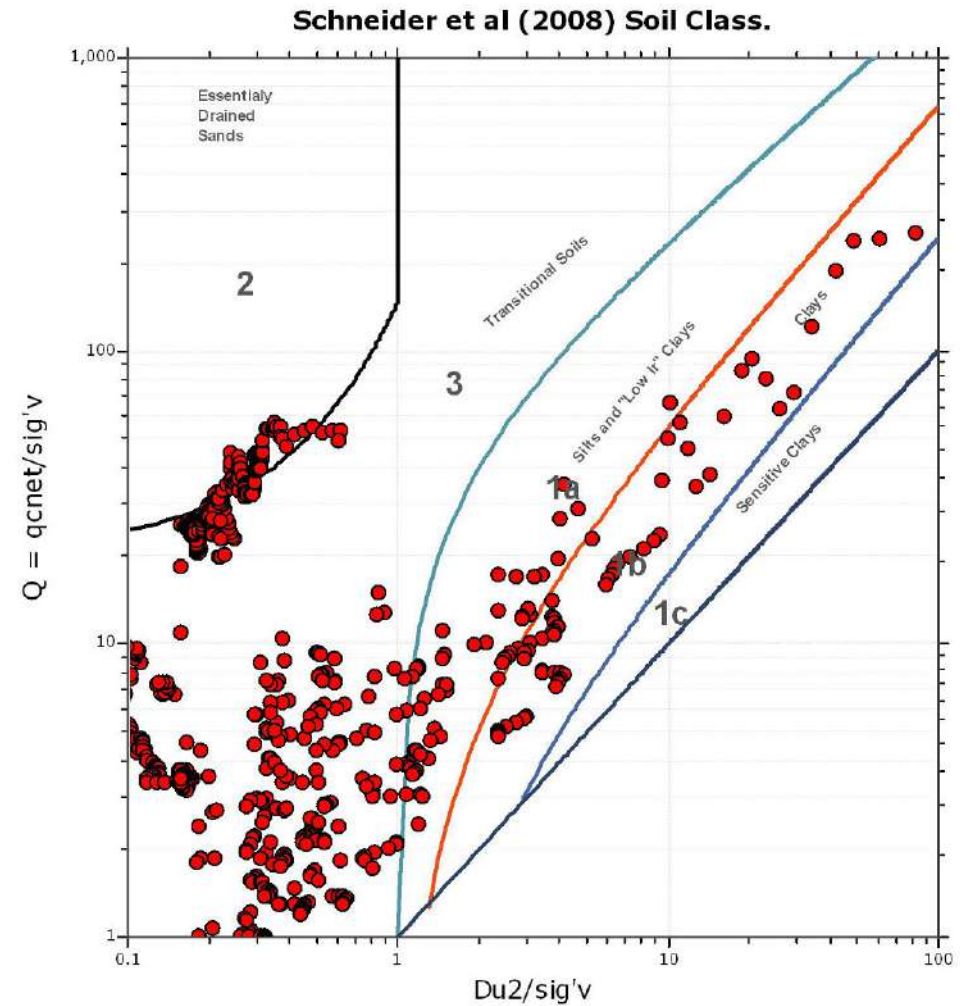
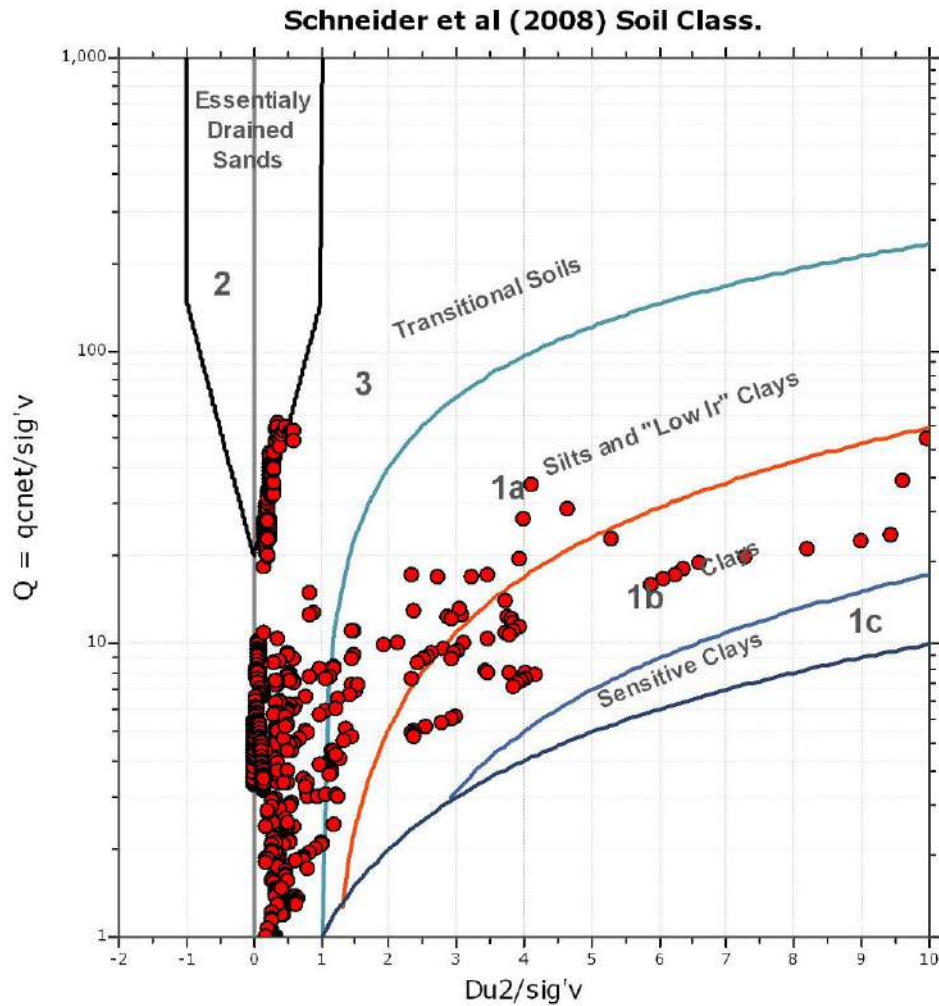
SBT - Bq plots (normalized)

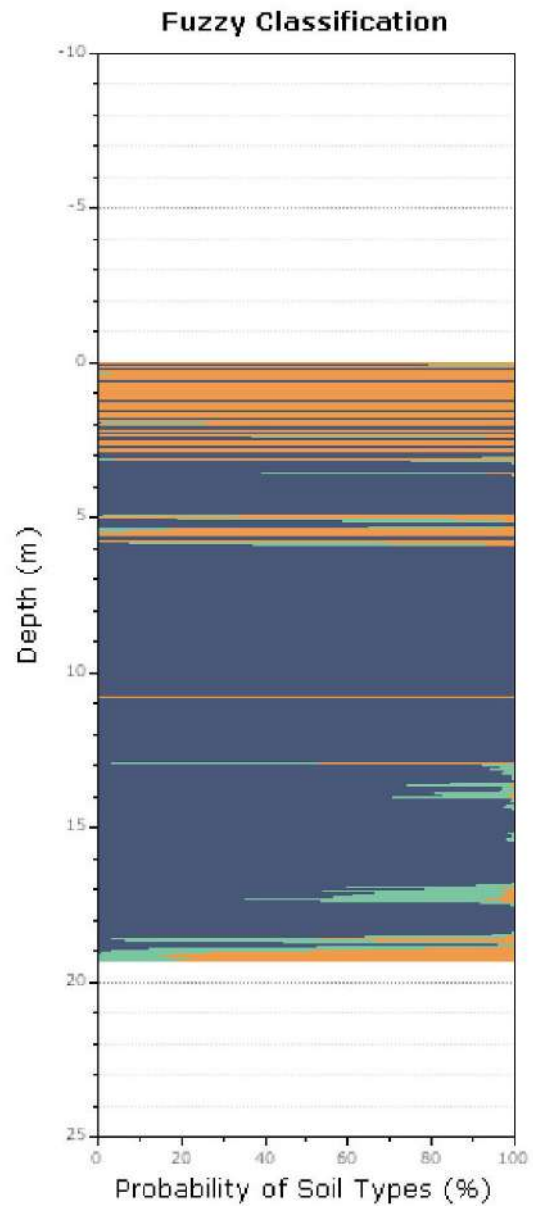
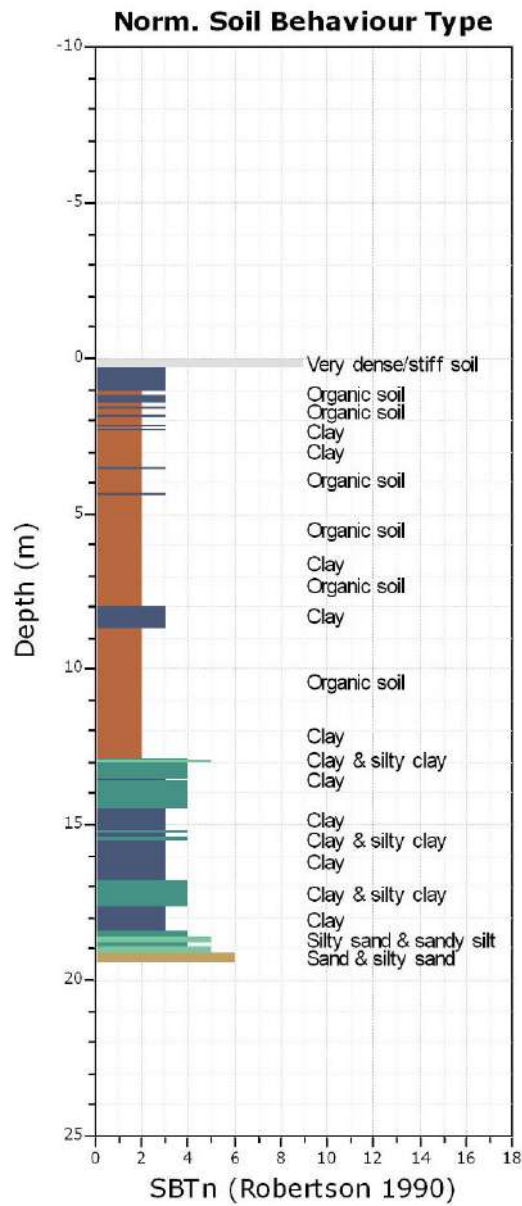


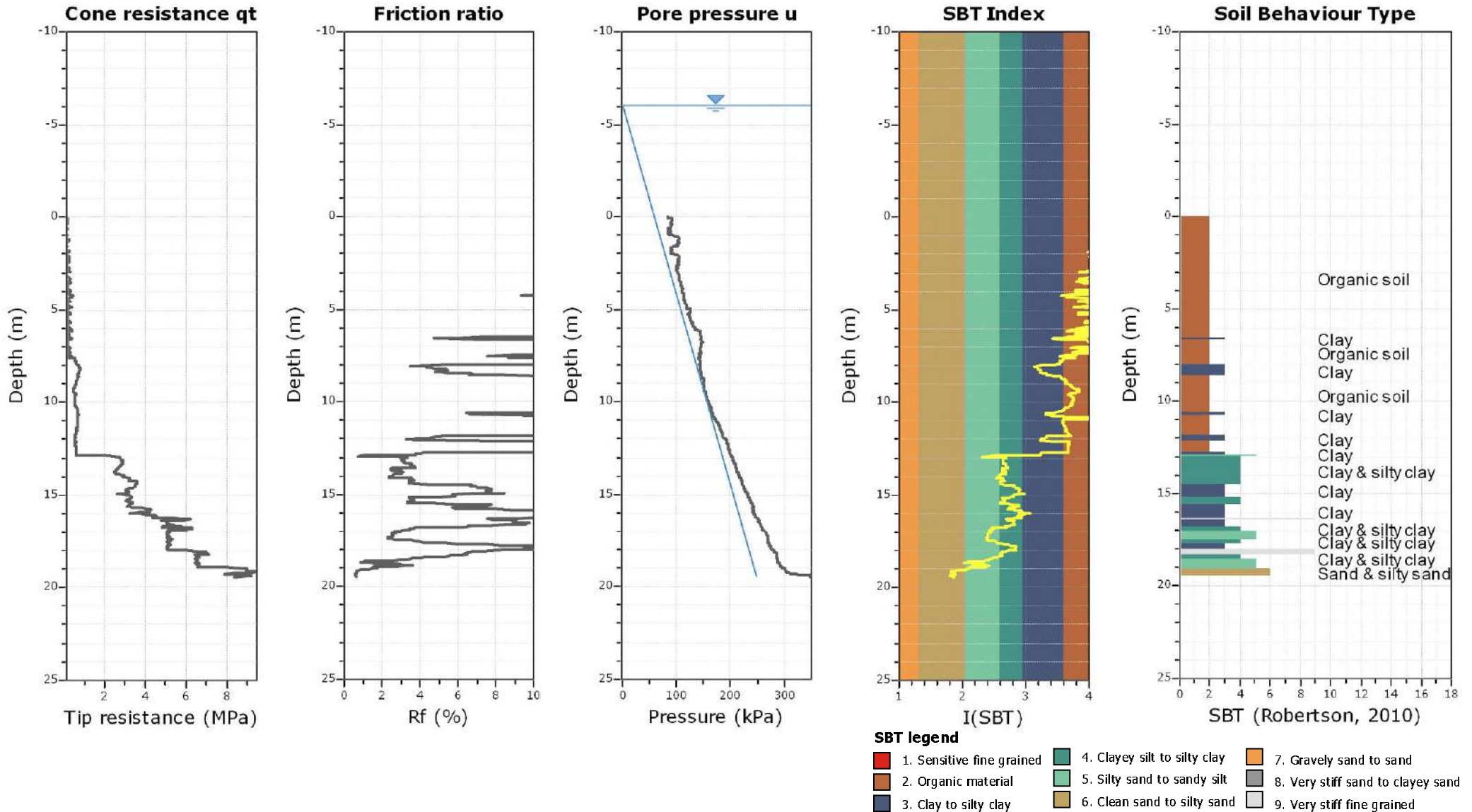
SBTn legend

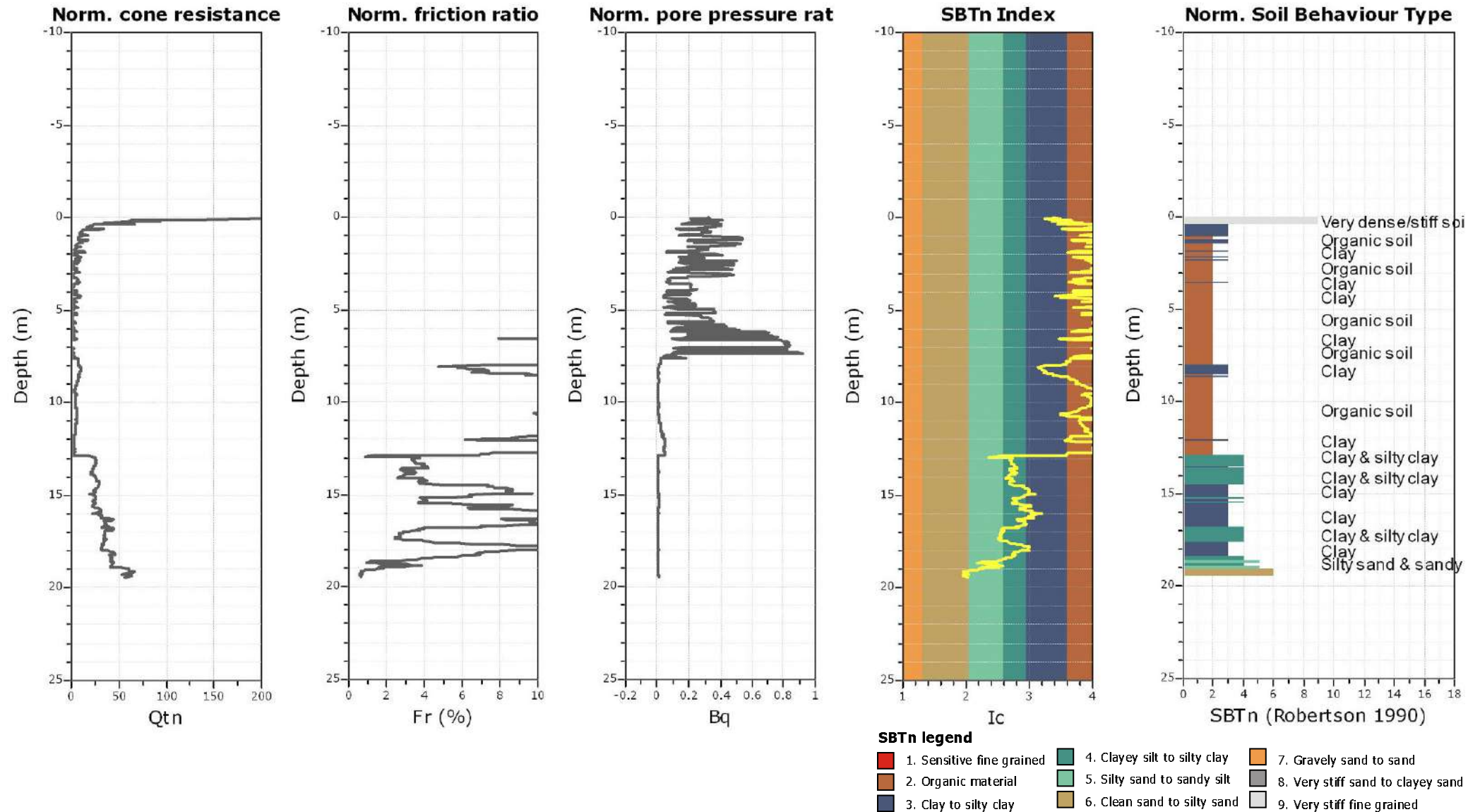
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to dayey sand |
| 3. Clay to silty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

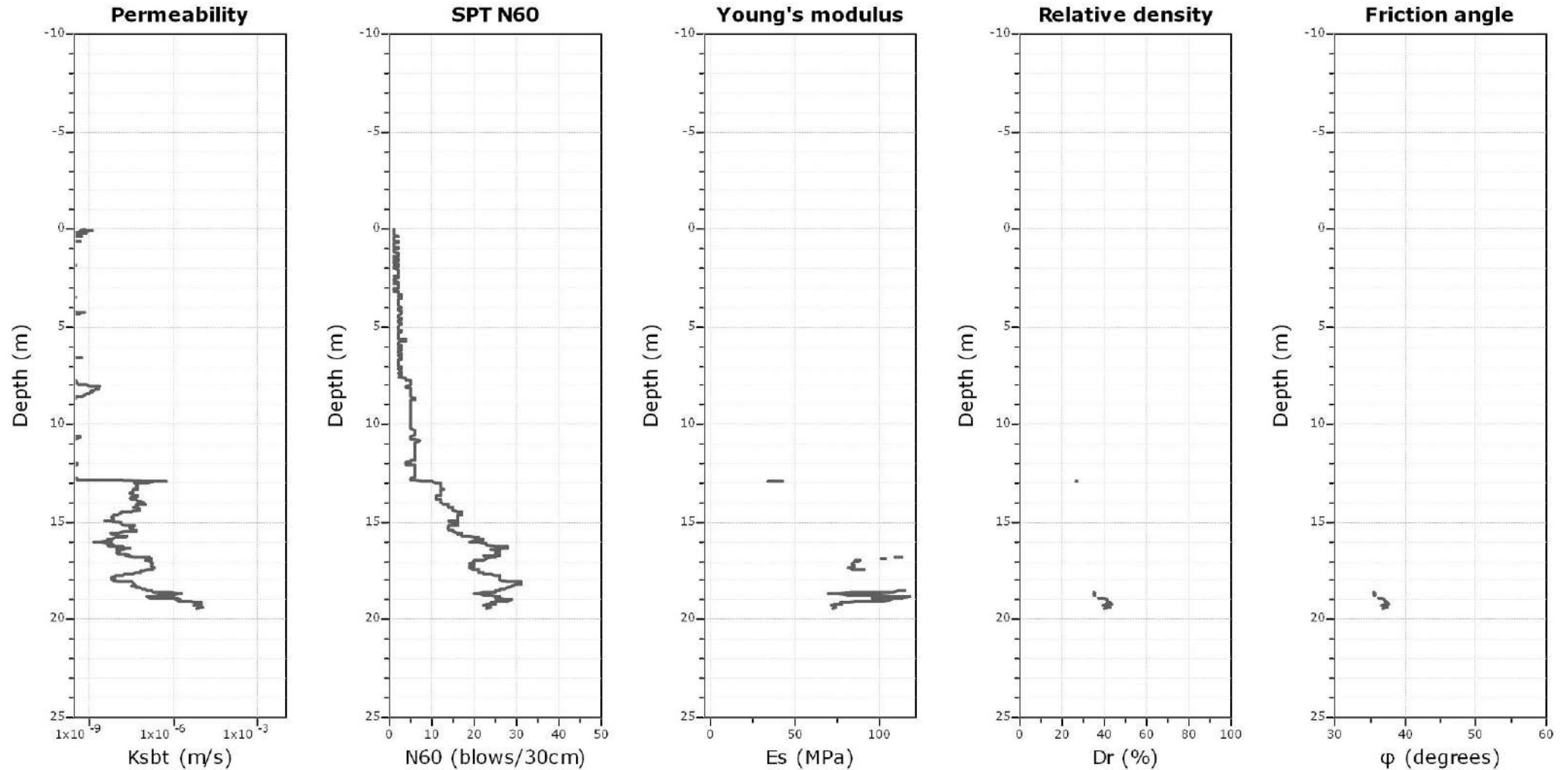
Bq plots (Schneider)











Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

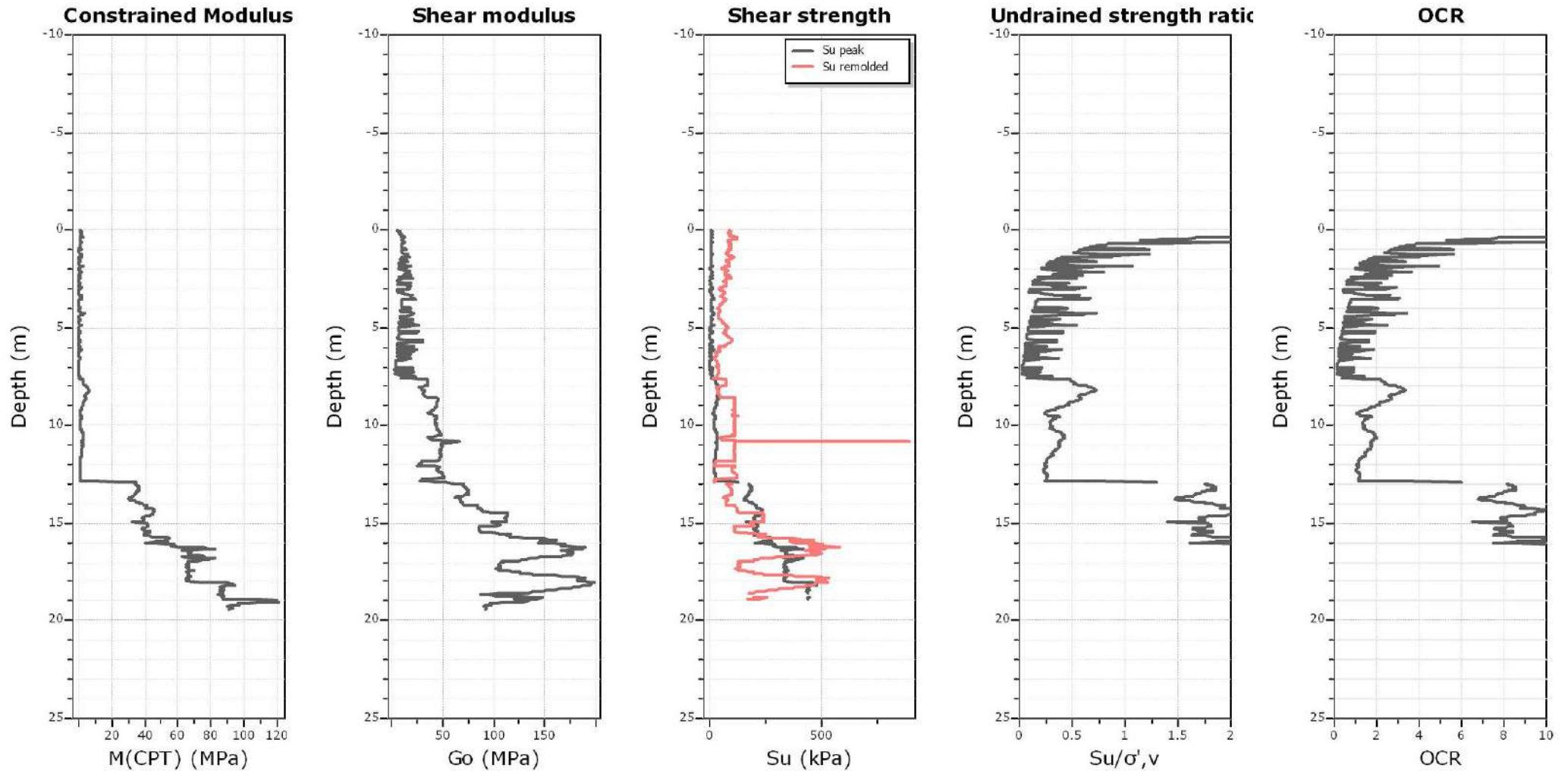
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_D: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

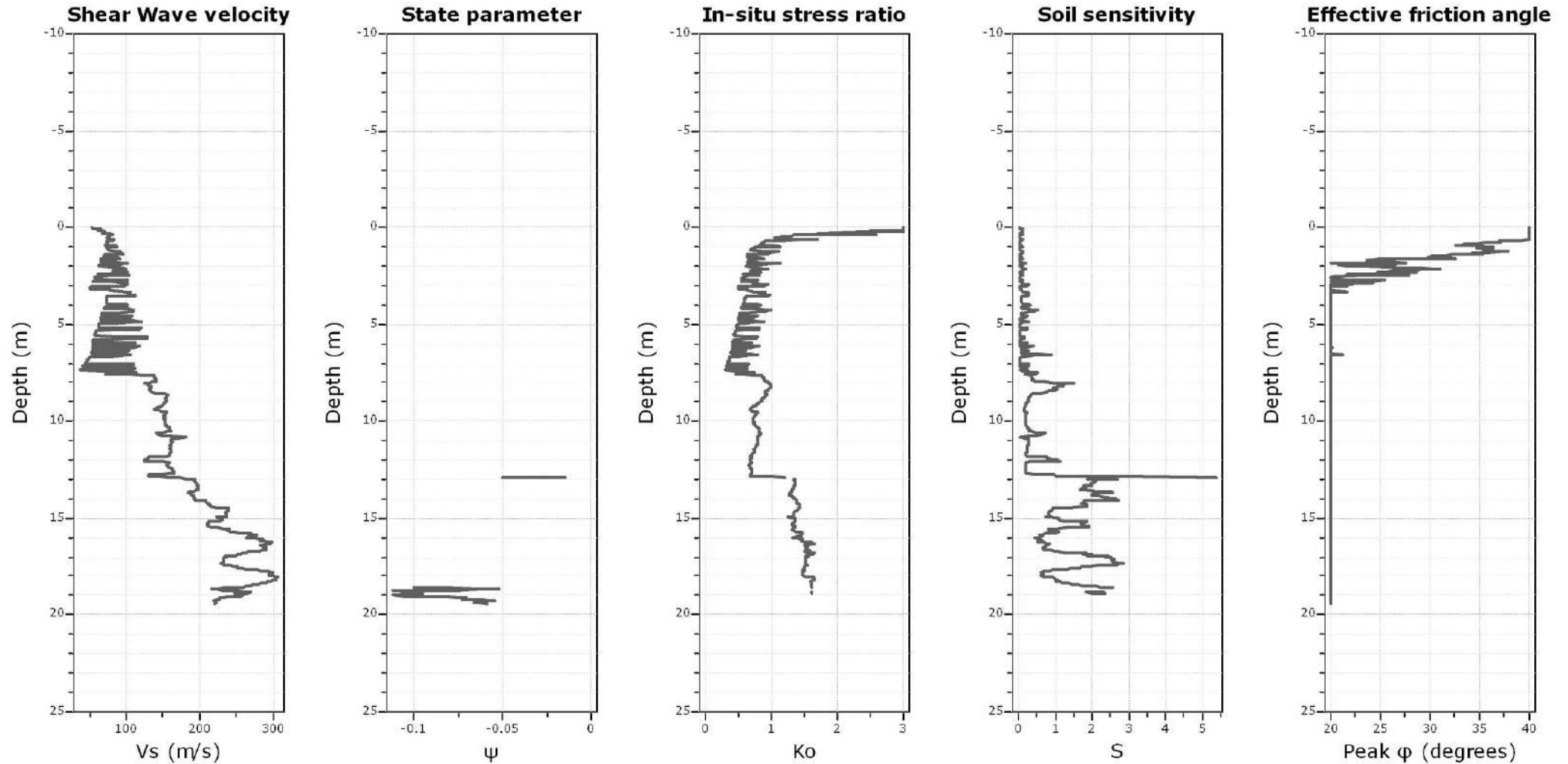
Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{tn} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable *alpha* 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



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

● User defined estimation data

Presented below is a list of formulas used for the estimation of various soil properties. The formulas are presented in SI unit system and assume that all components are expressed in the same units.

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

$$g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where g_w = water unit weight

:: Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

:: N_{SPT} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

:: 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, Dr (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad (\text{applicable only to } SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

:: 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 $SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8$)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

If $I_c > 2.20$

$$\alpha = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$\alpha = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

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) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) ::

$$S_{u(rem)} = f_s \quad (\text{applicable only to } SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \text{ or } I_c > I_{c_cutoff})$$

:: 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 $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'}$$

(applicable only to $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Soil Sensitivity, S_t ::

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

(applicable only to $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ 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 $0.10 < B_q < 1.00$)

References

- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5th Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)