

**POROČILO O CPTU MERITVAH NA OBMOČJU MALEGA GRABNA in
GRADŠČICE**

Projekt: GG poročilo za zagotavljanje poplavne
varnosti JV dela Ljubljane; etapa 1A
(št.poroč. IC 6/016)

Datum: 30.03.2017

Izvedba meritev:
Miha Petrenel, teh
Marjan Filipič, teh

Obdelava meritev:
Marjan Filipič, teh

Priprava poročila:
Marjan Filipič, teh.
Mag. Brane Merhar, u.d.i.geol.

VSEBINA

1. UVOD

2. POSTOPKI IZRAČUNA GEOMEHANSKIH PARAMETROV

2.1 Postopki izračunavanja geomehanskih parametrov in klasifik. zemljin

- 2.1.1 Klasifikacija zemljin
 - 2.1.2 Konsistenčno in gostotno stanje zemljin
 - 2.1.3 Nedrenirana strižna trdnost
 - 2.1.4 Kvocient nedrenirane strižne trdnosti
 - 2.1.5 Modul stisljivosti
 - 2.1.6 Modul elastičnosti
 - 2.1.7 Strižni modul pri majhnih deformacijah
 - 2.1.8 Koeficient prekonsolidacije
 - 2.1.9 Strižni kot
 - 2.1.10 Relativna gostota
 - 2.1.11 Standardni penetracijski test - SPT
 - 2.1.12 Disipacijski testi
-

PRILOGE

Priloga 1: Grafični prikaz rezultatov CPT meritev.

Priloga 2: Grafični prikaz in obdelava rezultatov meritev modula stisljivosti

1. UVOD

S sondiranjem s statičnim penetrometrom CPT smo zvezno ugotavljali slojevitost in geomehanske parametre tal na obravnavanem območju.

Za CPT preiskave smo uporabili stroj za vtiskanje (penetrometer) TG 63-100 proizvajalca PAGANI, opremljenega z merilno konico površine 10cm^2 in z oznako MH162 (št. certifikata o umeritvi 083/10 z dne 28.10.2010).

Sondirali smo do globin, kjer je bila izkoriščena razpoložljiva sila vtiskanja, ali pa razpoložljivo merilno območje na senzorjih. Končna globina sondiranja pri večini izvedenih preiskav je bila med 8-10m. Količina izvedenih preiskav in globina posameznih sond je razvidna iz preglednice 1, grafični prikaz rezultatov posameznih sondiranja pa je prikazan v prilogi 1.

Preglednica 1: Seznam izvedenih CPTU preiskav.

Območje	Objekt	Sonda	Globina
			m
A	zid 1	CPTU-1	10
		CPTU-Z1	10
		CPTU-Z2	10
		CPTU-2	10
B	zid 2	CPTU-Z4	10
D	zid 3	CPTU-Z6	10
		CPTU-Z7	10
		CPTU-7a	10
		CPTU-Z8a	10
		CPTU-Z10	8

Območje	Objekt	Sonda	Globina
			m
E	zid 3	CPTU-Z11	10
		CPTU-Z12	10
		CPTU-Z13	1,7
		CPTU-8	7
	zid 4	CPTU-Z14	9
		CPTU-Z15	8
F	zid 5	CPTU-Z16	8,3
		CPTU-Z17	7,9
		CPTU-Z18	9
		CPTU-N2	8,6
B	razbremenilnik	CPTU-13a	10,2
		CPTU-14	8
skupaj 22 sond			187,7

Preiskave smo opravili skladno s standardoma SIST EN 1997-2:2007 in oSIST pr EN ISO 22467-1:2005, kabinetno obdelavo merjenih vrednosti pa smo izvedli s programsko opremo CPeT-IT (ver. 1.6). V nadaljevanju podajamo nekaj osnovnih informacij o poteku izračunavanja parametrov.

2. POSTOPKI IZRAČUNA GEOMEHANSKIH PARAMETROV

Izmerjene in nekorrigirane podatke odpora pod konico q_c , trenja po plašču f_s in dinamičnih pornih tlakov u_2 , prikazujemo v grafični obliki v prilogah, kjer je podana tudi navzkrižna korelacija ujemanja med q_c in f_s . Ker je senzor odpora pod konico nameščen nekaj cm pred senzorjem trenja po plašču, ponavadi nastane do zaostajanja merjenih podatkov f_s za q_c . Po potrebi nato izvedemo sinhronizacijo merjenih parametrov.

Upoštevali smo tudi vplive odklona drogova na registrirano globino. Vrednosti odpora pod konico q_c smo korigirali zaradi vpliva dinamičnih pornih tlakov:

$$q_t = q_c + u_2 \left(1 - \frac{A_n}{A_c}\right)$$

kjer je

q_t korigiran odpor konice

q_c merjen odpor konice

u_2 dinamični porni tlak

A_c površina konice na katero deluje sila odpora zemljine (1000 mm²)

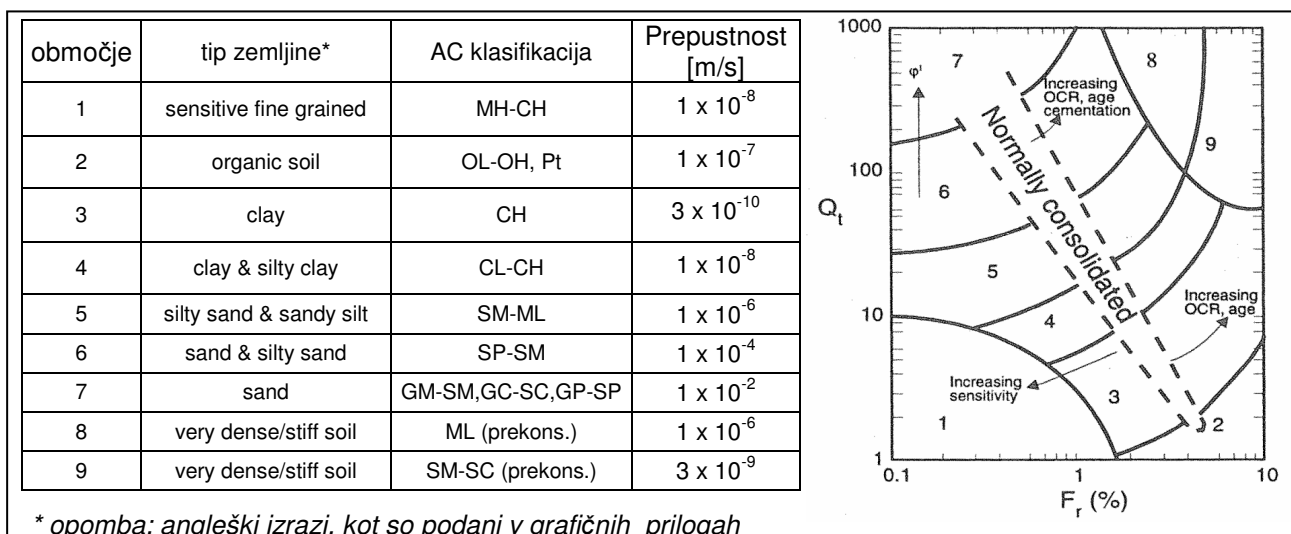
A_n efektivni merski prerez (580 mm²)

Vpliva dinamičnih pornih tlakov na trenje po plašču nismo korigirali.

2.1 Postopki izračunavanja geomehanskih parametrov in klasifik. zemljin

2.1.1 Klasifikacija zemljin

Klasifikacijo zemljin smo izvršili na osnovi izmerjenih in izračunanih parametrov. Obstaja več postopkov klasificiranja, uporabljena programska oprema upošteva le dve. V prilogah prikazujemo le klasifikacijo, ki temelji na normaliziranem trenjskem razmerju F_r ter normaliziranem odporom pod konico Q_t (Robertson, 1990). Po tej klasifikaciji se zemljine razdeli v 9 značilnih podskupin, ki so grafično prikazane na sliki 1.



Slika 1, preglednica 2: Klasifikacija zemljin iz normaliziranih vrednosti CPTU preiskav (Robertson, 1990)

Normalizirana vrednost trenjskega razmerja F_r je določena kot:

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{vo}) \times 100\%$$

Normalizirana vrednost odpora pod konico Q_t (v prilogah oznaka Q_{tn}) pa kot:

$$Q_m = ((q_t - \sigma_{vo}) / p_a) \times (p_a / (\sigma'_{vo}))^n$$

kjer je

Q_{tn} normaliziran odpor konice
 q_t korigiran odpor konice
 p_a referenčna napetost (zračni tlak – 100 kPa)
 σ_{v0} totalna vertikalna napetost
 σ'_{v0} efektivna vertikalna napetost
 n iteracijski eksponent določen kot

$$n = 0,381 \times I_c + 0,05 \times \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0,15$$

Iteracijski eksponent n vključuje indeks obnašanja zemljine I_c , ki upošteva normalizirane vrednosti odpora pod konico in trenja po plašču v naslednji obliki:

$$I_c = ((3,47 - \log Q_{t1})^2 + (\log Fr + 1,22)^2)^{0,5}$$

Q_{t1} je v začetnem primeru enak $Q_{t1} = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$, nato pa se v postopku iteracije Q_{t1} nadomesti z Q_{tn} , dokler ni sprememba n , $\Delta_n < 0,01$. Postopek iteracije povzemamo po originalnih navodilih programa CPeT-IT.

Tako razvrščanje zemljin na podlagi CPTU preiskav je zgolj orientacijsko in služi kot opora za nekatere nadaljne izračune, saj prenekateri izračuni temeljijo na predpostavki, ali zemljini pripišemo koherentne ali nekoherentne lastnosti.

V poročilu smo za iz vrednotenje geomehanskih parametrov upoštevali klasifikacijo iz normaliziranih vrednosti odpora pod konico in trenjskega razmerja (*Robertson 1990*).

2.1.2 Konsistenčno in gostotno stanje zemljin

Gostotno stanje nekoherentnih zemljin smo določili po kriterijih (*Bergdahl et al. 1993*):

q_t [kPa]	gostotno stanje
<2 500	zelo rahlo
2 500 – 5 000	rahlo
5 000 – 10 000	srednje gosto
10 000 – 20 000	gosto
> 20 000	zelo gosto

Za določitev konsistenčnega stanja koherentnih zemljin pa smo upoštevali :

q_t [kPa]	konsistenčno stanje
<200	židko do lahkognetno
200 - 400	lahkognetno
400 - 800	srednjegnetno
800 – 1 600	težkognetno
1 600 – 3 200	poltrdno
> 3 200	trdno

Gostotno in konsistenčno stanje preiskanih materialov je podano v obliki preglednic na prilogah.

2.1.3 Nedrenirana strižna trdnost

Za vsak interval koherentne zemljine določen na osnovi normaliziranega klasifikacijskega diagrama smo izračunali nedrenirano strižno trdnost s_u (Meigh, 1987), kjer smo upoštevali relacijo:

$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_k}$$

in kjer pomeni

s_u nedrenirana strižna trdnost

q_t odpor konice

σ_{vo} totalna prvotna vertikalna napetost na dani globini

N_k empirični faktor odvisen od tipa konice, OCR, stopnje cementacije itd. *

* Tipična vrednost $N_k = 10-20$. V prekonsolidiranih zemljinah je N_k večji kot pri normalno konsolidiranih. V našem izračunu smo upoštevali $N_k=16$

Podajamo tudi vrednosti rezidualne strižne trdnosti, ki je direktno izmerjena iz vrednosti trenja po plašču $f_s = s_u \text{ remoulded}$.

2.1.4 Kvocient nedrenirane strižne trdnosti

Kvocient nedrenirane strižne trdnosti s_u/σ_{vo} je uporaben predvsem za indikacijo prekonsolidiranih zemljin (je v direktni povezavi z OCR), obravnava pa ga mehanika tal kritičnega stanja, ki določa obnašanje zemljin pri različnih efektivnih napetostnih stanjih.

2.1.5 Modul stisljivosti

V odvisnosti od globine podajamo oceno modula stisljivosti M . Uporabljena programska oprema za interpretacijo CPeT-IT ga izračuna kot (Robertson 2009):

$$M = \alpha_M \times (q_t - \sigma_{vo})$$

Koeficient α_M je izražen v odvisnosti od indeksa obnašanja zemljine I_c :

v primeru $I_c > 2.20$ $\alpha_M = Q_t$ (če je $Q_t < 14$) in $\alpha_M = 14$ (če je $Q_t > 14$).

v primeru $I_c < 2.20$ $\alpha_M = 0.0188 \times (10^{(0.55 \times I_c + 1.68)})$

2.1.6 Modul elastičnosti

Youngov Modul elastičnosti E_s je določen na materialih z indeksom obnašanja $I_c < 2.60$ in predstavlja deformabilnostno lastnost materiala pri mobilizirani specifični deformaciji 0.1%. Pri večjih obremenitvah oz. specifičnih deformacijah je vrednost modula znatno nižja. Modul elastičnosti je določen z izrazom (Robertson, 2009):

$$E_s = \alpha_E \times (q_t - \sigma_{vo})$$

$$\alpha_E = 0.015 \times (10^{(0.55 \times I_c + 1.68)})$$

2.1.7 Strižni modul pri majhnih deformacijah

Strižni modul G_0 predstavlja elastično togost materiala ob zelo majhni strižni deformaciji $\gamma < 0.0001\%$. V grafih na prilogah je izvrednoten kot:

$$G_0 = \alpha_M \times (q_t - \sigma_{v0})$$

$$\alpha_M = 0.0188 \times (10^{(0.55 \times I_c + 1.68)})$$

2.1.8 Koeficient prekonsolidacije

Koeficient prekonsolidacije koherentnih zemljin OCR smo izračunali (Mayne 1991):

$$OCR = k \cdot \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

kjer naj bi bil k v območju od 0,2 do 0,5 (višja vrednost k je priporočena za močnejše prekonsolidirane zemljine). V našem primeru smo upoštevali vrednost $k = 0,33$.

2.1.9 Strižni kot

Strižni kot ϕ , ki ga za nekoherentne materiale izračunamo s programom CPeT-IT je določen kot (Kulhavy & Mayne 1990):

$$\phi = 17.6 + 11 \times \log(Q_t)$$

Rezultati so razvidni iz prilog, pripomnimo pa naj, da uporabljena relacija bolj velja za čiste, necementirane kremenčeve peske.

Strižni kot ϕ in modul elastičnosti E_m pri nekoherentnih zemljinah lahko ocenimo tudi s pomočjo naslednje preglednice (Bergdahl et al., 1993):

opis zemljine	q_t [MPa]	ϕ' [°]	E_m [MPa]
zelo rahla	0.0 – 2.5	29 - 32	<10
rahla	2.5 – 5.0	32 - 35	10 - 20
srednje gosta	5.0 – 10.0	35 - 37	20 - 30
gosta	10.0 – 20.0	37 - 40	30 - 60
zelo gosta	>20	40 - 42	60 - 90

Opomba: velja za peske; za meljaste zemljine vrednost zmanjšamo za 3°, za prode in grušče pa povečamo za 2°

Preglednica 3: ocena parametrov nekoherentnih tal na podlagi odpora pod konico q_t

2.1.10 Relativna gostota

Za iz vrednotenje relativne gostote D_r v peskih je uporabljena naslednja relacija (Kulhavy & Mayne 1990) :

$$D_r^2 = Q_{in} / C_{Dr}$$

kjer je C_{Dr} empirični faktor, ki je v povprečju 350 za večino peskov, cca 300 za fine peske, 400 za grobe peske, faktor pa narašča tudi s starostjo, ekstremno predvsem pri peskih odloženih več kot 10000 let. V našem izračunu smo upoštevali faktor 350.

2.1.11 Standardni penetracijski test - SPT

V prilogah podajamo tudi korelacijo med podatki iz CPT preiskav in številom udarcev pri standardnem penetracijskem testu SPT N_{60} , ki je podana kot odvisnost od odpora pod konico, zračnega tlaka p_a in indeksa obnašanja zemljine (Jefferies & Davies, 1993):

$$\frac{(q_t / p_a)}{N_{60}} = 8.5 \cdot \left(1 - \frac{I_c}{4.6} \right)$$

2.1.12 Disipacijski testi

Poleg meritev dinamičnih pornih tlakov med sondiranjem smo izvedli tudi meritve časovnega opazovanje spreminjanja pornih tlakov na določeni globini (disipacijski test).

Izračunali smo stopnjo disipacije U , da smo lahko določili čas t_{50} (čas pri $U=50\%$)

$$U = \frac{u_t - u_o}{u_i - u_o}$$

kjer pomeni

U stopnja disipacije

u_t porni tlak v času t

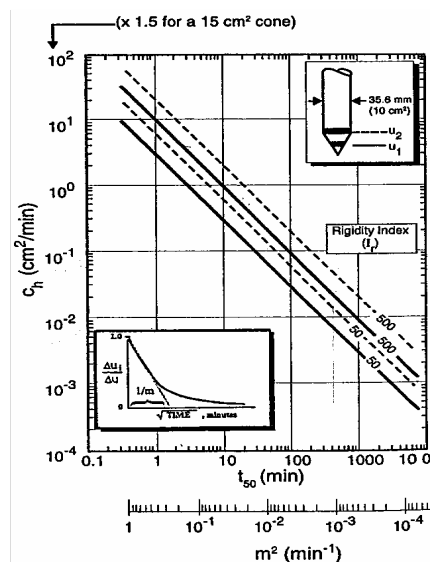
u_i porni tlak v času $t = 0$

u_o naravni porni tlak v tleh (ocenjen kot hidrostatski tlak iz višinske razlike med ocenjenim nivojem vode in globino disipacijskega testa)

Čas t_{50} nam je služil za posredno oceno koeficienta horizontalne konsolidacije c_h ter oceno vodoprepusnosti k_h .

Koeficient konsolidacije iz disipacijskega testa

Za iz vrednotenje horizontalnega koeficienta konsolidacije c_h smo se poslužili ocene na podlagi časa t_{50} in empiričnega diagrama, ki ga prikazujemo na naslednji sliki (Robertson et. al., 1992):



Slika 3: Diagram za oceno c_h (Robertson et al., 1992)

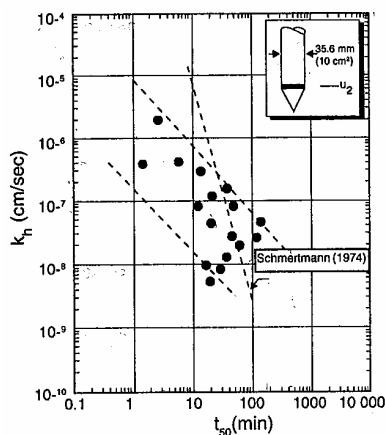
Druga metoda, po kateri smo izvednotili c_h , je naslednji izračun (Teh, 1987):

$$c_h = (m/M)^2 \cdot \sqrt{I_r} \cdot r^2$$

kjer je m gradient izmerjen iz disipacijskega testa, M je gradient odvisen od geometrije sonde in lokacije filtra (v našem primeru $M=1.15$), I_r je togostni indeks in r polmer sonde. Koeficiente konsolidacije c_h podajamo za togostna indeksa $I_r = 50$ in $I_r = 500$, dejanskega I_r nismo izvednotili.

Koeficient vodoprepustnosti iz disipacijskega testa

Tudi za koeficient horizontalne vodoprepustnosti smo na podlagi časa t_{50} opravili oceno iz empiričnega diagrama, kateri je prikazan na spodnji sliki (Robertson et al., 1992; Schmertmann, 1974):



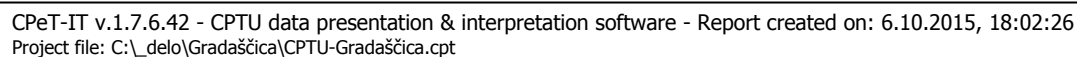
Slika 4: Diagram za oceno k_h (Robertson et al., 1992; Schmertmann, 1974)

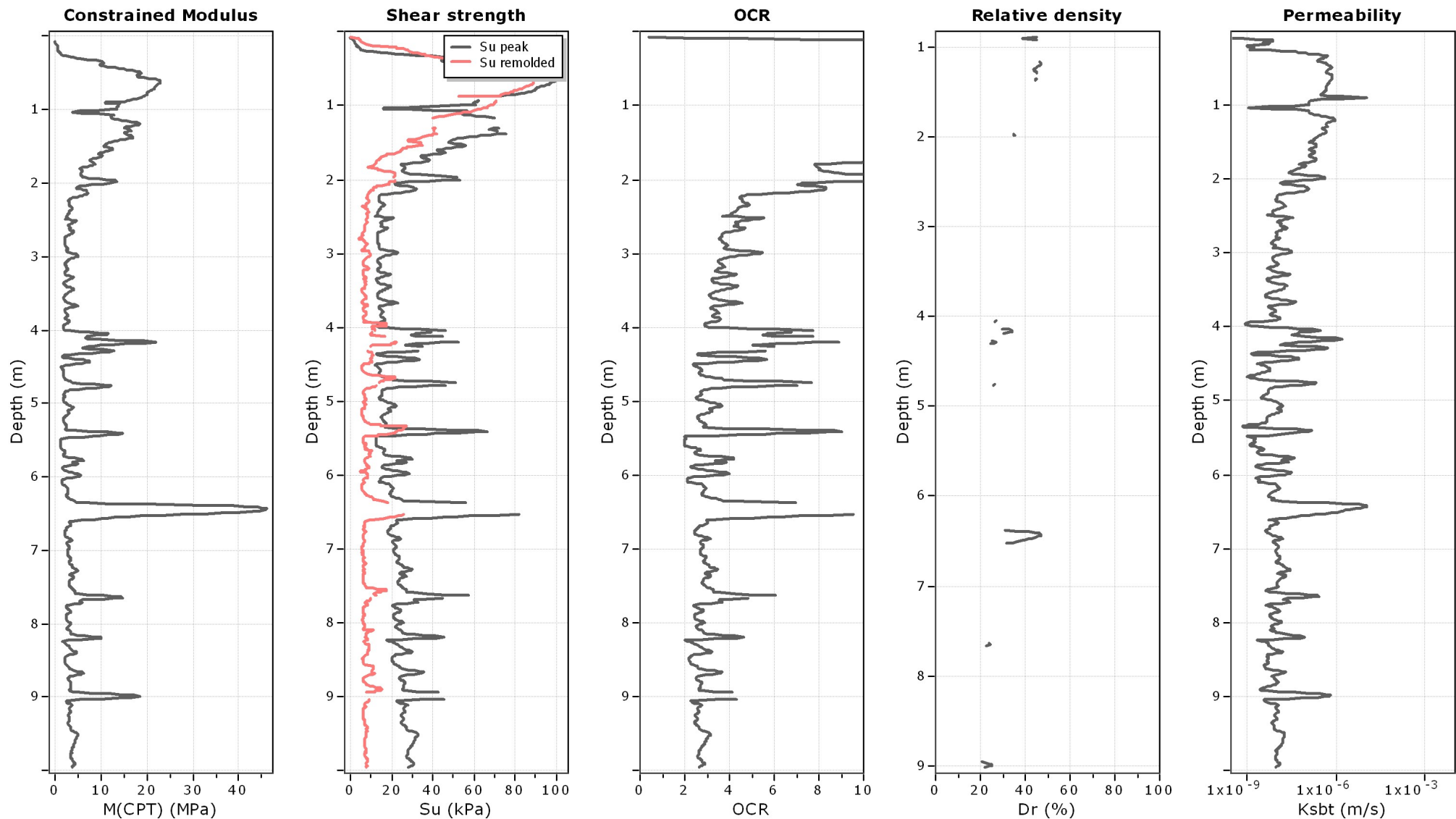
Podajamo tudi izračunano vrednost, ki je podana s spodnjim izrazom (Parez & Fauriel, 1988):

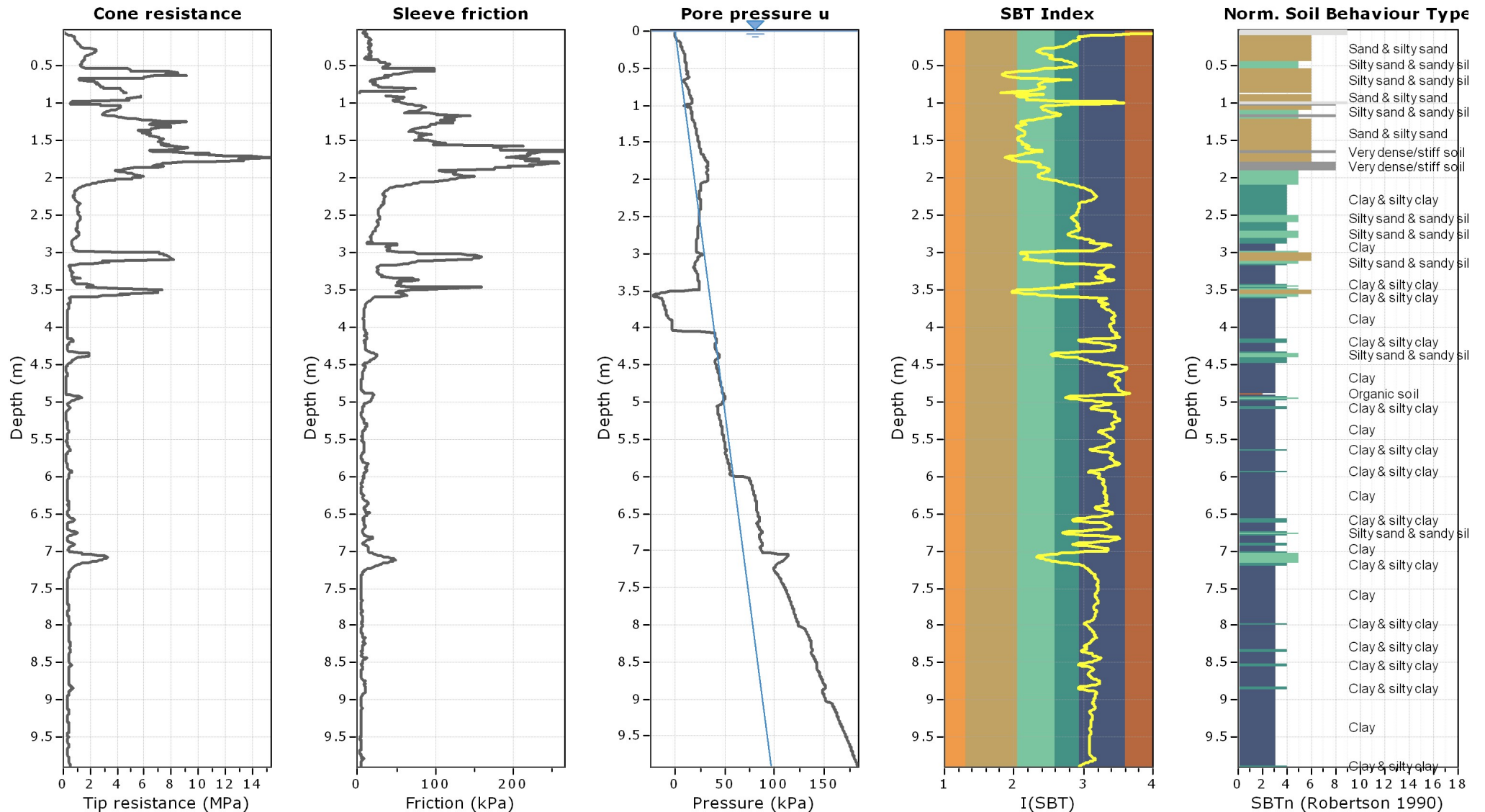
$$k = 1/(251 \cdot t_{50})^{1.25} \text{ [cm/s]}$$

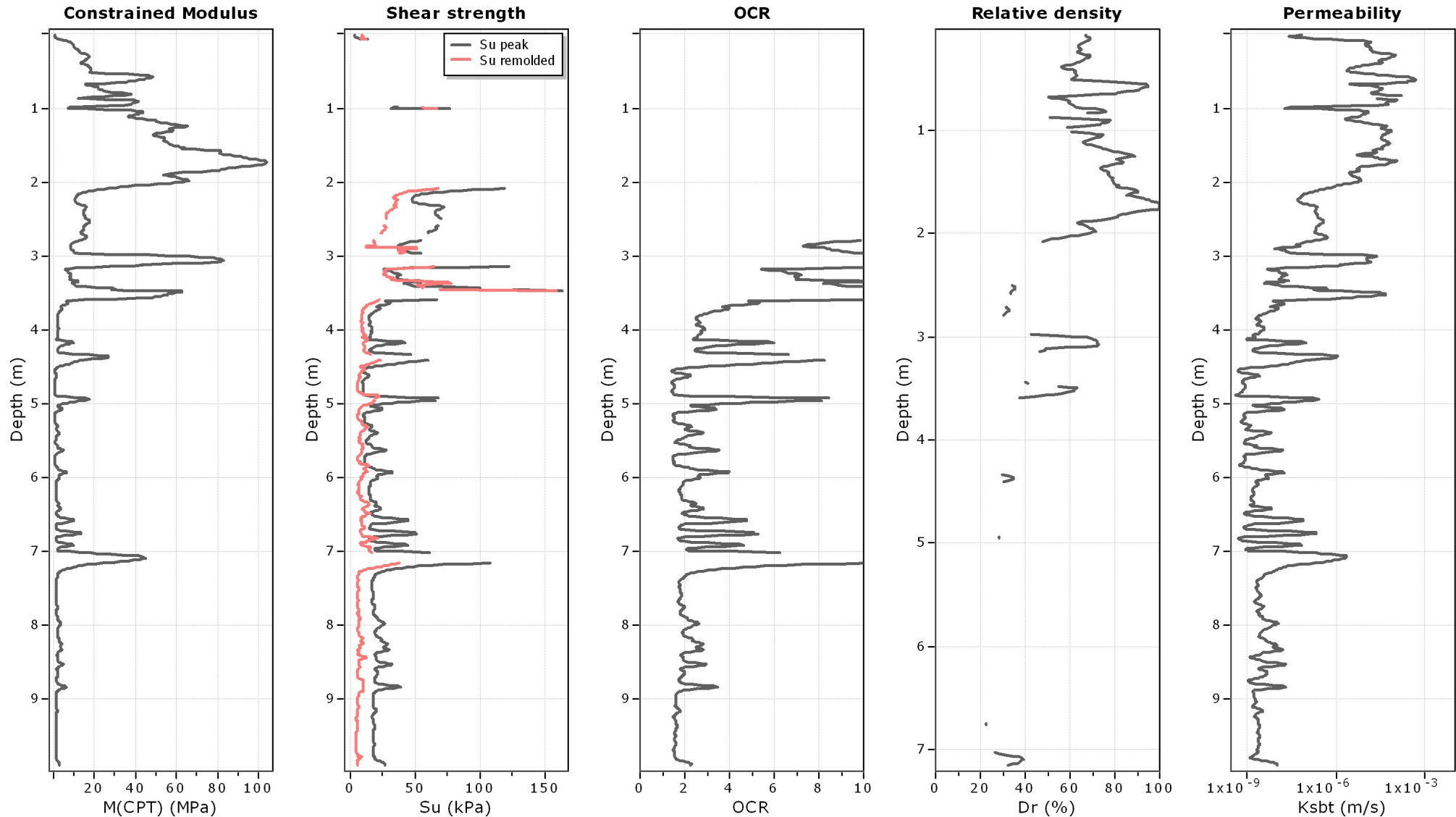
Priloga 1:

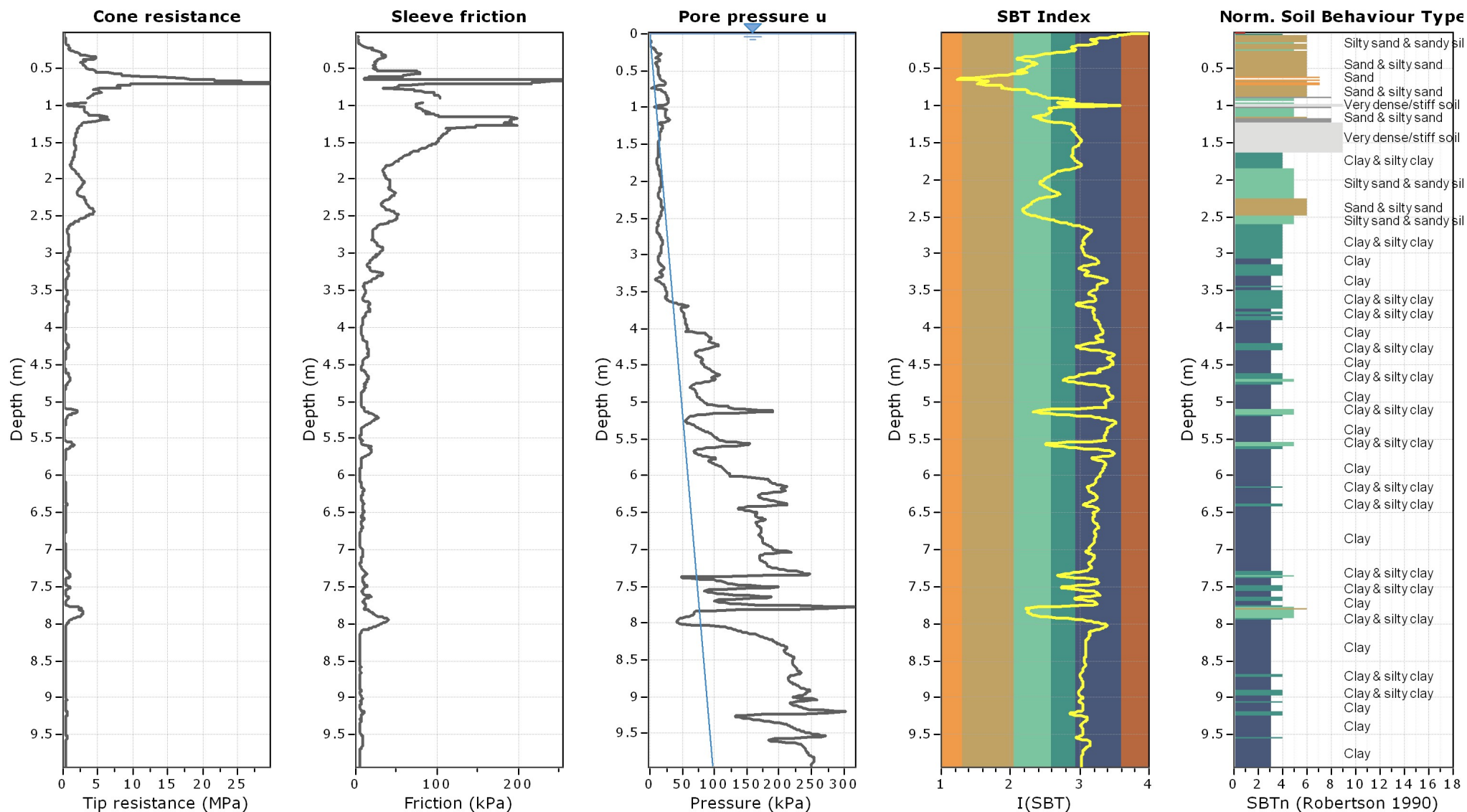
Grafični prikaz rezultatov CPT meritev

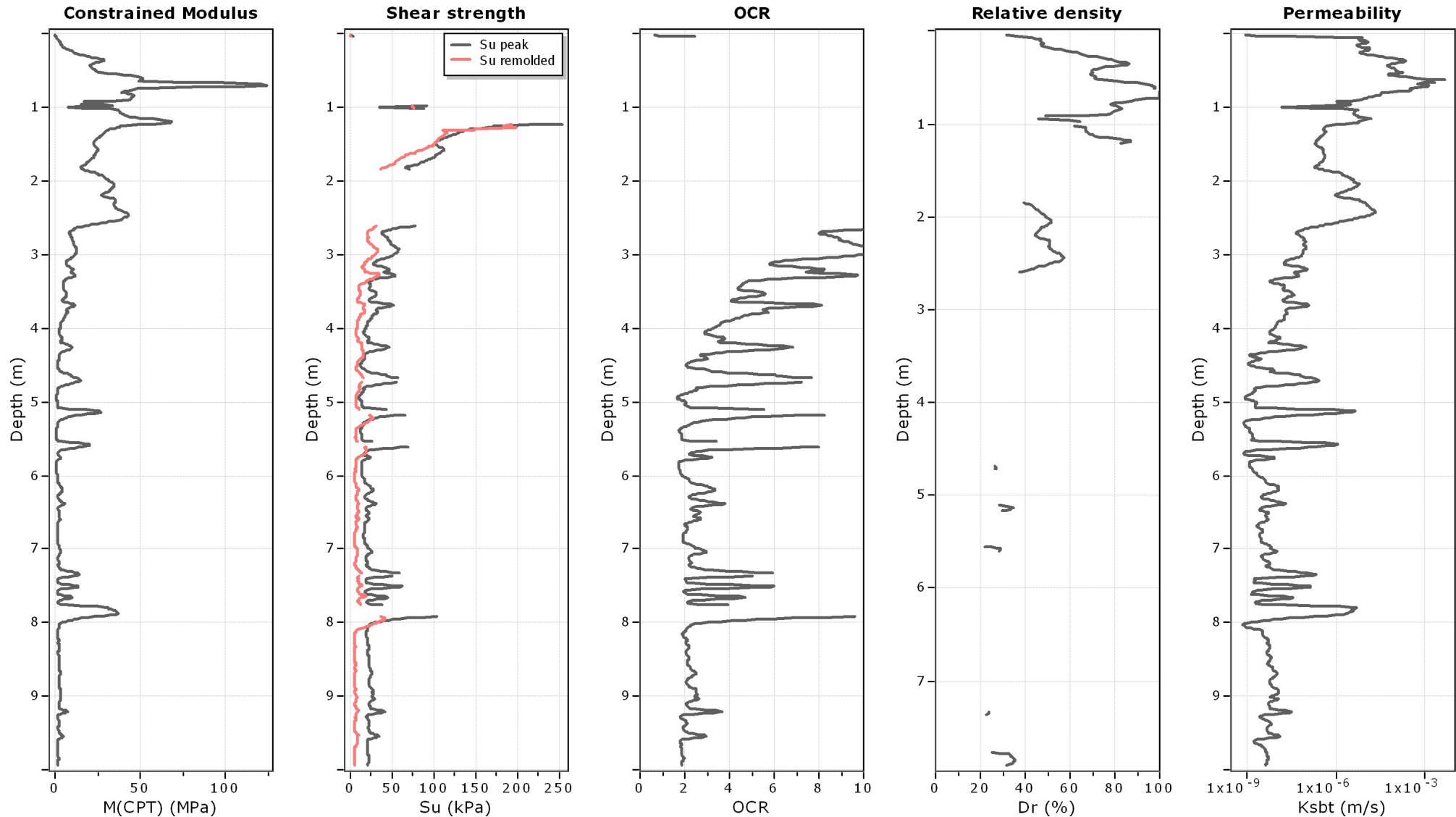


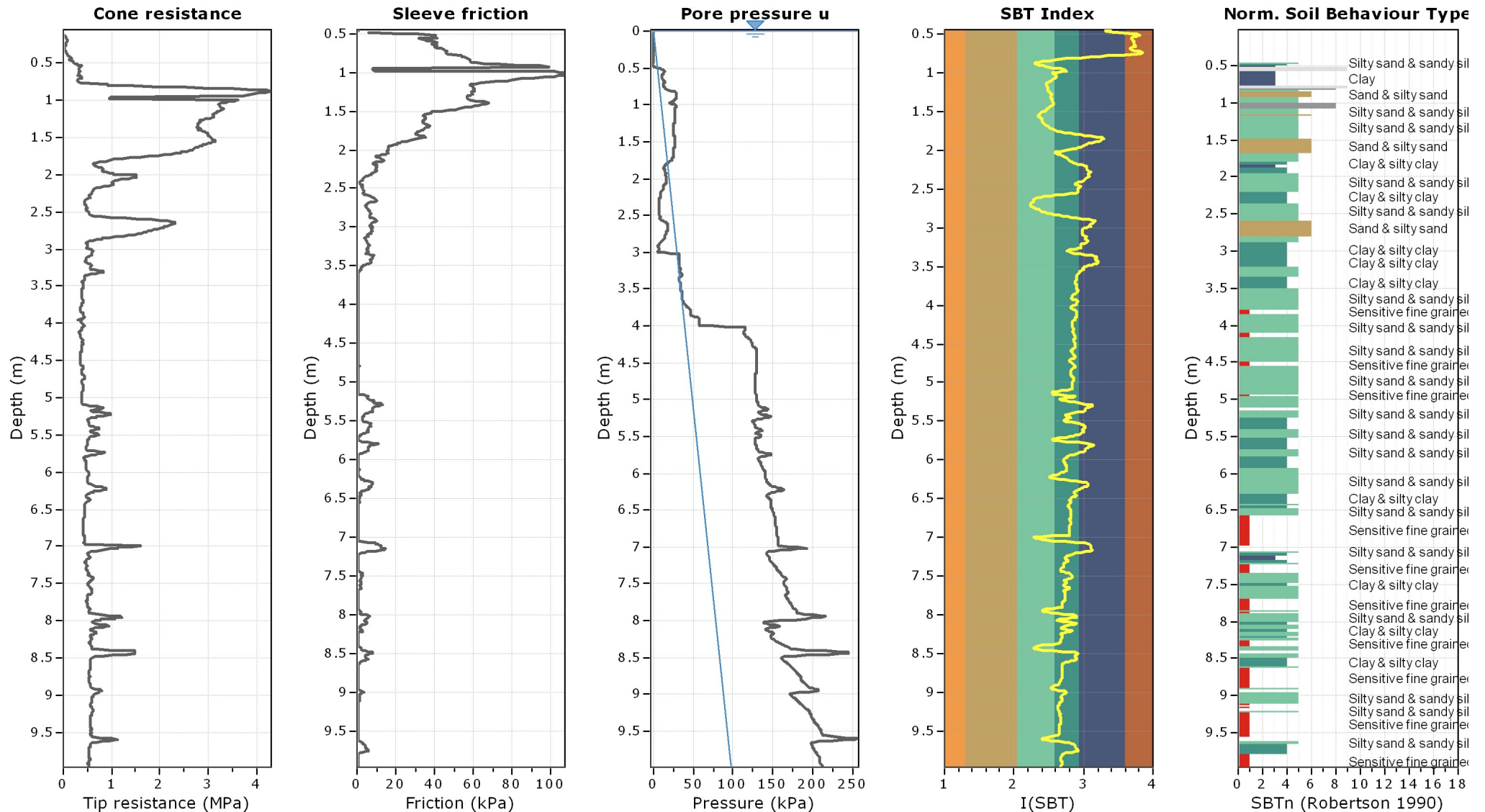


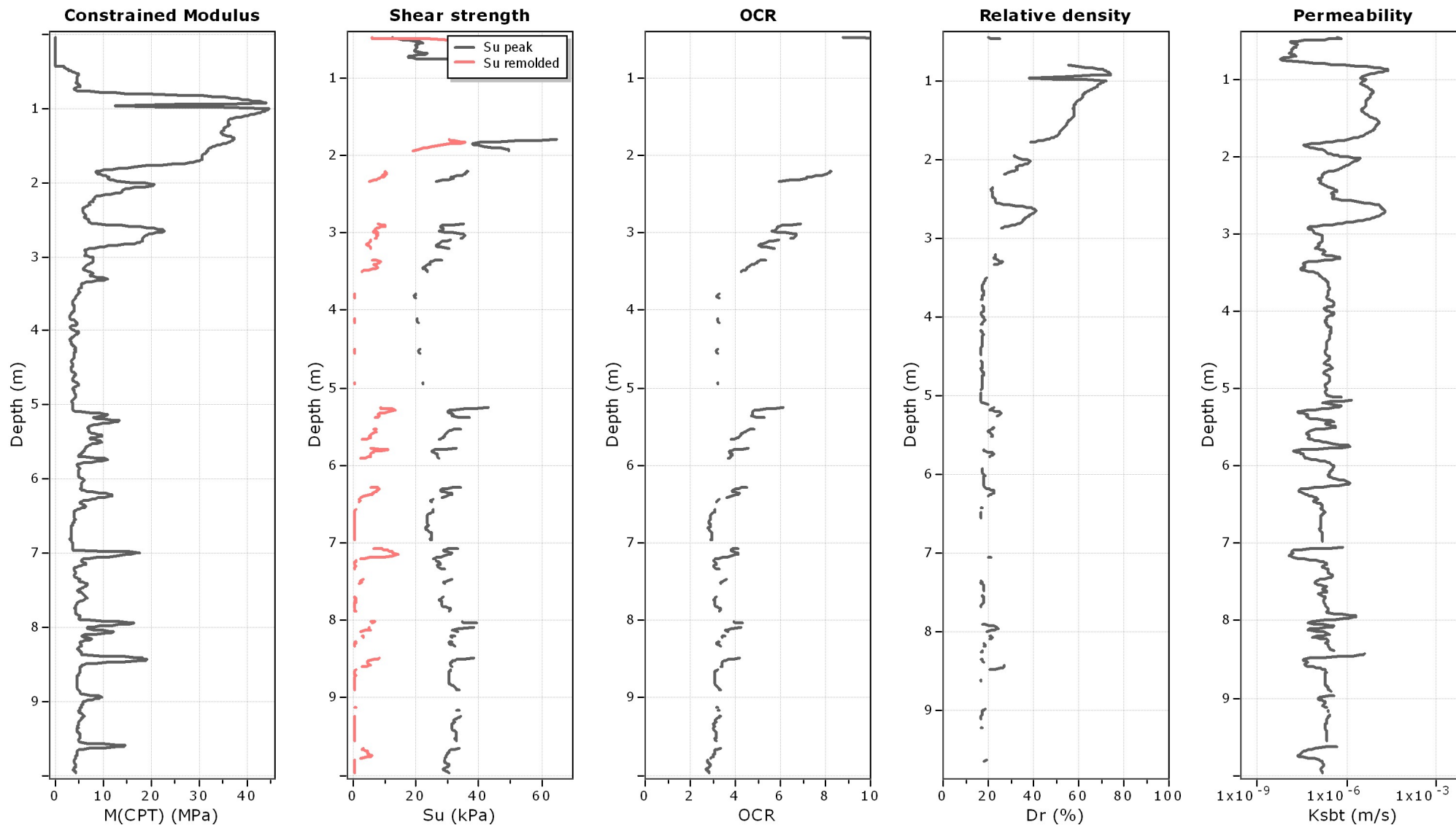


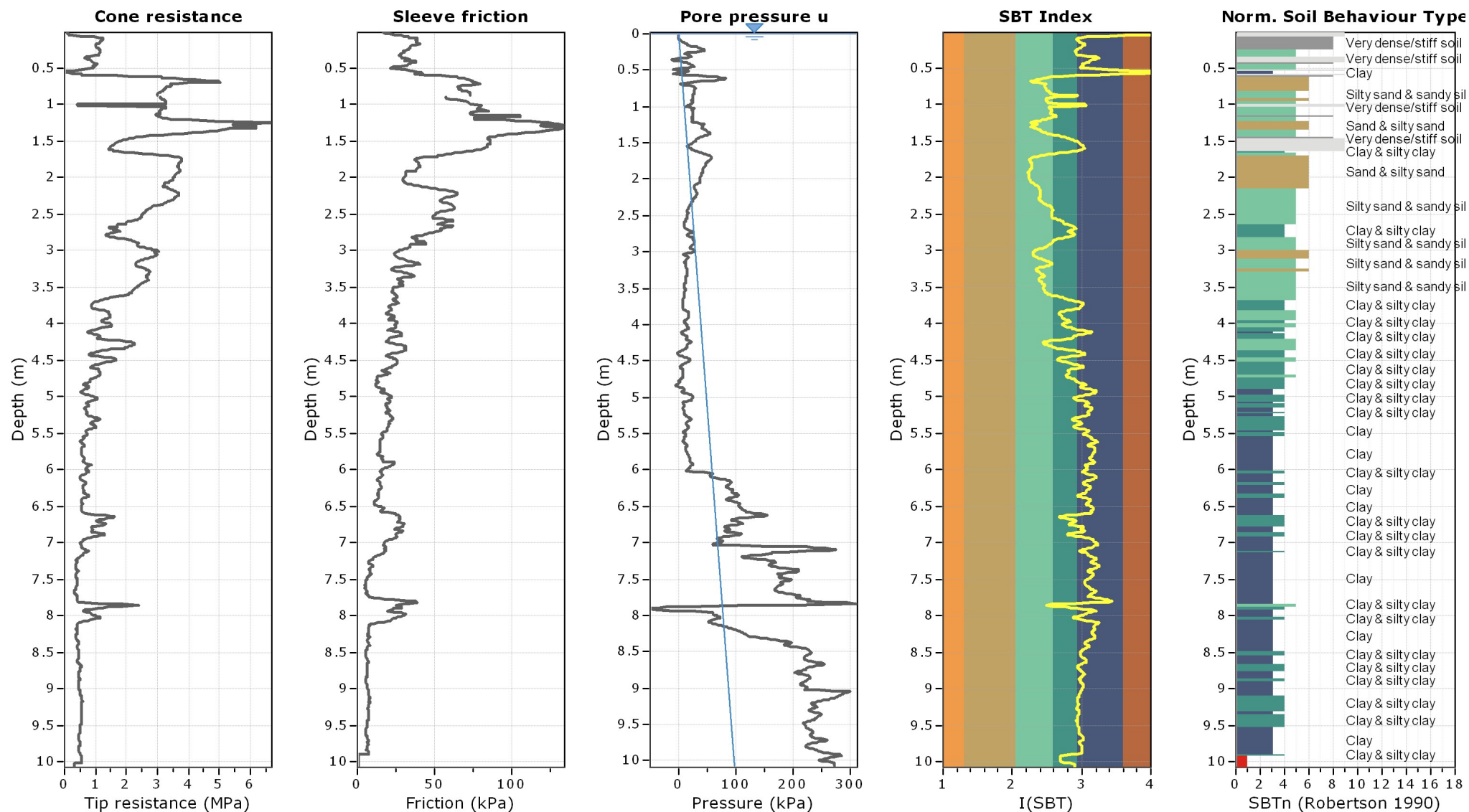


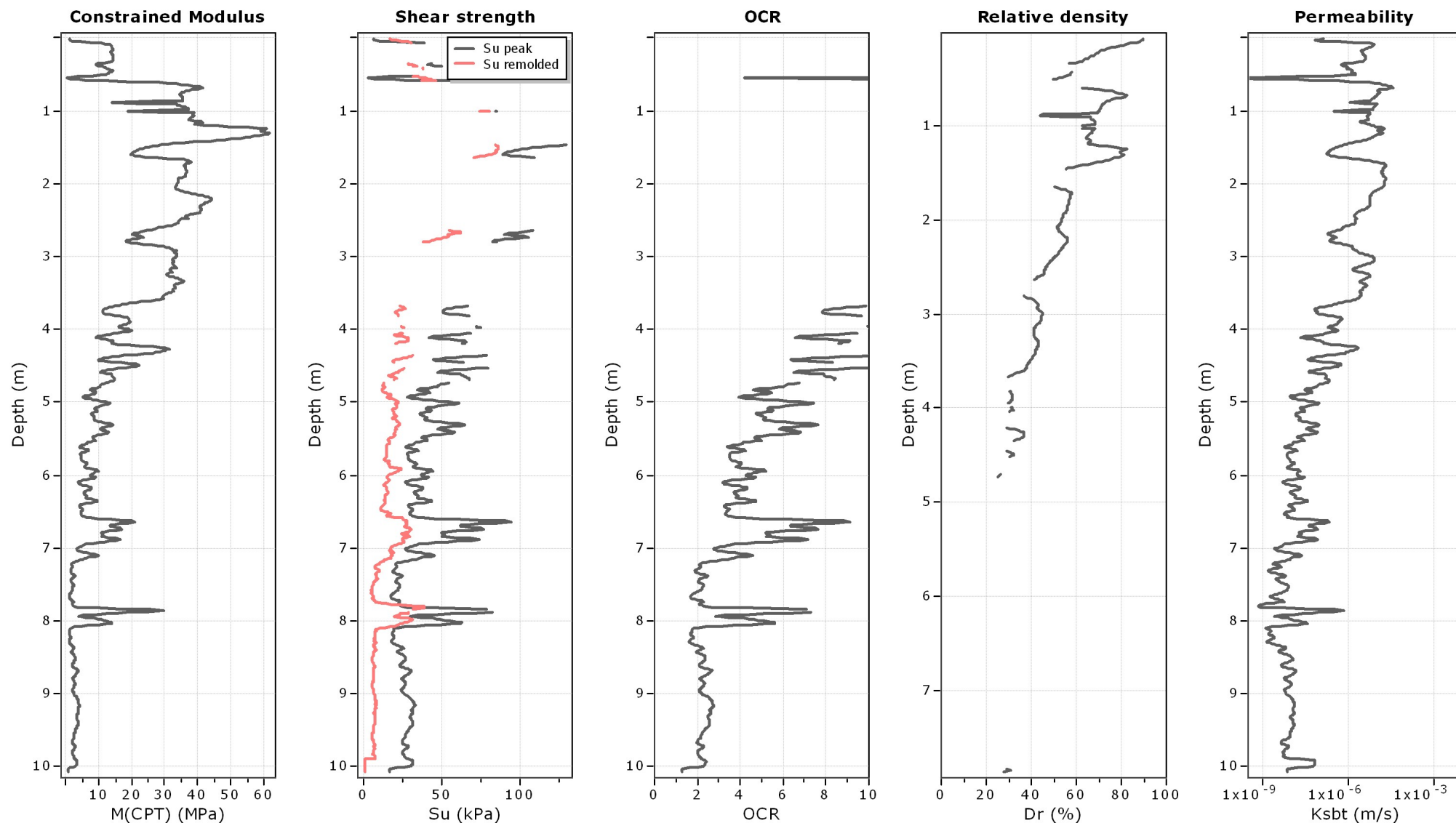


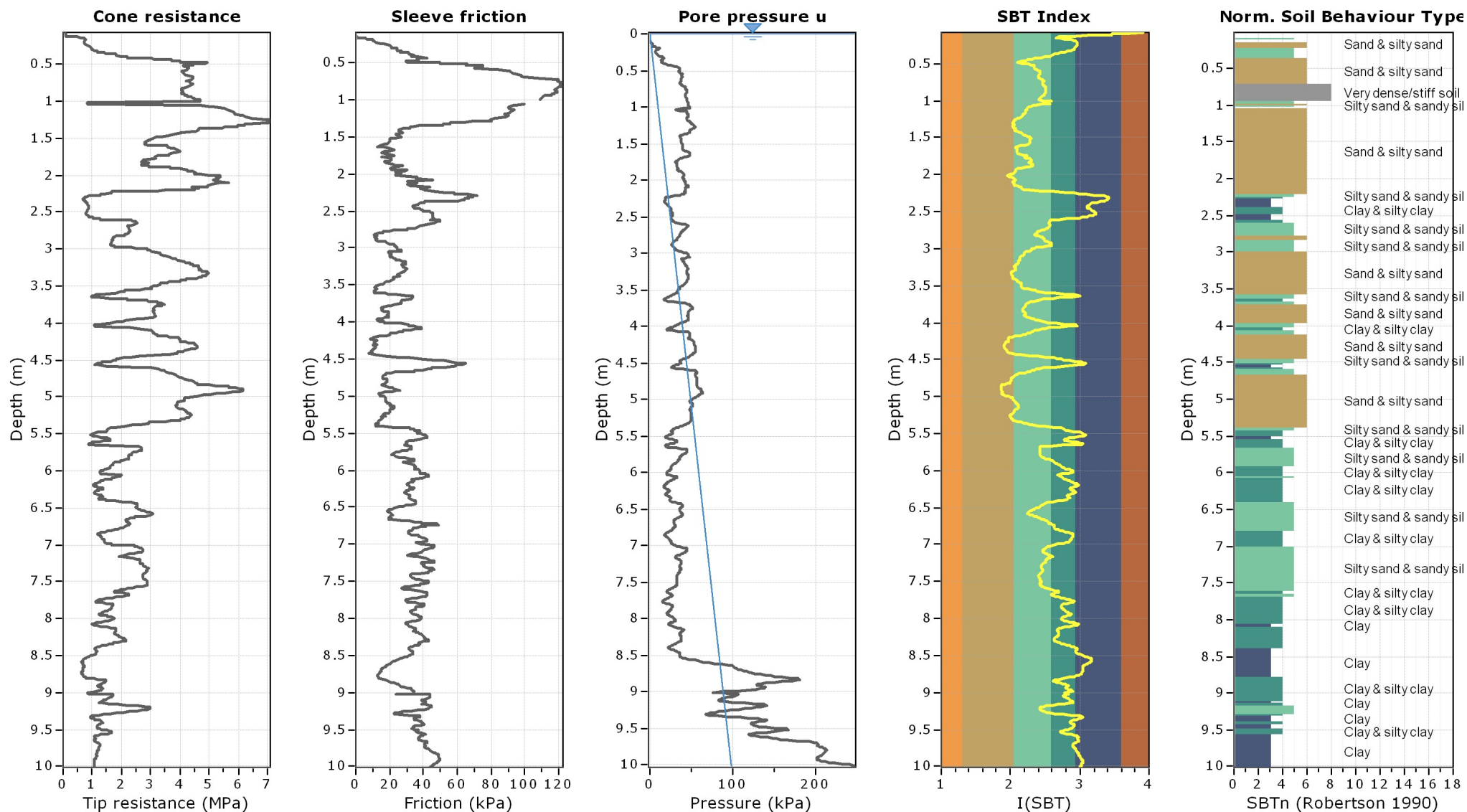


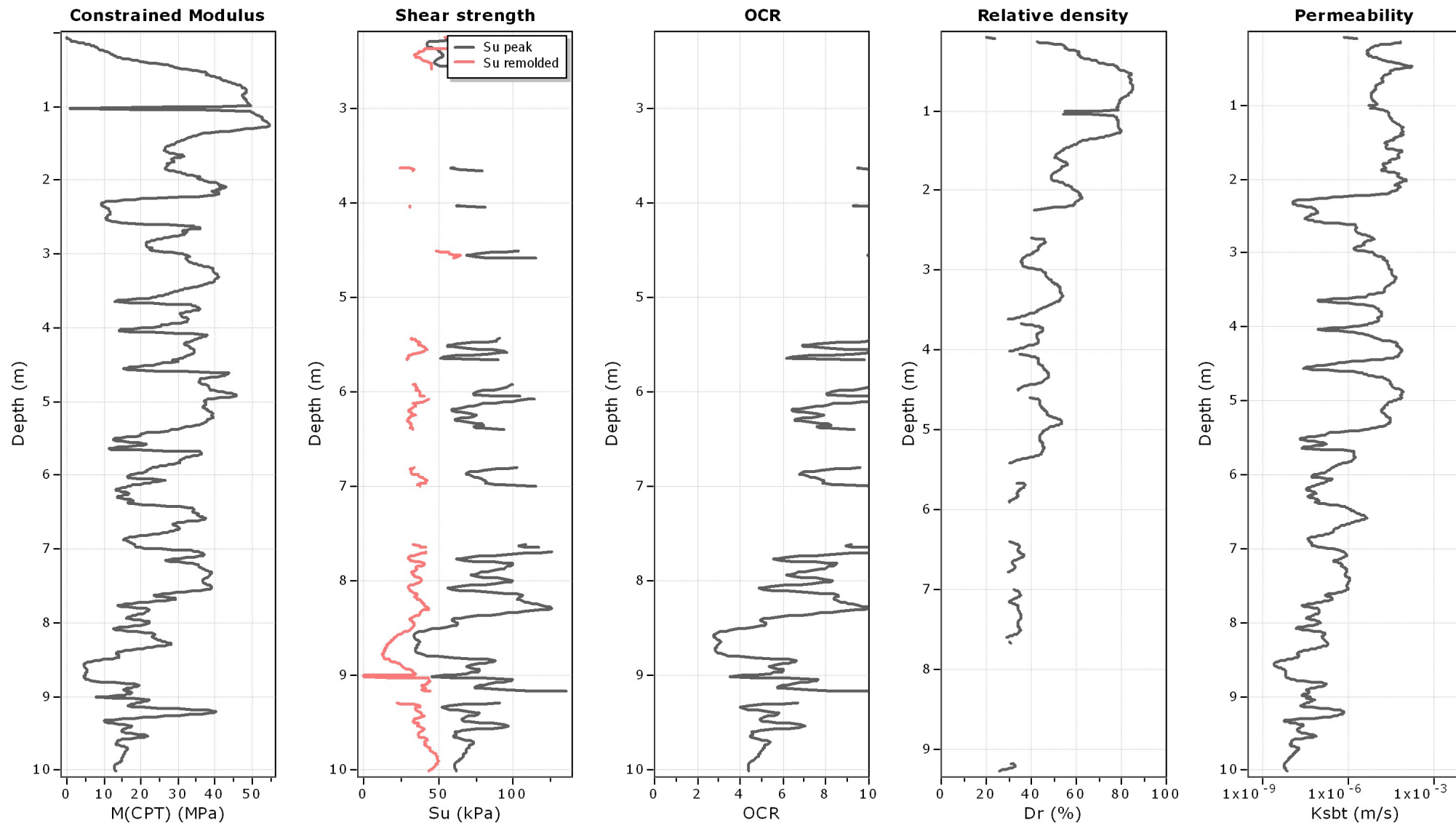


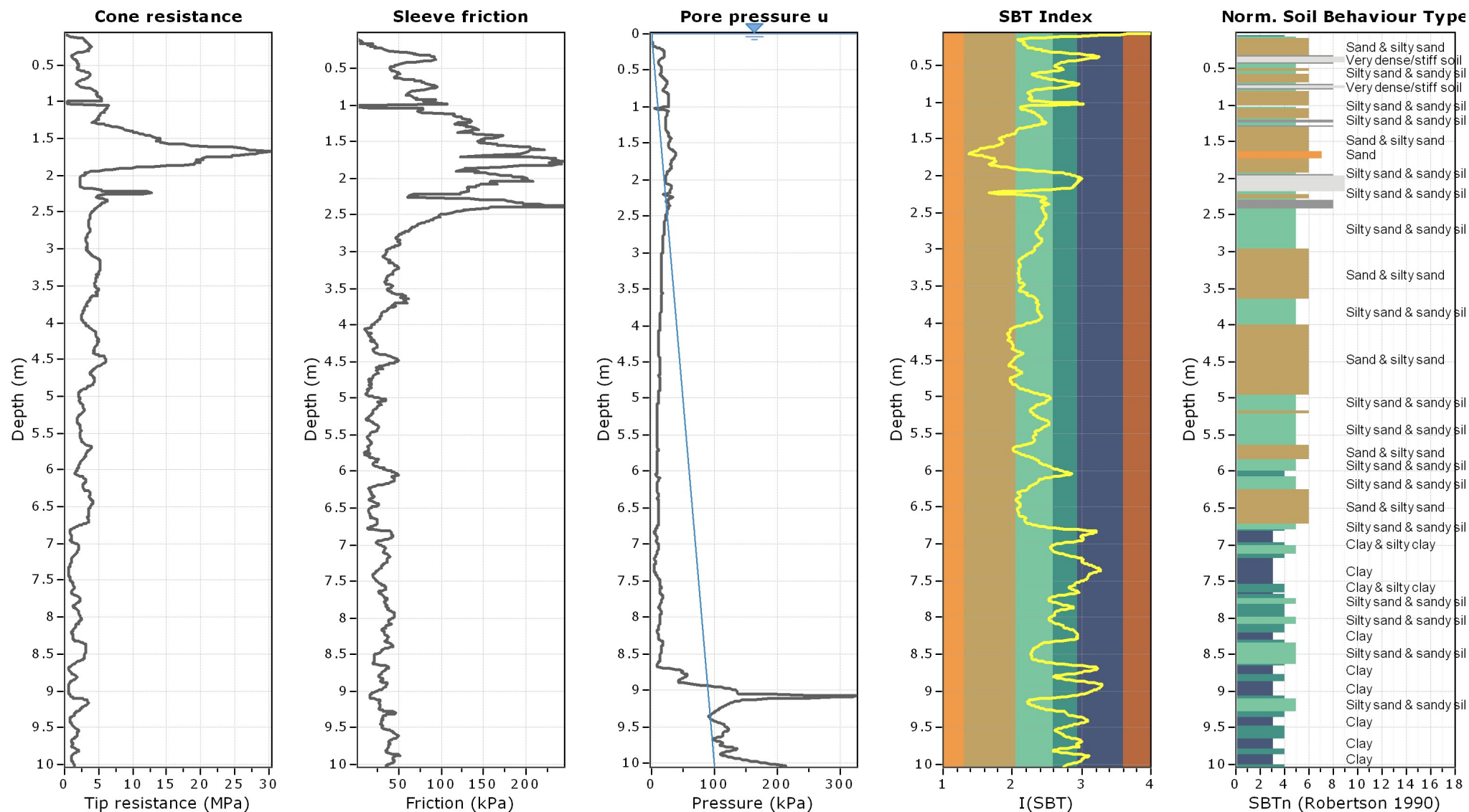


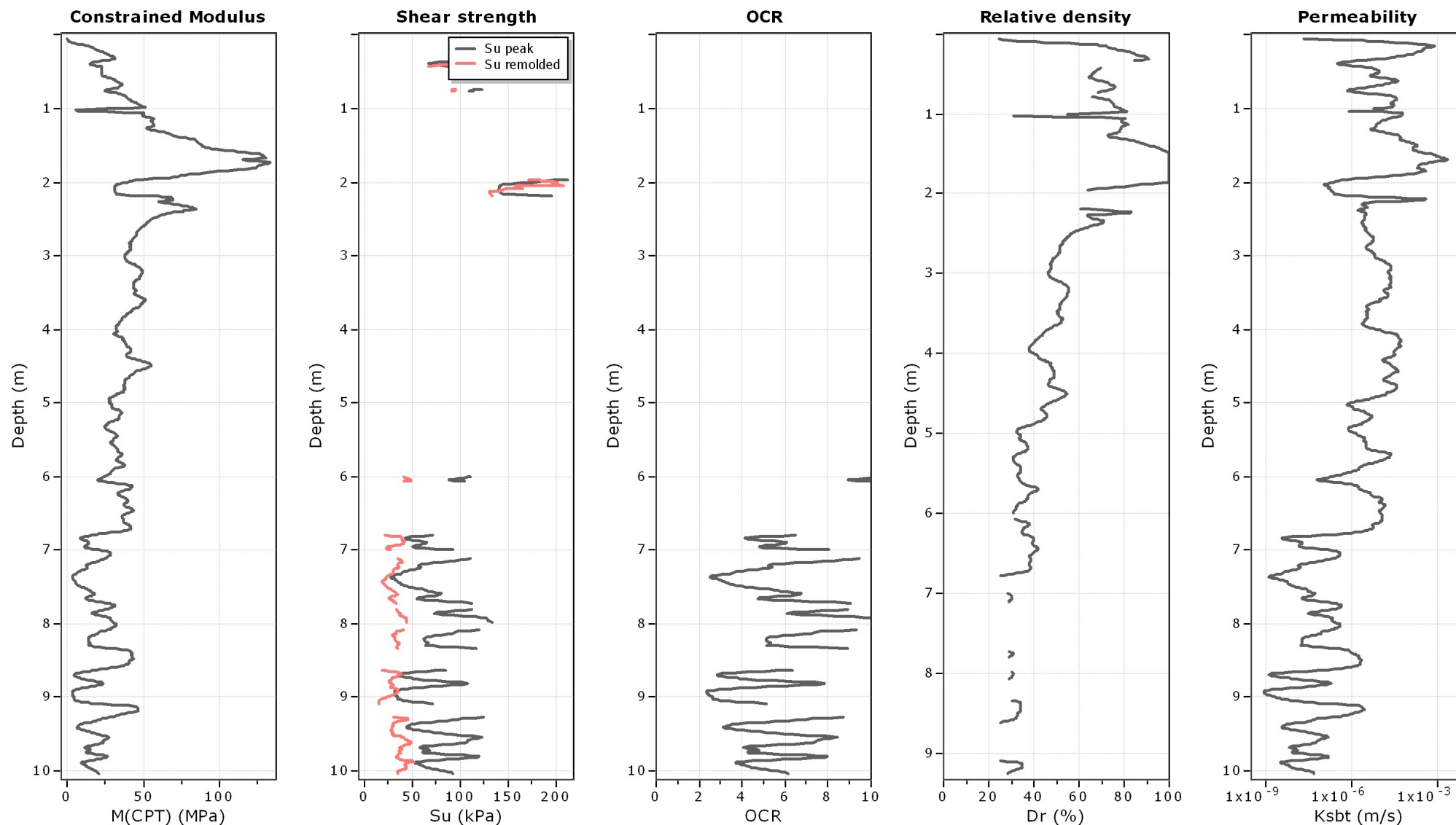


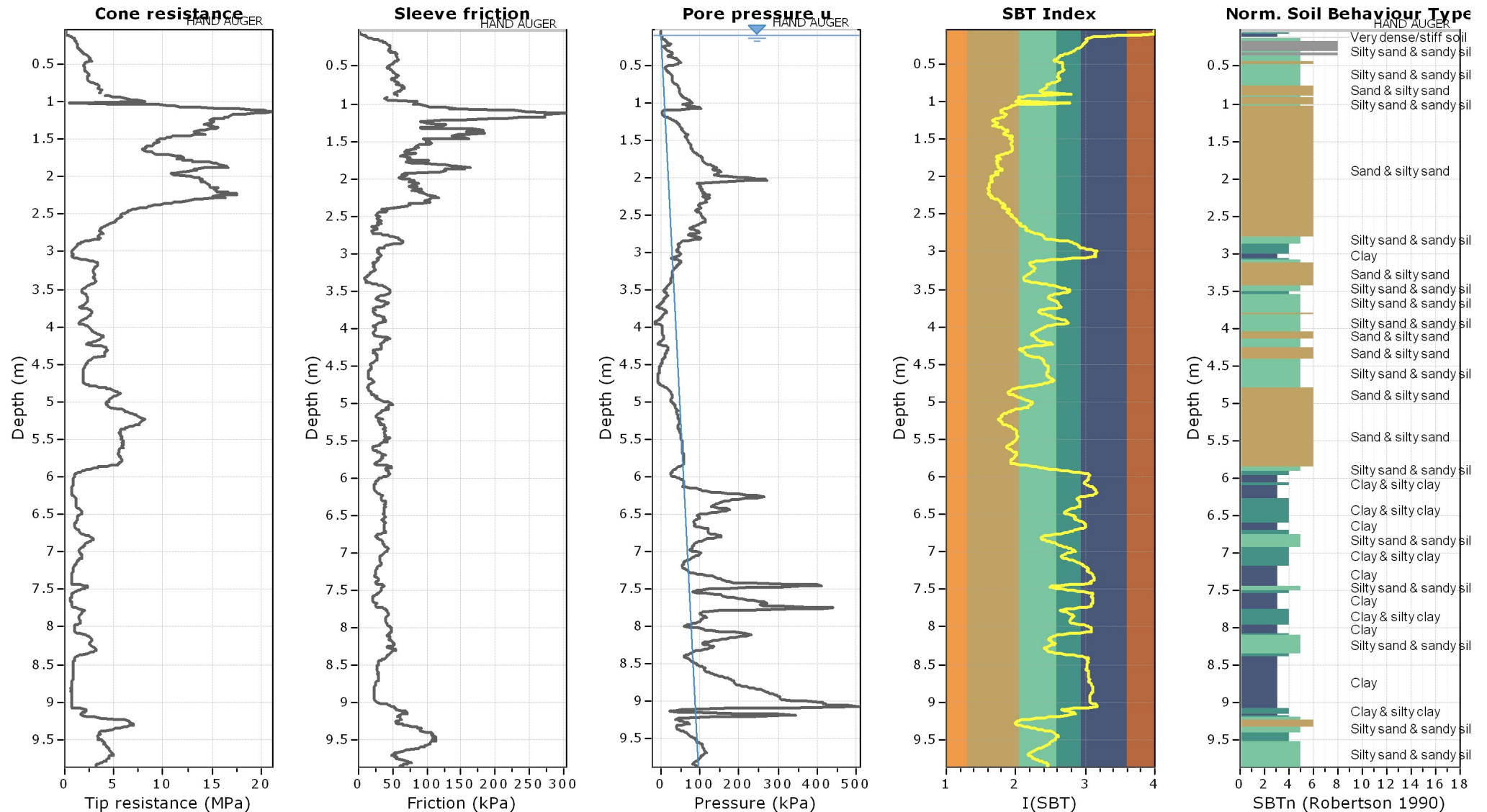


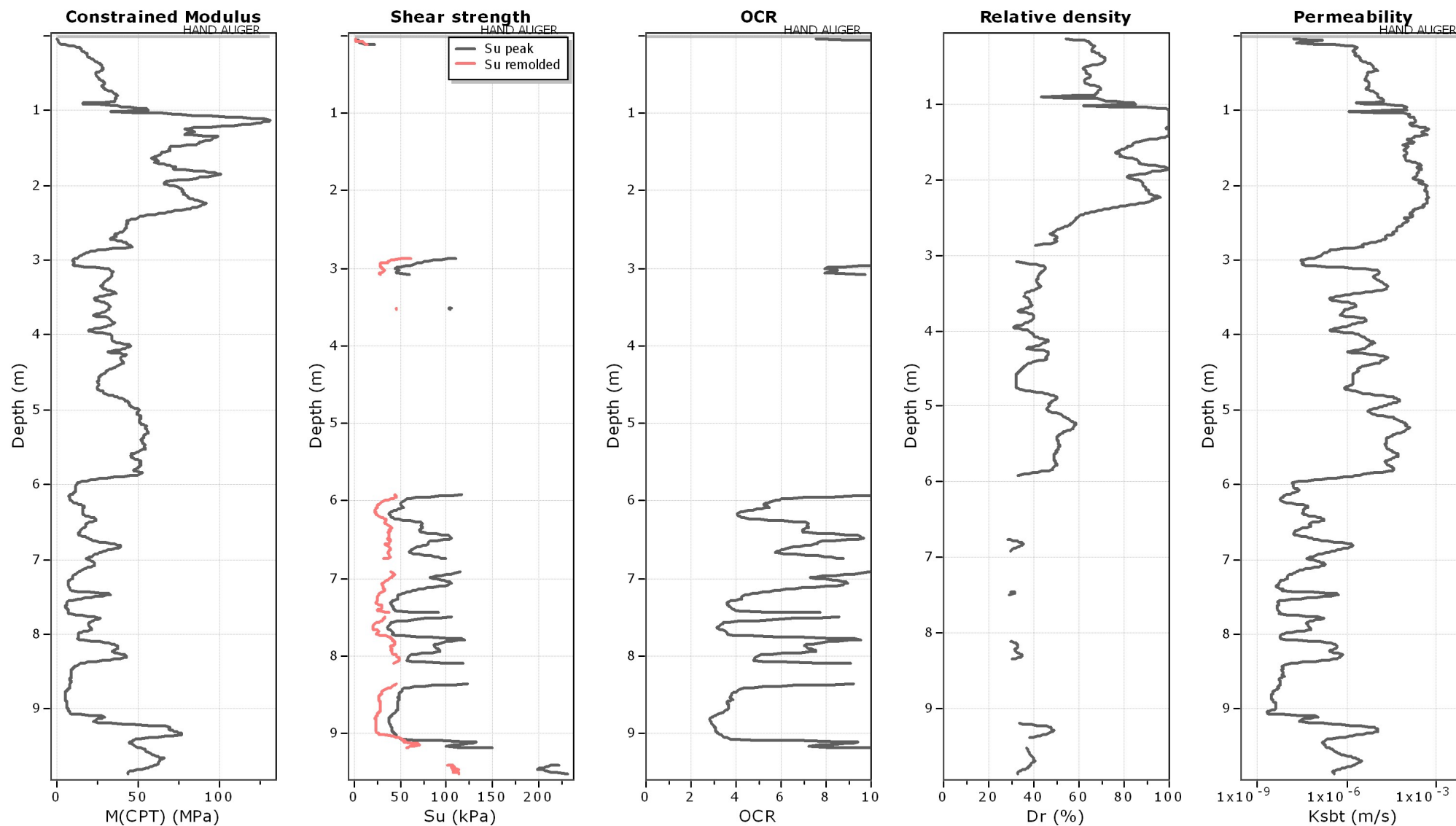


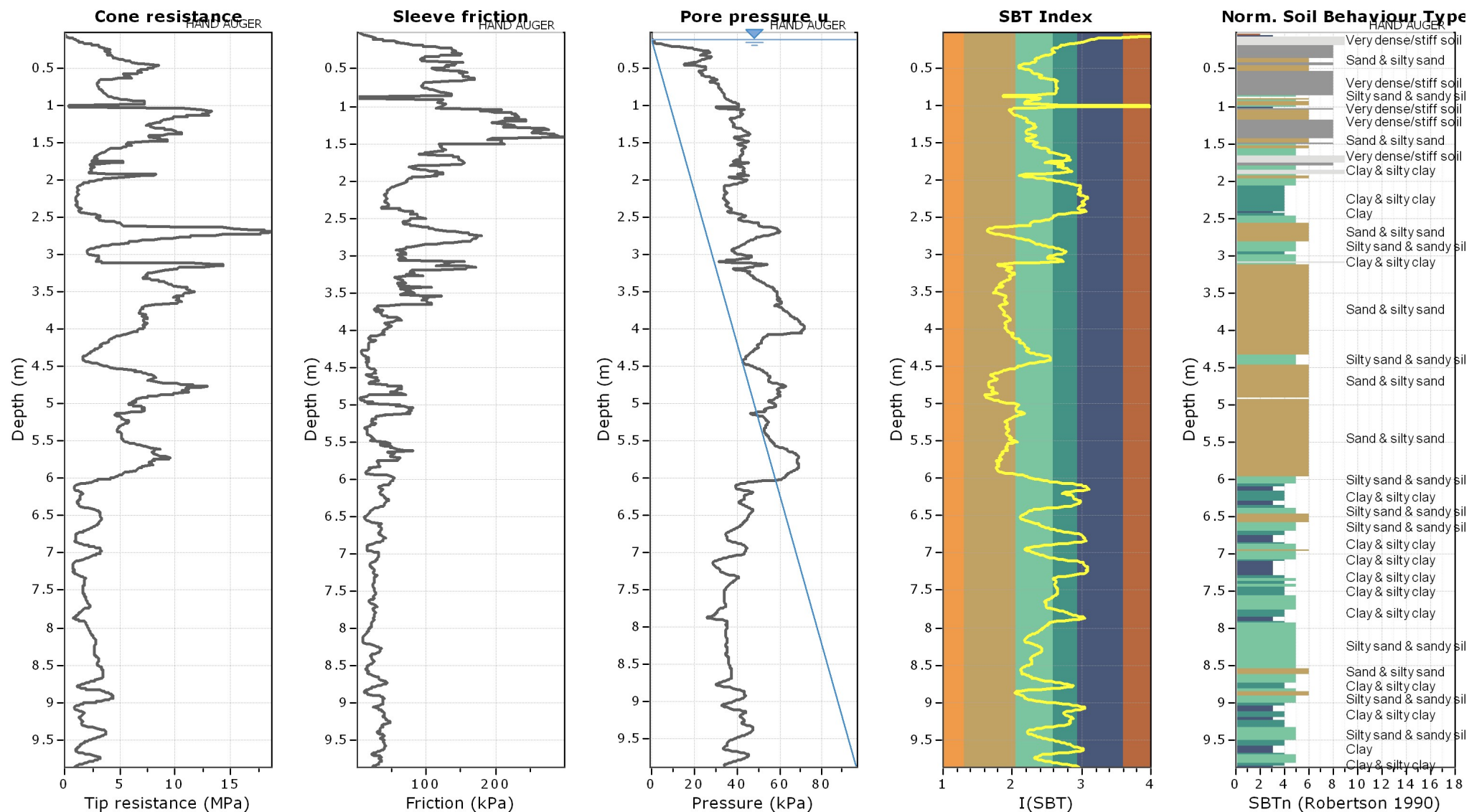


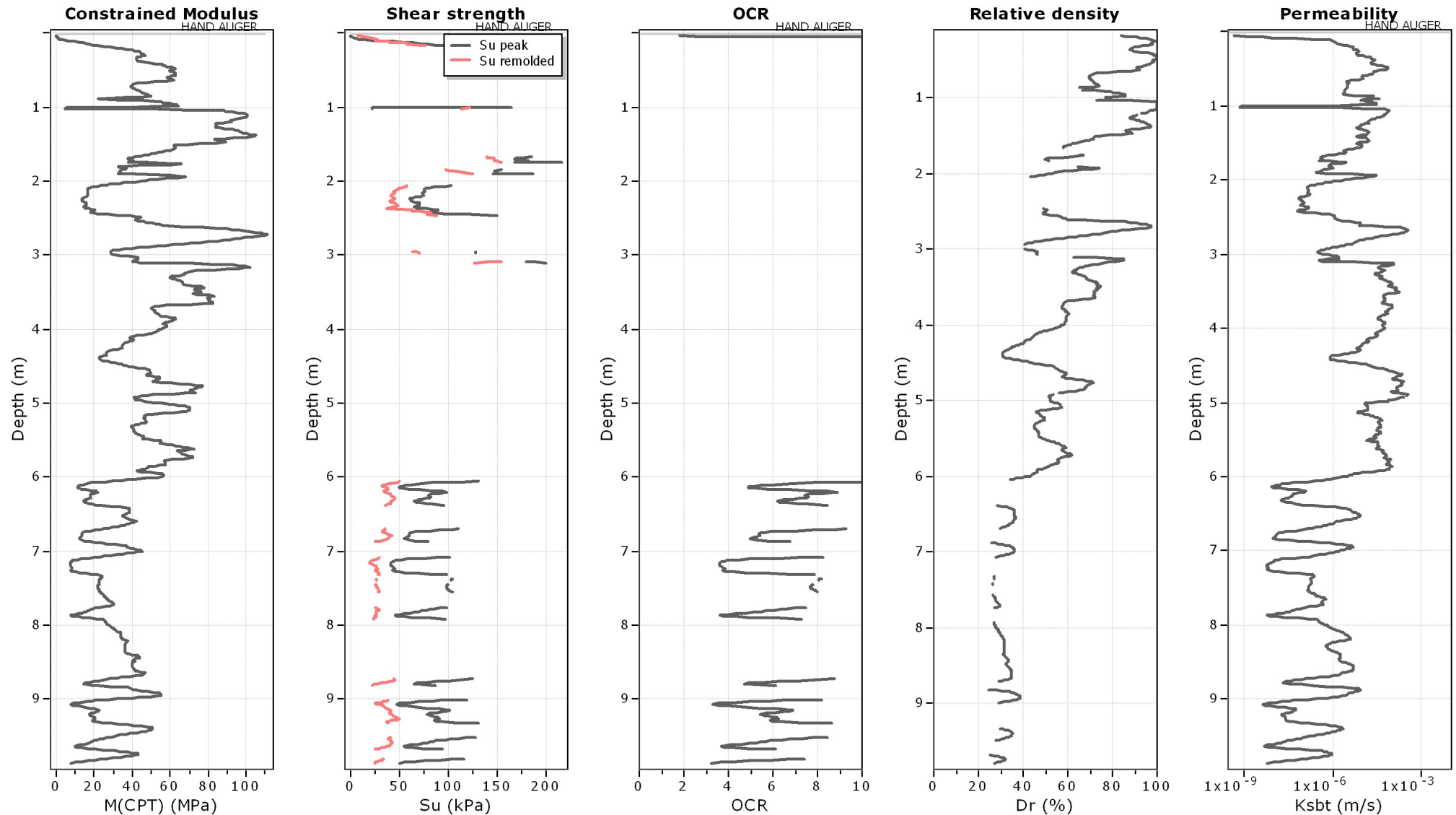


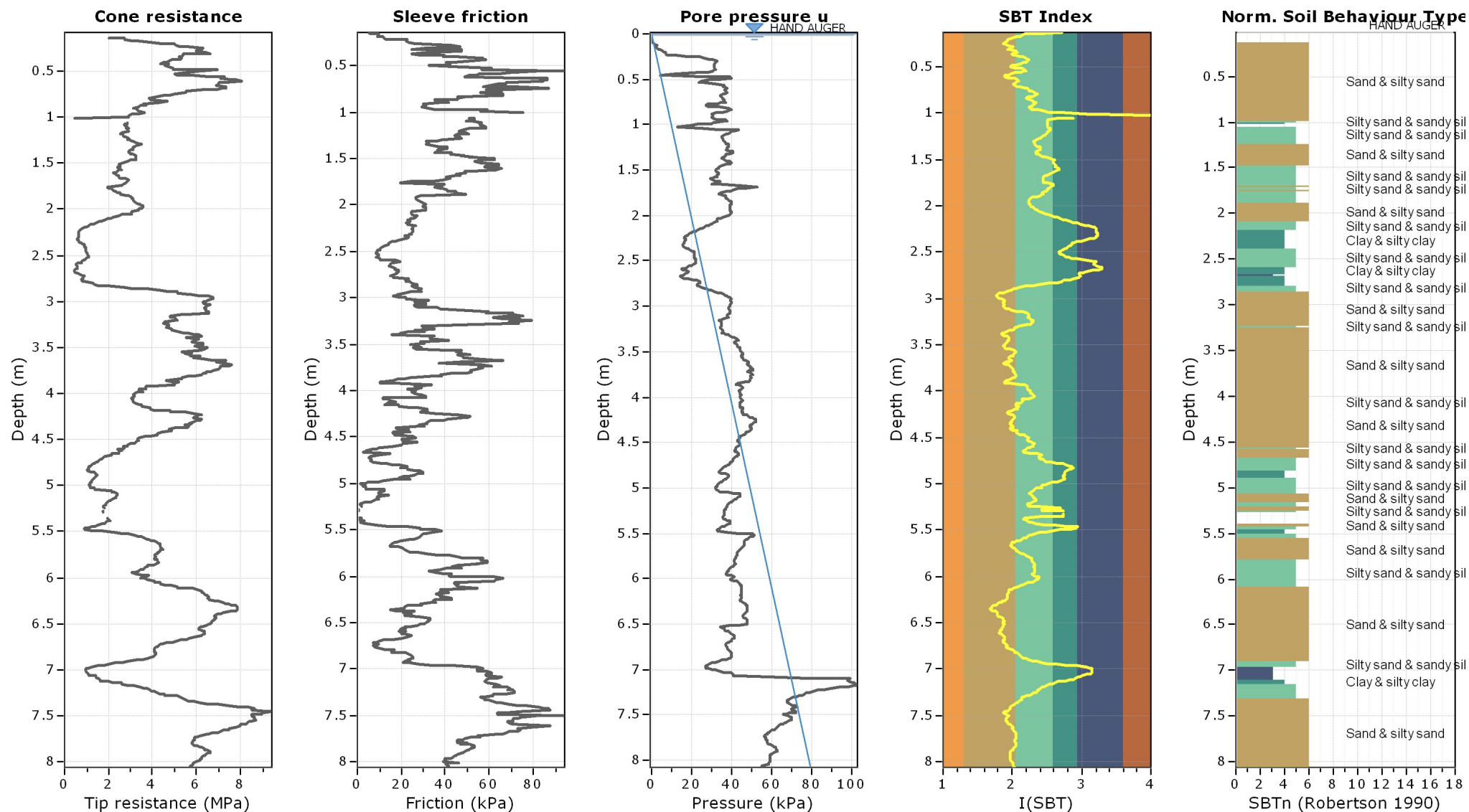


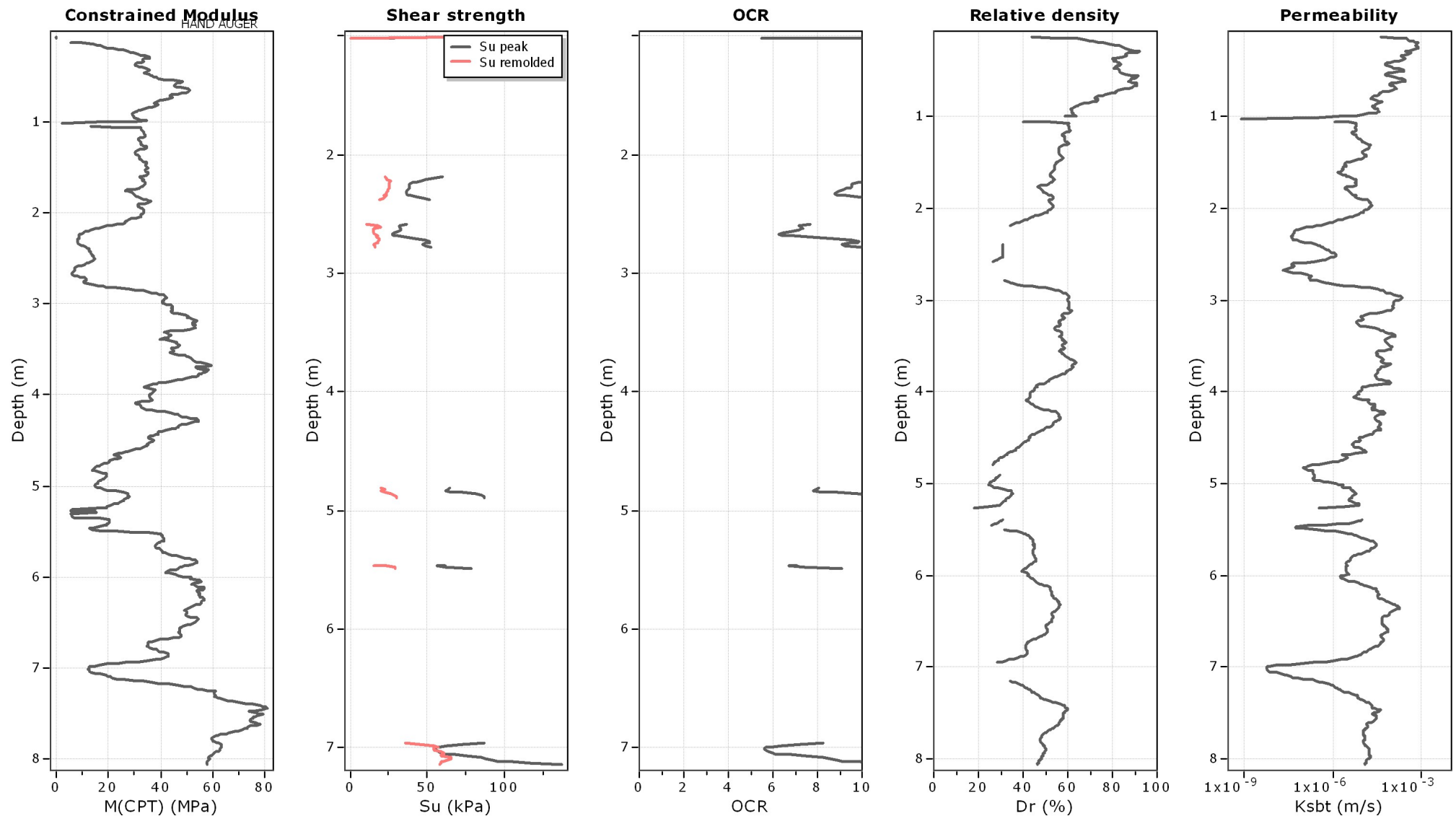


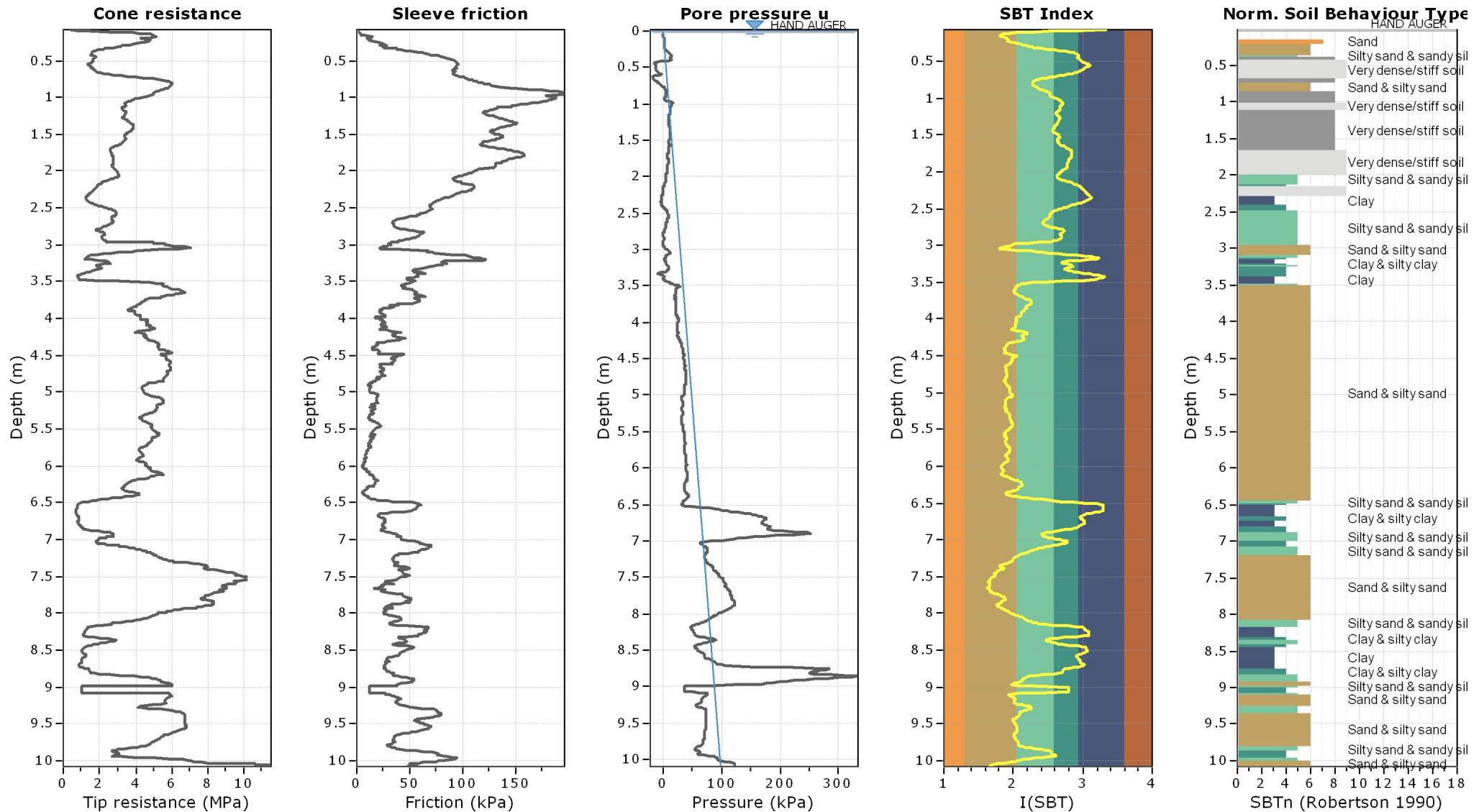


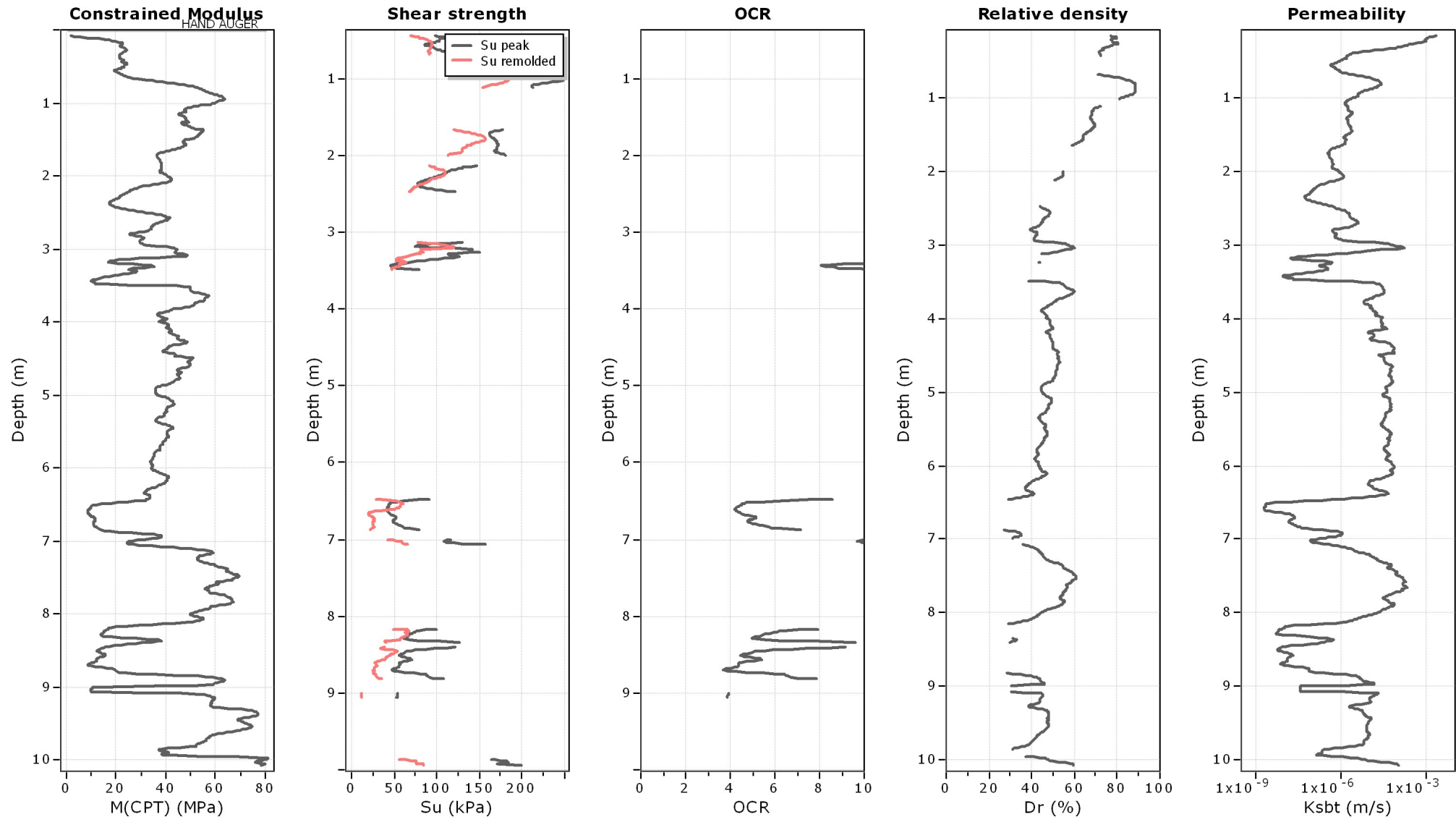


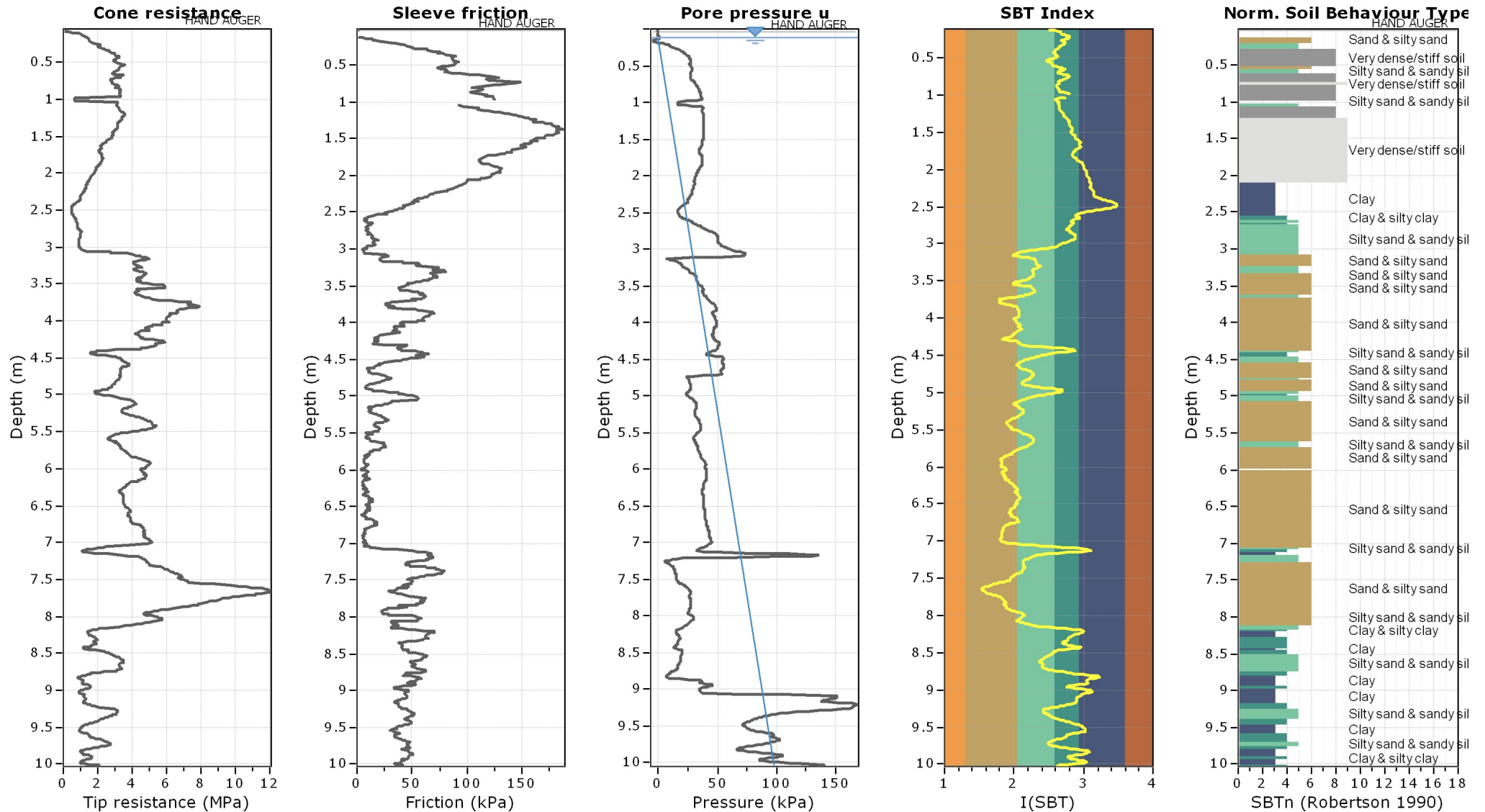


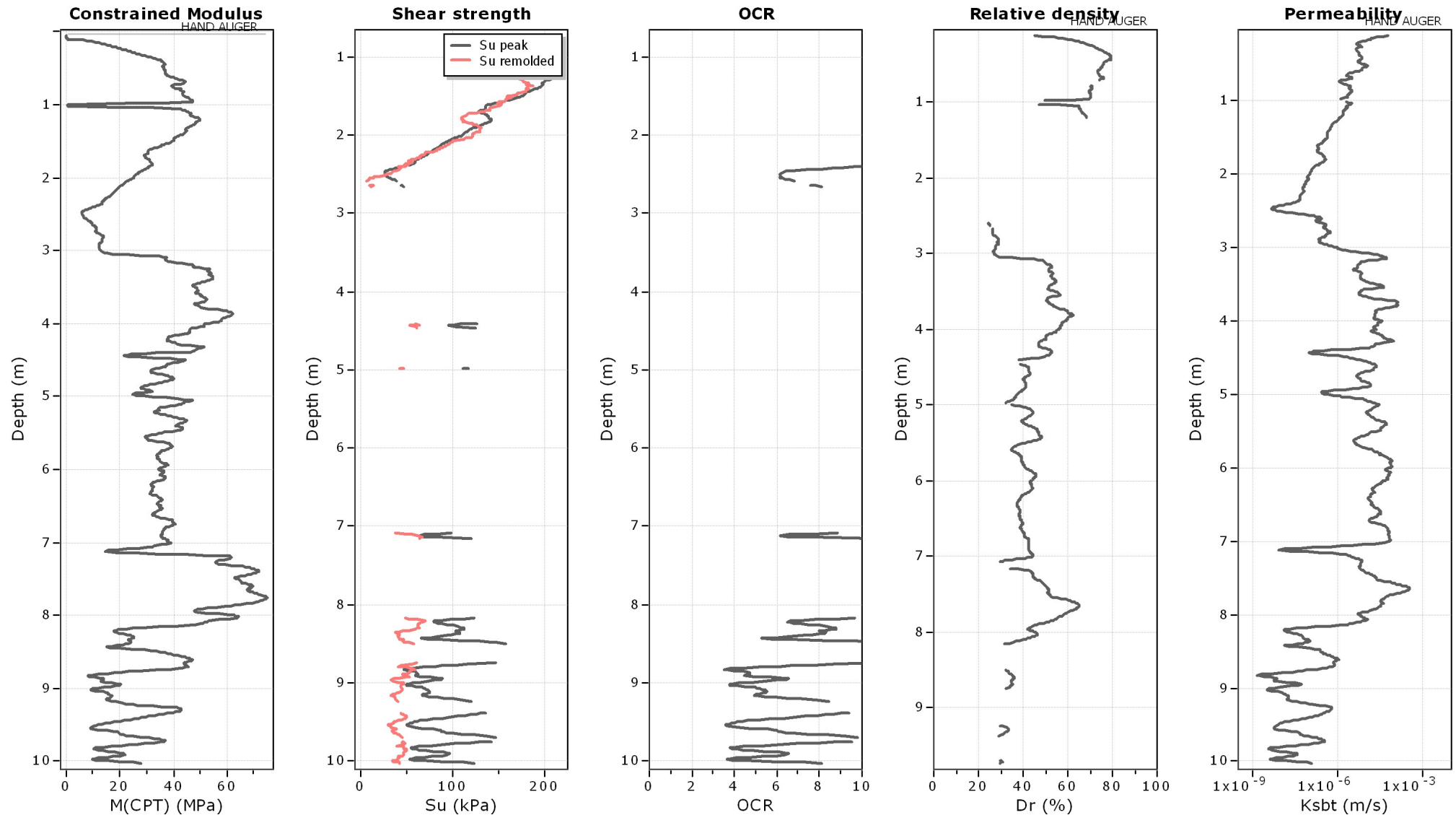


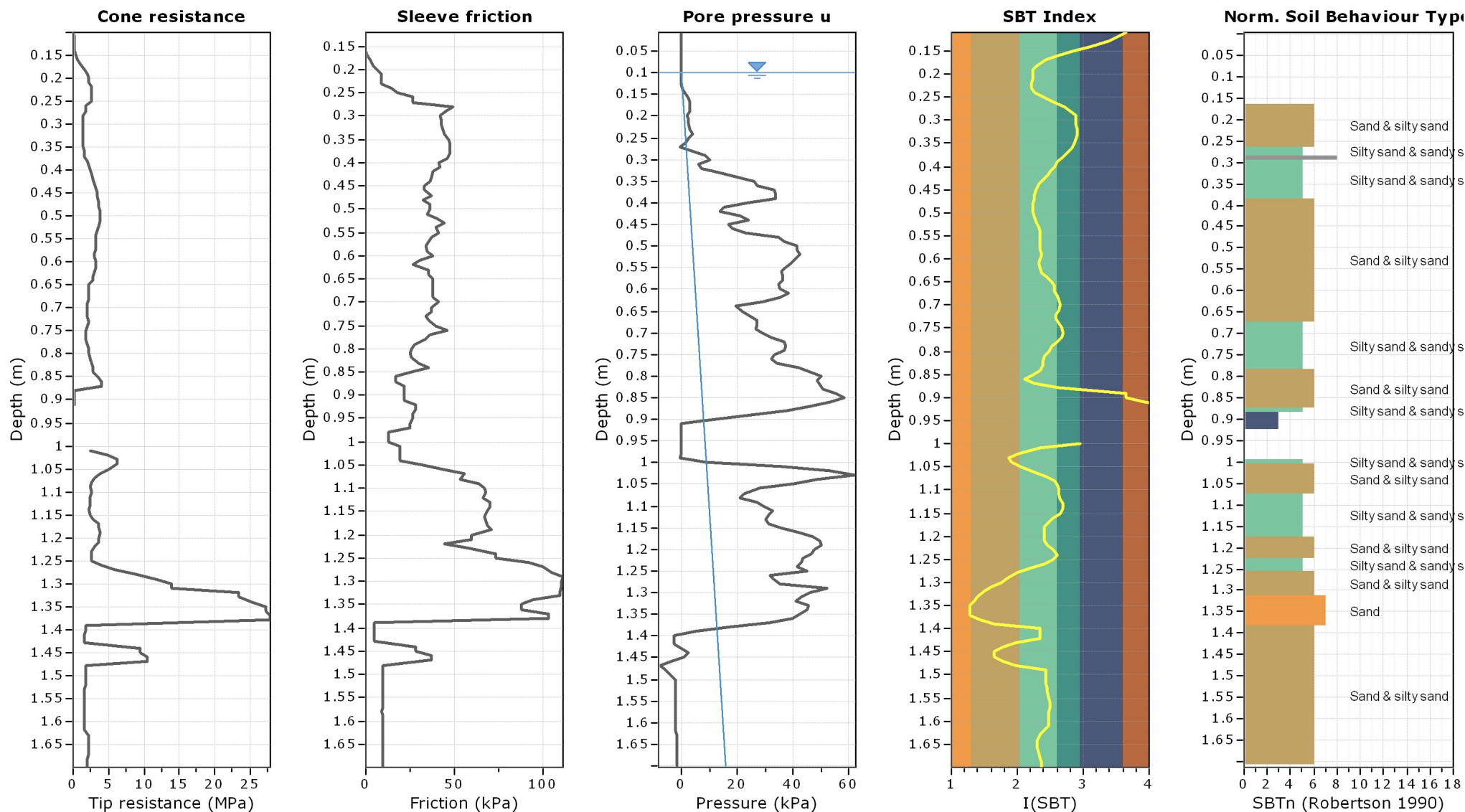


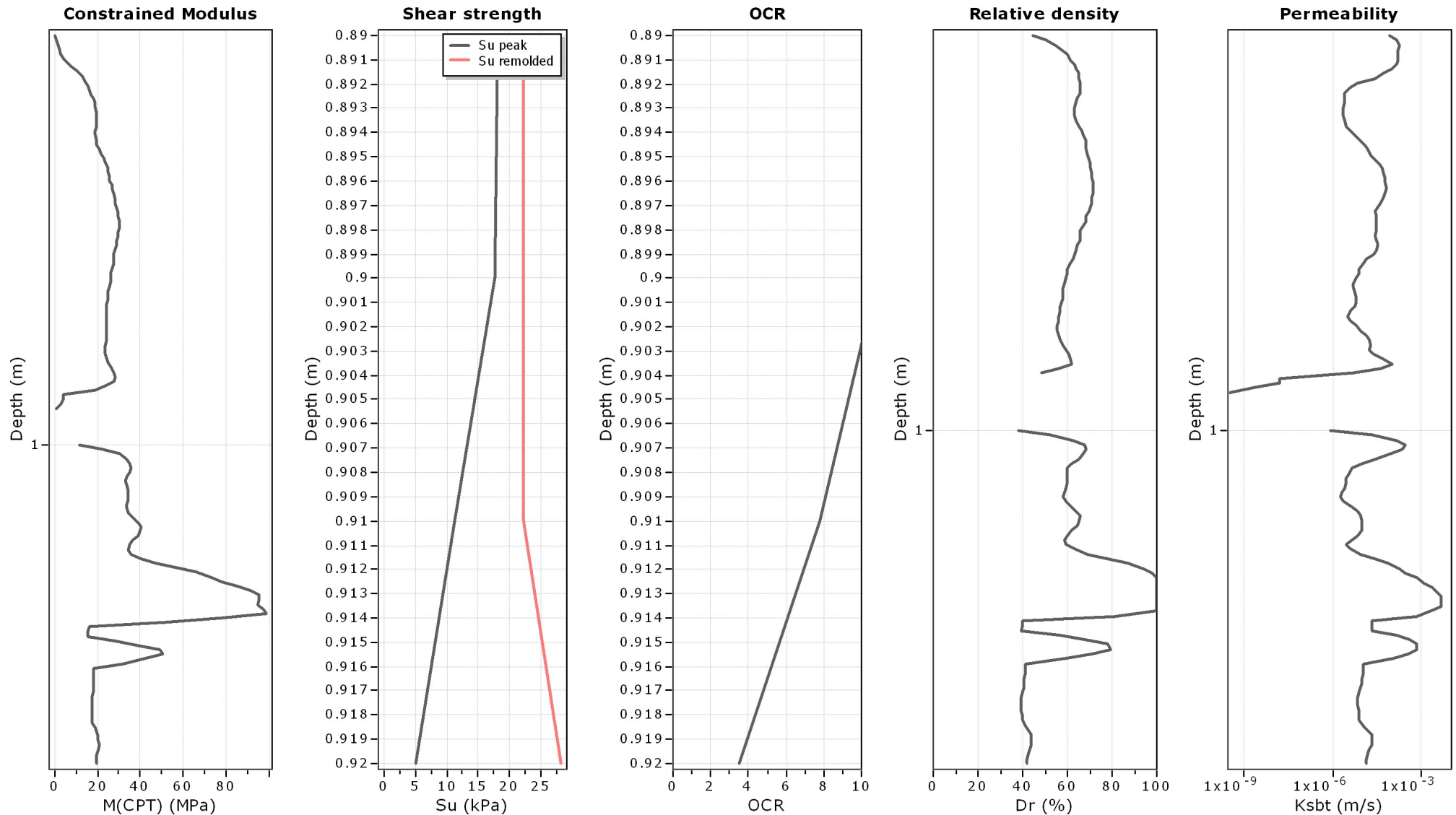


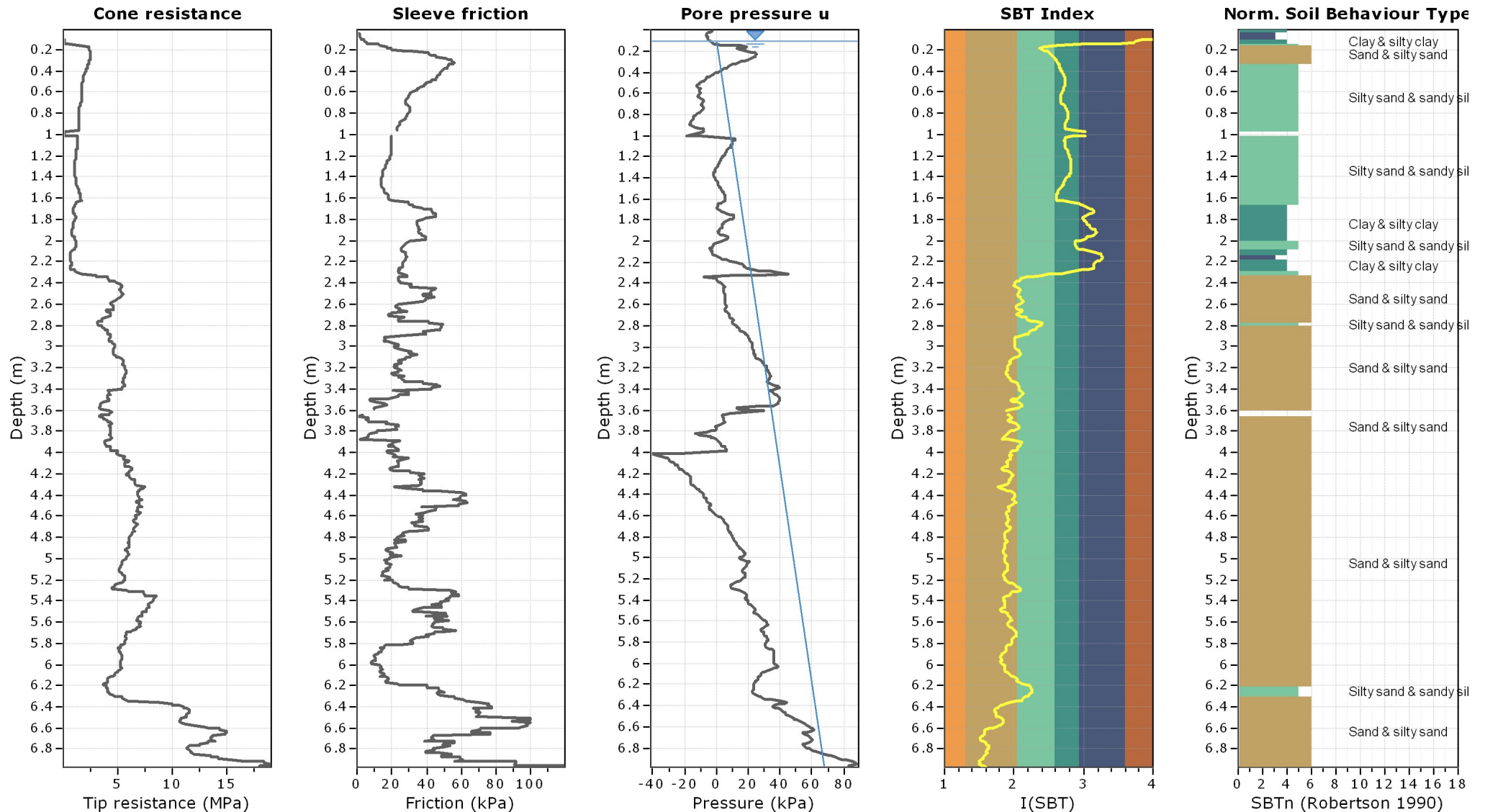


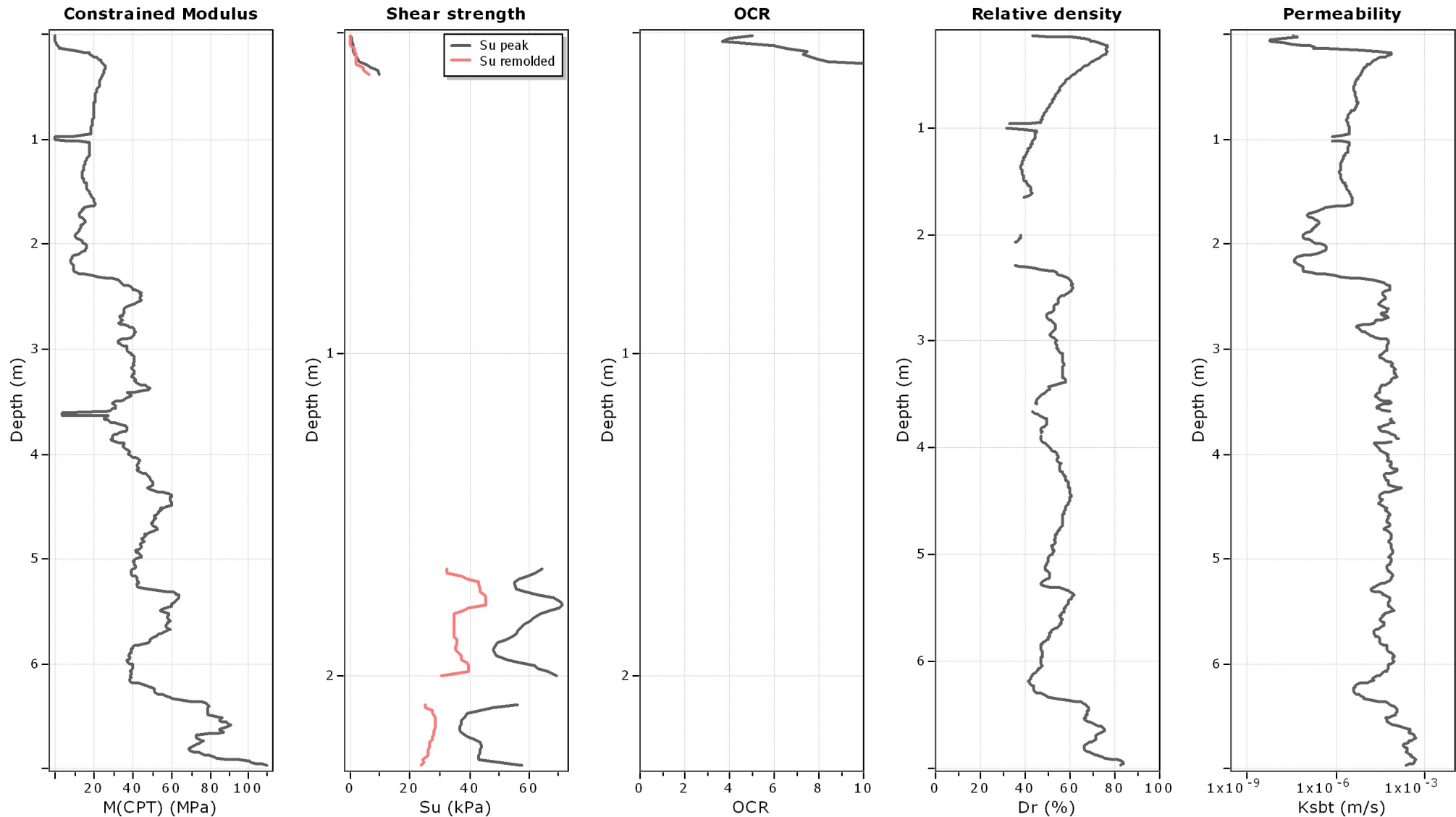


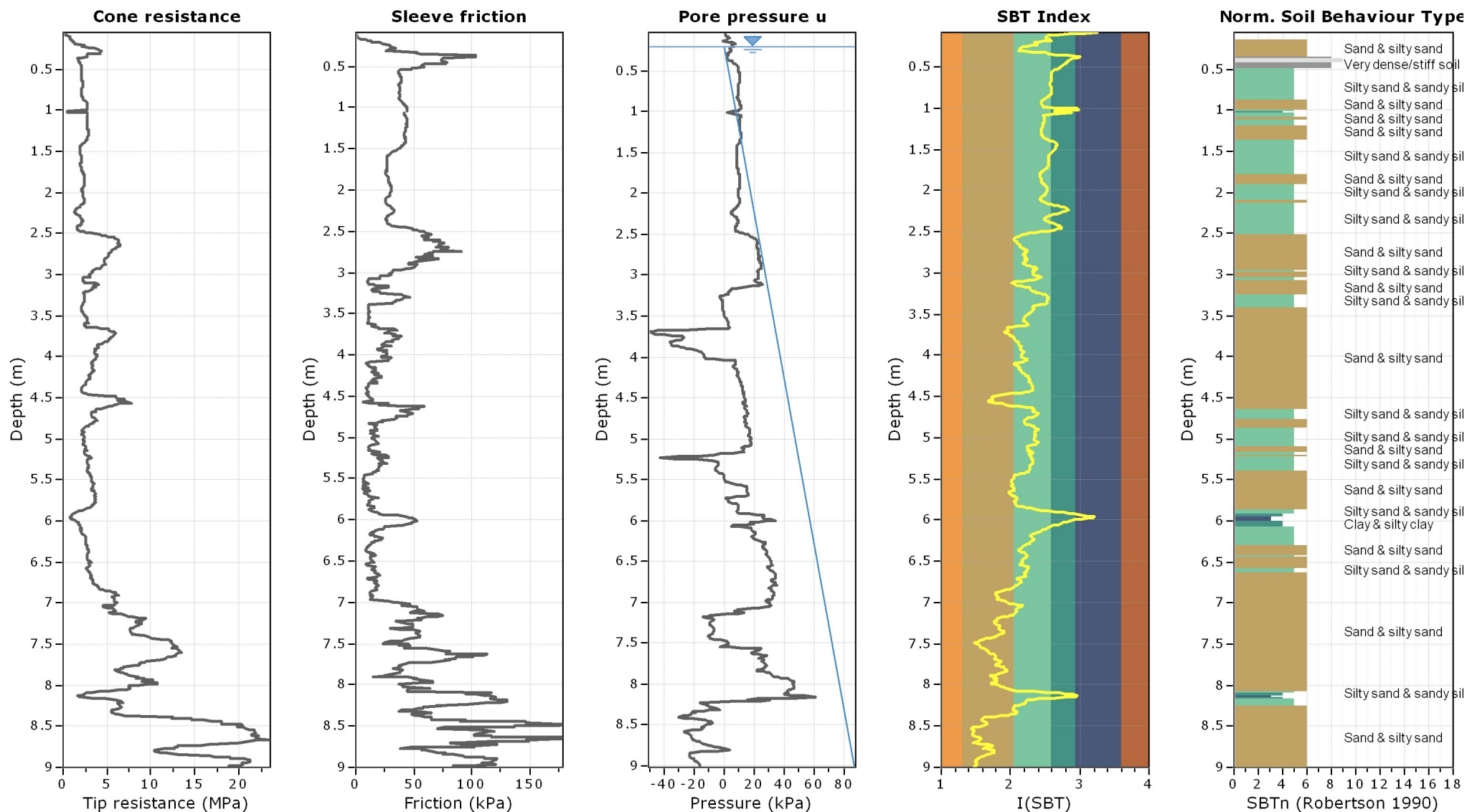


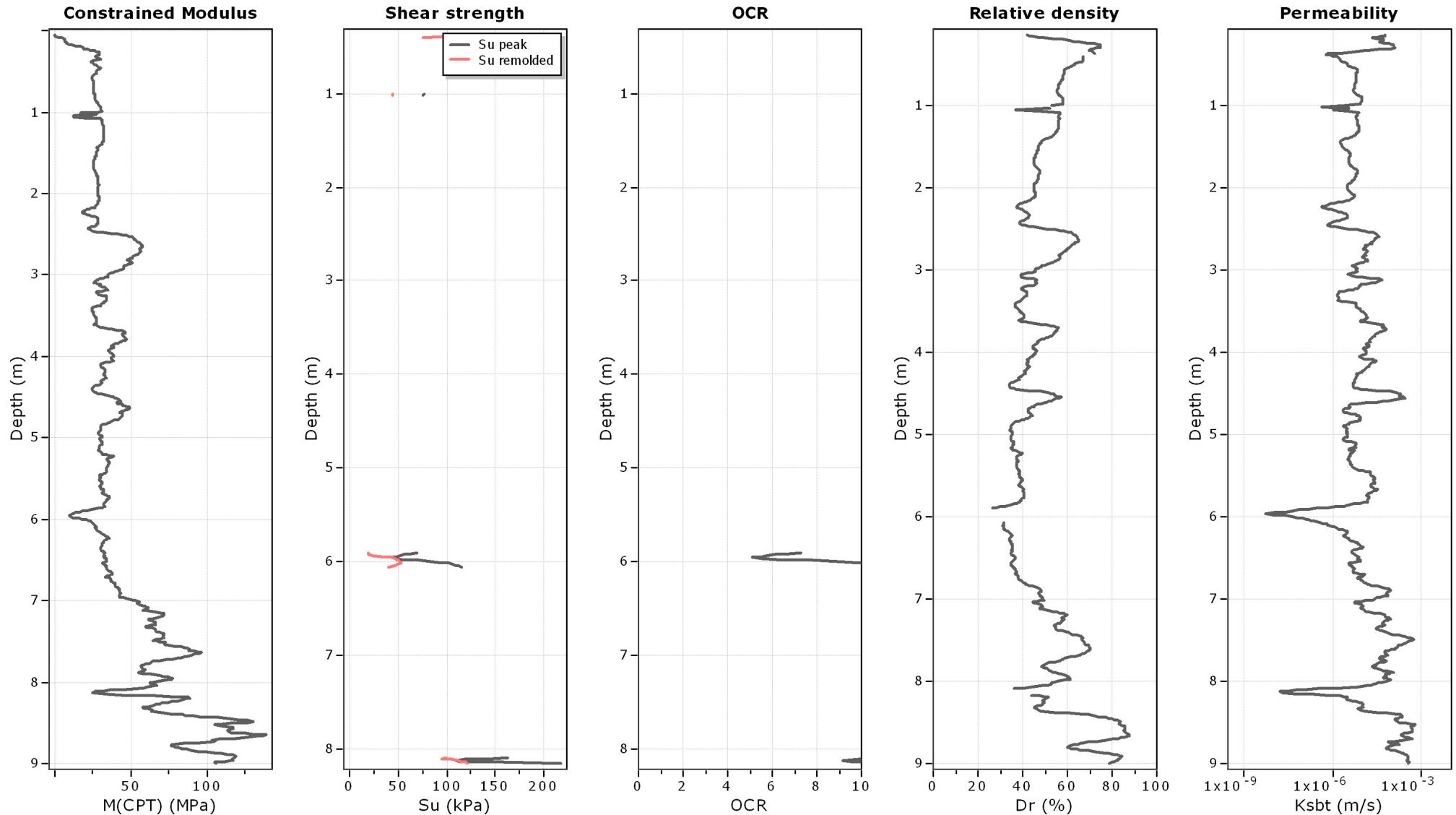


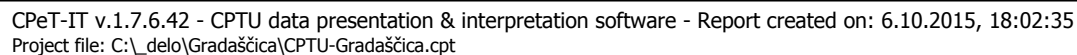


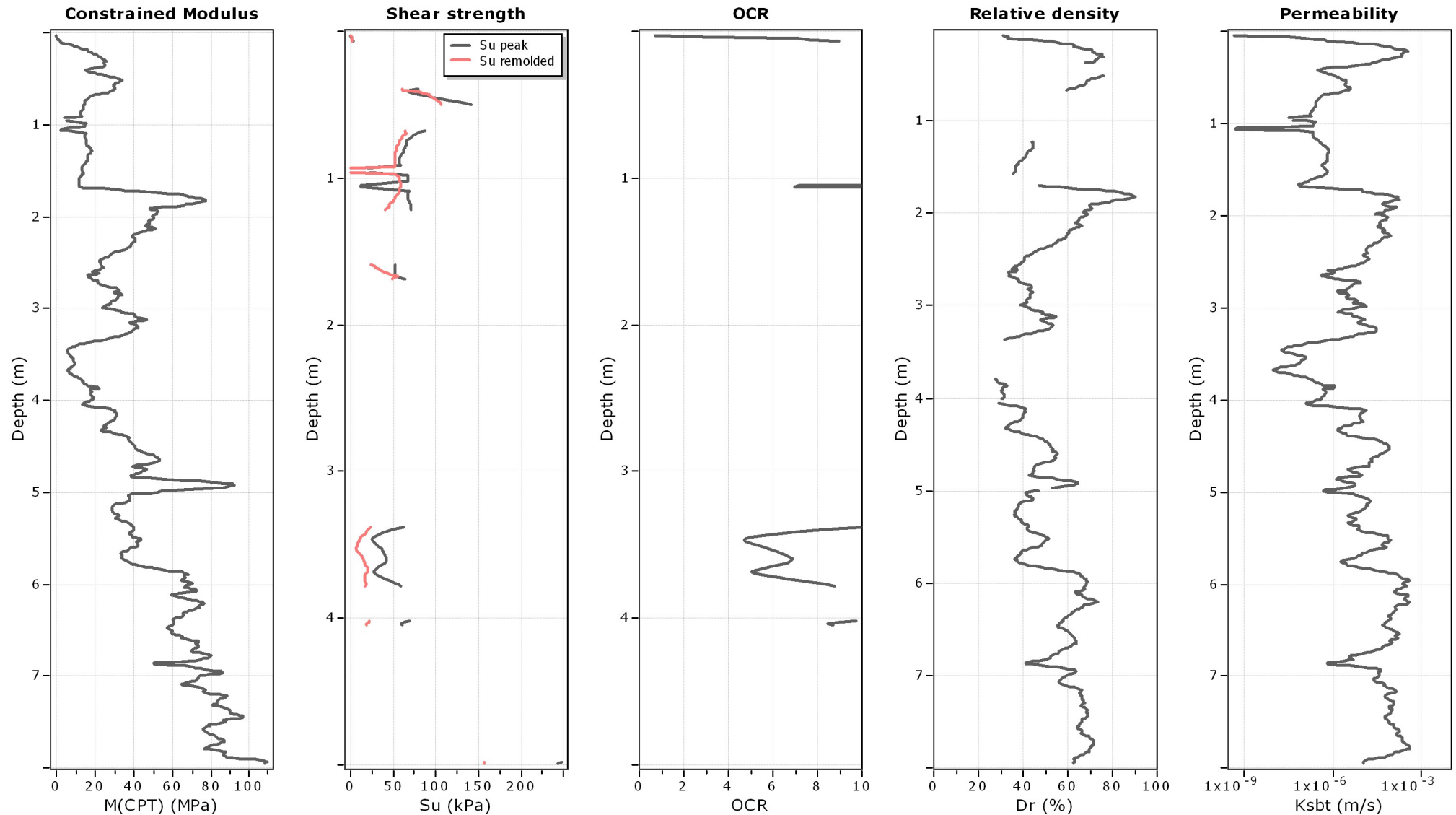


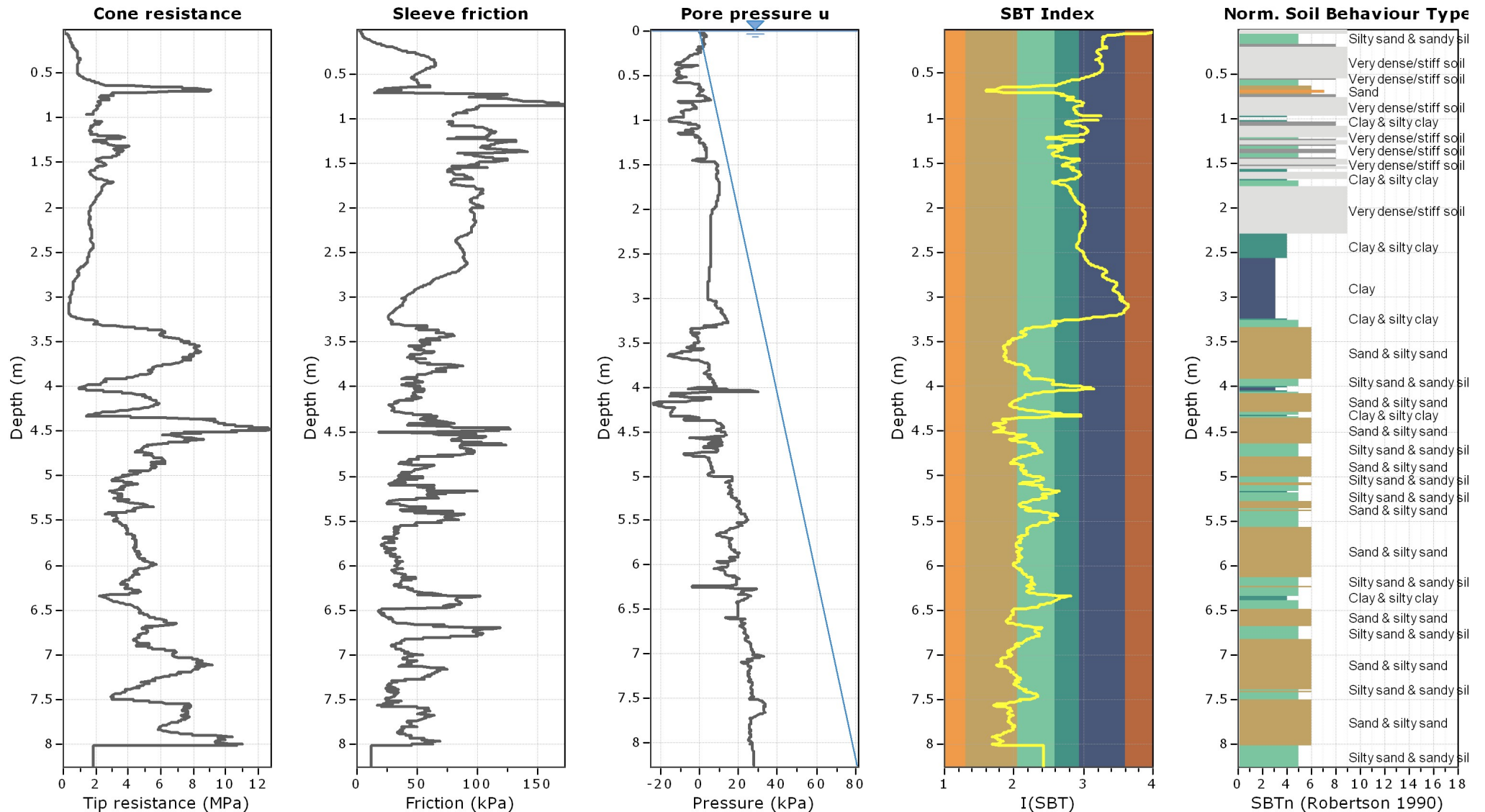


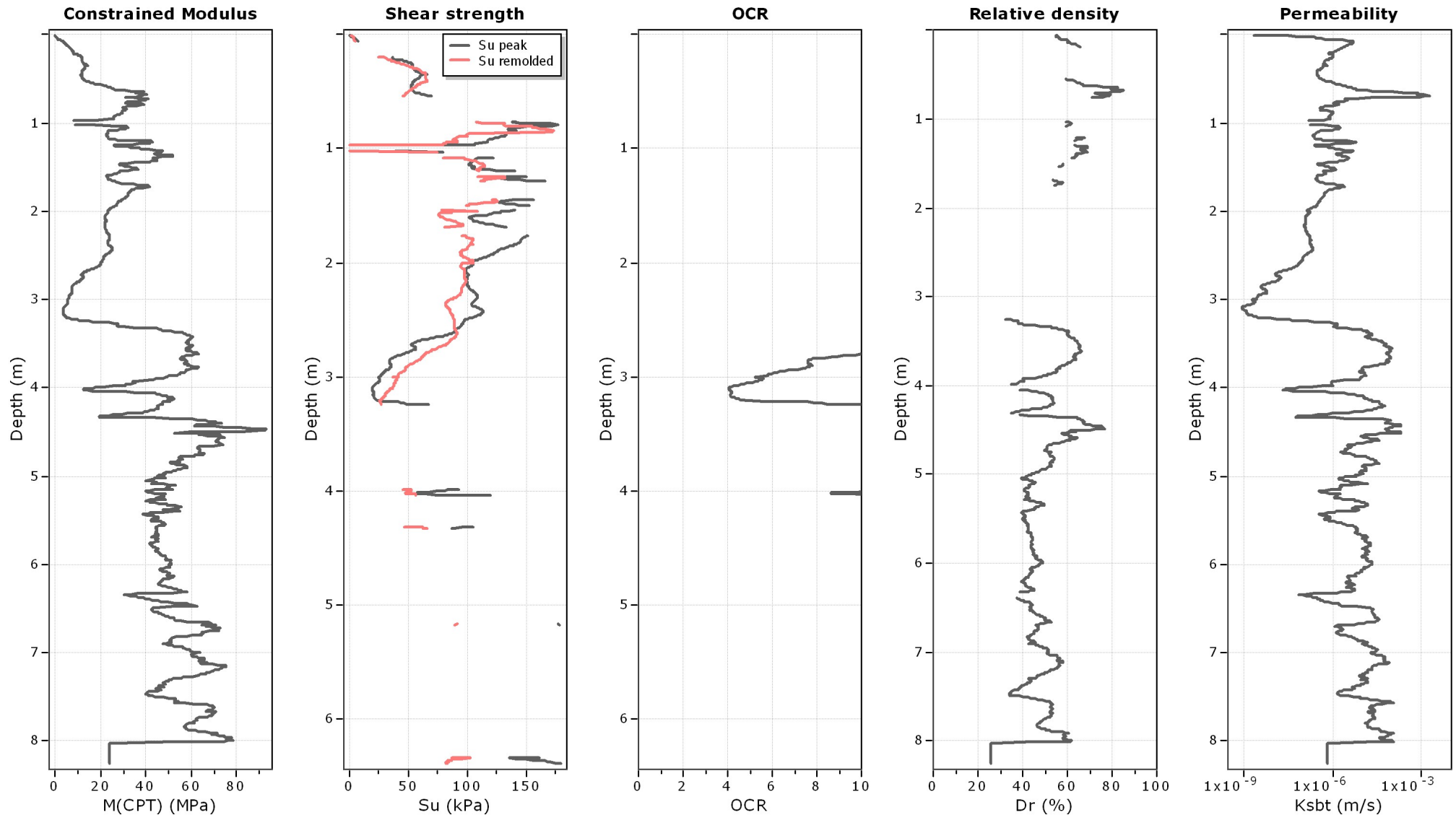


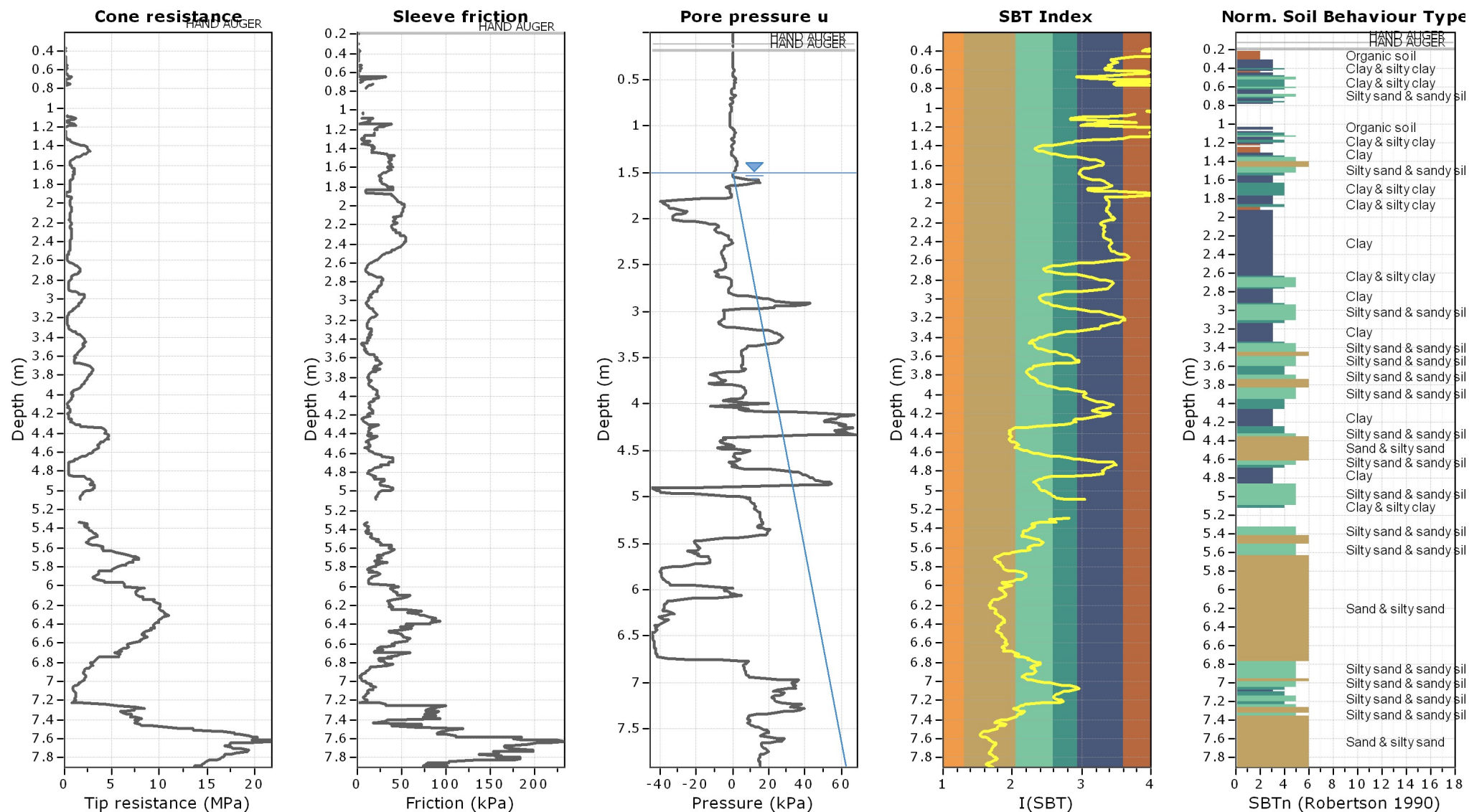


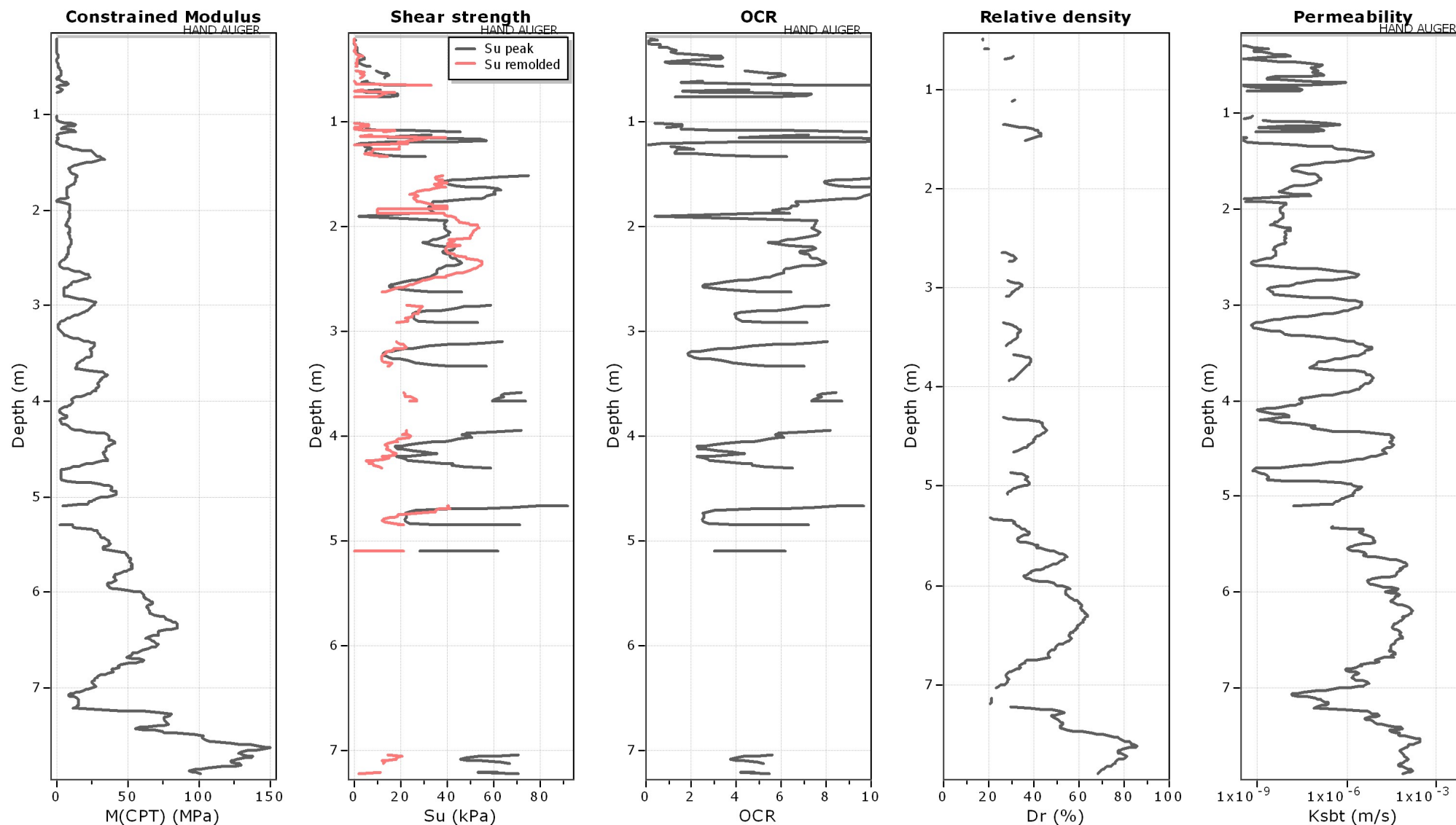


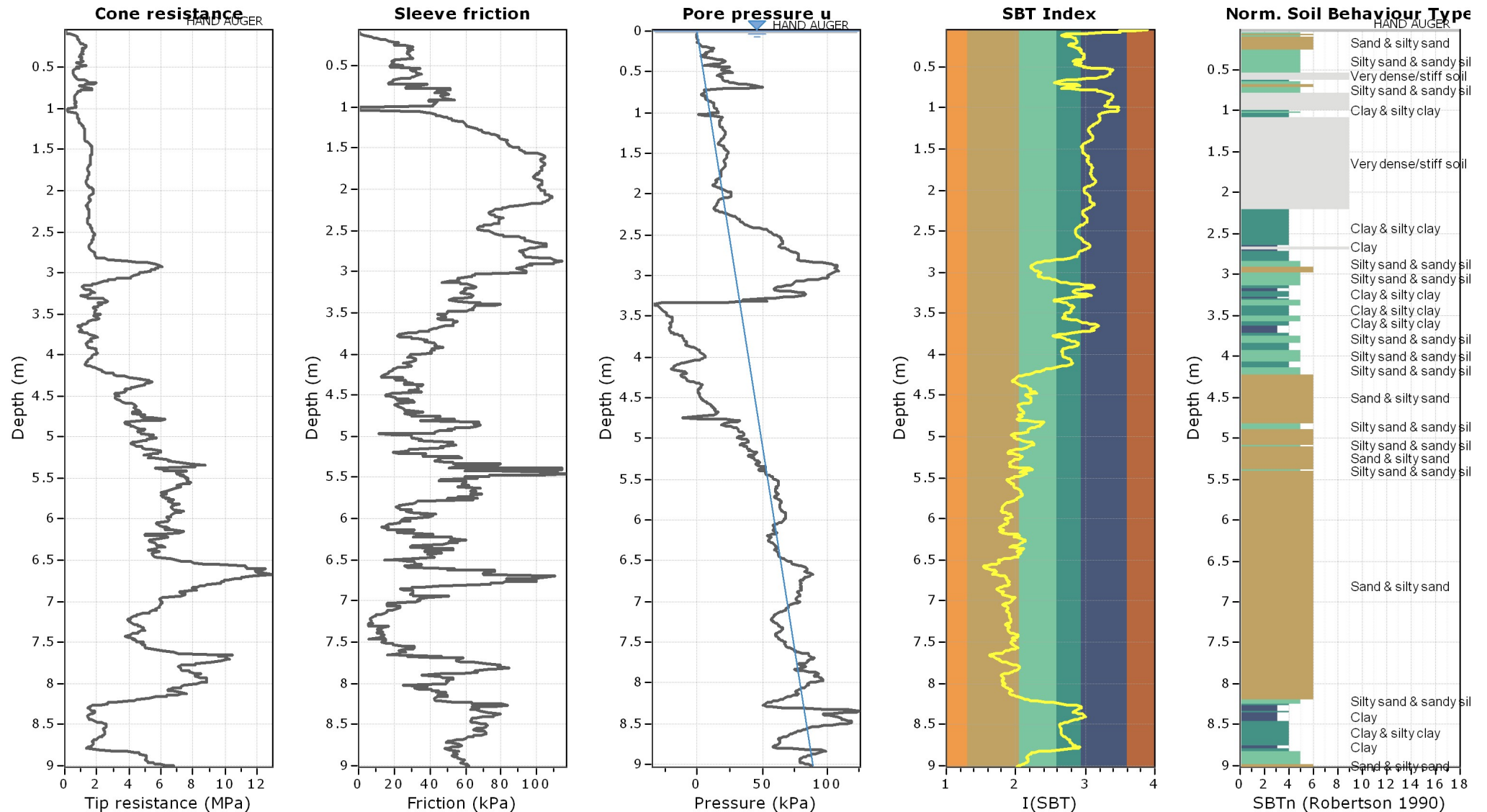


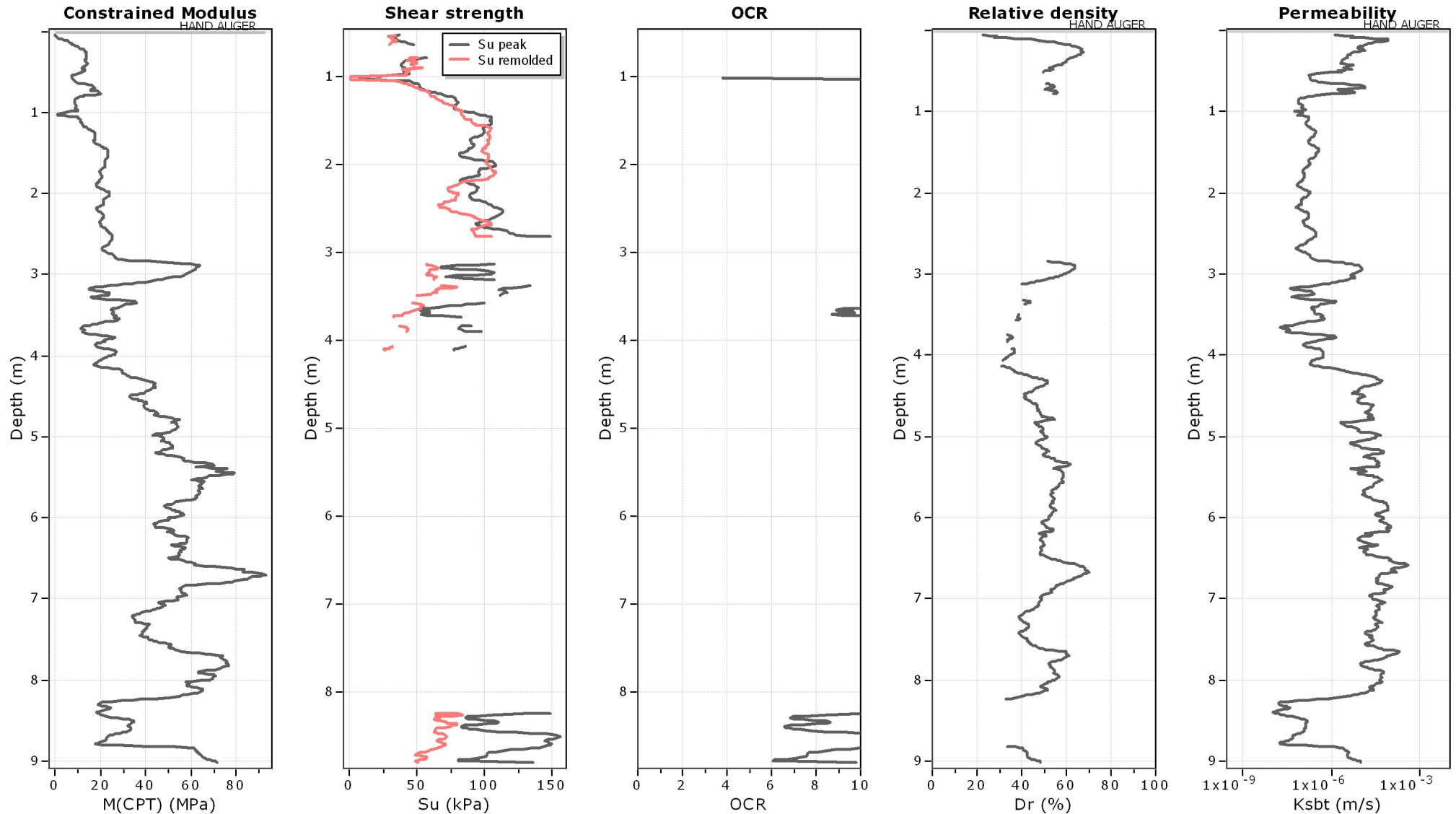


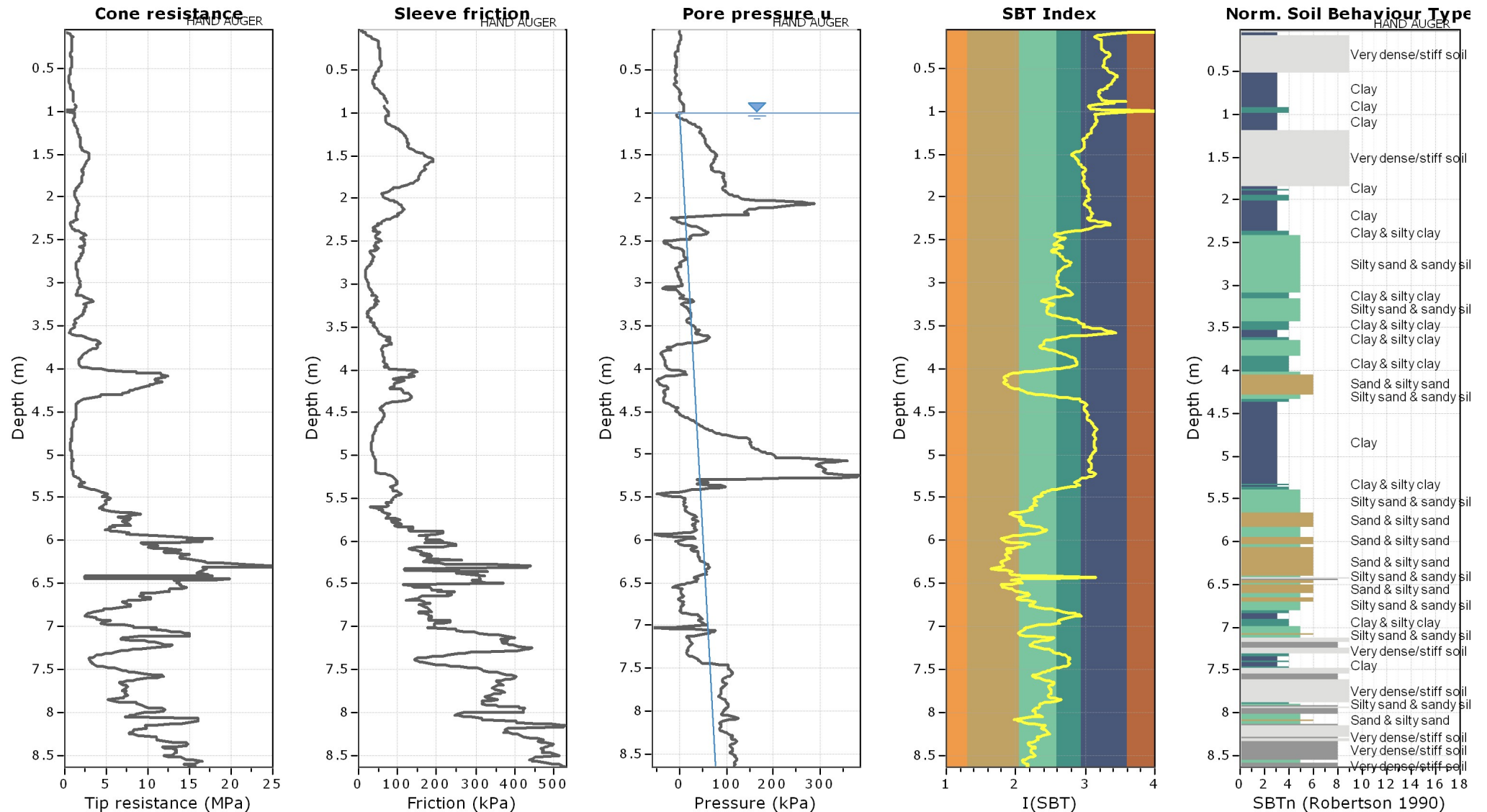


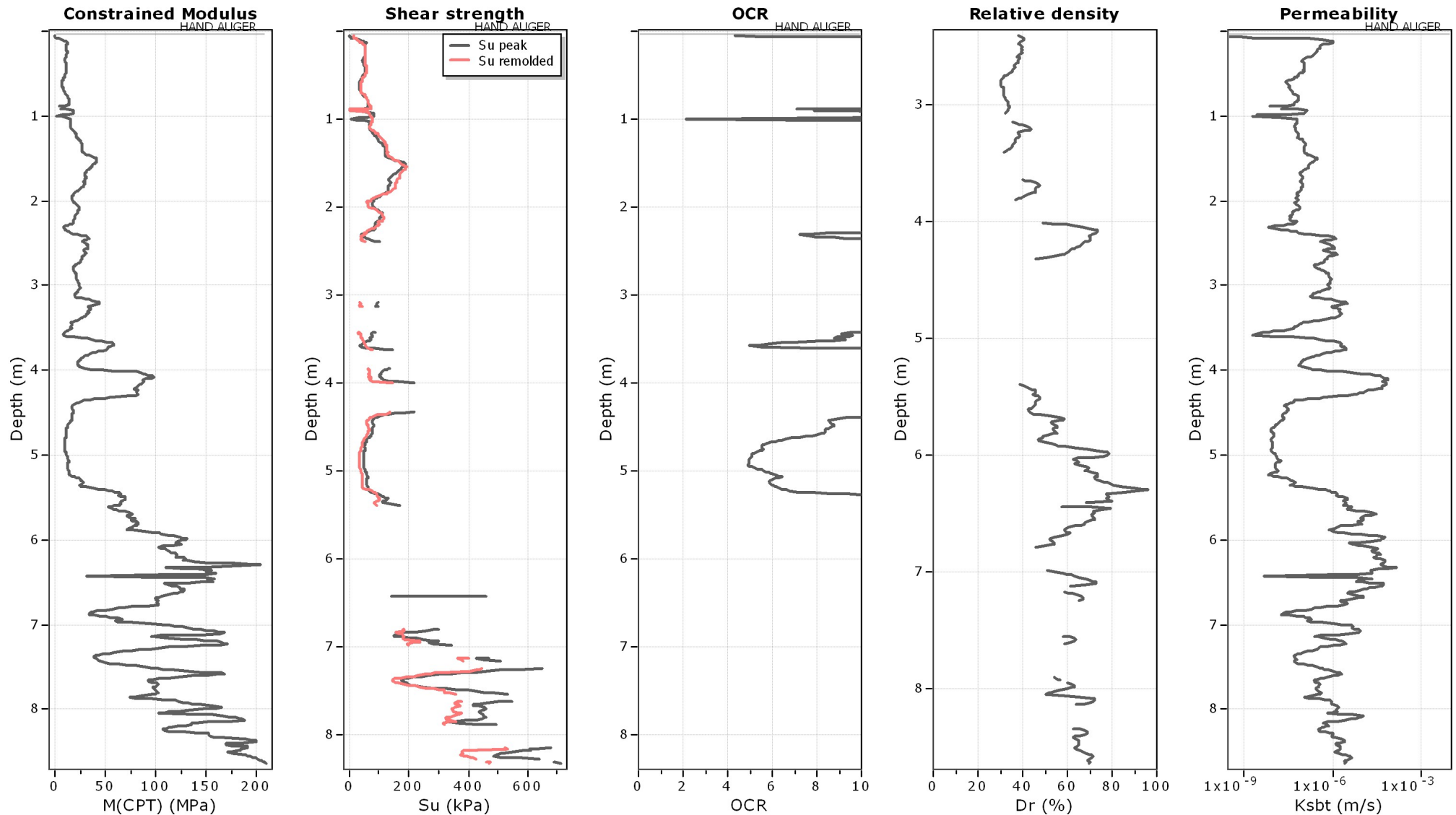


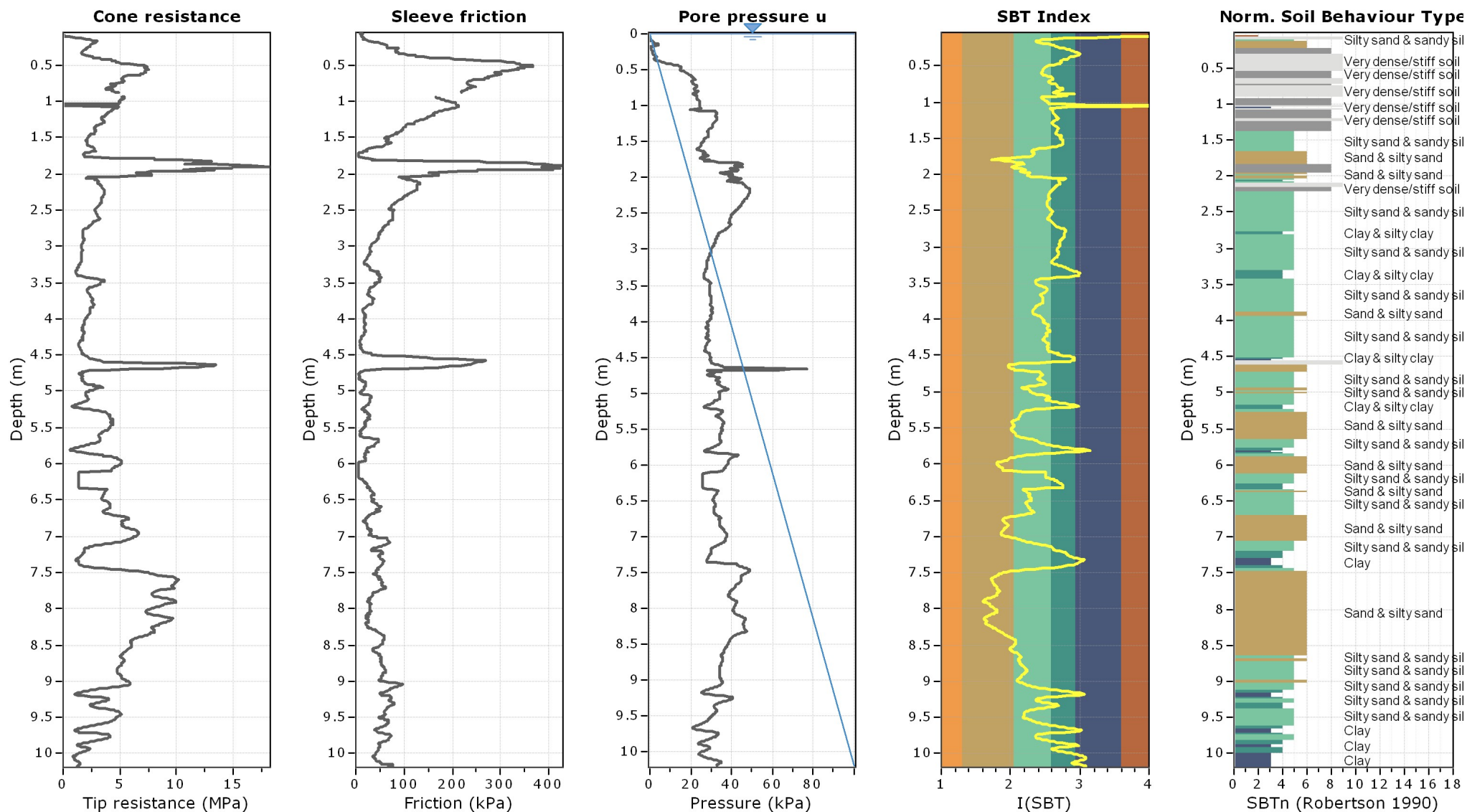


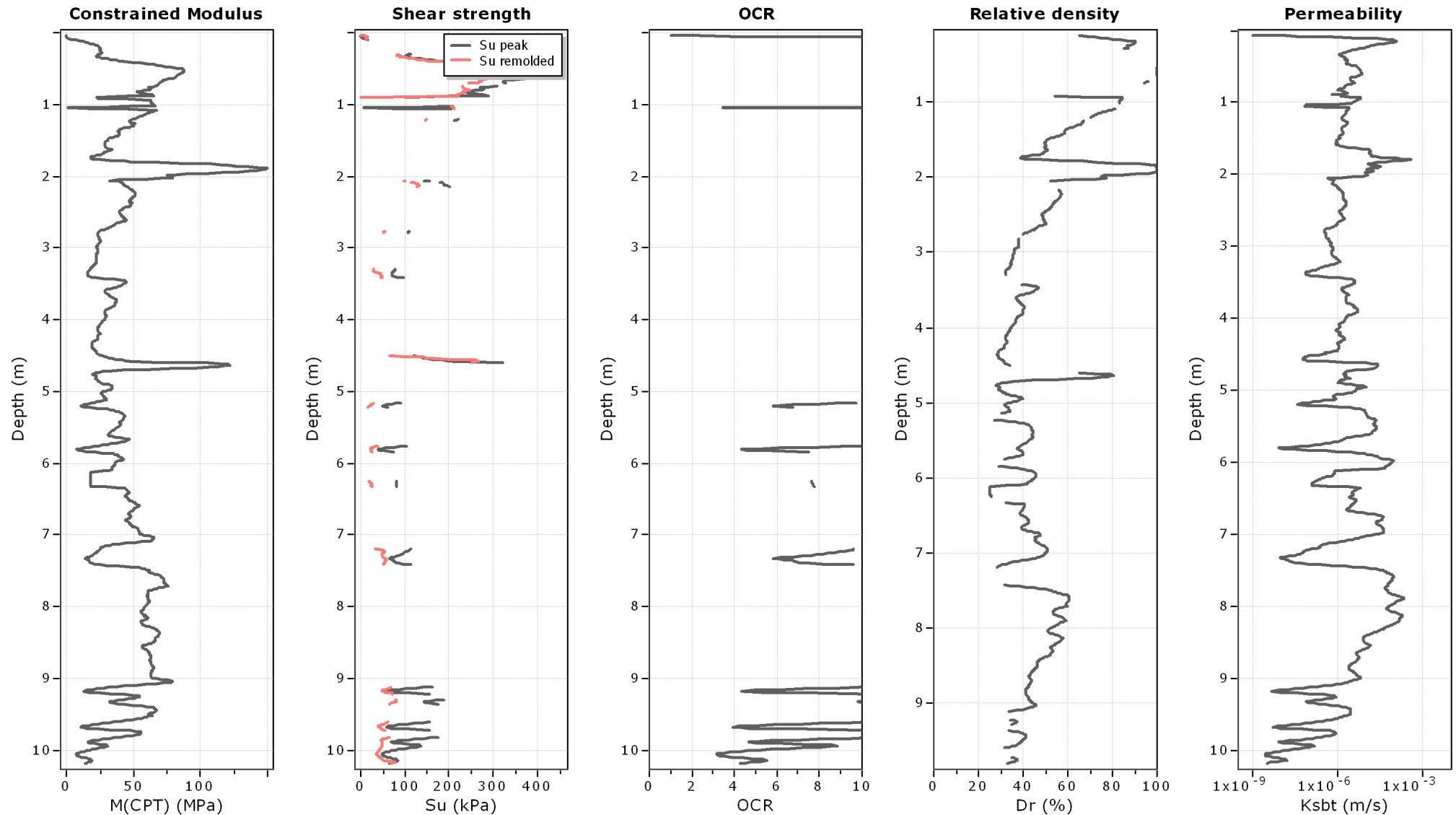


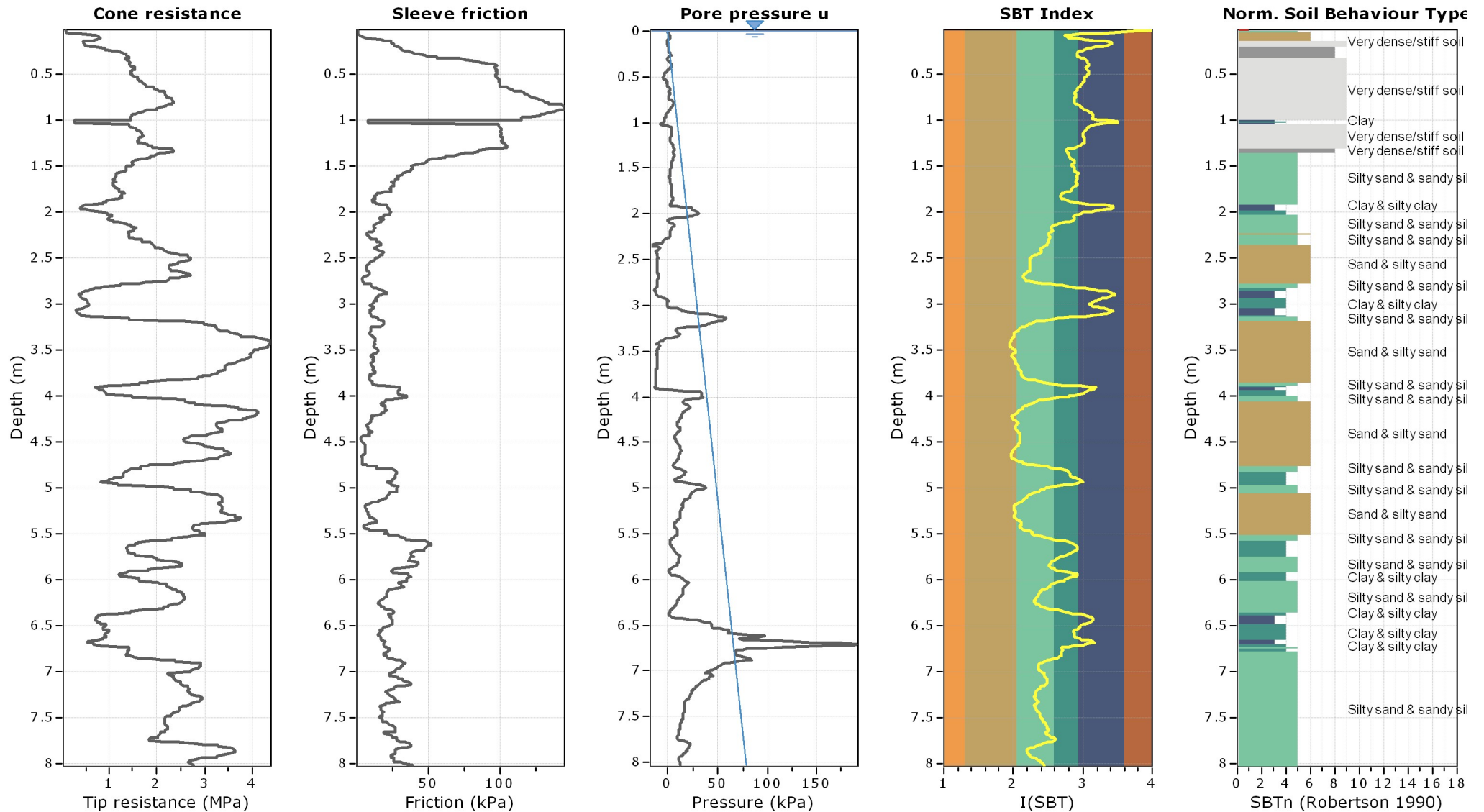


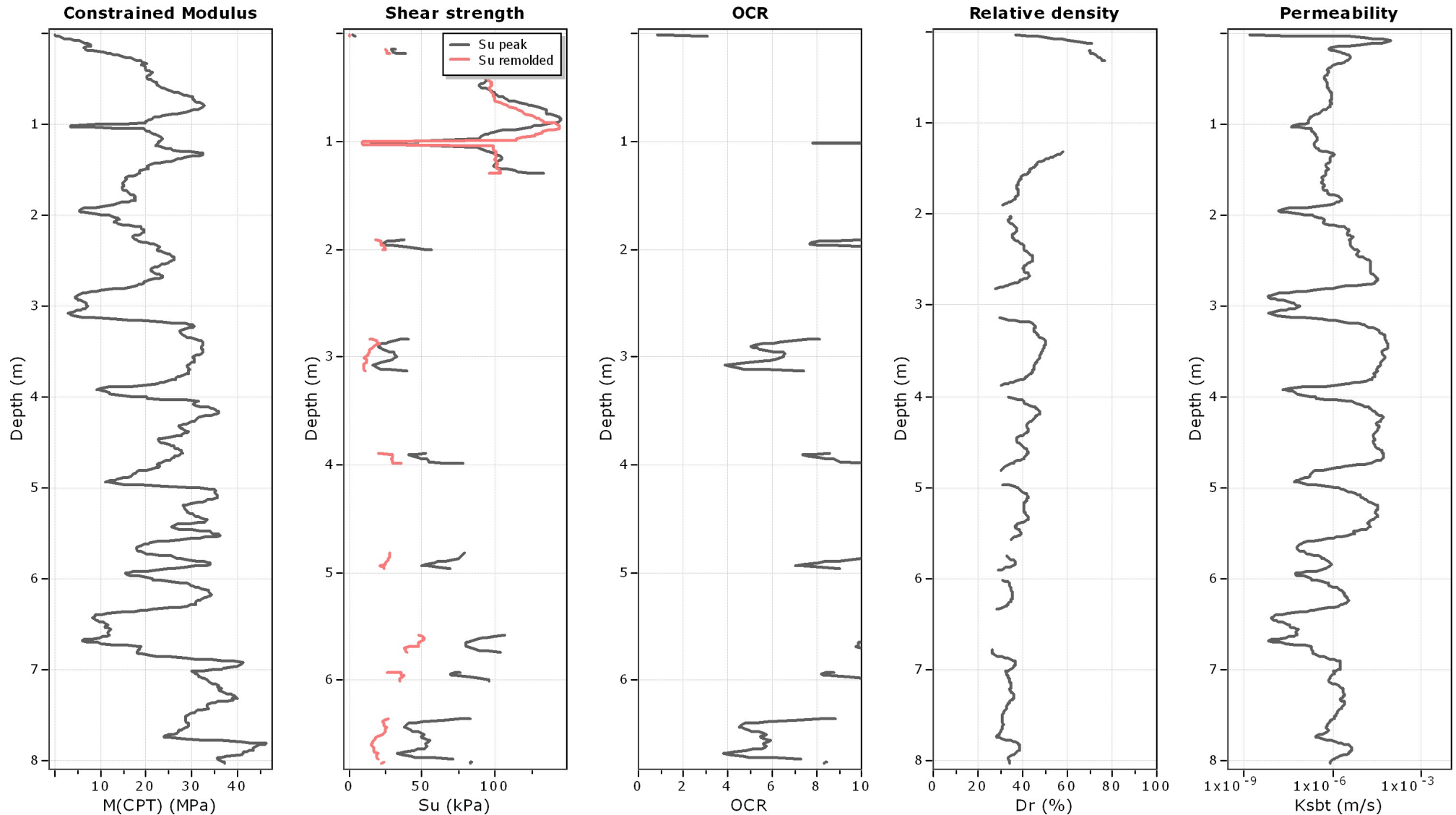












Priloga 2:

Grafični prikaz in obdelava rezultatov meritev modula stilsjivosti

