

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Dušan M. Berisavljević

**GEOTEHNIČKO MODELIRANJE TLA NA OSNOVU
PARAMETARA ODREĐENIH SEIZMIČKIM
DILATOMETROM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dušan M. Berisavljević

**GEOTECHNICAL SOIL MODELING BASED ON THE
PARAMETERS OBTAINED BY SEISMIC
DILATOMETER**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

- Mentor:** dr Vladimir Čebašek, vanredni profesor
Uža naučna oblast: Eksplotacija čvrstih mineralnih sirovina i mehanika stena
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
- Članovi komisije:** dr Nebojša Gojković, redovni profesor
Uža naučna oblast: Eksplotacija čvrstih mineralnih sirovina i mehanika stena
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
- dr Dragoslav Rakić, docent
Uža naučna oblast: Mehanika tla i fundiranje, mehanika stena i inženjerska geologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
- dr Zvonimir Bošković, docent
Uža naučna oblast: Eksplotacija tečnih i gasovitih mineralnih sirovina
Univerzitet u Banja Luci, Rudarski fakultet Prijedor
- dr Nenad Šušić, naučni savetnik
Institut za ispitivanje materijala – IMS

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Kao prvo, želeo bih da iskažem svoju veliku zahvalnost profesoru Vladimиру Čebašku za utrošeno vreme i podršku koju mi je pružio tokom izrade disertacije. Posebno sam mu zahvalan što je uvek bio na raspolaganju kad god mi je bio potreban i što je savetima uvek znao da me usmeri i vrati na pravi put kad god bih zalistao.

Profesor Čebašek je stvorio opšte uslove za izradu disertacije i bez njega realizacija ne bi bila moguća.

Želeo bih da se zahvalim profesoru Nebojši Gojkoviću što je prihvatio da bude deo komisije i što je svojim znanjem i iskustvom iz predmetne problematike doprineo da disertacija bude bolja.

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru Dragoslavu Rakiću koji mi je još za vreme osnovnih studija svojim zanimljivim predavanjima i interaktivnim pristupom nastavi usadio ljubav prema geotehničkom inženjerstvu. Iz te ljubavi izrodila se želja za kontinuiranim usavršavanjem i studioznom pristupu prilikom rešavanja praktičnih i akademskih problema. Ideja da dilatometar bude predmet izučavanja doktorske disertacije potiče od profesora Rakića kada je u jednom trenutku spomenuo da je potrebno nabaviti DMT radi realizacije naučnog projekta na kome smo zajedno učestvovali. Veoma sam mu zahvalan na pruženoj podršci i savetima koji su mi omogućili da unapredim svoj rad i kvalitet disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem dr Nenadu Šušiću koji je omogućio izvođenje jednog dela eksperimentalnih istraživanja i koji me je svojom nesebičnom podrškom podsticao na stalni napredak. Često bi mi omogućio da umesto tekućeg posla, pogotovo na početku kada je bilo najteže, radim na izradi disertacije na čemu sam mu neizmerno zahvalan.

Zahvaljujem se profesoru Silvanu Marchetti-u i Diego Marchetti-u koji su svoje vreme trošili da odgovore na beskonačno mnogo email-ova koje sam im slao kako bi smo zajedno diskutovali rezultate dilatometra. Zahvalan sam im i što su mi obezbedili, inače nedostupnu literaturu koja mi je u nekim trenucima bila od izuzetnog značaja.

Zahvalnost dugujem Radojici Milićeviću i njegovom timu iz Laboratorije za mehaniku tla Instituta IMS na izdvojenom vremenu prilikom izvođenja laboratorijskih opita. Zahvaljujem se profesoru Slobodanu Ćoriću i profesoru Čaki Laslu na podršci i savetima koje su mi pružili prilikom izrade disertacije. Zahvaljujem se dr Aleksandri Mitrović koja je pokazala ogromno interesovanje za disertaciju, a vrlo često je znala da se zauzme za mene kada mi je bilo teško. Zahvaljujem se kolegama iz odeljenja za Geotehniku Instituta IMS koji su preuzeли na sebe deo

posla i time mi stvorili više prostora za izradu disertacije. Zahvalujem se bratu Zoranu i Urošu, ocu Milanu i majci Snežani koji su mi pružali podršku prilikom izrade disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici supruzi Eli i čerkama Uni i Sari koji su mi bili najveći oslonac i podrška i koji su me najbolje razumeli u najteža vremena. Žao mi je što tokom izrade disertacije nisam imao više vremena da se posvetim njima. Veoma sam zahvalan Eli što je veliki deo mojih obaveza preuzeila na sebe čime mi je omogućila da privедем disertaciju do kraja.

GEOTEHNIČKO MODELIRANJE TLA NA OSNOVU PARAMETARA ODREĐENIH SEIZMIČKIM DILATOMETROM

Apstrakt:

U disertaciji je prikazana analiza i interpretacija rezultata koji se dobijaju kada se tlo ispita mehaničkim (DMT) i seizmičkim (SDMT) dilatometrom. Analizirani su pojedini činioci koji mogu da utiču na izmerene pritiske p_0 (A), p_1 (B) i p_2 (C) koji su osnovni podatak koji se dobija iz opita. Interpretacija je vršena u smislu geotehničkih parametara, pre svega čvrstoće i deformabilnosti proverom primenljivosti empirijskih zavisnosti na naše lokalne uslove i praksu. Poređenjem rezultata opita sa laboratorijskim opitima i merenjima na izgrađenim objektima izvedene su nove ili potvrđene postojeće korelacije za:

- parametre istorije opterećenja (OCR , p_c i k_0) u finozrnom tlu,
- parametre čvrstoće (ϕ' i s_u) i
- parametre deformabilnosti (E_{oed}).

Prikazane su međusobne zavisnosti između otpora na prodor konusa (q_c) i otpora na prodor sečiva (q_D) u grubozrnom tlu. Pokazano je da se na osnovu inicijalnog modula smicanja (G_0) može identifikovati tlo sa izraženom mikrostrukturom. Razlog je to što se G_0 određuje u domenu jako malih smičućih deformacija pri kojima struktura tla ostaje neporemećena. Sa druge strane utiskivanje sečiva izaziva velike smičuće deformacije okolnog tla, pa su svi izmereni parametri određeni u tlu čija je struktura delimično poremećena. Pokazano je da u tvrdim OC glinama iznad nivoa podzemne vode M_{DMT} zanatno precenjuje veličinu edometarskog modula (E_{oed}). U takvoj situaciji E_{oed} približno odgovara dilatometarskom modulu (E_D). Komparacijom izmerenih i računskih sleganja, za dva kapitalna objekta fundirana u dunavskom aluvionu, utvrđeno je da je procena sleganja iz DMT opita pouzdana. Poređenjem izmerenih sa računskim vertikalnih deformacijah tla ispod silosa na obali Dunava u Beogradu izdvojen je sloj kod koga DMT opit ne daje pouzdan rezultat i ne može da se interpretira zbog uslova dreniranja koji vladaju prilikom izvođenja opita. Od posebnog je značaja rezultati

SDMT opita u kolapsibilnom lesu. Pokazano je da se na osnovu prelaznih parametara I_D i K_D mogu izdvojiti zone kolapsibilnog lesa. Dat je postupak proračuna sleganja primenom rezultata DMT opita za prirodno stanje vlažnosti i nakon provlažavanja lesa.

Ključne reči: dilatometar, brzina smičućih talasa, čvrstoća i deformabilnost, sleganje, les, mikrostruktura

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Eksploracija čvrstih mineralnih sirovina i mehanika stena

UDK: **621:621.38**

622:622.33

624.121.5

624.131.1:551.2(043.3)

GEOTECHNICAL SOIL MODELING BASED ON THE PARAMETERS OBTAINED BY SEISMIC DILATOMETER

Abstract:

Dissertation presents analysis and interpretation of the results obtained when the soil is tested by mechanical (DMT) and seismic (SDMT) dilatometer. Factors which influence measured pressures p_0 (A), p_1 (B) and p_2 (C) have been analysed. Interpretation is made in the light of geotechnical parameters, primarily strength and stiffness, by considering the applicability of empirical correlations on our local conditions and practice. Comparing the test results with laboratory tests and with structure performance new correlations are derived and/or existing correlations are confirmed for:

- stress history parameters (OCR , p_c and k_0) in fine-grained soils,
- strength parameters (ϕ' i s_u) and
- stiffness parameters (E_{oed}).

Interrelationships between cone resistance (q_c) and blade resistance (q_D) in coarse-grained soils are presented. It is shown that initial shear modulus (G_0) can be utilized for determination of microstructure in soil. The reason for that lies in the fact that G_0 is determined in the low shear strain region in which microstructure remains undisturbed. On the other hand blade penetration cause large shear strains in surrounding soil, so that all measured parameters are obtained in the soil with partially destroyed structure. It is shown that in stiff OC clays M_{DMT} is significantly higher compared to oedometer modulus (E_{oed}). In that situation E_{oed} closely match dilatometer modulus (E_D). Comparisson of measured with calculated settlements for two major objects constructed in Danube's alluvion indicates that settlement prediction based on DMT is reliable. By comparing measured with calculated vertical strains in foundation soil below the Silo, at the Danube's bank in Belgrade, layer in which DMT test results are unreliable due to occurrence of partial drainage is allocated. Of particular importance are SDMT test results in collapsible loess. It is shown that intermediate parameters I_D and K_D can be

used to separate zones of collapsible loess. A method for calculating settlements in loess with natural moisture content and after saturation is proposed.

Key words: dilatometer, shear wave velocity, strength and stiffness, settlement, loess, microstructure

Scientific field: Mining engineering

Field of academic expertise: Exploitation of solid mineral resources and rock mechanics

UDK: 621:621.38

622:622.33

624.121.5

624.131.1:551.2(043.3)

SADRŽAJ

Spisak tabela	ix
Spisak slika	x
1. UVOD	1
1.1.Uvodna razmatranja	1
1.2.Struktura disertacije	2
1.3.Istorijski osvrt na upotrebu mehaničkog i seuzmičkog dilatometra	3
2. MEHANIČKI DILATOMETAR	6
2.1.Primena	6
2.2.Specijalne vrste dilatometara	6
2.2.1. „ <i>NGI Offshore</i> “ dilatometar	7
2.2.2. „ <i>UBC</i> “ istraživački dilatometar	8
2.2.3. „ <i>RD</i> “ istraživački dilatometar	8
2.2.4. „ <i>Newcastle</i> “ dilatometar (<i>NDMT</i>)	9
2.2.5. <i>Instrumentalizovani pločasti dilatometar „IDMT“</i>	10
2.2.6. „ <i>Novi</i> “ dilatometar	10
2.3.Vrsta tla podobna za ispitivanje DMT opitom	12
2.3.1. <i>Opšta upotrebljivost</i>	12
2.3.2. <i>Efekat „utiskivanja“</i>	14
2.4.DMT oprema	16
2.4.1. <i>Dilatometarsko sečivo sa membranom</i>	16
2.4.2. <i>Kontrolna jedinica</i>	19
2.4.3. <i>Oprema za kalibraciju i postupak kalibriranja</i>	20
2.4.4. <i>Pneumatsko-električni (p-e) kablovi</i>	23
2.4.5. <i>Izvor gasa</i>	24
2.4.6. <i>Kabl za uzemljenje</i>	25
2.4.7. <i>Šipke za utiskivanje sečiva</i>	26
2.5.Oprema za utiskivanje sečiva	27
2.5.1. <i>Oprema za utiskivanje na kopnu</i>	27
2.5.2. <i>Oprema za utiskivanje izvan kopna</i>	28
2.6.Postupak izvođenja DMT opita	29
2.6.1. <i>Uticaj brzine protoka gasa na izmerene vrednosti pritisaka A i B</i>	31
2.6.2. <i>Vreme potrebno da se ispita 1 m tla</i>	32
2.6.3. <i>Vertikalno rastojanje između opita (interval ispitivanja)</i>	32
3. SEIZMIČKI DILATOMETAR (SDMT)	33
3.1.Seizmički talasi – vrste i osobine	33
3.2.Faktori koji utiču na brzinu smičućih talasa	35
3.2.1. <i>Stepen zasićenja</i>	35
3.2.2. <i>Efektivno naponsko stanje (anizotropija)</i>	36
3.2.3. <i>Cementacija</i>	39

3.3.SDMT oprema	41
3.3.1. <i>Seizmički modul</i>	42
3.3.2. <i>Izvor seizmičkih talasa</i>	43
3.4.Postupak ispitivanja	44
3.5.Proračun brzine smičućih talasa (V_s)	46
4. ODREĐIVANJE PARAMETARA	49
4.1.Određivanje pritisaka p_0 , p_1 i p_2	50
4.2.Porni pritisci tokom izvođenja opita	52
4.2.1. <i>Pesak</i>	52
4.2.2. <i>Glina</i>	53
4.3.Određivanje prelaznih parametara	55
4.3.1. <i>Indeks materijala (I_D)</i>	55
4.3.2. <i>Dilatometarski modul (E_D)</i>	59
4.3.3. <i>Indeks horizontalnog napona (K_D)</i>	61
4.3.4. <i>Indeks pornog pritiska (U_D)</i>	62
5. INTERPRETACIJA REZULTATA	64
5.1.Porni pritisci i nivo podzemne vode	65
5.2.Klasifikacija tla	67
5.2.1. <i>Marchetti i Crapps (1981)</i>	68
5.2.2. <i>Lacasse i Lunne (1988)</i>	69
5.2.3. <i>Schmertmann (1988)</i>	71
5.2.4. <i>Larsson (1989)</i>	72
5.2.5. <i>Cruz i sar. (2012)</i>	72
5.2.6. <i>Rivera-Cruz i sar. (2012)</i>	74
5.2.7. <i>Robertson (2015)</i>	77
5.3.Mikrostruktura u tlu	79
5.4. Predlog dijagrama za određivanje vrste tla i prisustva mikrostrukture	81
5.4.1. <i>Validacija predloženog dijagrama</i>	83
5.5.Zapreminska težina u prirodnom stanju	90
5.6.Istorija opterećenja i zbijenost tla	94
5.6.1. <i>Stepen prekonsolidacije (OCR) i napon prekonsolidacije (p_c')</i>	95
5.6.1.1. <i>Određivanje OCR u finozrnom tlu</i>	97
5.6.1.2. <i>Određivanje OCR u grubozrnom tlu</i>	102
5.6.2. <i>Koeficijent bočnog pritiska tla u stanju mirovanja (k_0)</i>	103
5.6.2.1. <i>Korelacije za finozrna tla</i>	103
5.6.2.2. <i>Korelacije za grubozrna tla</i>	107
5.6.3. <i>Relativna zbijenost (D_R)</i>	110
5.7.Parametri čvrstoće	112
5.7.1. <i>Ugao smičuće čvrstoće peska (φ')</i>	112
5.7.1.1. <i>Određivanje φ_p' direktno iz K_D</i>	114
5.7.1.2. <i>Određivanje φ_p' iz teorije prodora klina</i>	115
5.7.1.3. <i>Određivanje φ_p' iz izmerenih V_s</i>	117

5.7.2. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla (s_u)	122
5.8. Penetracione otpornosti pri utiskivanju dilatometarskog sečiva	126
5.8.1. Zavisnost između sile utiskivanja i efektivnog prvog čitanja (p_0)	132
5.8.2. Zavisnost između q_D i DMT parametara	133
5.8.3. Zavisnost između q_D i G_0 u pesku	136
5.9. Parametri deformabilnosti	138
5.9.1. Inicijalni modul smicanja (G_0)	139
5.9.2. Određivanje ekvivalentnog modula (E_s) iz izmerenih V_s	140
5.9.3. Modul stišljivosti (M_{DMT})	141
5.9.3.1. Opravdanost upotrebe M_{DMT} kao konstante	142
5.9.4. Određivanje ekvivalentnog modula (E_{eq}) upotrebom G_0 i E_D	144
5.9.5. Procena kvaliteta uzorka tla	144
5.9.6. Poređenje E_{oed} i M_{DMT} za finozrno tlo iznad nivoa podzemne vode	148
6. KOMPARACIJA SLEGANJA	153
6.1. Silos na obali Dunava u Beogradu	153
6.1.1. Poređenje izmerenih i računskih sleganja	156
6.2. Rezervoar za skladištenje naftnih derivata u Smederevu	163
6.2.1. Poređenje izmerenih i računskih sleganja	165
7. INTERPRETACIJA SDMT OPITA U LESU	171
7.1. Cilj istraživanja	172
7.2. Prethodna istraživanja u lesu vezana za (S)DMT opit	172
7.3. Geotehnička svojstva izučavanog lesa	173
7.4. Kolapsibilnost lesa – identifikacija i kvantifikacija	174
7.5. Rezultati SDMT opita u kolapsibilnom lesu	178
7.5.1. Prikaz rezultata u polulogaritamskom dijagramu	181
7.6. Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za kolapsibilni les	182
7.7. Zavisnost između M_{DMT} i q_c u lesu	185
7.8. Predlog postupka za određivanje indeksa kolapsibilnosti	185
7.9. Zavisnost između odnosa G_0/M_{DMT} i K_D za les	187
8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE	189
9. LITERATURA	193
<u>DODATAK I</u>	
I.1. UVOD	209
I.2. OSNOVE D&M TEORIJE	209
I.2.1. Mehanizam loma tla u okolini sečiva	209
I.2.2. Formulacija metode	210
I.2.3. Određivanje faktora nosivosti ($N_{\gamma q}$)	211
I.3. METODA ZA ODREĐIVANJE ϕ_{ps}' - SCHMERTMANN (1988)	215
I.3.1. Određivanje k_0 iz K_D (Schmertmann, 1983)	215
I.3.2. Značaj naponskog stanja kod određivanja ϕ_{ps}'	215
I.3.3. Ravnoteža vertikalnih sila	217
I.3.4. Iteracijom do ϕ_{ps}'	219

I.3.5. Uticaj hrapavosti ($\delta\varphi$) na φ_{ps}	219
DODATAK II	
II.1. UVOD	221
II.2. USLOVI DRENIRANJA	221
DODATAK III	
III.1. UVOD	225
III.2. PAROVI TAČAKA	225
DODATAK IV	
IV.1. UVOD	230
IV.2. PRIKAZ REZULTATA DMT/SDMT OPITA	230

SPISAK TABELA

<u>Tabela 1.1.</u> Izvedeni opiti u periodu 2011-2016. godine	4
<u>Tabela 2.1.</u> Upotrebljivost DMT opita u različitim vrstama tla	13
<u>Tabela 3.1.</u> Parametri materijala 1, 2, 3 i 4 sa slike 3.2	36
<u>Tabela 3.2.</u> Postupak izvođenja SDMT opita	46
<u>Tabela 4.1.</u> Vrsta tla prema I_D (Marchetti, 1980)	56
<u>Tabela 4.2.</u> Očekivani sadržaj frakcije gline u tlu prema izmerenoj veličini I_D	57
<u>Tabela 5.1.</u> Poređenje dubine do NPV dobijene iz p_2 i merenjem u bušotini	67
<u>Tabela 5.2.</u> Osnovne karakteristike tla prikazanih na slici 5.10.	77
<u>Tabela 5.3.</u> Dokumentovani podaci za DMT/SDMT opite i zapreminske težine	91
<u>Tabela 5.4</u> Zavisnost između OCR i K_D za $I_D < 1.2$	98
<u>Tabela 5.5.</u> Korelacije između K_D i K_0 za $I_D < 1.2$	104
<u>Tabela 5.6.</u> Parametar β_k u zavisnosti od vrste tla	104
<u>Tabela 5.7.</u> Korelacije između K_D i K_0 za $I_D > 1.8$	107
<u>Tabela 5.8.</u> Jednačine za određivanje s_u iz DMT opita	124
<u>Tabela 5.9.</u> Konstanta proporcionalnosti (a) između q_D i K_D za $I_D > 1.8$	134
<u>Tabela 5.10.</u> Formule za određivanje korekcionog faktora R_M	142
<u>Tabela 5.11.</u> Kvantifikacija poremećenosti uzoraka na osnovu zapreminske promena tokom laboratorijske rekonsolidacije do σ'_{v0} .	146
<u>Tabela 6.1.</u> Prosečne vrednosti modula stišljivosti prema različitim metodama	161
<u>Tabela 7.1.</u> Rezultati edometarskih opita (uzorci iz jama, odseka i bušotina)	174
<u>Tabela 7.2.</u> Ozbiljnost problema u slučaju kolapsa u zavisnosti od CP	176
<u>Tabela 7.3.</u> Procena CP na osnovu odnosa M_{DMT}/q_c i granice tečenja (LL)	186
<u>Tabela I.1.</u> Određivanje φ_{ax}' iz φ_{ps}' (Schmertmann, 1988)	215
<u>Tabela I.2.</u> Uticaj nelinearnosti anvelope na ugao smičuće čvrstoće tla (lokacija 18)	216
<u>Tabela III.1.</u> Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($I_D < 0.6$)	227
<u>Tabela III.2.</u> Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($0.6 < I_D < 1.8$)	228
<u>Tabela III.3.</u> Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($1.8 < I_D < 3$)	228
<u>Tabela III.4.</u> Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($I_D > 3$)	229

SPISAK SLIKA

<i>Slika 1.1.</i> Kontrolna jedinica i DMT sečivo	4
<i>Slika 1.2.</i> Lokacije izvedenih opita (numeracija prema tabeli 1.1)	5
<i>Slika 2.1.</i> NGI dilatometar (Lune i sar., 1987): a) geometrijske karakteristike, b) rezultat u Onsøy glini (Norveška)	7
<i>Slika 2.2.</i> RD dilatometar: a) kalibraciona kriva i b) rezultat merenja u pesku	9
<i>Slika 2.3.</i> NDMT dilatometar: a) u fazi postavljanja klipa i b) rezultat ispitivanja u kaolinu (Akbar, 2001)	10
<i>Slika 2.4.</i> IDMT dilatometar: a) skica sečiva i b) rezultat merenja u glini (Benoit i Stetson, 2003)	11
<i>Slika 2.5.</i> Novi dilatometar (Colcote i Lehane, 2013): a) sečivo sa klipom i b) rezultat ispitivanja u pesku	11
<i>Slika 2.6.</i> Efekat poremećaja tla nakon utiskivanja: a) kvalitativni prikaz efekta za različite vrste opita (Marchetti, 1985), b) modelsko ispitivanje (Marchetti, 1981) i c) deformacija mreže nakon utiskivanja za klin i konus (Balghi i Scott, 1975)	15
<i>Slika 2.7.</i> Dimenzije sečiva i membrane	17
<i>Slika 2.8.</i> Električni prekidač	18
<i>Slika 2.9.</i> Kontrolna jedinica	20
<i>Slika 2.10.</i> Položaj membrane pri kalibraciji	21
<i>Slika 2.11.</i> Dispozicija prilikom kalibracije	22
<i>Slika 2.12.</i> Kabl koji ne može da se nastavi (levo) i koji može da se nastavi (desno)	24
<i>Slika 2.13.</i> Detalj A sa slike 2.12	24
<i>Slika 2.14.</i> Izvor gasa – boca sa regulatorom pritiska	25
<i>Slika 2.15.</i> Oprema za utiskivanje sečiva	27
<i>Slika 2.16.</i> „Seafloor“ dilatometar (Rim 2015)	29
<i>Slika 3.1.</i> Kompresioni (A) i smičući (B) talas u prostoru	33
<i>Slika 3.2.</i> Zavisnost V_s od stepena zasićenja za različite materijale (prema tabeli 3.1)	36
<i>Slika 3.3.</i> Promena V_s u uslovima izotropne kompresije (preuzeto iz Stokoe i sar., 1990)	37
<i>Slika 3.4.</i> Promena V_s u uslovima biaksijalnog naponskog stanja (preuzeto iz Stokoe i sar., 1990)	38

<i>Slika 3.5.</i> Zavisnost V_s od veličine vertikalnog efektivnog napona za:	
a) necementirane i b) cementirane uzorke peska u k_0 uslovima opterećenja (Yun i Santamarina, 2005)	40
<i>Slika 3.6.</i> Seizmički dilatometar (vlasništvo Instituta IMS)	42
<i>Slika 3.7.</i> Poluautomatski (levo) i ručni čekić (desno)	43
<i>Slika 3.8.</i> Orijentacija senzora u odnosu na izvor talasa	43
<i>Slika 3.9.</i> Šematski prikaz merenja brzine smišaćih talasa SDMT opitom	45
<i>Slika 3.10.</i> Zapis smišćeg talasa u vremenu – seismogram	47
<i>Slika 3.11.</i> Izmereni signali za tri uzastopna udarca na istoj dubini	48
<i>Slika 4.1.</i> Šematski prikaz određivanja geotehničkih parametara tla iz (S)DMT opita	49
<i>Slika 4.2.</i> Linearna ekstrapolacija do nultog pomeranja kod određivanja p_0 (Marchetti i Crapps, 1981)	51
<i>Slika 4.3.</i> Rezultat opita u pesku: a) zbijen pesak, b) rastresit pesak (Campanella i Robertson, 1991)	53
<i>Slika 4.4.</i> Rezultat opita u glini: a) meka glina, b) tvrda glina (Campanella i Robertson, 1991)	55
<i>Slika 4.5.</i> Uticaj frakcije gline, prašine i peska na I_D	57
<i>Slika 4.6.</i> Primena teorije elastičnosti kod analize ekspanzije membrane	60
<i>Slika 4.7.</i> Rezultat ispitivanja Toyoura peska u kalibracionoj komori istraživačkim dilatometrom (Bellotti i sar., 1997)	60
<i>Slika 4.8.</i> Uticaj OCR i D_R na K_D (preuzeto iz Lee i sar., 2011)	62
<i>Slika 5.1.</i> Prikaz rezultata merenja pritiska p_2 i presek merodavne istražne bušotine na lokaciji železničkog mosta preko kanala DTD (lokacija 18 u tabeli 1)	66
<i>Slika 5.2.</i> Odnos p_2/u_0 u zavisnosti od I_D	66
<i>Slika 5.3.</i> Vrsta tla i procena zapreminske težine (modifikovano iz Marchetti i Crapps, 1981)	69
<i>Slika 5.4.</i> Klasifikacioni dijagram (Lacasse i Lunne, 1988)	70
<i>Slika 5.5.</i> Poređenje zapreminskih težina iz DMT opita (Lacasse i Lunne, 1988)	70
<i>Slika 5.6.</i> Klasifikacioni sistem (Schmertmann, 1988)	71
<i>Slika 5.7.</i> Klasifikacioni sistem (Larsson, 1989)	73
<i>Slika 5.8.</i> Razlikovanje rezidualnog od sedimentnog tla na $G_0/E_D - I_D$ dijagramu	75
<i>Slika 5.9.</i> Razlikovanje rezidualnog od sedimentnog tla na $G_0/M_{DMT} - K_D$ dijagramu	75
<i>Slika 5.10.</i> SBT _{SDMT} klasifikacioni sistem (prema Rivera Cruz i dr., 2012)	76
<i>Slika 5.11.</i> SBT dijagram (Robertson, 2015)	78

<u>Slika 5.12.</u> Uticaj efekta starenja i cementacije na koeficijent poroznosti normalno konsolidovane gline (Leroueil i Vaughan, 1990)	80
<u>Slika 5.13.</u> Dijagram za određivanje vrste tla na osnovu I_D i K_D sa nanetim konturama normalizovanog G_0 vertikalnim efektivnim naponom	81
<u>Slika 5.14.</u> Preporučeni SBT dijagram	82
<u>Slika 5.15.</u> Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za grubozrna tla	84
<u>Slika 5.16.</u> Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za finozrna i tla iz prelazne zone	85
<u>Slika 5.17.</u> Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za kolapsibilni les, lateritska i saprolitska tla	87
<u>Slika 5.18.</u> Komparacija γ određenih laboratorijski i iz DMT opita	92
<u>Slika 5.19.</u> Komparacija γ određenih laboratorijski i iz V_s (jedn. 5.4)	94
<u>Slika 5.20.</u> Promena OCR sa dubinom u zavisnosti od mehanizma koji izaziva prekonsolidaciju (Chen i Mayne, 1994)	96
<u>Slika 5.21.</u> Profil K_D u cementiranoj, vremešnoj NC glini (lokacija 12)	99
<u>Slika 5.22.</u> Profil K_D u mehanički prekonsolidovanom tlu (lokacija 16)	100
<u>Slika 5.23.</u> Komparacija korelacija za OCR iz DMT opita za $I_D < 1.2$	100
<u>Slika 5.24.</u> Empirijske korelacije OCR- K_D za $I_D < 1.2$	101
<u>Slika 5.25.</u> Empirijske korelacije K_D-k_0 za $I_D < 1.2$	105
<u>Slika 5.26.</u> Procena k_0 iz SDMT opita za $I_D < 1.2$ (lokacija 12)	106
<u>Slika 5.27.</u> Korelacija k_0-K_D u zavisnosti od ϕ' (mod. iz Schmertmann, 1983)	108
<u>Slika 5.28.</u> Određivanje k_0 Busan peska: a) iz DMT;	
b) kombinovanjem CPT i DMT (Lee i sar., 2011)	109
<u>Slika 5.29.</u> Procena k_0 iz K_D (DMT) i q_c (CPT)	109
<u>Slika 5.30.</u> Korelacija K_D-D_R za mlade NC peskove	
bez mikrostrukture (Marchetti i sar., 2001)	110
<u>Slika 5.31.</u> Uticaj OCR na K_D-D_R zavisnost (Lee i sar., 2011)	112
<u>Slika 5.32.</u> Određivanje ϕ_p' iz nelinearne envelope napona loma	113
<u>Slika 5.33.</u> Zavisnost ϕ_p' od K_D i k_0 (Mayne, 2014)	115
<u>Slika 5.34.</u> ϕ_p' peska u zavisnosti od K_D za različite prepostavke k_0	115
<u>Slika 5.35.</u> Grafičko određivanje ϕ_p' iz k_0 i q_c (Marchetti, 1985)	116
<u>Slika 5.36.</u> Poređenje ϕ_p' , određen primenom različitih postupaka iz rezultata DMT/SDMT opita za kvarcni pesak bez znatnog prisustva mikrostrukture	118
<u>Slika 5.37.</u> Zavisnost odnosa $\frac{tg(\phi_M')}{tg(\phi_s')}$ od K_D za pesak bez mikrostrukture	118

<i>Slika 5.38.</i> Poređenje φ_p' , određen primenom različitih postupaka iz rezultata DMT/SDMT opita za pesak sa prisustvom mikrostrukture	120
<i>Slika 5.39.</i> Zavisnost odnosa $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ od K_D za pesak sa mikrostrukturom	121
<i>Slika 5.40.</i> Zavisnost odnosa $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ od pritiska na površini kod cementiranog i necementiranog peska	122
<i>Slika 5.41.</i> Pouzdanost upotrebe jednačine 5.20 u zavisnosti od I_D (preuzeto iz Lutteneger, 1988)	124
<i>Slika 5.42.</i> Poređenje s_u određene iz DMT opita i referentnih laboratorijskih vrednosti za CH gline sa lokacije 13	125
<i>Slika 5.43.</i> Poređenje DMT i CPT penetracionih otpornosti (Campanella i Robertson, 1991)	127
<i>Slika 5.44.</i> Poređenje sila potrebnih da se utisne sečivo i konus u finozrni pesak eolskog porekla sa lokacije 23 (korišćen proširivač iza sečiva)	128
<i>Slika 5.45.</i> Zavisnost između q_c i q_d za finozrni pesak eolskog porekla sa lokacije 23	128
<i>Slika 5.46.</i> q_c i q_d za aluvijalni prašinasti pesak sa lokacije 20 (korišćen proširivač iza sečiva)	129
<i>Slika 5.47.</i> Zavisnost između q_c i q_d za aluvijalni prašinasti pesak sa lokacije 20	130
<i>Slika 5.48.</i> q_c i q_d za aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15 (merenje vršeno sa seizmičkom sondom)	131
<i>Slika 5.49.</i> Zavisnost između q_c i q_d za aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15	131
<i>Slika 5.50.</i> Linearna zavisnost između F_{DMT} i $(p_0 - u_0)$ za $I_D > 1.8$ (lokacija 18)	132
<i>Slika 5.51.</i> Zavisnost q_D/σ_{v0}' od K_D (lokacija 18)	133
<i>Slika 5.52.</i> Zavisnost između q_D i E_D , p_0 , p_1 za pesak sa lokacije 18	133
<i>Slika 5.53.</i> Poređenje q_c izmerene i izračunate iz jednačine 5.25 za $I_D > 1.8$	135
<i>Slika 5.54.</i> Poređenje q_c izmerene i izračunate iz jednačine 5.25 za $I_D > 1.8$ (lokacija 20)	135
<i>Slika 5.55.</i> Zavisnost G_0 od q_D za peskovita tla ($I_D > 1.8$)	136
<i>Slika 5.56.</i> Zavisnost G_0/q_D od q_{D1} za peskovita tla ($I_D > 1.8$)	137
<i>Slika 5.57.</i> Opadanje smičućeg modula sa povećanjem smičuće deformacije (preuzeto iz Mayne, 2001)	138
<i>Slika 5.58.</i> Inicijalni modul smicanja: a) grafički prikaz i definicija b) kriva degradacije (preuzeto iz Jamiolkowski, 2012)	139

<i>Slika 5.59.</i> Zavisnost tangentnog modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog napona (Janbu, 1985)	143
<i>Slika 5.60.</i> Provera kvaliteta uzoraka za tri sredine sa lokacije 13	147
<i>Slika 5.61.</i> Provera kvaliteta uzoraka sa lokacije 12 i 5	147
<i>Slika 5.62.</i> Zavisnost E_{oed} od $\Delta e/e_0$ za uzorke sa lokacije 13 i 5	148
<i>Slika 5.63.</i> Poređenje modula po dubini (lokacija 13)	149
<i>Slika 5.64.</i> Poređenje modula po dubini (lokacija 5)	150
<i>Slika 5.65.</i> Zavisnost E_{oed}/E_D od K_D (lokacija 5)	151
<i>Slika 5.66.</i> Procena E_{oed} iz jednačine 5.34 (lokacija 5)	151
<i>Slika 5.67.</i> Procena E_{oed} iz jednačine 5.34 (lokacija 13)	152
<i>Slika 6.1.</i> Pogled na blok B silosa na obali Dunava i položaj SDMT opita	154
<i>Slika 6.2.</i> Dimenzije temeljnih ploča i položaj repera	154
<i>Slika 6.3.</i> Podužni presek terena na lokaciji silosa (Bogdanović, 1973)	155
<i>Slika 6.4.</i> Rezultat SDMT opita - silos na obali Dunava u Beogradu	155
<i>Slika 6.5.</i> Vremenski tok sleganja Silosa na obali Dunava u Beogradu	157
<i>Slika 6.6.</i> Poređenje izmerenih i računskih sleganja i vertikalnih deformacija po dubini za blok B silosa na obali Dunava	159
<i>Slika 6.7.</i> Granice granulometrijskih krivih sloja 2 (Bogdanović, 1973)	160
<i>Slika 6.8.</i> Poređenje modula dobijenih povratnom analizom i iz penetracionih opita	161
<i>Slika 6.9.</i> Zavisnost modula određenih iz penetracionih opita od modula određenog povratnom analizom	162
<i>Slika 6.10.</i> Izgled rezervoara R-27 sa spoljašnje i unutrašnje strane	163
<i>Slika 6.11.</i> Nivelmanska šema sa položajem repera i izvedenih DMT/SDMT opita (položaj opita je aproksimativan)	164
<i>Slika 6.12.</i> Rezultati DMT/SDMT opita na lokaciji rezervoara R-27 u Smederevu	166
<i>Slika 6.13.</i> Sleganje rezervoara (reperi R5 i R6) u zavisnosti od visine vodenog stuba	167
<i>Slika 6.14.</i> Sleganje rezervoara (reper R1) u zavisnosti od visine vodenog stuba	168
<i>Slika 6.15.</i> Sleganje rezervoara (reper R8) u zavisnosti od visine vodenog stuba	168
<i>Slika 6.16.</i> Distribucija M_{DMT} , $\Delta\sigma$ i ϵ po dubini na osnovu rezultata SDMT-1 opita	169
<i>Slika 6.17.</i> Distribucija M_{DMT} , $\Delta\sigma$ i ϵ po dubini na osnovu rezultata DMT-1 (R-27) opita	169
<i>Slika 6.18.</i> Komparacija izmerenih i računskih sleganja	170

<i>Slika 7.1.</i> Mikrostruktura lesa: a) šematski prikaz (Rogers, 1995) i b) mikroskopski snimak (Nouaouria i sar., 2008)	171
<i>Slika 7.2.</i> Tereni izgrađeni od lesa u kojima su izvedeni SDMT opiti	172
<i>Slika 7.3.</i> Granulometrijski sastav izučavanog lesa	174
<i>Slika 7.4.</i> Rezultat edometarske kompresije lesa: a) lokacija 3 i b) lokacija 1	177
<i>Slika 7.5.</i> Rezultat SDMT opita sa lokacije 1	179
<i>Slika 7.6.</i> Rezultat DMT/SDMT opita sa lokacije 3	180
<i>Slika 7.7.</i> Rezultat SDMT opita sa lokacije 19	180
<i>Slika 7.8.</i> Prikaz rezultata u $\log(I_D) - \log(K_D)$ dijagramu	181
<i>Slika 7.9.</i> Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za lokaciju 3	182
<i>Slika 7.10.</i> Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za lokaciju 1	183
<i>Slika 7.11.</i> Zavisnost odnosa E_{oed} u prirodnom stanju vlažnosti i nakon zasićenja od vertikalnog napona za lokaciju 1 i 3	184
<i>Slika 7.12.</i> M_{DMT}/q_c u kolapsibilnom lesu	185
<i>Slika 7.13.</i> Procena CP iz odnosa M_{DMT}/q_c i granice tečenja	186
<i>Slika 7.14.</i> Zavisnost M_{DMT}/G_0 od K_D za les	188
<i>Slika I.1.</i> Mehanizam loma tla prilikom utiskivanja sonde oblika sečiva za dubine veće od kritične dubine (Durgunoglu i Mitchell, 1973)	210
<i>Slika I.2.</i> Uticaj $\delta\varphi$ na $N_{\gamma q}$	212
<i>Slika I.3.</i> Uticaj D/B na $N_{\gamma q}$	213
<i>Slika I.4.</i> Uticaj k na $N_{\gamma q}$	214
<i>Slika I.5.</i> Uticaj K_D na $N_{\gamma q}$	214
<i>Slika I.6.</i> Zakrivljenost envelope loma u pesku (Baligh, 1976)	217
<i>Slika I.7.</i> Vertikalne sile koje deluju na sečivo tokom penetracije	218
<i>Slika I.8.</i> Zavisnost ϕ_{ps}' od hraptavosti sečiva (lokacija 18)	220
<i>Slika I.9.</i> Zavisnost odnosa ϕ_{ps}' starog i novog sečiva od pritiska na površini	220
<i>Slika II.1.</i> Idealizacija izmerenih pritisaka u mekoj glini (lokacija 12)	221
<i>Slika II.2.</i> Promena A pritiska u vremenu (lokacija 23)	222
<i>Slika II.3.</i> Porni pritisci u DMT opitu dobijeni ispitivanjem flotacijske jalovine (Schnaid i Odebrecht, 2015)	223
<i>Slika III.1.</i> SBT dijagram za određivanje vrste tla i prisustva mikrostrukture	225
<i>Slika III.2.</i> Zavisnost G_0/σ_v' od K_D za raličite vrste tla (Monaco i sar., 2009)	226

1. UVOD

1.1. Uvodna razmatranja

Opit sa pločastim dilatometrom je *in situ* penetracioni opit koji se koristi za potrebe geotehničkih istraživanja terena. Postupak sproveđenja opita je standardizovan, a zemlje koje su među prvima propisale nacionalne norme su: SAD, Italija, Švedska, Kina kao i zemlje Evropske unije, posredstvom EC-7. Opšte je prihvaćeno da je opit sa dilatometrom drugi najčešće korišćeni statički penetracioni opit u geotehničkom inženjerstvu (posle CPTu opita). Glavni razlog je jednostavnost izvođenja, ponovljivost rezultata i ekonomičnost. Interpretacija rezultata u cilju određivanja geotehničkih parametara još uvek je, u najvećoj meri, empirijskog karaktera što je ujedno i najveći ograničavajući faktor primenljivosti opita. Izvođenje opita sastoji se iz dve faze: utiskivanje sečiva i ekspanzije membrane (merenje odgovarajućih pritisaka). Obe faze zahtevaju vreme, tako da od trenutka kada se počne sa utiskivanjem sečiva do trenutka kada se završi opit može da prođe i 1 minut. Za vreme tog minuta generisani porni pritisci u tlu treba da budu nepromenljivi u vremenu što omogućava da se, u zavisnosti od vrste tla, opit interpretira ili kao drenirani ili kao nedrenirani. U grubozrnom tlu generisani porni pritisci su zanemarljivi i opit je dreniran. U finozrnom tlu porni pritisci su dominantni tako da je opit nedreniran. Tokom izvođenja opita postoji nekoliko načina da se utvrde uslovi dreniranja, što u velikoj meri interpretatoru olakšava posao. U izvesnim situacijama da bi se postigli željeni uslovi dreniranja poželjno je odstupiti od standardne procedure ispitivanja.

Česta upotreba dilatometra u svetu i stečeno iskustvo u poslednje dve decenije doprinelo je da se objavi veliki broj radova u vodećim časopisima i konferencijama. Ta istraživanja predstavljaju osnovu disertacije koja je nadograđena novostečenim iskustvom proisteklim iz upotrebe dilatometra poslednjih pet godina u našoj zemlji. Posebno značajan aspekt disertacije je to što je prilikom istraživanja bilo moguće meriti brzine prostiranja smičućih elastičnih talasa u tlu. Izmerene brzine su nezavistan i dodatni podatak koji se dobija pored ostalih parametara. One omogućavaju da se određena svojstva tla, koja bi bez njihovog merenja ostala nepoznanica, istraže u celini. Disertacija prati savremene trendove ali i kritički sagledava sve aspekte upotrebe

dilatometra u geotehničkom inženjerstvu. Želja autora je da pojedini rezultati prikazani u disertaciji nađu praktičnu primenu od strane inženjera geotehnike u našoj zemlji.

1.2. Srtuktura disertacije

Disertacija je organizovana u devet poglavlja i četiri dodatka. Prvo poglavlje pored uvodnog razmatranja i strukture disertacije daje istorijski pregled razvoja upotrebe dilatometra u svetu i kod nas.

Drugo poglavlje prikazuje oblasti geotehnike u kojima se primenjuju rezultati DMT opita. Sažeto su prikazane različite vrste pločastih dilatometara koje se koriste uglavnom u akademske svrhe. U drugom poglavlju prikazana su i tla koja su podobna za ispitivanje, kao i oprema potrebna da se izvede opit. Na kraju poglavlja prikazan je postupak izvođenja opita.

U trećem poglavlju opisan je seizmički dilatometar, postupak ispitivanja i potrebna oprema. Date su osnove merenja brzine smičućih talasa i faktori koji utiču na izmerenu brzinu.

Četvrto poglavlje prikazuje način određivanja parametara koji se dobijaju iz DMT opita. Prikazan je postupak određivanja prelaznih parametara koji su svojstveni isključivo ovom opitu.

U petom poglavlju prikazana je interpretacija rezultata u cilju određivanja geotehničkih parametara. Izvršena je sistematizacija postojećih korelacija za: klasifikaciju tla, zapreminsку težinu u prirodnom stanju vlažnosti, istoriju opterećenja i zbijenost, parametre čvrstoće smicanja, parametre deformabilnosti i penetracione otpornosti koje tlo pruža pri utiskivanju sečiva. Izvršena je validacija pojedinih korelacija u odnosu na referentne laboratorijske rezultate, a za tla sa određenih lokacija uspostvljene su nove korelacije.

Poređenje izmerenih i sleganja određenih računskom analizom rezultata DMT opita prikazano je u šestom poglavlju. Komparacija sleganja je izvršena za aluvijalne sedimente reke Dunav kod Beograda i Smedereva za silos i tankvanu.

U sedmom poglavlju prikazana je interpretacija rezultata SDMT opita u kolapsibilnom lesu. Posebna pažnja posvećena je: izdvajanju kolapsibilnih zona u lesu iz rezultata

DMT opita i poređenju laboratorijske veličine modula stišljivosti i modula stišljivosti određenog iz DMT opita.

Osmo poglavlje odnosi se na zaključna razmatranja. U devetom poglavlju dat je spisak korišćene literaturre.

Na kraju disertacije u okviru četiri dodatka, opisan je Schmertmann-ov (1982, 1988) postupak za određivanje ugla smišuće čvrstoće peska, prikazan je praktičan način kako odrediti uslove dreniranja tokom izvođenja opita, dati su parovi tačaka na osnovu kojih može da se konstruiše dijagram, prikazan u poglavlju 5.4., za određivanje vrste tla i prisustva mikrostrukture iz SDMT opita i prikazani su rezultati izvedenih DMT i SDMT koji su korišćeni za izradu disertacije.

1.3. Istorijski osvrt na upotrebu mehaničkog i seizmičkog dilatometra

Pločasti dilatometar izumeo je Profesor Silvano Marchetti, 1974 godine, radeći na L'Aquila Univerzitetu u Italiji. Opis opreme, princip izvođenja opita i određivanje geotehničkih parametara prvi put su detaljno opisani u publikaciji pod nazivom: „In situ tests by flat dilatometer”, ASCE Journal of Geotech. Eng. Div. 1980. Opit je poznat pod skaraćenicom DMT opit koji će se nadalje koristiti u disertaciji. Od 1980 godine uloga DMT opita postala je veoma zapažena među vodećim naučno istraživačkim institucijama i univerzitetima širom sveta. 1978. godine Prof. Marchetti u saradnji sa Prof. John Schmertmann-om, sa Univerziteta u Floridi, uvodi DMT na tlo Severne Amerike. Prvi projekat u okviru koga su izvedena DMT ispitivanja, u komercijalne svrhe, bio je vezan za izgradnju elektrane na severu Floride. Od tada se DMT intenzivno koristi za in situ istraživanja u SAD. Prvi korisnici DMT u Kanadi bili su Ron Innis (Mobile Augers and Research LTD) i Jack Hayes (Site Investigation Services LTD), koji su finansirali prvu DMT konferenciju održanu u Edmontonu u Kanadi 1983. godine.

Dilatometar (slika 1.1) je prvi put korišćen na teritoriji Republike Srbije od strane Instituta IMS. Oprema je nabavljena 2011. godine od italijanskog proizvođača Marchetti Studio s.r.l ubrzo nakon njihove prezentacije, održane u Bloku 21 u Novom Beogradu, pred domaćom stručnom javnosti. Prvi DMT opit izведен je u bližoj okolini

naselja Plandište (19.07.2011.), udaljenog oko 70 km od Beograda, u okviru projekta vezanog za izgradnju „VetroParka” za proizvodnju električne energije iz obnovljivih prirodnih izvora. Zatim je usledila kontinualna upotreba dilatometra, kako u komercijalne, tako i u naučno-istraživačke svrhe. Sa seizmičkom sondom, koja omogućuje merenje brzine prostiranja smičućih talasa u tlu, prvi put sam se susreo tokom posete Diega Marchetti-a Beogradu 11.08.2012. godine. Prva merenja brzine smičućih talasa seizmičkom sondom izvedena su u lesu Bežanijske kose u neposrednoj blizini „Kvantaške pijace” početkom 2013. godine. U tabeli 1.1 prikazani su svi opiti izvedeni do trenutka objavljivanja disertacije. Najdublji DMT opit iznosi 39.8 m. Najveća dubina do koje su merne brzine smičućih talasa iznosi 30.6 m.



Slika 1.1 Kontrolna jedinica i DMT sečivo

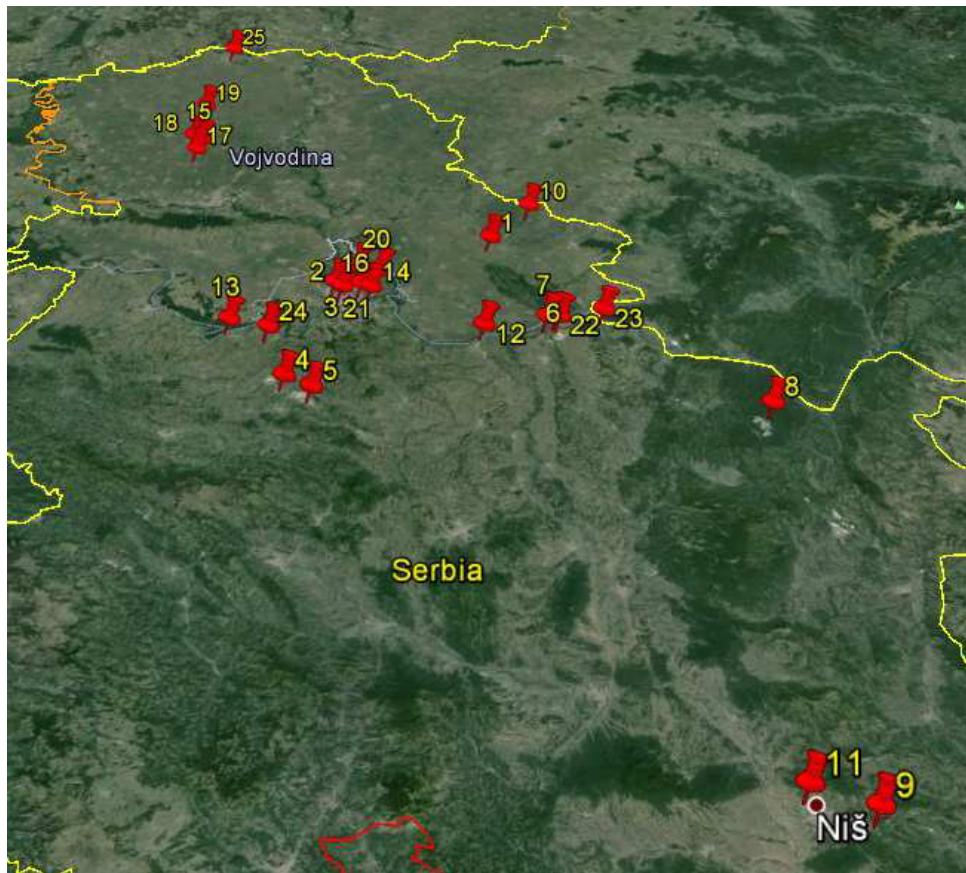
Tabela 1.1. Izvedeni opiti u periodu 2011-2016. godine

Red. br.	Naziv lokacije	Stat. penetrometar		Bušača garnitura	
		br. opita DMT/SDMT	min/max dubina (m)	br. bušotina u kojima je izveden opit	br. opita
1.	Alibunar	0/3	25.6-30.6		
2.	Blok 65, Novi Beograd	1/3	15.4-28.6		
3.	Bežanijska kosa	2/2	15.8-36.8		
4.	Odlagalište - „Tamnava Istočno-polje“	25/0	4.5-39.8		
5.	Montažni plac polja D u Zeokama			3	10
6.	Kostolac B	2/0	19.8-20.8	2	2
7.	Kostolac A	0/2	20.4-22.2		
8.	Majdanpek			2	3
9.	Niška Banja			6	6
10.	Plandište	31/0	24.0-32.0		

Tabela 1.1. Izvedeni opiti u periodu 2011-2016. godine (nastavak)

Red. br.	Naziv lokacije	Stat. penetrometar		Bušaća garnitura	
		br. opita DMT/SDMT	min/max dubina (m)	br. bušotina u kojima je izveden opit	br. opita
11.	Niš	0/2	7.6		
12.	Smederevo	1/1	15.0-15.2		
13.	Tent B	0/2	12.8-23.8	2	2
14.	Višnjica	4/0	7.2-15.0	1	4
15.	Bačko Dobro Polje	1/2	19.6-21.0		
16.	Zrenjaninska petlja	1/0	18.2		
17.	Zmajevо	0/1	16.6		
18.	Žel. most kanal DTD	1/3	16.6-26.2	1	1
19.	Mali Iđoš	0/2	15.6		
20.	Ovča	1/0	31.4		
21.	Dorćol – naselje 25. maj	0/1	23.4		
22.	Drmno	0/2	15.6-16.6		
23.	Veliko Gradište	1/0	17.8		
24.	Zvečka (Obrenovac)	0/1	17.6		
25.	Subotica	1/2	23.2-29.0		

Lokacije izvedenih opita prikazane su na slici 1.2.



Slika 1.2 Lokacije izvedenih opita (numeracija prema tabeli 1.1)

2. MEHANIČKI DILATOMETAR

2.1. Primena

Pločasti dilatometar se u poslednjih trideset godina sve češće koristi za potrebe geotehničkih istraživanja terena. Primarni cilj ispitivanja tla pločastim dilatometrom je da se omogući:

- a) karakterizacija i određivanje vrste tla,
- b) određivanje geotehničkih parametara tla,
- c) proračun konsolidacionog sleganja plitko fundiranih temelja i
- d) procena opasnosti od likvefakcije.

Rezultati dobijeni dilatometrom koriste se i za potrebe:

- e) proračuna horizontalno opterećenih šipova,
- f) određivanja G- γ krivih,
- g) kontrole zbijenosti posteljice,
- h) određivanja položaja kliznih površi kod prekonsolidovanih glina i
- i) određivanja koeficijenta horizontalne reakcije tla.

Istraživanja u okviru doktorske disertacije omogućila su mi da istražim podobnost upotrebe dilatometra za postizanje primarnog cilja istraživanja (a-c).

Istraživanja vezana za ostvarivanje ciljeva pobrojanih od d) do i) zahtevaju posebne programe istraživanja i specijalnu laboratorijsku opremu koji su finansijski veoma zahtevni i u ovom trenutku nedostupni. Oni bi mogli da budu predmet nekih budućih istraživanja.

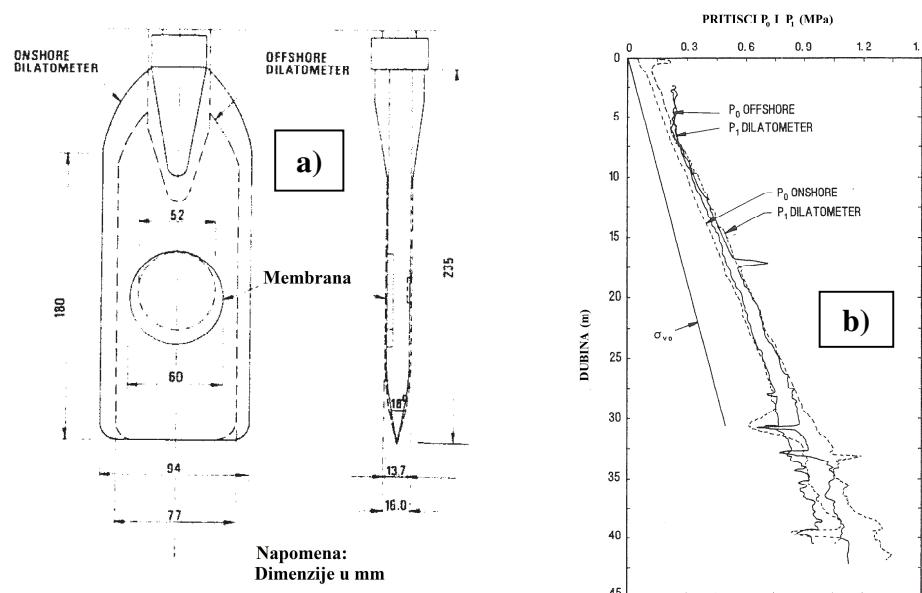
2.2. Specijalne vrste dilatometara

Ovo poglavlje treba da ukaže na posvećenost istraživača vodećih svetskih naučnih institucija u nastojanju da razumeju podatke koji se dobijaju izvođenjem opita sa dilatometrom. Vodeći istraživački centri u svetu izradili su različite vrste dilatometara radi upotrebe u posebne istraživačke svrhe i za specijalne uslove ispitivanja. Različite

modifikacije „standardnog“ dilatometra ukratko su, hronološkim redosledom, opisane u daljem tekstu. Osnovni nedostatak modifikovanih dilatometara je gubitak jednostavnosti prilikom izvođenja opita.

2.2.1. „NGI Offshore“ dilatometar

Norveški Geotehnički Institut (NGI, 1985) izradio je specijalan tip dilatometra za potrebe ispitivanja izvan kopna. Glavna prednost u poređenju sa standardnim dilatometrom je mogućnost kontinualnog merenja pornih pritisaka, tokom penetracije i sprovođenja opita, pomoću piezo-filtera postavljenog na lice sečiva suprotno od lica na kome se nalazi membrana. Dimenzije standardnih bušaćih cevi koje se koriste za bušenje izvan kopna bile su glavni razlog da se dimenzije NGI dilatometra modifikuju u odnosu na dimenzije standardnog dilatometra (Lunne i sar. 1987). Dimenzije NGI dilatometra prikazane su na slici 2.1a, a iznose: širina 77 mm, debljina 16 mm, prečnik membrane 54 mm. Umesto gasa (azot, vazduh) koji je uobičajen izvor pritiska kod standardnog dilatometra koristi se fluid (nafta) za ispitivanja na većim dubinama (>100 m).



Slika 2.1. NGI dilatometar (Lune i sar., 1987): a) geometrijske karakteristike, b) rezultat u Onsøy glini (Norveška)

Funkcionalnost opreme i pouzdanost rezultata provereni su paralelnim ispitivanjem sa standardnim dilatometrom, slika 2.1b. Opšti zaključak je da su p_0 i p_1 pritisci kod NGI dilatometra neznatno viši od pritisaka kod standardnog dilatometra, međutim interpretirani parametri su gotovo identični s obzirom da je razlika pritisaka ista (videti Lunne i sar., 1987, By i sar., 1987).

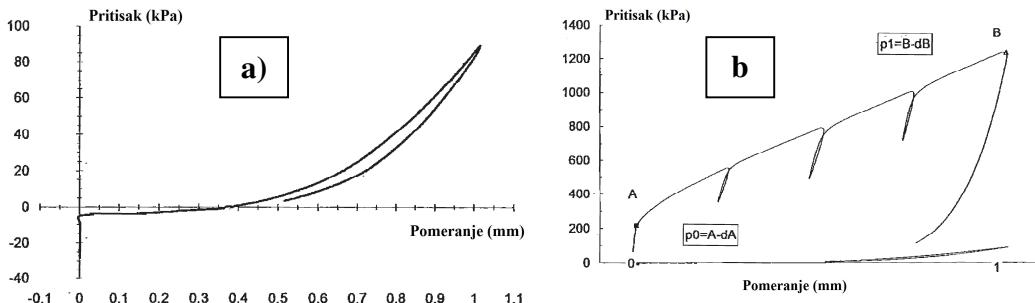
2.2.2. „UBC“ istraživački dilatometar

Istraživači (Campanella i sar., 1985; Robertson i sar., 1988 i Campanella i Robertson, 1991) sa Univerziteta u Britanskoj Kolumbiji (UBC) iz Kanade razvili su tzv. istraživački dilatometar koji je omogućio bolje razumevanje i tumačenje izmerenih podataka koji se dobijaju ispitivanjem. UBC dilatometar ima iste dimenzije kao i standardni dilatometar stim što ima mogućnost merenja: a) pornih pritisaka u centru membrane, b) pomeranja membrane tokom ekspanzije, c) pritiska na membranu u toku izvođenja opita, d) vertikalnost i e) sile (mereno neposredno iza sečiva) potrebne da se sečivo utisne u tlo za određeni interval. Sve ovo ukazuje na kompleksnu konstrukciju UBC dilatometra što je njegov osnovni nedostatak sa aspekta praktičnosti i jednostavnosti. S druge strane postavio je osnovu za razumevanje postojećih korelacija. Neki od rezultata dobijeni ovim dilatometrom biće prikazani u poglavljima koja slede.

2.2.3. „RD“ istraživački dilatometar

Fretti i sar. (1992) prikazuju modifikovanu konstrukciju dilatometra čija je glavna prednost u odnosu na standardni dilatometar mogućnost merenja pomeranja membrane u zavisnosti od primjenjenog pritiska i mogućnost određivanja modula rasterećenja. Pomeranje membrane pri kome se očitava pritisak p_1 iznosi 1.0 mm za razliku od standardnog dilatometra kod koga je to pomeranje 1.1 mm. Rezultat dobijen merenjem RD dilatometrom prilikom ispitivanja u pesku u kalibracionoj komori prikazan je na slici 2.2. Na slici 2.2. prikazana je histerezisna petlja dobijena kalibracijom membrane u vazduhu. Treba zapaziti negativnu vrednost pritiska - vakum na nultom pomeranju

membrane (slika 2.2a), kao i mogućnost izvođenja više ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja (slika 2.2b).

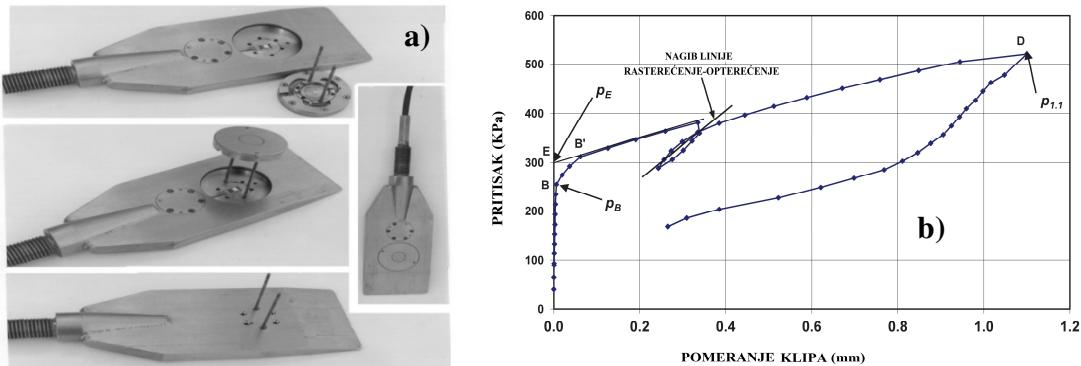


Slika 2.2. RD dilatometar: a) kalibraciona kriva i b) rezultat merenja u pesku

2.2.4. „Newcastle” dilatometar (NDMT)

Akbar (2001) je modifikovao standardni dilatometar u okviru istraživanja na Univerzitetu u Njukastlu. Dimenzije su identične kao kod standardnog dilatometra stim što postoji suštinska konstruktivna razlika, jer se umesto fleksibilne membrane koristi čvrsti klip (slika 2.3a) koji se posredstvom hidrauličkog sistema utiskuje u tlo. Maksimalno pomeranje klipa iznosi 1.1 mm što odgovara pomeranju membrane standardnog dilatometra u trenutku očitavanja p_1 pritiska.

Glavna prednost u odnosu na standardni dilatometar je mogućnost dobijanja zavisnosti pomeranja klipa od primjenjenog pritiska (slika 2.3b) tokom izvođenja opita i mogućnost ispitivanja grubozrnijih sedimenata (glečerski sedimenti - „tilovi”). Istraživanje je sprovedeno u više faza. Prva faza vezana je za izradu LDMT (laboratorijskog dilatometra) koji je omogućio ispitivanje u laboratorijski kontrolisanim uslovima. Druga faza vezana je za izradu RDMT (istraživački Njukastl dilatometar) koji predstavlja „terensku” verziju LDMT-a. RDMT je proveren paralelnim ispitivanjima sa standardnim dilatometrom u različitim vrstama tla u Velikoj Britaniji. Utvrđilo se da korelacije koje se koriste pri interpretaciji rezultata standardnog dilatometra mogu da se koriste za interpretaciju rezultata RDMT-a. U poslednjoj fazi konstruisan je NDMT dilatometar nakon uklanjanja nedostataka koji su primećeni prilikom ispitivanja RDMT dilatometrom.



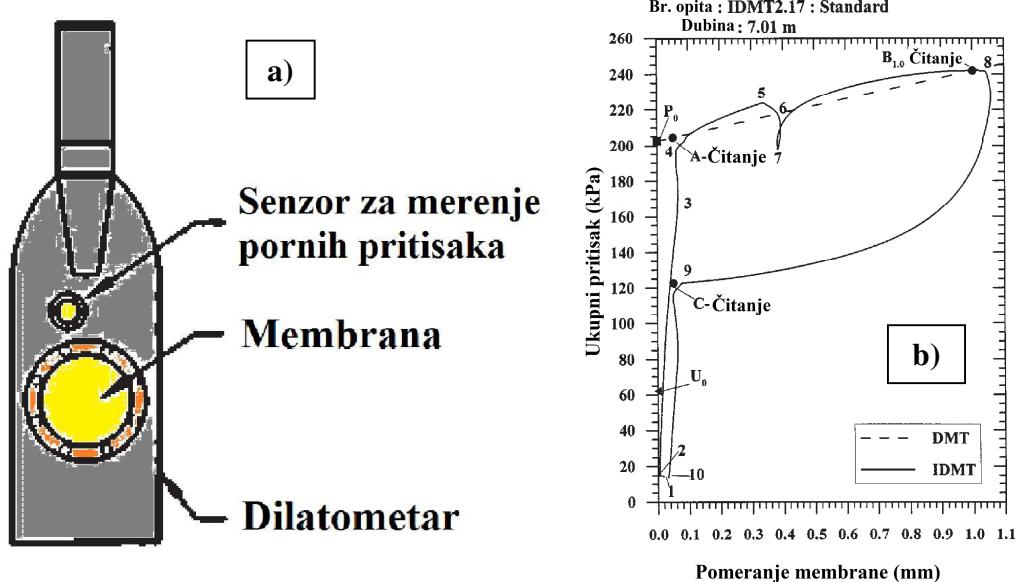
Slika 2.3. NDMT dilatometar: a) u fazi postavljanja klipa i b) rezultat ispitivanja u Kaolinu (Akbar, 2001)

2.2.5. Instrumentalizovani pločasti dilatometar „IDMT”

Stetson i sar. (2003) i Benoit i Stetson (2003) prikazali su rezultate ispitivanja mekih glina (varvi) instrumentalizovanim dilatometrom. Instrumentalizovani dilatometar je modifikovani standardni dilatometar opremljen sistemom za merenje: pomeranja membrane, pornih pritisaka u fazi utiskivanja i izvođenja opita i verikalnog pritiska potrebnog da se sečivo utisne u tlo. Slično kao i kod RD dilatometra pomeranje membrane pri kom se očitava p_1 pritisak iznosi 1.0 mm. Senzor za merenje pornih pritisaka postavljen je iznad centra membrane 60.7 mm (Slika 2.4a). Pomenuti autori navode da najveći uticaj na rezultate dobijene IDMT opitom ima znatno duže vreme trajanja izvođenja opita (oko 5 min) u odnosu na vreme izvođenja standardnog opita (oko 1 min). Stoga se približni rezultati IDMT i DMT opita mogu očekivati samo u dreniranim materijalima poput peska. Rezultat dobijen IDMT opitom na dubini 7.0 m u mekoj glini prikazan je na slici 2.4 b.

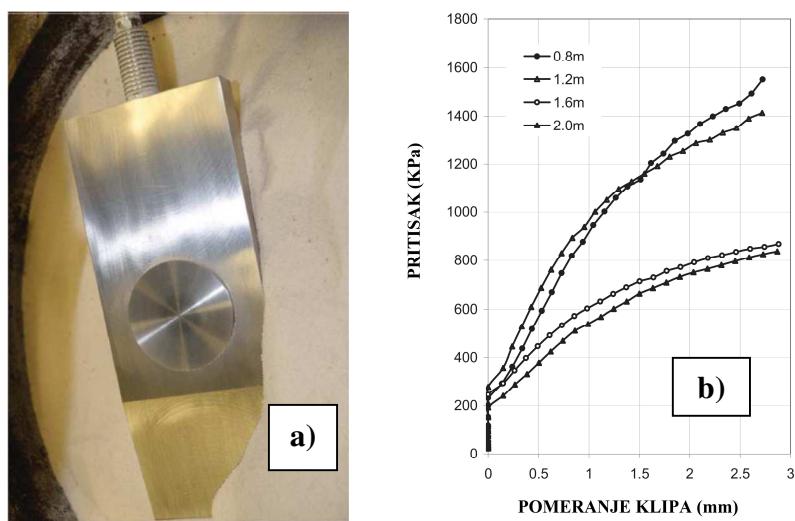
2.2.6. „Novi” dilatometar

Na nedavno održanom simpozijumu u Brazilu, Colcot i Lehane (2013) prikazali su konstrukciju i preliminarne rezultate dobijene tzv. „Novim dilatometrom”, slika 2.5.



Slika 2.4. IDMT dilatometar: a) skica sečiva i b) rezultat merenja u glini (Benoit i Stetson, 2003)

Dimenziije su identične kao kod standardnog dilatometra. Po ugledu na NDMT dilatometar umesto fleksibilne membrane koristi čvrsti klip koji se posredstvom hidrauličkog sistema utiskuje u tlo. Klip je odabran da bi konstrukcija bila što jednostavnija i jeftinija.



Slika 2.5. Novi dilatometar (Colcot i Lehane, 2013): a) sečivo sa klipom i b) rezultat ispitivanja u pesku

Razlika u odnosu na standardni dilatometar i NDMT je to što klip ima mogućnost da se pomera više od 1.1 mm (slika 2.5b).

Paralelna istraživanja sa standardnim dilatometrom u pesku ukazuju da su dobijeni rezultati približni bez obzira na drastičnu razliku u krutosti membrane i klipa.

Kao motive za izradu „Novog“ dilatometra Colcot i Lehane (2013) navode sledeće razloge:

- a) bolje razumevanje dobijenih rezultata i doprinos njihovoj interpretaciji i
- b) mogućnost uzimanja u obzir nelinearnog ponašanja tla iz izmerenih zavisnosti pomeranja klipa od primjenjenog pritiska kod proračuna sleganja plitkih temelja

Pored ovde prikazanih, drugi tipovi instrumentalizovanih dilatometara mogu se naći u Shen i sar. (2015).

2.3. Vrsta tla podobna za ispitivanje DMT opitom

2.3.1. Opšta upotrebljivost

Prilikom razmatranja podobnosti DMT opita za ispitivanje različitih vrsta tla potrebno je uzeti u obzir sledeće:

- upotrebljivost dobijenih podataka,
- preciznost korelacija kod interpretacije rezultata,
- opasnost od oštećenja opreme i
- mogućnost utiskivanja.

DMT opit je najprikladniji za upotrebu u glini, prašini i pesku čija su zrna mala u poređenju sa veličinom membrane (EC-7). Veoma je koristan za upotrebu u terenima u kojima je ekonomski zahtevno i praktično veoma teško uzimanje neporemećenih uzoraka za laboratorijska ispitivanja. To je slučaj kod ispitivanja peska i prašina niske plastičnosti.

Glavnu prepreku za uspešno izvođenje opita predstavljaju tla kod kojih postoji povećana opasnost od oštećenja opreme ili je mogućnost utiskivanja dilatometra ograničena. U tabeli 2.1 prikazana je opšta upotrebljivost DMT opita u različitim

vrstama tla prema Schmertmann (1988). Ova tabela može da posluži u preliminarnim fazama geotehničkog projektovanja pod uslovom da je poznato o kojoj vrsti tla se radi.

Tabela 2.1. Upotrebljivost DMT opita u različitim vrstama tla

0 =ne upotrebljavati	2=dobra
1=ponekad je upotrebljiv	3=najbolja upotreba

Vrsta tla	Upotrebljivost za različite vrste tla					
	slabo, rastresito ¹ $N_{SPT}<5^3$ $q_c<1.5 \text{ (MPa)}^4$	srednje $N_{SPT}=25^3$ $q_c=7.5 \text{ (MPa)}^4$		kruto, zbijeno ² $N_{SPT}>40^3$ $q_c>15 \text{ (MPa)}^4$		
	Nasipan materijal, kipovan, refuliran	Prirodan	Nasipan materijal, slabo zbijen	Prirodan	Nasipan materijal, dobro zbijen	Prirodan
Gline	3	3	2	2	2	2
Prašine	2	2	2	2	1	1
Pesak	3	3	2	2	1	1
Šljunak sa školjkama i konkrecijama	1	1	0	0	0	0
Obluci	0	0	0	0	0	0
Stena (raspadnuta)	0	1	0	0	0	0
CL+SI+SD	3	3	3	2	2	2
CL+SI+SD+školjke	2	2	2	2	0	0
CL+SI+SD+stena	1	1	1 ²	1 ²	0	0
Pesak+šljunak	2	2	2 ²	1 ²	0	0
Organsko CL+SD	3	3	2	2	1	1
Residualno tlo (w/o)	3	3	2	2	1	1
Residualno tlo (w)	1	1	0	1 ²	0	0
Cementirani pesak	-	1	-	1 ²	-	0
Talus sa stenom	-	1	-	1 ²	-	0
Glečerski til	0	1	0	0	0	0
Gline-varve	3	2	2	2	1	1
Les	3	2	2	2	-	-
Humus	3 ¹	2 ¹	2	2	-	-
Mulj, flotacijski talog	3 ¹	-	2	-	-	-

¹Rezultat osetljiv na postupak ispitivanja

SI – srednje zbijen pesak

²Opasnost od oštećenja – koristiti membranu veće debljine

SD – zbijen pesak

³ N_{SPT} – broj udara iz standardnog penetracionog opita

CL – niskoplastične gline

⁴ q_c – otpor na prođor konusa iz opita statičke penetracije

Napominjem da sam u saradnji sa stručnjacima iz radionice za Mašinsku obradu Instituta IMS izradio „geometrijsku“ repliku DMT sečiva (bez membrane) za probijanje slojeva tla kod kojih je povećan rizik od oštećenja membrane. Postupak izvođenja opita kombinovanom upotreboom ovog i standardnog sečiva je komplikovaniji i vremenski

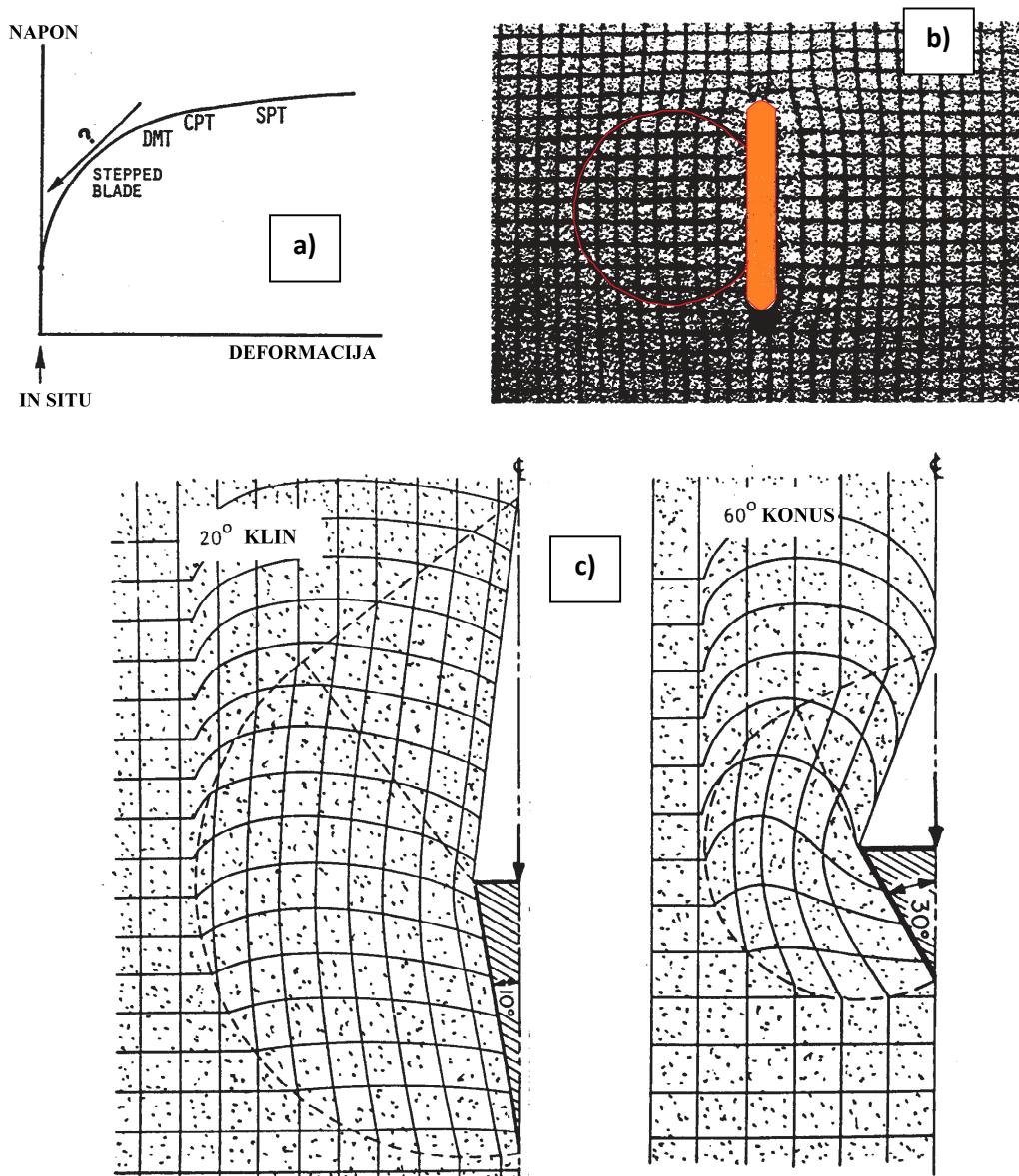
zahtevniji ali je doprinos to što je moguće ispitati slojeve tla koji se nalaze ispod potencijalne prepreke koja bi uslovila prekid opita. Replika je do sada primenjena na gradilištu u Termoelektrani Kostolac A (lokacija 7 iz tabele 1.1) i u Bloku 65 u Novom Beogradu (lokacija 2 iz tabele 1.1). U Kostolcu je opit uspešno izveden do dubine od 22 m zahvaljujući replici kojom je probijen sloj peščara (debljine 0.3 m) na dubini od 10 m. Inače membrana je prethodno oštećena na toj dubini s obzirom da taj proslojak nije bio dokumentovan u izveštajima iz prethodnih faza istraživanja. U Bloku 65 replikom je probijen površinski sloj nasipa, debljine 2-3 m, izgrađen od lomljenog agregata, krupnog šljunka i peska. Nakon toga, na većim dubinama, ispitivanje je nastavljeno standardnim DMT sečivom. Ukoliko se tlo nakon probijanja zarušava onda je izvođenje DMT opita pod znakom pitanja. To može da bude slučaj kod pokušaja da se ispitaju slojevi tla na većim dubinama iznad kojih se nalazi slabo do srednje zbijeni krupnozrnji šljunak znatne debljine. Jedina veličina koja može da se meri kada se koristi replika jeste sila potrebna da se ona utisne za određeni interval dubine (npr. za 0.2 m).

Iz tabele 2 može se videti da je upotreba DMT opita, prema Schmertmann-u, u šljunku u izvesnim situacijama opravdana. Međutim, Marchetti i dr. (2001) navodi da upotreba u šljunku ne daje pouzdane rezultate.

2.3.2. Efekat „utiskivanja”

Prilikom interpretacije rezultata DMT opita potrebno je da se uzme u obzir neizbežan efekat remećenja strukture tla koji nastaje utiskivanjem sečiva (efekat utiskivanja). Taj efekat manifestuje se promenom naponskog stanja i pojavom deformacija u tlu u neposrednoj blizini sečiva. Dakle, naponi u tlu nakon utiskivanja biće različiti od napona u tlu pre utiskivanja. Veličinu deformacija koje nastaju utiskivanjem sondi, različitog oblika (konus i klin - DMT sečivo), u tlo razmatrali su teorijski Baligh i Scott (1975) i Finno (1993) i eksperimentalno Marchetti (1981) i Davidson i Boghrat (1983). Opšti zaključak je da geometrijske figure kao što je klin ili DMT sečivo znatno manje poremećuju tlo u poređenju sa konusom. Dijagram koji kvalitativno pokazuje efekat utiskivanja za različite vrste opita prikazan je na slici 2.6a. Sa slike 2.6b može se videti da je zona poremećaja oko membrane relativno mala i uniformna (Schmertmann, 1988).

Davidson i Boghrat (1983) navode da su zapreminske i smičuće deformacije tri puta manje kod sečiva nego kod konusa nakon utiskivanja u pesak. Veličine deformacija zavise i od vrste tla u koje se vrši utiskivanje sečiva, pa je za očekivati da u mekim glinama i rastresitom pesku deformacije budu veće od deformacija u tvrdom i zbijenom tlu.



Slika 2.6. Efekat poremećaja tla nakon utiskivanja: a) kvalitativni prikaz efekta za različite vrste opita (Marchetti, 1985), b) modelsko ispitivanje (Marchetti, 1981) i c) deformacija mreže nakon utiskivanja za klin i konus (Balghi i Scott, 1975)

2.4. DMT oprema

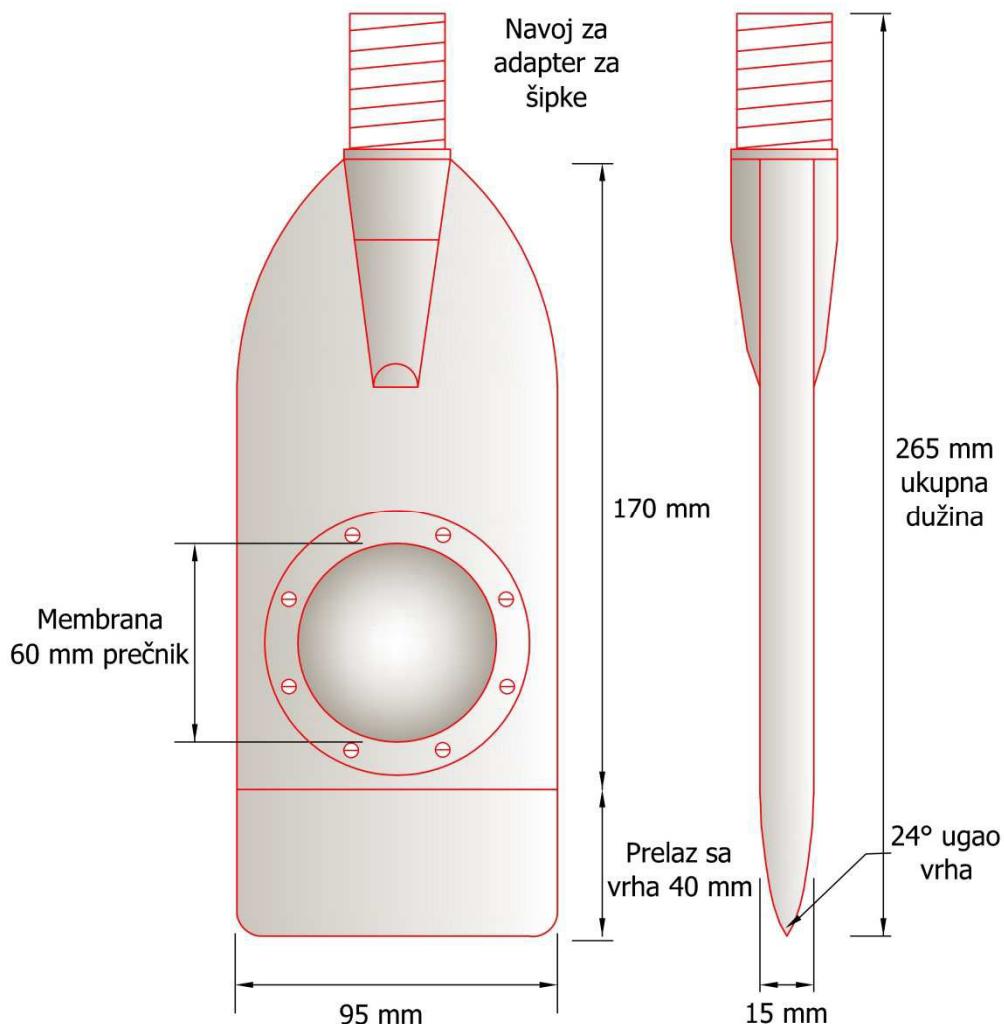
Oprema koja čini dilatometar sastoji se od sledećih ključnih komponenti: dilatometarsko sečivo, kontrolna jedinica, pneumatsko-električni kablovi (p-e), izvor gasa, kabl za uzemljenje i šipke za utiskivanje sečiva.

2.4.1. Dilatometarsko sečivo sa membranom

Dilatometarsko sečivo je slobodan prevod engleskog termina „*flat dilatometer blade*” što bi u bukvalnom prevodu značilo „*pljosnato dilatometarsko sečivo*”. Reč pljosnato ukazuje na geometrijski oblik sečiva (dve izražene dimenzije u odnosu na treću). Sečivo je napravljeno od visokokvalitetnog nerđajućeg čelika, a može da izdrži sile do 250 kN prilikom utiskivanja. Nominalna dimenzija sečiva iznosi: 95 mm širina i 15 mm debljina. Dužina „evropskog” i „američkog” sečiva se razlikuje, tako dužina sečiva sa navojem koju ima Institut IMS iznosi 265 mm, dok dužina sa navojem sečiva koje se proizvodi u SAD iznosi 330 mm (videti Schmertmann 1988, slika 1.1). Takođe, razlikuje se i ugao vrha sečiva. Tako na primer, ugao vrha sečiva koje je u vlasništvu Instituta IMS iznosi 24° , a ugao vrha sečiva koje se proizvodi u SAD iznosi 14° do 15° . Na jednom od lica sečiva nalazi se **čelična membrana** prečnika 60 mm. Prostor ispod membrane, unutar sečiva, opremljen je **električnim prekidačem** koji ima funkciju da signalizira kada se membrana nađe u jednom od tri predviđena položaja prilikom njene ekspanzije. Šematski prikaz sečiva i membrane sa geometrijskim karakteristikama prikazani su na slici 2.7.

Čelična membrana predstavlja pasivni separator između gasa (najčešće vazduha) sa unutrašnje strane i tla sa spoljašnje strane sečiva. Napominje se da membrana nije merno telo. Merno telo je kontrolna jedinica sa manometrima kojom rukuje operater. Standardna debljina membrane iznosi 0.2 mm, a samim tim ona poseduje određenu krutost, odnosno pruža određeni otpor pri deformisanju. Podaci dobijeni ispitivanjem se koriguju za pomenutu krutost membrane što je obrazloženo dalje u tekstu. Takođe, proizvode se membrane debljine 0.25 mm koje su otpornije na mehanička oštećenja, a upotrebljavaju se u tlu gde postoji povećan rizik od oštećenja membrane. Schmertmann

(1988) navodi dva tipa membrane S i H, pri čemu se S-tip koristi u tlu kod koga sila potrebna da se utisne sečivo ne prelazi 2 t ili kada je broj udara iz SPT opita $N_{SPT} < 5$.

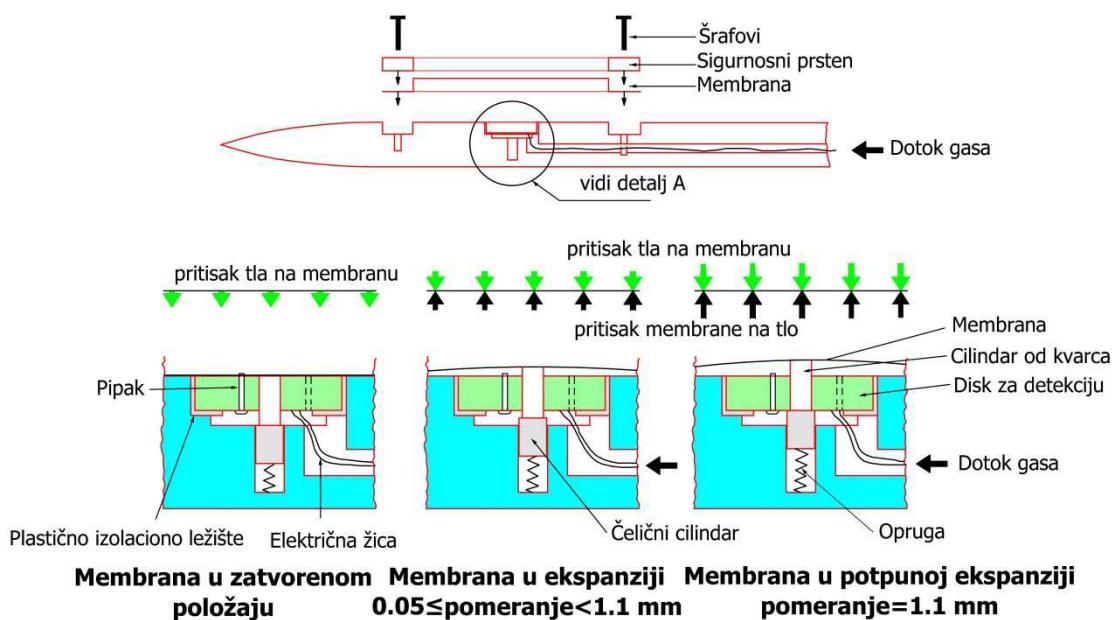


Slika 2.7. Dimenzije sečiva i membrane

Membrana prilikom ekspanzije može da se nađe u jednom od tri položaja tokom sprovođenja opita (videti sliku 2.8):

<i>položaj</i>	<i>el. prekidač</i>	<i>pomeranje (mm)</i>
zatvoren	uključen	<0.05
ekspanzija	isključen	$0.05 \leq \text{pomeranje} < 1.1$
potpuna ekspanzija	uključen	=1.1

Električni prekidač sastoji se od nekoliko komponenti prikazanih na slici 2.8. Njegova uloga je da omogući otvaranje i zatvaranje električnog kola. Fizički smisao položaja membrane i uloga električnog prekidača objašnjavaju se na sledeći način. Kada se sečivo utisne u tlo membrana usled pritiska tla se zatvara zatvarajući električno kolo u kome se javlja struja. To je propraćeno zvučnim i vizuelnim signalom na kontrolnoj jedinici.



Slika 2.8. Električni prekidač

Pumpanjem vazduha u sečivo povećava se pritisak na membranu i ona počinje da se širi. Kada se cilindar koji potiskuje membranu (slika 2.8) pomeri 0.05 mm električno kolo se otvara čime se zaustavlja protok struje, a zvučni i vizuelni signal nestaju, što operater beleži kao prvo čitanje (pritisak A). Dalje pumpanje vazduha povećava pritisak na membranu koja nastavlja da se širi sve do momenta dok se cilindar ne pomeri 1.1 mm. U tom trenutku električno kolo se ponovo zatvara što je propraćeno zvučnim i vizuelnim signalom na kontrolnoj jedinici. Pritisak potreban da se membrana pomeri, odnosno utisne u tlo 1.1 mm obeležava se kao pritisak B. Ovo ujedno predstavlja princip sprovođenja opita.

2.4.2. Kontrolna jedinica

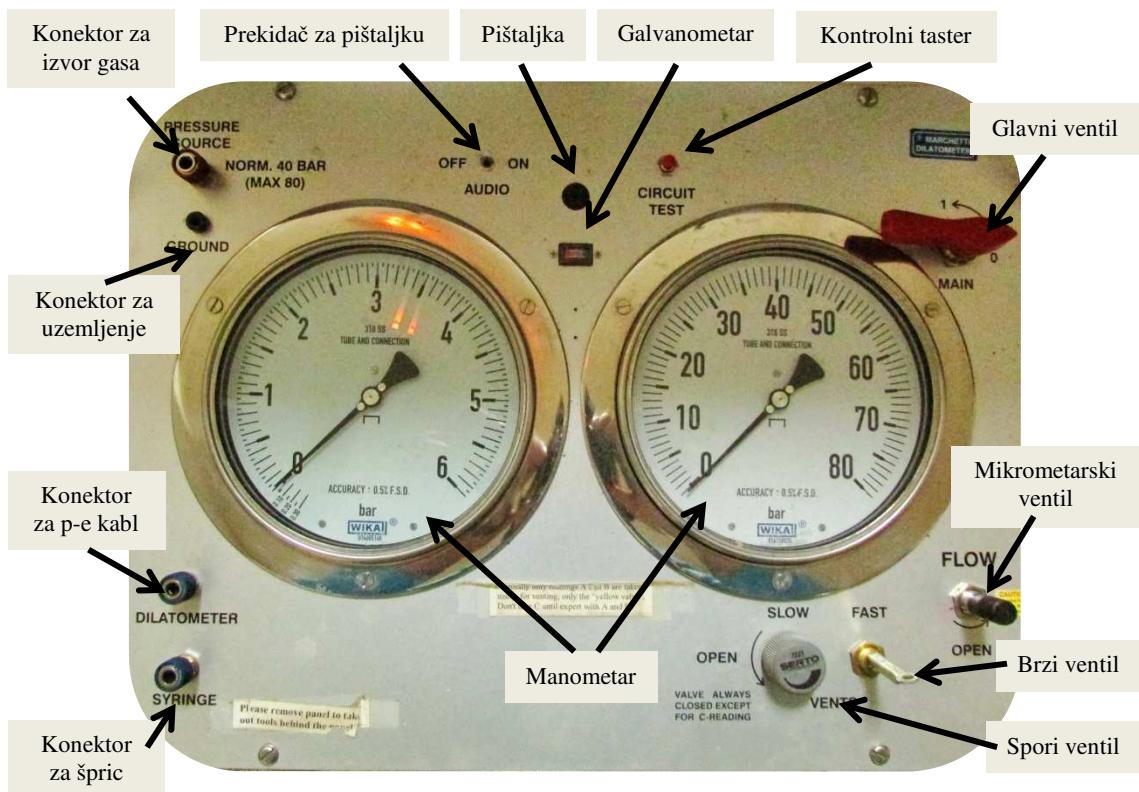
Osnovna funkcija kontrolne jedinice je da se prati i kontroliše pritisak gase koji se prenosi u sečivo i da se opaža položaj membrane posredstvom vizuelne i zvučne signalizacije. Jedinica se nalazi u aluminijumskom kućištu radi zaštite tokom transporta. Razvojem dilatometra kontrolna jedinica prolazila je kroz nekoliko faza evolucije. U početku je jedna kontrolna jedinica sadržala jedan od tri manometra različite preciznosti, odnosno opsega pritisaka i to: 0-40 bara za uobičajena ispitivanja, 0-16 bara prilagođena za mekša tla i 0-80 bara prilagođena za tvrda i zbijena tla. Zato je pre ispitivanja bilo potrebno unapred prepostaviti koju jedinicu koristiti da bi se dobio dovoljno tačan rezultat.

Moderna kontrolna jedinica, kakva je prikazana na slici 2.9, prilagođena je za upotrebu u različitim vrstama tla od vrlo mekih glina do jako zbijenih peskova. Sastoji se od dva manometra različite preciznosti. Precizniji manometar koristi se kada je pritisak na membrani ispod **5 bara** (meka i slabo zbijena tla). Maksimalni pritisak koji može da se ostvari na manometru šireg opsega pritisaka iznosi 80 bara.

Ostale komponente kontrolne jedinice, prikazane na slici 2.9 su: brzi konektor za izvor pritiska, brzi konektor za p-e kabl, konektor za uzemljenje, galvanometar i pištaljka koji proizvode vizuelni i zvučni signal kada je membrana u zatvorenom položaju (<0.05 mm) ili potpunoj ekspanziji (1.1 mm) i četiri ventila (glavni ventil, mikrometarski ventil, ventil za brzo ispuštanje vazduha i ventil za sporo ispuštanje vazduha) pomoću kojih se kontroliše protok gasa.

Glavni ventil omogućava da se prekine dotok gasa u p-e kabl i sečivo iz izvora. Operater koristi mikrometarski ventil da kontroliše brzinu protok gasa tokom opita, a kada je ovaj ventil zatvoren nema protoka gasa u p-e kabl i sečivo. Ventil za brzo ispuštanje vazduha koristi se za brzo-trenutno ispuštanje vazduha iz sistema nakon završetka opita na određenoj dubini. Ventil za sporo, kontrolisano ispuštanje vazduha koristi se za očitavanje tzv. pritiska C, nakon A i B čitanja.

Kontrolni taster služi da se proveri funkcionalnost 9 V baterije koja napaja el. kolo, galvanometra i audio signalizacije.



Slika 2.9. Kontrolna jedinica

2.4.3. Oprema za kalibraciju i postupak kalibriranja

Kada je u vazduhu, pri atmosferskom pritisku, membrana je zakriviljena ka spoljašnjoj strani sečiva, odnosno zauzima prirodan položaj između ΔA i ΔB pozicije (prikazano na slici 2.10). Membrana pri deformisanju u vazduhu pruža određeni otpor, odnosno poseduje krutost, što je potrebno uzeti u obzir pri određivanju pritiska A i B koji se mere tokom opita. Dakle, pritisak potreban da se membrana pomeri u zatvoreni položaj pri atmosferskom pritisku (pomeranje <0.05 mm) je pritisak ΔA . Pritisak potreban za potpunu ekspanziju membrane pri atmosferskom pritisku (1.1 mm) je pritisak ΔB . Kalibracija membrane podrazumeva određivanje ΔA i ΔB pritiska. Sva čitanja vrše se na preciznom manometru. Postupak kalibriranja je veoma jednostavan. Od opreme potrebno je imati špric kojim se proizvodi vakuum ili pritisak pri određivanju ΔA i ΔB respektivno. Dispozicija opreme prilikom kalibriranja membrane prikazana je na slici 2.11.



Slika 2.10. Položaj membrane pri kalibraciji

Prilikom kalibriranja prvo se prekine dotok gasa zatvaranjem glavnog ventila. Brzim povlačenjem klipa u špricu, do trenutka dok se ne uključi pištaljka, stvara se vakuum koji treba održavati nekoliko sekundi. U tom trenutku membrana je u zatvorenom položaju (ΔA položaj na slici 2.10), a pištaljka je uključena (taj položaj membrane je identičan položaju kada je sečivo utisnuto u tlo). Nakon toga, laganim otpuštanjem klipa membrana počinje da se pomera i u trenutku prestanka zvučnog signala očitava se ΔA pritisak. Ovaj postupak treba ponoviti nekoliko puta zbog preciznijeg očitavanja. Kada se odredi ΔA špic se otkači od kontrolne jedinice, klip se izvuče do maksimuma i zatim se špic vratи u brzu spojku na kontrolnoj jedinici. ΔB određuje se tako što se klip lagano potiskuje stvarajući pritisak usled kog se membrana širi. Kada se membrana nađe u potpunoj ekspanziji (pomeranje = 1.1 mm) pištaljka se ponovo uključuje, a operater očitava ΔB .

Kalibraciju membrane potrebno je vršiti pre i posle svakog opita, jer promena ΔA i ΔB pre i posle ukazuje na eventualna oštećenja koje je membrana pretrpela tokom izvođenja opita, odnosno ukazuje na uspešnost i pouzdanost izmerenih pritisaka.

ΔA i ΔB imaju svoje „prihvatljive” vrednosti (prema EC 7), odnosno kažemo da su u toleranciji kada je:

$$5 \leq \Delta A \leq 30 \text{ kPa}$$

$$5 \leq \Delta B \leq 80 \text{ kPa}$$

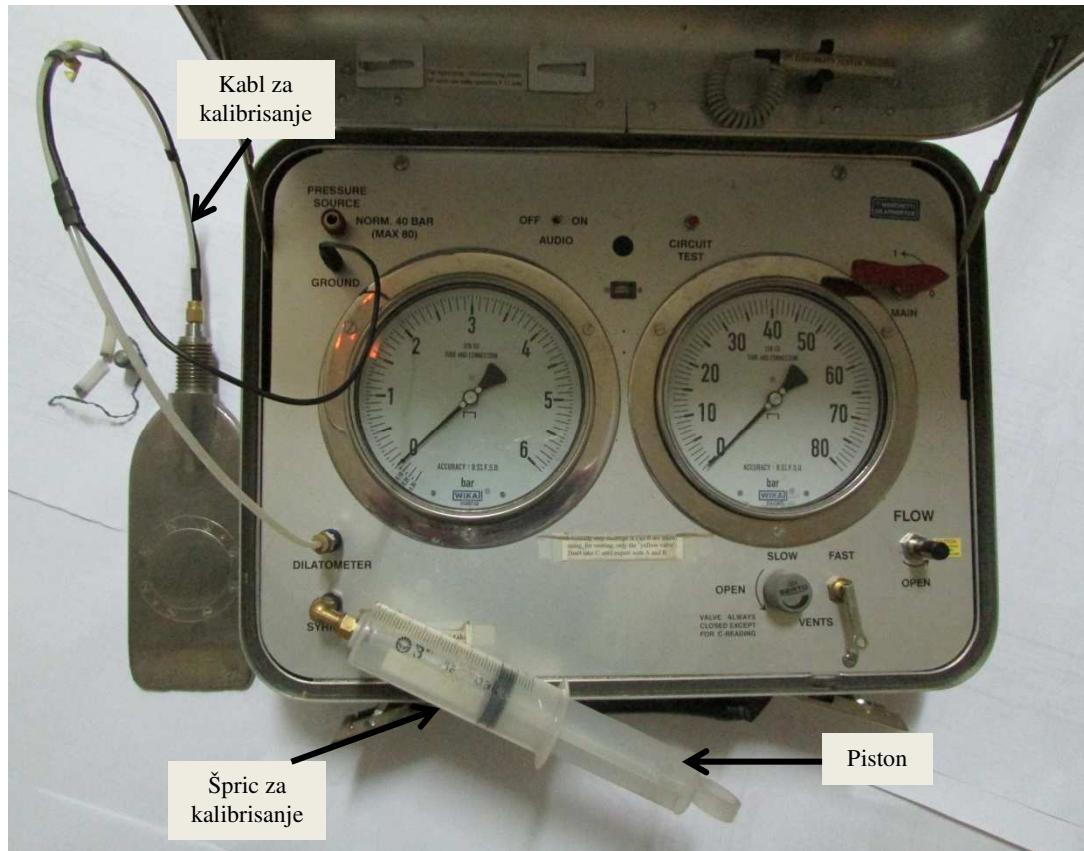
Ukoliko su pre opita vrednosti izvan prikazanih, membranu je neophodno zameniti novom.

Promena ΔA i ΔB pre i posle opita ne sme da prelazi 25 kPa. Ukoliko se to desi, prema EC-7, preporučeno je da se rezultati opita ne prihvate.

Prema iskustvu stečenom tokom dosadašnjih ispitivanja uobičajene vrednosti ΔA i ΔB nove (ne korišćene) membrane iznose: $\Delta A=12-18$ kPa i $\Delta B=30-55$ kPa.

Prikazane vrednosti ΔA i ΔB neznatno se menjaju tokom opita u slučaju kada se ispituju meka i slabo zbijena tla. Kada se ispituju tvrda, zbijena tla poput jako prekonsolidovanih glina i peskova ΔA i ΔB se smanjuju (dosadašnje iskustvo), odnosno teže ka svojim minimalnim prihvatljivim vrednostima (5 kPa). Takođe, dešava se da se ΔA smanjuje, a da se ΔB povećava u odnosu na vrednosti pre opita.

Pažljivo i korektno određivanje ΔA i ΔB pritisaka je od velikog značaja kod tla niskih otporno-deformabilnih karakteristika u kojima su prva (A) i druga (B) čitanja mala. U tom slučaju kalibracioni pritisci mogu da utiču na rezultate opita.



Slika 2.11. Dispozicija prilikom kalibracije

Kalibracija predstavlja jedini izvor greške pri interpretaciji rezultata jer se sva čitanja u jednom opitu koriguju sa istim vrednostima ΔA i ΔB . Međutim, pitanje je da li usvojiti pritiske ΔA i ΔB dobijene pre ili posle opita sa kojima se vrši korigovanje A i B čitanja? Kada je promena pre i posle opita mala (meka tla), npr. nekoliko kPa predlaže se da se usvoji aritmetička sredina, odnosno $(\Delta A_{pre} + \Delta A_{posle})/2 = \Delta A_{računski}$. Isto važi i za ΔB .

Međutim, kada su promene pre i posle opita približno 25 kPa onda je iskustvo interpretatora presudno.

Novu membranu je potrebno „uvežbati” tako što će se ciklično opterećivati i rasterećivati pumpanjem i ispumpavanjem vazduha pod pritiskom (~500 kPa). Za tu svrhu postoji specijalan špric kojim može da se ostvari maksimalan pritisak od 5 bara. Preporučuje se da „uvežbavanje” obuhvati minimum 100 ciklusa pumpanja i ispumpavanja vazduha pod pritiskom pre ispitivanja.

2.4.4. Pneumatsko-električni (p-e) kablovi

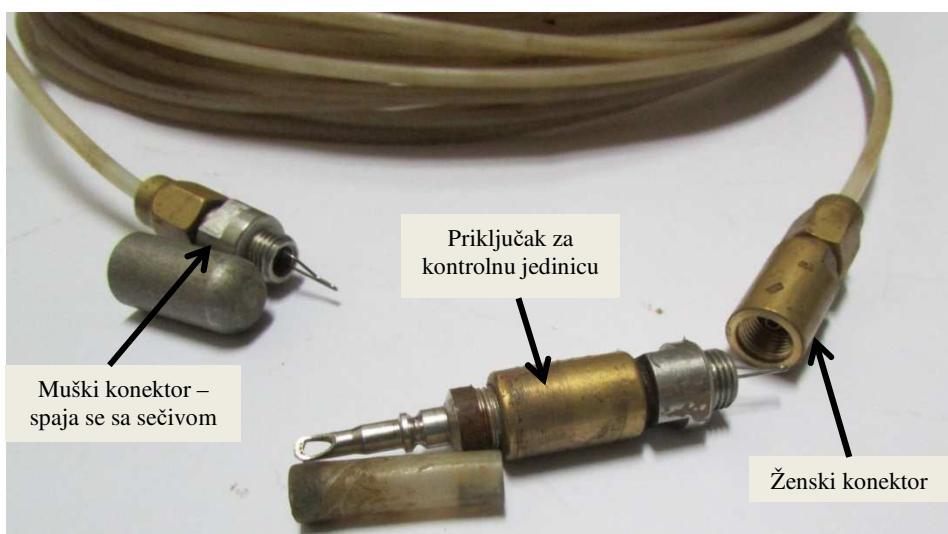
P-e kablovi omogućuju kontinualni prenos gasa i električnog signala sa kontrolne jedinice na dilatometarsko sečivo. Sastoje se od creva visokog pritiska unutar kojeg se nalazi žica izgrađena od nerđajućeg čelika. Oba kraja kabla završavaju se specijalnim metalnim konektorima. Dve vrste kabla su u upotrebi i to:

- Kabl koji ne može da se nastavi prikazan je na slici 2.12, levo. Kod ove vrste kabla na kraju koji se priključuje na sečivo nalazi se izolovani konektor (muški), dok se na drugom kraju koji se povezuje sa kontrolnom jedinicom nalazi izolovani brzi konektor. Dužina kabla (minus radna dužina na površini) ograničava dubinu do koje može da se izvede opit. Zato se ovaj tip kabla upotrebljava kada je unapred poznata dubina opita.
- Kabl koji se nastavlja, prikazan je na slici 2.12, desno. Koristi se kada dubina utiskivanja unapred nije poznata. Ovaj tip kabla omogućava da se na jedan njegov kraj (izolovani „ženski” konektor) prikači „muški” konektor drugog kabla čime se povećava potencijalna dubina do koje je moguće vršiti ispitivanje. Kraj sa ženskim konektorom ne može direktno da se poveže sa kontrolnom jedinicom već preko specijalno konstruisanog adaptera koji se uklanja kada se dodaje novi kabl, slika 2.13.

Napominje se da je prilikom ispitivanja poželjno koristiti što kraće dužine kablova zbog jednostavnijeg rukovanja i bržeg izjednačavanja pritiska u sistemu. Uobičajene dužine kablova su 18, 25 i 34 m.



Slika 2.12. Kabl koji ne može da se nastavi (levo) i koji može da se nastavi (desno)



Slika 2.13. Detalj A sa slike 2.12

2.4.5. Izvor gasa

Kao gasni izvor najčešće je u upotrebi ronilačka boca koja se preko kompresora puni vazduhom pod pritiskom. Ronilačka boca u vlasništvu Instituta IMS kapaciteta 200 bara prikazana je na slici 2.14. Boca je sa kontrolnom jedinicom povezana preko regulatora

pritiska koji ima funkciju da omogući kontrolisano i konstantno snabdevanje opreme gasom. Regulator se sastoji iz dva manometra, prvi koji pokazuje pritisak u boci i drugi izlazni manometar koji pokazuje regulisani pritisak. Pritisak na izlaznom manometru regulatora ne sme da pređe 80 bara, odnosno kapacitet manometra šireg opsega pritisaka kontrolne jedinice.

Za ispitivanje može da se koristi bilo koji gas koji nije opasan i štetan po ljude i životnu okolinu. Najčešće su u upotrebi vazduh i azot. Dosadašnje iskustvo ukazuje da je za ispitivanje oko 150 m' tla potrebna boca visine 0.6 m napunjena vazduhom pod pritiskom na 200 bara.



Slika 2.14. Izvor gasa – boca sa regulatorom pritiska

2.4.6. Kabl za uzemljenje

Električni kabl za uzemljenje omogućava električni kontinuitet između kontrolne jedinice i šipki za utiskivanje sečiva. Kabl za uzemljenje preko šipki vraća električni signal koji se šalje preko p-e kabla ka sečivu. Zato je veoma važno da je kabl za

uzemljenje dobro povezan sa šipkama ili penetrometrom. Ukoliko bi se tokom opita, npr. prilikom merenja B pritiska, uzemljenje otkačilo sa šipki ili penetrometra izostao bi zvučni signal u trenutku kada treba da se očita B pritisak. Ako operater to ne primeti može da dođe do deformisanja i oštećenja membrane usled prenapumpanosti membrane.

2.4.7. Šipke za utiskivanje sečiva

Šipke za utiskivanje imaju ulogu da prenesu opterećenje sa opreme za utiskivanje (najčešće glava penetrometra) na dilatometarsko sečivo. Iсторијски гледано, као средство којим се вршило утискivanje dilatometarskог сечива у тло био је статички penetromетар (CPT-гarnitura). Зато је и уобичајено да се користите шипке (пречника 36 mm, дужине 1 m) које се употребљавају за утискivanje мешовитих или електричних CPT конуса. Понекад се користи фрикциони редуктор који има улогу да укине (делимићно или потпуно) утицај тrena између тла и шипки. Када се он користи препорука EC-7 је да се постави минимум 20 cm изнад центра membrane. Уколико се врши испитивање тврдих и збјених тла могу да се користе делче, отпорније шипке (пречника 44 mm) које се употребљавају за утискivanje CPT конуса површине 15 cm².

Када се користи мешовити тип penetrometra (нпр. који користи Institut IMS) унутрашње шипке треба да се уклоне из спољашњих, ради спровођења п-е кабла од сечива до контролне единице, што омогућава потенцијално већа савијања спољашњих шипки.

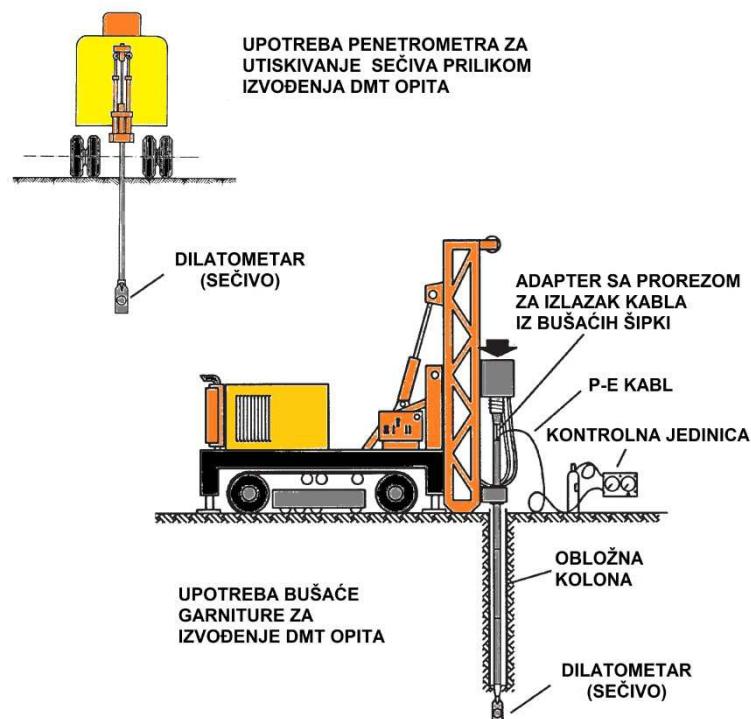
Briaud i sar. (1992) препоручују следеће максималне дозволjene вредности померања средишње тачке шипке дужине 1 m: 0.5 mm за пет последњих шипки (изнад сечива) и 1.0 mm за остатак шипки. Стварна савијања шипки неже лако измерити на терену.

Pored CPT у употреби су и шипке које се користе за истражно бушење. Kod нас најчеšće се користе бушаће шипке пречника 50 mm које је произвела „Geomašina”. Tehničke karakteristike поменутih шипки razlikuju se u odnosu na шипке уobičajene за земље Европске уније зato је било потребно да се направе прелази (адаптери) који омогућују повезивање сечива са бушаћим шипкама. Такође, било је неophodno направити poseban adapter са прорезом за прелаз са бушаће главе на шипке како би се омогућило вадење шипки и кабла из тла након завршетка опита.

2.5. Oprema za utiskivanje sečiva

2.5.1. Oprema za utiskivanje na kopnu

Utiskivanje sečiva u tlo vrši se na dva načina. Prvi način podrazumeva utiskivanje kvazi-statičkom silom posredstvom statičkog penetrometra ili bušaće garniture. Drugi način podrazumeva dinamičko pobijanje sečiva maljem (najčešće SPT malj). Šematski prikaz opreme za utiskivanje dat je na slici 2.15. ASTM D6635-01 i EC-7 preporučuju da brzina utiskivanja sečiva kvazi-statičkom silom iznosi 1 do 3 cm/s. Poređenja radi standardizovana brzina utiskivanja CPT konusa iznosi 2 cm/s. Prilikom utiskivanja sečiva penetrometrom poželjno je registrovati ukupnu silu potrebnu da se sečivo sa šipkama utisne za određeni interval dubine. Takođe, kada se vrši pobijanje maljem korisno je zabeležiti broj udara (N_{DMT}) potreban da se sečivo utisne za određeni interval (npr. 20 cm).



Slika 2.15. Oprema za utiskivanje sečiva

Prednost dilatometra u odnosu na većinu drugih terenskih opita je ta što opit može da se izvede i sa dna bušotine utiskivanjem sečiva pomoću bušaće garniture. Na taj način je

moguće prevazići prirodne prepreke poput jače cementiranih slojeva tla koje nije moguće „probiti” utiskivanjem sečiva statičkim penetrometrom sa površine terena. U slučaju da se opit izvodi sa dna bušotine statičkim utiskivanjem potencijalna dubina do koje je tlo poremećeno bušenjem iznosi 3-5 prečnika bušotine (Marchetti i sar., 2001). U toj zoni rezultate treba pažljivo interpretirati. Poželjno je da prečnik bušotine bude približno jednak širini sečiva (94 mm) da bi se smanjila mogućnost savijanja šipki. Ovo je pogotovo važno kod opita koji se izvode na dubini većoj od 15 m. Poželjno je da prečnik bušotine iznosi 100-120 mm. Utiskivanje sečiva bušaćom garniturom ograničeno je maksimalnom silom koju garnitura može da postigne. Najčešće su to sile 2-3 t. Rezultate opita dobijene pobijanjem potrebno je kalibrirati u odnosu na rezultate dobijene statičkim utiskivanjem (Marchetti i sar., 2001 i US DOT, 1998). Ovo podrazumeva da se izvede minimum dva opita u neposrednoj blizini na istoj dubini, jedan pobijanjem, a drugi statičkim utiskivanjem. EC-7 predlaže da pobijanje treba izbeći. Različite vrste tla različito reaguju na dinamičko opterećenje i vibracije zato rezultati dobijeni pobijanjem u manjoj ili većoj meri mogu da se razlikuju od rezultata dobijenih statičkim utiskivanjem. Tako na primer, rezultat dobijen pobijanjem u tlo čija je struktura vrlo osetljiva (les, slabo vezani pesak, itd.) i u slabo zbijenim peskovima biće nepovoljniji (konzervativniji) u odnosu na rezultat dobijen statičkim utiskivanjem. Istraživanje izvedeno u Portugaliji (Cruz i sar., 2006) koje se odnosi na rezidualno tlo ukazuje da dinamičko utiskivanje znatno narušava njegovu prirodnu strukturu umanjujući vrednosti prelaznih parametara koji se dobijaju kao rezultat opita. Ista studija ukazuje da pobijanje ima obrnut efekat u nasutom materijalu, odnosno tlo se zbjija, a vrednosti parametara su viši od onih dobijenih statičkim utiskivanjem (rezultat nije na strani sigurnosti).

Na osnovu pomenutog daje se prednost statičkom u odnosu na dinamičko utiskivanje sečiva.

2.5.2. Oprema za utiskivanje izvan kopna

Ispitivanja izvan kopna razlikuju se u odnosu na ona koja se izvode na kopnu pre svega u otežanom pristupu samoj lokaciji i načinu na koji se vrši utiskivanje pribora do

željenih dubina. Veoma interesantan način utiskivanja sa morskog dna prikazao je Profesor Marchetti u okviru prezentacije koju je održao u Soko Banji 2013 godine. Takozvani „seafloor“ dilatometar prikazan je na slici 2.16. Sastoji se od čeličnog kaveza, u koji se postavlja balast, i sistema za utiskivanje. Maksimalna dubina utiskivanja uslovljena je kapacitetom sistema za utiskivanje od 7 t.



Slika 2.16. „Seafloor“ dilatometar (Rim 2015)

Ova tehnologija je novijeg datuma tako da se očekuje dalji napredak u njenom razvoju. Vrlo je primamljiva ako se uzme u obzir cena iznajmljivnja barže ili platforme koja iznosi 1000 do 30000 evra po danu. U našoj zemlji nije retkost da se ispitivanja izvode sa barži u rečnom koritu za potrebe fundiranja mostovskih stubova. Zato bi „seafloor“ dilatometar mogao da nađe svoju aplikaciju upravo na ovakvim projektima.

2.6. Postupak izvođenja DMT opita

DMT opitom se na željenoj dubini registruju tri pritiska A, B i C (opciono). Izvođenje opita podrazumeva sledeće operacije:

- 1) Povezivanje opreme. Način povezivanja razlikuje se u zavisnosti da li se koristi CPT ili bušača garnitura za utiskivanje šipki i sečiva. Međutim princip ispitivanja je identičan.
- 2) Otvaranje ventila na boci sa kiseonikom i očitavanje pritiska u boci. Podešavanje pritiska na izlaznom manometru regulatora pritiska na 40 bara (uobičajeno). U

ovom trenutku svi ventili na kontrolnoj jedinici izuzev brzog ventila su zatvoreni (slika 2.9).

- 3) Postavljanje sečiva u početni (nulti) položaj. Sečivo je potrebno utisnuti u tlo tako da se centar membrane poklopi sa površinom terena. Ovo je bitan korak s obzirom da se dubina na kojoj se sečivo nalazi meri u odnosu na centar membrane.
- 4) Glavni ventil se otvorи (položaj 1 na slici 2.9). Ostali ventili su još uvek zatvoreni, izuzev brzog ventila. Na ovaj način gas iz boce se propušta do mikrometarskog ventila. U slučaju da je mikrometarski ventil oštećen, gas izlazi iz sistema u atmosferu preko otvorenog brzog ventila.
- 5) Utiskivanje sečiva u tlo prvih 20 cm (ili do željene dubine). Prilikom utiskivanja pištaljka je uključena jer tlo vrši pritisak na membranu (slika 2.8).
- 6) Nakon dostizanja željene dubine radnik na penetrometu konstatiuje pritisak potreban da se oprema (sečivo + šipke) utisne do te dubine (opciono). Zatim vrši potpuno rasterećenje sečiva. Pištaljka je i dalje uključena.
- 7) Registrovanje prvog čitanja, odnosno **A-pritisak**. Odmah nakon pozicije 6) operater počinje sa merenjem A-pritiska na sledeći način. Zatvara brzi ventil (uporediti položaj brzog ventila na slici 2.9 i slici 2.11) i polako otvara mikrometarski ventil. Na ovaj način omogućen je dovod gasa u sečivo preko p-e kabla. Kada pritisak vazduha sa unutrašnje strane membrane postane veći od pritiska koje tlo vrši na membranu ona počinje da se pomera. U trenutku kada se centar membrane pomeri 0.05 mm pištaljka se isključuje, a operater na manometru očitata pritisak. To je A-pritisak.
- 8) Registrovanje drugog čitanja, odnosno **B-pritisak**. Ne prekidajući dotok vazduha operater nastavlja da kontrolisano upumpava vazduh u sečivo preko mikrometarskog ventila. Pritisak na membranu se povećava i ona nastavlja da se širi sve dok pomeranje centra membrane ne bude 1.1 mm. U tom trenutku ponovo se čuje zvuk pištaljke i operater na manometru očita taj pritisak. To je B-pritisak.
- 9) Otpuštanje gase iz sistema. Ovaj korak je veoma bitan jer ukoliko se ne izvede korektno može dovesti do oštećenja membrane ili do znatne promene kalibracionih pritisaka ΔA i ΔB , a podrazumeva sledeće:

- odmah nakon registrovanja B-pritisaka operater otvara brzi ventil čime se ispušta gas u atmosferu
- operater zatvara mikrometarski ventil. Ovim se sprečava dotok vazduha u sečivo i zaustavlja se dalje širenje membrane.
- sačeka nekoliko sekundi (obično 1 do 2 sekunde) da bi se ispušto sav vazduh iz sistema (kazaljka na preciznom manometru se vrati na nulu) i da se membrana što više zatvori. Ovim se sprečava oštećenje membrane prilikom utiskivanjem sečiva na sledeću dubinu. U ovom trenutku pištajlka može i ne mora da bude uključena. U glini pištajlka je obično uključena što ukazuje da se membrana vratila u početni položaj. U pesku iznad nivoa vode membrana se ne vraća u početni položaj već se nalazi u položaju *membrana u ekspanziji* (slika 2.8) gde zvučna signalizacija izostaje.

10) Ponavljanje koraka 5)-9).

Ukoliko je neophodno operater može da registruje i treće čitanje, tzv. **C-pritisak** na sledeći način. U koraku 9) umesto da otvorи brzi ventil operater otvara spori ventil preko koga se iz sistema kontrolisano ispušta vazduh u atmosferu. Kazaljka na manometru se polako vraća na nulu. Nakon približno jednog minuta (od početka opita) pištajlka se aktivira, a operater registruje taj pritisak. To je C-pritisak. Ispuštanje vazduha otvaranjem sporog ventila je uslov da se membrana vrati u svoj početni položaj postupno i polako, što ima veliki praktičan značaj, pogotovo u pesku ispod nivoa vode (videti poglavljje 5.1).

2.6.1. Uticaj brzine protoka gasa na izmerene vrednosti pritisaka A i B

Vreme za koje se dostignu A i B pritisci direktno je povezano sa brzinom protoka gase od izvora do sečiva. Brzina se kontroliše preko mikrometarskog ventila. Zato će u mekom tlu protok biti znatno sporiji nego u tvrdom tlu. Rezultat opita i nije toliko osetljiv na brzinu protoka gase ako se izvede prema preporukama EC-7 ili ASTM D6635-01. Preporuka EC-7 je da se A-pritisak dostigne najkasnije 20 sekundi nakon utiskivanja sečiva na određenu dubinu, a da se B-pritisak dostigne najkasnije 20 sekundi

nakon A-pritiska. Preporuka ASTM D6635-01 je da se A-pritisak dostigne 15 do 30 sekundi nakon puštanja gasa otvaranjem mikrometarskog ventila, dok B-pritisak treba da se dostigne 15 do 30 sekundi nakon A-pritiska. Treba napomenuti da ASTM preporučuje gornje i donje granične vrednosti vremena očitavanja za razliku od EC-7, Samim tim procedura je jasnija. Pomenuta vremena važe za dužinu kabla ne veću od priblžno 30 m. Kod većih dužina kablova vreme dostizanja A i B pritisaka je potrebno povećati radi izjednačavanja pritiska u celom sistemu.

2.6.2. Vreme potrebno da se ispita 1 m tla

Često se kao najveći nedostatak DMT opita (u poređenju sa CPT opitom) spominje vreme potrebno da se opit izvede. Robertson (2009) i Robertson (2013) navodi da je za vreme koje je potrebno da se izvede jedan DMT opit moguće izvesti tri do četiri CPT opita. Ako se pretpostavi da je brzina utiskivanja sečiva u tlo 2 cm/s vreme potrebno da se ispita 1 m tla (5 opita u intervalu od 20 cm, samo A i B pritisci) iznosi oko 4-5 minuta. Ako se na ovo doda i vreme potrebno za očitavanje C-pritiska (u intervalima od 20 cm) onda je vreme potrebno za ispitivanje 1 m tla oko 6-7 minuta. Vreme potrebno da se ispita 1 m tla CPT opitom za standardnu brzinu utiskivanja konusa iznosi oko 1 minut. Ova komparacija jasno pokazuje da je DMT opit znatno sporiji u poređenju sa CPT opitom.

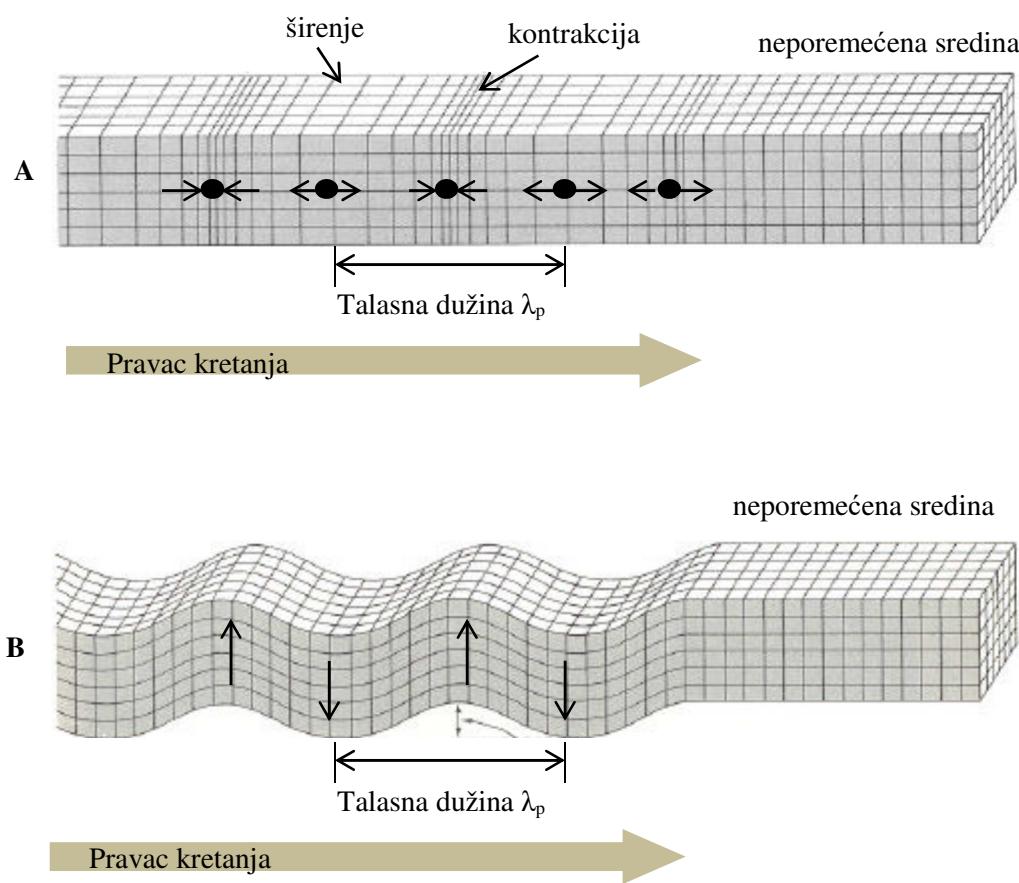
2.6.3. Vertikalno rastojanje između opita (interval ispitivanja)

Prema preporukama ASTM D6635-01 i EC-7 ispitivanja je poželjno vršiti u razmacima od 15 do 30 cm. Ovo ne isključuje mogućnost većih vertikalnih rastojanja (npr. svakih 40 cm). Uobičajeno je da se opiti vrše na svakih 20 cm (Marchetti i sar., 2001). Takođe, Marchetti i sar. (2001) predlažu intervale od 10 cm ukoliko je potrebno dobiti detaljniji profil tla. Najveći broj opita čiji su rezultati korišćeni u disertaciji izvedeni su u intervalima od 20 cm, a kada to nije slučaj posebno je naglašeno.

3. SEIZMIČKI DILATOMETAR (SDMT)

3.1. Seizmički talasi – vrste i osobine

Prirodni i veštački izvori poput zemljotresa, miniranja, itd. mogu da izazovu različite vrste seizmičkih talasa. U geotehničkom inženjerstvu posebno su znčajni *longitudinalni* (*primarni, kompresioni* – *P - talasi*) i *transverzalni* (*sekundarni, smičući* – *S - talasi*). Suštinski, ove dve vrste talasa razlikuju se prema pravacu oscilovanja materijalnih čestica u odnosu na pravac kretanja talasa i način deformisanja elemenata tla prilikom njihovog nailaska. Kod P-talasa oscilovanje čestica je u pravcu kretanja talasa, slika 3.1. Kod S-talasa oscilovanje čestica je upravno na pravac kretanja talasa tako da su deformacije elemenata tla smičuće prirode. S-talase prema pravcu kretanja čestica možemo podeliti na dve komponente SV i SH u zavisnosti da li se kretanje odvija u vertikalnoj (SV) ili horizontalnoj ravni (SH).



Slika 3.1. Kompresioni (A) i smičući (B) talas u prostoru

Brzine P i S talasa zavise od elastičnih karakteristika sredina kroz koje se prostiru. Prema teoriji elastičnosti brzine prostiranja kompresionih (V_p) i smičućih (V_s) talasa dovode se u vezu sa inicijalnim modulom stišljivosti i inicijalnim modulom smicanja pri jako malim deformacijama ($<10^{-3} \%$) što je prikazano jednačinom 3.1 i 3.2.

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad (3.1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{M_0}{\rho}} \quad (3.2)$$

Pri čemu su:

G_0 –inicijalni modul smicanja tla,

M_0 – inicijalni modul stišljivosti tla i

ρ – gustina tla (kg/cm^3) – ukupna zapreminska težina (γ) podeljena sa ubrzanjem sile zemljine teže (g).

Ukoliko se uvede pretpostavka o homogenoj i izotropnoj sredini V_s i V_p mogu se dovesti u vezu preko Poasonovog koeficijenta (v). Za Poasonov koeficijent recimo 0.2 odnos modula stišljivosti (M) i smičućeg modula (G), prema teoriji elastičnosti, iznosi $M/G=2.67$. Iz tog odnosa deformabilnih karakteristika tla vidi se da su brzine kompresionog talasa veće od brzine smičućeg talasa. P- talasi mogu da se prostiru kroz čvrsta tela, gasove i fluide, dok S- talasi mogu da se prostiru samo kroz sredine koje pružaju otpor pri smicanju što isključuje većinu fluida i gasova.

Autor prilikom eksperimentalnog dela nije imao mogućnost merenja brzine P – talasa tako da dalje neće biti razmatrani. Jedan deo disertacije odnosi se na rezultate merenja i interpretacije V_s pa se u daljem tekstu ukratko, na osnovu dostupne literature, opisuju parametri koje utiču na veličinu izmerenih V_s .

3.2. Faktori koji utiču na brzinu smičućih talasa

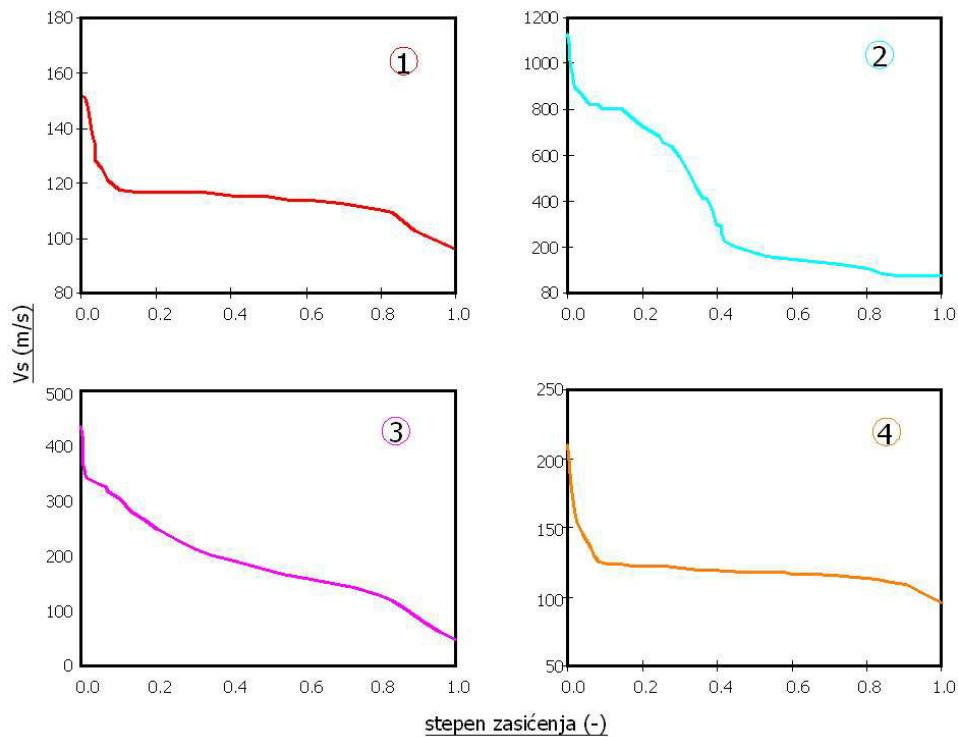
Osnovni činioci koji utiču na brzinu prostiranja smičućih talasa u tlu, pored vrste tla, su (Stokoe i Santamarina, 2000):

- stepen zasićenja (S_r),
- efektivno naponsko stanje,
- cementacija (dijageneza) i
- anizotropija (strukturalna i naponska).

3.2.1. Stepen zasićenja

U čistom krupnozrnom pesku, gde su kapilarni efekti zanemarljivi, modul smicanja je zavistan od efektivnog naponskog stanja, dok se efekat zasićenja ispoljava samo u promeni gustine materijala (jedn. 3.1). Uticaj kapilarnih sila, na kontaktu između zrna čestica tla, na modul smicanja se povećava sa povećanjem učešća finozrne frakcije. Na slici 3.2 prikazana je zavisnost V_s od S_r za različite vrste materijala dobijene ispitivanjem u specijalno konstruisanom edometru (Cho i Santamarina, 2001). Osnovni podaci o ispitanim materijalima prikazni su u tabeli 3.1. Sva ispitivanja su sprovedena za vertikalno opterećenje od 1.5 kPa. Sa slike 3.2 uočava se sledeće:

- kod slabo provlaženih uzoraka veće su brzine V_s ,
- maksimalne brzine smičućih talasa (V_{smax}) odgovaraju suvom uzorku ($S_r=0$), a minimalne zasićenom ($S_r=1$),
- nagle promene nagiba dijagrama, odnosno veća osetljivost V_s na promenu S_r dešava se kada je $S_r>0.8-0.9$ i $S_r<0.1-0.05$ i
- prilikom sušenja ili provlažavanja uzorak prolazi kroz najmanje tri različite faze u pogledu uticaja S_r na veličinu V_s .



Slika 3.2. Zavisnost V_s od stepena zasićenja za različite materijale (prema tabeli 3.1)

Tabela 3.1. Parametri materijala 1, 2, 3 i 4 sa slike 3.2 (Cho i Santamarina, 2001)

Materijal	Staklena zrna (1)	Kaolinit (2)	Granitni prah (3)	Sandboil pesak (4)
d_{10} (μm)	260	1	17	170
d_{50} (μm)	320	5	89	360
Specifična težina	2.46	2.70	2.75	2.62

3.2.2. Efektivno naponsko stanje (anizotropija)

Brojna istraživanja (Bellotti i sar., 1996; Stokoe i sar., 1991; Roesler, 1979, Stokoe i Santamarina 2000) sprovedena na laboratorijskim uzorcima različitog oblika i veličine (od kocke stranice 30 cm do kalibracione komore oblika kocke stranice 2.15 m) ukazuju da brzine V_s zavise od veličine i pravca delovanja glavnih napona. Laboratorijski uslovi omogućavaju da se pobude talasi čiji se pravac kretanja poklapa sa pravcem jednog od glavnih napona dok se pravac oscilovanja materijalnih čestica poklapa sa pravcem drugog glavnog napona. U uslovima izotropne kompresije ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\sigma_0$) zavisnost V_s

od svestranog pritiska opisuje se stepenom funkcijom (Stokoe i Santamarina, 2000) prema jednačini 3.3.

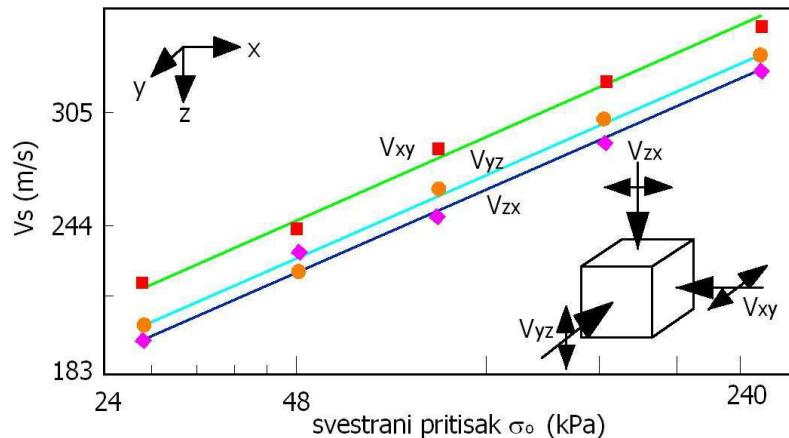
$$V_s = C \sigma_0^n \quad (3.3)$$

Pri čemu su:

σ_0 – svestrani pritisak,

C – konstanta materijala (zavisi od veličine zrna, prirode kontakta između zrna i stabilnosti skeleta tla) i

n – nagib prave $V_s-\sigma_0$ u bi-logaritamskoj podeli.



Slika 3.3. Promena V_s u uslovima izotropne kompresije (preuzeto iz Stokoe i sar., 1990)

Grafički prikaz jednačine 3.3 dat je na slici 3.3. Prikazani rezultat odnosi se na uzorak srednje zbijenog peska klasifikovanog kao SP prema USCS klasifikaciji, srednje veličine zrna $d_{50\%}=0.45$ mm, zapreminske težine u suvom stanju $\gamma_d=13.1$ kN/m³ (Stokoe i sar., 1991). Rezultat je dobijen ispitivanjem uzorka, ugrađenog postupkom pluviacije, u kalibracionoj komori. Ova specijano modifikovana komora ima mogućnost merenja V_s u različitim pravcima kao što je prikazano na slici 3.3.

Sa slike se vidi da su brzine talasa u dva paravca (V_{zx} i V_{yz}) približno jednake dok brzina talasa V_{xy} ima nešto veće vrednosti. Ovo pokazuje da talas koji se kreće u horizontalnoj ravni kod koga čestice osciluju u istoj ravni ima veće brzine kretanja od preostala dva talasa čije se kretanje ili deformacije manifestuju u vertikalnoj ravni. Ova

pojava se naziva **strukturna anizotropija**, a ona je rezultat depozicionih uslova u kojima je sredina formirana i karakteristika zrna tla (Stokoe i Santamarina, 2000).

Pored izotropnog razmotriće se i uticaj biaksijalnog naponskog stanja ($\sigma_x=\sigma_y \neq \sigma_z$) na brzinu smičućih talasa. Na slici 3.4 prikazan je jedan takav slučaj (Stokoe i dr., 1991) gde su naponi u horizontalnom pravcu održavani konstantnim ($\sigma_x=\sigma_y=83$ kPa) dok je vertikalni glavni napon menjan od $\sigma_z=41-145$ kPa. Sa slike se vidi da je brzina V_{xy} praktično konstantna s obzirom da su naponi u pravcu kretanja talasa i oscilovanja čestica konstantni. Brzine kod kojih se pravac kretanja talasa (V_{zx}) ili pravac oscilovanja čestica (V_{yz}) poklapa sa pravcem glavnog napona (σ_z) zavisne su od tog glavnog napona. Ta pojava naziva se **naponska anizotropija** i data je jednačinom 3.4 (Stokoe i Santamarina, 2000) u opštem obliku.

$$V_s = C_1 \sigma_a^{na} \sigma_b^{nb} \quad (3.4)$$

Pri čemu su:

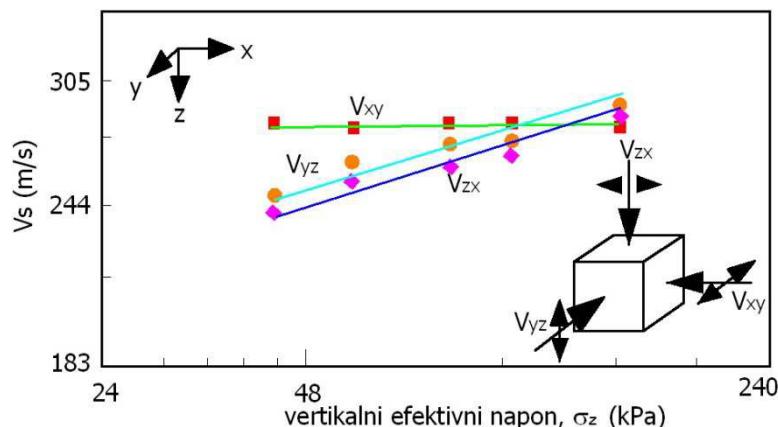
σ_a – efektivni glavni napon u pravcu kretanja talasa,

σ_b – efektivni glavni napon u pravcu oscilovanja čestica,

C_1 – konstanta materijala (zavisi od veličine zrna, prirode kontakta između zrna i stabilnosti skeleta tla),

na – nagib prave $V_s-\sigma_a$ u bi-logaritamskoj podeli i

nb – nagib prave $V_s-\sigma_b$ u bi-logaritamskoj podeli.



Slika 3.4. Promena V_s u uslovima biaksijalnog naponskog stanja

(preuzeto iz Stokoe i sar., 1990)

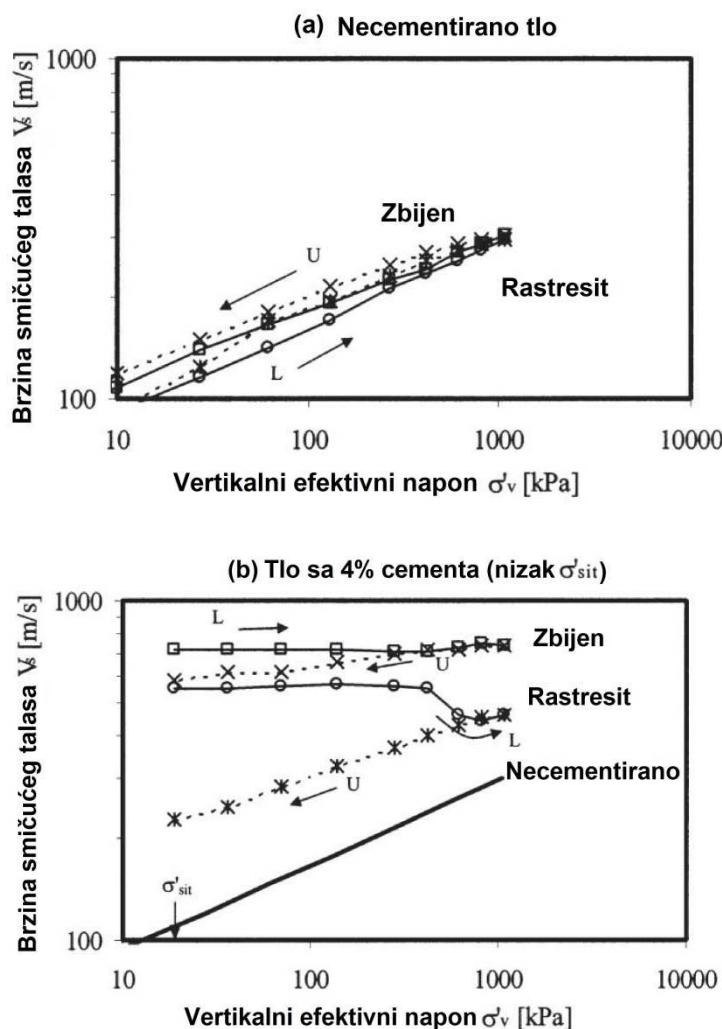
SDMT opitom (downhole metodom) određuje se brzina označena kao V_{zx} na slici 3.3 i 3.4. Crosshole metodom određuju se brzine koje odgovaraju brzini V_{xy} ili V_{xz} . Odavde se vidi da brzini V_s koja se meri SDMT opitom odgovara brzina V_{xz} izmerena crosshole opitom. Prethodno su prikazani slučajevi izotropnog i biaksijalnog naponskog stanja kakvi se mogu postići u kontrolisanom laboratorijskom okruženju, međutim stvarno naponsko stanje u terenu je složenije i bliže triaksijalnom stanju napona ($\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$) što dodatno komplikuje mogućnost određivanja uticaja pojedinačnih činioča na izmerenu brzinu V_s .

3.2.3. Cementacija

Pokazano je da naponsko stanje utiče na brzinu smičućih talasa što je posebno izraženo kod „poremećenih“ uzoraka kakvi su npr. uzorci suvog peska ugrađeni u kalibracione komore postupkom pluviacije. Međutim, dijagenetski procesi modifikuju tlo menjajući njihova elastična svojstva bitna sa aspekta određivanja brzine smičućih talasa. Pod dijagenetskim procesima u tlu podrazumeva se sekundarna konsolidacija (starenje), tiksotropija, migracija koloidnih čestica, cementacija, i dr. (videti Stokoe i Santamarina, 2000). Svi pomenuti procesi povećavaju površinu kontakata između pojedinačnih zrna skeleta tla ili povećavaju broj kontakata što utiče na povećanje brzine smičućih talasa. Posebno je značajan efekat cementacije čiji se uticaj na brzinu smičućih talasa može dokazati kroz različite laboratorijske opite. Takva ispitivanja sproveli su (Yun i Santamarina, 2005) u specijalno konstruisanom edometarskom aparatu na uzorcima peska (Nevada pesak) sledećih karakteristika: $e_{min}=0.533$, $e_{max}=0.888$, $d_{50\%}=0.14-0.17$ mm, koeficijent uniformnosti $C_u=1.67$. Kao cementno vezivo korišćen je Portland cement specifične težine $G_s=3.15$. Ukupno je ispitano osam uzoraka različite zbijenosti i količine cementa (2% i 4%). Rezultat ispitivanja za uzorak bez cementa i sa 4% sadržaja cementa prikazan je na slici 3.5.

Sa slike se zapaža sledeće: brzina V_s kod necementiranog uzorka raste približno linearno sa vertikalnim efektivnim naponom (σ_v'); cementirani uzorci imaju značajno veće brzine od necementiranog uzorka za isti nivo napona; kod cementiranih uzoraka brzina je praktično neosetljiva na porast vertikalnog efektivnog napona; uzorci veće

zbijenosti imaju veće brzine od uzoraka manje zbijenosti za isti nivo napona i cementacije. Posebno je interesantno zapaziti da kod manje zbijenih cementiranih uzoraka pri određenom nivou napona dolazi do tzv. kolapsa strukture usled gubitka cementacije, što se pripisuje kolapsu strukture uzorka tla nastalog kao posledica povećanja napona. Nakon kolapsa brzina ima tendenciju porasta sa nivoom napona.



Slika 3.5. Zavisnost V_s od veličine vertikalnog efektivnog napona za: a) necementirane i b) cementirane uzorke peska u k_0 uslovima opterećenja (Yun i Santamarina, 2005)

Brzina kod uzoraka sa manjom količinom cementa osetljivija je na promenu naponskog stanja. Fernandez i Santamarina (2001) teorijski i eksperimentalno su pokazali da

cementacija ima dominantan uticaj na brzinu smičućih talasa pri niskim nivoima napona. Izdvojili su dve oblasti:

- oblas *niskih napona* gde preovlađuje uticaj cementacije na brzinu smičućih talasa i
- oblast *visokih napona* gde preovladjuje uticaj naponskog stanja na brzinu smičućih talasa.

Oblast niskih napona posebno je značajna kod materijala kao što je kolapsibilni makroporozni les kod koga su naponi u tlu relativno niski, a cementacija značajna (Berislavljević i sar., 2014). Ova pojava se odražava u vidu izrazito visokih vrednosti brzina prostiranja smičućih talasa određenih iz SDMT opita u poređenju sa niskim vrednostima K_D i M_{DMT} (videti poglavlje 7).

Cementacija može da ima veliki praktičan značaj kod projektovanja inženjerskih konstrukcija ukoliko se pravilno interpretira. Sa jedne strane ekonomičnije rešenje je moguće postići kada se cementacija prepozna, tako na primer ekonomičnije plitko fundiranje može da bude dovoljno da se zadovolje dozvoljena sleganja ili je moguće izbeći mere stabilizacije tla radi sprečavanja pojave likvefakcije. S druge strane pogrešna interpretacija efekta cementacije može da dovede do rešenja koje nije na strani sigurnosti. Tako na primer, visoke vrednosti brzina smičućih talasa ne moraju da podrazumevaju i dobro temeljno tlo što je slučaj kod slabo zbijenog cementiranog peska ili lesa koji su skloni kolapsu.

3.3. SDMT oprema

Seizmički dilatometar je kombinacija mehaničkog dilatometra i seizmičkog modula koji omogućava merenje brzine seizmičkih talasa u tlu. SDMT je konceptualno sličan seizmičkom CPT opitu (SCPT). Prototip SDMT opita predstavio je Hepton (1988). Deset godina kasnije na „Georgia Tech“ univerzitetu iz Atlante, Martin i Mayne (1997, 1998) i Mayne i sar. (1999), razvili su preteču savremenog seizmičkog dilatometra. Seizmička sonda prikazana je na slici 3.6.



Slika 3.6. Seizmički dilatometar (vlasništvo Instituta IMS)

SDMT opitom određuju se isti parametri kao i DMT opitom sa dodatkom još jednog parametra, a to je brzina smičućih talasa. Da bi se izveo SDMT opit pored standardne DMT opreme potrebno je obezbediti: seizmički modul, izvor seizmičkih talasa i softver za obradu podataka. U daljem tekstu biće opisane prve dve komponente opreme.

3.3.1. Seizmički modul

Seizmički modul ili seizmička sonda je cilindrični element opremljen sa dva horizontalna senzora (prijemnika) postavljenih na međusobnom rastojanju od 0.5 m. Njena uloga je da primi, pojača i digitalizuje signal koji zatim šalje do seizmičke kutije i računara na površini. Sonda je pozicionirana odmah iznad sečiva tako da su u odnosu na centar membrane senzori postavljeni na rastojanju 0.25 m i 0.75 m. Dužina sonde iznosi 70 cm. Prečnik sonde se razlikuje po dužini. Najveći prečnik iznosi 42 mm na mestu senzora. Ovo proširenje omogućava da se senzori nađu u direktnom kontaktu sa tlom što je neophodan uslov za nesmetan prijem talasa indukovanih na površini terena. Treba

zapaziti da sonda predstavlja određeni vid friкционog reducira kada se za utiskivanje sečiva koriste CPT šipke prečnika 36 mm.

Pored horizontalnih senzora koji registruju smičuće talase, ista sonda može da sadrži i par vertikalnih senzora za merenje brzine prostiranja longitudinalnih talasa u tlu (V_p). Autor nije imao mogućnost merenja longitudinalni talasa tako da oni nisu predmet ove disertacije i dalje neće biti razmatrani. Pored pomenutih sonda sadrži i dvoosne senzore za merenje inklinacije.

3.3.2. Izvor seizmičkih talasa

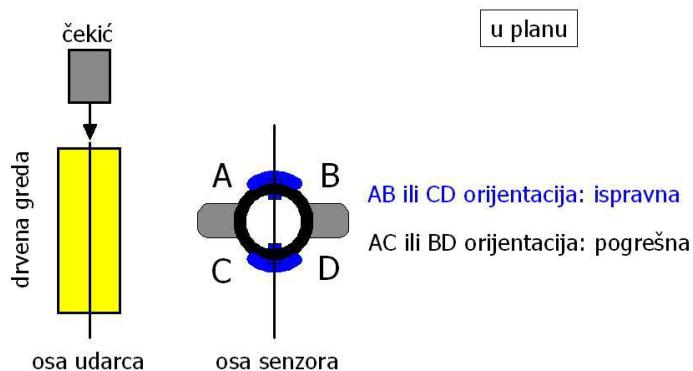
Najčešće se kao izvor seizmičkih talasa koristi drvena greda i ručni ili poluautomatski čekić (slika 3.7). Pravilna orijentacija grede u odnosu na položaj senzora je od vitalnog značaja za dobijanje upotrebljivih podataka. Duža strana grede mora da bude orijentisana paralelno osetljivoj osi senzora kao što je prikazano na slici 3.8. Greda treba da bude postavljena centrično u odnosu na osu šipke. Na ovaj način smanjuje se potencijalna pojava parazitskih uticaja poput longitudinalnih talasa koji za kraće vreme stižu do prijemnika. Dakle, suština je da se pravac oscilovanja indukovanih smičućeg talasa poklapa sa pravcem ose senzora. Pored orijentacije bitno je da greda bude opterećena u vertikalnom pravcu. Veće dubine ispitivanja zahtevaju veća opterećenja i obrnuto. Greda ne sme „vidno” da se pomera prilikom nanošenja udaraca čekićem.



Slika 3.7. Poluautomatski (levo) i ručni čekić (desno)

ASTM D7400-08 preporučuje da horizontalno rastojanje ose grede od ose šipki (x, slika 3.9) bude između 1 i 3 m.

Izbor čekića ne utiče mnogo na dobijeni rezultat izuzev kada je potrebno meriti na većim dubinama. Tada je neophodno da se poveća masa čekića. Za uobičajene dubine ispitivanja (do 30.0 m) autor je dobio zadovoljavajuće rezultate sa čekićem mase 10 kg.



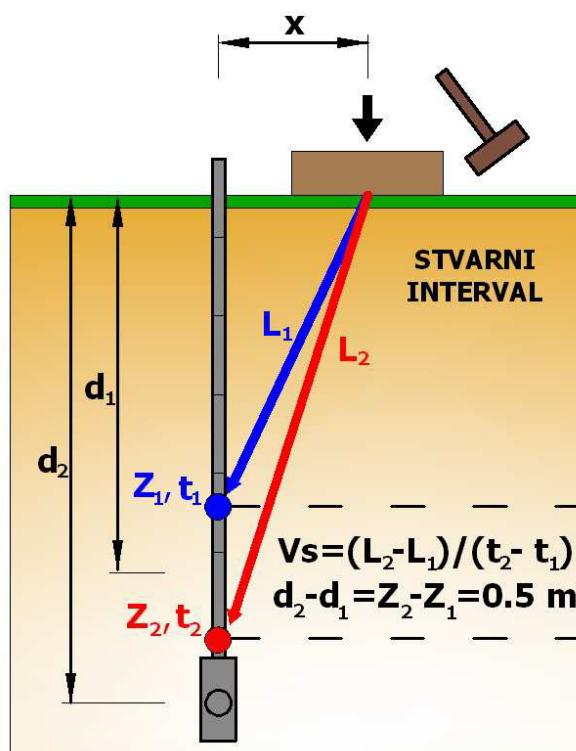
Slika 3.8. Orijentacija senzora u odnosu na izvor talasa

3.4. Postupak ispitivanja

Postupak određivanja V_s seizmičkim dilatometrom spada u grupu „downhole“ geofizičkih metoda. Ispitivanje podrazumeva da se u tlu, udarom čekića o gredu na površini, indukuje (pobudi) smičući seizmički talas koji registruje jedan ili više prijemnika koji se u tom trenutku nalaze na određenoj dubini u tlu, slika 3.9. Prijemnici registruju vreme za koje talas pređe rastojanje od izvora do prijemnika. Kod downhole metode izvor je stacionaran dok prijemnik napreduje niz bušotinu za određeni interval dubine. Radi boljeg razumevanja same metode potrebno je definisati dva bitna pojma, a to su: dubina sonde u trenutku merenja i interval merenja.

Pod dubinom na kojoj se nalazi sonda u trenutku merenja podrazumevamo vertikalno rastojanje mereno od površine terena do središnje tačke između senzora (d_1 , slika 3.9). Dubina do centra membrane (d_2 , slika 3.9) u odnosu na dubinu središnje tačke između senzora razlikuje se za 0.5 m. Merenje brzine smičućih talasa moguće je tek kada se oba senzora nađu u tlu što odgovara dubini sečiva od 1 m mereno od površine terena.

Dosadašnje iskustvo ukazuje da je prvo merenje moguće ostvariti kada se sečivo utisne na dubinu veću od 1.5-2.0 m. Razlog je to što signali dobijeni na manjim dubinama sadrže i smičuće i kompresione talase čija separacija nije moguća. Takođe, na manjim dubinama vibracije penetrometra mogu da utiču na kvalitet izmerenog signala.



Slika 3.9. Šematski prikaz merenja brzine smičućih talasa SDMT opitom

Interval merenja za koji se određuje V_s predstavlja rastojanje između senzora i iznosi 0.5 m. V_s određena merenjem sa dva senzora predstavlja brzinu određenu za stvarni interval dubine, u ovom slučaju 0.5 m.

U praktične svrhe danas se koriste i seizmički moduli koji umesto dva imaju samo jedan ugrađen prijemnik. Na taj način se određuju brzine za tzv. „pseudo-interval”. Nedostatak pseudo-intervala je to što se nakon ispitivanja na jednoj dubini pribor mora utisnuti do sledeće i ispitivanje ponoviti. Na taj način brzina je određena iz dva talasa indukovana različitim udarcima malja.

Merenje V_s započinje odmah nakon merenja A, B i C (opcionalno) čitanja, odnosno nakon koraka 9) opisanog u poglavljju 2.6. Jedini uslov je da membrana bude u zatvorenom položaju (uključena pištaljka) pri ispitivanju jer tada zatvoreno strujno kolo omogućava

prenos električnog signala od prijemnika do seizmičke kutije i računara na površini. Pre indukovanih smičućeg talasa poželjno je da se registruje tzv. „ambijentalni seizmički šum“ koji kasnije može da posluži pri analizi i interpretaciji izmerenih brzina. Uobičajena praksa je da se merenje V_s ponovi najmanje tri puta na istoj dubini. Na taj način može da se proceni ponovljivost rezultata što je jedan od načina ocene kvaliteta izmerenih signala. Napominje se da je interval ispitivanja DMT opita (A, B, C - pritisci) 0.2 m, a interval merenja brzine talasa 0.5 m. Zato se na svakoj drugoj dubini na kojoj se mere brzine smičućih talasa ne izvodi DMT opit (videti tabelu 3.2).

Tabela 3.2. Postupak izvođenja SDMT opita

Dubina (m)	Opit
...	...
2.0	prvo DMT (A, B, C) posle SDMT (V_s)
2.2	DMT
2.4	DMT
2.5	SDMT (V_s)
2.6	DMT
2.8	DMT
3.0	prvo DMT (A, B, C) posle SDMT (V_s)
3.2	DMT
...	...

3.5. Proračun brzine smičućih talasa (V_s)

Brzina smičućih talasa za određeni interval (0.5 m) predstavlja odnos između razlike rastojanja koje talas treba da pređe od izvora do oba senzora i razlike u vremenima potrebnim da talas pređe ta dva rastojanja. V_s se određuje na osnovu jednačine 3.5.

$$V_s = \frac{(L_2 - L_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (3.5)$$

Pri čemu je (videti sliku 3.9):

V_s - brzina smičućih talasa u tlu (m/s),

L_1 - rastojanje koje talas treba da pređe od izvora do gornjeg prijemnika (m),

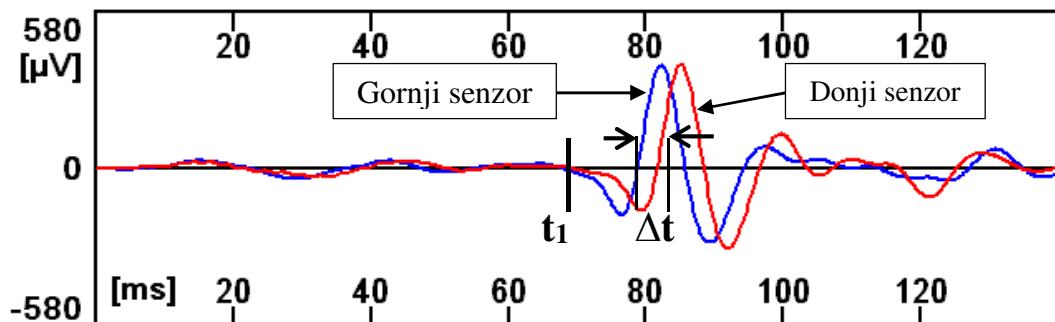
L_2 - rastojanje koje talas treba da pređe od izvora do donjeg prijemnika (m),

t_1 – vreme prvog nailaska smičućeg talasa na gornjem prijemniku i
 t_2 – vreme prvog nailaska smičućeg talasa na donjem prijemniku.

L_1 i L_2 računaju se iz dve poznate strane imaginarnog pravouglog trougla, a to su dubina senzora (Z_1 i Z_2 , slika 3.9) i horizontalno rastojanje ose grede od ose šipki (x , slika 3.9). Prilikom određivanja L_1 i L_2 uvodi se prepostavka da je putanja talasa pravolinijska. Ova prepostavka u određenim situacijama nije podržana teorijskim i eksperimentalnim rezultatima. To je slučaj kad postoje izražene razlike u elastičnim karakteristikama slojeva tla koje se ispituje. Tada je neophodno uvesti u proračun Shell-ov zakon prelamanja (Baziw, 2002). Stewart, 1992 je utvrdio da je razlika u izračunatoj V_s za prepostavku o pravolinijskoj putanji i V_s za stvarnu putanju manja od 3%.

Pouzdanost i preciznost rezultata zavisi i od veličine imenioca u jednačini 3.5 koji predstavlja razliku u vremenima prvog nailaska talasa na donjem i gornjem prijemniku. U literaturi se pominju različiti načini određivanja t_1 i t_2 iz izmerenih signala. Najzastupljenija je *cross-over* i *cross-correlation* metoda. Zato će u daljem tekstu kroz primer ukratko biti opisan princip određivanja t_1 i t_2 , odnosno njihove razlike (Δt).

Na slici 3.10 prikazan je *seizmogram* - signal izmeren na dubini od 11.0 m u aluvijonu Dunava u okolini Smedereva.



Slika 3.10. Zapis smičućeg talasa u vremenu - seizmogram

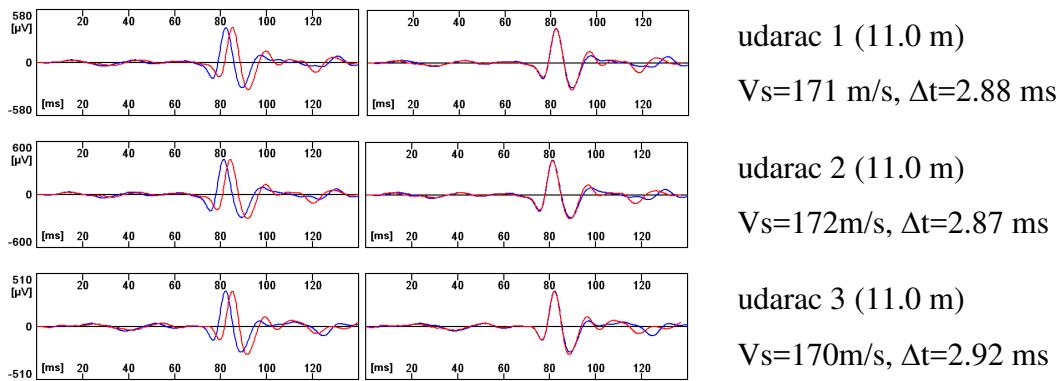
Signal prikazan na slici 3.10 predstavlja tipičan zapis smičućeg talasa u vremenu nakon filtriranja signala. Na slici se vide dva slična signala (po magnitudi, frekvenciji i obliku), jedan je registrovao gornji, a drugi je registrovao donji senzor. Prikazani smičući talasi imaju karakterističnu formu, a trenutak njihovog dolaska do prijemnika manifestuje se u vidu:

- naglog porasta amplitude i
- promene frekvencije koja odgovara trenutku naglog porasta amplitude (obeleženo sa t_1 na slici 3.10).

Određivanje vremena t_1 zavisi od subjektivnosti interpretatora. Zato je neophodno definisati način na koji bi se ova subjektivnost eliminisala. Jedan od postupaka predstavlja uvođenje korelacionog koeficijenta primenom *cross-correlation* metode.

Cross-correlation metoda omogućava pronađenje vremena Δt (slika 3.10) kojоj odgovara najveća vrednost korelacionog koeficijenta. To vreme se koristi u jednačini 3.5 za određivanje V_s . Princip određivanja Δt je sledeći. Donji signal se relativno pomera u odnosu na gornji duž vremenske ose za određeni isti korak vremena. Za svako pomeranje računa se zbir proizvoda amplituda oba signala za svaki korak vremena. Taj zbir proizvoda amplituda predstavlja korelacioni koeficijent za to pomeranje. Kada se određe vrednosti korelacionih koeficijenata za sva pomeranja, duž vremenske ose, traži se njegova najveća vrednost. Vreme kome odgovara najveća vrednost korelacionog koeficijenta usvaja se kao Δt i koristi se za proračun V_s u jednačini 3.5.

Signali dobijeni iz tri različita udarca na istoj dubini pre i posle primene *cross-correlation* metode prikazani su na slici 3.11. Na istoj slici prikazane su i izračunate vrednosti V_s i Δt .

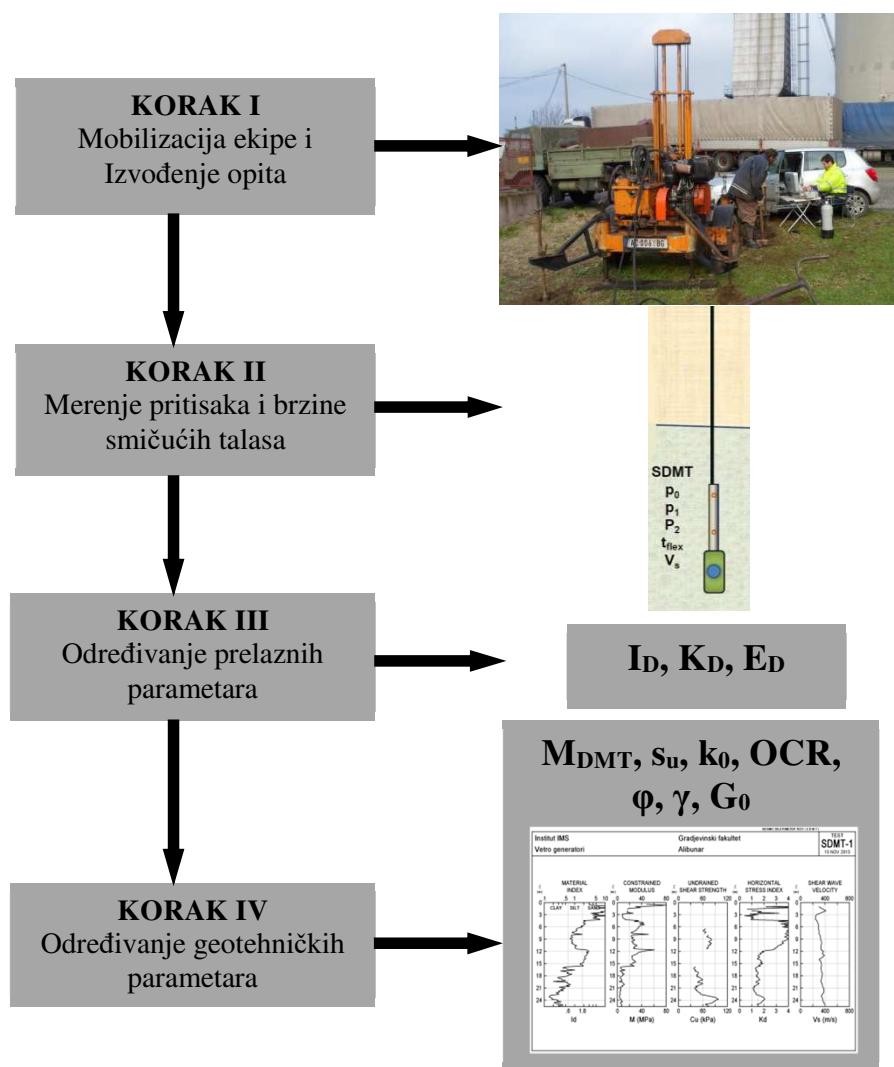


Slika 3.11. Izmereni signali za tri uzastopna udarca na istoj dubini

Intervalna brzina se računa kao aritmetička sredina svih brzina određenih na istoj dubini. Tako na primer brzina koja odgovara dubini od 11 m (interval od 10.75-11.25) sa slike 3.11 iznosi $V_s=171 \text{ m/s}$.

4. ODREĐIVANJE PARAMETARA

Svrha DMT opita je da se odrede parametri koji se mogu direktno koristiti u geotehničkom projektovanju. Zato je uobičajeno da se rezultati opita interpretiraju u smislu parametara deformabilnosti i čvrstoće karakterističnih za mehaniku tla. Međutim, to nije jednostavan zadatak i sprovodi se u nekoliko koraka. Šematski je to prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1.Šematski prikaz određivanja geotehničkih parametara tla iz (S)DMT opita

Ispitivanjem tla SDMT opitom dobija se više nezavisnih parametara (p_0 , p_1 , p_2 , t_{flex} , q_d i V_s). Zato se često u literaturi SDMT opit zajedno sa SCPTu opitom naziva i višeparametarski opit. Odavde se vidi prednost višeparametarskog SDMT opita u

odnosu na jednoparametarski mehanički CPT opit kod koga je jedini podatak, koji se sa određenim stepenom pouzdanosti može interpretirati u smislu parametara mehanike tla otpor konusa q_c .

U sledećem poglavlju prikazan je način određivanja p_0 , p_1 i p_2 pritisaka koji su osnova za interpretaciju mehaničkog DMT opita.

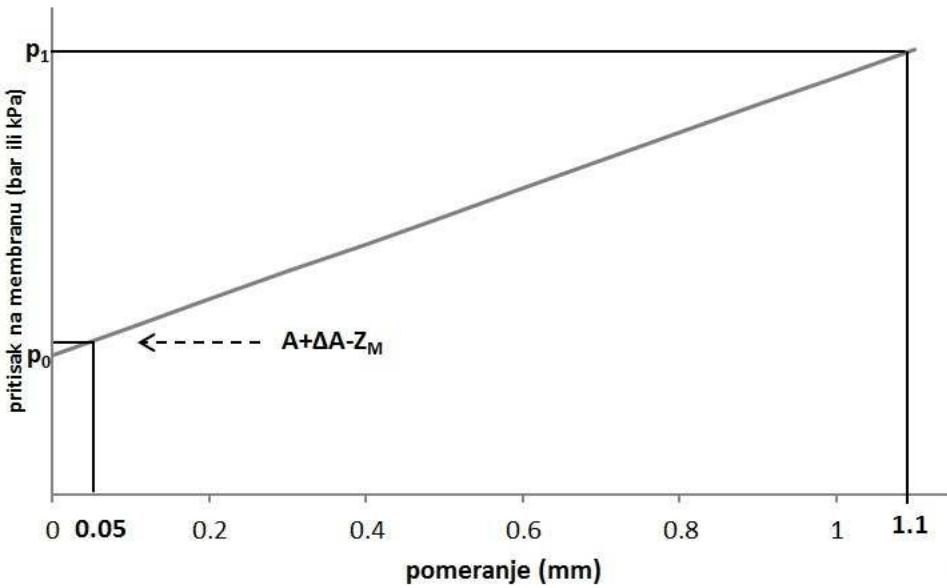
4.1. Određivanje pritisaka p_0 , p_1 i p_2

Pritisak B koji se meri tokom DMT opita je pritisak gasa sa unutrašnje strane membrane potreban da se centar membrane pomeri 1.1 mm u tlo. Pritisak B je potrebno korigovati za krutost membrane (ΔB , poglavljje 2.4.3.) i za veličinu zaostalog pritiska u sistemu nakon ispuštanja gasa u atmosferu (Z_M) da bi se dobio pritisak p_1 . To je prikazano jednačinom 4.1 i grafički na slici 4.2. Parametar Z_M ima istorijski značaj, a korišćen je kod opita kod kojih kalibracija i merenje pritisaka A i B (C) nisu vršeni na istom manometru. Kod savremene DMT opreme Z_M je izgubio praktični značaj i usvaja se da je jednak 0.

$$p_1 = B - Z_M - \Delta B, \text{ za } Z_M = 0, \quad p_1 = B - \Delta B \quad (4.1)$$

Pritisak A je pritisak gasa sa unutrašnje strane membrane potreban da se centar membrane pomeri 0.05 mm u tlo. Pritisak p_0 je pritisak koje tlo vrši na membranu neposredno pre nego što ona počne da se pomera (pomeranje=0.0 mm). Da bi se odredio pritisak p_0 potrebno je korigovati čitanje A za krutost membrane (ΔA) i za pritisak potreban da se membrana pomeri 0.05 mm u tlo. To podrazumeva da se izvrši ekstrapolacija do nultog pomeranja pri čemu se prepostavlja linearna zavisnost između pritiska i pomeranja membrane. Postupak određivanja p_0 dat je jednačinom 4.2 (za $Z_M=0$) i grafički na slici 4.2.

$$p_0 = 1.05(A + \Delta A) - 0.05(B - \Delta B) \quad (4.2)$$



Slika 4.2. Linearna ekstrapolacija do nultog pomeranja kod određivanja p_0
 (Marchetti i Crapps, 1981)

Pritisak p_0 čini osnovu za određivanje većine parametara koji se dobijaju DMT opitom. Campanella i Robertson (1991) su na osnovu rezultata dobijenih UBC istraživačkim dilatometrom ustanovili da je kod tvrdih, prekonsolidovanih glina zavisnost pomeranja membrane od pritiska nelinearna što ukazuje na izvesna odstupanja od prepostavke o linearnoj ekstrapolaciji do nultog pomeranja. U mekom tlu prepostavka o linearnoj ekstrapolaciji je dovoljno precizna (Schmertmann, 1988). Takođe, Schmertmann (1988) navodi da u određenoj vrsti tla (kolapsibilni pesak i prašine) usled prepostavke o linearnoj ekstrapolaciji pritisak p_0 može da bude negativan, a što bi bio slučaj kada je pritisak $B >> \text{pritsaka } A$. Radi pojednostavljenja, ako se zanemari krutost membrane ($\Delta A = \Delta B = 0$) i pozivanjem na jednačinu 4.2, da bi pritisak p_0 bio negativan, pritisak B treba da bude 21 put veći od pritiska A , odnosno da bi $p_0 < 0$, potrebno je da $B > 21A$. Prilikom izvođenja opita u kolapsibilnom lesu ali i u ostalim vrstama tla rezultati nisu ukazivali na ovaku pojavu.

Treba napomenuti da rezultati dobijeni ispitivanjem imaju smisla kada je ispunjen uslov dat jednačinom 4.3.

$$(B - A) > (\Delta A + \Delta B) \quad (4.3)$$

Takođe, treba napomenuti da je p_0 mera totalnog horizontalnog naponu u tlu tako da uvek treba da bude veći od veličine hidrostatičkih pornih pritisaka (u_0) pre ispitivanja. Ukoliko to nije slučaj moguće je da merenje nije korektno sprovedeno ili je pogrešna prepostavka o linearnoj ekstrapolaciji usled izraženog nelinearnog ponašanja tla prilikom ekspanzije membrane.

Nakon merenja pritisaka A i B moguće je izmeriti i treći tzv. pritisak C koji se meri u fazi kontrolisanog ispuštanja gasa iz sistema, odnosno u fazi izduvavanja membrane. Pritisak C predstavlja pritisak unutar membrane u trenutku njenog vraćanja u položaj od 0.05 mm. Da bi se odredio pritisak p_2 potrebno je pritisak C korigovati za krutost membrane ΔA kao što je dato jednačinom 4.4.

$$p_2 = C + \Delta A \quad (4.4)$$

Pritisak p_2 se prevashodno koristi za određivanje veličine hidrostatičkih pornih pritisaka u peskovima, odnosno dubine do nivoa podzemne vode.

4.2. Porni pritisci tokom izvođenja opita

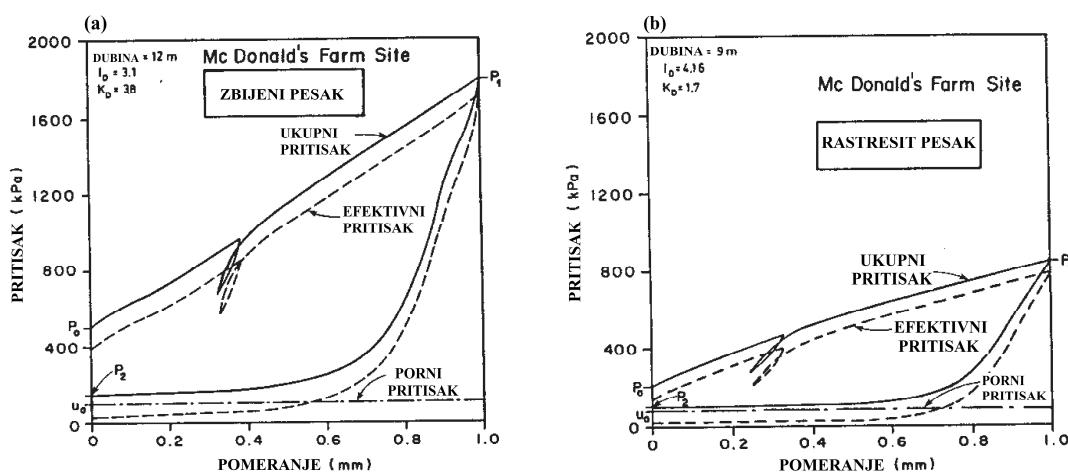
Rezultati dobijeni UBC dilatometrom (poglavlje 2.2.2.) omogućili su da se jasnije definišu uslovi dreniranja tokom izvođenja opita. Merenjem pornih pritisaka zasebnim piezofilterima postavljenim u centru membrane došlo se do saznanja o međusobnom odnosu stvarnih izmerenih pornih pritisaka i pritisaka p_0 i p_2 u različitim vrstama materijala.

4.2.1. Pesak

Rezultati u pesku ukazuju da je pritisak p_2 jednak hidrostatičkom pornom pritisku (u_0) koji je postojao pre utiskivanja sečiva u tlo. Ovo se objašnjava velikom vodopropusnošću peska kod koga se nakon približno jednog minuta, koliko je potrebno da se očita pritisak C, obavi disipacija pornih nadpritisaka nastalih utiskivanjem sečiva i

ponovo uspostavi hidrostatičko stanje pornih pritisaka. U jednačinama za određivanje prelaznih parametara figuriše veličina hidrostatičkog pornog pritiska (u_0), tako da merenje C (p_2) u peskovima ima veliki praktičan značaj. Pozivanjem na jednačinu 4.4 može se videti da je potrebno da u_0 bude veće od ΔA da bi pritisak C bio pozitivan. Dakle, potrebno je minimum 1.5 m vodenog stuba (za uobičajenu vrednost ΔA od 15 kPa) da bi se očitao pritisak C.

Rezultat DMT opita u pesku dobijen UBC istraživačkim dilatometrom prikazan je na slici 4.3. Sa slike 4.3 vidi se da je prilikom ekspanzije membrane od p_0 do p_1 zanemarujući uticaj pornih nadpritisaka, odnosno meri se stvarni odgovor tla na ekspanziju membrane u uslovima efektivnih pritisaka. Razlika u rezultatu kod zbijenog (slika 4.3 a) i rasteresitog peska (slika 4.3 b) je očigledna pre svega u veličini ostvarenih pritisaka i nagiba linije zavisnosti pritisak-pomeranje.



Slika 4.3. Rezultat opita u pesku: a) zbijeni pesak, b) rastresit pesak

(Campanella i Robertson, 1991)

4.2.2. Glina

Rezultati u glini su po svojoj prirodi drugačiji od rezultata u pesku. U mekoj glini opit je u svim fazama nedreniran. Na prvo (p_0) i drugo (p_1) čitanje najveći uticaj imaju porni pritisci koji se javljaju usled penetracije sečiva i izvođenja opita. Ovo je prikazano na slici 4.4 a) sa koje se zapaža sledeće:

- a) efektivni naponi koji deluju na membranu su mali i približno konstantni u fazi ekspanzije i izduvavanja membrane,
- b) p_0 i p_1 su mera totalnih naponi na koje najviše utiču visoki porni pritisci,
- c) pritisak p_2 je približno jednak ukupnom pornom pritisku nakon utiskivanja sečiva (u_0+u_e) i
- d) razlika prvog i trećeg čitanja (p_0-p_2) približno predstavlja veličinu efektivnog naponi na membrani.

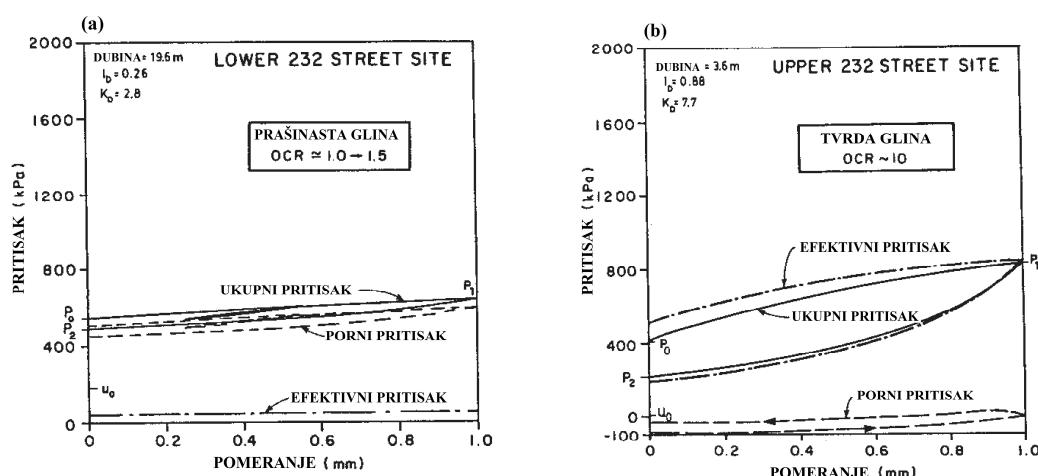
Pomenuto je da su u mekim glinama efektivni naponi tokom izvođenja DMT opita mali i praktično nepromjenjeni tokom ekspanzije membrane, a da je prirast totalnih naponi (p_1-p_0) jednak prirastu pornih pritisaka (u). Takvo ponašanje odgovara ekspanziji (širenju) šupljine u elastično savršeno plastičnom materijalu kada je materijal u stanju loma. Ovo ukazuje da je glina u okolini membrane u stanju loma prouzrokovanoj utiskivanjem sečiva i da svako naredno širenje membrane izaziva povećanje pornih pritisaka jednakom povećanju pritiska sa unutrašnje strane membrane u sečivu (p_1-p_0). Schnaid i Odebrecht (2015) ispitivanjem peska i gline pomoću specijalno konstruisanog sečiva koji umesto membrane ima ugrađen piezofilter potvrdili su da je u pesku opit dreniran, a u mekoj glini nedreniran. Takođe, navode da indeks materijala (I_D) može da ukaže na uslove dreniranja tokom izvođenja opita, odnosno kada je $I_D < 0.6$ opit je nedreniran dok je za $I_D > 1.8$ opit dreniran (videti poglavlje 4.3.1).

Rezultati dobijeni ispitivanjem UBC istraživačkim dilatometrom u tvrdoj prekonsolidovanoj glini prikazani su na slici 4.4 b). Sa slike se zapaža sledeće:

- a) Porni pritisci koji deluju na membranu tokom i neposredno nakon utiskivanja su mali i uglavnom negativni,
- b) efektivni naponi koji deluju na membranu su visoki i menjaju se na sličan način kao i totalni naponi,
- c) p_2 ne može da se dovede u vezu niti sa pornim pritiskom nastalim usled utiskivanja sečiva niti sa hidrostatičkim pornim pritiskom i
- d) zavisnost pomeranja od primjenjenog pritiska u intervalu od p_0 do p_1 je nelinearna.

Lutenegger (1988) navodi da na p_0 u tvrdim prekonsolidovanim glinama pored pornog pritiska utiče i komponenta „stvarnog otpora” koje tlo pruža prilikom ekspanzije membrane.

Nelinearnost krive pritisak-pomeranje (tačka d) može da utiče na preciznost određivanja p_0 pritiska linearnom ekstrapolacijom kao što je prikazano na slici 4.2. Uticaj nelinearnosti na interpretaciju rezultata je za sada nepoznat.



Slika 4.4. Rezultat opita: a) meka glina, b) tvrda glina (Campanella i Robertson, 1991)

4.3. Određivanje prelaznih parametara

DMT opitom određuju se tri prelazna parametra I_D , K_D , i E_D koji su svojstveni isključivo za ovaj opit. U daljem tekstu biće objašnjeno značenje i prikazan postupak određivanja svakog od tri pomenuta parametra. Pored ta tri, moguće je odrediti i četvrti parametar U_D – indeks pornog pritiska.

4.3.1. Indeks materijala (I_D)

Indeks materijala je numerički pokazatelj na osnovu koga se definiše vrsta tla u kome se vrši ispitivanje. Računski se određuje iz izmerenih pritisaka p_0 i p_1 uz prepostavku ili poznavanje veličine hidrostatičkog pornog pritiska (u_0), prema jednačini 4.5.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (4.5)$$

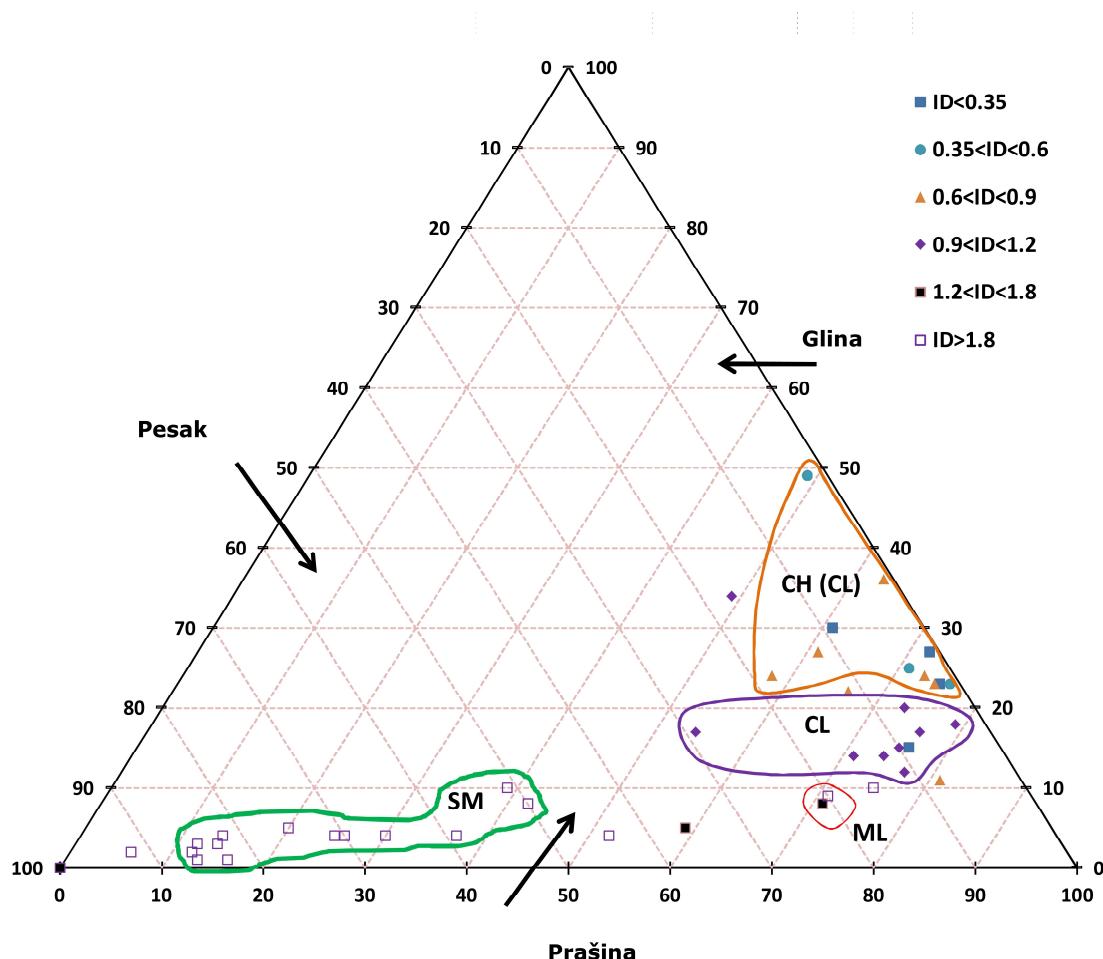
U tabeli 4.1 prikazane su vrednosti I_D koje odgovaraju određenim vrstama tla prema Marchetti (1980).

Tabela 4.1. Vrsta tla prema I_D (Marchetti, 1980)

Humus i osetljive gline	Gline		Prašine			Pesak	
	gline	prašinaste	glinovite	prašine	peskovite	prašinast	pesak
I_D	0.1	0.35	0.6	0.9	1.2	1.8	3.3

Na osnovu I_D izdvojene su tri osnovne grupe tla, glina, prašina i pesak i sedam podgrupa kao što je prikazano u tabeli 4.1. I_D ne treba direktno povezivati sa granulometrijskim sastavom tla već ga treba tumačiti kao pokazatelj „mehaničkog ponašanja“ tla (Marchetti i sar., 2001). Tako na primer, prilikom ispitivanja veoma tvrdih glina I_D može da identificuje tlo kao prašina (npr. $0.9 < I_D < 1.8$). Pesak sa značajnim učešćem glinovite frakcije često se klasificuje kao prašina. Marchetti (1980) navodi da je I_D osetljiv na promenu sadržaja frakcije gline u tlu, a da indeks plastičnosti I_P nema značajnijeg uticaja na I_D . Na slici 4.5 prikazan je uticaj prašinaste, glinovite i peskovite frakcije na I_D . Rezultati prikazani na slici 4.5 odnose se na različite lokacije, na teritoriji Srbije, gde su paralelno izvedeni DMT opiti i laboratorijska identifikaciono-klasifikaciona ispitivanja.

Sa slike se zapaža da ukoliko tlo sadrži manje od 10 % frakcije gline I_D je veći od 1.2, odnosno tlo, prema tabeli 4.1, spada u grupu peskovite prašine ($1.2 < I_D < 1.8$), prašinast pesak ($1.8 < I_D < 3.3$) ili pesak ($I_D > 3.3$). Tlo sa sadržajem frakcije gline između 10 i 20% prema I_D spada u grupu prašina ($0.9 < I_D < 1.2$). Tlo sa sadržajem frakcije gline više od 20%, prema I_D , spada u grupu glinovite prašine ($0.6 < I_D < 0.9$), prašinaste gline ($0.35 < I_D < 0.6$) i gline ($I_D < 0.35$). Prema slici 4.5 u tabeli 4.2 prikazan je očekivani sadržaj frakcije gline tla na osnovu izmerene veličine I_D . Takođe, u tabeli 4.2 dati su odgovarajući rezultati za švedsko tlo prema Larsson (1989). Izvesna grupacija prema plastičnosti tla uočljiva je sa slike 4.5. To je i očekivano s obzirom da sa povećanjem frakcije gline povećava se i plastičnost.



Slika 4.5. Uticaj frakcije gline, prašine i peska na I_D

Tabela 4.2. Očekivani sadržaj frakcije gline u tlu prema izmerenoj veličini I_D

I	II	III
Indeks materijala (I_D)	Očekivana količina frakcije gline (%) – srpsko tlo	Frakcije gline (%), Larsson (1989) – švedsko tlo
0.1-0.35		>40
0.35-0.6	>20	20-40
0.6-0.9		10-20
0.9-1.2	10-20	<10
>1.2	<10	-

Larson (1989), na osnovu ispitivanja sprovedenih u Švedskoj, navodi da je u normalno konsolidovanom tlu I_D dovoljno precizan parametar za određivanje vrste tla, dok je u prekonsolidovanom tlu I_D veći od očekivanog za vrstu tla koja je određena iz

laboratorijskih klasifikacionih opita. Zato Larsson (1989) za prekonsolidovana tla uvodi korekciju na izmerenu veličinu I_D u zavisnosti od dubine ispitivanja (d) i veličine indeksa horizontalnog napona (K_D) prema jednačinama 4.6 i 4.7.

$$I_{Dkor} = I_D - 0.075(K_D - 2.5) \quad \text{za } K_D > 2.5 \text{ i } d < 2.5 \text{ m} \quad (4.6)$$

$$I_{Dkor} = I_D - 0.035(K_D - 2.5) \quad \text{za } K_D > 2.5 \text{ i } d > 2.5 \text{ m} \quad (4.7)$$

Prikazane korekcije, jednačina 4.6, kada se primene na srpsko tlo daju visoke vrednosti I_D u odnosu na očekivane (prema laboratorijskim rezultatima). Naime, na manjim dubinama (< 2.5 m) efekti kapilarnog penjanja, odnosno negativni porni pritisci, kao i ispitivanje u nezasićenim sredinama utiču na izmerene pritiske p_0 i p_1 , a time i na izračunatu veličinu I_D . Uticaj pomenutih efekata na izmerene pritiske nije u potpunosti jasan. Ispitivanjem je utvrđeno da je potrebno korigovati I_D , prema jednačini 4.8, kako bi se dobila očekivana količina frakcije gline (prema tabeli 4.2) na dubini manjoj od 2.5 m.

$$I_{Dkor} = \frac{I_{D(Marchetti)}}{2} \quad \text{za } K_D > 3.5, 1.2 < I_D < 3.3 \text{ i } d < 2.5 \text{ m} \quad (4.8)$$

Jednačina 4.8 važi za $K_D > 3.5$ iz razloga što je to minimalna vrednost K_D koja je dobijena merenjem na pomenutim dubinama, na analiziranim lokacijama u Srbiji, a da pri tome postoje rezultati laboratorijskih ispitivanja dobijeni na uzorcima uzetim iz istražnih bušotina u neposrednoj blizini izvedenih opita. I_{Dkor} određen iz jednačine 4.8 treba približno da odgovara frakciji gline prikazanoj u tabeli 4.2, kolona II. Za vrednosti I_D manje od 1.2 pretpostavlja se da korekcioni faktor, u jednačini 4.8, značajno opada, međutim za ovu tvrdnju nema dovoljno podataka da se to i dokaže, tako da je jednačina 4.8 primenjiva za raspon vrednosti I_D od 1.2 do 3.3. U pesku je efekat precenjivanja I_D znatno manji.

Poređenje jednačine 4.6, izvedene za Švedske, Norveške i Engleske gline, sa jednačinom 4.8, izvedene za srpsko tlo, ukazuje na značaj lokalnog iskustva, lokalnih laboratorijskih procedura i različitosti u genezi tla na uspostavljanje korelacija.

4.3.2. Dilatometarski modul (E_D)

Ukoliko se ekspanzija membrane u okolno tlo analizira kao fleksibilni temelj, kružnog poprečnog preseka, opterećen jednako podeljenim opterećenjem na površini elastičnog poluprostora čije su elastične konstante modul elastičnosti E i Poasonov koeficijent ν , onda se pomeranje centra membrane može izračunati iz jednačine 4.9 (Gravensen, 1960). Jednačina 4.9 izvedena je pod pretpostavkom da su pomeranja elemenata tla izvan opterećene površine upravno na ravan sečiva jednaka nuli, slika 4.6. Pretpostavka o jednakom podeljenom opterećenju opravdana je s obzirom da je krutost membrane znatno manja od okolnog tla u koje se membrana utiskuje.

$$S = \frac{2D\Delta p}{\pi} \frac{(1-\nu^2)}{E} \quad (4.9)$$

Pri čemu je:

S – maksimalno pomeranje centra membrane = 1.1 mm,

D – prečnik membrane = 60 mm,

Δp – razlika pritisaka = $p_1 - p_0$ (kPa) i

π – Ludolfov broj

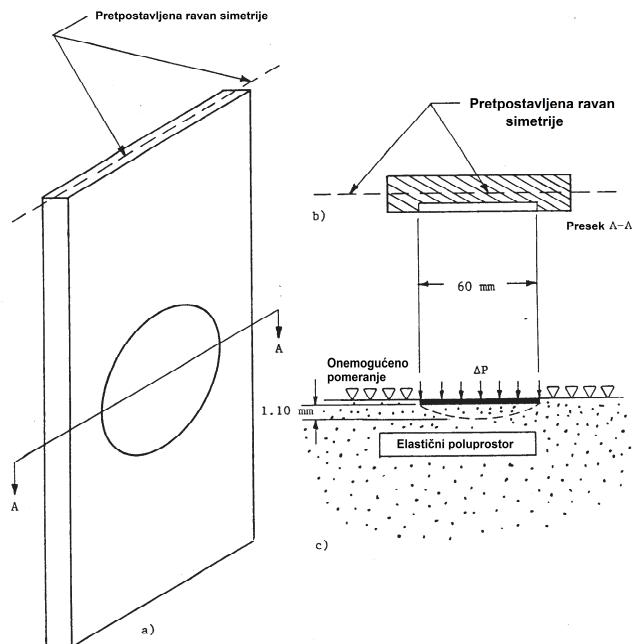
Kada se prikazane numeričke vrednosti zamene u jednačinu 4.10 dobija se izraz za dilatometarski modul:

$$\frac{E}{1-\nu^2} = E_D = 34.7\Delta p \quad (4.10)$$

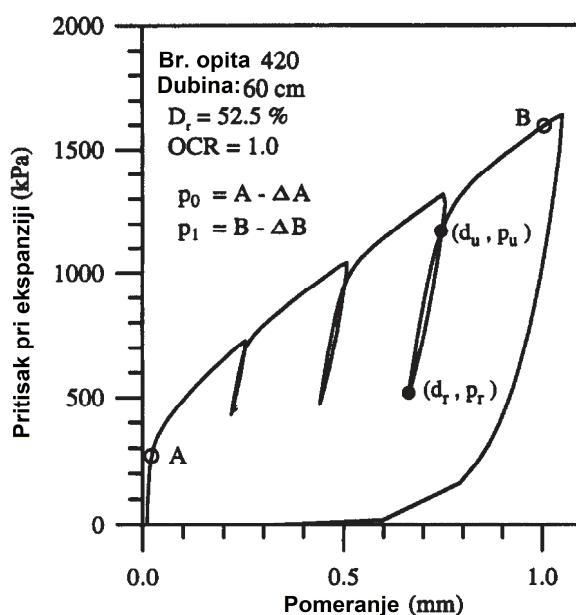
Iz jednačine 4.10 vidi se da E_D predstavlja proizvod razlike izmerenih pritisaka i konstante $C=34.7$.

Istraživanja koja su sproveli Campanella i Robertson (1991) i Bellotti i sar. (1997) istraživačkim dilatometrom ukazuju da E_D predstavlja modul određen iz elasto-plastičnog odgovora tla na ekspanziju membrane. Ovo je suprotno od dugogodišnjeg verovanja da je E_D modul ponovnog opterećenja prethodno prednapregnutog tla usled penetracije sečiva (videti npr. Hayes, 1990, Campanella, 1983). Bellotti i sar. (1997)

navode da je sekantni modul određen iz krive rasterećenje-ponovno opterećenje (E_{ur}) i do šest puta veći od E_D i da on predstavlja stvarni elastični parametar tla (slika 4.7).



Slika 4.6. Primena teorije elastičnosti kod analize ekspanzije membrane



Slika 4.7. Rezultat ispitivanja Toyoura peska u kalibracionoj komori istraživačkim dilatometrom (Bellotti i sar., 1997)

Marchetti (2001) i Moon Lo i sar. (2011) navode da E_D nije osetljiv na istoriju opterećenja, odnosno stepen prekonsolidacije i da zato ne treba da se koristi samostalno kao parametar deformabilnosti već u kombinaciji sa indeksom horizontalnog napona K_D .

4.3.3. Indeks horizontalnog napona (K_D)

Indeks horizontalnog napona predstavlja odnos efektivnog prvog čitanja (p_0-u_0) i vertikalnog efektivnog napona σ_v' . Određuje se iz jednačine 4.11.

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma_v'} \quad (4.11)$$

K_D predstavlja ključni rezultat DMT opita i osnovu za određivanje većine geotehničkih parametara. Prema Marchetti i sar. (2001) i Schnaid (2009) K_D treba posmatrati kao koeficijent horizontalnog pritiska tla u miru (K_0) pojačan za efekte izazvane utiskivanjem sečiva. Kao što je prethodno napomenuto zbog efekta utiskivanja tlo u neposrednoj blizini sečiva je u poremećenom stanju tako da je p_0 obično veći od horizontalnog geostatičkog napona pre utiskivanja (Schmertmann, 1988). Dakle, ni u kom slučaju p_0 ili K_D ne daju precizno veličinu horizontalnog napona u tlu.

Eksperimentalno su utvrđena dva bitna rezultata vezana za K_D u glinama, a to je da:

- u normalno konsolidovanim glinama bez znatne mikrostrukture $K_D \approx 2$ (1.8-2.3)
- vertikalni profil K_D sličan je profilu OCR (stepen prekonsolidacije).

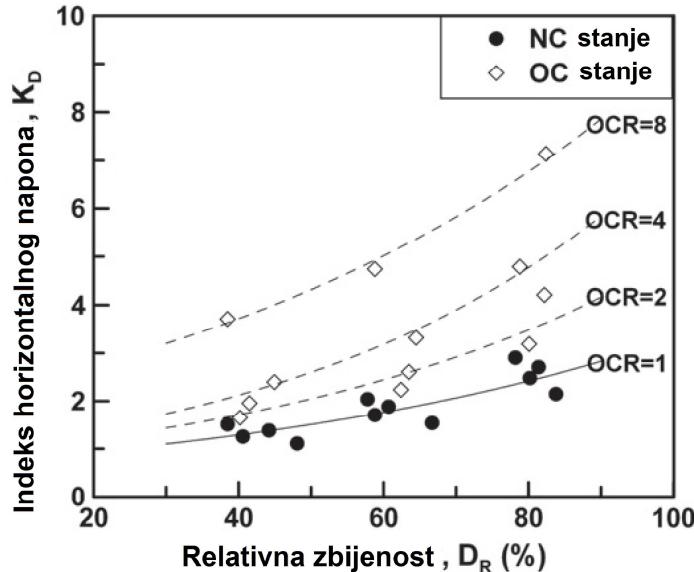
Numerička vrednost i distribucija K_D profila po dubini (u kombinaciji sa I_D) čine osnovu za interpretaciju istorije stvaranja tla koje se ispituje. Eksperimentalno je dokazano da je K_D osetljiv na: prekonsolidaciju, cementaciju, zbijenost, starenje, ali i druge fizičke procese koji doprinose povećanju/smanjenju mehaničkih svojstava tla. Jedan od brojnih primera iz literature gde se jasno vidi uticaj OCR i relativne zbijenosti (D_R) na K_D prikazan je na slici 4.8. Rezultati su dobijeni ispitivanjem Busan peska u kalibracionoj komori prečnika 1.2 m, dubine 1 m. Inženjerska svojstva Busan peska

data su u tabeli u okviru slike 4.8. Sa slike se zapaža da K_D raste sa porastom relativne zbijenosti i stepenom prekonsolidacije (prekompresijom) peska, kao i da je brzina porasta K_D sa porastom D_R veća za više vrednosti OCR. Napominje se da je u normalno konsolidovanim (OCR=1), necemnetiranim peskovima K_D funkcija zbijenosti peska. Međutim, ukoliko se efekat prekompresije zanemari, u prekonsolidovanim peskovima D_R može znatno da se preceni, čime se dobija rezultat na strani nesigurnosti. U pozadini toga je to što se prekompresijom neznatno povećava D_R , dok se s druge strane znatno povećava horizontalni napon što se reflektuje na povećanje p_0 pritiska, odnosno K_D .

TABELE I

Inženjerska svojstva Busan peska

G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS
2.62	0.162	0.315	2.35	0.71	1.063	0.658	SP



Slika 4.8. Uticaj OCR i D_R na K_D (preuzeto iz Lee i sar., 2011)

4.3.4. Indeks pornog pritiska (U_D)

Lutenegger i Kabir (1988) uvode dodatni parametar koji se određuje na osnovu izmerenih pritisaka u DMT opitu, tzv. indeks pornog pritiska (U_D) koji predstavlja odnos između razlike p_2 i u_0 i razlike p_0 i u_0 , a dat je jednačinom 4.12.

$$U_D = \frac{p_2 - u_0}{p_0 - u_0} \quad (4.12)$$

Suština ovog parametra je da definiše uslove dreniranja u fazi izvođenja opita, odnosno da ukaže na vodopropusna ($U_D=0$), vodonepropusna ($U_D=0.7$) i tla „srednje“ vodopropusnosti ($0 < U_D < 0.7$). U_D ne treba direktno da se dovodi u vezu sa koeficijentom vodopropusnosti tla.

Schmertmann (1988) daje drugačiju definiciju indeksa pornog pritiska (poglavlje 5.2.3. i slika 5.6) i upotrebljava ga kao dodatni parametar pri klasifikovanju tla.

5. INTERPRETACIJA REZULTATA

Interpretacija terenskih opita postaje sve složenija jer se pored empirijskih sve više primenjuju i teorijski pristupi interpretaciji kojima se teži da se rezultati merenja i/ili izvođenja opita predstave u vidu analitičkih (tačnih) ili numeričkih rešenja. Primena analitičkog ili numeričkog modela uslovljena je potrebom za usvajanjem odgovarajućeg konstitutivnog modela tla i graničnih uslova. Tako na primer, nelinearni konstitutivni modeli tla zahtevaju primenu numeričkih rešenja kako bi se dobio približan fizički mehanizam terenskog opita. Od teorijskih rešenja za analizu CPT i DMT opita koriste se najčešće metode zasnovane na teoriji ekspandirajuće šupljine (cilindrične) i metode konačnih elemenata i metode konačnih razlika, kao i njihove kombinacije (videti npr. Yu, 2001; Butlanska, 2014). U izvesnim situacijama potrebno je proveriti numerička rešenja tačnim analitičkim, ali i sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja pod kontrolisanim uslovima (npr. rezultatima kalibracione komore).

Posebno primamljiva metoda interpretacije za inženjere u praksi predstavlja empirijska metoda koja podrazumeva primenu određenih rešenja dobijenih na osnovu prethodnog iskustva u sličnim situacijama. Empirijski pristup interpretaciji rezultata terenskih opita podrazumeva poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima direktnog osmatranja ponašanja inženjerskih objekata ili korelaciju sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja uzorka tla.

Interpretacija rezultata DMT opita u osnovi se zasniva na korelacijama uspostavljenim između DMT pritisaka (p_0 i p_1) i pouzdano verifikovanih parametara (Schnaid, 2009). Te korelacije snažno su podržane iskustvom koje ukazuje da DMT parametri mogu da se dovedu u vezu sa: vrstom tla, zapreminske težinom u prirodnom stanju vlažnosti (γ), koeficijentom horizontalnog pritiska tla u miru (K_0), stepenom prekonsolidacije (OCR), modulom stišljivosti (M), nedreniranom čvrstoćom (s_u) i uglom smičuće čvrstoće tla (ϕ'). S obzirom na empirijsku prirodu metoda interpretacije rezultata DMT opita, korelacije su odgovarajuće (precizne) samo za lokalne uslove za koje su izvedene pa se može očekivati izvesno odstupanje prognoziranih od ostvarenih (izmerenih) rezultata prilikom njihove šire primene.

Jedan od zadataka disertacije je da se ispita primenljivost pomenutih korelacija za tlo na teritoriji republike Srbije i uspostave nove korelacije.

5.1. Porni pritisci i nivo podzemne vode

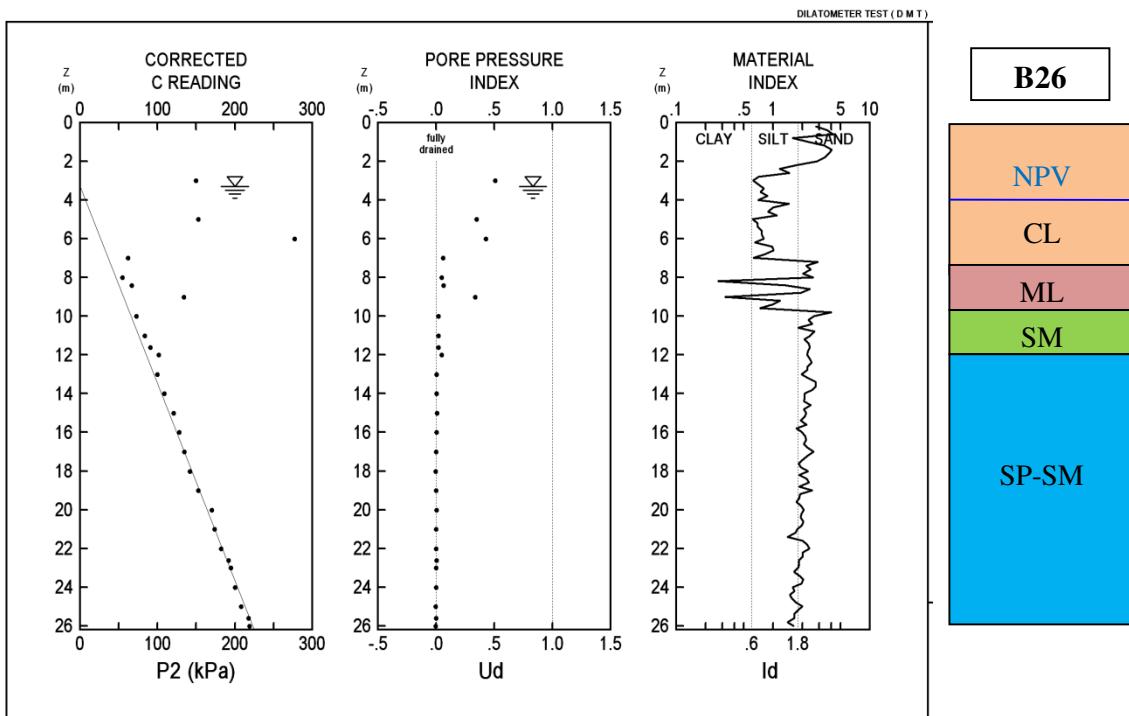
Pomenuto je (poglavlje 4.2.1) da u tlu visoke vodopropusnosti pritisak p_2 odgovara veličini u_0 . Prikaz rezultata merenja pritiska p_2 u peskovitom tlu u okolini Bačkog Dobrog Polja dat je na slici 5.1. Na slici 5.1 prikazan je i presek istražne bušotine, izvedene u neposrednoj blizini izvedenog opita, u kojoj je direktno osmatran nivo podzemne vode. Sa slike treba zapaziti da se hidrostaticka linija „poklapa“ sa pritiskom p_2 jedino u peskovitom tlu, dok u glinovitim i prašinastim materijalima p_2 je veći u odnosu na veličinu u_0 . Odavde se vidi mogućnost razlikovanja slojeva različite vodopropusnosti na osnovu izmerenih pritisaka p_2 . Na slici 5.2 prikazan je uticaj I_D na odnos p_2 i poznatog hidrostatickog pritiska u_0 . Sa slike se vidi da je odnos p_2/u_0 približno jednak jedinici za $I_D > 1.8$. Schmertmann (1988) navodi da je odnos p_2/u_0 približno jednak jedinici za $I_D > 2$.

Prepostavlja se da je tlo kod koga je $I_D > 1.8$ dovoljno vodopropusno da se šupljina, nastala nakon vraćanja membrane u početni položaj, ispuni vodom, a da su pritom hidraulički gradijenti dovoljno mali da ne dođe do rušenja nastale šupline. Šupljina nastaje kao posledica zakriviljenosti membrane i lučnog efekta u pesku.

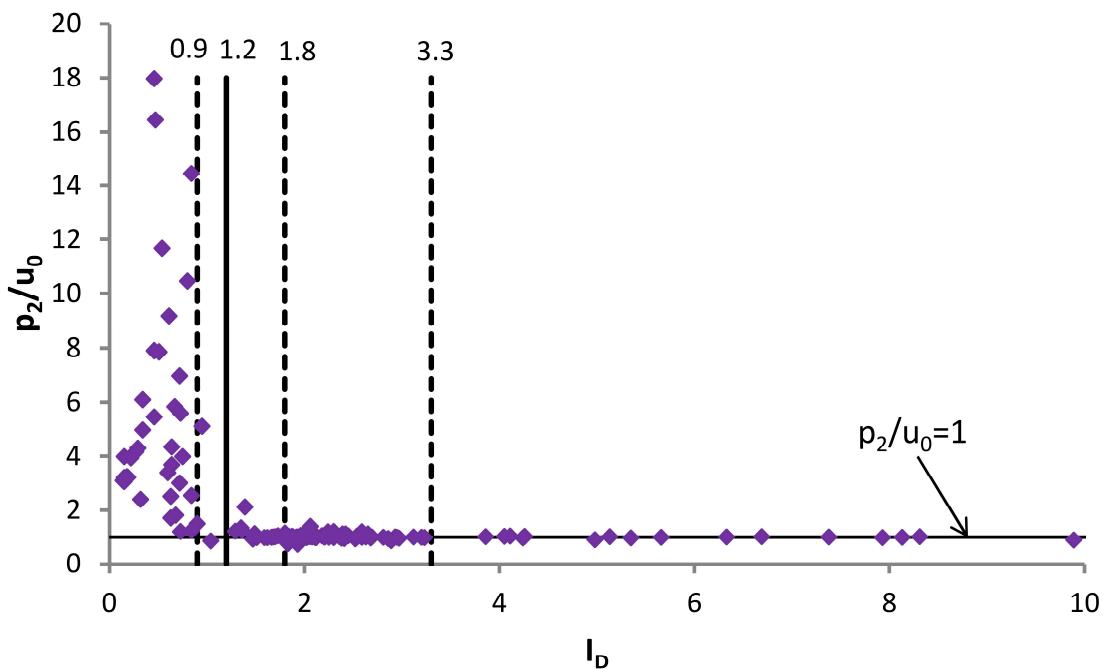
U tabeli 5.1 upoređeni su rezultati određivanja dubine do nivoa podzemne vode (NPV) na osnovu izmerenih pritisaka p_2 i direktnim merenjem u istražnim buštinama u neposrednoj blizini izvedenih opita. Napominje se da je nivo podzemne vode prikazan u apsolutnim kotama na mestima gde je teren u nagibu između istražne bušotine i DMT opita i na mestima gde postoje značajne denivelacije nastale građevinskim radovima (iskopi za temeljne jame, i sl.). USCS klasifikacija data u tabeli 5.1 odnosi se na materijal u kojima je vršeno merenje pritiska p_2 .

Iz tabele je očigledno da u peskovitom tlu pritisak p_2 dovoljno precizno ukazuje na dubinu do nivoa podzemne vode.

Rezultati su pokazali da u šljunku kod koga ima više od 50 % frakcije krupnije od 4-6 mm, precizno određivanje NPV iz pritisaka p_2 nije moguće, a verovatan razlog je kolaps zrna šljunka u okolini membrane tokom njenog izduvavanja. Uzročnici kolapsa mogu biti veći hidraulički gradijenti i teža zrna u poređenju sa peskovitim materijalima. U toj situaciji na membranu pored pritiska vode deluju i dodatne sile od zrna šljunka koja udaraju u nju.



Slika 5.1. Prikaz rezultata merenja pritiska p_2 i presek merodavne istražne bušotine na lokaciji železničkog mosta preko kanala DTD (lokacija 18 u tabeli 1)



Slika 5.2. Odnos p_2/u_0 u zavisnosti od I_D

Tabela 5.1. Poređenje dubine do NPV dobijene iz p_2 i merenjem u bušotini

Lokacija (tabela 1)	USCS klasifikacija	p_2 (mnv ili m)	Bušotina (mnv ili m)
2.	SP-SM, SM	69.70 70.20	71.00
7.	SC	68.10	67.45
12.	GF, GP-GF	1.50	1.50
13.	SP	6.00	5.70
15.	SP-SM, SM	4.50	4.10
16.	SP	0.20	0.20
17.	SP	1.20	1.70
18.	SP-SM SP-SM	3.00 3.30	3.00 3.10
20.	SM, SP-SM	2.0	2.0
23.*	SM	membrana se ne vraća u ležište	nema vode

*Pritisak C nije bilo moguće očitati jer se membrana ne vraća u početni položaj nakon ispuštanja vazduha iz sečiva i sistema. To je uobičajeno kod peska iznad nivoa vode

Potrebno je više merenja pritisaka p_2 u vertikalnom profilu da bi se dobio pouzdan nivo vode, odnosno ne treba se oslanjati na jedno ili dva čitanja u fazi izvođenja opita.

Pogrešna pretpostavka o nivou podzemne vode direktno utiče na veličinu prelaznih parametara I_D i K_D (jednačine 4.5, 4.11), ali i na veličinu dilatometarskog modula E_D .

Greška usled pogrešne pretpostavke u_0 je značajna jedino u mekom tlu gde su izmereni pritisci p_0 i p_1 veoma male veličine. U praktičnim slučajevima NPV se može utvrditi sa dovoljnom preciznošću da bi se eliminisao uticaj pogrešne pretpostavke o u_0 na rezultate opita.

5.2. Klasifikacija tla

Jedna od glavnih primena rezultata DMT opita je utvrđivanje litologije i vrste tla. Uobičajeno je da se vrsta tla određena na osnovu rezultata DMT opita (videti poglavljje 4.3.1.) dovodi u vezu sa geološkim opisom sloja zasnovanim na klasifikacionim sistemima koji razmatraju fizička svojstva tla kao što su granulometrijski sastav i plastičnost (npr. USCS klasifikacioni sistem). Međutim, rezultati svih penetracionih opita, pa i DMT opita, pokazatelji su „in situ“ mehaničkog ponašanja tla. Granulometrijski sastav i Aterbergove granice određuju se na poremećenim uzorcima

tla dok sa druge strane DMT opitom meri se stvarni odgovor tla na utiskivanje sečiva i ekspanziju membrane. Međutim, u većini slučajeva pomenute fizičke karakteristike dobro opisuju mehaničko ponašanje tla pa je veza između njih praktično zadovoljavajuća.

Prema mehaničkom ponašanju sva tla se mogu svrstati u četiri velike grupe (Robertson, 2012):

CD – grubozrna tla sa izraženom dilatacijom pri smicanju (uglavnom drenirana)

CC – grubozrna tla sa izraženom kontrakcijom pri smicanju (uglavnom drenirana)

FD – finozrna tla sa izraženom dilatacijom pri smicanju (uglavnom nedrenirana)

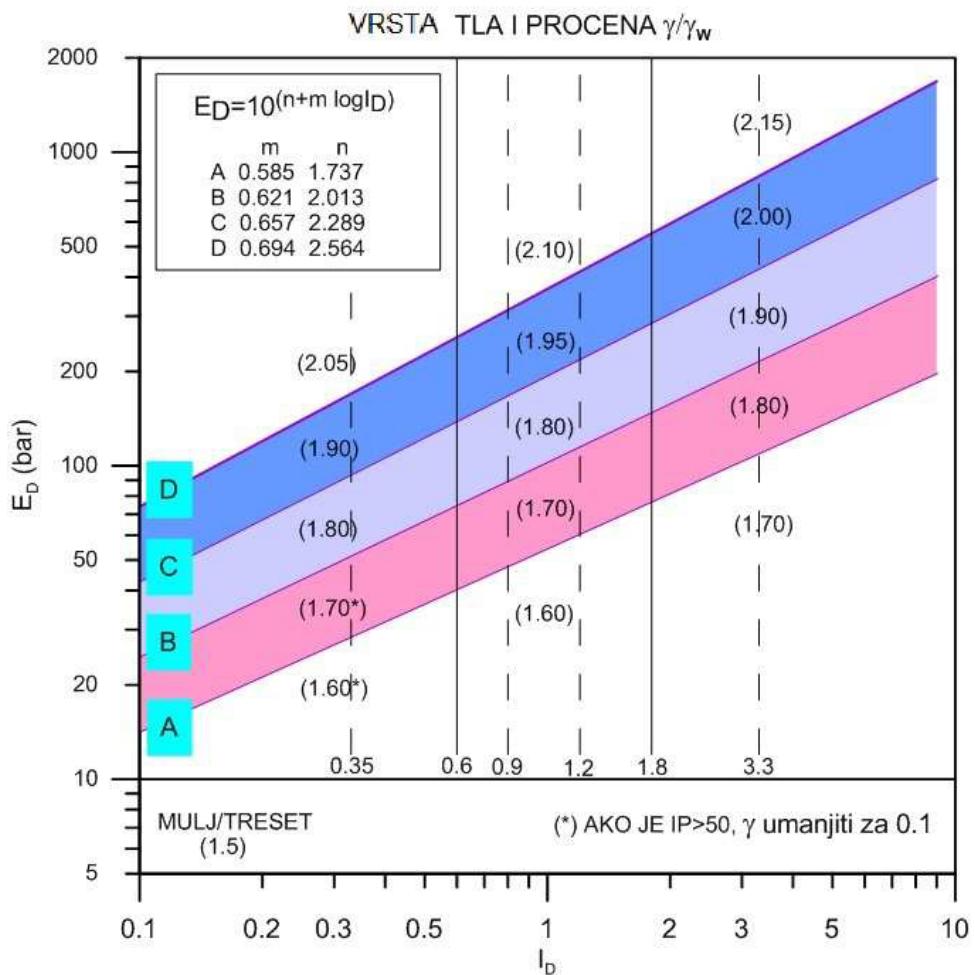
FC – finozrna tla sa izraženom kontrakcijom pri smicanju (uglavnom nedrenirana)

Izrazi drenirana i nedrenirana tla ukazuju na uslove dreniranja koji vladaju prilikom statičkog opterećenja dok izrazi dilatacija (širenje) i kontrakcija (skupljanje) opisuju zapreminske promene koje tlo pretrpi prilikom smicanja. Vrlo je korisno da rezultati terenskih opita ukažu na jednu od četiri pomenute grupe tla. U daljem tekstu biće prikazani, klasifikacioni sistemi zasnovani na rezultatima DMT opita.

5.2.1. *Marchetti i Crapps (1981)*

Marchetti i Crapps (1981) daju proširenu verziju tabele 4.1 u vidu dijagrama prikazanog na slici 5.3. Pored I_D , na osnovu koga se određuje vrsta tla, dijagram uzima u obzir i E_D tako da kombinacija ova dva parametra omogućuje da se proceni veličina zapreminske težine u prirodnom stanju vlažnosti (γ). Suština dijagrama je procena zapreminske težine na osnovu koje je moguće približno konstruisati profil vertikalnog geostatičkog naponu potrebnog za računanje prelaznih i geotehničkih parametara. Treba zapaziti da dijagram prikazan na slici 5.3 nije bezdimenzionalan s obzirom da ordinata predstavlja E_D u odgovarajućim jedinicama. Zavisnost E_D od I_D je linearna u bi-logaritamskoj podeli, a parametri jednačina koje definišu granične linije (u vertikalmu pravcu) između različitih zapreminske težine prikazane su na dijagramu na slici 5.3.

Dijagram je izведен za „normalna tla”, odnosno tla bez znatne mikrostrukture.



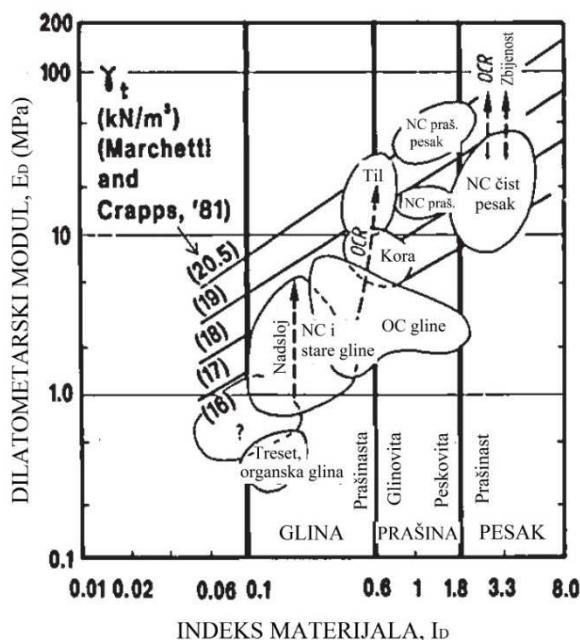
Slika 5.3. Vrsta tla i procena zapreminske težine

(modifikovano iz Marchetti i Crapps, 1981)

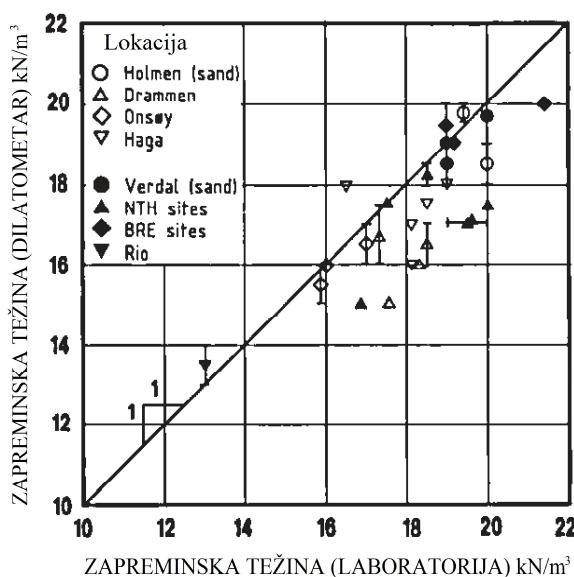
5.2.2. Lacasse i Lunne (1988)

Lacasse i Lunne (1988) proširili su dijagram dat na slici 5.3 kvalitativno ilustrujući uticaj težine nadloja, prekonsolidacije i zbijenosti tla na E_D . Taj dijagram dat je na slici 5.4 i odražava lokalne uslove za Norveška tla u kojima je vršeno ispitivanje. Pomenuto je da E_D nije osetljiv na istoriju opterećenja (poglavlje 4.3.2) međutim dijagram na slici 5.4 upravo uzima u obzir uticaj OCR na E_D , što u izvesnom smislu predstavlja kontradiktornost. Dijagram je proširen kako bi uzeo u obzir vrednosti I_D manje od 0.1 (0.05).

Poređenje zapreminske težine određenih iz jednačina koje su dali Marchetti i Crapps (1981) i referentnih zapreminske težine određenih u laboratoriji za Norveška tla prikazano je na slici 5.5. Lacasse i Lunne (1988) navode da su zapremske težine određene iz DMT opita niže u odnosu na referentne laboratorijske vrednosti u mekim glinama.



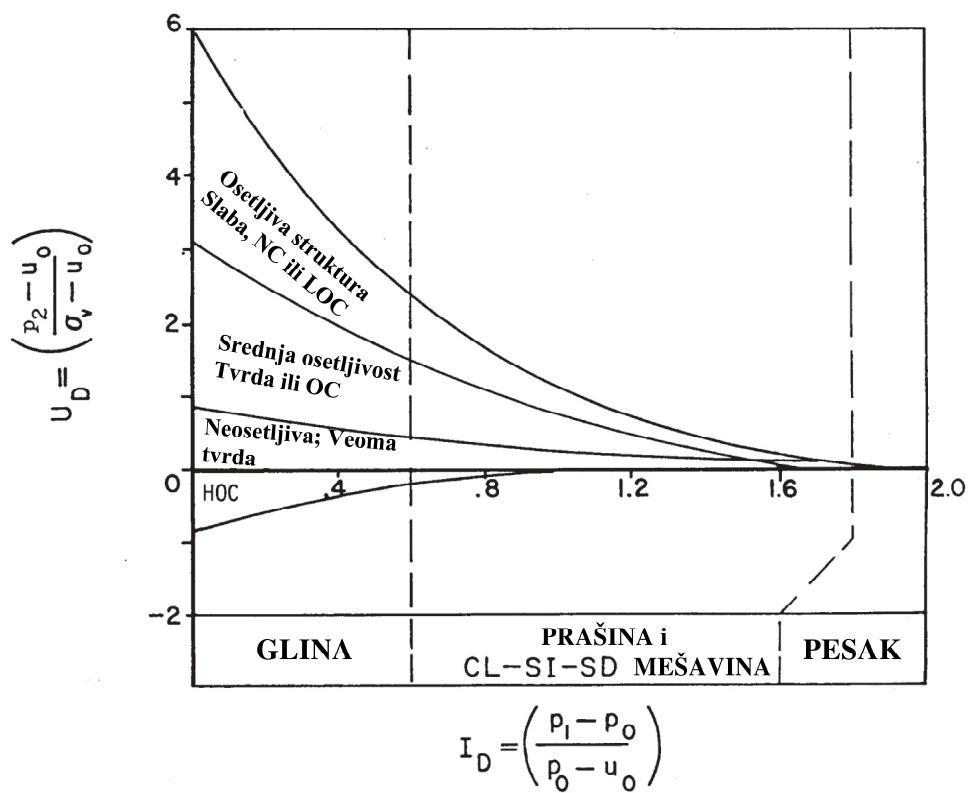
Slika 5.4. Klasifikacioni dijagram (Lacasse i Lunne, 1988)



Slika 5.5. Poređenje zapreminske težine iz DMT opita (Lacasse i Lunne, 1988)

5.2.3. Schmertmann (1988)

Schmertmann (1988) predlaže klasifikacioni sistem, prikazan na slici 5.6, koji pored I_D uzima u obzir i indeks pornog pritiska (U_D). U_D koji se ovde pominje ima drugačiju definiciju od U_D datom u poglavlju 4.3.4 s obzirom da predstavlja porni nadpritisak ($p_2 - u_0$) normalizovan vertikalnim efektivnim naponom (σ_v'). Klasifikacioni sistem koji predlaže Schmertmann je upotrebljiv u tlu kod koga je vrednost I_D manja od 2, odnosno u prašinastom i glinovitom tlu. Za vrednosti I_D veće od 2 razlika između p_2 i u_0 je veoma mala pa je U_D približno jednak nuli. Sa dijagrama se vidi da U_D ukazuje na stepen prekonsolidacije i senzitivnost glinovitog tla. U normalno konsolidovanim, mekim glinama U_D je relativno visok, dok u jako prekonsolidovanom tlu U_D može da bude i negativan. Ovaj klasifikacioni sistem ima praktičan nedostatak iz razloga što uzima u obzir pritisak p_2 koji produžava vreme izvođenja opita.



Slika 5.6. Klasifikacioni sistem (Schmertmann, 1988)

5.2.4. Larsson (1989)

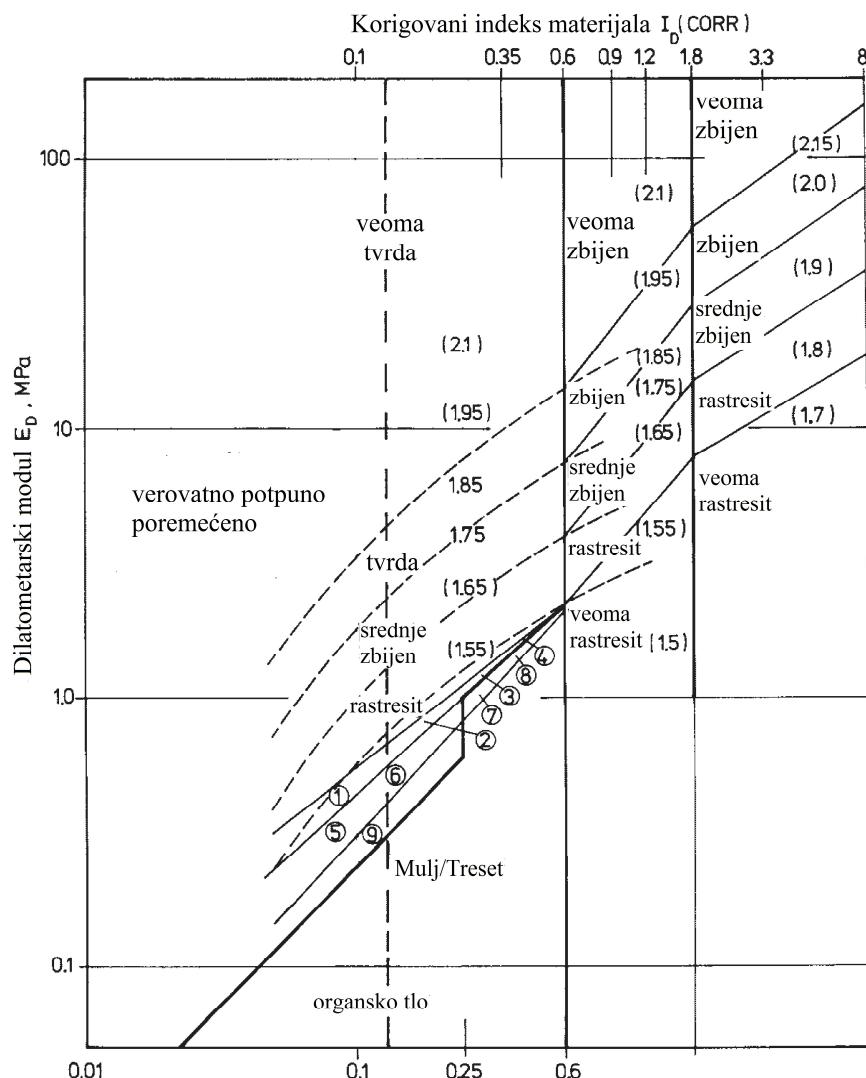
Larsson (1989) modifikuje klasifikacioni sistem koji su preporučili Marchetti i Crapps (1981) uzimanjem u obzir uticaj prekonsolidacije i negativnih pornih pritisaka na I_D , tako što uvodi korekciju ($I_{D\text{kor}}$) prikazanu jednačinom 4.6 i 4.7. Modifikovani sistem (slika 5.7) prilagođen je i Švedskoj laboratorijskoj praksi za klasifikovanje glinovitog tla (u to vreme), a razlikuje nekoliko grupa tla koja su klasifikovana prema uslovima dreniranja u fazi izvođenja opita. Za tla kod kojih je vrednost $I_{D\text{kor}}$ manja od 0.13 Larsson smatra da je to tlo znatno poremećeno utiskivanjem DMT sečiva što se dešava u glinama sa čestim proslojcima prašina (tzv. varve), slika 5.7.

5.2.5. Cruz i sar. (2012)

Do sada su prikazani klasifikacioni sistemi koji razmatraju po dva prelazna parametra, I_D-E_D , ili I_D-U_D , a uglavnom su izvedeni za „normalna tla”, odnosno tla bez zнатне mikrostrukture. Ovde se prvi put uvodi kao dopunski klasifikacioni parametar inicijalni modul smicanja (G_0) određen iz izmerene V_s (videti poglavljje 5.9.1).

Cruz i sar. (2013) daju klasifikacione dijagrame, prikazane na slikama 5.8 i 5.9, koji omogućavaju da se izdvoje rezidualna tla od sedimentnih, odnosno dijagrame koji mogu da ukažu na znatano prisustvo cementacije u tlu što je uobičajeno za rezidualna tla. Autori daju dva različita dijagrama sličnog potencijala za ralikovanje dve pomenute grupe tla, slike 5.8 i 5.9. Dijagram prikazan na slici 5.8 uzima u obzir zavisnost G_0/E_D od I_D . Dijagram prikazan na slici 5.9 uzima u obzir zavisnost G_0/M_{DMT} od K_D . Sa slike 5.8 vidi se da G_0/E_D opada sa porastom I_D i kod sedimentnog i kod rezidualnog tla, međutim za iste veličine I_D (sličan granulometrijski sastav) rezidualna tla imaju znatno veći odnos G_0/E_D što predstavlja pokazatelj zastupljenosti cementacije u tlu. Sa dijagrama treba zapaziti da su rezultati dobijeni za rezidualna tla iz Portugalije gde je ta vrsta tla znatno zastupljenija i vertikalno bolje razvijena nego u našoj zemlji. Na osnovu literaturnih podataka I_D u rezidualnom tlu je uglavnom veći od 1.2. Dijagram prikazan na slici 5.9 uzima u obzir K_D , parametar koji je osetljiv na cementaciju.

Gлина са прослојцима прашине/ прашинаста глина	Глина прашинаста	Прашине глиновите/песковите	Песак прашинаст
---	---------------------	--------------------------------	--------------------



Zona	Klasifikacija *	
1	Gлина са прослојцима прашине/прашинаста глина/(органска глина)	(1.45)
2	Глина/органска глина	(1.45)
3	Глина/Mulj/Treset	(1.4)
4	Прашинаста глина/(Mulj/Treset)	(1.4)
5	Органска глина/(глина са прослојцима прашине/прашинаста глина)	(1.3)
6	Органска глина/(глина)	(1.3)
7	Mulj/Treset/(Глина)	(1.25)
8	Mulj/Treset/прашинаста глина	(1.25)
9	Органска глина/Mulj/Treset	(1.15)

* Za глиновито и органски тло, ознаке веома растресит, растресит, средње тврда, тврда и веома тврда дате су на основу процене недренираних смичуће чврстоће.

Slika 5.7. Klasifikacioni sistem (Larsson, 1989)

Međutim, indeks horizontalnog napona K_D određuje se iz pritiska p_0 nakon utiskivanja sečiva, odnosno nakon delimičnog remećenja inicijalne cementirane strukture tla. S druge strane za iste vrednosti $I_D (>1.2)$ odnos G_0/M_{DMT} je veći kod rezidualnih tla nego kod sedimentnih, što dokazuje da taj odnos može da ukaže na prisustvo cementacije u tlu.

Granična linija između rezidualnog i sedimentnog tla data na slikama 5.8 i 5.9 predstavljena je sledećim jednačinama:

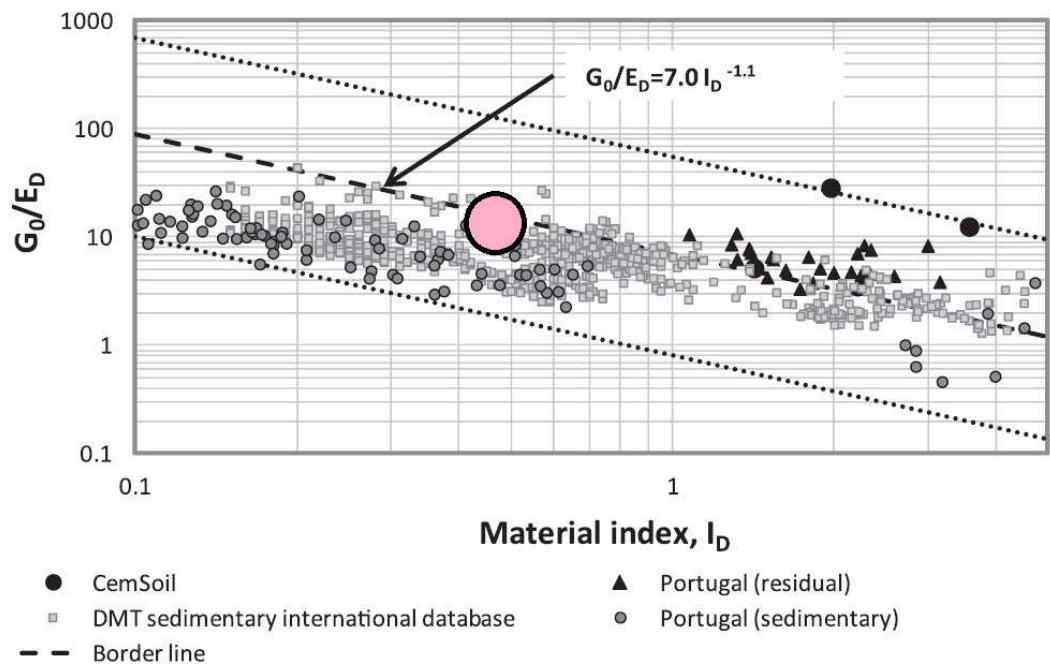
$$\frac{G_0}{E_D} = 7.0I_D^{-1.1} \quad (5.1)$$

$$\frac{G_0}{M_{DMT}} = 6.5K_D^{0.691} \quad (5.2)$$

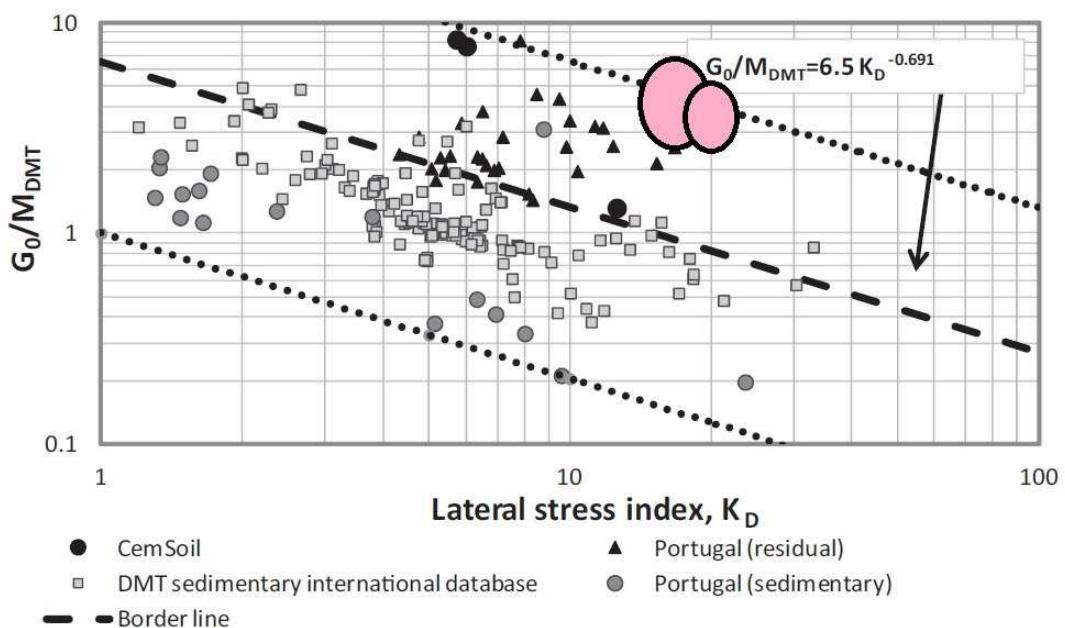
Provera prikazanih dijagrama izvršena je na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem laporanja, koji se može smatrati za predstavnika tla sa izraženom cementacijom. Sa slike 5.8 vidi se da se veći deo površine koja predstavlja rezulat u laporu nalazi ispod granične linije, odnosno u ovom slučaju lapor je prepoznat uglavnom kao sedimentno tlo bez znatnog učešća cementacije. Napomenuto je da su granice date jednačinama 5.1 i 5.2 izvedene za $I_D > 1.2$ (kod laporanja $0.3 < I_D < 0.55$), pa se prepostavlja da za niže vrednosti I_D dijagram prikazan na slici 5.8 nije primenjiv, odnosno potrebno ga je modifikovati. Sa druge strane dijagram na slici 5.9 svrstava lapor duboko u zonu tla sa izraženom cementacijom i u ovom slučaju daje bolji rezultat u poređenju sa dijagramom prikazanim na slici 5.8. Visoke vrednosti K_D u laporu posledica su njegove cementirane strukture, ali i znatnog uticaja prekonsolidacije na izmereni pritisak p_0 .

5.2.6. Rivera-Cruz i sar. (2012)

Autori predlažu novi klasifikacioni sistem, tzv. SBT_{SDMT} (soil behaviour type) sistem, koji uzima u obzir odnos deformacijskih parametara G_0/E_D i drenažnih karakteristika tla posredstvom prelaznog parmetra U_D . Klasifikacioni sistem prikazan je na slici 5.10. Na dijagramu, prikazanom na slici 5.10 razlikuje se sedam grupa tla.



Slika 5.8. Razlikovanje rezidualnog od sedimentnog tla na G_0/E_D - I_D dijagramu

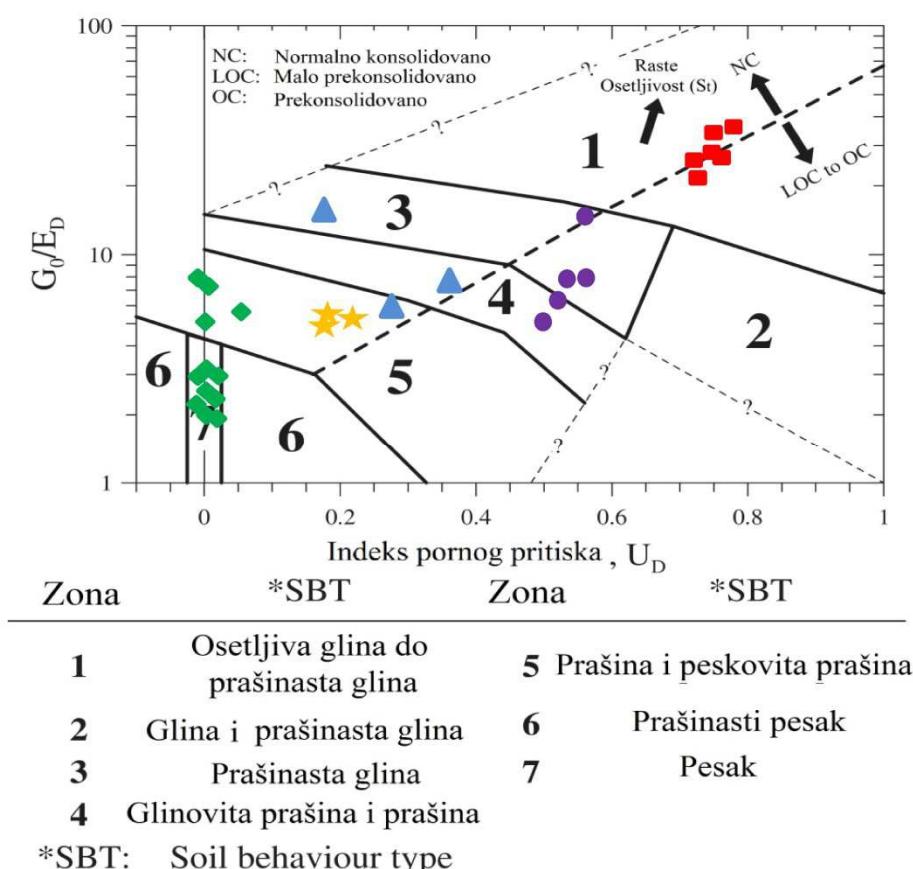


Slika 5.9. Razlikovanje rezidualnog od sedimentnog tla na G_0/M_{DMT} - K_D dijagramu

Autori uzimaju u obzir osetljivost glinovitog tla, navodeći da se sa porastom osetljivosti tla povećava i odnos G_0/E_D . Već je napomenuto da je odnos G_0/E_D osetljiv i na

prisustvo cementacije u tlu tako da jasno razlikovanje osetljivosti tla od prisustva cementacije na osnovu G_0/E_D odnosa nije jednostavno. Na slici 5.10 isprekidana linija predstavlja granicu između normalno konsolidovanog ($K_D < 2.3$) i prekonsolidovanog tla ($K_D > 2.3$) povučenu na osnovu vrednosti K_D .

Rezultati dobijeni ispitivanjem određenih vrsta tla (tabela 5.2), koja su pogodna za proveru klasifikacionog sistema, prikazani su na slici 5.10.



Slika 5.10. SBT_{SDMT} klasifikacioni sistem (prema Rivera Cruz i sar., 2012)

Iz tabele 5.2 i slike 5.10 zapaža se da sa porastom I_D opada U_D , pa je tako u peskovitom tlu opit potpuno dreniran ($U_D \sim 0$) dok je u tlu sa najnižim I_D ($I_D < 0.35$) opit nedreniran ($U_D \sim 0.7$). Ostala tla spadaju u prelaznu zonu, odnosno zonu gde je moguće da je opit delimično dreniran ($0 < U_D < 0.7$). Kod tih vrsta tla interpretacija rezultata predstavlja izazov.

Treba zapaziti da su tla sa visokim K_D indeksom ($K_D > 3.5$), poput kvartarnih terasnih sedimenata i lesolikih prašina, prema prikazanom klasifikacionom sistemu svrstana u

normalno konsolidovna tla što odgovara geološkim uslovima i istoriji opterećenja u kojima su formirana. Visoke vrednosti K_D su posledica cementacije i verovatno negativnih pornih pritisaka koji su vladali u fazi izvođenja opita. S druge strane lapor je klasifikovan kao prekonsolidovano tlo, ispod isprekidane linije (grupa 3 i 4), što odgovara genezi i istoriji stvaranja te vrste tla.

Tabela 5.2. Osnovne karakteristike tla prikazanih na slici 5.10.

Oznaka	Lokacija/ (dubina) (m)	USCS klasifikacija, kratak opis	I_D	K_D	Cementacija
◆	15/(5.0-20.0)	SP-SM	1.5-2.2	2-8.1	vrlo malo prisustvo CaCO_3
★	22/(5.4-7.0)	CL, lesolike prašine	1.06-1.2	3.6-4.2	znatno prisustvo CaCO_3
▲	11/(5.4-7.2)	CH, tvrde gline-prašine, terasni sedimenti	0.77-0.85	6.3-8.1	znatno prisustvo CaCO_3
●	24/(9.0-14.0)	ML-MH, lapor	0.41-0.54	14.1-20.3	znatno prisustvo CaCO_3
■	12/(9.0-14.0)	CL, muljevite prašine	0.14-0.22	2.4-3.7	znatno prisustvo CaCO_3

Dakle, dijagram prikazan na slici 5.10 omogućuje da se tačno predviđi vrsta tla i preporučuje se da se koristi u kombinaciji sa dijagrom datim na slici 5.9 u prvima fazama projektovanja.

5.2.7. Robertson (2015)

Robertson (2009, 2012 i 2015) navodi da su dva ključna parametra koji se dobijaju DMT opitom I_D i K_D , a da je E_D izведен iz ta dva parametra preko jednačine 5.3:

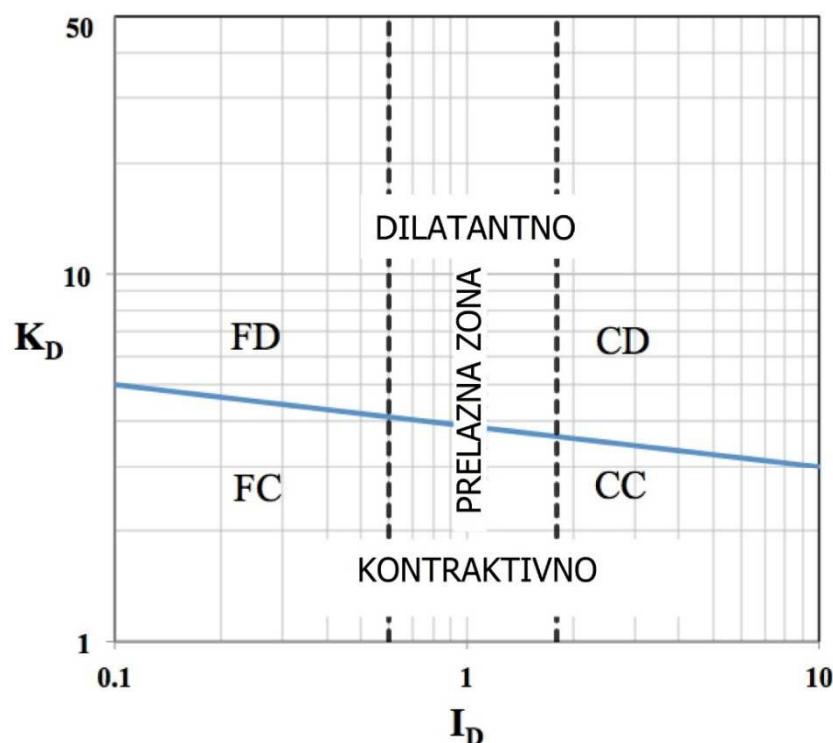
$$\frac{E_D}{\sigma'_v} = 34.7 I_D K_D \quad (5.3)$$

Na osnovu takvog tumačenja rezultata Robertson (2015) predlaže SBT dijagram prikazan na slici 5.11, koji izdvaja četiri grupe tla pomenuta u poglavlju 5.2. Granica

između kontraktivnih i dilatantnih tla određena je na osnovu eksperimentalnih rezultata (za mlade normalno konsolidovane sedimente), pri čemu se:

- a) finozrna tla kod kojih je stepen prekonsolidacije $OCR > 4$, odnosno $K_D > 5$ smatraju dilatantnim i
- b) grubozrna tla kod kojih je parametar stanja (ψ) manji od -0.05 smatraju dilatantnim.

Dakle, granica dilatantno-kontraktivno nije definisana jednom veličinom K_D , već rasponom vrednosti od $3 < K_D < 5$. Položaj granice je aproksimativan, a izvedena je za tla pretežno holocenske starosti bez značajnije mikrostrukture (Robertson, 2012; Robertson, 2015). Granica između finozrnog i grubozrnog tla data je u vidu prelazne zone ($0.6 < I_D < 1.8$). Robertson (2015) navodi da je predloženi dijagram preliminarni.



- CD – Grubozrno, dilatantno (drenirano)*
- CC – Grubozrno, kontraktivno (drenirano)*
- FD – Finozrno, dilatantno (nedrenirano)*
- FC – Finozrno, kontraktivno (nedrenirano)*

Slika 5.11. SBT dijagram (Robertson, 2015)

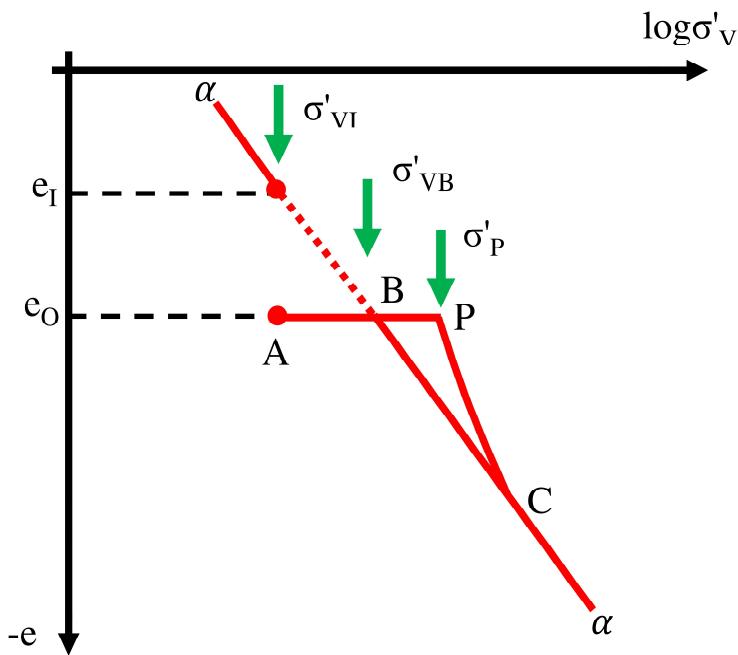
5.3. Mikrostruktura u tlu

Mikrostruktura se koristi kao termin koji treba da ukaže da tlo poseduje određena „neobičajena“ svojstva zbog kojih se razlikuje od tla kod kojih ta svojstva nisu izražena (Robertson, 2015). Mikrostruktura podrazumeva pre svega efekte cementacije i starenja. Ti efekti mogu da imaju značajan uticaj na mehaničke karakteristike tla. Stvaranje mikrostrukture u tlu prikazano je na slici 5.12. Sedimentacijom materijala povećava se vertikalni efektivni napon (σ_v') što izaziva smanjenje koeficijenta poroznosti (e). Nakon završene sedimentacije vertikalni efektivni napon u tlu je σ_{vI}' , a koeficijent poroznosti je e_I kao što je prikazano na slici 5.12. Posle toga sledi sekundarna kompresija pri čemu se za isti vertikalni efektivni napon koeficijent poroznosti smanjuje na e_0 . Pad koeficijenta poroznosti daje prividno povećanje napona prekonsolidacije od σ_{vI}' do σ_{vB}' . To ima za posledicu i povećanje nedrenirane čvrstoće. Ukoliko u tlu iz bilo kog razloga dođe do cementacije, napon prekonsolidacije se povećava za iznos od tačke B do tačke P.

Uzroci cementacije mogu biti različi, kao što su taloženje karbonata, oksida gvožđa i aluminijuma, organske materije, itd. na kontaktima između zrna. Cementacija može da nastane u fazi geneze tla ili kao postgenetski produkt.

Mikrostruktura u tlu proširuje oblast u kojoj se tlo ponaša elastično (slika 5.12), a u zavisnosti od jačine cementnih veza povećava se vršna čvrstoća i inicijalni moduli deformabilnosti. Tla sa izraženom mikrostrukturom obično imaju visoke koeficijente poroznosti kao što je npr. makroporozan kolapsibilni les, vulkanski peskovi, tropska i rezidualna tla (lateriti), i dr., ali i laporoviti sedimenti sa kojima se kod nas često susrećemo.

Inicijalni modul smicanja (G_0) je parametar koji se najčešće koristi za utvrđivanje prisustva mikrostrukture u tlu (Eslaamizaad i Robertson, 1996, Schnaid, 2005, Viana da Fonseca i sar., 2006, Cruz i sar., 2012). Razlog je to što smišljeni talasi izazivaju veoma male deformacije elemenata tla (10^{-3} %) prilikom njihovog prostiranja tako da mikrostruktura ostaje sačuvana.

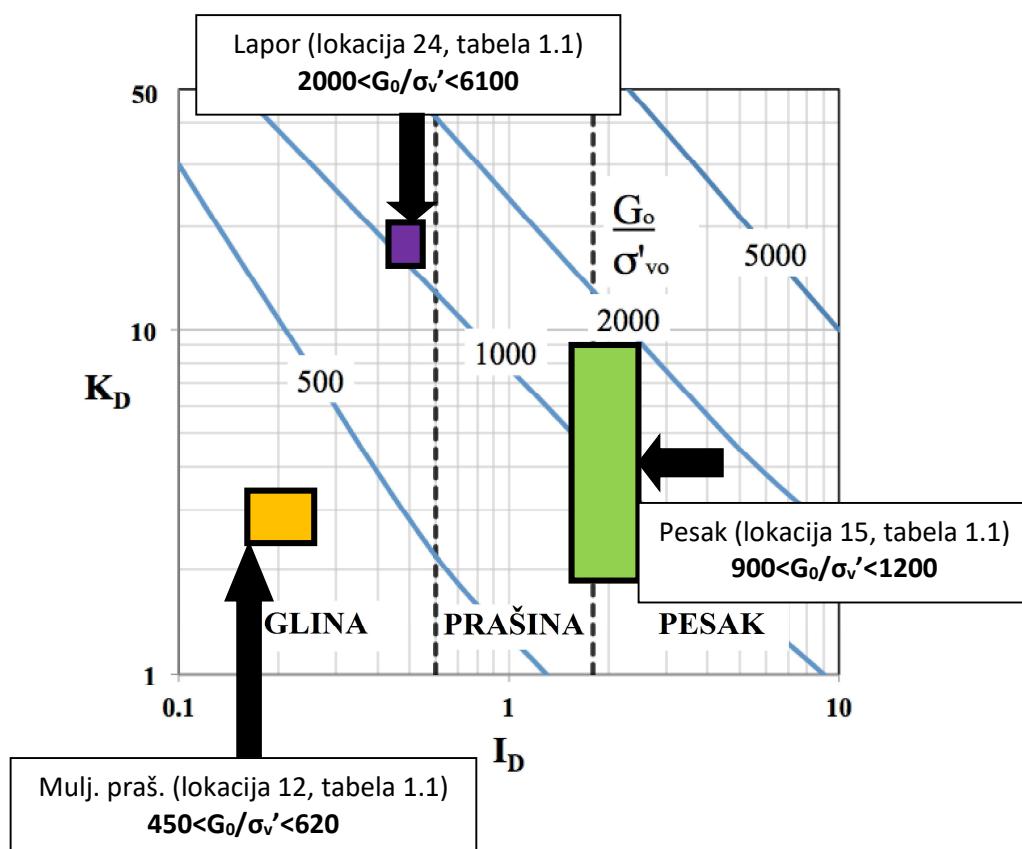


Slika 5.12. Uticaj efekta starenja i cementacije na koeficijent poroznosti normalno konsolidovane gline (Leroueil i Vaughan, 1990)

Dijagram za određivanje mikrostrukture u tlu predložio je Robertson (2015), a prikazan je na slici 5.13. Prikazani dijagram omogućava da se proceni veličina G_0 tla bez znatne mikrostrukture na osnovu vrednosti I_D , K_D i σ'_v . Pod mikrostrukturom ovde se podrazumevaju doprinosi cementacije, starenja, istorije opterećenja, itd. na mehaničke karakteristike tla (Robertson, 2015). Ukoliko se utvrdi da izmereni G_0 (SDMT) znatno odstupa od procenjene veličine G_0 (sa dijagraama) onda se radi o tlu sa izraženom mikrostrukturom. Veća odstupanja ukazuju na veće prisustvo mikrostrukture. Primena dijagraama za utvrđivanje potencijalnog prisustva mikrostrukture prikazana je upotrebom rezultata SDMT opita sa tri lokacije (12, 15 i 24 prema tabeli 1.1). Na dijagramu su aproksimativno obeleženi rasponi I_D i K_D za tri vrste tla i njihove izmerene veličine G_0 normalizovane sa σ'_v . Prvu grupu tla predstavlja aluvijalni kvarcni pesak (80 % kvarca) kod koga je izmereni normalizovani G_0 približan normalizovanom G_0 određenom sa dijagama. Ovakvo tlo se smatra da je bez znatne mikrostrukture, što je i očekivano za ovu vrstu tla uvezši u obzir njegovu genezu. Drugi karakterističan primer je lapor kod koga se očekuje da dijagram ukaže na znatno prisustvo mikrostrukture koja je posledica cementacije i istorije opterećenja. Normalizovana vrednost izmerenog G_0 ($1900 < G_0/\sigma'_v < 3780$) i G_0 (~ 1000) određenog sa dijagama znatno se razlikuju što

ukazuje da je kod ovog tla izraženo prisustvo mikrostrukture. Treći primer su muljevite prašine kod kojih je mikrostruktura posledica cementacije i verovatno starenja. Kao i kod prethodne grupe tla normalizovane i izmerene veličine G_0 znatno se razlikuju.

Iz prethodne diskusije vidi se da dijagram prikazan na slici 5.13 ima snažan potencijal da izdvoji tla sa znatnom mikrostrukturom.



Slika 5.13. Dijagram za određivanje vrste tla na osnovu I_D i K_D sa nanetim konturama normalizovanog G_0 vertikalnim efektivnim naponom

5.4. Predlog dijagrama za određivanje vrste tla i mikrostrukture

Dijagram je u osnovi zasnovan na ideji profesora Robertsona koju je izneo na trećoj DMT konferenciji održanoj u Rimu, a predstavlja modifikaciju dijagrama datog na slici 5.13. Vrsta tla određuje se na osnovu prelaznih parametara I_D i K_D , a prisustvo mikrostrukture procenjuje se na osnovu veličine G_0 normalizovanog sa σ'_v . Predloženi dijagram prikazan je na slici 5.14.

Na dijagramu se razlikuju četiri glavne grupe tla:

CD – grubozrna tla sa izraženom dilatancijom pri smicanju (uglavnom drenirana)

CC – grubozrna tla sa izraženom kontrakcijom pri smicanju (uglavnom drenirana)

FD – finozrna tla sa izraženom dilatancijom pri smicanju (uglavnom nedrenirana)

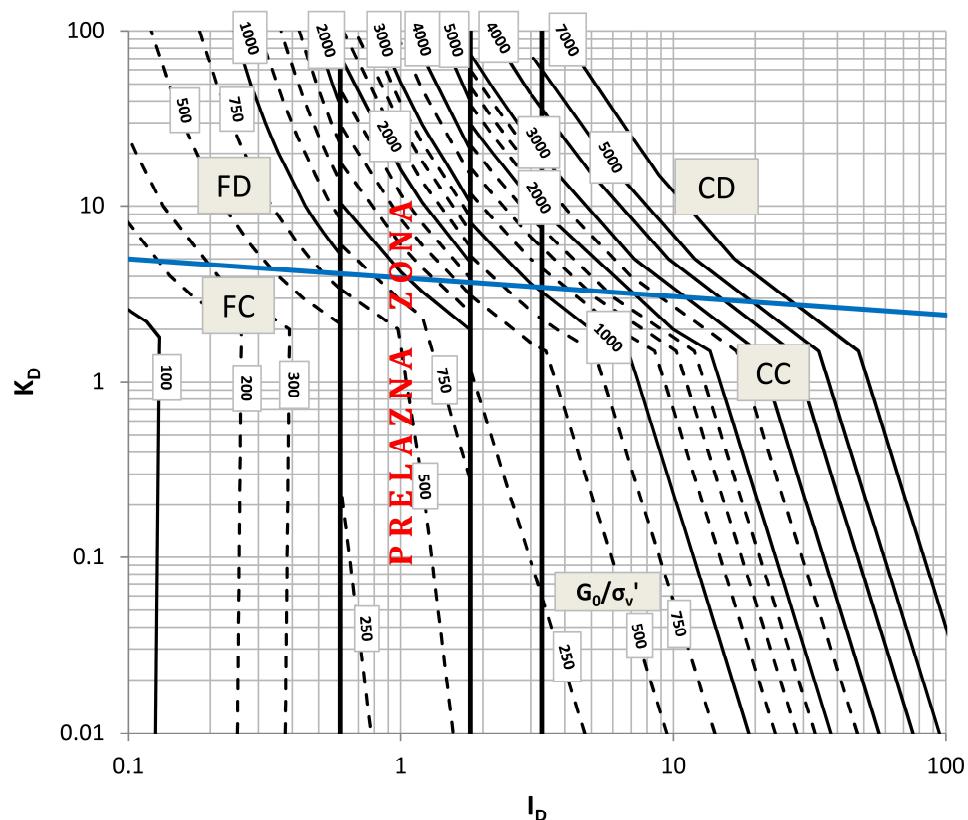
FC – finozrna tla sa izraženom kontrakcijom pri smicanju (uglavnom nedrenirana)

Klasifikacija na finozrno (nedrenirano) ili grubozrno (drenirano) tlo zavisi od I_D .

Finozrna tla su sva tla kod kojih je $I_D < 0.6$. Grubozrna tla su sva tla kod kojih je $I_D > 1.8$.

Ovo znači da će opit u tlu za koje je $I_D < 0.6$ biti nedreniran, dok će opit u tlu za koje je $I_D > 1.8$ biti dreniran. Prelazna zona, izdvojena na osnovu veličine I_D ($0.6 < I_D < 1.8$), ukazuje da je opit moguće delimično dreniran. Već je napomenuto da je kod ove vrste tla interpretacija rezultata nezahvalna.

Granica između dilatantnog i kontraktivnog tla definisana je veličinom K_D ($3 < K_D < 5$) i u manjoj meri je zavisna od I_D (granica nije horizontalna).



Slika 5.14. Preporučeni SBT dijagram

Isprekidane i pune linije, date na dijagramu na slici 5.14, predstavljaju različite veličine G_0/σ_v' . Te linije izvedene su kombinovanjem jednačina za određivanje modula stišljivost (M_{DMT}) prema Marchetti i sar. (2001) i jednačina za određivanje odnosa G_0/M_{DMT} prema Monaco i sar. (2009) i Marchetti (2014). U Dodatku III prikazani su detalji izvođenja jednačina i parovi I_D i K_D na osnovu kojih su definisane G_0/σ_v' linije. Prisustvo mikrostrukture se određuje poređenjem procenjene veličine G_0/σ_v' , sa dijagrama datog na slici 5.14, i izmerene veličine G_0/σ_v' iz izvedenog opita. Ukoliko izmerene veličine znatno odstupaju od procenjenih tlo poseduje mikrostrukturu. Sa povećanjem odstupanja mikrostruktura je izraženija. Pomenuti princip je sličan postupku koji predlažu Andrus i sar. (2009) i Hayati i Andrus (2009) za korigovanje otpora tla na pojavu likvefakcije starih peskova na osnovu izmerenih i procenjenih brzina smičućih talasa (V_s), tzv MEVR – Measured to Estimated Velocity Ratio.

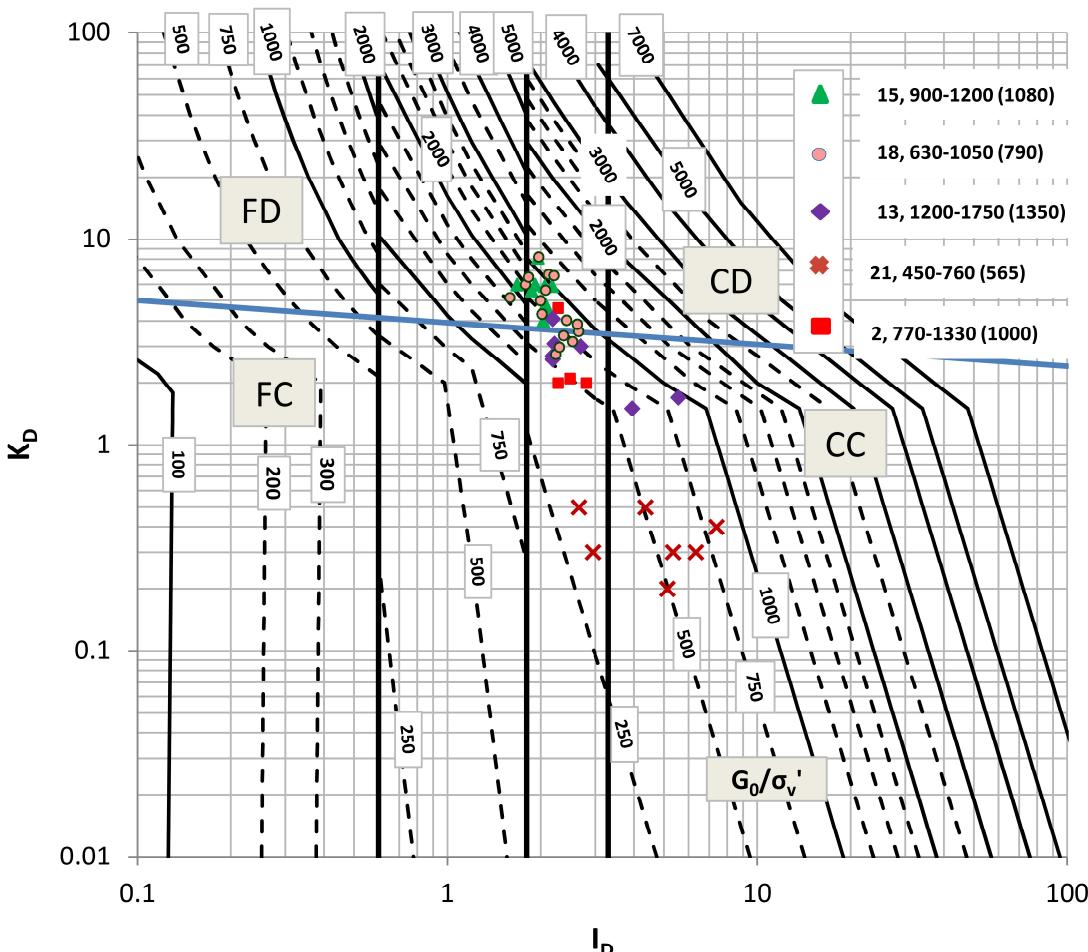
5.4.1. Validacija predloženog dijagrama

Na slikama 5.15-5.17 prikazani su preporučeni dijagrami na kojima su naneti rezultati dobijeni iz SDMT opita izvedenih na različitim lokacijama u Srbiji. Takođe, prikazan je i određen broj rezultata preuzet iz literature, a tačke nanete na dijagramu očitane su grafički tako da je njihov položaj aproksimativan.

Rezultati su predstavljeni tačkama čiji je položaj definisan veličinom I_D i K_D na bilogaritamskom dijagramu. Svakoj tački (paru I_D i K_D) odgovara određena veličina G_0/σ_v' koja je izmerena na istoj dubini kao i I_D i K_D . Dijagrame prati legenda na kojoj su pored oznaka prikazane numeričke vrednosti i to (idući sa leva na desno): lokacija (prema tabeli 1.1), minimalna i maksimalna izmerena veličina G_0/σ_v' i njihova aritmetička sredina (prikazana u zagradi).

Na dijagramu prikazanom na slici 5.15 prikazani su rezultati dobijeni ispitivanjem u grubozrnom tlu u aluvijalnim sedimentima reke Save i Dunava. Lokacije 15 i 18 nalaze se u okolini Bačkog Dobrog Polja i Vrbasa, a prikazani rezultati odnose se na kvarni pesak (SP – USCS) sa dubinom većih od 10 m. Istorija stvaranja terena ukazuje da je reč o mladim NC sedimentima bez izražene mikrostrukture. Razlike izmerenih i procenjenih

G_0/σ_v' su veoma male što ukazuje da kod ovog tla mikrostruktura nije izražena što je u saglasnosti sa njegovom genezom.



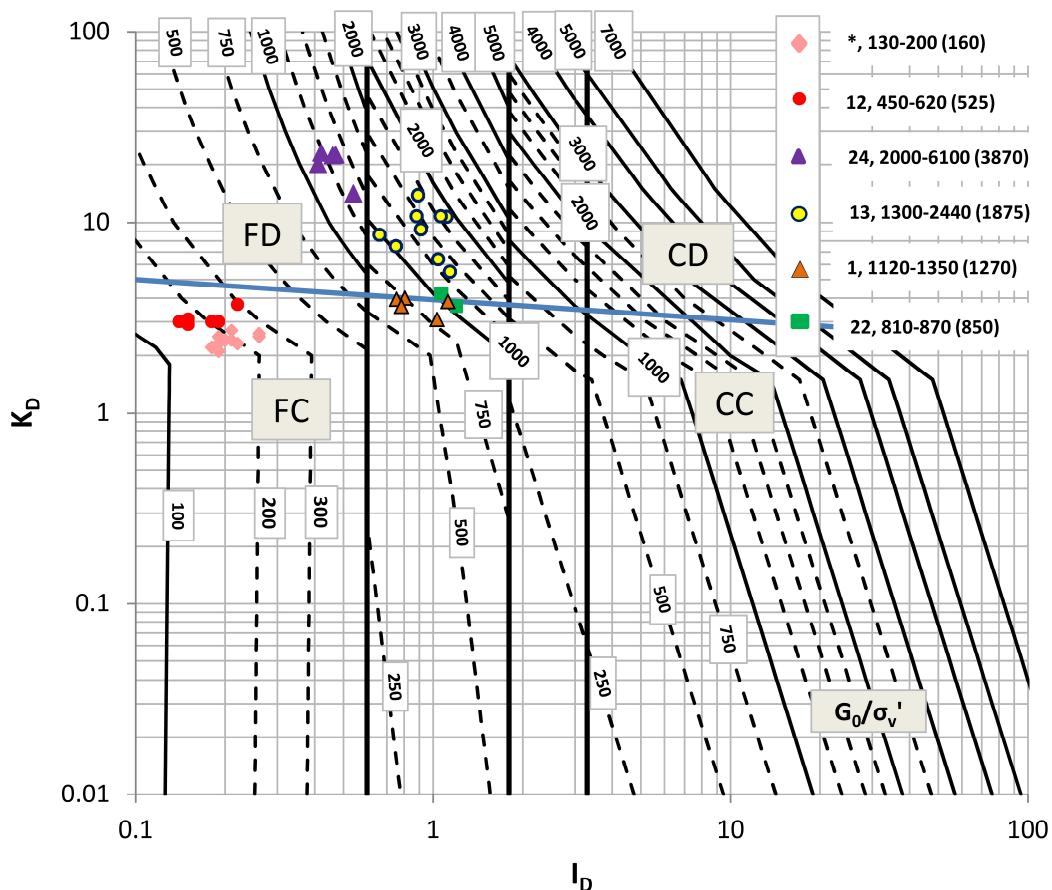
Slika 5.15. Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za grubozrna tla

Lokacija 21 nalazi se na obali Dunava na Dorćolu. Podaci se odnose na sloj sitnozrnog prašinastog peska (SM, SP - USCS) od 11 m do 18 m dubine. Genetski ovo tlo je mlado, normalno konsolidovano bez znatne mikrostrukture. Veoma niske vrednosti K_D ukazuju da je to tlo kontraktivno, odnosno ima tendenciju da smanjuje zapreminu pri smicanju. Prosečne vrednosti izmerenih G_0/σ_v' približno odgovaraju procenjenim što ukazuje da je reč o tlu bez znatnog prisustva mikrostrukture.

Lokacija 13 nalazi se u okviru TE „Nikola Tesla B” u Obrenovcu. Rezultati se odnose na sloj peska i sitnozrnog šljunka reke Save sa dubine od 14 m do 20 m. Prilikom kartiranja jezgra istražnih bušotina utvrđeno je da ovaj sloj burno do umereno reaguje

na HCl što može da ukaže na postojanje cementacije u tlu u vidu karbonatnih veza na kontaktu između zrna tla. Moguće je da je karbonat istaložen iz povlatnog sloja gline u kojima je intenzivno prisutan. Neposredno ispod ovog sloja nalazi se proslojak peščara što ukazuje na složene post genetske procese koji su modifikovali tlo nakon sedimentacije. Izmerene i procenjene veličine G_0/σ'_v se razlikuju što ukazuje na prisustvo mikrostrukture, odnosno cementacije na kontaktima između zrna.

Lokacija 2 nalazi se u bloku 65 u Novom Beogradu. Prema USCS klasifikacionom sistemu sloj je klasifikovan kao SM. Jezgro izvađeno iz istražne bušotine burno reaguje na HCl što može da ukaže na prisustvo cementacije. Poreklo cementacije nije u potpunosti jasno. Moguće je da potiče iz pretaloženog lesnog materijala lesnog kompleksa Bežanijske kose koji se nalazi u neposrednoj blizini ove lokacije. Na potencijalno prisustvo mikrostrukture ukazuju i odstupanja izmerenih od procenjenih G_0/σ'_v .



Slika 5.16. Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za finozrna i tla iz prelazne zone

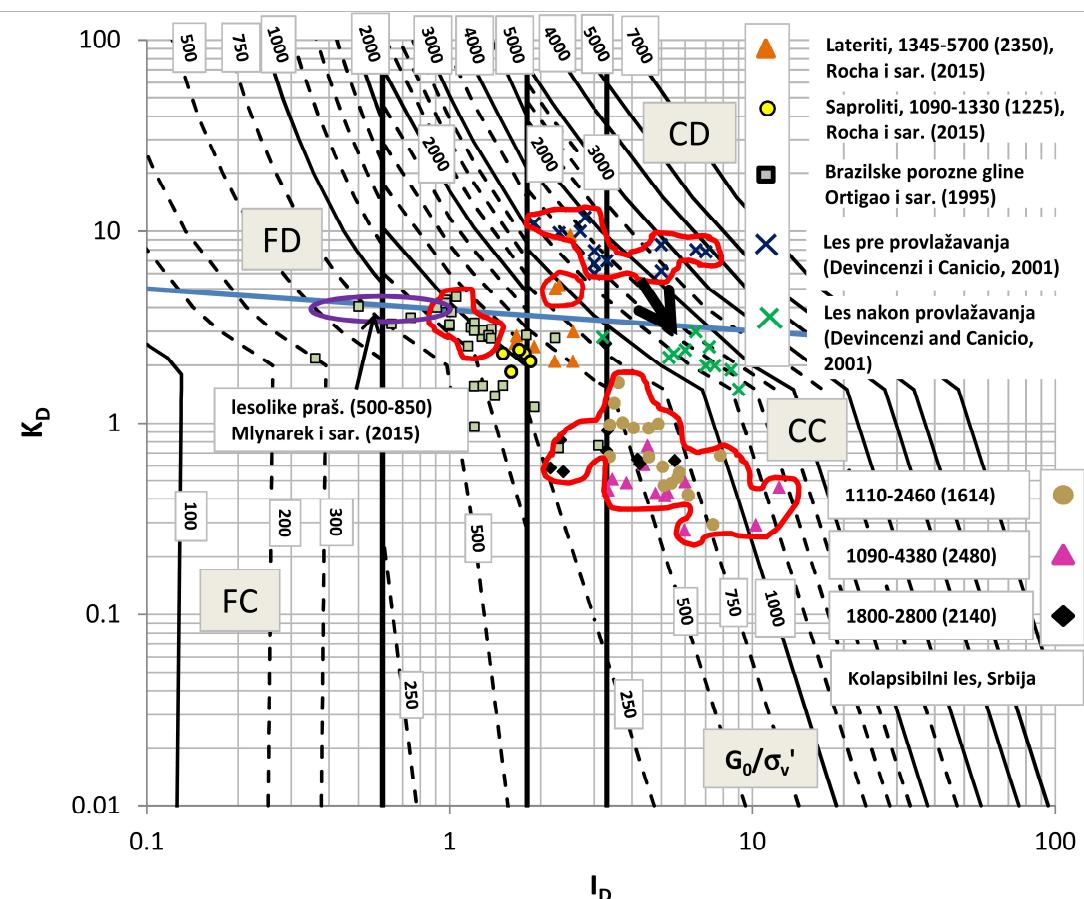
Na slici 5.16 prikazani su rezultati dobijeni ispitivanjem u finozrnom tlu i tlu iz prelazne zone. Rezultat za Fuimicino gline (obeležen asteriksom *) preuzet iz literature. Fuimicino gline su normalno konsolidovane bez prisustva znatne mikrostrukture. Izmerena vrednost G_0/σ_v' odgovara procenjenoj. Tlo sa lokacije 12 predstavljeno je muljevitim prašinastim sedimentima (CL) facije povodnja reke Dunav u blizini Smedereva. Sadržaj karbonata i organskih materija (laboratorijski utvrđeno) ukazuju na postojanje cementacije. Pretpostavlja se da je izražena i sekundarna kompresija, odnosno starenje. Cementacija i starenje povećavaju veličinu G_0 u tlu, odatle su izmerene veličine više u odnosu na procenjene. Treba zapaziti da se rezultati za Fuimicino gline i tlo sa lokacije 12 nalaze međusobno vrlo blizu na dijagramu ali im se G_0/σ_v' znatno razlikuju.

Lapor (lokacija 24) je tipičan predstavnik prekonsolidovanog tla sa izraženom mikrostrukturom (posledica cementacije). Na dijagramu je izdvojen kao dilatantno tlo, a izmereni G_0/σ_v' znatno su veći od procenjenih vrednosti. To je u saglasnosti sa genezom laporanja.

Sledeće tri grupe tla predstavljaju sedimente prelazne zone, a zajedničko im je da su iznad nivoa podzemne vode. Tlo sa lokacije 13 predstavlja CH gline. Pretpostavlja se da kod njih negativni porni pritisci imaju uticaja na izmerene veličine prelaznih parametara s obzirom da se radi o tlu neposredno iznad nivoa podzemne vode u zoni kapilarnog penjanja. Kod ovog tla registrovano je i prisustvo CaCO_3 u vidu praha i konkrecija što može da ukaže na postojanje cementacije. Izmerene vrednosti G_0/σ_v' umereno odstupaju od procenjenih što ukazuje na manje prisustvo mikrostrukture nego kod prethodno opisanih tla. Moguće je da negativni porni pritisci imaju veći uticaj na izmerene prelazne parametre nego cementacija na G_0/σ_v' tako da dijagram nije u mogućnosti da ukaže na eventualno prisustvo cementacije, odnosno mikrostrukture.

Lesolike prašine iz okoline Alibunara (lokacija 1) i Kostolca (lokacija 22) zauzimaju položaj gotovo na samoj graničnoj liniji koja deli dilatantna od kontraktivnih tla. Koeficijent poroznosti ($e \sim 0.6-0.7$) i suve zapreminske težine ($\gamma_d > 15 \text{ kN/m}^3$) ukazuju da nema veće opasnosti od kolapsa strukture nakon provlažavanja. Ova grupa eolskih sedimenata je interesantna s obzirom da su na dijagramu koji sledi (slika 5.17) prikazani rezultati dobijeni ispitivanjem u tipičnom kolapsibilnom lesu i drugim lesolikim sedimentima preuzetih iz literature. Manja odstupanja izmerenih od procenjenih

vrednosti G_0/σ_v' su verovatno posledica prisustva CaCO_3 koji međusobno povezuje zrna tla slabim cementnim vezama. Ta pojava je uobičajena za lesolike sedimente.



Slika 5.17. Preporučeni SBT dijagram sa nanetim rezultatima za kolapsibilni les, lateritska i saprolitska tla

Na slici 5.17 prikazan je dijagram na kome su naneti rezultati za tla kod kojih se očekuje da imaju izraženu mikrostrukturu u najvećoj meri zbog prisustva cementacije. Karakteristično za sve grupe tla prikazane na dijagramu, datom na slici 5.17, je to da je reč o nezasićenom tlu. Tačke koje se odnose na kolapsibilno tlo ograničene su crvenom linijom. Tipičan primer takvog tla jeste kolapsibilni les „Zemunskog lesnog platoa” i teritorije AP Vojvodine (lokacija 1, 3 i 19). Kod ove vrste tla rezultati SDMT opita su veoma specifični, a detaljnije će biti obrađeni u poglavlju 7. Razlika u izmerenim i procenjenim vrednostima G_0/σ_v' je veoma izražena (i do nekoliko puta) što ukazuje na znatno prisustvo mikrostrukture.

Sledeću grupu čine tropска tla iz Brazila, i to lateriti i saproliti. Podaci za ovu grupu preuzeti su iz Rocha i sar. (2015), Giacheti i sar. (2006). Lateritska tla imaju izraženu mikrostrukturu (cementaciju) koja je posledica procesa laterizacije (ispiranje silikata u vidu rastvora što dovodi do povećanja oksida i hidroksida gvožđa i aluminijuma u tlu) karakterističnog za tropске klimatske uslove. Takođe, lateritska tla su poznata i po tome da imaju izraženu poroznu strukturu i male zapreminske težine pogotovo u prvih par metara ispod površine terena gde je proces laterizacije najizraženiji. Zato je jedan od čestih geotehničkih problema kod njih kolaps strukture tla nakon provlažavanja (Rocha i sar., 2015). Iz tog razloga su na dijagramu tačke koje predstavljaju rezultat dobijen u prvih pet metara ograničene crvenom linijom da bi se ukazalo da je ovo tlo kolapsibilno u uslovima intenzivnog provlažavanja. Kriterijum za izdvajanje ovih tačaka u odnosu na ostale tačke koje se odnose na dubine veće od 5 m su niže zapreminske težine u prirodnom stanju vlažnosti u prvih 5 m (videti Rocha i sar., 2015, slika 7). Sa dijagrama na slici 5.17 vidi se da lateritska tla imaju i nekoliko puta veću izmerenu vrednost G_0/σ_v' od procenjene. To je u saglasnosti sa izraženom mikrostrukturom kod ove vrste tla. Kada se uporede rezultati sa lokacije 15 i 18 (slika 5.15) sa rezultatima za lateritska tla vidi se da zauzimaju približno isti položaj na dijagramu, međutim odnos G_0/σ_v' je znatno veći kod lateritskog tla. To nesumnjivo ukazuje na prisustvo mikrostrukture kod laterita za razliku od peskova, lokacije 15 i 18, kod kojih ona nije izražena.

Saprolitska-rezidualna tla nisu zahvaćena procesom laterizacije pa samim tim treba očekivati da imaju slabije razvijenu mikrostrukturu od laterita na šta ukazuju neznatno više izmerene od procenjenih vrednosti G_0/σ_v' . Obe grupe tla prema USCS klasifikacionom sistemu spadaju u zaglinjene prašinaste peskove SM-SC.

Rezultat za Brazilske porozne gline preuzet je iz Ortigao (1994) i Ortigao i sar. (1995). Ovo tlo spada u grupu lateritskih tla sa visokim koeficijentom poroznosti ($e \sim 1,7$) i niskim zapreminskim težinama u suvom stanju ($\gamma_d < 10 \text{ kN/m}^3$). Za razliku od prethodne grupe tla prema USCS klasifikaciji to tlo spada u prašine visoke plastičnosti (MH). Tačke prikazane na dijagramu odnose se na rezultat dobijen iznad nivoa podzemne vode (do 10 m dubine). Kod ove grupe tla ne postoji podatak o veličini G_0/σ_v' , odnosno nije vršeno merenje V_s prilikom izvođenja opita (u to vreme seizmički modul još uvek nije bio razvijen). Iz tog razloga nije moguće uporediti izmerene i procenjene vrednosti G_0/σ_v' . Međutim, značajna je izdvojena zona potencijalno kolapsibilnih tačaka. Zona je

izdvojena crvenom linijom na osnovu tačaka dobijenih na dubinama gde postoji opasnost od kolapsa nakon provlažavanja.

Devincenzi i Canicio (2001) prikazali su rezultat DMT opita izvedenog u Španiji u kolapsibilnim lesolikim prašinama (ML, $e \sim 0.6$, $\gamma_d < 16 \text{ kN/m}^3$) u prirodnom stanju vlažnosti ($S_r = 50\%$) i nakon zasićenja. Sa dijagrama na slici 5.17 može se videti da se pre provlažavanja ispitano tlo ponaša kao grubozrno dilatantno tlo, a nakon zasićenja kao grubozrno kontraktivno. Ovo se može pripisati gubitku kohezije, odnosno cementacije nakon provlažavanja. Ne postoji podatak o veličini izmerenog G_0 , ali je značajan položaj tačaka kolapsibilnog tla na dijagramu koji je ograničen crvenom linijom.

Na dijagramu su prikazani i rezultati dobijeni ispitivanjem u lesolikim prašinama (donja zona lesnog horizonta) u zapadoj Poljskoj. Rezultat je preuzeti iz Mlynarek i sar. (2015). Autori navode da pomenuto tlo nema izraženu mikrostrukturu i da nema izraženu kolapsibilnost. Sa dijagrama se može videti da su izmerene i procenjene veličine G_0/σ_v' približne što potvrđuje da tlo ne poseduje znatnu mikrostrukturu. Poređenjem dijagrama datih na slikama 5.16 i 5.17 vidi se da lesoliki sedimenti lokacije 1 i 22 zauzimaju približno isti položaj kao i lesolike prašine iz Poljske. Prepostavlja se da sedimenti sa lokacije 1 i 22 imaju nešto izraženiju cementaciju s obzirom na nešto veća odstupanja izmerenih od procenjenih vrednosti G_0/σ_v' . Treba zapaziti da i ovi sedimenti, kao i lesolike prašine lokacije 1 i 22, zauzimaju položaj gotovo na samoj graničnoj liniji koja deli dilatantna od kontraktivnih tla.

Prikazani rezultati ukazuju na sledeće:

- odstupanje izmerene od procenjene veličine G_0/σ_v' može da ukaže na prisustvo mikrostrukture,
- što je odstupanje veće značajnije je prisustvo mikrostrukture u tlu,
- kada je odnos izmerenih i procenjenih G_0/σ_v' veći od 1.5 tlo ima izraženu mikrostrukturu,
- tla sa mikrostrukturom mogu da budu izrazito kontraktivna i izrazito dilatantna,
- kolapsibilna tla nemaju jedinstven položaj na dijagramu, niskoplastična (CL i ML) kolapsibilna tla ponašaju se kao grubozrna ($I_D > 1.8$), a visokoplastična (MH) kolapsibilna tla ponašaju se kao kontraktivna i nalaze se u prelaznoj zoni,

- izuzev u čistim peskovima i mladim, NC glinama ne preporučuje se da se G_0 procenjuje sa dijagrama prikazanog na slici 5.14 na osnovu dobijenih I_D i K_D iz opita,
- uvek je bolje direktno odrediti G_0 iz izmerenih V_s ,
- najniže vrednosti G_0/σ_v' imaju finozrna kontraktivna tla (FC) bez mikrostrukture, a najviše finozrna dilatantna tla (FD) sa izraženom mikrostrukturom (lavori), kolapsibilni les Zemunskog lesnog platoa i lateritska tla i
- podobnost parametra G_0/σ_v' za određivanje prisustva mikrostrukture u tlu iz prelazne zone ($0.6 < I_D < 1.8$) je potrebno dopunsko istražiti.

5.5. Zapreminska težina u prirodnom stanju

Postoje brojne korelacije na osnovu kojih može da se izvrši procena zapreminske težine tla u prirodnom stanju vlažnosti iz penetracionih opita. Sa dijagrama prikazanog na slici 5.3 moguće je proceniti zapreminsku težinu na osnovu prelaznih parametara I_D i E_D . To omogućava da se γ proceni iz rezultata mehaničkog DMT opita. Međutim, ukoliko se izvede SDMT opit moguće je zapreminsku težinu u zasićenom stanju proceniti na osnovu veličine normalizovane brzine smišćućih talasa (V_{s1}) preko sledeće jednačine (Mayne 2007):

$$\gamma = 4.17 \ln(V_{s1}) - 4.03 \quad (5.4)$$

Pri čemu je:

$$V_{s1} = \frac{V_s}{(\frac{\sigma_v'}{p_a})^{0.25}},$$

σ_v' – vertikalni efektivni napon u tlu i

p_a – atmosferski pritisak u istim jedinicama kao i σ_v' .

Zapreminska težina iz jednačine 5.4 određuje se iterativnim postupkom s obzirom da σ_v' zavisi od γ .

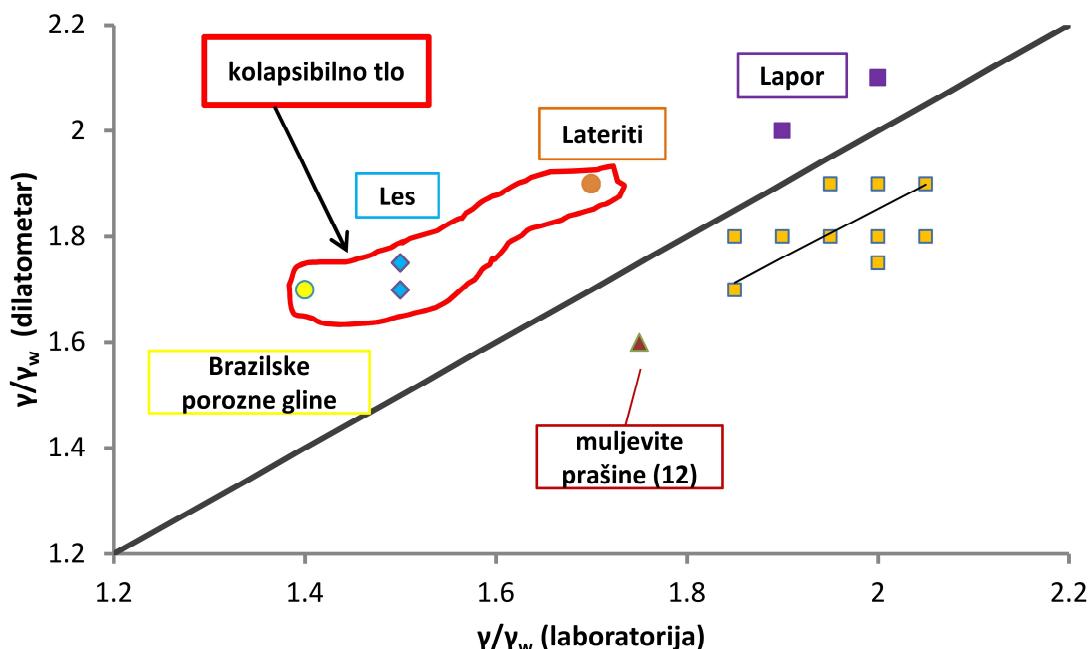
U tabeli 5.3 prikazane su γ dobijene iz DMT opita (slika 5.3), jednačine 5.4 i rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla iz bušotina u neposrednoj blizini izvedenih SDMT/DMT opita. Laboratorijski određene γ odnose se na relativno homogene slojeve tla izdvojene u fazi istražnog bušenja. Iz tabele 5.3 vidi se da γ najviše varira kod slojeva najveće debljine. Prašinasto-peskovita frakcija znatno doprinosi varijabilnosti γ , a mogući uzrok je različiti stepen poremećenosti uzorka u fazi bušenja i laboratorijskih ispitivanja. Primena prosečnih vrednosti umanjuje potencijalnu grešku. Brojevi lokacija označeni asteriksom (*) odnose se na rezultate dobijene ispod nivoa podzemne vode.

Tabela 5.3. Dokumentovani podaci za DMT/SDMT opite i zapreminske težine

Lokacija	Opis tla	Raspon dubine (m)	Bezdim. zapr. težina (γ/γ_w) – lab.	DMT I_D	DMT K_D	DMT γ_{DMT}/γ_w	SDMT V_s (m/s)
1	prašine lesolike	6-10	1.7-1.8	0.7-1.8	3.5-4.0	1.7-1.9	290-340
2*	prašine peskovite	3-6	1.9	1.0-1.8	2.2-5.5	1.8	180-220
3*	lesoidna glina	16-21	1.9-2.0	0.8-1.2	1.8-2.5	1.8	
4*	meka glina	18-30	1.8-2.0	0.3-0.5	1.3-1.8	1.8	
5*	tvrda ispicala glina	2-11	1.9-2.1	0.91-1.31	4-24	1.9	
7*	prašinasto, peskovite gline	6-10	1.9-2.1	0.6-1.15	4-7.5	1.8	240-300
8	tvrda glina	8.3-8.6	2.05	0.93-0.97	3.9-4.3	1.8	
10*	prašine glinovite	3-18	1.9-2.1	0.43-0.78	3.5-6.5	1.8	
11*	tvrde gline	3.5-7	1.9-2.0	0.7-1.0	6-8	1.9	250-300
12*	muljevite prašine	9-15	1.8-1.9	0.2-0.35	2.4-3.7	1.6	160-200
13	tvrde gline	3-7	2.0-2.1	0.7-1.3	5.5-14	1.9	230-310
13*	lapor	>27	1.9	0.3-0.4	7	2.0	
14*	lavorovite gline, ispucale	10-13	1.9-2.0	0.54-0.93	3.5-6.7	1.9	
15	prašina glinovito, peskovita	2-5	1.9-2.1	0.8-1.2	4-8	1.7-1.9	200-260
17*	gline prašinaste i prašine glinovite	2.5-5.5	2.0	0.7-1.1	4-11	1.7-1.8	200-300
18*	gline prašinaste i prašine glinovite	2-9	1.7-2.0	0.4-1.5	4-8	1.7-1.9	180-300
22	prašine - lesolike	3-6	1.9-2.0	1.0-1.3	4-5	1.8	210-220
24*	lapor	>9	1.9-2.1	0.4-0.55	13-24	2.1	300-700
1	kolapsibilni les	2.5-12	1.5	3.0-8.5	0.3-1.7	1.7-1.8	220-390
3	kolapsibilni les	2-6	1.5	1.9-12.0	0.3-1.2	1.7	260-315

Poređenje γ određenih u laboratoriji i iz DMT opita (tabele 5.3) prikazano je grafički na slici 5.18. Za poređenje korišćene su prosečne laboratorijske vrednosti. Na dijagramu su prikazani rezultati za:

- a) tla bez znatne mikrostrukture,
- b) tla sa izraženom mikrostrukturu (brazilske gline, les, lateriti, lapor, muljevite prašine).



Slika 5.18. Komparacija γ određenih laboratorijski i iz DMT opita

Minimalne veličine zapreminske težine, koje su ovde razmatrane, su 14.7 kN/m^3 , a maksimalne 20.5 kN/m^3 . Sa dijagrama, prikazanom na slici 5.18, uočavaju se sledeći tendovi:

- procenjene zapreminske težine iz DMT opita niže su u odnosu na referentne (laboratorijske) vrednosti kod tla bez mikrostrukture, pri čemu je relativna greška je u najvećem broju slučajeva ispod 10 %,
- dijagram ima sličnosti sa dijagramom prikazanim na slici 5.5, za tla bez mikrostrukture,
- procenjene zapreminske težine iz DMT opita su veće u odnosu na referentne (laboratorijske) vrednosti kod tla sa izraženom mikrostrukturu (izuzev

muljevitih prašina), a razlog je to što dijagram prikazan na slici 5.3 nije izведен za tla sa izraženom mikrostruktururom,

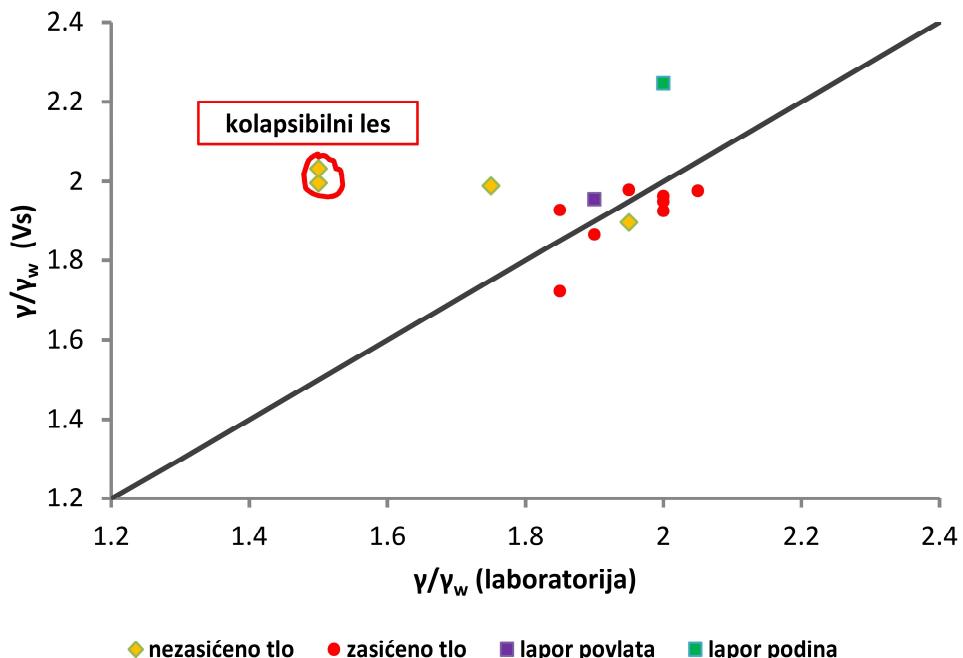
- kod kolapsibilnog tla najveće je odstupanje procenjenih zapreminskeih težina iz DMT opita u odnosu na referentne vrednosti, a relativna greška iznosi od 12 % do 21 %,
- kod kolapsibilnog lesa relativna greška iznosi približno 15 % (Berisavljević i sar., 2014).

Kod kolapsibilnog tla preporučuje se da se γ redukuje za 15 % kada se koristi za proračun G_0 , jer je u suprotnom ista tolika greška u njegovom određivanju.

Na slici 5.19 prikazana je komparacija γ određenih laboratorijski i iz jednačine 5.4 (na osnovu izmerene veličine V_s). U proračunu normalizovane brzine smičućih talasa korišćena je prosečna V_s za dati sloj. U laporima (lokacija 24) V_s ima brzi prirast sa dubinom (od 300 m/s na 9 m do 700 m/s na 17 m), što može da bude posledica različitog stepena cementacije i prekonsolidacije povlatnog od dubljih delova sloja. Zato je kod određivanja V_{s1} korišćena i minimalna i maksimalna vrednost V_s izmerena u sloju. Sa dijagraama, prikazanom na slici 5.19, uočavaju se sledeći trendovi:

- Zapreminske težine zasićenog tla određene iz jednačine 5.4 neznatno odstupaju od referentnih vrednosti. Relativna greška je manja od 7 %.
- Zapreminske težine nezasićenog tla mogu značajno da odstupaju od laboratorijskih vrednosti. Najveće odstupanje je kod kolapsibilnog lesa gde je prosečna relativna greška 34 %. Položaj tačaka u gornjem levom uglu kod cementiranog tla je očekivan s obzirom da imaju visok koeficijent poroznosti (niske γ), dok s druge strane cementacija povećava V_s . S obzirom na moguća značajna odstupanja, kao i činjenicu da je jednačina 5.4 izvedena za zasićena tla, ne preporučuje se njena upotreba za određivanje γ kod nezasićenog tla.
- Kod jako cementiranog tla, kao što je lapor (podina), relativna greška u odnosu na referentne vrednosti može da bude i preko 7 %.

Na osnovu prikazanih rezultata preporučuje se da se za procenu γ zasićenog tla koristi jednačina 5.4.



Slika 5.19. Komparacija γ određenih laboratorijski i iz V_s (jedn. 5.4)

Jednačina 5.5 može da se koristi za određivanje zapreminske težine u zasićenom stanju iz prelaznih DMT parametara (Mayne, 2009):

$$\gamma_t = 1.12 \gamma_w \left(\frac{E_D}{p_a} \right)^{0.1} (I_D)^{-0.05} \quad (5.5)$$

5.6. Istorija opterećenja i zbijenost tla

Istorija opterećenja kod glina kontroliše mnoge aspekte mehaničkog ponašanja, uključujući zapreminske promene tokom konsolidacije, naponsku dilatanciju, promenu pornih pritisaka, vršnu čvrstoću i dr.

Brojni su razlozi koji dovode do prekonsolidacije prirodnog tla, a kako je ponašanje tla uslovljeno promenom efektivnog naponskog stanja, bilo kakva promena *totalnih napona* ili *pornih pritisaka* može da izazove prekonsolidaciju tla. Primer prekonsolidacije izazvane promenom totalnih napona mogu biti: erozija, povlačenje glečera, iskop materijala (temeljni iskop), itd. Prekonsolidacija izazvana promenom pornih pritisaka nastaje usled: kolebanja nivoa podzemne vode, dreniranja i crpenja

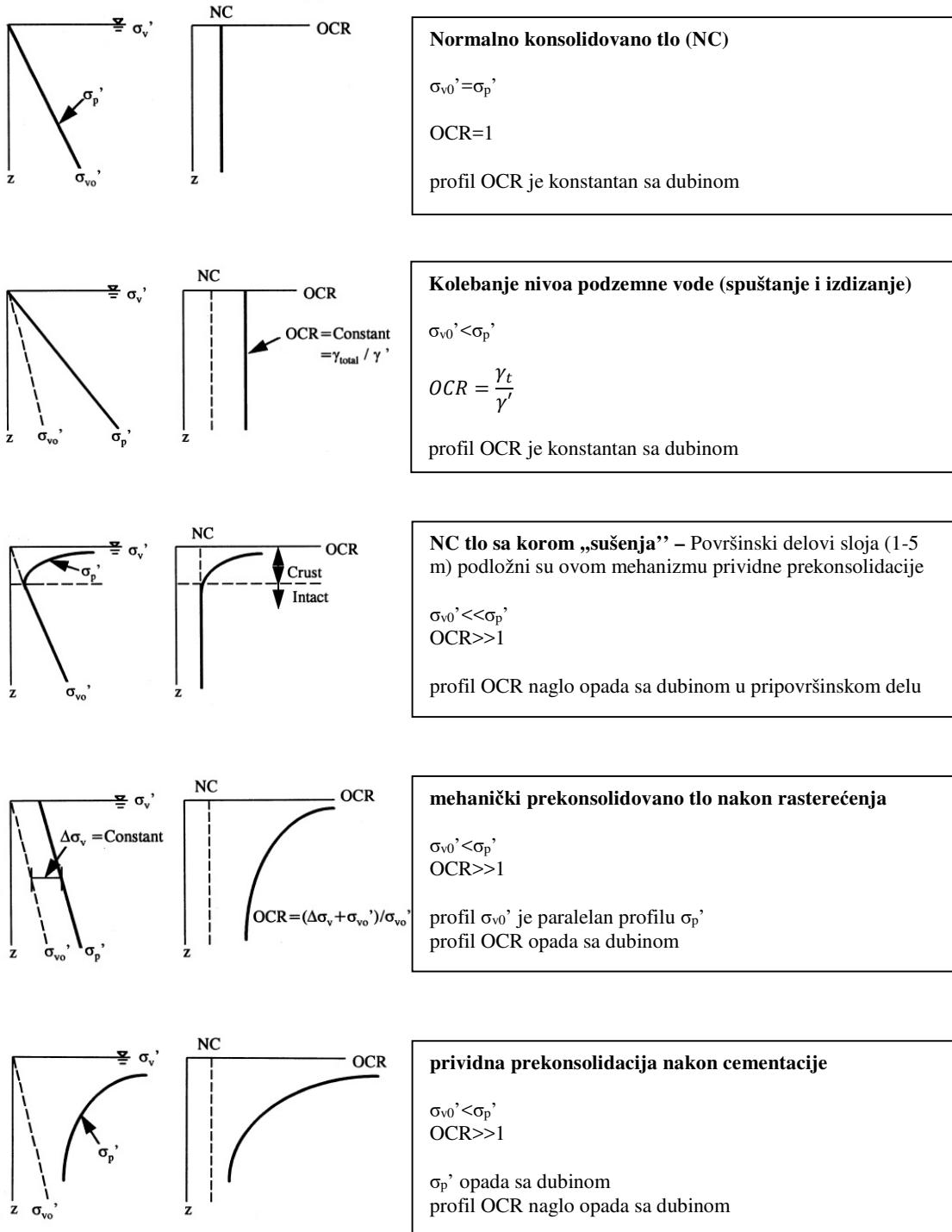
vode iz tla, isušivanja (desikacije) tla usled solarnih efekata ili kapilarnog penjanja, itd. Prividna prekonsolidacija može da nastane kao posledica cementacije ili starenja (sekundarne kompresije) o čemu je već bilo reči u prethodnim poglavljima. U prirodnom tlu udruženo delovanje gore pomenutih mehanizama može da dovede do prekonsolidacije čime se dobija kompleksan vertikalni profil tla sa aspekta istorije opterećenja. Jamiolkowski (1985) je izdvojio sledeće mehanizme koji izazivaju prekonsolidaciju tla:

- A** Mehanički koji nastaju usled promene težine nadsloja ili nivoa podzemne vode,
- B** Desikacija koja nastaje usled evaporacije i mržnjenja tla,
- C** Puzanje (starenje) usled sekundarne kompresije i
- D** Fizičko-hemiske pojave koje dovode do pojave cementacije i drugih vidova međuzrnskih veza.

Na slici 5.20 prikazani su vertikalni profili istorije opterećenja izazvane različitim mehanizmima.

5.6.1. Stepen prekonsolidacije (OCR) i napon prekonsolidacije (p_c')

Interpretacija rezultata edometarskog opita izvedenog na neporemećenim uzorcima finozrnog tla omogućava da se odredi istorija opterećenja datog sloja, odnosno efektivni napon pri kome dolazi do intenzivnijeg deformisanja uzorka daljim nanošenjem vertikalnog opterećenja. U zavisnosti od mehanizma koji izaziva efekat prekonsolidacije taj napon se naziva napon puzanja (σ_y') – mehanizmi B, C i D prema Jamiolkowski (1985) – ili napon prekonsolidacije (p_c') ukoliko je njegov uzrok mehanička prekonsolidacija (mehanizam pod A, prema Jamiolkowski, 1985). U prašinastim i peskovitim materijalima procena σ_y' (p_c') je znatno teža s obzirom na teškoće koje nastaju prilikom uzorkovanja.



Slika 5.20. Promena OCR sa dubinom u zavisnosti od mehanizma koji izaziva prekonsolidaciju (Chen i Mayne, 1994)

Normalizovan, bezdimenzionalni oblik istorije opterećenja (stepen puzanja, eng. „yield stress ratio“) dat je u vidu jednačine 5.5 (Mayne, 2014):

$$YSR = \frac{\sigma_y'}{\sigma_{v_0'}} \quad (5.5)$$

Još jedan alternativni naziv za napon puzanja je i „prividni napon prekonsolidacije” (Alonso i sar., 1990).

Češće se pominje stepen prekonsolidacije (OCR), dat jednačinom 5.6, koji se odnosi na mehaničku prekonsolidaciju, odnosno na prekonsolidaciju nastalu erozijom nad sloja, spuštanjem nivoa vode, povlačenjem glečera, itd.

$$OCR = \frac{p_c'}{\sigma_{v_0'}} \quad (5.6)$$

U daljem tekstu koristiće se ustaljen naziv „napon prekonsolidacije” i on treba da ukaže da tlo do tog nivoa napona ima bolja mehanička svojstva u odnosu na mehanička svojstva za više nivoe napona.

Iz DMT opita OCR može da se odredi na dva načina:

- a) direktno iz korelacije sa K_D i
- b) indirektno iz p_c' iz korelacije sa K_D .

5.6.1.1. Određivanje OCR u finozrnom tlu

U tabeli 5.4 prikazane su korelacije između stepena prekonsolidacije i indeksa horizontalnog napona za finozrna tla ($I_D < 1.2$).

Jednačina 5.7 predstavlja opšti oblik jednačine između K_D i OCR.

$$OCR = nK_D^m \quad (5.7)$$

Parametar n kreće se u širokom rasponu od 0.225 do 2.7, dok se parametar m kreće od 0.84 do 1.67 i u najvećoj meri zavisi od plastičnosti (Lacasse i Lunne, 1988). Powel i Uglow (1988) i Lunne i sar. (1989) navode da na korelaciju između K_D i OCR utiče starost tla, pa tako izdvajaju korelacije za stara i mlada tla. Treba napomenuti da ne postoji opšte prihvaćena korelacija za sva tla. Međutim, Powel i Uglow (1988) navode

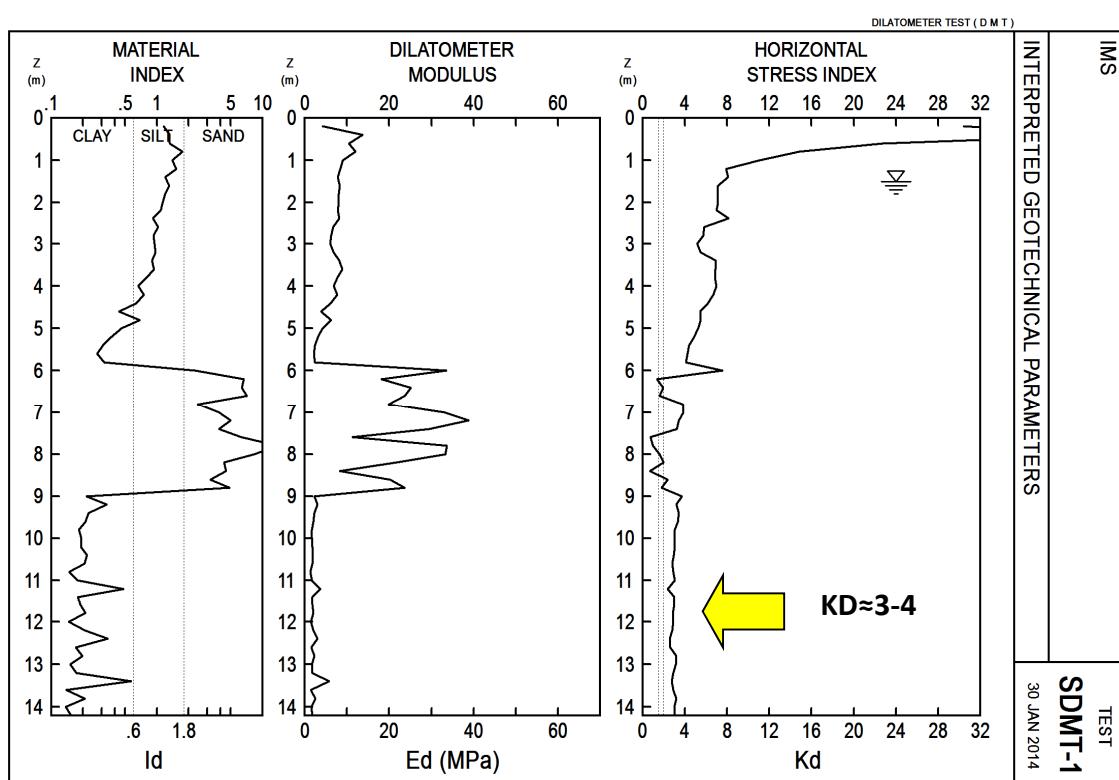
da ukoliko postoji pouzdano određena vrednost OCR i odgovarajuća vrednost K_D za dato tlo, linija koja definiše zavisnost između OCR i K_D za to tlo, može da se povuče paralelno sa linijom koja definiše zavisnost koju predlaže Marchetti (1980).

Tabela 5.4 Zavisnost između OCR i K_D za $I_D < 1.2$

Jednačina za OCR	Referenca	Napomena
Eksperimentalne		
$(0.5K_D)^{1.56} = 0.34K_D^{1.56}$	Marchetti (1980)	meke i srednje tvrde gline, bez mikrostrukture
$0.22K_D^m$ (m=1.35-1.67) važi za $OCR > 1.25$	Lacasse i Lunne (1988)	za veću plastičnost niže m.
$0.24K_D^{1.32}$ za mlade gline (≤ 70000 god.)	Powel i Uglow (1988)	za $K_D=3$, $OCR=1$
$0.3K_D^{1.17} = (0.36K_D)^{1.17}$ $s_u/\sigma_v' \leq 0.8$ (mlade gline) $2.7K_D^{1.17} = (2.34K_D)^{1.17}$ $s_u/\sigma_v' > 0.8$ (stare gline)	Lunne i sar. (1990)	
$10^{0.16(K_D-2.5)}$	Larsson (1989)	
$(0.5K_D)^{0.84} = 0.56K_D^{0.84}$	Chang (1991)	marinska glina (Singapur)
$(047K_D)^{1.43} = 0.34K_D^{1.43}$	Kamei i Iwasaki (1995)	
$10^{0.16(K_D-2.5)}$ $K_D \leq 5$ (Larsson, 1990) 2.51 + 0.368($K_D - 5$) $5 < K_D \leq 7.5$ $0.24K_D^{1.32}$ $K_D > 7.5$ (Powel i Uglow, 1988)	Larsson i Ahnberg (2005)	
$p'_c = 0.5(p_0 - u_0) \Rightarrow OCR = \frac{K_D}{2}$	Mayne (1987)	za $1 < OCR < 36$
Teorijsko-empirijske		
$K_D = K_{0NC}OCR^a + (s_u/\sigma_v')_{NC}OCR^mN_D$ $K_D = K_{0NC}OCR^a + (\frac{s_u}{\sigma_{v0}})_{NC}OCR^mN_D$ a=sinφ $m = \frac{(\lambda - k)}{\lambda}$ λ - nagib linije normalne konsolidacije k - nagib linije rekompresije $N_D = \frac{(p_0 - \sigma_h)}{s_u}$	Smith i Housby (1995)	jednodimenzionalno prosto rasterećenje; necementirane gline
$K_D = \frac{(6 - 2M)}{(6 + M)} OCR^{\frac{3M}{(6+M)}} + \frac{c_1 M}{2r^m} OCR^{(c_2+m)}$ c ₁ , c ₂ – konstante za dato tlo M=6sinφ/(3-sinφ)	Yu (2006)	Weald, kaolinitksa i londonska glina
$2(\frac{p_0 - \sigma_{v0}}{4.13\sigma_{v0}})^{1.18}$ $2(\frac{p_0 - \sigma_{v0}}{4.77\sigma_{v0}})^{1.18}$	Cao i sar. (2015)	marinska glina (Singapur)
$0.5K_D^{0.91}$	Singh i Chung (2015)	OCR≤3

Prvu korelaciju OCR- K_D predložio je Marchetti (1980). Jednačina je izvedena za pretpostavku (eksperimentalno dokazanu) da je $K_D \approx 2$ kod NC glina (OCR=1) bez mikrostrukture. Ukoliko je $K_D > 2$ (2.3) tlo je ili prekonsolidovano (OCR>1) ili je

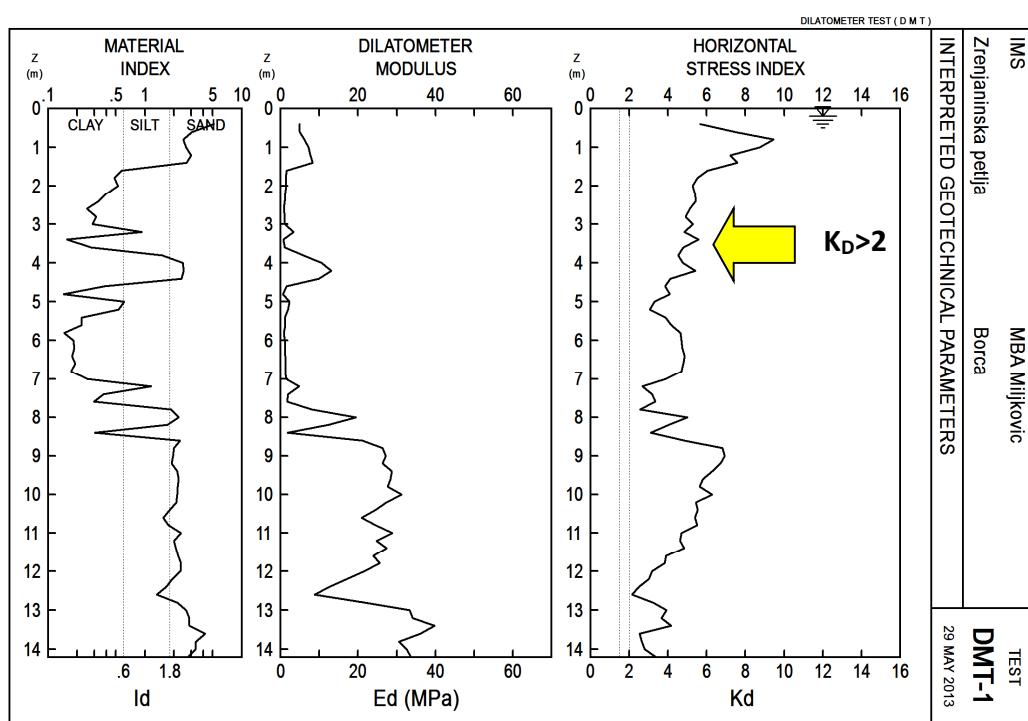
cementirano, vremešno, odnosno ima mikrostrukturu. Kod mehanički prekonsolidovanog tla K_D profil opada sa dubinom, slično profilu OCR, dok kod tla sa mikrostrukturom K_D je približno konstantan po dubini ($K_D \approx 3-4$). Na slici 5.21 prikazan je rezultat (prelazni DMT parametri) dobijen u vremešnim, cementiranim, NC glinama okoline Smedereva. Sa slike se vidi da je $K_D \approx 3-4$ i konstantan od 9.0 m do 14.0 m što odgovara dubini pojavljivanja tih glina.



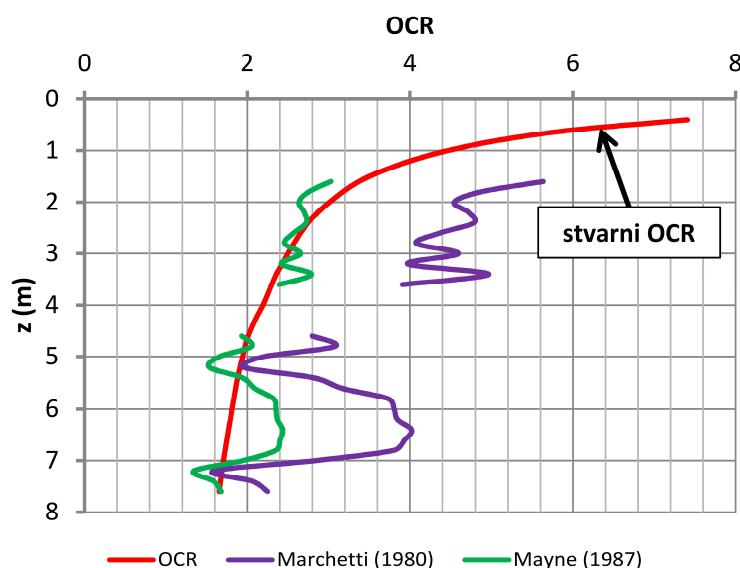
Slika 5.21. Profil K_D u cementiranoj, vremešnoj NC glini (lokacija 12)

U prekonsolidovanom tlu profil K_D po dubini ima oblik kao što je prikazano na slici 5.22. Ovaj profil je izabran jer je kod njega moguće približno rekonstruisati istoriju opterećenja, odnosno odrediti profil OCR po dubini u uslovima jednodimenzionalnog rasterećenja. Inicijalno, ovo tlo je bilo normalno konsolidovano i predstavlja mlade aluvijalne sedimente reke Dunav. Naime, DMT opit je izveden na dnu temeljnog iskopa izvedenog za potrebe fundiranja temelja mosta na lokaciji Zrenjaninske petlje kod Borče. Rasterećenje nakon iskopa iznosilo je oko 31 kPa ($1.7 \text{ m} \times 18 \text{ kN/m}^3$). Zapreminske težine određene su laboratorijski. Profil OCR prikazan je na slici 5.23. Na istoj slici dati su profili OCR određeni iz korelacije koje predlaže Marchetti (1980) i

Mayne (1987). Korelacija Marchetti (1980) znatno precenjuje vrednosti OCR u ovom slučaju, dok se procenjeni OCR iz korelacije koju predlaže Mayne (1987) bolje poklapa sa stvarnom veličinom OCR. Takođe, treba zapaziti da je varijabilnost manje izražena kod korelacije koju predlaže Mayne (1987).

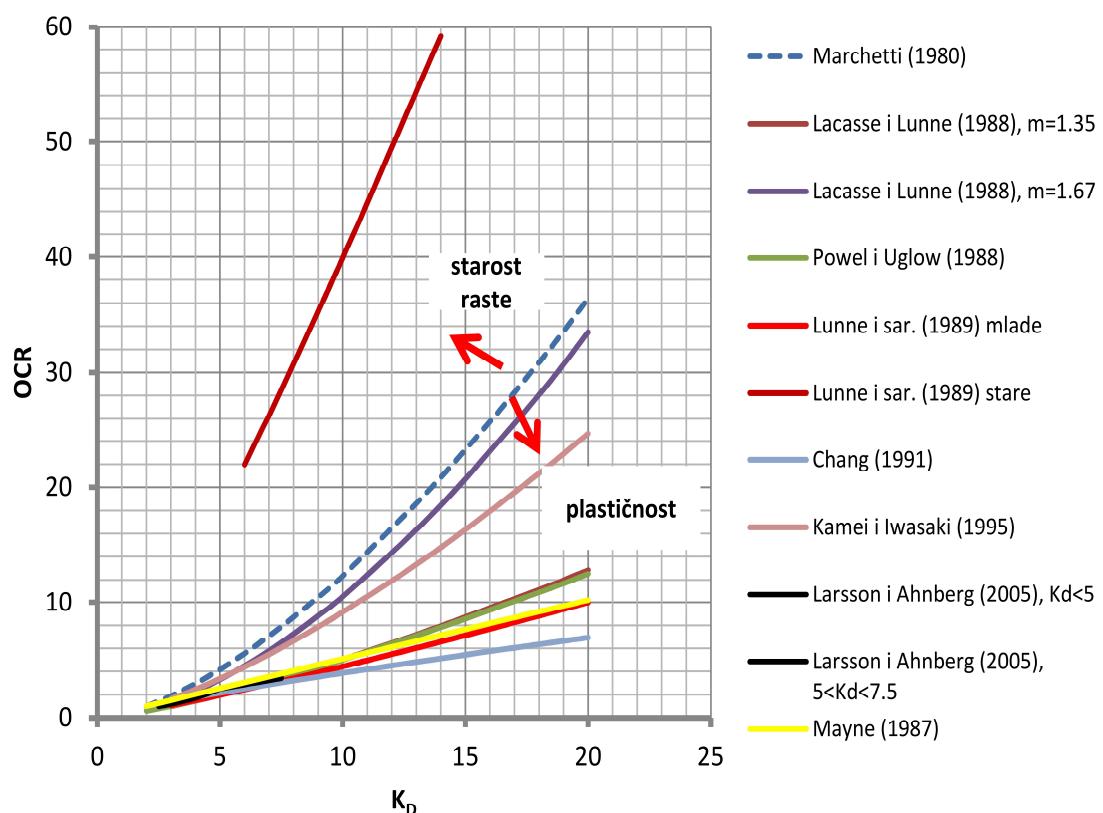


Slika 5.22. Profil K_D u mehanički prekonsolidovanom tlu (lokacija 16)



Slika 5.23. Komparacija korelacija za OCR iz DMT opita za $I_D < 1.2$

Korelacije iz tabele 5.4 prikazane su u vidu dijagrama na slici 5.24. Sa dijagrama se zapaža da najniže vrednosti OCR u zavisnosti od K_D daje korelacija Chang (1991), dok najviše vrednosti predviđa korelacija za stare gline Lunne i sar. (1989). Sa povećanjem K_D veća su odstupanja OCR između pojedinačnih korelacija za isti K_D . Sa dijagrama se zapaža da se osetljivost K_D na OCR smanjuje sa povećanjem plastičnosti, odnosno, sa povećanjem starosti sedimenta osetljivost K_D na OCR se povećava.



Slika 5.24. Empirijske korelacije OCR- K_D za $I_D < 1.2$

Na osnovu veoma ograničenog broja podataka, za finozrna tla bez mikrostrukture, preporučuje se upotreba korelacije koju predlaže Mayne (1987). Za tla kod kojih je mikrostruktura izražena, korelacije K_D -OCR treba da budu izolovane u odnosu na korelacije date za tla bez mikrostrukture. Osnovni razlog je što je K_D , osim na OCR, osetljiv i na cementaciju, starost, itd. pa su u budućnosti potrebna dodatna istraživanja.

5.6.1.2. Određivanje OCR u grubozrnom tlu

Na osnovu eksperimentalnih podataka Marchetti i sar. (2001) predlažu da se OCR peska odredi kombinovanjem q_c izmerenog iz CPT opita i M_{DMT} određenog iz DMT opita. Pomenuti autori navode da je u NC pesku $q_c/M_{DMT}=5-10$, dok je u prekonsolidovanim peskovima $q_c/M_{DMT}=12-24$. Pomenute granice su samo indikacija u kakvom stanju se pesak najverovatnije nalazi. Schmertmann (1988) daje sledeću jednačinu za određivanje OCR u pesku na osnovu rezultata DMT opita:

$$OCR = \frac{k_0}{1 - \sin\phi_{ax}}^{1.25 \sin\phi_{ax}} \quad (I_D > 1.2) \quad (5.8)$$

Pri čemu su:

k_0 – koeficijent bočnog pritiska tla u miru određen iz DMT opita (tabela 5.7),

ϕ_{ax} – osno-simetričan ugao smičuće čvrstoće određen iz ugla za ravno stanje deformacije ϕ_{ps} koji se dobija DMT opitom (Dodatak I).

Schmertmann (1988) navodi da jednačina 5.8 precenjuje vrednosti OCR u vremešnim i/ili cementiranim peskovima. Jednačina je namenjena za procenu OCR, kod tla bez znatne mikrostrukturi, nastalog kao posledica mehaničkog rasterećenja. Jednačina nije namenjena za određivanje prividne prekonsolidacije koja je posledica starenja ili cementacije ili oba. Dijagram na slici 5.13 može da pomogne pri utvrđivanju tla kod kojih je jednačina 5.8 upotrebljiva. Monaco i sar. (2014) daju sledeće korelacije za određivanje OCR u pesku ($I_D > 1.8$) dobijene na osnovu obimnih terenskih istraživanja izvedenih u venecijanskom tlu:

$$OCR = 0.0344 \left(\frac{M_{DMT}}{q_t} \right)^2 - 0.4174 \frac{M_{DMT}}{q_t} + 2.2914 \quad (5.9)$$

$$OCR = -0.0135 K_D^2 + 0.4959 K_D - 0.0359 \quad (5.10)$$

Pri čemu je:

q_t – ukupni otpor konusa (kod peska $q_c \approx q_t$).

Iz jednačine 5.10 vidi se da je $OCR=1$ za $K_D \approx 2.2$. Jednačina 5.9 ima širi karakter s obzirom da uzima u obzir i otpor konusa koji je mera čvrstoće tla, dok sa druge strane veličina ugla smičuće čvrstoće i relativna zbijenost, pored OCR, utiču na K_D .

5.6.2. Koeficijent bočnog pritiska tla u stanju mirovanja (k_0)

Odnos horizontalnog i vertikalnog efektivnog napona u tlu u uslovima sprečenog bočnog širenja ($\epsilon_h=0$) izražava se preko koeficijenta bočnog pritiska tla k_0 . On zavisi od veličine mobilisanog ugla smičuće čvrstoće tla (Mesri i Hayat, 1993). DMT opitom ne može direktno da se odredi k_0 s obzirom da pri utiskivanju dolazi do remećenja inicijalne strukture tla, međutim postoje empirijske korelacije iz kojih se k_0 određuje preko K_D . Te korelacije su prikazane u daljem tekstu.

5.6.2.1. Korelacija za finozrna tla

Osnovnu korelaciju za određivanje k_0 iz DMT opita dao je Marchetti (1980), a prikazana je u vidu jednačine 5.11.

$$k_0 = \left(\frac{K_D}{1.5}\right)^{0.47} - 0.6 \quad (5.11)$$

Korelacija je izvedena za italijanske gline bez znatne mikrostrukturi. Prilikom uspostavljanja korelacije referentnu vrednost k_0 Marchetti (1980) je odredio iz izraza koji daju Brooker i Ireland (1965), odnosno referentna vrednost nije izmerena veličina već procenjena na osnovu pomenute empirijske jednačine. Brojni autori modifikovali su jednačinu 5.11 prilagodivši je lokalnim uslovima i vrsti tla u kojima su vršena ispitivanja. Referentne vrednosti k_0 uglavnom su određivane na osnovu terenskih opita (krilna sonda, naponska čelija, različite vrste presiometara,...) ali i na osnovu k_0 – triaksijalnog opita i k_0 – edometra. U tabeli 5.5 prikazane su korelacije iz literature između K_D i k_0 za finozrna tla.

Tabela 5.5. Korelacije između K_D i k_0 za $I_D < 1.2$

Jednačina za k_0	Referenca	Napomena
Eksperimentalne		
$k_0 = \left(\frac{K_D}{1.5}\right)^{0.47} - 0.6$	Marchetti (1980)	tla bez mikrostrukture
$0.34K_D^m$ ($m=0.44-0.64$) važi za $K_D < 4$	Lacasse i Lunne (1988)	niže m za veću plastičnost
$0.34K_D^{0.55}$ za mlade gline (≤ 70000 god.)	Powell i Uglow (1988)	
$0.34K_D^{0.54}$ za $s_u/\sigma_v' \leq 0.8$ (mlade gline) $0.68K_D^{0.54}$ za $s_u/\sigma_v' > 0.8$ (stare gline)	Lunne i sar. (1990)	meke do tvrde gline, za $K_D < 4$
$0.24K_D^{0.84}$	Larsson (1989)	
$0.27K_D$	Mayne i Kulhawy (1990)	k_0 određen iz SBPMT optira, 7 intaktnih i 5 ispučalih gline
$0.34K_D^{0.55} - \frac{15 - PI}{PI} 0.5 \left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}}\right)_{DMT}$	Sully (1991)	za PI=15 % jednačina se svodi na jednačinu Powell i Uglow (1988)
Teorijsko - empirijske		
$K_D - k_0 = \left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}}\right)_{NC} \left(\frac{k_0}{k_{0NC}}\right)^{\frac{m}{a}} N_D$ značenje parametara dato je u tabeli 5.4	Smith i Houlsby (1995)	jednodimenzionalno prosto rasterećenje; necementirane gline
$K_D = k_0 + \frac{c_1 M}{2r^\lambda} \left(\frac{6+M}{6-2M}\right) K_0^{\frac{6+M}{3M}(c_2+\lambda)}$ značenje parametara dato je u tabeli 5.4	Yu (2006)	Weald, kaolinitksa i londonska gлина

Kulhawy i Mayne (1990) daju opšti oblik jednačine za k_0 :

$$k_0 = \left(\frac{K_D}{\beta_K}\right)^{0.47} - 0.6 \quad (5.12)$$

Pri čemu parametar β_K zavisi od vrste tla i geološkog porekla (Kulhawy i Mayne, 1990).

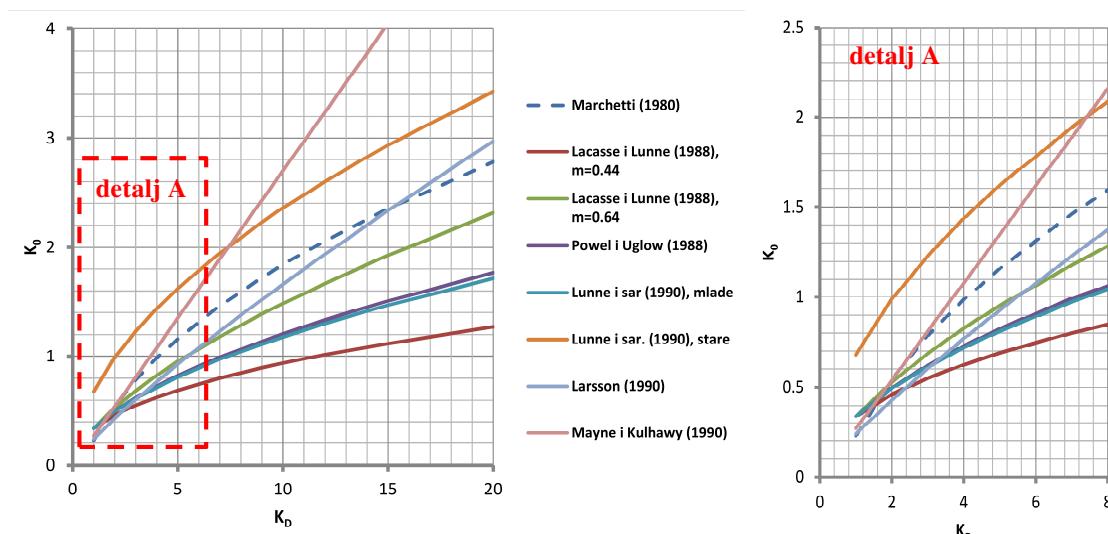
Za preliminarne faze istraživanja β_K može da se proceni iz tabele 5.6.

Tabela 5.6. Parametar β_K u zavisnosti od vrste tla

β_K	Vrsta tla
0.9	ispucale gline
1.5 (Marchetti, 1980)	ne osetljive gline
2	osetljive gline
3	glacijalni til

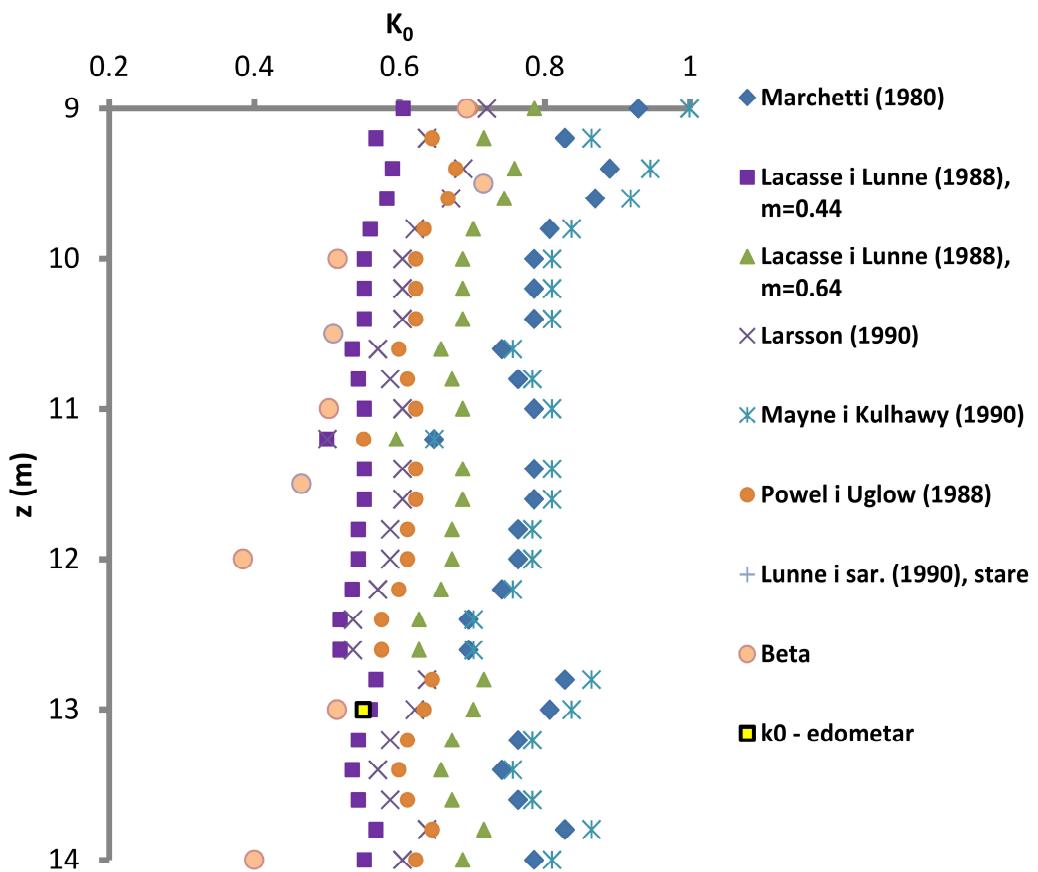
Eksperimentalne korelacije date u tabeli 5.5 prikazane su u vidu dijagrama na slici 5.25.

Sa dijagraama se vidi da postoje znatana odstupanja između korelacija, pogotovo za veće vrednosti K_D . Međusobna odstupanja ukazuju da empirijske korelacije uglavnom funkcionišu za određeni lokalitet na kome su vršena ispitivanja. Vrsta opita koji se koristi za određivanje referentne vrednosti k_0 je takođe bitan činilac koji utiče na međusobnu povezanost korelacija. Podobno bi bilo kada bi referentna vrednost k_0 uvek bila određena iz istog opita (laboratorijskog), npr. k_0 -edometara ili k_0 -triaksijalnog opita. Prepostavlja se da bi se na taj način međusobna odstupanja između korelacija donekle umanjila. Poteškoće u određivanju k_0 iz izmerenih vrednosti K_D nastaju u tlu kod koga je izraženo prisustvo mikrostrukture. U tom slučaju jedan deo izmerene veličine K_D je posledica mikrostrukture.



Slika 5.25. Empirijske korelacije K_D - k_0 za $I_D < 1.2$

Na lokaciji 12 (cementirane, vremešne, NC gline) Rudarsko-geološki fakultet iz Beograda 1982 god. izvršio je k_0 -edometarski opit, kod koga su pored vertikalnih deformacija mereni i horizontalni naponi. To je omogućilo da se dobije referentna vrednost k_0 pomenutog tla čiji je DMT profil prikazan na slici 5.21 (9-14 m). Referentna vrednost određena je na uzorku uzetom sa dubine od 13.0 m i iznosi $k_0 = 0.5$. Međusobno poređenje veličine k_0 određene iz korelacija datih u tabeli 5.5 zajedno sa referentnom vrednosti k_0 za lokaciju 12 prikazano je na slici 5.26.



Slika 5.26. Procena k_0 iz SDMT opita za $I_D < 1.2$ (lokacija 12)

Sa slike se vidi da sve korelacije precenjuju veličinu k_0 u odnosu na referentnu vrednost. Najpričniji vrednost referentnoj daje korelacija koju predlažu Lacasse i Lunne (1988) za $m=0.44$. Parametar m ima tendenciju da se smanjuje sa povećanjem plastičnosti (tabela 5.5) što je u suprotnosti sa ovde dobijenim rezultatom s obzirom da se radi o CL glini. To ukazuje da je parametar m zavistan i od mikrostrukture tla. Prepostavlja se da veličina parametra m opada sa povećanjem mikrostrukture i obrnuto. U tom smislu, potrebno je da se pre određivanja k_0 utvrdi da li je u tlu izraženo prisustvo mikrostrukture primenom dijagrama prikazanog na slici 5.14. Sa povećanjem odstupanja izmerenih od procenjenih vrednosti G_0/σ_v' preporučuje se da se usvoji niža vrednost parametra m i obrnuto. Raspon vrednosti parametra m kreće se od 0.44 do 1 (tabela 5.5).

Još jedan alternativni način za određivanje k_0 , jeste korišćenje parametara β_k iz jednačine 5.12. Ukoliko se prepostavi da se parametar β_k povećava sa prisustvom mikrostrukture,

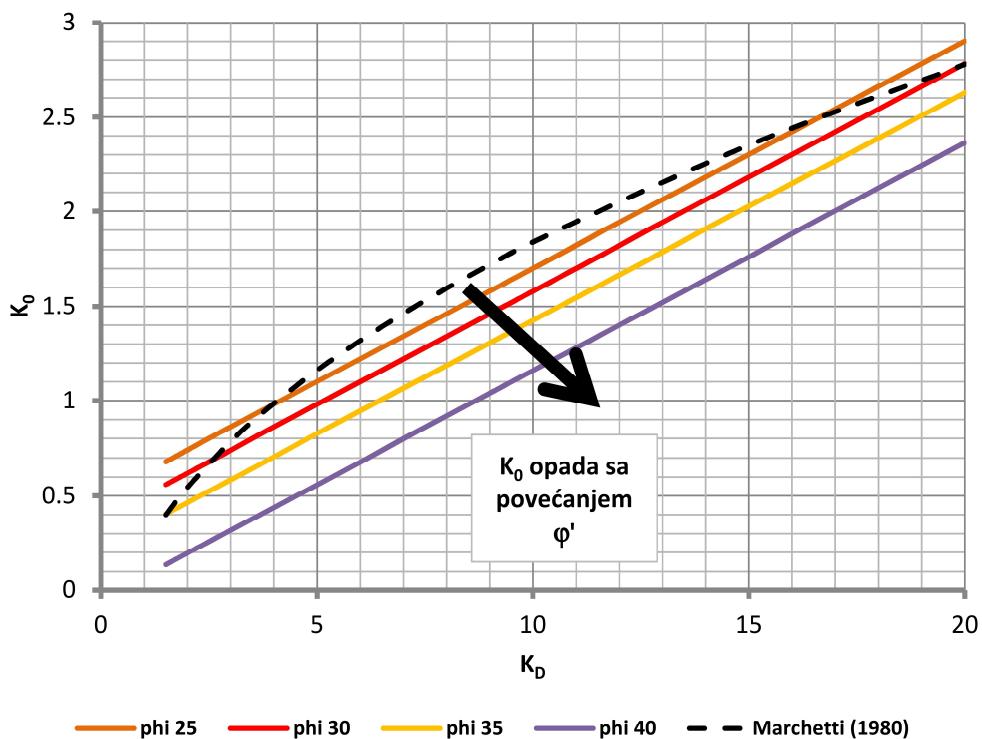
na šta ukazuje tabela 5.6, i ukoliko se usvoji da je β_k jednak odnosu izmerenih i procenjenih G_0/σ_v' onda je k_0 moguće odredi iz SDMT opita primenom jednačine 5.12. Parametar β_k kreće se u rasponu od 1.5 do 3 (izuzimajući ispucale gline). Ukoliko se ispitivanjem dobije da je odnos izmerene i procenjene vrednosti G_0/σ_v' veći od 3 usvaja se $\beta_k=3$. Ukoliko se dobije da je manji od 1.5 usvaja se $\beta_k=1.5$. Ovakav postupak nazvan je **beta** postupak. Rezultat upotrebe tog postupka, uporedo sa drugim korelacijama, prikazan je na slici 5.26. Prikazane načine određivanja k_0 iz DMT i SDMT opita potrebno je dodatno istražiti.

5.6.2.2. Korelacije za grubozrna tla

U pesku direktna korelacija između K_D i k_0 nije preporučljiva, jer K_D u velikoj meri zavisi od ugla smišuće čvrstoće (ϕ'), odnosno relativne zbijenosti peska (D_r). Na to je ukazao Schmertmann (1982, 1983) koji je na osnovu rezultata dobijenih u kalibracionoj komori (CC) dao zavisnost $k_0-K_D-\phi'$ (tabela 5.7). Grafički prikaz Schmertmann-ove jednačine dat je na slici 5.27. Slika pokazuje da zavisnost k_0 od K_D nije jedinstvena već zavisi od ϕ' . Fizički, to je razumljivo s obzirom da je u zbijenom pesku samo jedan deo K_D posledica k_0 , dok je preostali deo posledica ϕ' (D_r). Upotreba Schmertmann-ove jednačine podrazumeva upotrebu osno-simetričnog ugla smišuće čvrstoće (φ_{ax}'), koji je moguće odrediti indirektno iz DMT opita (videti Dodatak I).

Tabela 5.7. Korelacije između K_D i k_0 za $I_D>1.8$

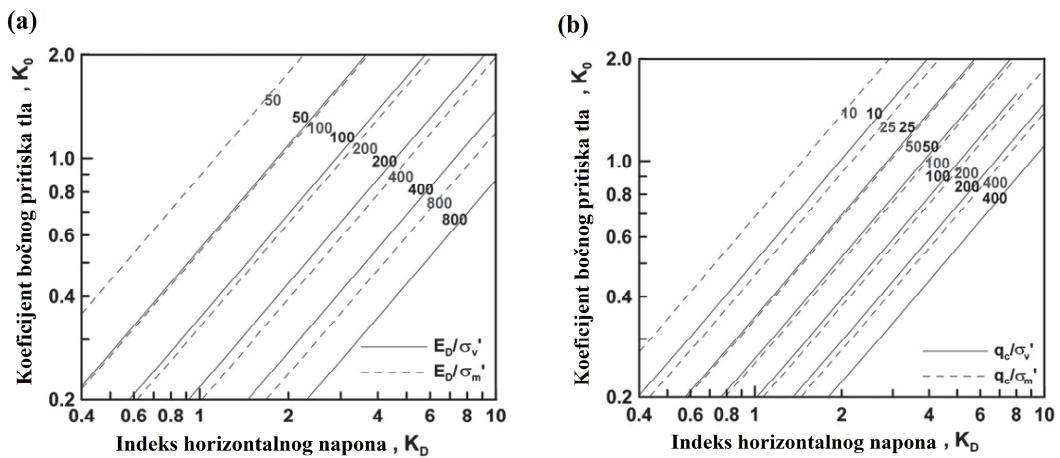
Jednačina za k_0	Referenca	Napomena
Eksperimentalne		
$\frac{40 + 23K_D - 86K_D(1 - \sin\varphi'_{ax}) + 152(1 - \sin\varphi'_{ax}) - 717(1 - \sin\varphi'_{ax})^2}{192 - 717(1 - \sin\varphi'_{ax})}$	Schmertmann (1983)	ispitivanje sprovedeno u CC
(I) $0.376 + 0.095KD - 0.0017\frac{q_c}{\sigma_{v0}'}$	Baldi (1986)	Ticino i Hokksund pesak (CC)
(II) $0.376 + 0.095KD - 0.0046\frac{q_c}{\sigma_{v0}'}$		



Slika 5.27. Korelacija k_0 - K_D u zavisnosti od ϕ' (modifikovano iz Schmertmann, 1983)

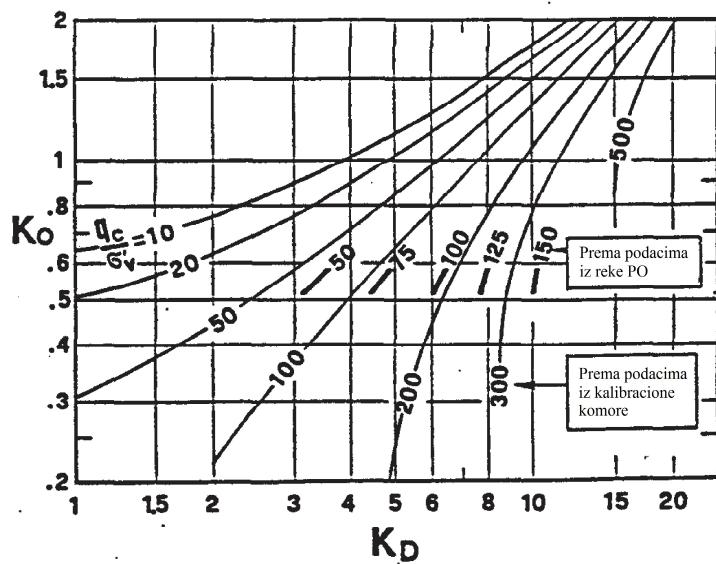
Jednačina I, iz tabele 5.7, koju daje Baldi (1986) dobijena je na osnovu rezultata paralelnih CPT i DMT opita u kalibracionoj komori u pesku koji je ugrađen postupkom pluviacije. Jednačina II dobijena je korigovanjem poslednjeg koeficijenta jednačine I kako bi se tačno predvideo k_0 prirodnog peska iz reke Po. Na osnovu ovih rezultata Marchetti (2015) preporučuje da se u „sezonskim” peskovima kao poslednji koeficijent koristi 0.005, dok kod „svež” istaloženih peskova može da se koristiti 0.002. Takav pristup zahteva dosta subjektivnosti, a kao mogući pokazatelj da li je pesak svež ili sezonski navodi se parametar K_D .

Lee i sar. (2011) daju dijagram, prikazan na slici 5.28, za određivanje k_0 iz rezultata DMT opita (slika 5.28 a) i iz kombinovanih rezultata CPT i DMT opita (slika 5.28 b). Sa dijagraama može se videti da su i E_D i q_c normalizovani sa σ_{v0}' , odnosno sa srednjim efektivnim glavnim naponom (σ_m'). Eksperimentalno utvrđene zavisnosti k_0 - K_D - E_D/σ_m' mogu da se koriste kako u NC tako i u OC pesku, dok zavisnosti k_0 - K_D - E_D/σ_{v0}' važe samo za NC pesak. Treba napomenuti da su pomenuti rezultati dobijeni ispitivanjem Busan peska u kalibracionoj komori.



Slika 5.28. Određivanje k_0 Busan peska: a) iz DMT; b) kombinovanjem CPT i DMT
(Lee i sar., 2011)

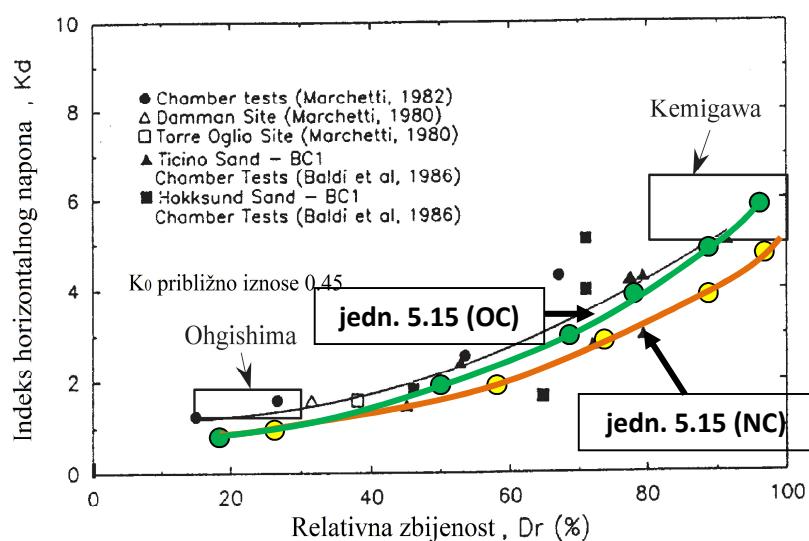
Schmertmann-ov postupak za određivanje k_0 (jedn. u tabeli 5.7) zahteva da se prvo odredi ugao smičuće čvrstoće složenim iterativnim postupkom (videti Dodatak I). Da bi pojednostavio postupak Marchetti (1985) daje dijagram prikazan na slici 5.29 sa koga je moguće proceniti k_0 ukoliko su poznati q_c i K_D . Dijagram je izведен kombinovanjem Schmertmann-ove $k_0-K_D-\phi'$ zavisnosti i Durgunoglu i Mitchell (1975) $q_c-k_0-\phi'$ zavisnosti. Na taj način Marchetti je eliminisao potrebu za procenom ϕ' kod određivanja k_0 .



Slika 5.29. Procena k_0 iz K_D i q_c (Marchetti, 1985)

5.6.3. Relativna zbijenost (D_R)

Procena relativne zbijenosti često predstavlja prelazni korak kod određivanja čvrstoće grubozrnog tla (Schmertmann, 1978). Brojna istraživanja ukazuju da relativna zbijenost (koeficijent poroznosti), kada se koristi samostalno, nije pouzdan parametar za opisivanje stanja u kome se nalazi grubozrno tlo (Robertson, 2010; Bolton, 1986; Been i Jefferies, 1985). Jedan od razloga je taj što je pri konstantnoj relativnoj zbijenosti ponašanje tla promenljivo u zavisnosti od veličine efektivnog naponskog stanja. Jamiolkowski i sar. (2001) i Mayne (2014) pokazali su da relativna zbijenost NC (i OC) peska zavisi i od njegove stišljivosti koja se dovodi u vezu sa mineralnim sastavom zrna od kog je izgrađen pesak. Određivanje D_R iz DMT opita nije jednostavan zadatak međutim postoje određena istraživanja koja će biti prikazana u daljem tekstu. Istraživanja su sprovedena u najvećoj meri u kalibracionoj komori (Jamiolkowski i sar, 2001), a mali deo i na zamrznutim uzorcima (npr. Tanaka i Tanaka, 1998). Marchetti i sar. (2001) preporučuju da se koristi dijagram dat na slici 5.30 za određivanje D_R kod NC peska bez mikrostrukture. Kod OC peska ili peska sa izraženom mikrostrukturom relativna zbijenost određena iz K_D , sa slike 5.30, biće precenjena (na strani nesigurnosti) s obzirom da na K_D veliki uticaj ima prekonsolidacija i/ili cementacija pored same relativne zbijenosti.



Slika 5.30. Korelacija K_D - D_R za mlade NC peskove bez mikrostrukture
(Marchetti i sar, 2001)

Jamiolkowski i sar. (2001) daju korelacije između D_R i q_D i D_R i K_D uspostavljene na osnovu 136 DMT opita izvedenih u kalibracionoj komori u tri dobro poznata peska, Ticino, Toyoura i Hokksund. Korelacije su prikazane jednačinama 5.13-5.15.

$$D_R = -1.082 + 0.204 \ln\left(\frac{q_D}{\sigma_{v_0}^{0.4}}\right), \quad q_D \text{ i } \sigma_v \text{ u istim jedinicama} \quad (5.13)$$

$$K_D = C_0(\sigma')^{C_1}(p_a)^{(1-C_1)} e^{C_2 D_R} \quad \Rightarrow \quad D_R = \frac{1}{C_2} \ln\left\{\frac{K_D}{C_0(\sigma')^{C_1}(p_a)^{(1-C_1)}}\right\} \quad (5.14)$$

$$K_D = A e^{(B*D_R)} \quad \Rightarrow \quad D_R = \frac{1}{B} \ln\left(\frac{K_D}{A}\right) \quad (5.15)$$

Pri čemu su:

q_D – otpor tla na prođor DMT sečiva,

C_0 – koeficijent ($0.0053 - 0.0066$),

C_1 – koeficijent ($-0.18 - -0.25$),

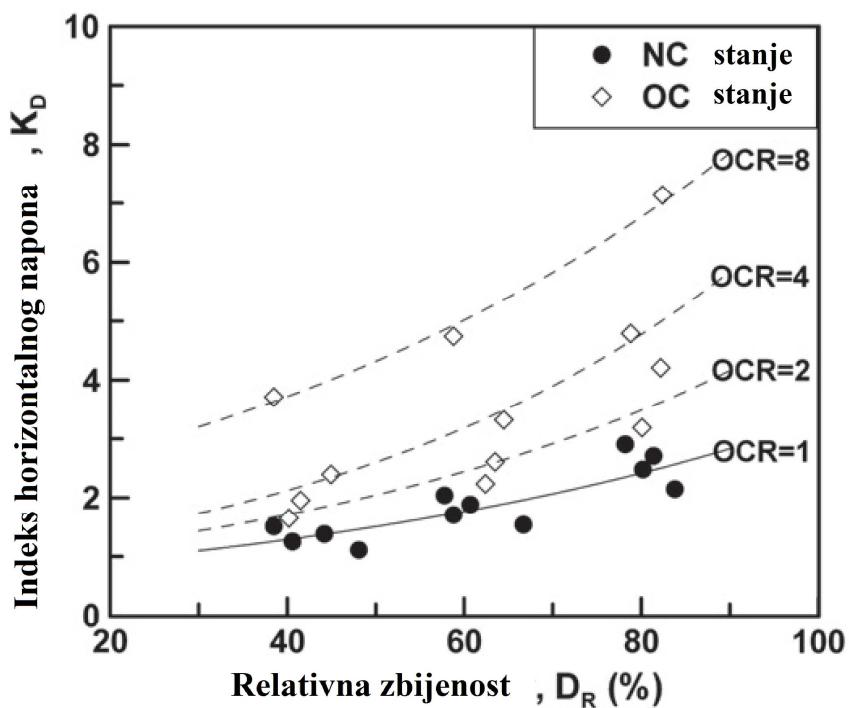
C_2 – koeficijent ($2.6 - 2.29$),

A – koeficijent eksperimentalno određen (0.53 NC pesak - 0.57 OC pesak) i

B – koeficijent eksperimentalno određen (2.42 NC pesak – 2.56 OC pesak).

Jednačina 5.15 data je u vidu dijagrama na slici 5.30 zajedno sa korelacijom koju predlažu Reyna i Chameau (1991). Sa slike se zapaža da je dijagram za NC pesak paralelan sa dijagramom koji daju Reyna i Chameau i nalazi se ispod njega. Dijagram za OC pesak prati dijagram koji daju Reyna i Chameau (za NC pesak) za vrednosti D_R veće od 50 %.

Treba zapaziti da je uticaj prekonsolidacije na izračunate D_R , prema jednačini 5.15 mali i da raste sa povećanjem D_R . Nešto drugačiji rezultat dobili su Lee i sar. (2011), koji su pokazali ispitivanjem Busan peska u kalibracionoj komori da OCR ima dominantan uticaj na korelaciju K_D-D_R , što je prikazano na slici 5.31.



Slika 5.31. Uticaj OCR na K_D - D_R zavisnost (Lee i sar., 2011)

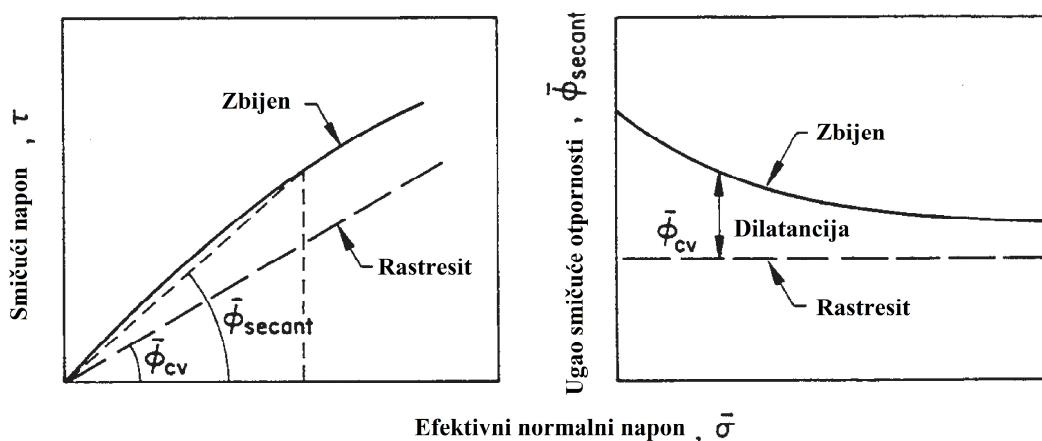
5.7. Parametri čvrstoće

5.7.1. Ugao smičuće čvrstoće peska (φ')

Drenirani (efektivni) ugao smičuće čvrstoće (φ') je fundamentalni parametar koji opisuje smičuću čvrstoću tla. Korelacija rezultata terenskih penetracionih opita sa φ' podrazumeva da se jednoznačno definiše koja referentna vrednost φ' se koristi pri korelaciji. Najčešće je to vrednost određena na neporemećenim uzorcima peska, uzorkovanim metodom zamrzavanja, u uslovina triaksijalne komresije (npr. Mayne, 2014; Mayne, 2015; Fioravante i sar., 2012). U ovom poglavlju su prikazane korelacije za određivanje vršnog ugla smičuće otpornosti (φ_p') iz rezultata SDMT opita. Vršni ugao smičuće otpornosti (φ_p') sastoji se iz dve komponente (Mayne, 2014, Atkinson, 2006): 1) ugla kritičnog stanja (φ_{cv}') i 2) ugla dilatancije (ψ_d). Ugao φ_{cv}' zavisi od oblika zrna, stišljivosti i mineralogije datog peska. Ugao dilatancije zavisi od relativne zbijenosti materijala (e_0 ili D_R) i naponskog stanja u tlu koje se izražava preko srednjeg

efektivnog glavnog napona $p' = \frac{\sigma_v' + 2\sigma_h'}{3}$ ili preko vertikalnog efektivnog napona (σ_v').

Vršni ugao (ϕ_p') se određuje za naponsko stanje u trenutku loma koje je dostignuto po prethodno odabranoj putanji napona koja odgovara problemu koji se analizira. Kod određivanja ϕ_p' treba uzeti u obzir i nelinearnost anvelope napona loma koja je posledica dilatantne prirode materijala. Zbijeni pesak ima izraženu nelinearnu anvelopu ($\phi_p' > \phi_{cv}'$) dok je kod rastresitog peska anvelopa praktično linear (slika 5.32). Vršni ugao (ϕ_p') se određuje kao sekantna vrednost, povučena iz koordinatnog početka do tačke na anvelopi kao što je prikazano na slici 5.32.



Slika 5.32. Određivanje ϕ_p' iz nelinearne anvelope napona loma

Veoma bitno je napomenuti da ϕ_p' zavisi i od vrste opita, odnosno graničnih uslova u opitu. Najčešće su u upotrebi vršni ugao: ϕ_{ptc}' - određen iz opita triaksijalne kompresije (rotaciono simetrično stanje deformacija), ϕ_{pps}' - određen u uslovima ravног stanja deformacije i ϕ_{pds}' – određen u aparatu za direktno smicanje. Zavisnost između ϕ_{ptc}' , ϕ_{pps}' i ϕ_{pds}' može se naći u literaturi (npr. videti Kulhawy i Mayne, 1990). Na veličinu ϕ_p' ima uticaj pravac u kome se vrši opterećenje (kompresija ili ekstenzija) i veličina srednjeg glavnog napona (σ_2). Ugao kritičnog stanja (ϕ_{cv}') ne zavisi od inicijalnog stanja u kome se nalazi tlo, odnosno ne zavisi od $D_R(\psi)$ ili OCR. Vrednosti se kreću u rasponu od 33° za kvarcene do 40° za biogene i koralne peskove i peskove sa feldspatom (Jamiolkowski i sar., 2001; Mayne, 2014). Ukoliko pesak nije čist, već sadrži prašinu u određenom iznosu ϕ_{cv}' ima tendenciju da opada (27° - 33°). S druge strane D_R znatno

utiče na ψ_d (Bolton, 1986, Kulhawy i Mayne, 1990) pri određenom naponskom stanju. Određivanje vršnog ugla smičuće otpornosti peska moguće je ukoliko su poznati ϕ_{cv}' i ψ_d kao što je prikazano jednačinom 5.16:

$$\phi_p' \approx \phi_{cv}' + \psi_d \quad (5.16)$$

Vršni ugao smičuće otpornosti peska moguće je, iz rezultata SDMT opita, odrediti na sledeći način:

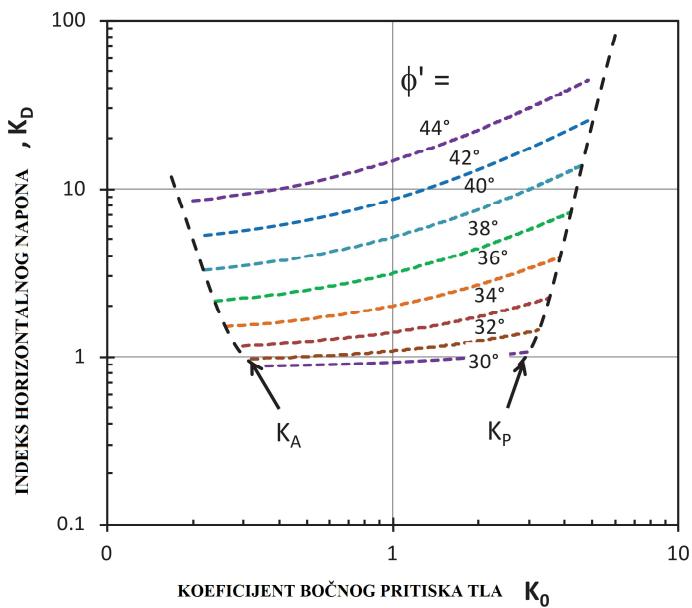
- a) direktno iz veličine K_D (Marchetti, 1997),
- b) na osnovu teorije prodora klina koju daju Durgunoglu i Mitchell (1973), a upotrebom postupka koji preporučuje Schmertmann (1988) i Marchetti (1985) i
- c) iz izmerenih V_s (Uzielli i sar., 2013).

5.7.1.1. Određivanje ϕ_p' direktno iz K_D

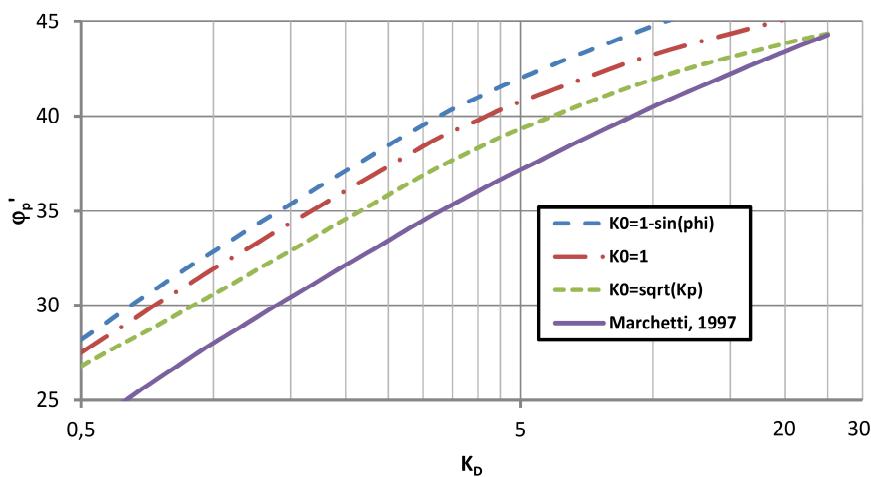
Direktno iz K_D vršni ugao (ϕ_p') može da se odredi na osnovu jednačine 5.17 koju daje Marchetti (1997):

$$\phi_p' = 28^\circ + 14.6 \log(K_D) - 2.1 [\log(K_D)]^2 \quad (5.17)$$

Pomenuta jednačina daje niže vrednosti ϕ_p' od onih koje se dobiju kada se odrede parovi K_D - ϕ_p' , sa dijagrama prikaznog na slici 5.33, za tri različite prepostavke K_0 : $k_0 = 1 - \sin\phi_p'$, $k_0 = 1$ i $k_0 = \sqrt{K_p}$. Grafički je to prikazano na slici 5.34, gde se vidi da je ϕ_p' određen iz jednačine 5.17 na strani sigurnosti. Jednačina 5.17 izvedena je za peskove bez znatne mikrostrukture (Marchetti, 2015).



Slika 5.33. Zavisnost ϕ'_p od K_D i k_0 (Mayne, 2014)



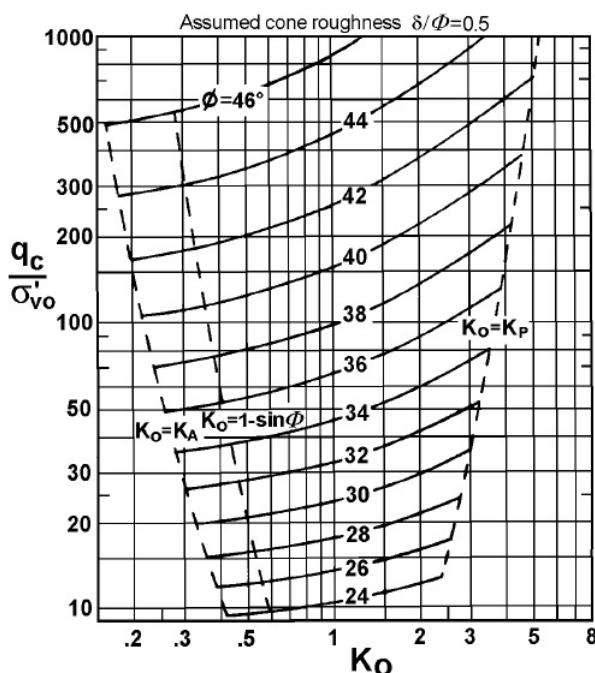
Slika 5.34. ϕ'_p peska u zavisnosti od K_D za različite pretpostavke k_0

5.7.1.2. Određivanje ϕ'_p iz teorije prodora klina

Schmertmann (1982) je razvio iterativni postupak za određivanje vršnog ugla ϕ'_p iz DMT opita primenom teorije prodora klina koju daju Durgunoglu i Mitchell (1973). Polazna osnova metode zasniva se na pretpostavci da prođor DMT sečiva u pesku može da se aproksimira kao problem ravnog stanja deformacije. Takav vid loma omogućava

da se odredi vršni ugao smičuće otpornosti peska za ravno stanje deformacije (ϕ_{pps}'). Schmertmann uvodi pretpostavku da je koeficijent trenja između sečiva i tla jednak $\operatorname{tg}(\frac{\phi_{pps}'}{2})$. Takođe, primena ove metode podrazumeva merenje sile na površini (preko manometara na glavi penetrometra) potrebne da se utisne sečivo za određeni interval dubine. Pomenuti postupak zahteva primenu jednačine za određivanje k_0 date u tabeli 5.7 i korekciju ugla smičuće otpornosti za odgovarajući prosečni vertikalni efektivni napon u ravni loma (σ'_{ff}) nastalu usled utiskivanja sečiva. Postupak određivanja ϕ_{pps}' Schmertmann-ovom metodom dat je u Dodatku I.

Marchetti (1985) pojednostavljuje Schmertmann-ov postupak, uvođenjem dijagrama prikazanog na slici 5.35 koji je izведен iz teorije prodora klina koju daju Durgunoglu i Mitchell (1973). Razlika u ta dva postupka, za određivanje ϕ_p' , je to što prvi koristi otpor sečiva q_D i jednačinu za k_0 koju daje Schmertmann (1988), a drugi otpor konusa q_c i jednačinu I ili II, za određivanje k_0 , iz tabele 5.7. Takođe, Schmertmann-ovom metodom se dobija ϕ_{pps}' , a Marchetti-jevom metodom ϕ_{pax}' . Marchetti (1985) ne uvodi korekciju ugla za odgovarajuće naponsko stanje. Dijagram prikazan na slici 5.35 omogućava određivanje ϕ_{pax}' iz K_0 i q_c . Nedostatak ove metode je potreba za izvođenjem CPT pored DMT opita.



Slika 5.35. Grafičko određivanje ϕ_p' iz k_0 i q_c (Marchetti, 1985)

5.7.1.3. Određivanje φ_p' iz izmerenih V_s

Uzielli i sar. (2013) daju izraz prikazan jednačinom 5.18 koji omogućava da se odredi φ_p' iz izmerenih V_s . Jednačina je izvedena za čiste kvarcne i kvarcno-silikatne peskove sa sadržajem finozrne komponente manje od 10 %.

$$\varphi_p' \text{ (stepeni)} = 3.9^\circ (V_{s1})^{0.44} \quad (5.18)$$

Pri čemu je:

V_s – normalizovana brzina smičućih talasa (videti jednačinu 5.4).

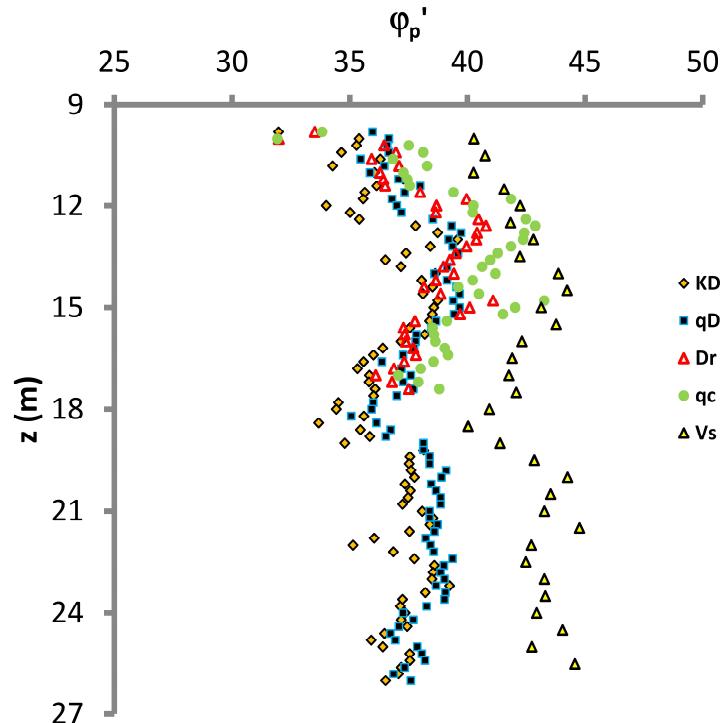
S obzirom da uzimanje neporemećenih uzoraka iz peska konvencionalnim metodama bušenja nije bilo moguće izvršeno je poređenje veličine φ_p' određene na osnovu prikazanih metoda, prema jednačini 5.17 (K_D), 5.18 (V_s) i Schmertmann-ovoj (q_D) proceduri (Dodatak I). Pored pomenutih postupaka φ_p' je određen i iz opita statičke penetracije (CPT) korišćenjem zavisnosti između q_c - D_r (Jamiolkowski, 2001) i D_r - φ_p' (Schmertmann, 1978) i korišćenjem korelacije q_c - φ_p' (Kulhawy i Mayne, 1990). Rezultat komparacije prikazan je na slici 5.36. Poređenje je izvedeno za pretežno kvarcni pesak (lokacija 18), kod koga nema značajnijeg prisustva mikrostrukture. Napominje se da je CPT opit izведен na udaljenosti približno 1.0 m od SDMT opita. Dubina CPT opita iznosila je 17.4 m.

Napominje se da, u ovom slučaju, ugao određen prema Schmertmann (1988) postupku (q_D) odgovara uglu za rotaciono simetrično stanje deformacije, pri čemu je konverzija iz ugla pri ravnom stanju deformacija u ugao za rotaciono simetrično stanje deformacija izvršena upotrebom jednačine prikazane u Dodatku I. Na taj način je omogućeno da se međusobno porede uglovi koji odgovaraju istim graničnim uslovima.

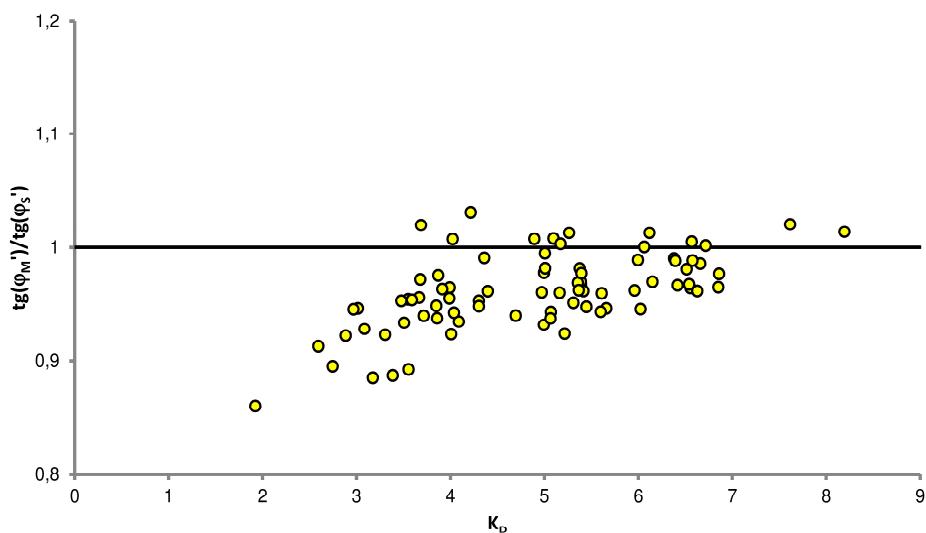
Sa slike 5.36 zapaža se sledeće:

- φ_p' određen iz K_D (Marchetti, 1997) predstavlja donju graničnu vrednost smičuće čvrstoće kvarcnog peska bez prisustva značajnije mikrostrukture. To je u saglasnosti sa literaturom (Mayne, 2015; Marchetti i sar., 2001). Odnos ugla smičuće otpornosti $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ određen iz Marchetti (1997) i Schmertmann (1988)

procedure prikazan je na slici 5.37. Sa slike se može videti da se najveći broj tačaka kreće u rasponu od 1.0 do 0.9.



Slika 5.36. Poređenje ϕ_p' , određen primenom različitih postupaka iz rezultata DMT/SDMT opita za kvarcni pesak bez znatnog prisustva mikrostrukture



Slika 5.37. Zavisnost odnosa $\frac{tg(\phi_M')}{tg(\phi_s')}$ od K_D za pesak bez mikrostrukture

- Najviše vrednosti ugla smičuće čvrstoće daje korelacija $V_s-\varphi_p'$, koja je izvedena za raspon normalizovanih brzina od 125 m/s do 225 m/s (Uzielli i sar., 2013). Takođe, njihova korelacija bazirana je na svega 12 uzoraka. Moguće je da su to uzroci odstupanja φ_p' određene iz V_s u odnosu na druge prikazane metode.
- Razlika između φ_p' određenog iz Schmertmann (1988) postupka, primenom D&M teorije, i φ_p' određenog iz q_c primenom Kulhawy i Mayne (1990) korelacije raste sa povećanjem zbijenosti peska (od 11.6 m do 13.2 m). Briaud i Miran (1992) navode da se razlika između φ_p' određenog u laboratoriji i određenog iz D&M teorije povećava sa porastom zbijenosti peska. Mayne (2014) i Mayne (2015) navode da korelacija koju daju Kulhawy i Mayne (1990) precizno određuje φ_p' koji se dobija iz opita triaksijalne kompresije. Tako da, ukoliko se veličina φ_p' određena iz q_c , prema korelaciji koju daju Kulhawy i Mayne (1990), posmatra kao laboratorijska veličina onda je pomenuta razlika u zbijenom (dilatantnom) pesku potvrđena.

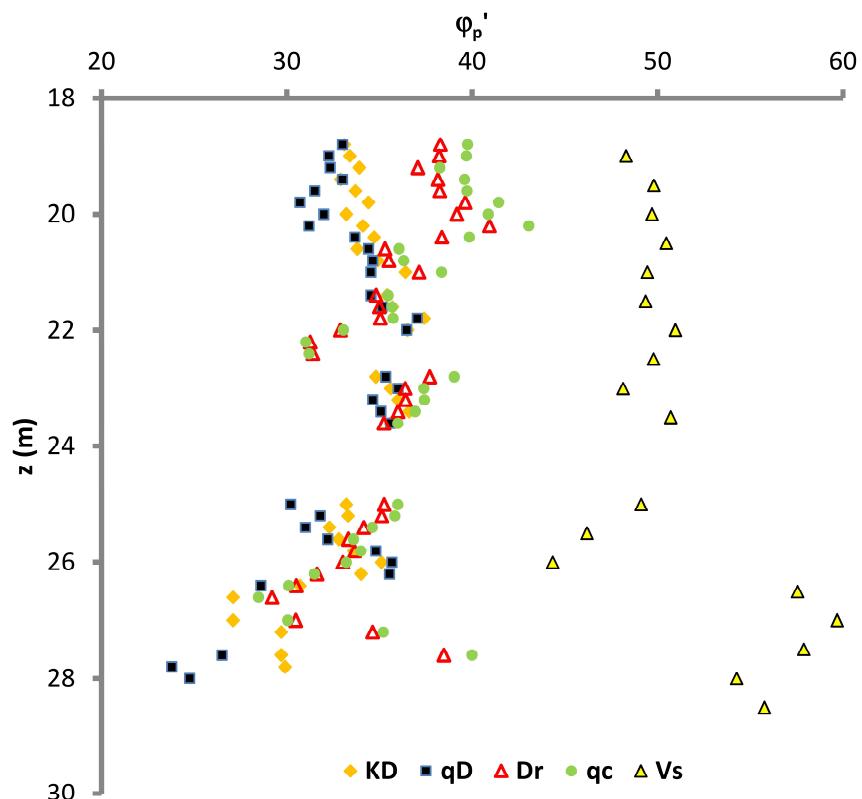
Kod peska sa izraženom mikrostrukturom (lokacija 25) rezultat određivanja φ_p' primenom opisanih korelacija prikazan je na slici 5.38.

Sa slike 5.38 zapaža se sledeće:

- korelacija koju daje Marchetti (1997) i postupak koji daje Schmertmann (1982) daju približno iste vrednosti φ_p' u slabo do srednje zbijenom pesku (kontraktivnom) sa izraženom mikrostrukturom,
- korelacije koje uzimaju u obzir otpor na prođor konusa (q_c i D_r , sa slike 5.38) kada se porede međusobno daju približno iste vrednosti φ_p' ,
- ne postoji trend između odgovarajćih φ_p' određenih iz DMT i CPT opita, što ukazuje da korelacije nisu izvedene za ovu vrstu peska,
- kada se koristi korelacija sa V_s dobijaju se znatno veće vrednosti φ_p' , što ukazuje na značaj utvrđivanja prisustva mikrostrukture u tlu,
- na dubini većoj od 27.0 m φ_p' određen Šmertmanovim postupkom je neuobičajeno nizak za pesak (manji od 26°), što je posledica naglog pada K_D i

q_D , dok na istoj dubini ϕ_p' određen iz V_s naglo raste što je posledica većeg uticaja mikrostrukture na izmerenu V_s .

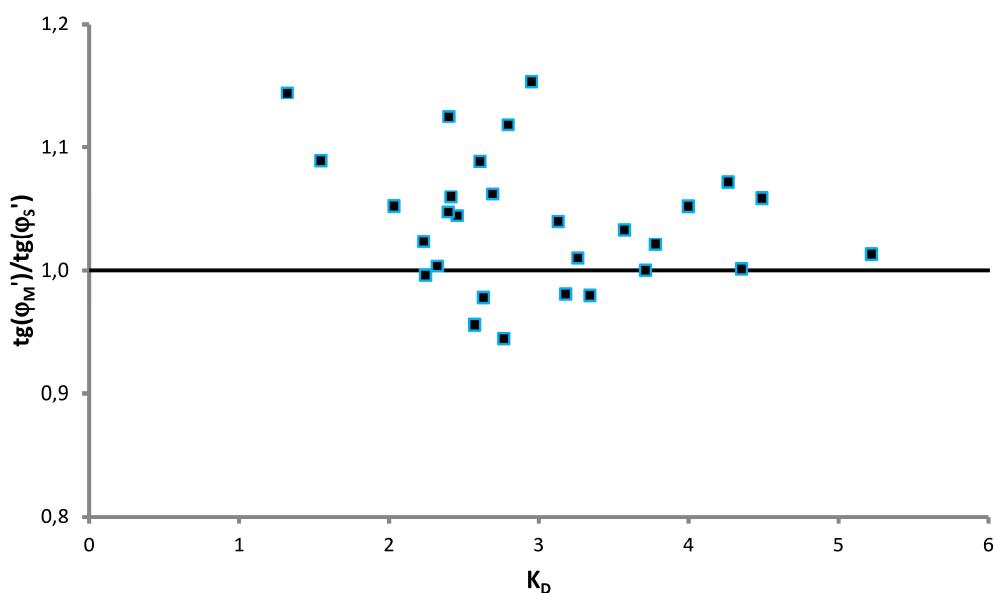
Dakle, u slabo do srednje zbijenom pesku kod koga je prisutna cementacija (u vidu karbonatnih veza između zrna peska) ne preporučuje se primena korelacija koje koriste V_s za određivanje ϕ_p' . Primenom tih korelacija dobijaju se isuviše visoke vrednosti ϕ_p' . Prilikom prodora sečiva u slabo cementirani pesak dolazi do potpunog ili delimičnog narušavanja inicijalne strukture tla u okolini sečiva. U takvoj situaciji nije u potpunosti jasan doprinos cementacije na veličinu izmerenog pritiska potrebnog da se sečivo utisne na određenu dubinu i izmereni pritisak p_0 (K_D). Na dubini većoj od 27.0 m pritisak (kg) naglo opada, a V_s naglo raste što ukazuje da ispitani pesak ima potencijalno nestabilniju mikrostrukturu u odnosu na povlatu, odnosno efekat utiskivanja je izraženiji. U tim situacijama preporučuje se upotreba Marchetti (1997) korelacije za određivanje ϕ_p' .



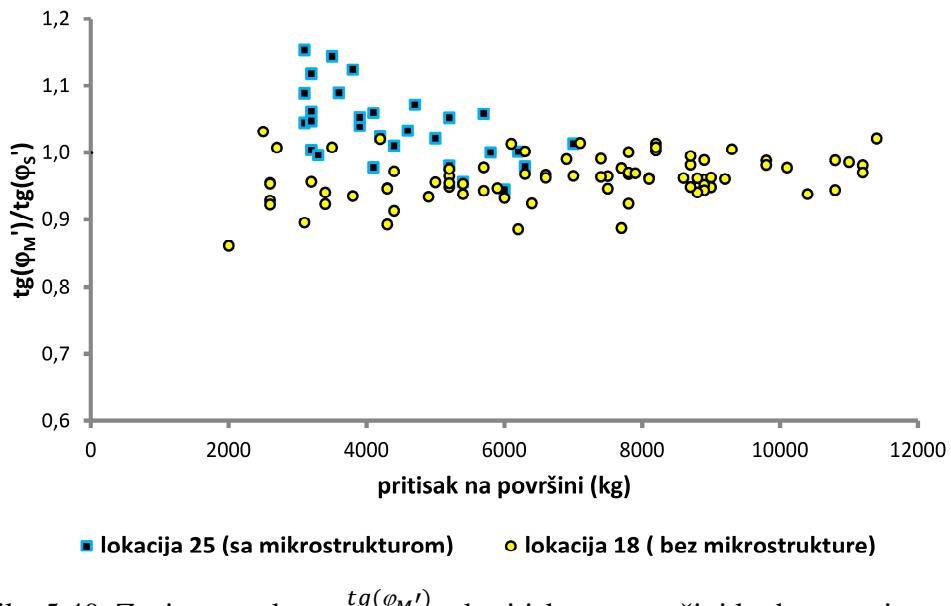
Slika 5.38. Poređenje ϕ_p' , određen primenom različitih postupaka iz rezultata DMT/SDMT opita za pesak sa prisustvom mikrostrukture

Odnos ugla smičuće otpornosti $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ određen iz Marchetti (1997) i Schmertmann (1982) procedure, za cementirani pesak, prikazan je na slici 5.39. Sa slike se može videti da pomenuti odnos može biti i veći i manji od 1 i kreće se u rasponu od 0.95 do 1.15. Rezultat za cementirani pesak razlikuje se od rezultata za pesak bez prisustva znatne mikrostrukture (slika 5.37).

Sa slike 5.40. može se videti da odnos $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ kod peska sa izraženom mikrostrukturom opada sa povećanjem pritiska na površini, dok je kod peska bez znatnog prisustva mikrostrukture isti odnos praktično neosetljiv na pritisak na površini. Već je napomenuto da je K_D parametar osetljiv na cementaciju pa je moguće da su nešto više vrednosti φ_p' (određene iz K_D) posledica tog efekta. To pokazuje i slika 5.38 sa koje se zapaža da je razlika φ_p' , određenog iz Marchetti (1997) i Schmertmann (1982) postupka najveća na dubinama gde φ_p' određen iz V_s naglo raste. Prepostavlja se da je, u ovom slučaju, q_D manje osetljiv na prisustvo cementacije, pa se preporučuje da se φ_p' odredi iz Schmertmann (1982) postupka (izuzev na dubinama gde su vrednosti neuobičajeno niske).



Slika 5.39. Zavisnost odnosa $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ od K_D za pesak sa mikrostrukturom



Slika 5.40. Zavisnost odnosa $\frac{tg(\varphi_M')}{tg(\varphi_s')}$ od pritiska na površini kod cementiranog i necementiranog peska

5.7.2. Nedrenirana smičuća čvrstoća tla (s_u)

Nedrenirana čvrstoća tla jedan je od osnovnih geotehničkih parametara koji se koristi pri projektovanju inženjerskih objekata u finozrnom tlu. Veličina nedrenirane čvrstoće zavisi od sledećih faktora: vrste opita (laboratorijskog ili terenskog) koji se koristi za njeno određivanje, brzine smicanja, anizotropije i istorije opterećenja (Ladd i sar., 1977; Wroth, 1984; Kulhawy i Mayne, 1990, Schnaid, 2009). Opšta zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće tla i istorije opterećenja (OCR) data je jednačinom 5.19.

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{v_0}'}\right)_{OC} = \left(\frac{s_u}{\sigma_{v_0}'}\right)_{NC} OCR^m \quad (5.19)$$

Pri čemu je:

$$m=(0.75-0.85).$$

Analize zasnovane na teoriji kritičnog stanja tla (Wroth, 1984) i eksperimentalni rezultati na preko 100 vrsta glinovitog tla (Mayne, 1988) ukazuju da je $\left(\frac{s_u}{\sigma_{v_0}'}\right)_{NC}$

funkcija ugla smičuće čvrstoće tla (ϕ') i vrste opita (triaksijalna kompresija, ekstenzija ili čisto smicanje). Dominantan uticaj na normalizovanu veličinu nedrenirane smičuće čvrstoće $\left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{OC}$ ima istorija opterećenja, pre svega zbog uticaja OCR na parametar pornog pritiska A_f (Ladd i sar., 1977). Marchetti (1980) daje jednačinu za određivanje nedrenirane čvrstoće iz DMT opita tako što u jednačinu 5.19 umesto OCR koristi zavisnost između OCR i K_D prikazanu u tabeli 5.4 ($OCR = (0.5K_D)^{1.56}$). Za eksponent m koristi vrednost 0.8 prema preporuci koju daju Ladd i sar. (1977), a za $\left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{NC}$ koristi 0.22 prema preporuci koju daje Mesri (1975). Osnovna jednačina koja se koristi za interpretaciju nedrenirane čvrstoće iz DMT opita data je sledećim izrazom:

$$s_{uDMDT} = 0.22 \sigma_{v0}' (0.5K_D)^{1.25} \quad \text{za } I_D < 1.2 \quad (5.20)$$

Novija istraživanja ukazuju da jednačina 5.20 može da predviđa i vrednosti s_u koje su na strani sigurnosti ali i vrednosti na strani nesigurnosti. Iz tog razloga potrebno je dati specifične korelacije za tlo koje se istražuje. Empirijske koelacije i teorijske zavisnosti između DMT parametara i s_u , preuzete iz literature, prikazane su u tabeli 5.8.

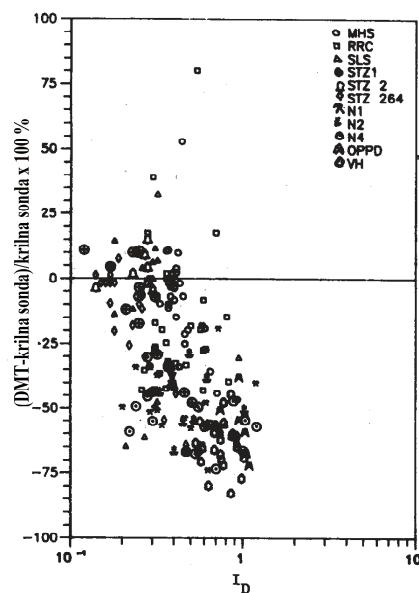
Lutenegger (1988) navodi da je jednačina 5.20 pouzdana pri određivanju s_u za vrednosti $I_D < 0.33$. Pri tome jednačinu 5.20 poredi sa s_u određenom iz (nekorigovanog) opita krilne sonde. Pomenuti rezultati prikazani su na slici 5.41. Sa slike 5.41 vidi se da sa povećanjem I_D pouzdanost jednačine 5.20 opada.

Poređenje s_u određene iz jednačine 5.20 i laboratorijskih vrednosti dobijenih iz konsolidovanog nedreniranog opita triaksijalne kompresije (CIUC) i opita jednoaksijalne kompresije (U) prikazano je na slici 5.42. Rezultati se odnose na tvrde CH gline sa lokacije 13. Napominje se da su gline iznad nivoa podzemne vode u zoni kapilarnog penjanja. Rezultati laboratorijskih istraživanja preuzeti su iz arhive Kosovoprojekta. Nedrenirana čvrstoća iz triaksijalnog opita određena je kao polovina vrednosti devijatora napona pri lomu, $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2}$, za veličinu svestranog pritiska (σ_3) koji približno odgovara veličini vertikalnog efektivnog napona ($\sigma_3 = \sigma_{v0}'$) sa dubine na kojoj je uzet uzorak.

Tabela 5.8. Jednačine za određivanje s_u iz DMT opita

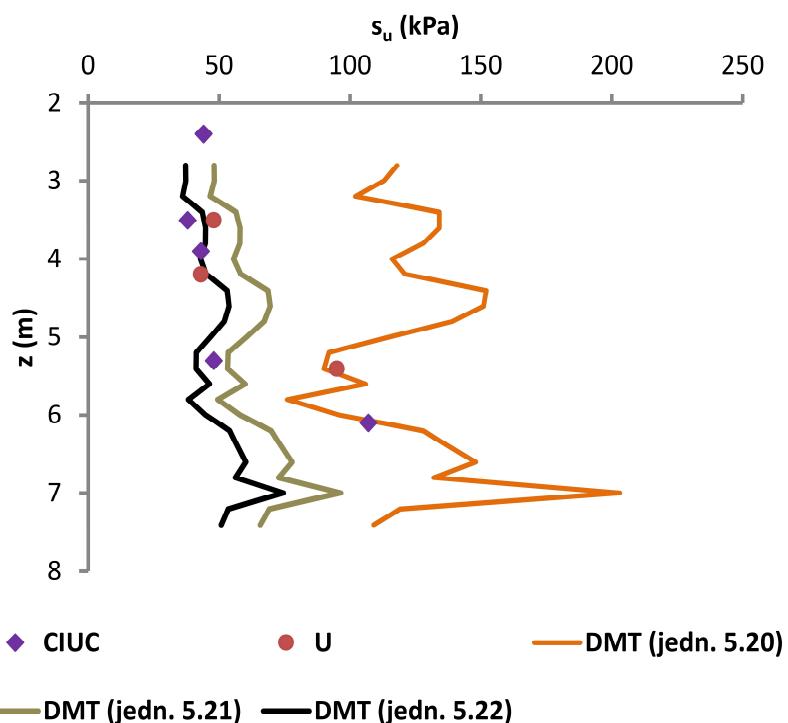
Jednačina za s_u	Referenca	Komentar
$d_s \sigma_{v0}' (0.5K_D)^{1.25}$	Lacasse i Lunne (1988)	empirijski i zavisi od vrste opita: $d_s=0.2$ (TC) $d_s=0.14$ (DSS) $d_s=0.17-0.21$ (VST)
$\frac{(p_1 - \sigma_{h0})}{N_c}$ $\sigma_{h0} = k_0 \sigma_{v0}' + u_0$ Nc – faktor nosivosti	Roque i sar. (1988)	Nc=5 (tvrd glina) Nc=7 (srednje tvrd glina) Nc=9 (neosetljiva plastična glina)
$\frac{\sigma_{v0}' K_D}{10} = \frac{p_0 - u_0}{10}$	Schmertmann (1991)	teorija ekspandirajuće šupljine
$\frac{0.35(0.47K_D)^{1.14}}{0.018E_D}$	Kamei i Iwasaki (1995)	s_u određen iz UU i U opita za tla Holocene starosti za $s_u < 100$ kPa
$\frac{(p_o - \sigma_{h0})}{N_{p0}}$ $N_{p0}=1.57\ln I_r - 1.75$ N _{p0} – normalizovano prvo DMT čitanje $I_r = \frac{G}{s_u}$ – indeks krutosti G – modul smicanja	Yu (1992, 2006)	MKE analiza, Tresca model
$\frac{(p_0 - p_2)}{2.65}$	Lutenegger (2006)	Teorija ekspandirajuće šupljine
$0.12(p_0 - \sigma_{v0})$ $0.09(p_1 - \sigma_{v0})$	Cao i sar. (2015)	marinska glina (Singapur)

Oznake u tabeli: TC-triaksijalna kompresija, DSS-čisto smicanje, VST-krilna sonda, UU-nekonsolidovani nedrenirani triaksijalni opit, U-jednoaksijalna kompresija, MKE-metoda konačnih elemenata



Slika 5.41. Pouzdanost upotrebe jednačine 5.20 u zavisnosti od I_D

(preuzeto iz Lutteneger, 1988)



Slika 5.42. Poređenje s_u određene iz DMT opita i referentnih laboratorijskih vrednosti za CH gline sa lokacije 13

Sa slike 5.42 zapaža se da su dve laboratorijski određene vrednosti s_u veće od ostalih. To se može prepisati heterogenoj prirodi ispitanih glina s obzirom da su prikazani rezultati dobijeni na uzorcima uzetim iz više bušotina u blizini izvedenih SDMT opita. Na slici 5.42 prikazane su veličine s_u određene iz jednačine 5.21 i 5.22, koje su dobijene tako što se za OCR u izrazu 5.19 upotrebi empirijska zavisnost koju daje Mayne (1987) (videti tabelu 5.4). Jednačine 5.20 i 5.21 razlikuju se samo u empirijskim zavisnostima koje se koriste za određivanje OCR iz K_D . Kod obe jednačine eksponent $m=0.8$, dok je $\left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{NC} = 0.22$. U jednačini 5.22 $\left(\frac{s_u}{\sigma_{v0}'}\right)_{NC} = 0.17$. Na taj način se dobijaju s_{uDMT} koje su u saglasnosti laboratorijskim vrednostima.

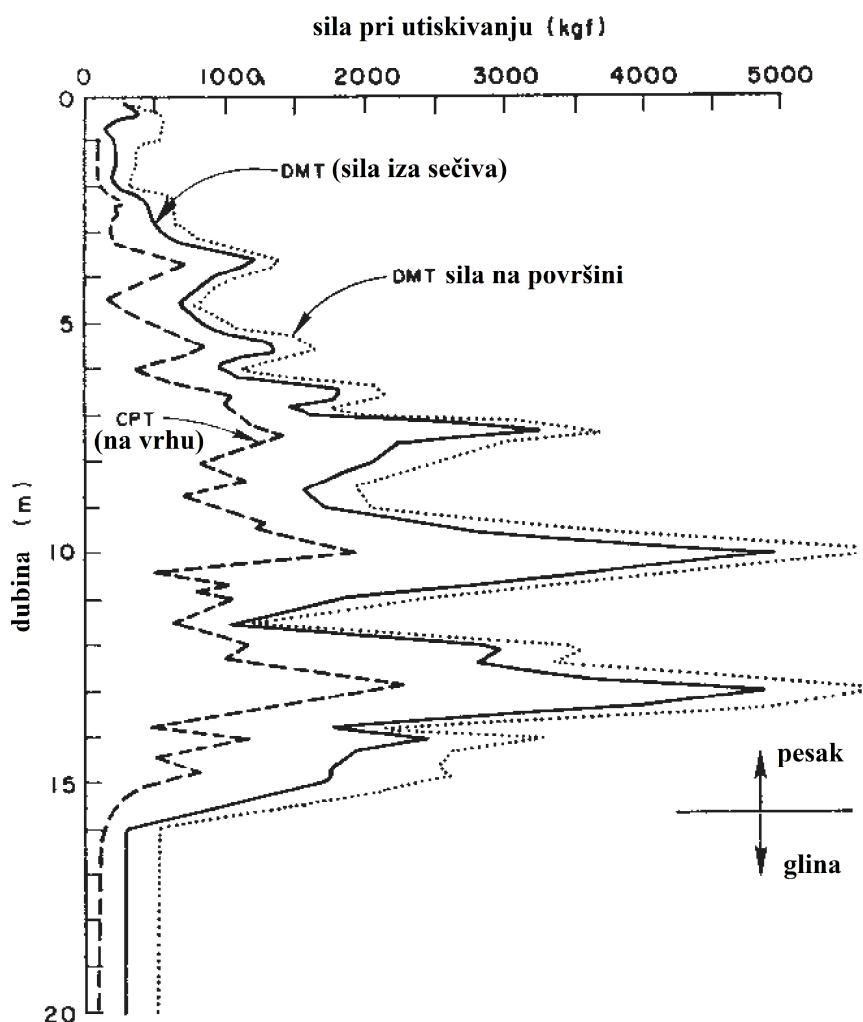
$$s_{uDMT} = 0.22 \sigma_{v0}' (0.5K_D)^{0.8} \quad (5.21)$$

$$s_{uDMT} = 0.17 \sigma_{v0}' (0.5K_D)^{0.8} \quad (5.22)$$

Sa slike 5.42 može se videti da su određena iz jednačine 5.22 predstavlja donju graničnu vrednost za CH gline kod kojih je $I_D < 1.2$ i $K_D > 5.5$. Upotrebljivost jednačine 5.22 izvan pomenutih granica prelaznih DMT parametara nije poznata.

5.8. Penetracione otpornosti pri utiskivanju dilatometarskog sečiva

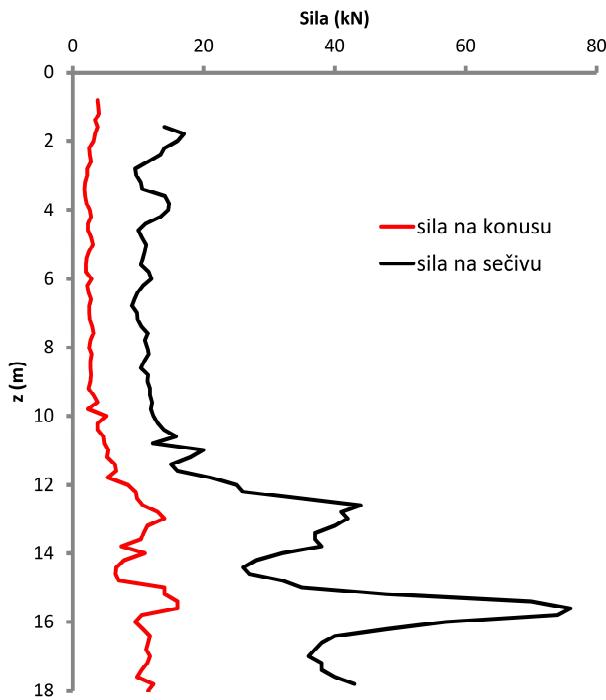
Merenje ukupne sile (na površini) potrebne da se utisne DMT sečivo, za interval ispitivanja, prvi je preporučio Schmertmann (1982, 1988). Veličina ukupne sile omogućava da se odredi ugao smičuće čvrstoće peska (poglavlje 5.7.1) pod prepostavkom da se trenje između šipki i tla može zanemariti. Takođe, veličina otpora na prodor sečiva (q_D), odnosno sila na površini, predstavljaju značajan podatak prilikom definisanja debljine slojeva tla i formiranja geotehničkog modela terena. Idealno bi bilo kada bi se sila merila na samom vrhu DMT sečiva, ali je to praktično ne izvodljivo zbog konstrukcije sečiva. Alternativa je da se postave merne trake neposredno iznad sečiva koje bi omogućile merenje potrebne sile (Campanella i Robertson, 1991). U daljem tekstu prikazano je nekoliko primera gde je merena sila na površini tokom izvođenja DMT/SDMT opita. Prethodno je potrebno definisati određene geometrijske karakteristike sečiva. Projekcija površine sečiva i šipki prečnika 3.6 cm u horizontalnoj ravni iznosi $\sim 18.6 \text{ cm}^2$. Radi poređenja, projekcija Begemanovog mehaničkog konusa iznosi 10 cm^2 . Uobičajeno je da se koristi tzv. „frikcioni reducir“ (proširivač) kada se izvodi DMT opit, koji se postavlja iznad sečiva kako bi se smanjio uticaj trenja između šipki i tla. Campanella i Robertson (1991) prikazali su rezultat paralelnog merenja sile na površini i sile neposredno iznad sečiva (slika 5.43). Prilikom izvođenja opita korišćen je frikcioni reducir. Slika 5.43 ukazuje da je u pesku ($I_D > 2$) trenje između šipki i tla veoma malo. Na slici 5.43 prikazana je i sila potrebna da se utisne CPT konus. Autori navode da je sila potrebna da se utisne sečivo približno dvostruko veća od sile potrebne da se utisne konus, što pripisuju približno dvostruko većoj površini sečiva u odnosu na konus (18.6 cm^2 u odnosu 10 cm^2).



Slika 5.43. Poređenje DMT i CPT penetracionih otpornosti
(Campanella i Robertson, 1991)

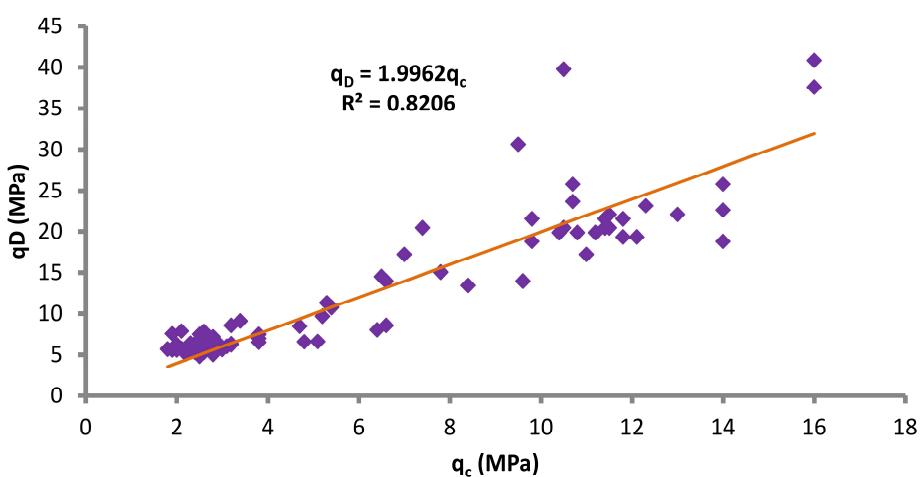
Na slici 5.44 prikazan je rezultat merenja sile utiskivanja mehaničkog CPT konusa i DMT sečiva. Merenje je vršeno manometrom postavljenim na glavi penetrometra. Isti penetrometar, šipke i proširivač su korišćeni za utiskivanje sečiva i konusa. Opiti su izvedeni na međusobnom rastojanju od 2.0 m. Sa slike se zapaža sledeće:

- sličan oblik i paralelnost oba dijagrama ukazuje da friкцион reducir efikasno eliminiše parazitski uticaj trenja između šipki i tla,
- potrebna je približno 4 puta veća sila da se utisne sečivo od sile potrebne da se utisne konus sa tendencijom da u zbijenijim slojevima tla taj odnos raste.



Slika 5.44. Poređenje sila potrebnih da se utisne sečivo i konus u finozrni pesak eolskog porekla sa lokacije 23 (korišćen proširivač iza sečiva)

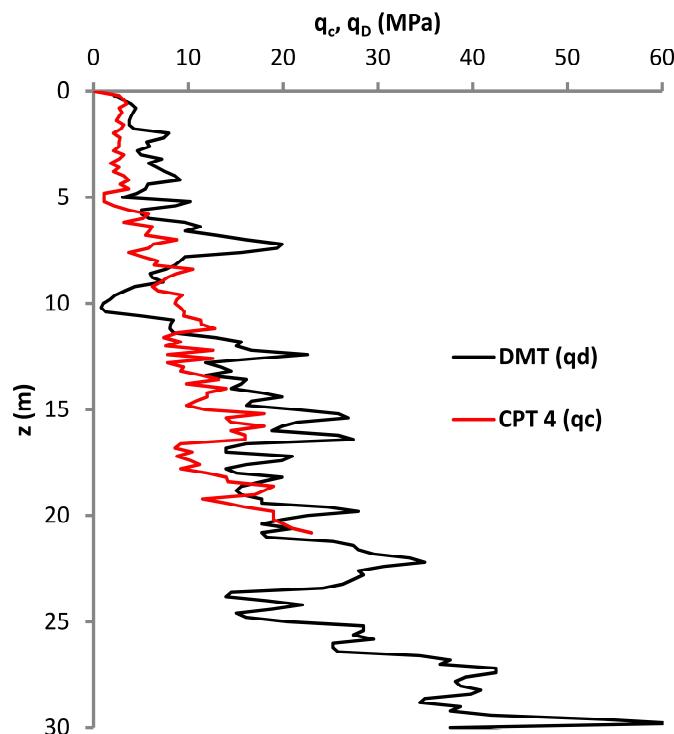
Na slici 5.45 prikazana je zavisnost između otpora na prodor konusa ($q_c = \text{sila}/10 \text{ cm}^2$) i otpora na prodor sečiva ($q_D = \text{sila na površini}/18.6 \text{ cm}^2$) određenih iz sila prikazanih na slici 5.44. Vidi se da je otpor na prodor sečiva dva puta veći od otpora na prodor konusa. Koeficijent determinacije, $R^2=0.82$, ukazuje da se jedan podatak može pouzdano predvideti iz drugog izmerenog.



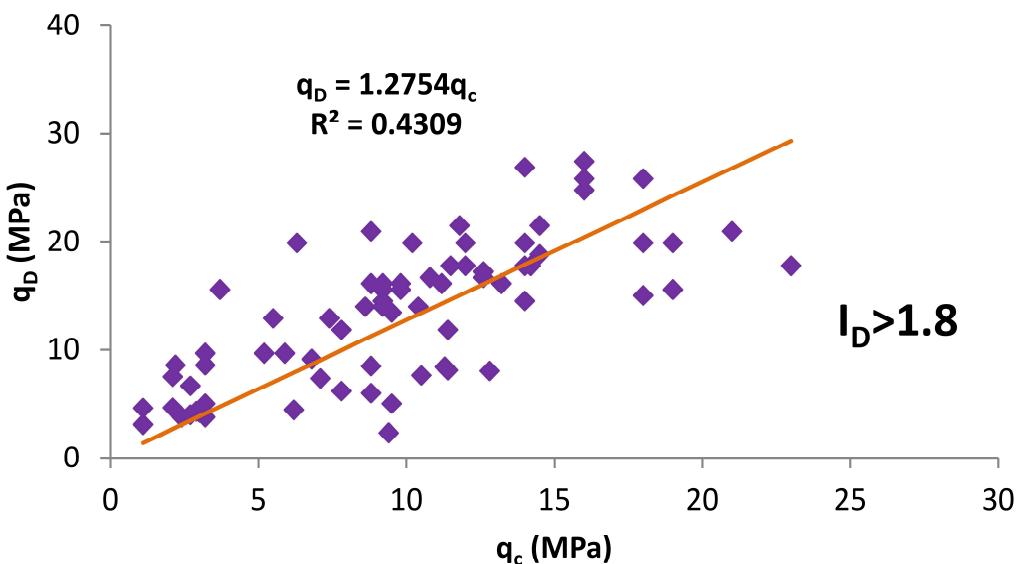
Slika 5.45. Zavisnost između q_c i q_d za finozrni pesak eolskog porekla sa lokacije 23

Na slici 5.46 prikazan je otpor na prodor konusa i sečiva po dubini u alvijalnom prašinastom pesku sa lokacije u Ovči. Sa slike se može videti paralelnost izmerenih penetracionih otpora, što ukazuje da frikciona reducir efikasno umanjuje uticaj trenja na penetracione šipke iznad njega. U ovom slučaju razlika između q_c i q_d je manja nego kod eolskog peska, a njihov odnos je dat na slici 5.47. Napominje se da je međusobno rastojanje između izvedenih CPT i DMT opita 10 m, što je verovatno razlog nižeg koeficijenta determinacije nego u prethodnom primeru.

Dakle, odnos q_d i q_c u pesku ($I_D > 1.8$) nije konstanta već zavisi od njegove geneze, istorije opterećenja, granulometrijskog sastava, kompresibilnosti i heterogenosti. Campanella i Robertson (1991) navode da je $q_d = 1.1 q_c$ u srednjezrnom do krupnozrnom pesku ($I_D > 2$), što se može videti sa slike 5.43. Kvalitet i pouzdanost komparacije uslovljen je međusobnim rastojanjem između izvedenih opita. Na trećoj DMT konferenciji održanoj 2015. godine u Rimu, preporučeno je da, ukoliko se vrši poređenje, međusobno rastojanje između CPT i DMT opita bude 1.0 m, ni manje ni više.



Slika 5.46. q_c i q_d za alvijalni prašinasti pesak sa lokacije 20
(korišćen proširivač iza sečiva)

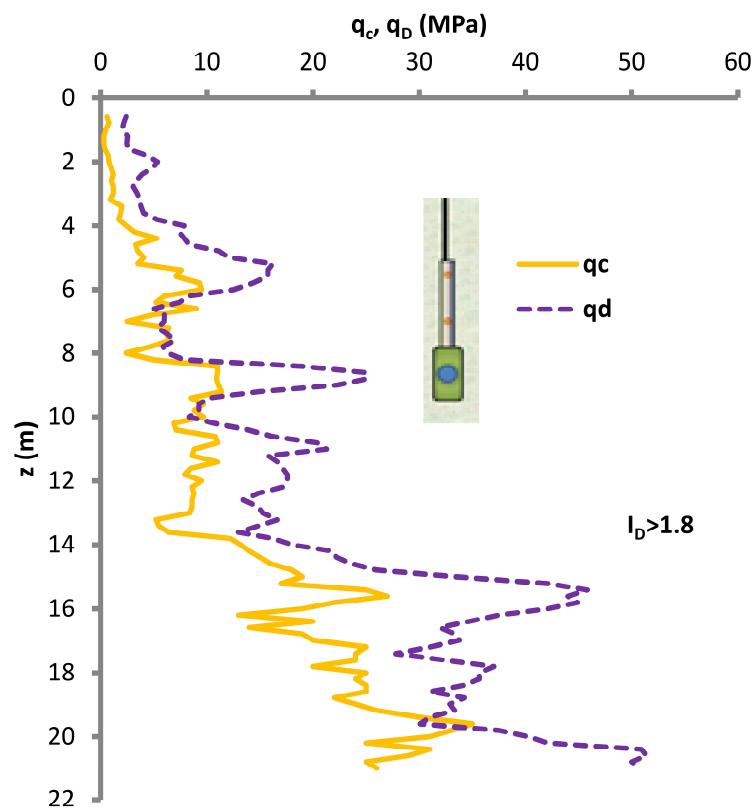


Slika 5.47. Zavisnost između q_c i q_d za aluvijalni prašinasti pesak sa lokacije 20

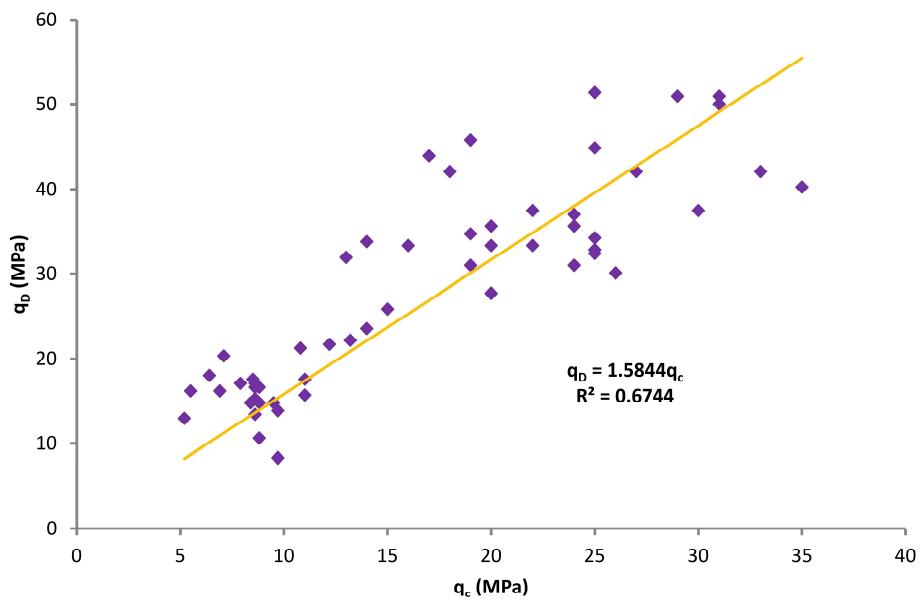
Do sada su prikazani rezultati utiskivanja sečiva sa proširivačem, bez seizmičke sonde. Na slici 5.48 prikazan je rezultat merenja sile potrebne da se utisnene sečivo i sonda u aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15. Na rastojanju od 1.5 m urađen je CPT opit, a otpor konusa prikazan je na slici 5.48. Sa slike se zapaža sledeće:

- sličan oblik i paralelnost oba dijagrama ukazuje da seizmička sonda (prečnik 4.2 cm) efikasno eliminiše parazitski uticaj trenja između šipki i tla,
- uticaj trenja između sonde i tla nije u potpunosti poznat, ali se prepostavlja da u tlu sa malim do umerenim k_0 vrednostima trenje ima zanemarljiv uticaj na ukupnu izmerenu silu na površini.

Na slici 5.49 dat je odnos između q_c i q_D za izmerene penetracione otpornosti prikazane na slici 5.48. Odnos q_c/q_D je približno 1.6 za aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15. Napominje se da kada se koristi seizmička sonda projekcija površine poprečnog preseka sečiva i sonde na horizontalnu ravan iznosi 21.6 cm^2 , što je za 3 cm^2 veća površina nego kada se izvodi samo DMT opit (18.6 cm^2). Razlog je to što je prečnik sonde neposredno iza sečiva 4.2 cm za razliku od šipki čiji je prečnik 3.6 cm.



Slika 5.48. q_c i q_d za aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15 (merenje vršeno sa seizmičkom sondom)



Slika 5.49. Zavisnost između q_c i q_d za aluvijalni kvarcni pesak sa lokacije 15

5.8.1. Zavisnost između sile utiskivanja i efektivnog prvog čitanja (p_0)

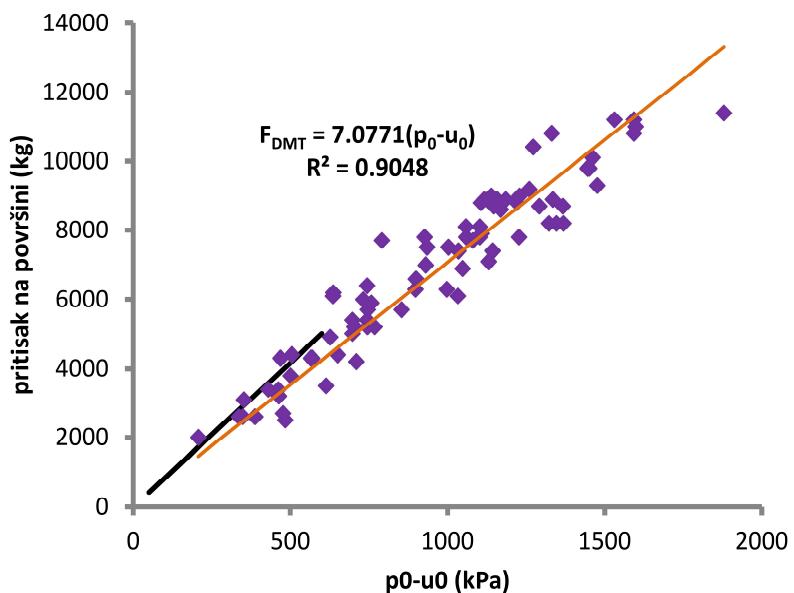
Campanella i Robertson (1991) pokazali su da postoji direktna veza između efektivnog prvog čitanja ($p_0 - u_0$) i izmerene sile potrebne da se utisne sečivo (F_{DMT}). Zavisnost između izmerene sile na površini i efektivne veličine prvog čitanja za pesak sa lokacije 18 prikazana je na slici 5.50. Na istoj slici prikazana je i zavisnost koju daju Campanella i Robertson (1991) za pesak sa McDonald farme u Kanadi. Slika 5.50 ukazuje da ukoliko se ne meri sila na površini (F_{DMT}) ona se može proceniti sa visokom pouzdanošću iz jednačine 5.23.

$$F_{DMT} \text{ (kg)} = 7.1 (p_0 - u_0) \quad \text{za } I_D > 1.8, \quad p_0 \text{ i } u_0 \text{ u kPa} \quad (5.23)$$

Sličan rezultat je dobijen i za pesak sa lokacije 15, a zavisnost je data jednačinom 5.24.

$$F_{DMT} \text{ (kg)} = 7.3 (p_0 - u_0) \quad \text{za } I_D > 1.8, \quad p_0 \text{ i } u_0 \text{ u kPa} \quad (5.24)$$

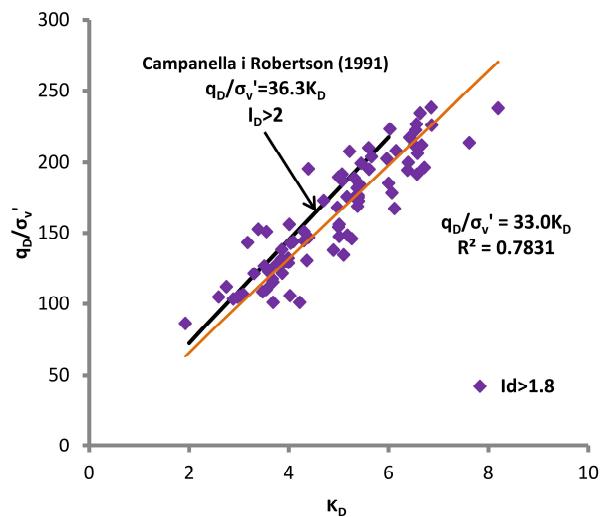
Jednačine 5.23 i 5.24, neznatno se razlikuju i ukazuju da u kvarcnom aluvijalnom pesku bez izražene mikrostrukturi F_{DMT} može pouzdano da se odredi iz efektivnog prvog čitanja.



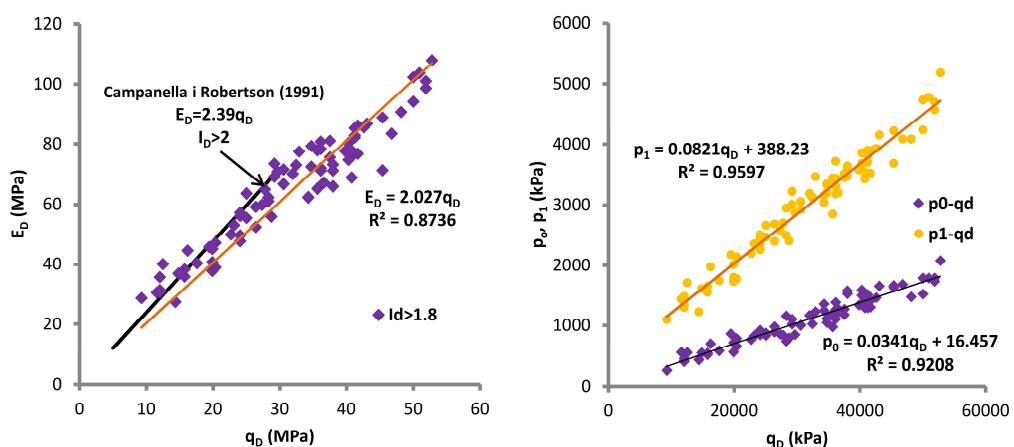
Slika 5.50. Linearna zavisnost između F_{DMT} i $(p_0 - u_0)$ za $I_D > 1.8$ (lokacija 18)

5.8.2. Zavisnost između q_D i DMT parametara

S obzirom da je F_{DMT} u direktnoj vezi sa $(p_0 - u_0)$ onda je K_D proporcionalan sa q_D/σ_{v0}' . Zavisnost između q_D/σ_{v0}' i K_D prikazana je na slici 5.51 za pesak sa lokacije 18. Dilatometarski modul i pritiske moguće je direktno proceniti iz izmerene penetracione otpornosti, kao što je prikazano na slici 5.52. Sa slike 5.52 vidi se da sa porastom penetracione otpornosti raste i dilatometarski modul. Pritisici p_0 i p_1 su veličine koje se najpouzdanije mogu proceniti iz penetracione otpornosti q_D . To može biti korisno ukoliko je na određenim dubinama potrebno proceniti p_0 ili p_1 usled sumnje u korektnost izmerenih pritisaka.



Slika 5.51. Zavisnost q_D/σ_{v0}' od K_D (lokacija 18)



Slika 5.52. Zavisnost između q_D i E_D , p_0 , p_1 za pesak sa lokacije 18

U tabeli 5.9 prikazana je konstanta proporcionalnosti (a) između q_D/σ_{v0}' i K_D za peskove različite geneze. Bitno je zapaziti da se parametar (a) razlikuje za eolske i aluvijalne peskove. Veće vrednosti su karakteristične za eolske peskove bogate liskunima, dok su niže vrednosti karakteristične za aluvijalne peskove kod kojih parametar (a) ima tendenciju da raste sa povećanjem krupnozrne frakcije. Interesantno je zapaziti da ukoliko se primeni zavisnost između q_D i q_c prikazana na slikama 5.45, 5.47 i 5.49 dobija se da je normalizovana vrednost otpora konusa q_c/σ_{v0}' funkcija od K_D i data je jednačinom 5.25.

$$\frac{q_c}{\sigma_{v0}'} \approx 21K_D \quad I_D > 1.8 \quad (5.25)$$

Ova jednačina se ne može koristiti za peskove sa izraženom mikrostrukturom kao što je pesak sa lokacije 25.

Tabela 5.9. Konstanta proporcionalnosti (a) između q_D i K_D za $I_D > 1.8$

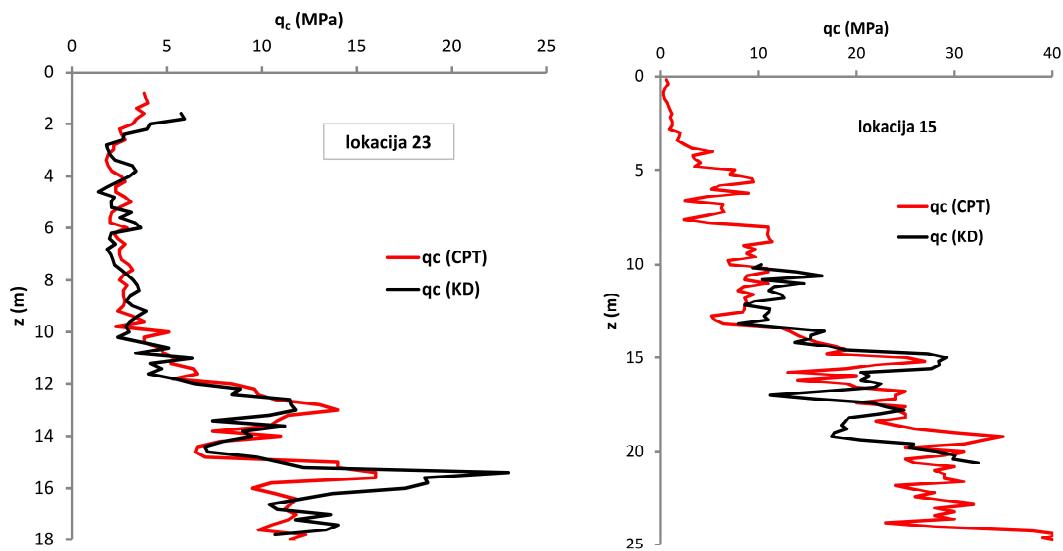
Lokacija	Opis i vrsta tla	R^2	$\frac{q_c}{\sigma_{v0}'} = (a)K_D$ (a)	DMT/ SDMT	Napomena
23	eolski prašinasti pesak	0.76	43.7	DMT	$K_D < 4$
20	aluvijalni prašinasti pesak	0.70	28.3	DMT	$K_D < 10$
15	aluvijalni kvarcni pesak	0.84	33.4	SDMT	$K_D < 9$
18	aluvijalni kvarcni pesak	0.78	33.0	SDMT	$K_D < 8$
25	umereno cementirani pesak	0.64	33.0	SDMT	$K_D < 5$
McDonald's farma	srednjezrni do krupnozrni pesak	-	36.3	DMT	$K_D < 10$

Na slici 5.53 prikazano je poređenje izmerenog i procenjenog q_c iz jednačine 5.25 za različite lokacije. Sa slike se vidi da se izmerene i procenjene vrednosti približno poklapaju pa se preporučuje primena jednačine 5.25 u preliminarnim fazama projektovanja. Napominje se da jednačina 5.25 ne predstavlja zamenu za izmerene q_c iz CPT opita i obrnuto. Na slici 5.54. prikazano je poređenje izmerenog i procenjenog q_c za lokaciju 20. Na slici je prikazana procenjena vrednost q_c koja se dobije kada se upotrebi zavisnost ($q_c=33K_D$) koju preporučuju Campanella i Robertson (1991). Može se videti da je predložena korelacija (jednačina 5.25) znatno pouzdanija od korelacije koju predlažu Campanella i Robertson (1991). Ovo još jednom ukazuje na značaj lokalnih uslova kod primene različitih korelacija.

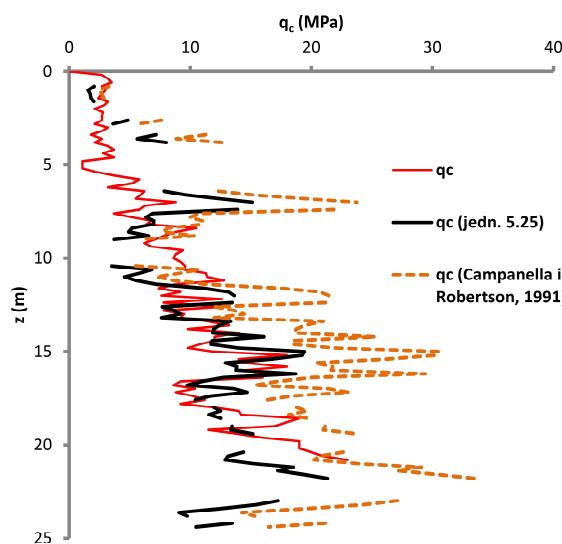
Robertson (2012), razmatranjem rezultata koji daju Tsai i sar. (2009), daje zavisnost između normalizovane veličine otpora na prodor konusa svedene na ekvivalentnu vrednost za čisti pesak ($Q_{tn,cs}$) i K_D u vidu jednačine 5.26.

$$Q_{tn,cs} = 25K_D \quad (5.26)$$

Jednačine 5.25 i 5.26 ukazuju da je otpor tla na prodor konusa funkcija K_D . Jednačina 5.26 izvedena je za električni konus.



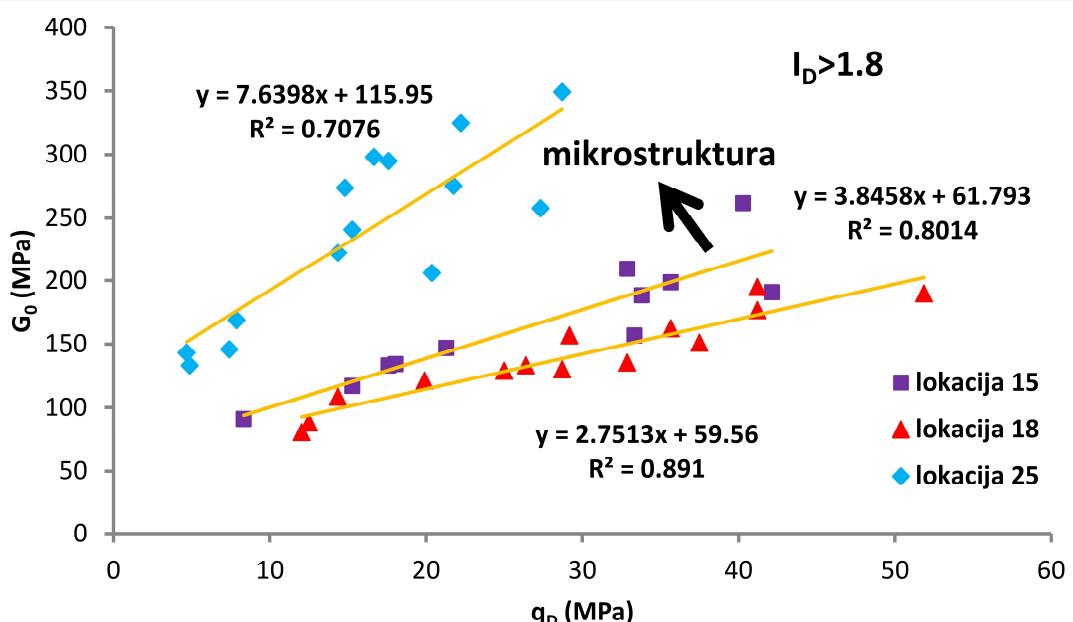
Slika 5.53. Poređenje q_c izmerene i izračunate iz jednačine 5.25 za $I_D > 1.8$



Slika 5.54. Poređenje q_c izmerene i izračunate iz jednačine 5.25 za $I_D > 1.8$ (lokacija 20)

5.8.3. Zavisnost između q_D i G_0 u pesku

Brojna istraživanja (Eslamizaad i Robertson, 1996; Schnaid, 2005; Viana da Fonseca i dr., 2006; Schneider i Moss, 2011) ukazala su da odnos inicijalnog smičućeg modula G_0 i čvrstoće tla izražene u vidu otpora na prođor konusa q_c mogu da ukažu na prisustvo cementacije i starenja u tlu. G_0 i q_c zavise od relativne zbijenosti, efektivnog naponskog stanja i prisustva mikrostrukture (starenje i cementacija) u tlu (Schneider i Moss, 2011). Međutim, G_0 je osetljiviji na prisustvo mikrostrukture od q_c , zato je odnos G_0/q_c veći kod tla sa izraženom mikrostrukturom nego kod tla kod koga mikrostruktura nije izražena. Analogno tome, može se pretpostaviti da q_D i G_0 izmereni u SDMT optitu imaju potencijal da ukažu na prisustvo mikrostrukture u tlu. Na slici 5.55 prikazana je zavisnost G_0 od q_D za peskove sa lokacije 15, 18 i 25. Pesak sa lokacije 25 ima izraženu mikrostrukturu, dok ostala dva nemaju. Sa slike 5.55 vidi se da G_0 raste sa porastom q_D ali da je prirast brži (veći koeficijent pravca) kod peska sa mikrostrukturom.



Slika 5.55. Zavisnost G_0 od q_D za peskovita tla ($I_D > 1.8$)

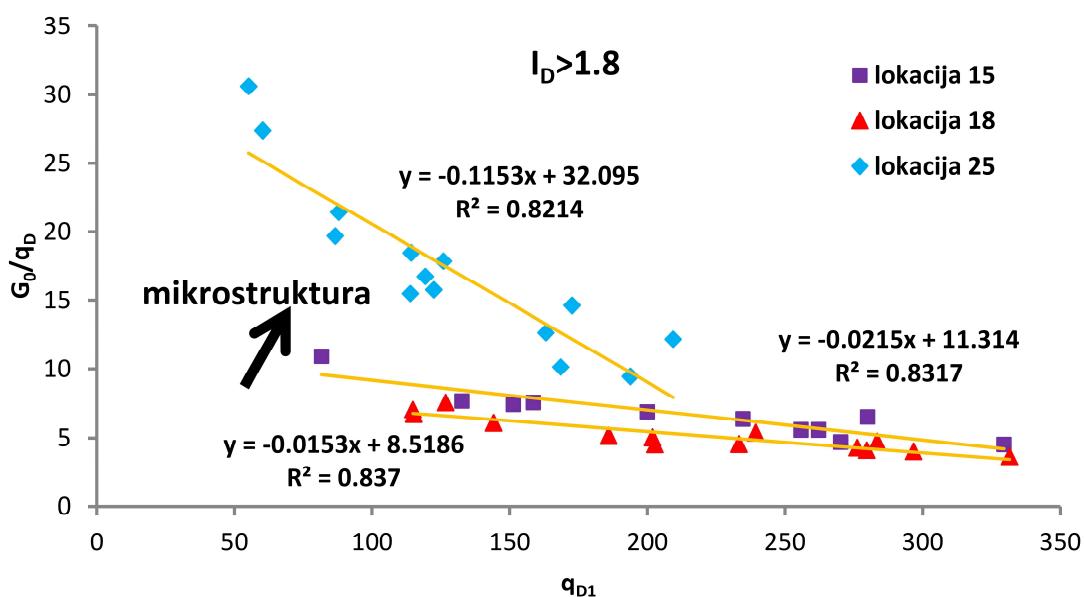
Na sličan način može da se uspostavi zavisnost između G_0/q_D i q_{D1} kao što je prikazano na slici 5.56, pri čemu se q_{D1} određuje iz jednačine 5.27.

$$q_{D1} = \left(\frac{q_D}{p_{ref}} \right) \left(\frac{p_{ref}}{\sigma_{v0'}} \right)^{0.5} \quad (5.27)$$

Pri čemu je:

p_{ref} – referentni napon jednak 100 kPa.

Sa dijagraama prikazanog na slici 5.56 vidi se da odnos G_0/q_D opada sa povećanjem q_{D1} , kao i da je G_0/q_D znatno viši kod cementiranih peskova. To je u saglasnosti sa rezultatima koji se dobijaju iz SCPT opita kao što je prethodno napomenuto. Prednost se daje dijagramu prikazanom na slici 5.56 u odnosu na dijagram sa slike 5.55 iz razloga što je koeficijent determinacije veći, a i dijagram uzima u obzir bezdimenzijsne i normalizovane parametre (G_0/q_D i q_{D1}).

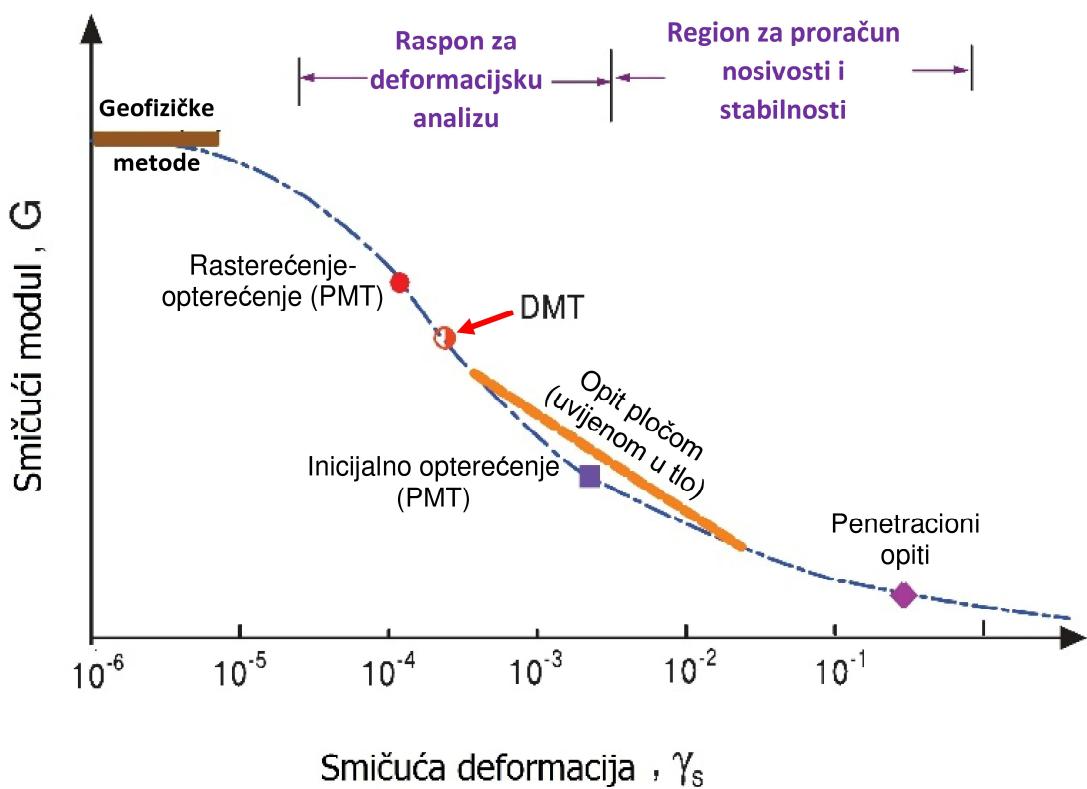


Slika 5.56. Zavisnost G_0/q_D od q_{D1} za peskovita tla ($I_D > 1.8$)

Najveći nedostatak prikazanih zavisnosti je to što je q_D određen iz sile izmerene na manometru postavljenom na glavi penetrometra, pa je stvarni uticaj trenja između šipki i tla i sonde i tla nepoznat. Poželjno bi bilo kada bi se q_D merio na vrhu sečiva tako da buduća istraživanja treba usmeriti ka tom cilju.

5.9. Parametri deformabilnosti

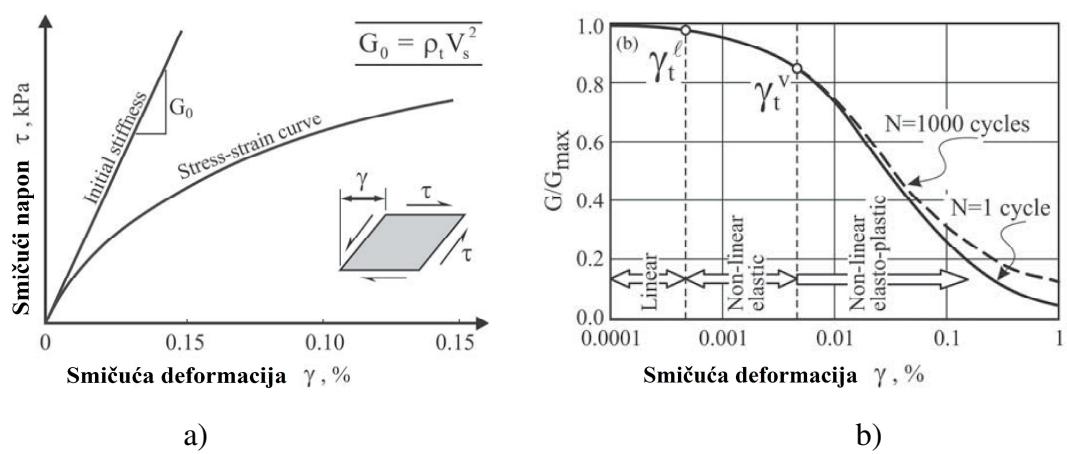
Više različitih parametara koristi se za kvantifikaciju deformabilnih svojstava tla. To su elastični moduli (E , M_v , G , K), Poasonov koeficijent (ν) i njihove međusobne veze: $M_v = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $E = 2G(1+\nu)$ i $E = 3K(1-2\nu)$. Već je napomenuto da fundamentalni deformacijski parametar G_0 , određen iz V_s , pri jako malim nivoima smičućih deformacija ($\gamma < 0.0001$) definiše početak naponsko deformacijske krive prikazane na slici 5.57. Slika ukazuje da se različitim opitima određuju moduli za različite veličine smičućih deformacija koje nastaju u tlu tokom njihovog izvođenja. U daljem tekstu prikazan je postupak određivanja modula stišljivosti (M_{DMT}), inicijalnog smičućeg modula (G_0) i ekvivalentnih modula (E_s i E_{eq}). Ti moduli određuju se za različit nivo mobilisanih deformacija ispod temelja.



Slika 5.57. Opadanje smičućeg modula sa povećanjem smičuće deformacije
(preuzeto iz Mayne, 2001)

5.9.1. Inicijalni modul smicanja (G_0)

G_0 predstavlja nagib inicijalnog linearog dela naponsko deformacijske krive gde su deformacije nakon rasterećenja povratne i elastične prirode (slika 5.58a). Linearni deo naponsko deformacijske krive je ograničen „pragom linearne deformacije” (γ_t^ℓ) koja se kreće u rasponu od 10^{-5} do 10^{-4} (Jamiolkowski, 2012). Na slici 5.58b prikazan je i „prag zapreminske smičuće deformacije” (γ_t^v). Ona predstavlja granicu iznad koje element tla, pri konstantnom srednjem efektivnom naponu, u uslovima povećanja smičućih napona tokom dreniranog opterećenja, počinje plastično da se deformiše, a u uslovima nedreniranog opterećenja počinju da se generišu porni nadpritisci. Modul smicanja G_0 može da se posmatra kao tangentni modul koji je identičan za dinamičke i statičke uslove opterećenja (Mayne, 2001). Određuje se u laboratorijskim uslovima pomoću specijalno konstruisanih triaksijalnih aparata. Međutim, takva oprema je kod nas nedostupna pa se G_0 često određuje in-situ iz SDMT opita. U svakom slučaju in-situ izmereni G_0 treba da predstavlja referentnu vrednost za laboratorijski izmerene G_0 (Jamiolkowski, 2012).



Slika 5.58. Inicijalni modul smicanja: a) grafički prikaz i definicija b) kriva degradacije (preuzeto iz Jamiolkowski, 2012)

Faktori koji utiču na izmerenu V_s (G_0) opisani su u poglavlju 3.2. Isti faktori utiču i na G_0 , međutim in-situ opiti omogućavaju merenje G_0 koji odgovara ambijentalnom efektivnom naponskom stanju i koeficijentu poroznosti koje poseduje tlo u trenutku

ispitivanja. Brojna istraživanja ukazuju da promena G_0 u zavisnosti od naponskog stanja i koeficijenta poroznosti može da se opiše jednačinom 5.28.

$$G_0 = C_G F(e) [(\sigma_a')^{na} (\sigma_b')^{nb} (p_a)^{-2(na+nb)}] \quad (5.28)$$

Pri čemu je:

C_G – eksperimentalno određena materijalna konstanta,

na i nb – eksperimentalno utvrđen naponski eksponent,

$F(e)$ – funkcija koeficijenta poroznosti,

σ_a' – efektivni napon u pravcu prostiranja talasa i

σ_b' – efektivni napon u ravni polarizacije.

Jednačina 5.28 omogućuje da se za dato tlo, poznavanjem funkcije koeficijenta poroznosti i materijalnih konstanti, odredi G_0 pri različitim naponskim stanjima i zbijenostima. Za određivanje funkcije koeficijenta poroznosti i materijalnih konstanti potrebna su skupa i kompleksna ispitivanja koja nisu deo rutinske prakse.

Iz izmerenih V_s , prema teoriji elastičnosti, inicijani modul smicanja određuje se iz jednačine 5.29.

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (5.29)$$

5.9.2. Određivanje ekvivalentnog modula E_s iz izmerenih V_s

Module G_0 i E_0 je potrebno redukovati radi korišćenja u proračunu sleganja temeljnog tla s obzirom da su deformacije ispod temelja veće od deformacija pri kojima se oni određuju. Mayne i sar. (1999) i Sabatini i sar. (2002) daju postupak za određivanje ekvivalentnog modula elastičnosti (E_s) koji se koristi pri analizi sleganja temelja. Postupak podrazumeva merenje V_s po dubini, a sastoji se u sledećem:

- formirati model tla prema izmerenim G_0 ,
- izdvojiti sredine sa pripadajućim G_0 ili naći prosečnu vrednost G_0 ispod temelja do dubine uticaja opterećenja,

- usvojiti hiperboličku zavisnost između vrednosti degradacije modula E/E_0 i opterećenja, odnosno faktora sigurnosti (F_s) prema jednačini 5.30 i
- odrediti E_s kao $E_s = \left(\frac{E}{E_0}\right) 2\rho V_s^2 (1 + \nu)$.

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{q}{q_{ult}}\right)^g \quad (5.30)$$

U jednačini 5.30 član q/q_{ult} predstavlja recipročnu vrednost faktora sigurnosti ($1/F_s$). Mayne i sar. (1999) preporučuje da se za bezdimenzionalni parametar g koristi 0.3 u slučaju finozrnih i grubozrnih tla bez znatne mikrostrukture. Da bi se odredio odgovarajući modul potrebno je da se poznaje radno i granično opterećenje ili faktor sigurnosti u uslovima eksploatacije objekta. U tlu sa izraženom mikrostrukturom kada se koristi vrednost $g=0.3$ izračunata sleganja su konzervativna (Sabatini i sar., 2002). Da bi se odredio E_s potrebno je prepostaviti vrednost Poasonovog koeficijenta. Jamiolkowski (1994) navodi da se za uobičajene veličine opterećenja od objekta u dreniranim uslovima, Poasonov koeficijent kreće u rasponu $0.1 < \nu < 0.2$. Sabatini i sar. (2002) preporučuje da se za ν koristi 0.1 kod grubozrnih tla.

5.9.3. Modul stišljivosti (M_{DMT})

Jedan od najbitnijih parametara koji se dobija DMT opitom je dilatometarski modul stišljivosti (M_{DMT}) koji predstavlja empirijski ekvivalent edometarskog modula stišljivosti (E_{oed}). Dilatometarski modul stišljivosti M_{DMT} predstavlja vertikalni, drenirani, tangentni modul pri vertikalnom efektivnom naponu σ_{v0}' . Marchetti (1980) je uspostavio korelaciju između M_{DMT} i E_{oed} koja važi i za dreniranu i za nedreniranu ekspanziju membrane (peskovita i glinovita tla). Nedrenirana ekspanzija membrane u finozrnom tlu, različiti pravci delovanja opterećenja kod DMT i edometarskog opita i uticaj efekta utiskivanja, uslovljavaju empirijsku prirodu korelacije između M_{DMT} i referentnog E_{oed} . Modul M_{DMT} određuje se množenjem E_D korekcionim faktorom R_M , kao što je dato jednačinom 5.31.

$$M_{DMT}=E_D R_M \quad (5.31)$$

Korekcioni faktor je funkcija I_D i K_D , pri čemu najveći uticaj ima K_D . Formule za određivanje R_M prikazane su u tabeli 5.10. U najvećem broju slučajeva R_M se kreće u rasponu od 1 do 3 (Marchetti i sar., 2001).

Tabela 5.10. Formule za određivanje korekcionog faktora R_M (Marchetti i sar., 2001)

Uslov za I_D	Formula	Vrsta tla prema I_p
$I_D \leq 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$	glina
$I_D \geq 3$	$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$	pesak
$0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ $R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6)$	prašine i prašinasti pesak
$K_D > 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$	sva tla
$R_M < 0.85$	$R_M = 0.85$	sva tla

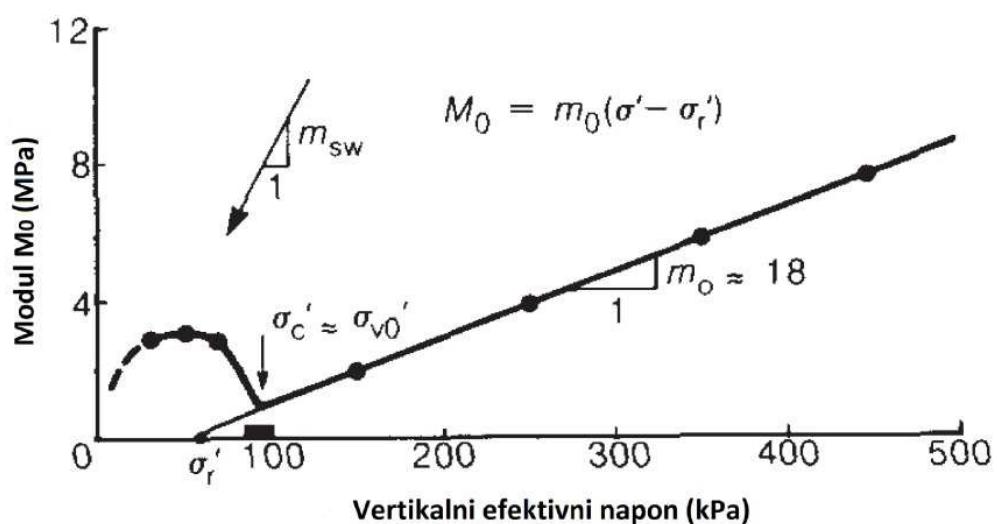
Modul M_{DMT} se koristi u proračunima sleganja na isti način kao što se koristi i E_{oed} primenom teorije jednodimenzionalne konsolidacije. Treba napomenuti da primena modula stišljivosti za proračun sleganja nije uvek opravdana jer granični uslovi u edometru i pretpostavka da nema horizontalnih deformacija (k_0 -opit) tla nisu u potpunosti zadovoljeni u realnim situacijama. Ta razlika je pogotovo izražena kod temelja malih dimenzija oslonjenih na stišljivo tlo velike debljine. Bez obzira na pomenuto, 1-D konsolidacija se najčešće koristi pri analizi sleganja u geotehničkoj praksi. Burland i sar. (1977) i Poulos (2000) navode da je za proračun sleganja od primarnog značaja određivanje odgovarajućeg deformacijskog parametra, a da metod proračuna ima manji značaj.

5.9.3.1. Opravdanost upotrebe M_{DMT} kao konstante

Dobro je poznata činjenica da E_{oed} nije konstanta, već se menja u zavisnosti od nanetog opterećenja (Janbu, 1985; Janbu 1998). Na slici 5.59 prikazan je dijagram zavisnosti tangentnog modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog napona. Sa slike se vidi da postoji nagli pad modula u trenutku kada napon dostigne vrednost napona prekonsolidacije (p_c'). Nakon toga uzorak se ponaša normalno konsolidovano i modul linearno raste sa porastom napona. Zato modul koji se koristi u proračunu sleganja treba

da predstavlja prosečni modul u određenom intervalu naponu koji je od interesa (od inicijalnog do sekundarnog). Određivanje prosečne veličine modula moguće je iz rezultata edometarskog opita ali nije moguće ukoliko je poznata samo vrednost modula pri vertikalnom efektivnom geostatičkom naponu (kao što je M_{DMT}). Zato predviđanje sleganja upotrebom M_{DMT} predstavlja aproksimaciju. Marchetti (2015) navodi da je upotreba M_{DMT} kao konstantne veličine opravdana, s obzirom da je kod većine tla, izuzev glina sa jako izraženom mikrostrukturom, promena modula prilikom dostizanja naponu prekonsolidacije umerena. Kada se uzme u obzir poremećenost uzorka i poteškoće u preciznom određivanju naponu prekonsolidacije iz edometarskih opita, gore pomenuta pretpostavka ima opravdanja uz mogućnost pojave manje greške.

Treba napomenuti da M_{DMT} predstavlja „operativni modul“ tokom konsolidacije, tako da izračunata sleganja su primarna i ne uključuju sekundarna (Marchetti, 2001).



Slika 5.59. Zavisnost tangentnog modula stišljivosti od vertikalnog efektivnog naponu (Janbu, 1985)

Schmertmann (1986) je dao postupak koji uzima u obzir promenu M_{DMT} sa promenom vertikalnog naponu primenom metode „Janbuovog tangentnog modula“. Međutim, utvrđeno je da su razlike u izračunatim sleganjima male kada se pretpostavi da je $M_{DMT} \approx$ konstanta i kada se pretpostavi da je $M_{DMT} = f(\sigma_v')$ (Schmertmann, 1986; Monaco i sar. 2006). Proračun sleganja temelja upotrebom M_{DMT} prikazana je u poglavljju 6.

5.9.4. Određivanje ekvivalentnog modula (E_{eq}) upotrebom G_0 i E_D

Lehane i sar. (2009) predlažu metodu za određivanje ekvivalentnog modula peska (E_{eq}) upotrebom G_0 i E_D iz SDMT opita. Metoda je izvedena za NC peskove bez znatne mikrostrukture. Ekvivalentni modul E_{eq} se određuje iz jednačine 5.32.

$$E_{eq} = \frac{(E_0 / \sqrt{\sigma'_{v0}}) \sqrt{\sigma'_{v,avg}}}{[(s/B)/0.00005]^C} \quad \text{za } s/B > 0.0005 \quad (5.32)$$

Pri čemu je:

$$C = \frac{\log(E_{s/B \leq 0.005\%}/E_{s/B = 1.8\%})}{\log(1.8/0.005)},$$

$Z(m) = (B)^{0.75}$ – dubina (zona) uticaja opterećenja,

B – širina temelja (u metrima),

$\sigma'_{v,avg} = \sqrt{(q\sigma'_{v0})}$ – prosečni napon unutar zone uticaja,

q – opterećenje od temelja,

σ'_{v0} – vertikalni efektivni napon na $\frac{Z}{2}$,

s/B – odnos sleganja i širine temelja,

$E_0 = E_{s/B \leq 0.005\%} = 2.2G_0$ i

$$E_{s/B = 1.8\%} = 1.3E_D/\sqrt{K_D} \quad \text{za } s/B = 1.8\% \quad (5.33)$$

Lehane i Fahey (2004) na osnovu ispitivanja peskova u Australiji daju izraz za „operativni modul” tla (jednačina 5.33) koji se koristi pri proračunu sleganja krutog temelja za veličinu odnosa sleganja i širine temelja od 1.8 %. Oni DMT opit posmatraju kao mini test opterećenja kod koga je s/B 1.8 % (p₁ se meri pri ekspanziji membrane od 1.1 mm, a prečnik membrane je 60 mm).

5.9.5. Procena kvaliteta uzorka tla

Kada se analizira rezultat edometarskog ili triaksijalnog opita neophodno je da se kvantifkuje i kvalitet ispitanih uzorka što nažalost nije uobičajena praksa. Postoje

različiti načini da se kvantificuje kvalitet uzorka. Jedan od kriterijuma je poređenje V_s izmerenih na terenu i u laboratoriji na uzorcima uzetim sa dubine koja odgovara izmerenim V_s na terenu. Prednost te metode je mogućnost procene kvaliteta kako finozrnih, tako i grubozrnih uzorka (Jamiolkowski, 2012).

Međutim, nedostatak pomenute metode je to što je potrebno proceniti horizontalni napon prilikom rekonsolidacije uzorka do naponskog stanja koje odgovara dubini sa koje je uzorak uzet. U razvijenim zemljama često se na većim projektima koristi radiografska metoda (ASTM D4452). Ta metoda omogućava da se dobije slika koja nedvosmisleno ukazuje na postojanje npr. pukotina koje su nastale kao posledica remećenja inicijalne strukture procesom bušenja i vađenja uzorka iz sržne cevi. Na primer, MIT koristi radiografsku metodu još od 1978 godine. Ta metoda je nezaobilazni deo kod „offshore“ ispitivanja gde postoji ograničen broj visokokvalitetnih uzorka. Ladd i DeGroot (2003) preporučuju da svaka geotehnička zajednica treba da ima bar jedan radiografski uređaj. Još jedan od načina provere kvaliteta uzorka je merenje sukcijske u uzorku odmah nakon vađenja iz tla. Primenljivost metode je ograničena na homogene malopropusne gline kod kojih sukacija ostaje sačuvana posle pada efektivnog in situ napona na nulu nakon vađenja uzorka na površinu.

Andresen i Kolstad (1979) daju kriterijum za određivanje kvaliteta uzorka uzimanjem u obzir volumetrijske deformacije (ϵ_{vol}) pri rekonsolidaciji uzorka do σ'_{v0} u edometarskom ili triaksijalnom opitu (tabela 5.11). Terzaghi i sar. (1996) proširuju pomenuti kriterijum tako što uvode klase kvaliteta od A do E. Autori navode da je njihov kriterijum primenljiv za finozrno tlo kod koga je $OCR < 3-5$. Terzaghi i sar. (1996) navode da su za proračun sleganja upotrebljivi rezultati uzorka koji spadaju u klasu A i B ali da je klasa A poželjnija.

Lunne (1997) i Lunne i sar. (2006) daju kriterijum koji razmatra veličinu $\Delta e/e_0$, umesto ϵ_{vol} , prilikom rekonsolidacije do σ'_{v0} . Autori uzimaju u obzir i OCR navodeći da za jače prekonsolidovana tla $\Delta e/e_0$ opada, odnosno kriterijum postaje rigorozniji (videti tabelu 5.11). Lunne (1997) navodi da je $\Delta e/e_0$ podobniji parametar od ϵ_{vol} za kvantifikovanje s obzirom da na njega poremećenost ima veći uticaj. Kriterijum je izведен uglavnom za marinska tla sledećih karakteristika: IP 6%-43%, w=20%-67%, OCR 1-4 i dubine do 25 m. Brojni autori primenjuju pomenuti kriterijum bez obzira na genezu tla stim da se indeksni pokazatelji uzorka nalaze u pomenutim granicama.

Tabela 5.11. Kvantifikacija poremećenosti uzoraka na osnovu zapreminske promene tokom laboratorijske rekonsolidacije do σ'_{v0} .

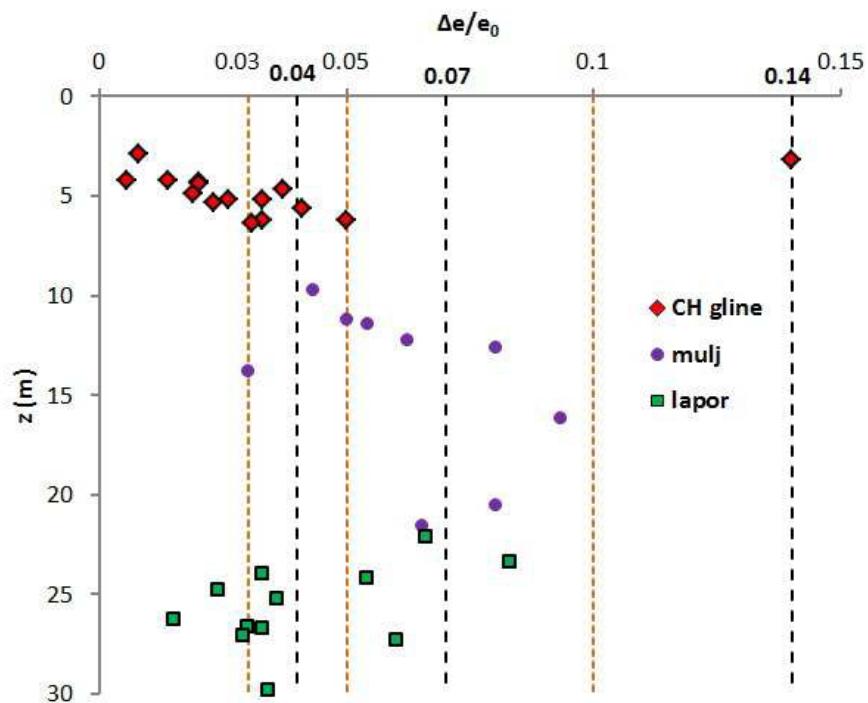
SQD (specimen quality designation) Terzaghi i sar. (1996)		Kriterijum $\Delta e/e_0$ Lunne i sar (2006)		
ϵ_{vol} (%)	SQD	OCR 1-2 $\Delta e/e_0$	OCR 2-4 $\Delta e/e_0$	Klasa
<1	A	<0.04	<0.03	vrlo dobar do odličan
1-2	B	0.04-0.07	0.03-0.05	dobar do zadovoljavajući
2-4	C	0.07-0.14	0.05-0.1	loš
4-8	D	>0.14	>0.1	veoma loš
>8	E			

Provera kvaliteta laboratorijskih uzoraka sa lokacija 13, 12 i 5 primenom $\Delta e/e_0$ kriterijuma prikazana je na slikama 5.60 i 5.61. Veličina $\Delta e/e_0$ pri σ'_{v0} određena je iz rezultata edometarskih opita. Rezultati su preuzeti iz arhive Instituta IMS (lokacija 12 i 5) i arhive Kosovoprojekta (lokacija 13). Svi uzorci imaju indeksne pokazatelje u okviru gore prikazanih granica.

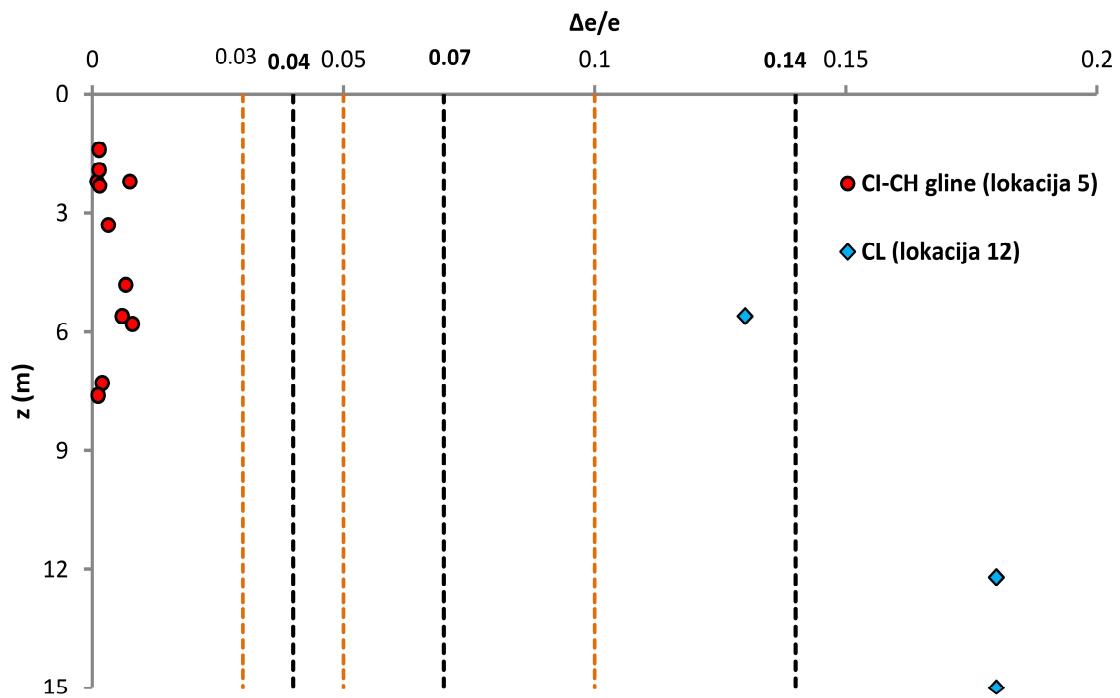
Sa slike 5.60 vidi se da uzorci CH glina spadaju u klasu vrlo dobar do odličan i klasu dobar izuzev jednog uzorka koji spada u klasu veoma loše. Za klasifikovanje CH glina koriste se granice za $\Delta e/e_0$ izvedene za OCR 2-4. Uzorci mulja znatno su slabijeg kvaliteta od uzoraka CH gline. Većina uzoraka mulja spada u klasu dobar i loš (kriterijum za OCR 1-2). Uzorci laporanja su promenjivog kvaliteta, a samo uzorci koji spadaju u prve dve klase biće korišćeni za dalju analizu. S obzirom na lošiji kvalitet uzoraka mulja oni neće biti dalje razmatrani. Određen broj uzoraka laporanja uzet je sa dubina većih od 25 m čime se izašlo izvan granica primenjivosti kriterijuma. Međutim, male $\Delta e/e_0$ mogu da ukažu na visok kvalitet ispitanih uzoraka pogotovo ako se uzme u obzir da poremećenost uzoraka raste sa dubinom (Ladd i DeGroot, 2003).

Na slici 5.61 prikazani su rezultati primene $\Delta e/e_0$ kriterijuma na uzorke uzete sa lokacije 12 i 5. Rezultat sa lokacije 12 odnosi se na uzorke CL glina (videti sliku 5.16) sa izraženom mikrostrukturom. Klasifikacija uzorka prema $\Delta e/e_0$ (OCR 1-2) ukazuje na njihovu znatnu poremećenost. Svi uzorci spadaju u kategoriju loš i veoma loš što može da se doveđe u vezu sa osetljivošću njihove mikrostrukture na proces bušenja. Uzorci sa lokacije 5 predstavljaju tvrde, ispucale prekonsolidovane CI-CH gline. Prema prikazanom klasifikacionom sistemu te gline imaju vrlo dobar do odličan kvalitet. Napominje se da je OCR ovih gline veći od 4, pogotovo je to izraženo na plitkim dubinama gde je σ_{v0}' mali (OCR 6-9), što dovodi u pitanje upotrebljivost prikazanog

kriterijuma. Međutim, pretpostavlja se da niske vrednosti $\Delta e/e_0$ mogu da ukažu na visok kvalitet uzorka.

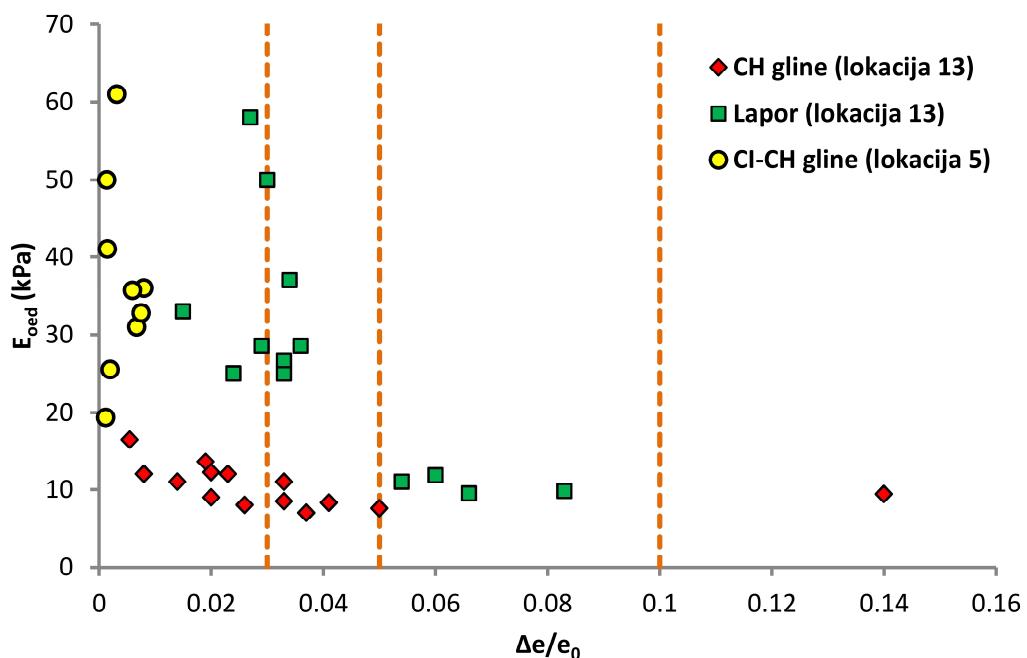


Slika 5.60. Provera kvaliteta uzoraka za tri sredine sa lokacije 13



Slika 5.61. Provera kvaliteta uzoraka sa lokacije 12 i 5

Na slici 5.62 prikazana je zavisnost E_{oed} od $\Delta e/e_0$ za CH gline i lapore sa lokacije 13 (slika 5.60) i CI-CH gline sa lokacije 5 (slika 5.61). Sa dijagrama se zapaža da E_{oed} opada sa povećanjem $\Delta e/e_0$. To ukazuje da se na uzorcima slabijeg kvaliteta dobijaju niže vrednosti E_{oed} , koje mogu da se odraze na neekonomično projektovanje.



Slika 5.62. Zavisnost E_{oed} od $\Delta e/e_0$ za uzorke sa lokacije 13 i 5

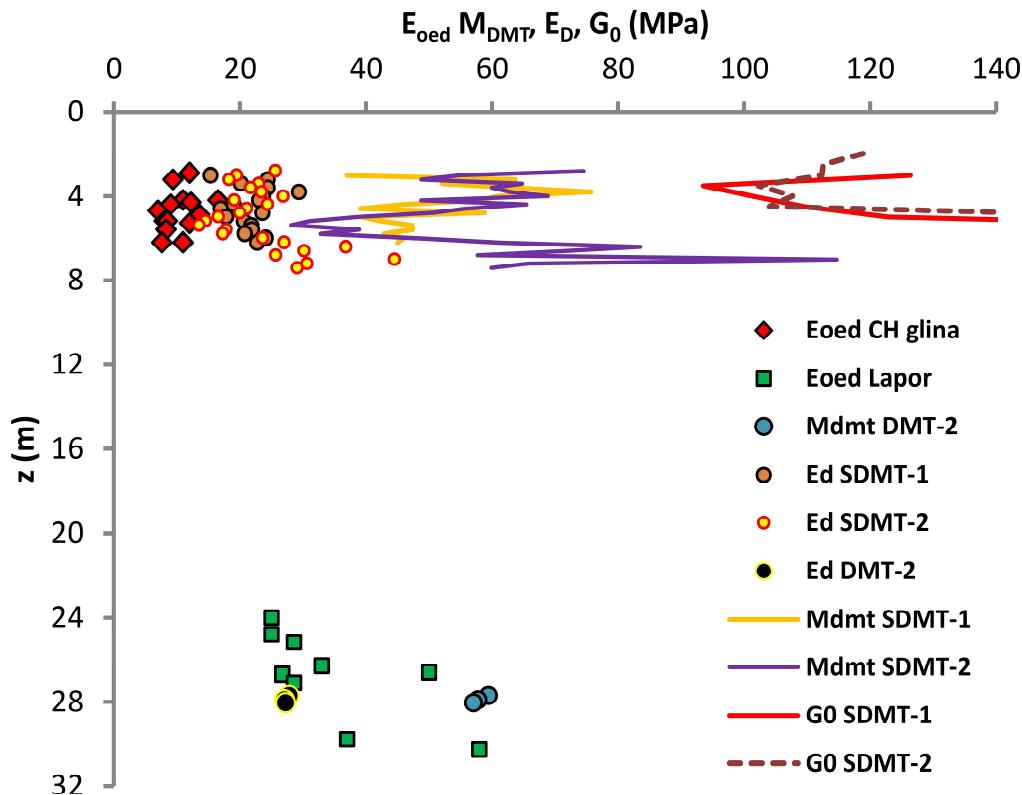
5.9.6. Poređenje E_{oed} i M_{DMT} za finozrno tlo iznad nivoa podzemne vode

U ovom poglavlju prikazano je poređenje E_{oed} i M_{DMT} za tlo iznad nivoa podzemne vode kod koga je $0.6 < I_D < 1.2$. Modul E_{oed} je određen kao sekantna veličina za interval napona koji približno odgovara najbolje procenjenom vertikalnom efektivnom naponu u tlu sa dubine sa koje je uzet uzorak. Za određivanje E_{oed} korišćeni su uzorci uzeti sa lokacija 5 i 13, koji spadaju u prve dve klase kvaliteta prikazani na slikama 5.60 i 5.61.

Na slici 5.63 prikazani su E_{oed} , M_{DMT} , E_D i G_0 po dubini za sloj CH glina i laporanja sa lokacije 13. Sa slike se zapaža sledeće:

- G_0 ima najveće vrednosti od svih prikazanih modula,
- u sloju CH glina M_{DMT} je nekoliko puta veći od referentnog E_{oed} ,
- u sloju CH glina E_D je približniji E_{oed} i

- u sloju laporanog modula E_D je bliži donjoj laboratorijskoj vrednosti E_{oed} , dok je M_{DMT} bliži gornjoj laboratorijskoj vrednosti E_{oed} .



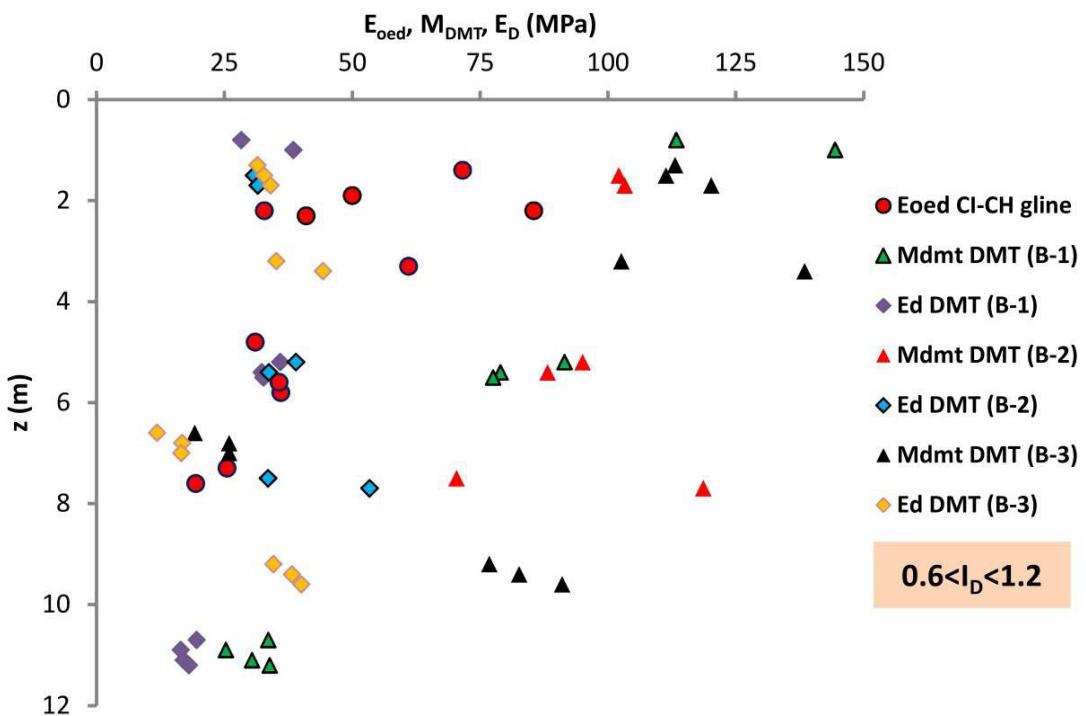
Slika 5.63. Poređenje modula po dubini (lokacija 13)

Na slici 5.64 prikazani su E_{oed} , M_{DMT} i E_D po dubini za sloj CI-CH glina sa lokacije 5.

Sa slike se zapaža sledeće:

- M_{DMT} je nekoliko puta veći od referentnog E_{oed} i
- E_D je bliži donjoj vrednosti E_{oed} .

Na osnovu prikazanog vidi se da M_{DMT} određen u tvrdim prekonsolidovanim glinama ($0.6 < I_D < 1.2$) iznad nivoa podzemne vode, znatno je veći od referentne vrednosti (E_{oed}). To ima za posledicu da ukoliko se u analizi sleganja koristi M_{DMT} , vrednost izračunatih sleganja biće na strani nesigurnosti.



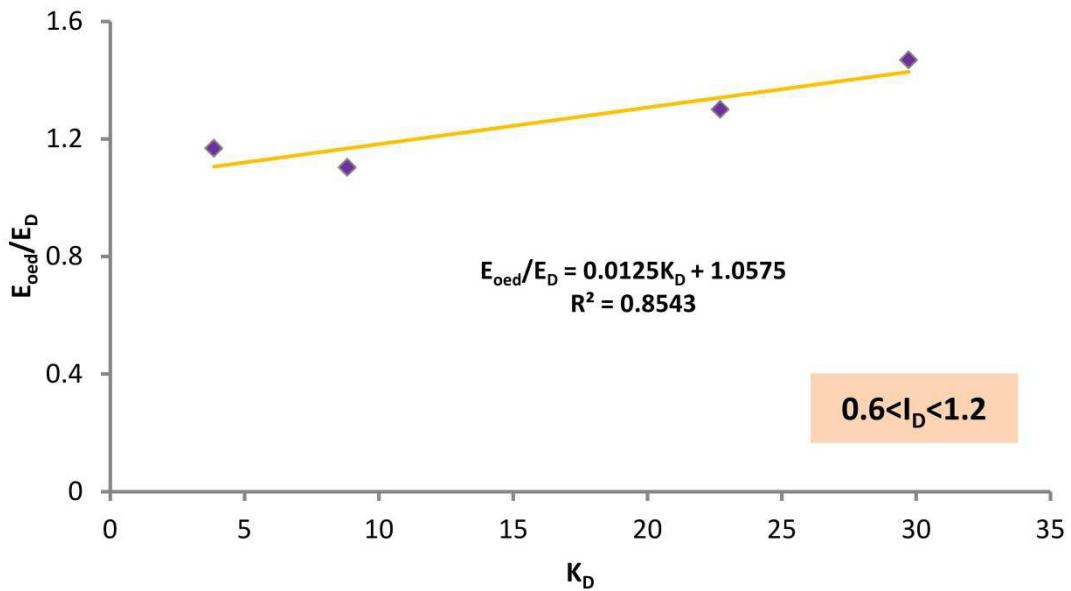
Slika 5.64. Poređenje modula po dubini (lokacija 5)

Na slici 5.65 grafički je prikazana zavisnost E_{oed}/E_D od K_D za lokaciju 5. Prilikom uspostavljanja zavisnosti razmatrani su uzorci uzeti neposredno iznad ili ispod izvedenih DMT opita u istoj bušotini. Sa slike se vidi da sa porastom K_D veličina E_{oed}/E_D linerno raste, a njihova zavisnost može se opisati jednačinom 5.34.

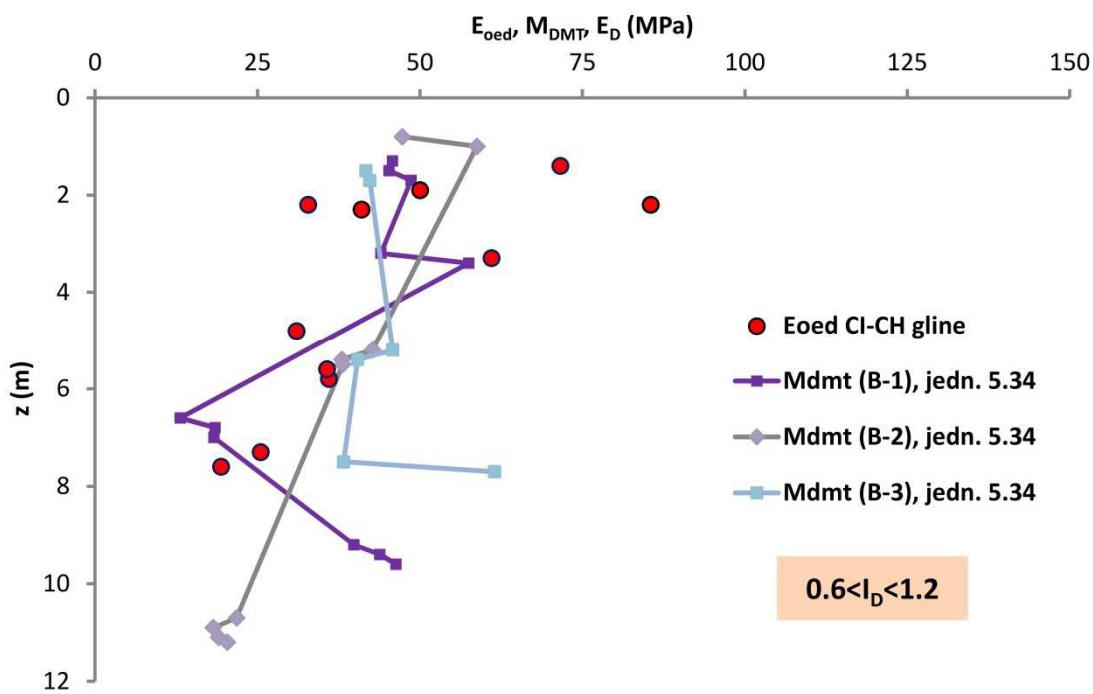
$$\frac{E_{oed}}{E_D} = 0.0125K_D + 1.0575 \quad (5.34)$$

Jednačina 5.34 važi za tla kod kojih je $K_D > 5$ i $0.6 < I_D < 1.2$, odnosno za tla iz prelazne zone prikazane na SBT dijagramu na slici 5.14.

Poređenje E_{oed} određenog iz jednačine 5.34 i referentne laboratorijske vrednosti prikazano je na slikama 5.66 (lokacija 5) i 5.67 (lokacija 13). Sa slike 5.66 zapaža se da jednačina 5.34 približnije predviđa E_{oed} od M_{DMT} određenog prema korelaciji koju daje Marchetti (1980). U sloju CH glina (lokacija 13) jednačina 5.34 daje nešto veće vrednosti E_{oed} od referentnih kod kojih je izraženija poremećenost uzorka nastala u procesu bušenja.



Slika 5.65. Zavisnost E_{oed}/E_D od K_D (lokacija 5)

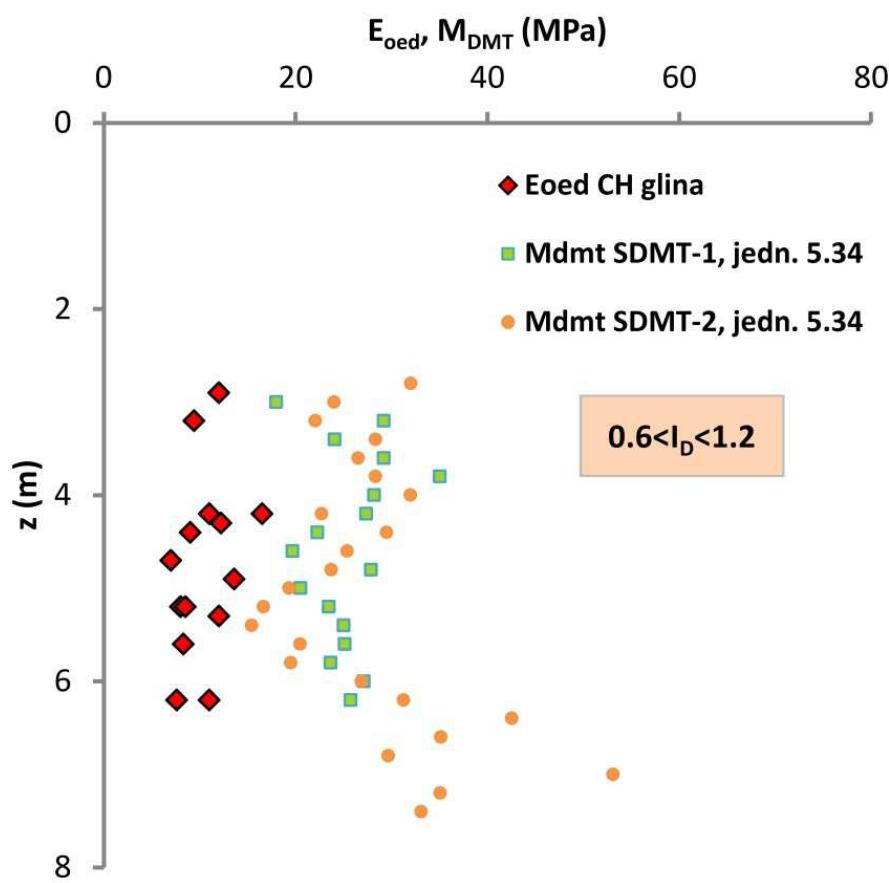


Slika 5.66. Procena E_{oed} iz jednačine 5.34 (lokacija 5)

Predlaže se da se M_{DMT} u tvrdim, ispucalim glinama (tlo prelazne zone) kod kojih je $K_D > 5$ i $0.6 < I_D < 1.2$ određuje prema jednačini 5.34. U laporima se preporučuje upotreba originalne korelacije za određivanje M_{DMT} koju predlaže Marchetti (1980). Već je

napomeno da ta korelacija daje gornju graničnu vrednost (manje poremećeni uzorci) laboratorijski određenih E_{oed} .

M_{DMT} određen iz korelacije koju predlaže Marchetti (1980) ne daje pouzdane vrednosti E_{oed} u tvrdim ispucalim glinama. Razlog za to je preveliki uticaj K_D (p_0) na korelaciju. Napomenuto je da u tvrdoj prekonsolidovanoj glini zavisnost izmerenih pritisaka od pomeranja membrane može da bude nelinearan, a uticaj negativnih pornih pritisaka može da bude veliki (slika 4.4).



Slika 5.67. Procena E_{oed} iz jednačine 5.34 (lokacija 13)

6. KOMPARACIJA SLEGANJA

U ovom poglavlju biće upoređena sleganja dobijena višegodišnjim merenjima sa izračunatim sleganjima iz rezultata SDMT opita. Rezultati sleganja odnose se na objekte koji se nalaze u Beogradu (lokacija 21) i Smederevu (lokacija 12). U proračunu od deformacijskih parametara korišćen je M_{DMT} određen prema korelaciji koju daje Marchetti (1980).

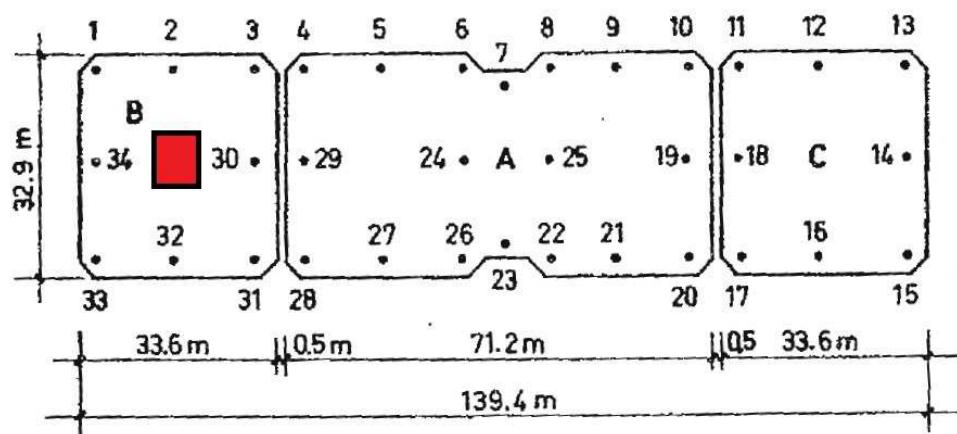
6.1. Silos na obali Dunava u Beogradu

Na desnoj obali Dunava, u sklopu beogradskog pristaništa, izgrađen je silos u periodu od 1959. do 1961. godine. Ukupni kapacitet silosa, koji se sastoji iz blokova A, B i C i mašinske kuće iznosi 40000 tona. Srednji blok A može da primi 20000 tona, a nizvodni blok C i uzvodni blok B po 10000 tona. Blok A ima 4 baterije, a blokovi B i C po 2 baterije. Svaka baterija ima po 8 cilindričnih čelija prečnika 7 m i visine 18.7 m. Visina silosa iznosi 30.7 m, a mašinske kuće 35.0 m. Na slici 6.1 prikazan je izgled silosa i položaj izvedenog SDMT opita. Dimenzije temelja blokova A, B i C kao i položaji repera za osmatranje sleganja prikazani su na slici 6.2. Srednje kontaktno naprezanje na tlo od stalnog opterećenja iznosi $q_0=73$ kPa, a od korisnog $q_1=97$ kPa, tako da je ukupno opterećenje na temeljno tlo $q=170$ kPa.

Detaljna geotehnička terenska i laboratorijska istraživanja sproveo je Institut IMS u nekoliko navrata pre i nakon izgradnje silosa u periodu od 1959. do 1966. godine (Bogdanović, 1973). S obzirom da su maksimalna izmerena sleganja tokom izgradnje i eksploatacije iznosila i do 60 cm silos je bio predmet izučavanja brojnih istraživača. Milović i Đogo (2009) sproveli su numeričke analize u kojima razmatraju uticaj krutosti temeljne ploče i neuniformne raspodele opterećenja na veličinu sleganja. Razmatraju i uticaj debljine deformabilne sredine, odnosno primene različitih rešenja za proračun napona od dopunskog opterećenja po dubini na izračunata sleganja. Za ovaj objekat jedinstveno je da su merena sleganja pojedinih slojeva tla po dubini pomoću specijalno konstruisanih dubinskih repera (Petrović, 1974) što će biti iskorišćeno za poređenje sa računskim sleganjima.

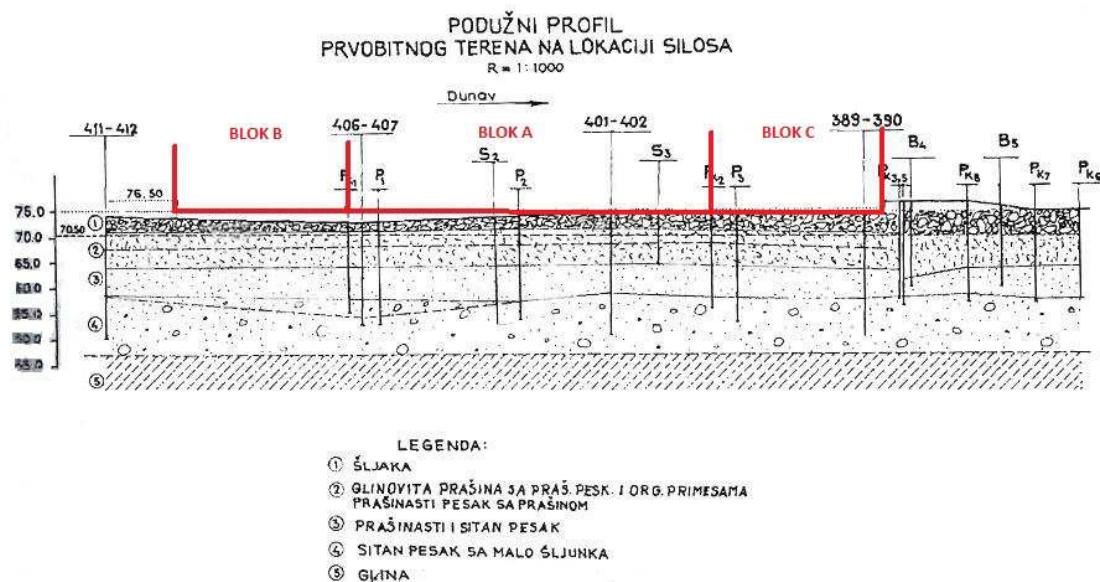


Slika 6.1. Pogled na blok B silosa na obali Dunava i položaj SDMT opita

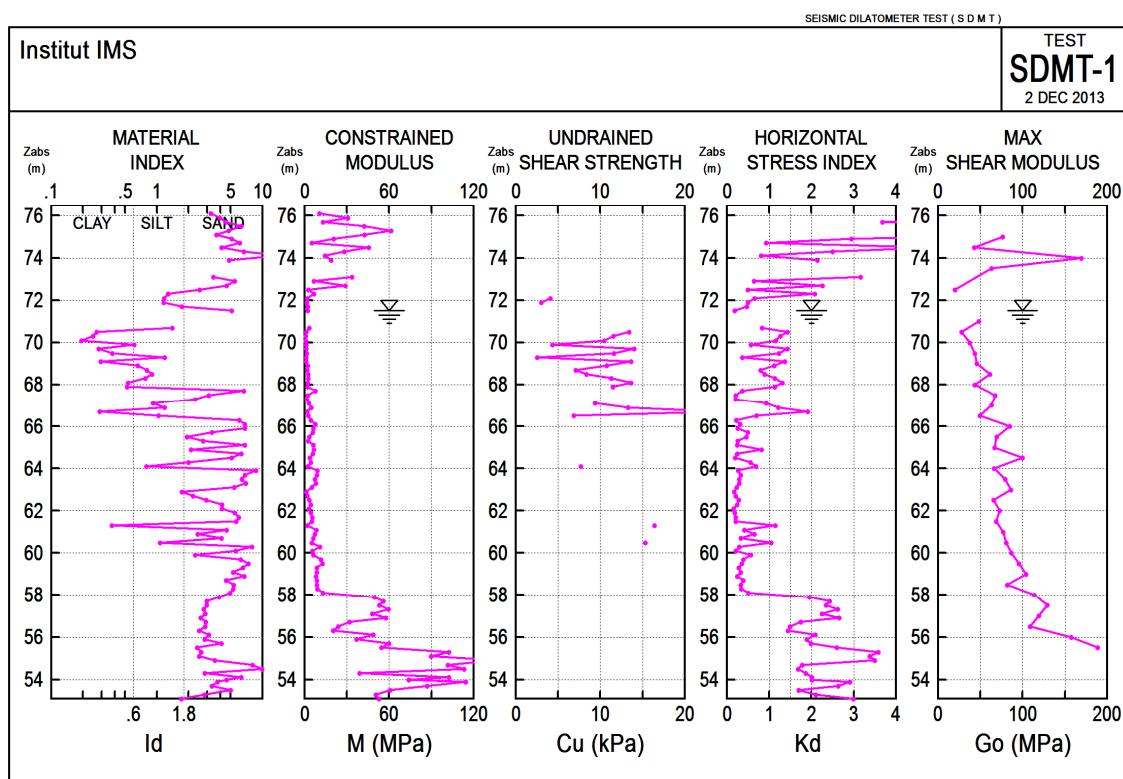


Slika 6.2. Dimenzije temeljnih ploča i položaj repera (kvadrat u središtu bloka B označava položaj dubinskih repera)

Podužni presek terena sa izdvojenim sredinama prikazan je na slici 6.3. Rezultat SDMT opita dat je na slici 6.4. U trenutku ispitivanja nivo podzemne vode bio je na koti 71 mnv. Fundiranje je izvršeno na koti 75.5 mnv, a kota površine terena iznosi 76.5 mnv (sa te kote je izведен SDMT opit).



Slika 6.3. Podužni presek terena na lokaciji silosa (Bogdanović, 1973)



I_d – indeks materijala; **M** (M_{DMT}) – modul stišljivosti; **c_u** (s_u) – nedrenirana smičuća čvrstoća;
K_d – indeks horizontalnog napona; **G₀** – inicijalni modul smicanja

Slika 6.4. Rezultat SDMT opita - silos na obali Dunava u Beogradu

Rezultat SDMT opita ukazuje da se radi o izrazito heterogenom tlu sa čestim smenjivanjem glinovitih, prašinastih i peskovitih proslojaka. Prema rezultatima SDMT opita mogu se izdvojiti sledeći slojevi (oznake su prema Bogdanović, 1973):

1. refulirani pesak, debljine 4.5 m (kota 76.5mnv – 71mnv)
2. glinovita prašina sa prašinastim peskom i organskim primesama, debljine 5.0m (kota 71.0mnv – 66.0mnv)
3. prašinasti pesak sa prašinom, debljine 3.0 m (kota 66.0mnv – 63.0mnv)
4. prašinasti pesak sa sitnim peskom, debljine 5.0 m (kota 63.0mnv – 58.0mnv)
5. Sitan pesak sa šljunkom, debljine preko 5.0 m (gornja kota sloja 58.0mnv)

U sloju 5 završen je SDMT opit. Bogdanović (1973) navodi da je debljina sloja 5 oko 11.0 m. U podini sloja 5 nalaze se tvrde tercijarne gline (ispod kote 47.0 mnv).

Debljine prikazanih slojeva odlično se poklapaju sa debljinama utvrđenim detaljnim geotehničkim istraživanjima (Bogdanović, 1973). Profil M_{DMT} ukazuje da je do kote 58.0 mnv tlo izrazito stišljivo. K_D je neuobičajeno nizak što je posledica uslova dreniranja tokom izvođenja opita. Ovo će posebno biti naglašeno u daljem tekstu. G_0 (V_s) približno linearно raste sa dubinom od kote 71.0 mnv do kote 58.0 mnv.

Prirost V_s sa veličinom geostatičkog efektivnog napona može da se aproksimira jednačinom 6.1.

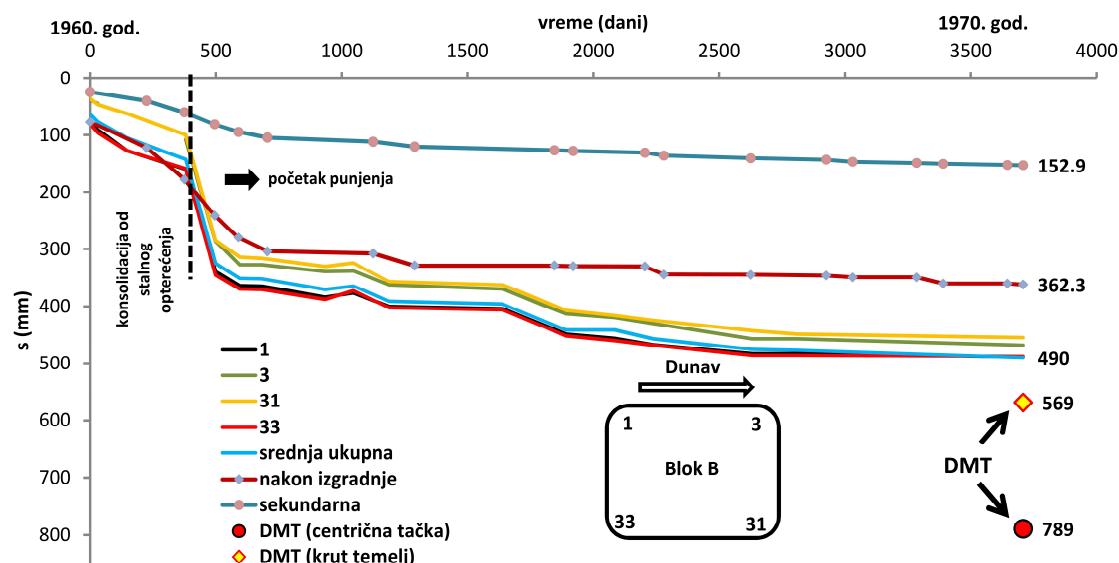
$$V_s \text{ (m/s)} = 93(\sigma_{v0}' / p_{ref}) + 80 \quad (6.1)$$

6.1.1. Poređenje izmerenih i računskih sleganja

Proračun sleganja sproveden je primenom teorije 1-D konsolidacije. Ova teorija predstavlja linearno elastičan pristup kod koga je sleganje proporcionalno nanetom opterećenju. Nelinearno ponašanje nije moguće uzeti u obzir 1-D teorijom. Prirost napona po dubini računat je postupkom Štajnbrenera, a kao deformacijski parametar korišćen je M_{DMT} (slojevi debljine 0.2 m). Proračun je sproveden za blok B kod koga su pored površinskih repera osmatrana i sleganja pojedinih slojeva po dubini (videti sliku 6.2). Ploča je približno kvadratne osnove (33.6 m x 32.9 m). Neto kontaktno opterećenje

na tlo iznosi $q_n=154$ kPa. Vremenski tok sleganja prikazan je na slici 6.5. Prikazana sleganja izmerena su na reperima postavljenim u uglovima silosa (reper 1, 3, 31 i 33). Pored njih data su i srednja ukupna izmerena sleganja (svih repera) i računska primarna i sekundarna sleganja izračunata ispod karakteristične tačke za krut temelj (Bogdanović, 1973). Bogdanović (1973) je ukazao na značaj sekundarne kompresije (puzanja) slojeva 2 i 3 kao i sloja refuliranog peska (1) na ukupna izmerena sleganja. Gradnja bloka B počela je sredinom 1960. godine, a ukupno opterećenje dostignuto je tek sredinom 1966. godine. Tome je prethodilo nekoliko ciklusa delimičnog punjenja i pražnjenja silosa. Bogdanović (1973) navodi da su sleganja koja nastaju za vreme nanošenja opterećenja u granicama 60-80 % od krajnih sleganja u zavisnosti od brzine nanošenja opterećenja. Računska SDMT sleganja upoređena su sa sleganjem ostvarenim u fazi nanošenja opterećenja. Na taj način eliminisana su sekundarna sleganja.

Sa slike 6.5 vidi se da SDMT izračunata sleganja ispod karakteristične tačke iznose 569mm, dok ostvarena sleganja za vreme nanošenja opterećenja iznose 362mm. Dakle, SDMT sleganja su 1.6 puta veća u odnosu na srednja ostvarena sleganja za vreme nanošenja opterećenja. Na slici 6.5 data je i veličina sleganja određena iz SDMT opita pri čemu je prirast napona od dopunskog opterećenja računat za centričnu tačku. Tako dobijena sleganja su 1.6 puta veća od srednjih ukupnih izmerenih sleganja.



Slika 6.5. Vremenski tok sleganja Silosa na obali Dunava u Beogradu

Na slici 6.6 a) prikazano je izmereno sleganje, ispod centra temeljne ploče, po dubini za opterećenje $q_n=154$ kPa. Maksimalno izmereno sleganje iznosi 540 mm na kontaktu temeljne ploče i tla. Sleganje koje nastaje u vreme nanošenja opterećenja (isprekidana linija) određeno je kao 70 % od ukupnog izmerenog sleganja¹. Na taj način eliminisana su sekundarna sleganja, što omogućava direktno poređenje izmerenih i SDMT računskih sleganja. Kod analize izmerenih sleganja ispod centrične tačke uvedena je prepostavka da se deformacije u horizontalnom pravcu mogu zanemariti, odnosno da izgradnja silosa napreže tlo po k_0 -putanji napona. Napominje se da veličina horizontalnih deformacija ispod silosa nije merena pa je njihov stvarni uticaj na izmerena sleganja nepoznat.

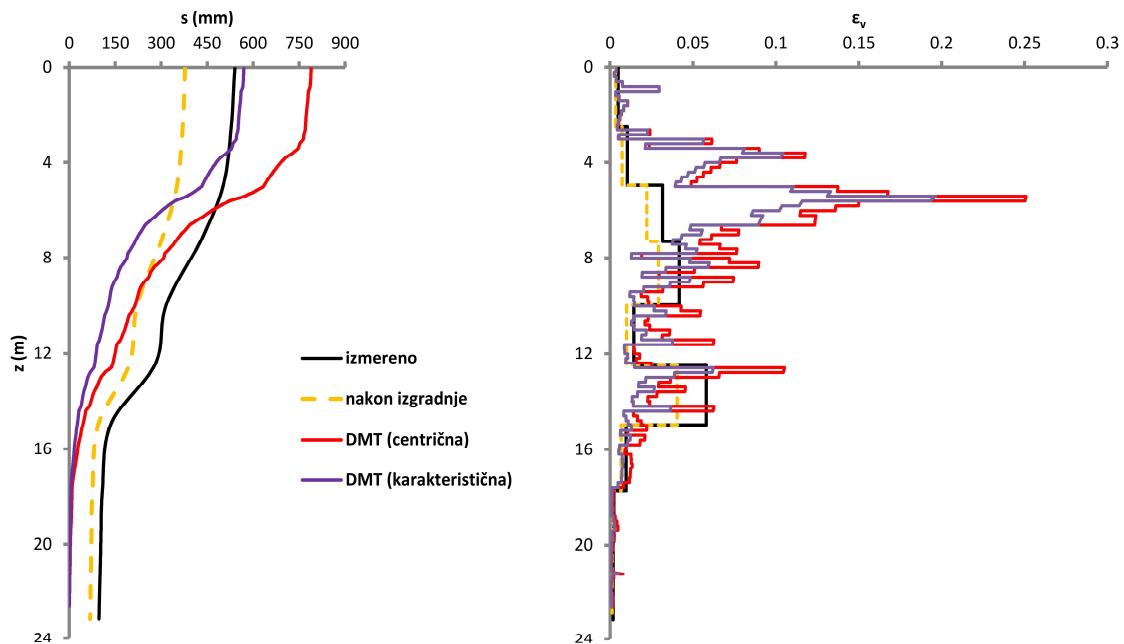
Različiti nagibi krive izmerenog sleganja (slika 6.6) ukazuju na različitu stišljivost pojedinih slojeva. Tako na primer, najmanje je stišljiv sloj 5 i sloj 1, dok je najstišljiviji sloj 2. Pored izmerenih prikazana su i računska sleganja po dubini određena iz SDMT opita. Sa slike 6.6 vidi se da su SDMT sleganja 1.5 do 2.1 puta veća u odnosu na sleganja koja nastaju u vreme nanošenja opterećenja u zavisnosti od toga da li se temelj posmatra kao krut ili kao fleksibilan.

Poređenjem oblika i nagiba izmerenih i računskih krivih vidi se da je najveće međusobno odstupanje u sloju 2, debljine 3.0-4.0 m. Na slici 6.6 b) prikazana je raspodela izmerenih i računskih vertikalnih deformacija (ϵ_v) po dubini. Najveća odstupanja su u sloju 2, pri čemu su računske deformacije znatno veće od izmerenih. U ostalim slojevima deformacije su približne. Razlog za to može da bude to što je DMT opit u sloju 2 delimično dreniran što ima za posledicu da je izmereni pritisak B (izmeren nakon A čitanja) suviše nizak. U tlu gde je disipacija pornih nadpritisaka u fazi ekspanzije membrane od A do B znatna DMT opit ne daje pouzdane rezultate (Marchetti, 2015). U takvoj situaciji, korišćenje parametara dobijenih iz B čitanja je nepouzdano jer je u tom slučaju razlika čitanja B-A mala. Jedini parametar koji može da se interpretira je K_D i s_u koji su nezavisni od B. U sloju 2 velike računske deformacije (u odnosu na izmerene) posledica su malog M_{DMT} , na koji pored A utiče i B čitanje.

Tla kod kojih postoje poteškoće pri interpretaciji rezultata DMT opita na svu sreću nisu česta pojava (npr. Drammen u Norveškoj). Postupci za utvrđivanje da li se radi o

¹ Uvedena je prepostavka da u je svim slojevima po dubini sleganje nakon izgradnje 70% od ukupno ostvarenog sleganja sloja, tako da je linija koja definiše sleganje nakon izgradnje paralelna izmerenoj.

delimično dreniranom tlu i kako izvesti „brzi” ili „spori” opit u pomenutom tlu mogu se naći u Marchetti i sar. (2001) i Marchetti (2015).



Slika 6.6. Poređenje izmerenih i računskih sleganja i vertikalnih deformacija po dubini za blok B silosa na obali Dunava

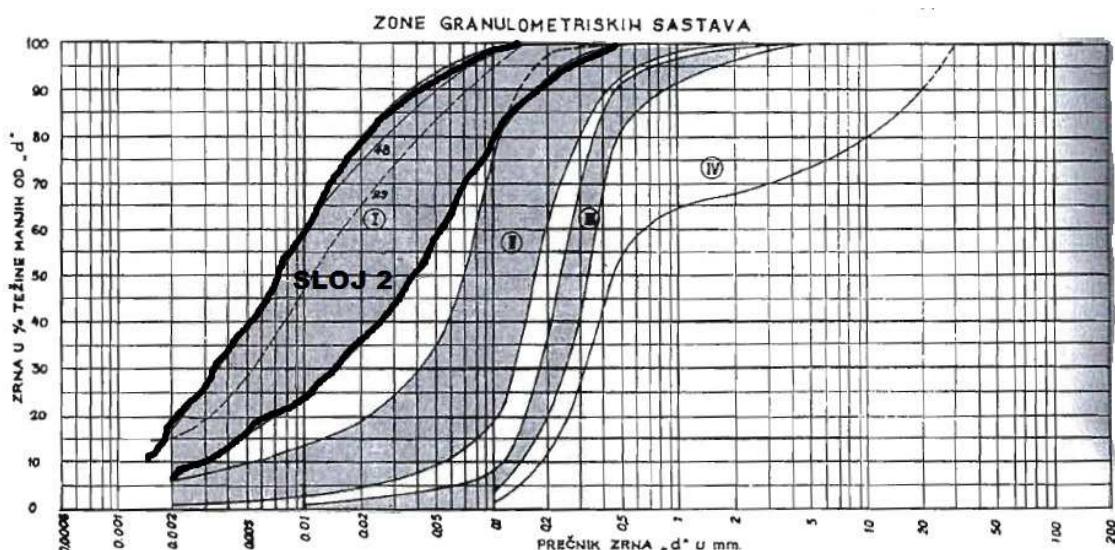
Da bi se eliminisao uticaj delimičnog dreniranja predlaže se primena jednačine 6.2, koja predstavlja zavisnost između M_{DMT} i s_u . U tom slučaju se dobija vrednost modula koja je približna izmerenoj. Izmerena veličina modula pri maksimalnom opterećenju silosa iznosi 4.85 MPa, dok se iz jednačine 6.2 dobija da je „operativni modul” $M_{DMT}=5$ MPa ($s_u \approx 10$ kPa, slika 6.4).

$$M_{DMT}=500s_{uDMDT} \quad 0.35 < I_{Dcorr} < 0.6 \quad (6.2)$$

Jednačina 6.2 preuzeta je iz Larsson (1989) u kome se mogu naći i korelacije između modula i nedrenirane smišuće čvrstoće za druge raspone I_{Dcorr} (videti jednačine 4.6 i 4.7).

Za sloj 2 (glinovita prašina sa prašinastim peskom i organskim primesama) u kome interpretacija rezultata nije pouzdana, zbog poludreniranih uslova koji vladaju u fazi izvođenja opita, krive granulometrijskog sastava prikazane su na slici 6.7. One mogu

poslužiti prilikom interpretacije DMT opita s obzirom da su uslovi dreniranja direktno povezani sa granulometrijskim sastavom tla. Ukoliko se granulometrijska kriva nalazi unutar jasno naznačenih granica DMT parametre koji zavise od B čitanja ne treba koristiti pri interpretaciji rezultata.



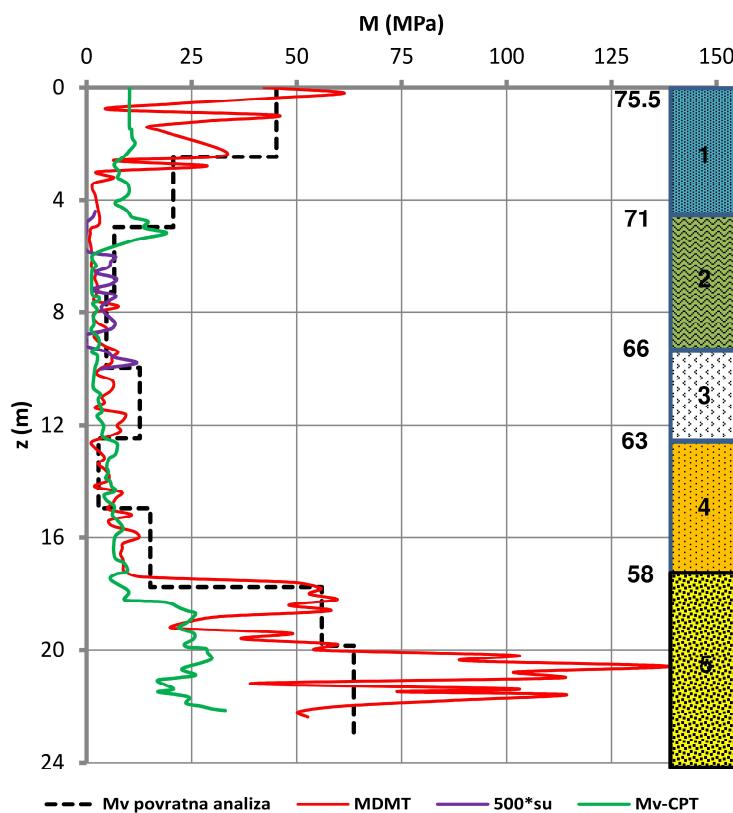
Slika 6.7. Granice granulometrijskih krivih sloja 2 (Bogdanović, 1973)

Na slici 6.8 prikazana je komparacija modula stišljivosti određenih iz SDMT i CPT opita sa referentnim vrednostima koje su određene povratnom analizom iz izmerenih sleganja (deformacija), po dubini pojedinih slojeva (slika 6.6) i odgovarajuće veličine dopunskih naponova. Dopunski naponi određeni su u sredini sloja između dve merne tačke. Prikazani moduli određeni iz povratne analize predstavljaju module koji se odnose na vreme nakon izgradnje objekta (primarna konsolidacija). Tako određene vrednosti su više u odnosu na module koji uključuju sekundarnu konsolidaciju, odnosno puzanje temeljnog tla (Bogdanović, 1973). Prilikom određivanja modula stišljivosti iz CPT opita korišćen je koeficijent α pojedinih slojeva prema preporukama koje daje Bogdanović (1973). Tako određeni moduli su na strani sigurnosti (Bogdanović, 1973). Prosečne vrednosti modula iz penetracionih opita, prikazane u tabeli 6.1, određene su kao geometrijska sredina za određen interval dubine. Iz tabele 6.1 može da se vidi da su moduli određeni povratnom analizom uglavnom veći u odnosu na module određene iz penetracionih opita, s tim što su moduli određeni iz SDMT opita približniji referentnoj vrednosti u poređenju sa modulima iz mCPT opita.

Tabela 6.1. Prosečne vrednosti modula stišljivosti prema različitim metodama

Sloj	Modul stišljivosti (MPa)			Odnos	
	Povratna analiza (PA)	SDMT	mCPT	PA/SDMT	PA/mCPT
1	45 (do 75.5 do 73 mnv)	24.4	10.3	1.8	4.4
	20 (od 73 do 71 mnv)	3.6	8.3	-	2.4
2	5.6	2.0 (5.0*)	3.2	2.8 (1.12)	1.75
3	12.6	5.2	2.7	2.4	4.7
4	2.85 (od 63 do 61 mnv)	3.3	6.0	0.86	0.47
	15.9 (od 61 do 58 mnv)	8.3	6.7	1.9	2.4
5	56.0	43.8	20.0	1.28	2.8
	63.6	81.4	25.0	0.78	2.5

*Modul određen iz jednačine 6.2

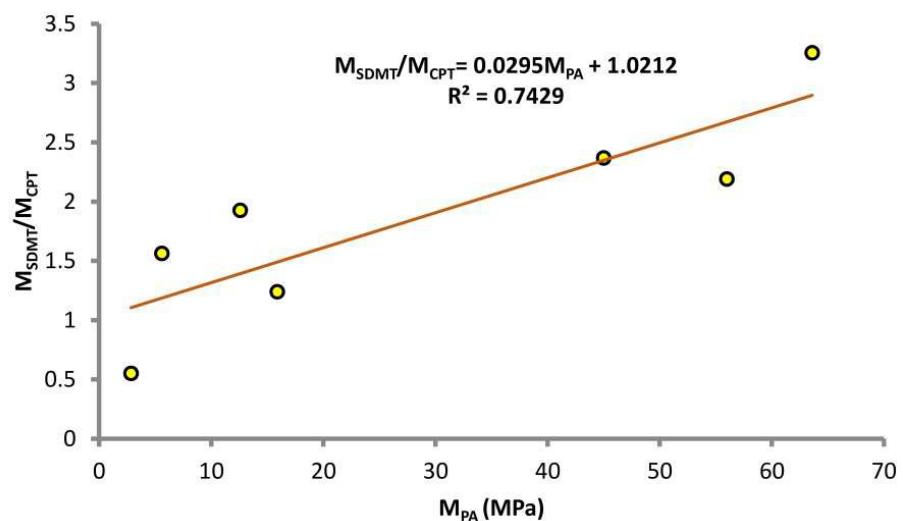


Slika 6.8. Poređenje modula dobijenih povratnom analizom i iz penetracionih opita

Najbolje poklapanje modula određenih iz SDMT opita i iz povratne analize dobijeno je u sloju 5 i površinskom delu sloja 4. U sloju 2, jednačina 6.2 daje približne vrednosti modula. Interesantno je zapaziti da je u slojevima refuliranog peska (1) i sitnog peska (4) odnos „izmerene” i izračunate vrednosti modula približno isti (1.8 i 1.9). Ta dva

sloja imaju paralelne granulometrijske krive (slika 6.7, grupa II i III), pri čemu efektivni prečnik zrna (d_{50}) refuliranog peska iznosi 0.3mm, a sloja sitnog peska 0.1mm. Moguće je da je u pomenutom rasponu d_{50} potrebno povećati module M_{DMT} dva puta kako bi se dobio operativni modul za proračun. Kada je d_{50} veći od 0.3 mm M_{DMT} odgovara operativnom modulu stišljivosti kao kod sloja 5.

Na slici 6.9 prikazan je dijagram na kome je dat odnos modula određenih iz DMT i CPT opita (M_{SDMT}/M_{CPT}) u funkciji modula određenog povratnom analizom (M_{PA}). Vidi se da taj odnos raste sa povećanjem „izmerenog“ (M_{PA}) modula što ukazuje da moduli određeni iz CPT opita imaju tendenciju da budu znatno niži (visok faktor sigurnosti), za penetracione otpornosti $q_c > 15$ MPa, u odnosu na „izmerene“ vrednosti modula. Česta pojava u praksi je da se usvajaju niži koeficijenti α (najčešće 1.5-2.0) za visoke penetracione otpornosti prilikom analize CPT opita. U pesku iz okoline Adelaide (Australija) operativni moduli su 5 do 12 puta veći od penetracionih otpornosti dok je u glinama taj odnos još veći, što ukazuje da je određivanje modula iz CPT opita korišćenjem parametra α vrlo nepouzdano. Treba napomenuti da zavisnost prikazana na slici 6.9 obuhvata drenirane i nedrenirane opite, odnosno rezultate opita izvedenih u finozrnim i sitnozrnim materijalima.



Slika 6.9. Zavisnost modula određenih iz penetracionih opita od modula određenog povratnom analizom

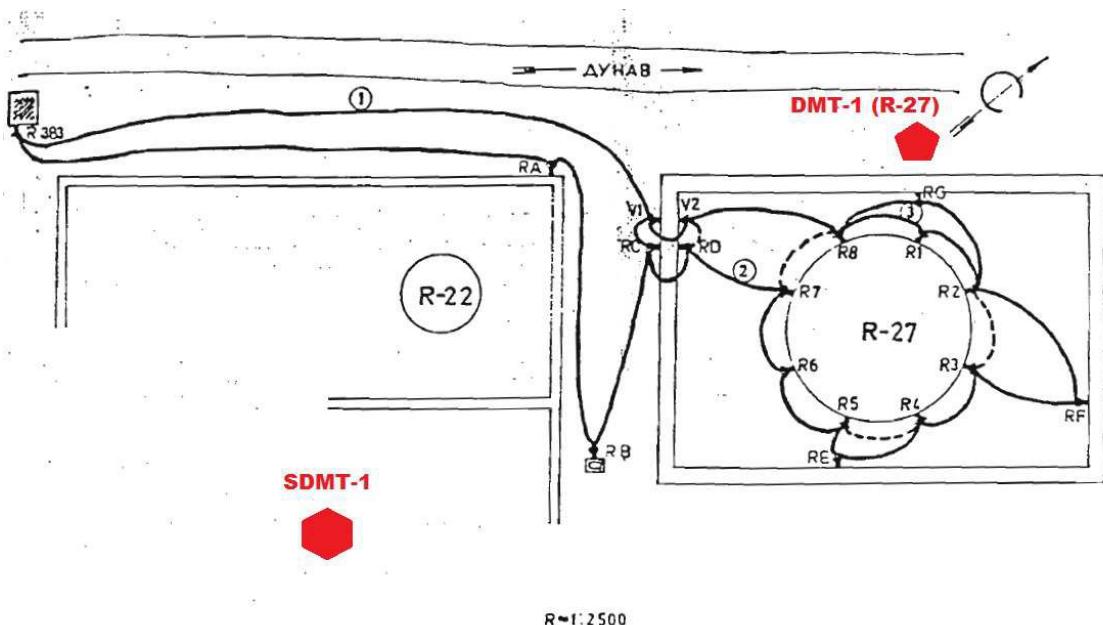
6.2. Rezervoar za skladištenje naftnih derivata u Smederevu

Na desnoj obali Dunava u okolini Smedereva, 1983. godine izgrađen je rezervoar R-27 za skladištenje naftnih derivata zapremine 60000 m^3 .

Na slici 6.10 dat je pogled na rezervoar sa spoljne i unutrašnje strane. Na slici 6.11 prikazana je skica nivelmanske šeme sa položajem repera i izvedenih DMT/SDMT opita. DMT-1 (R-27) opit izведен je u neposrednoj blizini rezervoara, dok je SDMT-1 izведен južno u blizini rezervoara R-19.



Slika 6.10. Izgled rezervoara R-27 sa spoljašnje i unutrašnje strane



*Slika 6.11. Nivelmanska šema sa položajem repera i izvedenih DMT/SDMT opita
(položaj opita je aproksimativan)*

Institut IMS 2010. godine sproveo je detaljna geotehnička istraživanja terena za potrebe provere temeljnog tla rezervoara s obzirom da je isti pretrpeo oštećenja tokom bombardovanja 1999. godine. Ta istraživanja omogućila su sagledavanje prostornog položaja slojeva ispod rezervoara, a iskorišćena su za upoređivanje sa rezultatima DMT/SDMT opita.

Prečnik rezervoara iznosi 73.5 m. Temeljenje dna rezervoara urađeno je preko tamponskog sloja debljine 4.0 m iznad koga se nalazi fleksibilno čelično dno rezervoara. Zid tankvane predstavlja čelični plašt čije se opterećenje prenosi preko temeljne trake na tamponski sloj. Pre puštanja u rad izvršeno je probno punjenje i pražnjenje rezervoara vodom pri čemu su osmatrana sleganja po obimu rezervoara na ukupno osam ugrađenih repera. Maksimalna visina vodenog stuba iznosila je 14.2 m, a sleganje je osmatrano od Novembra 1983. do Marta 1984. godine. Najveće izmereno sleganje iznosi 145 mm, a maksimalno diferencijalno sleganje između pojedinih repera je 26 mm.

Na slici 6.12. prikazani su rezultati DMT-1 (R-27) i SDMT-1 opita. Oba opita izvedena su sa približno iste nadmorske visine van gabarita rezervoara kako bi se eliminisao

uticaj konsolidacije temeljnog tla (usled prethodnog punjenja i pražnjenja) na dobijene rezultate. Na osnovu rezultata DMT/SDMT opita izdvojeni su sledeći slojevi:

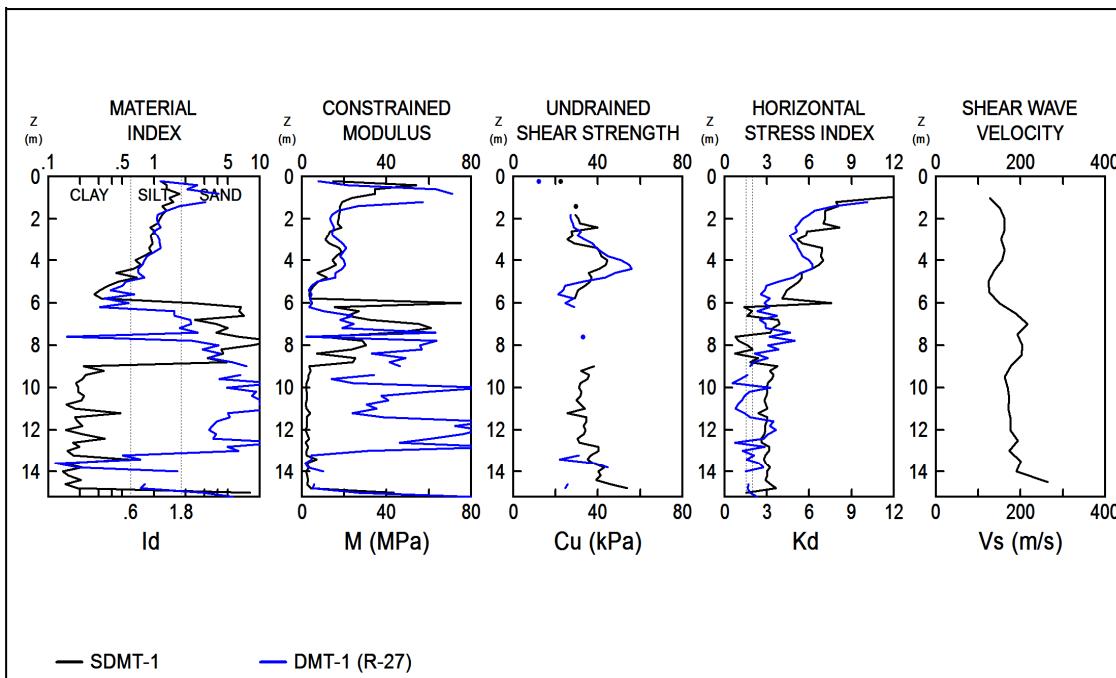
oznaka sloja		debljina (m)
	DMT-1 (R-27)	SDMT-1
1 - prašine peskovite	1.6	1.6
2 – prašine glinovito peskovite	2.2	1.8
3 – gline prašinaste i glinovite prašine	3.6	2.2
4 – peskoviti šljunak i pesak	5.4	3.0
5 – muljevite prašine	2.0	6.0
6 – šljunak i pesak*	0.2	0.2

*nije bila moguće dublje utiskivanje sečiva u ovom sloju

Iz gore prikazanog može se videti da izuzev sloja 1 i 2 postoje razlike u debljini ostalih slojeva kao i da je dubina do sloja peska (6), koji predstavlja podinu izučavanog prostora, u oba opita ista. Debljine slojeva utvrđene detaljnim istraživanjima koje je sproveo Institut IMS odgovaraju debljinama i opisu slojeva iz DMT/SDMT opita u odnosu na njihov položaj. Stim u vezi treba reći da debljina slojeva ispod repera R5 i R6 odgovara debljini slojeva koji su izdvojeni SDMT-1 opitom. Iz tog razloga računsko sleganje određeno iz SDMT-1 opita moguće je uporediti sa izmerenim sleganjem repera R5 i R6 ispod kojih sloj 5 ima najveću debljinu.

6.2.1. Poređenje izmerenih i računskih sleganja

Na slikama 6.13, 6.14 i 6.15 prikazana su sleganja (merodavnih repera) u zavisnosti od visine vodenog stuba u rezervoaru.



I_D – indeks materijala; M (M_{DMT}) – modul stišljivosti; c_u (s_u) – nedrenirana smičuća čvrstoća; K_D – indeks horizontalnog napona; G_0 – inicijalni modul smicanja

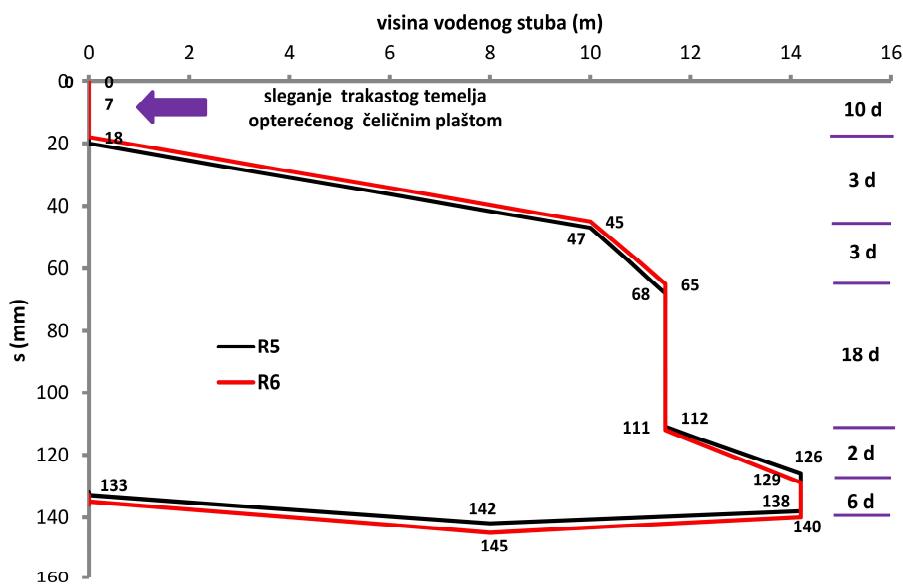
Slika 6.12. Rezultati DMT/SDMT opita na lokaciji rezervoara R-27 u Smederevu

Maksimalna visina vodenog stuba od 14.2 m dostignuta je postupno u više koraka, a vreme potrebno za realizaciju svakog koraka prikazano je na slikama u danima (d). Sa slika 6.13, 6.14 i 6.15 uočava se sledeće:

- Za vremenski period od 10 dana osmatrano je sleganje praznog rezervoara neposredno nakon njegove izgradnje koja uključuje izgradnju tamponskog sloja, trakastih temelja i čeličnog plašta. Ostvareno sleganje je ravnomerno po obimu rezervoara, a iznosi približno 20 mm. S obzirom da su reperi postavljeni sa spoljašnje strane trakastog temelja pomenuta sleganja su u najvećoj meri rezultat sopstvene težine plašta i temelja. Moguće je da je deo sleganja posledica opterećenja temeljnog tla tamponskim slojem.
- Reperi R5 i R6 najviše su se slegli (140 mm). Ujedno ispod ovog dela rezervoara najveća je debljina muljevitih prašina – sloj 5 (slika 6.12, SDMT-1).
- Reper R1 najmanje je slegao. Ispod ovog dela rezervoara debljina sloja 5 je najmanja i gotovo da izostaje (slika 6.12, DMT-1).
- Nakon 16 dana i dostizanja visine vodenog stuba od 11.5 m opterećenje je držano konstantno u trajanju od 18 dana. Za to vreme, pri konstantnom

opterećenju, reperi R5 i R6 slegli su 43 mm i 47 mm, odnosno 65% i 72% u odnosu na prethodno obavljeno sleganje neposredno nakon dostizanja 11.5 m visine vodenog stuba. S druge strane reper R1 za isti vremenski period slegao se 17 mm, odnosno 26% u odnosu na obavljeno sleganje neposredno nakon dostizanja 11.5 m visine vodenog stuba. To ukazuje da se u svim slojevima, izuzev u sloju 5, najveći deo sleganja ostvari tokom nanošenja samog opterećenja.

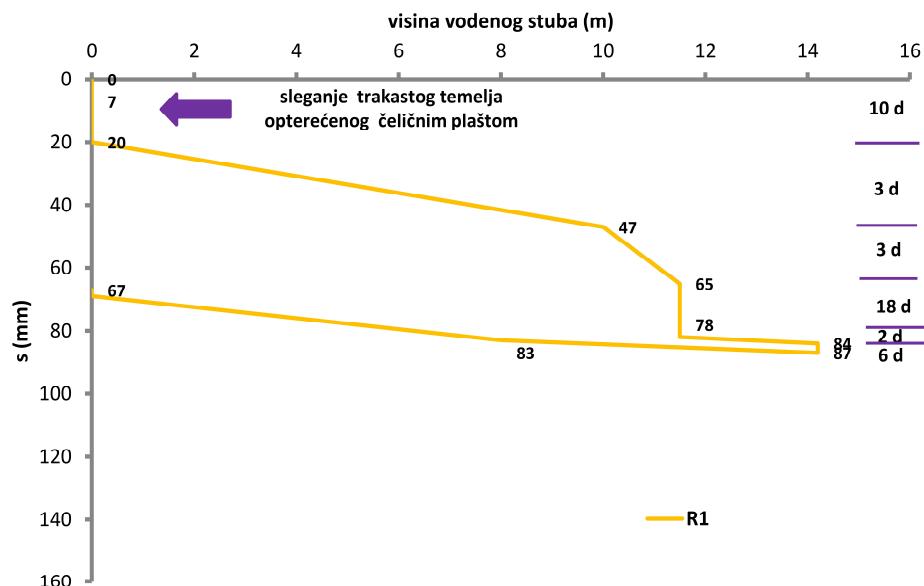
- U sloju 5 pored dugotrajne konsolidacije izražena je i sekundarna kompresija (puzanje) čija kvantifikacija na osnovu kratkotrajnih osmatranja sleganja nije pouzdana. Konsolidaciona sleganja u slabovodopropusnim sredinama (sloj 5) i sekundarna kompresija pod stalnim opterećenjem može da traje godinama. Zato se smatra da prikazana sleganja predstavljaju konsolidaciona sleganja ali da nije izvršena potpuna konsolidacija za određenu visinu vodenog stuba u rezervoaru.



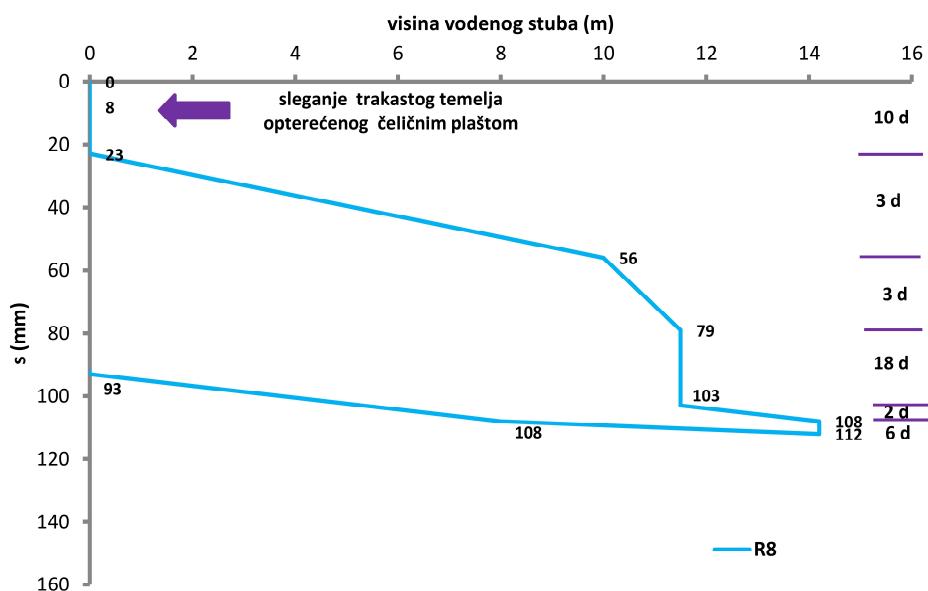
Slika 6.13. Sleganje rezervoara (reperi R5 i R6) u zavisnosti od visine vodenog stuba

Proračun sleganja sproveden je uobičajenim postupkom 1-D teorijom konsolidacije pri čemu je model podeljen na slojeve debljine 0.2 m sa pripadajućim M_{DMT} kao deformacijskim parametrom. Površinski deo M_{DMT} profila zamenjen je tamponskim slojem sa usvojenim modulom stišljivosti $M_{DMT}=40$ MPa. Modul M_{DMT} tamponskog sloja može da se odredi iz poznate veličine sleganja trakastog temelja neposredno pre

punjena rezervoara vodom (videti sliku 6.13 i 6.14 i 6.15). U sloju 6, koji predstavlja praktično slabo stišljivu podinu usvojen je $M_{DMT}=80$ MPa.



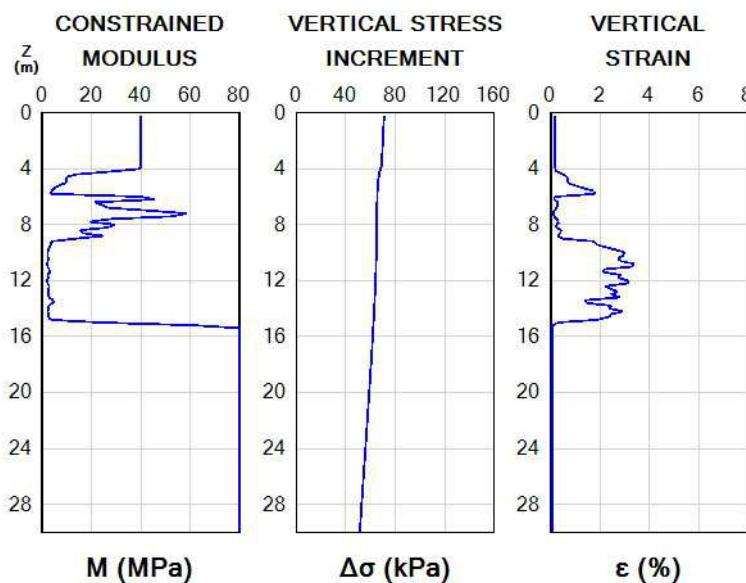
Slika 6.14. Sleganje rezervoara (reper R1) u zavisnosti od visine vodenog stuba



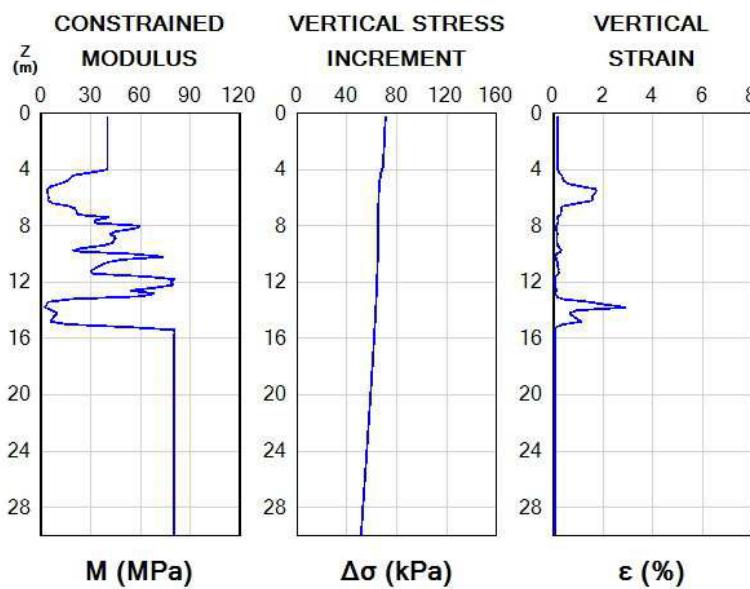
Slika 6.15. Sleganje rezervoara (reper R8) u zavisnosti od visine vodenog stuba

Vertikalni profil M_{DMT} , prirast napona od dopunskog opterećenja i vertikalna deformacija po dubini ispod temelja prikazani su na slikama 6.16 i 6.17 za SDMT-1 i DMT-1 (R-27) opit.

Sa slike se zapaža značajna razlika u izračunatoj vertikalnoj deformaciji od 9.0 m do 15.0 m dubine, što je posledica različite debljine sloja 5.



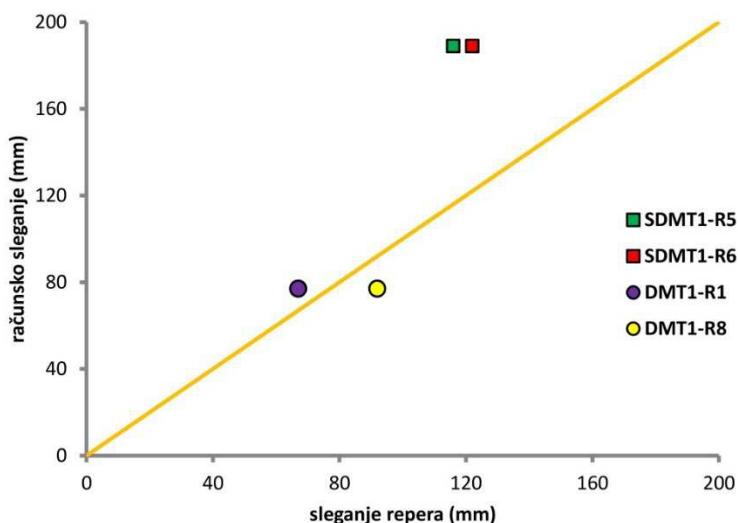
Slika 6.16. Distribucija M_{DMT} , $\Delta\sigma$ i ϵ po dubini na osnovu rezultata SDMT-1 opita



Slika 6.17. Distribucija M_{DMT} , $\Delta\sigma$ i ϵ po dubini na osnovu rezultata DMT-1 (R-27) opita

Sleganje perifernih tačaka (R5 i R6) kružnog temelja iznosi **189 mm** iz SDMT-1 opita, odnosno **77 mm** (R1 i R8) iz DMT-1 (R-27) opita. Periferne tačke odgovaraju pozicijama repera. Merenje sleganja centrične tačke nije bilo moguće tako da ona nisu

razmatrana. Prilikom poređenja izmerenih i računskih sleganja nije uzeto u obzir izmereno sleganje temeljne trake (20 mm) nakon izgradnje rezervoara u trenutku kada je on bio prazan. Komparacija sleganja prikazana je grafički na slici 6.18.

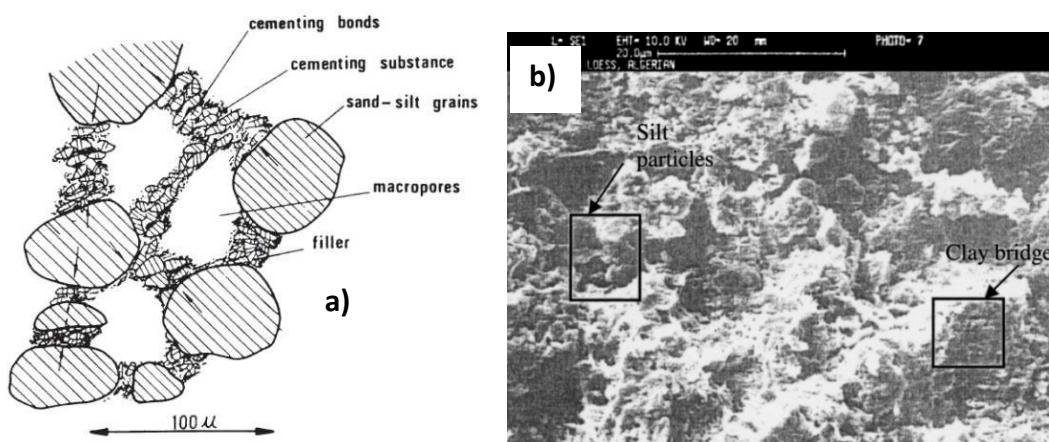


Slika 6.18. Komparacija izmerenih i računskih sleganja

Sa slike 6.18 vidi se da su veća odstupanja izmerenih od računskih sleganja kod SDMT-1 opita gde je utvrđena najveća debljina sloja 5. Ta razlika može da bude posledica nedovršene konsolidacije sloja 5 pri maksimalnoj visini vodenog stuba u rezervoaru od 14.2 m, s obzirom na to da računska sleganja određena iz DMT opita odgovaraju završenoj primarnoj konsolidaciji. Model određen na osnovu DMT-1 opita daje približnija sleganja u odnosu na izmerena (reperi R1 i R8). Ujedno kod ovog opita debljina sloja 5 je najmanja. Napominje se da su veličine izmerenih sleganja mogle da budu drugačije ukoliko bi dinamika punjenja bila drugačija, odnosno sleganja su vremenski zavisna i povećavaju se sa dužim održavanjem određene visine vodenog stuba u rezervoaru.

7. INTERPRETACIJA SDMT OPITA U LESU

Les prekriva približno 10 % kopnene površine Zemlje. Intenzivna urbanizacija, izgradnja saobraćajne infrastrukture i potreba za građevinskim zemljištem, kako kod nas, tako i u Svetu, uslovila je sve češću gradnju na terenima izgrađenim od lesa. Les je, kao građevinsko tlo, specifičan zbog svoje izražene mikrostrukture (slika 7.1) koja je posledica cementacije između zrna. Cementaciju najčešće stvara frakcija gline koja obavlja krupnije čestice prašine i peska. Zrna takođe mogu da budu međusobno vezana i karbonatnim vezivom koje se neizostavno nalazi u lesnom tlu nastalo kao postgenetski proizvod. Karakteristično za les je da formira vertikalne odseke visine nekoliko desetina do nekoliko stotina metara. Takav les je obično makroporozan, sa izraženim makroporama veličine nekoliko mm do nekoliko cm. Specifično za makroporozan les je sklonost ka naglom smanjenju zapremine, odnosno rušenju mikrostrukture, u uslovima intenzivnog provlažavanja ili nanošenja „prekomernog“ opterećenja ili njihovo udruženo delovanje. Ta sklonost se često u literaturi naziva kolapsibilnost i taj termin će nadalje biti korišćen u disertaciji. Les je genetski vezan za eolski proces i u našoj zemlji najveće rasprostranjenje ima na teritoriji AP Vojvodine. Površine prekrivene lesom prikazane su na morfostruktурној karti Srbije na slici 7.2. Na karti su obeležene lokacije na kojima su izvedeni SDMT opiti.



Slika 7.1. Mikrostruktura lesa: a) šematski prikaz (Rogers, 1995) i b) mikroskopski snimak (Nouaouria i sar., 2008)



Slika 7.2. Tereni izgrađeni od lesa u kojima su izvedeni SDMT opiti

7.1. Cilj istraživanja

Osnovni cilj istraživanja je da se ukaže na mogućnost izdvajanja kolapsibilnih zona u lesu na osnovu rezultata SDMT opita i oceni upotrebljivost korelacija za određivanje geotehničkih parametara kolapsibilnog lesa.

Iz tog razloga laboratorijska ispitivanja fokusirana su na kolapsibilni les.

7.2. Prethodna istraživanja u lesu vezana za (S)DMT opit

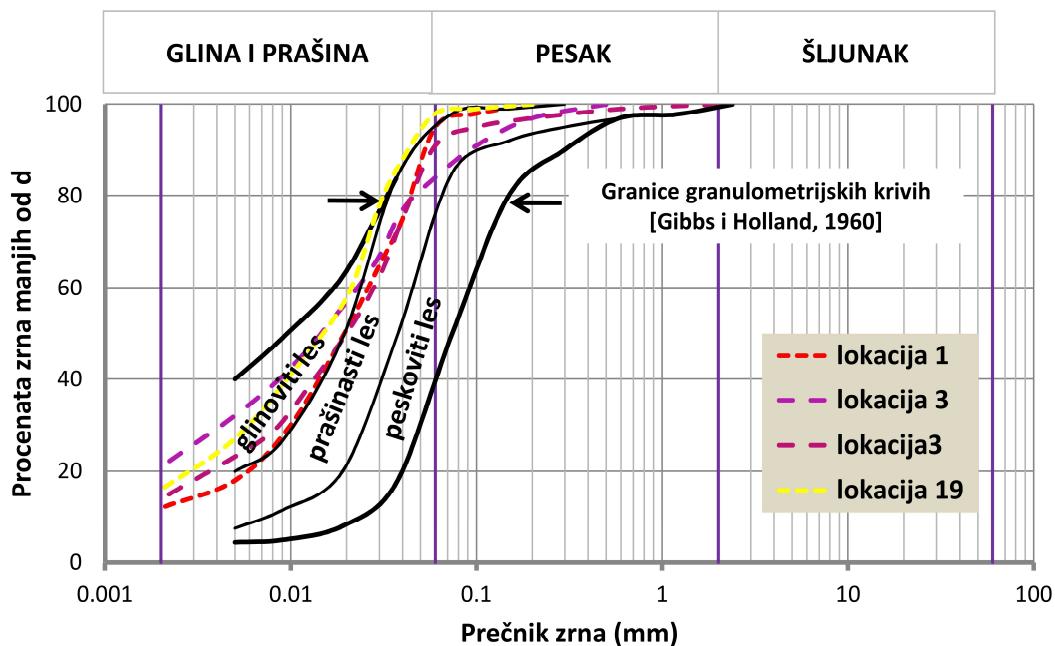
U literaturi se može naći nekoliko radova u kojima su prikazani rezultati DMT opita izvedeni u lesu. Glavni aspekt tih istraživanja odnosi se na mogućnost izdvajanja kolapsibilnih zona i određivanja stepena prekonsolidacije lesnog tla (Lutenegger i

Donchev, 1983; Hamamdshiev i Lutenegger, 1985; Handy i Ferguson, 1994; Handy, 1995; Devincenzi i Canicio, 2001; Berisavljević i sar., 2014; Berisavljević i sar., 2015; Mlynarek i sar., 2015 i Mulabdić i Minažek, 2015). Lutenegger i Donchev (1983) prvi su uočili da je u kolapsibilnom lesu $I_D > 1.8$ i $K_D \sim 0.3 - 0.6$ što je neuobičajen rezultat s obzirom da je prema granulometrijskom sastavu najzastupljenija frakcija prašine (~80 %). Njihovo istraživanje odnosi se na les iz rečne doline Dunava severne Bugarske. Kasnije će se videti da rezultati dobijeni ispitivanjem lesa u Srbiji u velikoj meri potvrđuju rezultate koji su dobijeni u Bugarskoj, što je i očekivano s obzirom da su te dve zemlje geografski veoma blizu.

Prvi SDMT opit izведен u kolapsibilnom lesu prikazali su Berisavljević i sar. (2014). Rezultat je dobijen ispitivanjem lesa, „Zemunskog lesnog platoa” (Bežanijska Kosa, lokacija 3 iz tabele 1). Kasnije je istraživanje prošireno na još dve lokacije u okolini Alibunara (lokacija 1) i Malog Idoša (lokacija 19). Utvrđeno je da merenje V_s ima ogroman značaj za određivanje prisustva mikrostrukture i kolapsibilnosti lesa (npr. videti sliku 5.17). Treba napomenuti da bi značajan doprinos pri interpretaciji SDMT opita imalo i merenje V_p , jer bi to omogućilo da se utvrdi debljina nezasićenih slojeva lesa kod kojih je kolapsibilnost izraženija.

7.3. Geotehnička svojstva izučavanog lesa

Geotehnička svojstva izučavanog lesa određena su laboratorijskim opitima na uzorcima uzetim iz istražnih jama i bušotina. Rezultat se odnosi na kolapsibilni les koji je predmet izučavanja. Granulometrijski sastav lesa sa lokacije 1, 3 i 19 prikazan je na slici 7.3. Na istoj slici prikazane su granice, prema Gibbs i Holland (1960), koje razdvajaju tri osnovne grupe lesa prema njihovom granulometrijskom sastavu. Sa slike se vidi da les sa lokacije 3 i 19 spada u grupu glinovitog lesa, dok je les sa lokacije 1 na granici prašinstog i glinovitog lesa. Ostali relevantni pokazatelji prikazani su u tabeli 7.1. Ispitivanja je sprovedla geomehanička laboratorija Instituta za ispitivanje materijala iz Beograda.



Slika 7.3. Granulometrijski sastav izučavanog lesa

Tabela 7.1. Rezultati edometarskih opita (uzorci iz jama, odseka i bušotine)

Lokacija	Br. uzorka	e_0	γ_w (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	S _r (%)	σ_v pre zasićenja (kPa)	CP (%) prema NAVFAC
3	1	1.042	14.70	12.53	42	prirodna w	-
	2	1.055	14.50	12.46	40	25	0.7
	3	1.077	14.50	12.32	42	100	5
	4	1.058	14.60	12.43	43	200	6.6
1	A*	1.234	12.57	11.72	16	prirodna w	-
	B*	1.225	12.85	11.89	17	25	0.6
	C*	1.172	12.52	11.92	11	200	10.7
19	I**	0.847	18.10	13.98	89	prirodna w	-
	II**	0.777	18.42	14.65	86	prirodna w	-

*Uzorci uzeti iz vertikalnog odseka u blizini izvedenih opita. Plastičnost, granulometrijski sastav i stepen zasićenja odgovaraju uzorcima uzetim sa same mikrolokacije gde su izvedeni opiti

**uzorak iz istražne bušotine

7.4. Kolapsibilnost lesa – identifikacija i kvantifikacija

Postoje različiti kriterijumi na osnovu kojih može da se identifikuje kolapsibilno tlo (npr. videti Lutenegger i Saber, 1988; Rogers i sar., 1994). Ti kriterijumi najčešće koriste suvu zapreminsку težinu (γ_d), granice konzistencije ili njihovu kombinaciju za

identifikaciju kolapsibilnosti. To zahteva da se izvrše laboratorijska ispitivanja na neporemećenim uzorcima kod kojih je očuvana primarna mikrostruktura. Uzeti neporemećen uzorak iz kolapsibilnog tla je vremenski i finansijski zahtevno jer to najčešće podrazumeva iskop istražnih jama. Handy (1995) navodi da u lesu procenat nabušenog jezgra može da bude veoma nizak, do 67 %, što je posledica njegove kompresibilnosti. Milović (1988) navodi da što je veća poroznost lesa veća je verovatnoća da je uzorak mehanički poremećen kada se uzima iz istražne bušotine. Dakle, sve indeksne pokazatelje, kao što su γ_a , w i e_0 , koji mogu da ukažu na sklonost lesa ka kolapsu treba odrediti iz visokokvalitetnih uzoraka uzetih iz istražnih jama. Taj pristup je primenjen u okviru disertacije za les sa lokacije 1 i 3. Sa lokacije 19 nije bilo moguće uzeti neporemećene uzorke iz istražnih jama iz objektivnih razloga.

Kvantifikovanje kolapsibilnosti, odnosno zapreminske promene koje nastaju kao posledica provlažavanja ili nanošenja opterećenja moguće je odrediti na osnovu rezultata edometarske kompresije. Najčešće se koriste dve metode ispitivanja: „edometar samac (single oedometer)” i „dvojni edometar (double oedometer)“. Edometar samac podrazumeva da se na određenom nivou vertikalnog napona izvrši provlažavanje uzorka. Nakon provlažavanja meri se promena koeficijenta poroznosti (ili visine uzorka) za određeni vertikalni napon što omogućava da se odredi indeks kolapsibilnosti (CP) prema jednačini 7.1.

$$CP (\%) = \frac{\Delta e}{1+e_1} \quad (7.1)$$

Pri čemu je:

Δe – promena koeficijenta poroznosti nakon provlažavanja

e_1 – koeficijent poroznosti pre provlažavanja

Jednačinu 7.1 prvi je predložio Abelev (1948). Knight (1963) predlaže da se umesto e_1 , u jednačini 7.1, koristi inicijalni koeficijent poroznosti e_0 . Razlika u veličini indeksa kolapsibilnosti, u zavisnosti da li se koristi e_0 ili e_1 , je mala ukoliko je kompresija uzorka pre provlažavanja mala i obrnuto. U disertaciji je korišćen kriterijum za određivanje „ozbiljnosti problema“ u slučaju kolapsa na osnovu veličine CP koji

predlaže NAVFAC (1986) dat u tabeli 7.2. CP je određen za napon pre provlažavanja od 200 kPa.

Tabela 7.2. „Ozbiljnost problema“ u slučaju kolapsa u zavisnosti od CP (NAVFAC, 1986)

CP (%)	Ozbiljnost problema
0-1	nema problema
1-5	umerena opasnost
5-10	opasnost
10-20	ozbiljna opasnost
>20	veoma ozbiljna opasnost

U tabeli 7.1 prikazane su vrednosti indeksa kolapsibilnosti za uzorke sa lokacije 1 i 3. Na taj način je pokazano da je ispitani les kolapsibilan, a da u slučaju kolapsa postoji opasnost, tj. ozbiljna opasnost kada je u pitanju ozbiljnost problema.

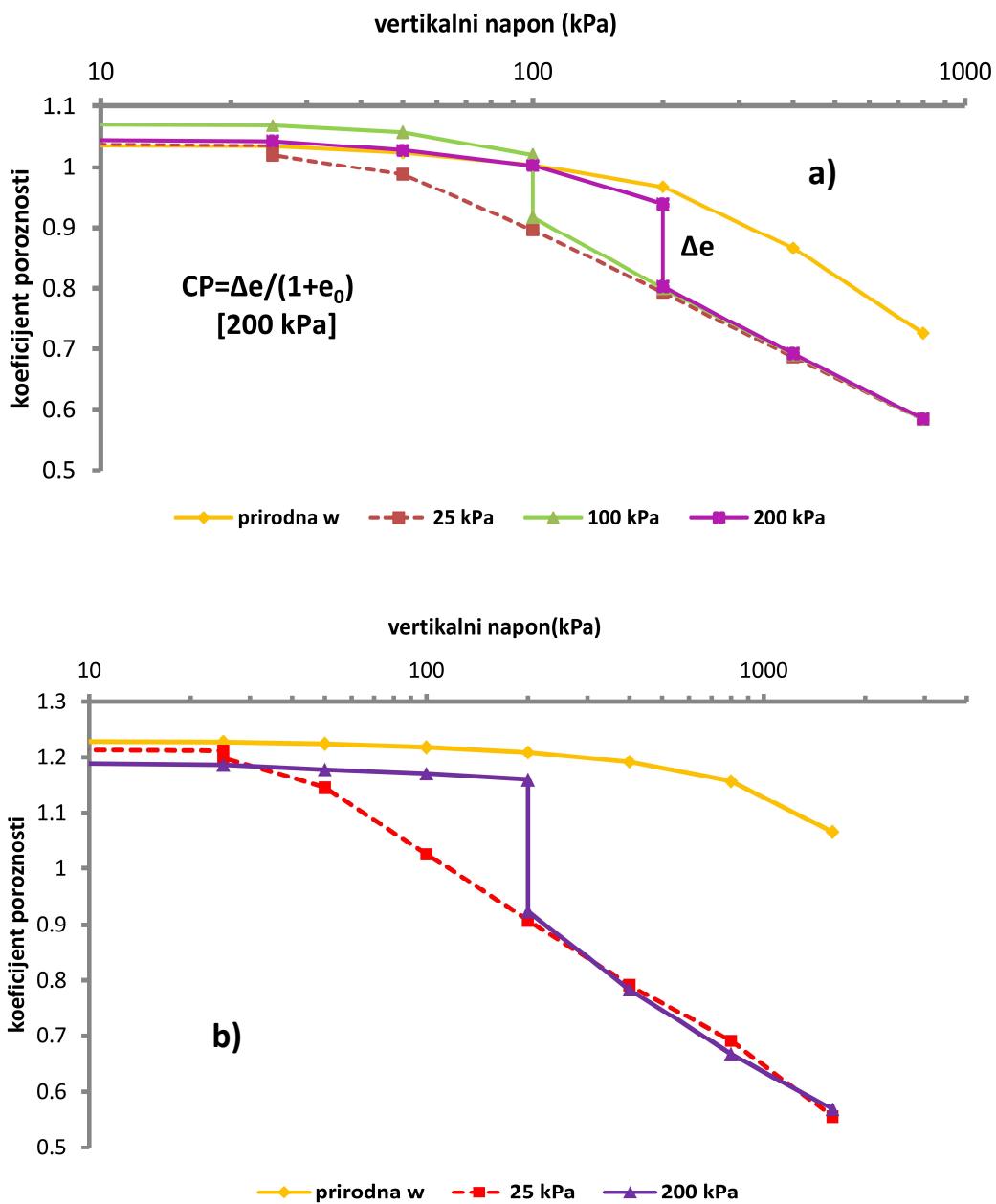
Alternativni način kvantifikovanja kolapsibilnosti predložili su Jennings i Knight (1957) primenom rezultata dobijenih metodom dvojnog edometra. Postupak se zasniva na izvođenju dva edometarska opita jedan u prirodnom stanju vlažnosti, a drugi u prethodno zasićenom stanju. Kolapsibilnost se određuje kao rastojanje između krive uzorka sa prirodnom vlažnosti i krive zasićenog uzorka (Lutenegeger i Saber, 1988). Proračun sleganja iz rezultata dvojnog edometra za NC i OC tla može se naći u Clemence i Finbarr (1981).

Rezultat edometarskih opita izvedenih na uzorcima uzetih sa lokacije 1 i 3 prikazan je na slici 7.4. Sa slike 7.4 vidi se sledeće:

- Nakon zasićenja dijagrami kompresije se poklapaju, a koeficijent poroznosti približno linearno opada sa povećanjem vertikalnog napona.
- Koeficijent poroznosti (kolapsibilnost) je veći kod uzorka sa lokacije 1 u odnosu na uzorak sa lokacije 3.
- Prividni napon prekonsolidacije (napon puzanja) kod uzorka sa lokacije 3 iznosi približno 200-250 kPa, dok je kod uzorka sa lokacije 1 znatno veći, ali ga nije moguće precizno odrediti s obzirom da nije primenjen dovoljno visok maksimalni vertikalni napon u opitu (max 1600 kPa). Pretpostavlja se da napon puzanja iznosi između 800 kPa i 1200 kPa što je znatno više u odnosu na lokaciju 3. Alonso i sar. (1990) pokazali su da se sa povećanjem sukcije (smanjenje stepena zasićenja) povećava i napon puzanja, odnosno oblast u kome

se tlo ponaša elastično. Stepen zasićenja uzorka sa lokacije 1 znatno je niži u odnosu na uzorke sa lokacije 3 (tabela 7.1) što objašnjava razliku u naponu puzanja.

- Prema ozbiljnosti problema (tabela 7.2) uzorci sa lokacije 3 ukazuju na opasnost, a uzorci sa lokacije 1 na ozbiljnu opasnost od kolapsa.



Slika 7.4. Rezultat edometarske kompresije lesa: a) lokacija 3 i b) lokacija 1

7.5. Rezultati SDMT opita u kolapsibilnom lesu

Pored laboratorijskih ispitivanja kolapsibilnost lesa može da se kvantifikuje terenskim opitima, kao što je npr. opit pločom. Međutim, to zahteva višestruka ispitivanja pri različitim vlažnostima tla, što je skupo, vremenski i tehnički zahtevno, pa je poželjno alternativu tražiti u penetracionim opitima, kao što su CPT i DMT (Berislavljević i sar., 2015).

Rezultati DMT i SDMT opita za tri predmetne lokacije prikazani su na slikama 7.5 do 7.7. Na slikama je prikazan i uopšteni presek terena sa izdvojenim sredinama za svaku lokaciju posebno. Presek terena određen je na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja uzorka tla koji su dobijeni istražnim bušenjem.

Oznake na slikama imaju sledeće značenje:

L – kolapsibilni les (rezultat edometarskog opita prikazan je na slici 7.4), L1 – prvi (kolapsibilni) lesni horizont (rezultat edometarskog opita prikazan je na slici 7.3), L2 – drugi lesni horizont, L3 – treći lesni horizont, b – pogrebena zemlja, ostale oznake su prema USCS klasifikacionom sistemu za pripadajući sloj.

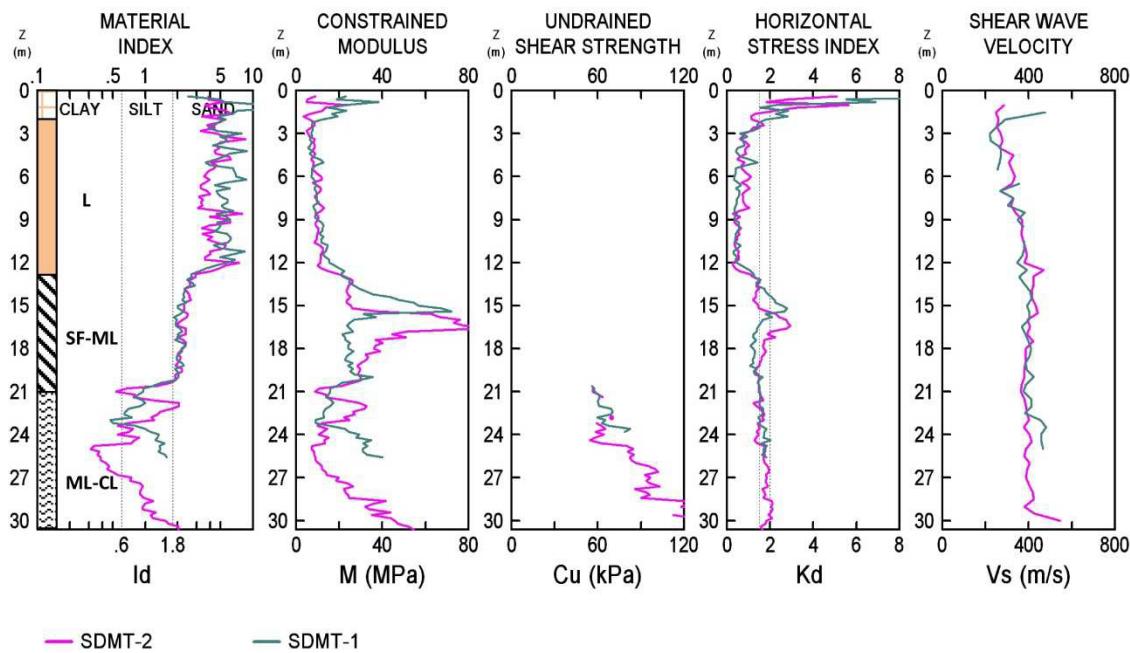
Na lokacijama 1 i 19 izdvojen je jedan lesni horizont, dok su na lokaciji 3 izdvojena tri lesna horizonta razdvojena slojevima pogrebene zemlje. Na lokacijama 1 i 19 nije konstatovan nivo podzemne vode. Na lokaciji 3 nivo podzemne vode varira na godišnjem nivou, a u trenutku ispitivanja bio je na 10.0 m ispod površine terena (kota 83 mnv). Oscilacije nivoa podzemne vode opažane su tokom jedne hidrološke godine i utvrđeno je da drugi lesni horizont u potpunosti može da bude ispod nivoa podzemne vode. Kolapsibilnost drugog i trećeg lesnog horizonta nije dokazana s obzirom da nije bilo moguće uzeti neporemećene uzorke iz istražnih jama. S druge strane istražno bušenje ne daje pouzdane rezultate zbog mehaničke poremećenosti uzorka. Tokom geološke istorije udruženi efekti podizanja nivoa podzemne vode i geostatički pritisak usled težine nadloja verovatno su uslovili potpuno ili delimično rušenje inicijalne strukture drugog i trećeg lesnog horizonta, tako da se oni smatraju nekolapsibilnim.

Sa prikazanih slika 7.5 do 7.7 vidi se da:

- U kolapsibilnom lesu (L i L1) K_D je manji od 0.6, dok je I_D veći od 3.0, što ukazuje da se na osnovu rezultata DMT opita les ponaša kao rastresiti pesak, odnosno „*in situ*“ mehaničko ponašanje lesa razlikuje se od opisa zasnovanom

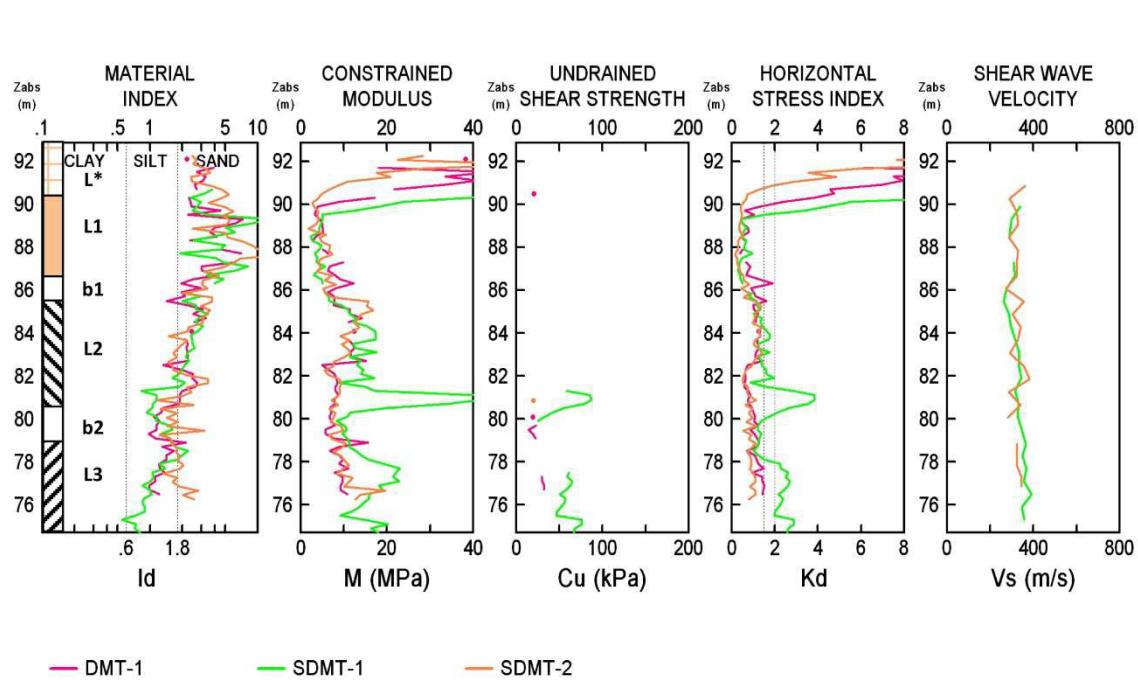
na fizičkim karakteristikama dobijenim na poremećenim uzorcima, kao što su granulometrijski sastav i granice plastičnosti. Prema USCS sistemu les je klasifikovan kao CL (sve tri lokacije). Prikazane vrednosti K_D i I_D u saglasnosti su sa rezultatima iz literature (Lutenegger i Donchev, 1983).

- Brzina smičućih talasa je neuobičajeno visoka ($V_s > 260 \text{ m/s}$) u poređenju sa niskim K_D i M_{DMT} . To se objašnjava različitom veličinom smičuće deformacije u tlu koju izaziva seizmički talas u poređenju sa smičućom deformacijom nastalom usled utiskivanja sečiva. Visoke V_s su posledica cementacije (videti poglavlje 3.2).
- U drugom lesnom horizontu K_D je 1.2 iznad nivoa podzemne vode, dok ispod nivoa podzemne vode opada za 50 % i iznosi 0.6. I_D je manje osetljiv na promenu vlažnosti.
- Pogrebena zemlja (b) razlikuje se po većem K_D i M_{DMT} u odnosu na horizont kolapsibilnog lesa.



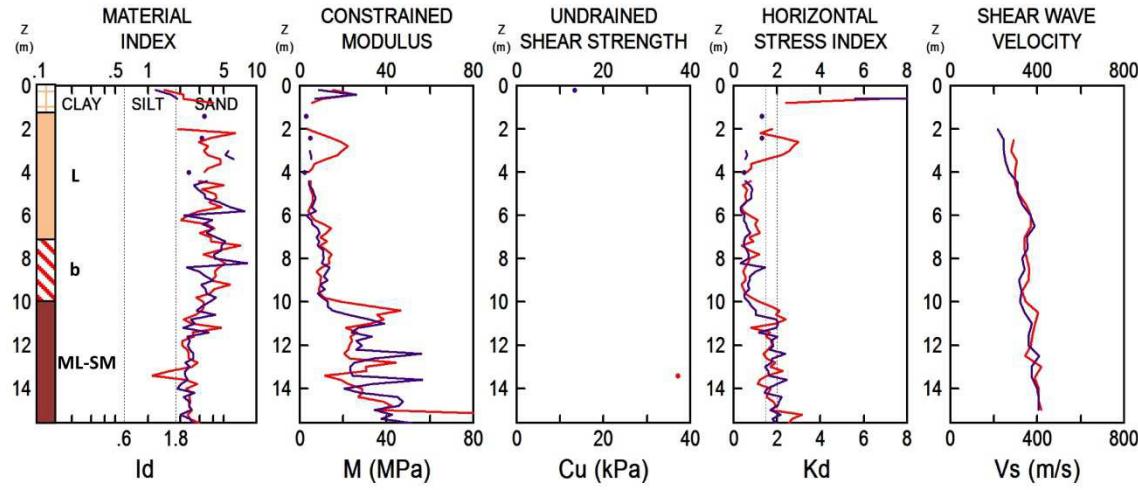
I_D – indeks materijala; M (M_{DMT}) – modul stišljivosti; c_u (s_u) – nedrenirana smičuća čvrstoća; K_D – indeks horizontalnog napona; V_s – brzina smičućih talasa

Slika 7.5. Rezultat SDMT optita sa lokacije 1



Id – indeks materijala; **M** (M_{DMT}) – modul stišljivosti; **c_u** (s_u) – nedrenirana smičuća čvrstoća;
K_D – indeks horizontalnog napona; **V_s** – brzina smičućih talasa

Slika 7.6. Rezultat DMT/SDMT opita sa lokacije 3



Id – indeks materijala; **M** (M_{DMT}) – modul stišljivosti; **c_u** (s_u) – nedrenirana smičuća čvrstoćа;
K_D – indeks horizontalnog napona; **V_s** – brzina smičućih talasa

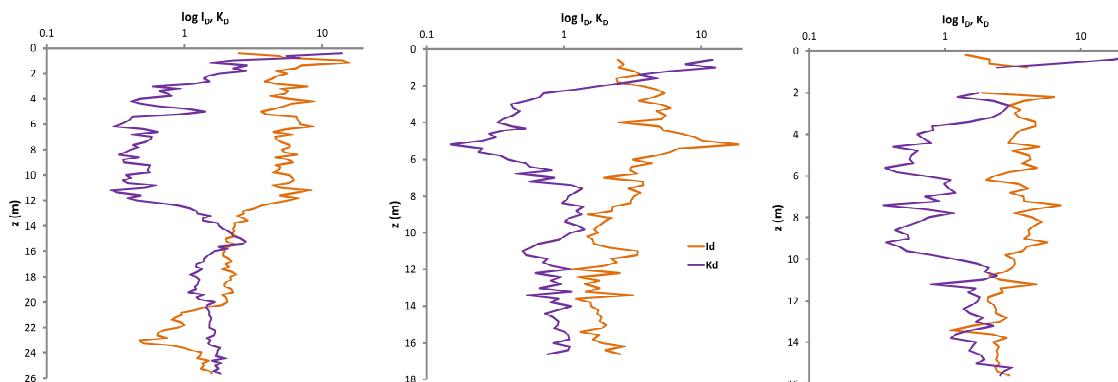
Slika 7.7. Rezultat SDMT opita sa lokacije 19

- U prva dva metra (na svim lokacijama) nalazi se humificirani les koji je bogat ekspanzivnim mineralima gline, što se na rezultat DMT opita odražava u vidu naglog skoka K_D pri površini. q_c je manje osetljiv od K_D na prisustvo ekspanzivnih minerala.

Niske vrednosti K_D u lesu posledica su malih horizontalnih naponi i efekta utiskivanja sečiva. Mali horizontalni naponi su posledica malog $K_0 \sim 0.1\text{--}0.2$ (Handy, 1995; Handy i Ferguson, 1994; Marković, 1987) i niske zapreminske težine (tabela 7.1). Interesantno je da su vrednosti K_D u kolapsibilnom lesu oko tri puta niže od vrednosti za čist pesak koji je siguran u odnosu na pojavu likvefakcije u ne-seizmičkim oblastima ($K_D > 1.7$), prema kriterijumu koji predlaže Monaco i sar. (2005).

7.5.1. Prikaz rezultata u polulogaritamskom dijagramu

Da bi se naglasio položaj kolapsibilnog lesa u vertikalnom profilu predlaže se da se rezultat DMT opita prikaže na dijagramu na kome su I_D i K_D prikazani zajedno u logaritamskoj razmeri (logaritam sa osnovom 10) na apcisi. Pomenuti dijgrami prikazani su na slici 7.8 za tri predmetne lokacije. Sa slike se vidi da je horizontalno rastojanje između I_D i K_D veće u kolapsibilnom lesu u odnosu na nekolapsibilno tlo. Za kolapsibilni les je specifično da je: $\frac{I_D}{K_D} > 5$ i $45 < \frac{E_D}{\sigma_v'} < 150$.

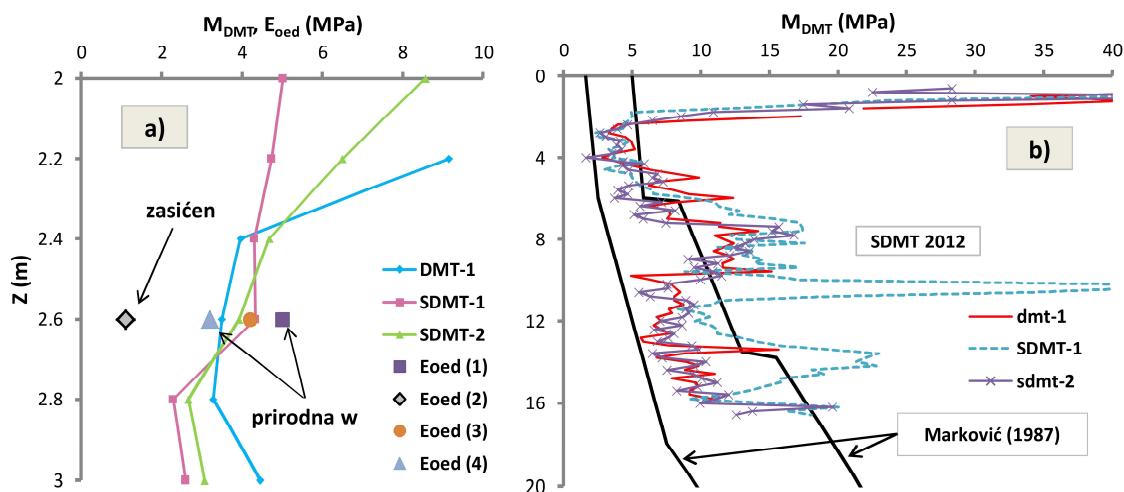


Slika 7.8. Prikaz rezultata u $\log(I_D) - \log(K_D)$ dijagramu

7.6. Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za kolapsibilni les

Korekcioni faktor R_M (videti tabelu 5.10) koji se koristi za određivanje M_{DMT} , iz jednačine 5.31, u kolapsibilnom lesu može da bude manji od 0.85 ili čak da bude negativan. Razlog su niske vrednosti K_D . Prema korelaciji koju predlaže Marchetti (1980) ukoliko je R_M manji od 0.85 treba usvojiti da je $R_M=0.85$ (tabela 5.10). To je slučaj u kolapsibilnom lesu kod koga se M_{DMT} računa kao $0.85E_D$.

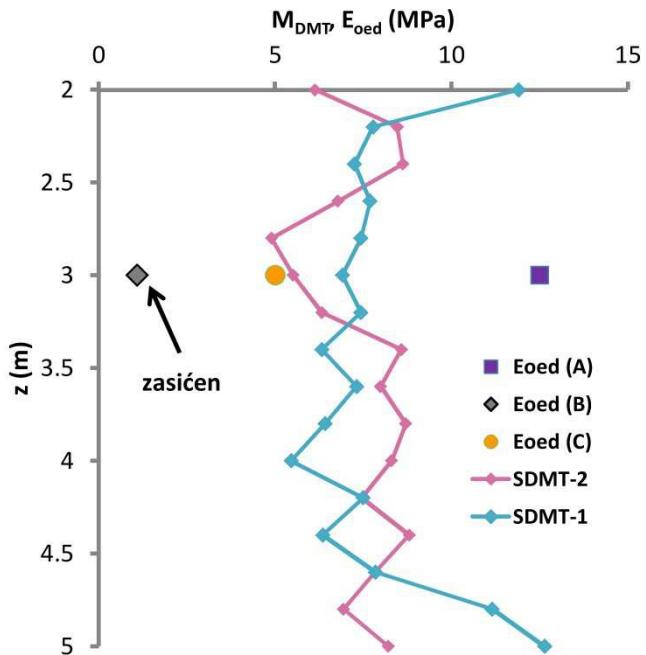
Na slici 7.9 uporedno su prikazane vrednosti M_{DMT} i E_{oed} za kolapsibilni les i to na slici 7.9 a) prikazani su rezultati za lokaciju 3, a na slici 7.9 b) prikazane su granice E_{oed} za područje „Zemunskog lesnog platoa“ zajedno sa M_{DMT} sa lokacije 3. Granice su određene na preko 500 uzoraka ispitanih opitom edometarske kompresije (Marković, 1987). Sa slike se vidi da se rezultati dobro poklapaju, što ukazuje da se korelacija koju predlaže Marchetti (1980) može koristiti za određivanje edometarskog modula u kolapsibilnom lesu „Zemunskog lesnog platoa“ za nivo napona koji je manji od napona puzanja od 200-250 kPa (videti sliku 7.3).



Slika 7.9. Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za lokaciju 3

Poređenje M_{DMT} i referentne vrednosti E_{oed} za lokaciju 1 prikazano je na slici 7.10. Sa slike se vidi da laboratorijske vrednosti znatno odstupaju međusobno. Odstupanja su karakteristična za nivo napona do 200 kPa, nakon čega E_{oed} ima približno iste vrednosti za sve ispitane uzorke. M_{DMT} se nalazi bliže donjoj vrednosti, pa je samim tim na strani sigurnosti. Međutim, da bi se dobili pouzdaniji zaključci za lesne terene koji po

strukturnim i fizičko-mehaničkim svojstvima približno odgovaraju terenima sa lokacije 1, potrebno je sprovesti dodatna ispitivanja.

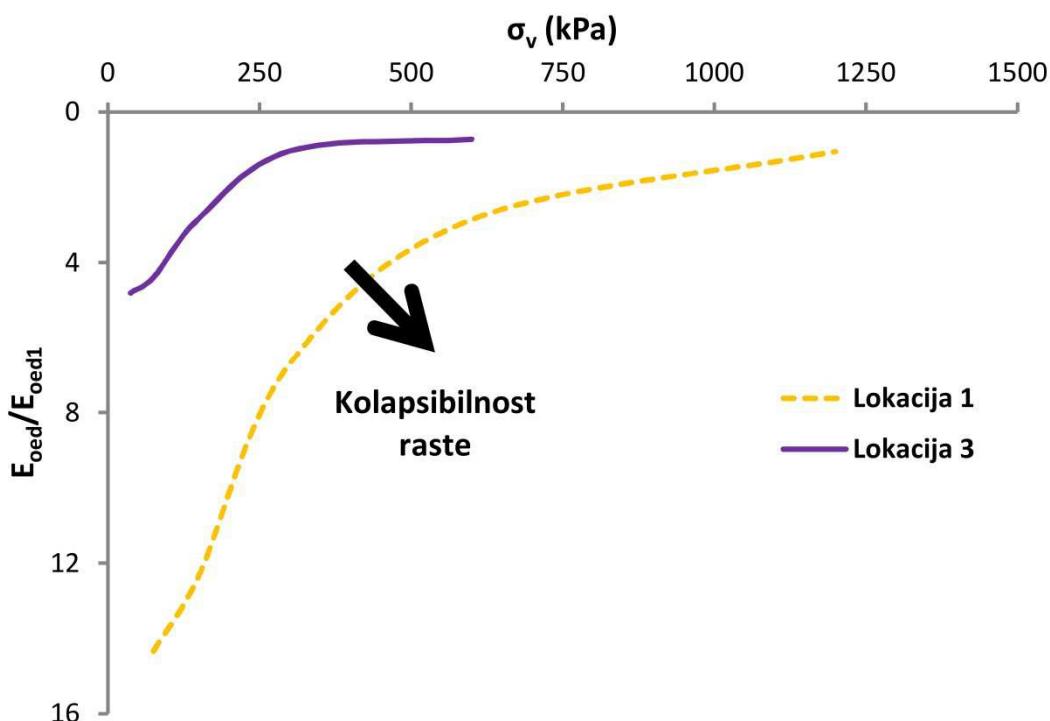


Slika 7.10. Poređenje M_{DMT} i E_{oed} za lokaciju 1

Devincenzi i Canicio (2001) sproveli su detaljna istraživanja lesa u Španiji in-situ opitima. Oni su izveli DMT opite pre i nakon provlažavanja lesa što im je omogućilo da utvrde promenu M_{DMT} nakon provlažavanja. Ispitivanje je pokazalo da M_{DMT} nakon provlažavanja iznosi 32 % M_{DMT} u prirodnom stanju vlažnosti. Tlo koje su ispitivali pokazuje veoma visoku kolapsibilnost u uslovima edometarske kompresije (19 % za napon u trenutku zasićenja od 150 kPa). Preporučuje se da se za određivanje M_{DMT} nakon provlažavanja koristi dijagram prikazan na slici 7.11. Dijagram prikazuje odnos E_{oed} pre i nakon zasićenja u zavisnosti od vertikalnog napona za lokaciju 1 i 3. Napominje se da je dijagram rezultat edometarskog opita i da je dobijen za mali broj uzoraka, pa ga treba primenjivati sa oprezom. Dijagram može da se primeni za proračun sleganja na sledeći način:

- iz SDMT opita odredi se M_{DMT} u prirodnom stanju vlažnosti,
- prepostavi se da je $E_{oed}=M_{DMT}$,
- odredi se prirast napona u tlu od opterećenja prema teoriji elastičnosti (npr. Busineskovo rešenje),

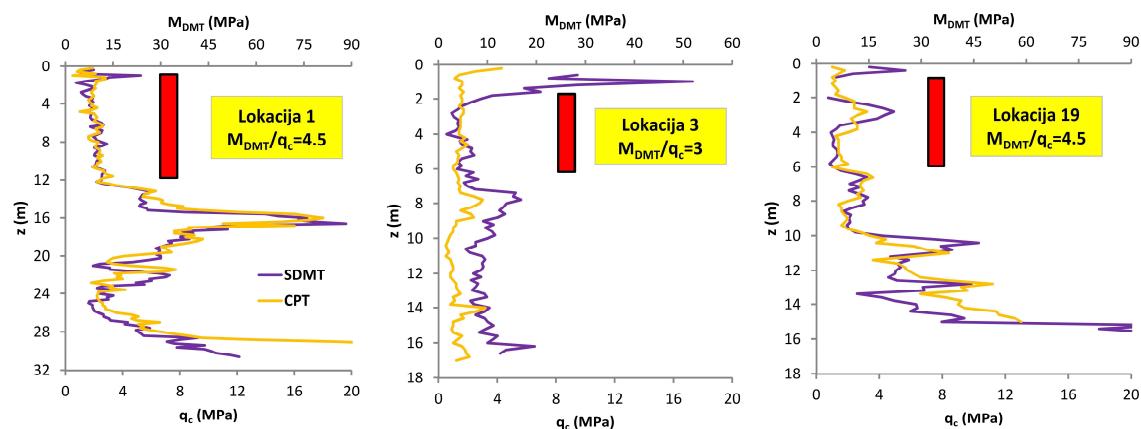
- izračuna se sleganje, za prirodno stanje vlažnosti, prema 1-D teoriji korišćenjem M_{DMT} (važi do nivoa napona puzanja),
- odredi se prosečna veličina M_{DMT} za sloj kolapsibilnog tla (može da se podeli u više slojeva u zavisnosti od debljine),
- u sredini kolapsibilnog sloja izračuna se maksimalni vertikalni napon (geostatički napon + prirast napona od dopunskog opterećenja),
- za maksimalni vertikalni napon sa dijagrama se proceni koeficijent redukcije kao recipročna vrednost odnosa E_{oed}/E_{oed1} ,
- prosečni M_{DMT} se množi koeficijentom redukcije čime se dobija računska vrednost M_{DMT1} nakon provlažavanja,
- sleganje se računa 1-D teorijom korišćenjem M_{DMT1} u kolapsibilnom sloju čime se dobija sleganje temelja nakon provlažavanja. Za ostale slojeve koristi se M_{DMT} određen iz DMT opita.



Slika 7.11. Zavisnost odnosa E_{oed} u prirodnom stanju vlažnosti i nakon zasićenja od vertikalnog napona za lokaciju 1 i 3

7.7. Zavisnost između M_{DMT} i q_c u lesu

Na slici 7.12 prikazan je odnos između M_{DMT} i q_c u kolapsibilnom lesu za sve tri lokacije. Odnosi M_{DMT}/q_c u lesu su niži u poređenju sa rezultatima za pesak ($I_D > 1.8$) pri istim vrednostima I_D . Marchetti i sar. (2001) navode da je raspon M_{DMT}/q_c u NC pesku 5-10, a u OC 12-24. Prikazani rezultati ukazuju da se radi o „neobičajenom tlu”, odnosno tlu sa izraženom mikrostrukturom.



Slika 7.12. M_{DMT}/q_c u kolapsibilnom lesu

7.8. Predlog postupka za određivanje indeksa kolapsibilnosti

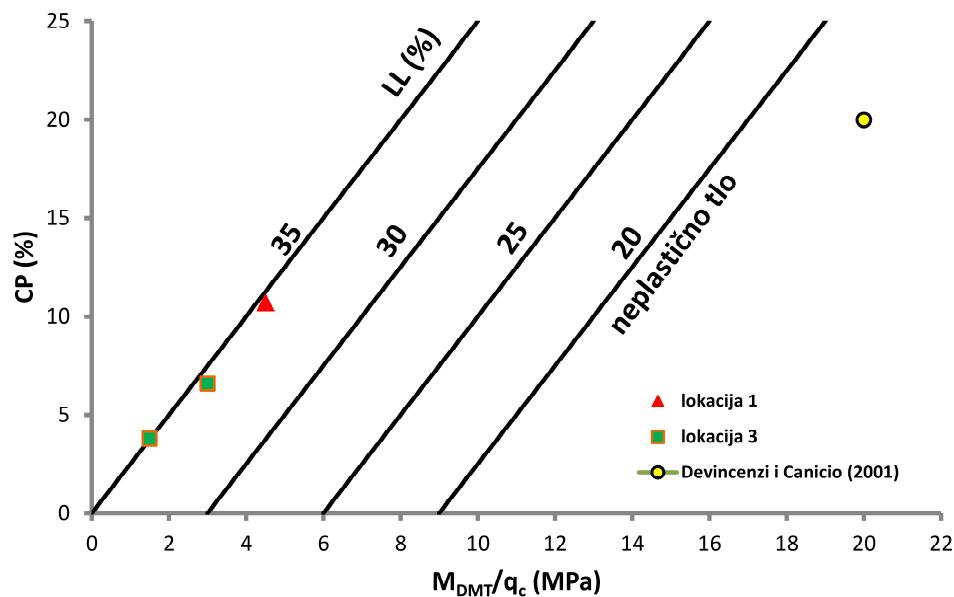
Dijagram prikazan na slici 7.13 omogućava da se odredi CP ukoliko je poznat odnos M_{DMT}/q_c i granica tečenja kolapsibilnog lesa. Dijagram ukazuje da postoji jedinstvena zavisnost između CP i M_{DMT}/q_c za određenu plastičnost tla, odnosno CP se linearno povećava sa povećanjem odnosa M_{DMT}/q_c , pri čemu je nagib prave određen iz rezultata dobijenih za lokaciju 1 i 3. Na pomenutim lokacijama prosečna vrednost granice tečenja iznosi 35%. Granica između neplastičnog i tla niske plastičnosti (linija sa LL=20%) određena je na osnovu rezultata koje su dobili Devincenzi i Canicio (2001) u kolapsibilnim lesolikim prašinama u Španiji. Autori navode da su lesolike prašine neplastične (LL<20%) do niske plastičnosti (ML prema USCS), pri čemu je odnos $M_{DMT}/q_c=20$ u prirodnom stanju vlažnosti. Kolapsibilnost iznosi 19 % određena pri naponu od 150 kPa. Pretpostavlja se da bi, prema tabeli 7.2, CP (određen pri naponu od

200 kPa) bio veći od 20 %. Tačke korišćene za izradu dijagrama prikazanog na slici 7.13 date su u tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Procena CP na osnovu odnosa M_{DMT}/q_c i granice tečenja (LL)

Podatak	M_{DMT}/q_c	CP (%) – 200 kPa	LL (%)	Ozbiljnost problema prema tabeli 7.2
lokacija 3	3	6.6	35	opasnost
	1.5	3.8		umerena opasnost
lokacija 1	4.5	10.7	35	ozbiljna opasnost
Devincenzi i Canicio (2001)	20	>20	<20	veoma ozbiljna opasnost

Dijagram ukazuje da su za određenu plastičnost tla M_{DMT} i q_c isto osetljivi na promenu vlažnosti s obzirom na linearan karakter zavisnosti odnosa M_{DMT}/q_c od CP. Preporučuje se korišćenje prikazanog dijagrama kod neplastičnih do niskoplastičnih kolapsibilnih tla u fazama preliminarnog projektovanja. U svakom slučaju poželjnije je odrediti CP iz rezultata edometarske kompresije u kasnijim fazama istraživanja. Da bi se potvrdio trend prikazan na slici 7.13 potrebna su dodatna istraživanja. Nedostatak dijagrama je potreba za izvođenjem CPT i DMT opita.



Slika 7.13. Procena CP iz odnosa M_{DMT}/q_c i granice tečenja

7.9. Zavisnost između odnosa G_0/M_{DMT} i K_D za les

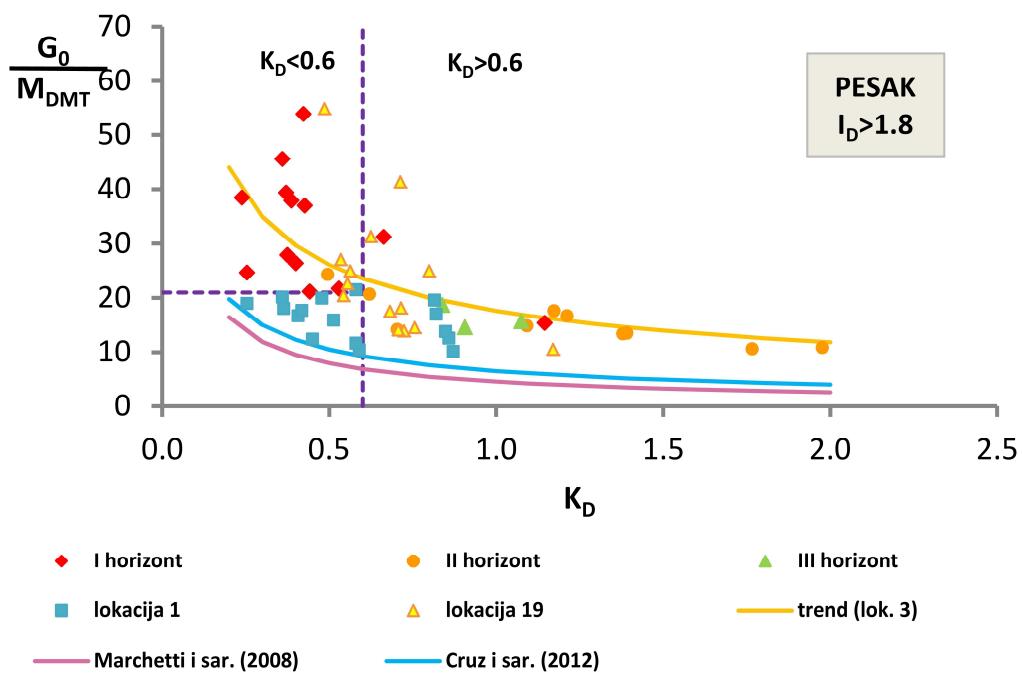
Na slici 7.14 prikazan je dijagram zavisnosti G_0/M_{DMT} od K_D za les. Na slici su prikazane i zavisnosti koje predlažu Marchetti i sar. (2008), Cruz i sar. (2012) i Berisavljević i sar. (2014) za $I_D > 1.8$. Prikazani trend za lokaciju 3 uzima u obzir sva tri lesna horizonta. Sa slike se može videti sledeće:

- najviše vrednosti G_0/M_{DMT} ima prvi kolapsibilni lesni horizont sa lokacije 3 kod koga je $G_0/M_{DMT} > 21$,
- drugi i treći lesni horizont sa lokacije 3 imaju vrednosti $G_0/M_{DMT} < 21$,
- G_0/M_{DMT} za les sa lokacije 1 (koji je kolapsibilniji od lesa sa lokacije 3) kreće se u rasponu od 10 do 21,
- razlika u G_0/M_{DMT} kod te dve lokacije je posledica većih vrednosti M_{DMT} kod lokacije 1. Moguće je da frakcija gline ima uticaj na odnos G_0/M_{DMT} s obzirom da mikrostrukturu lesa pored karbonatnog čini i glinovito vezivo. Najmanje procentualno učešće glinovite frakcije je kod lokacije 1 (videti sliku 7.3).
- G_0/M_{DMT} za lokaciju 19 nalazi se između prikazanih odnosa za prethodne dve lokacije,
- za peskovito tlo kod koga je $I_D > 1.8$ Marchetti i sar. (2008) navode da je raspon vrednosti G_0/M_{DMT} između 0.5 i 3.0 (za $K_D > 1$),
- znatno veći odnos G_0/M_{DMT} kod kolapsibilnog lesa u odnosu na tlo kod koga je $I_D > 1.8$ ukazuje da se radi o „neobičajenom tlu” sa izraženom mikrostrukturom,
- prema podacima sa lokacije 1 i 3 može se reći da G_0/M_{DMT} opada sa povećanjem CP i
- za sve tri lokacije G_0/M_{DMT} opada sa povećanjem K_D . To je uobičajeno za sva tla (Marchetti i sar., 2008).

Zavisnost između G_0/M_{DMT} od K_D za lokaciju 3 može da se opiše sledećom jednačinom (Berisavljević i sar., 2014):

$$\frac{G_0}{M_{DMT}} = 17.58K_D - 0.577 \quad (7.2)$$

Jednačina 7.2 omogućava da se odredi G_0 kada su poznati M_{DMT} i K_D iz DMT opita. Cilj jednačine nije da zameni merenje V_s , već samo aproksimativno da omogući određivanje G_0 lesa čije su karakteristike slične lesu sa lokacije 3.



Slika 7.14. Zavisnost M_{DMT}/G_0 od K_D za les

8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE

Opit pločastim dilatometrom predstavlja *in situ* penetracioni opit koji se koristi za potrebe geotehničkih istraživanja terena. U svetu, intenzivno se koristi u komercijalne i istraživačke svrhe od 1980 godine. Od tada je stečeno veliko iskustvo pri analizi i interpretaciji dobijenih rezultata. Kod nas opit je počeo da se koristi 2011 godine od strane Instituta IMS. Interpretacija rezultata je empirijskog karaktera. Geotehnički parametri, određeni iz korelacija koje su duboko ukorenjene u postojeće komercijalne programske pakete, neretko odstupaju od rezultata laboratorijskih ispitivanja i/ili osmatranog ponašanja inženjerskih objekata. Zato je neophodno da se postojeće korelacije modifikuju ili izvedu nove za tla koja su predmet ispitivanja. Poslednjih nekoliko godina imao sam prilike da kritički sagledam mogućnost primene DMT opita u domaćoj geotehničkoj praksi i da na osnovu prikazanih rezultata i stečenog iskustva donesem sledeće zaključke:

1. Ukupno je izvedeno 72 DMT i 29 SDMT opita dubine od 4.5 m do 40.0 m. Izvedeno je i nekoliko opita sa dna istražne bušotine (tabela 1.1). Ispitano je 2150 m dužnih tla, što je ekvivalentno 10750 izvedenih opita u intervalima od 0.2 m (pet opita po metru dužnom dubine). Statički penetrometar se pokazao kao najbolje sredstvo za utiskivanje sečiva. Sečivo može da se utiskuje sa dna istražne bušotine posredstvom bušače garniture ili pobijanjem SPT maljem.
2. Najpouzdaniji rezultati dobijaju se kod ispitivanja dilatantnog i kontraktivnog grubozrnog tla i kontraktivnog finozrnog tla. U šljunku rezultati su manje pouzdani i veća je opasnost od oštećenja membrane. Tabela 2.1 može da posluži za ocenu opšte upotrebljivosti DMT opita u različitim vrstama tla.
3. Teorijska i eksperimentalna istraživanja ukazuju da je tlo u okolini sečiva znatno manje poremećeno nego što je to slučaj sa konusom nakon utiskivanja. To može da bude razlog češće upotrebe rezultata DMT opita pri deformacijskoj analizi u odnosu na rezultate CPT opita koji su mera čvrstoće tla.
4. U pesku DMT opitom precizno može da se utvrdi dubina do nivoa podzemne vode merenjem p_2 pritiska (tabela 5.1 i slika 5.2)

5. Seizmička sonda omogućava da se izmere brzine smičućih talasa u tlu (V_s). Iz te brzine određuje se inicijalni modul smicanja G_0 . Brzina se meri u intervalima od 0.5 m, s obzirom da su prijemnici postavljeni na međusobnom rastojanju od 0.5 m.
6. Određivanje vrste tla, prisustva mikrostrukture i potencijalno kolapsibilnog tla moguće je iz dijagrama prikazanih na slikama 5.14 – 5.17. Vrsta tla određuje se iz dva ključna DMT prelazna parametra I_D i K_D , a prisustvo mikrostrukture određuje se iz odnosa G_0/σ_v' .
7. Zapreminske težine zasićenog tla moguće je proceniti, iz izmerenih V_s , preko jednačine 5.4. Kada V_s nisu dostupne preporučuje se da se koristi dijagram prikazan na slici 5.3 za procenu zapremskih težina. U tom slučaju relativna greška u odnosu na referentne laboratorijske vrednosti je manja od 10 %. U kolapsibilnom lesu zapreminske težine, određene sa dijagrama datog na slici 5.3, potrebno je redukovati 15 %. To je bitan korak kod određivanja G_0 u lesu.
8. Za određivanje OCR u finozrnom tlu ($I_D < 1.2$) preporučuje se upotreba korelacije koju daje Mayne (1987) – tabela 5.4. Prethodno je potrebno proveriti mehanizam koji dovodi do prekonsolidacije. U grubozrnom tlu određivanje OCR zahteva izvođenje CPT pored DMT opita.
9. Određivanje k_0 ($I_D < 1.2$) moguće je iz jednačine 5.12. Prethodno je potrebno usvojiti parametar β_k koji zavisi od mikrostrukture tla. Veće prisustvo mikrostrukture veći je i β_k . Kod tla bez značajnijeg prisustva mikrostrukture jednačina se svodi na jednačinu koju daje Marchetti (1980). U grubozrnom tlu da bi se procenila vrednost k_0 prporučuje se izvođenje CPT pored DMT opita.
10. Ugao smičuće čvrstoće peska (bez znatne mikrostrukture) može da se odredi iz jednačine 5.18 (preko V_s) ili Schmertmann (1982) procedurom gde je potrebno merenje sile kojom se utiskuje sečivo. U pesku sa izraženom mikrostrukturom jednačina 5.18 u znatnoj meri precenjuje ugao, dok jednačina 5.17 i Schmertmann (1982) procedura daju sličan rezultat. Upotreba jednačine 5.17 daje rezultat koji je na strani sigurnosti.
11. Jednačina 5.22 može da se koristi za određivanje nedrenirane čvrstoće zasićenih CH glina iznad nivoa podzemne vode. Jednačina važi za $I_D < 1.2$ i $K_D > 5.5$ i na strani je sigurnosti.

12. Merenje sile potrebne da se sečivo utisne u tlo (F_{DMT}) predstavlja značajan dodatni podatak koji se dobija iz DMT opita. Sila može da se proceni iz efektivnog prvog čitanja (p_0-u_0) iz jednačine 5.23 i 5.24. Otpor konusa (q_c) može da se približno odredi iz jednačine 5.25, što ne isključuje potrebu za direktnim merenjem q_c iz CPT opita. Dijagram prikazan na slici 5.55 može da ukaže na prisustvo mikrostrukture u tlu.
13. Preporučuje se da se operativni modul stišljivosti (M_{DMT}) određuje iz tabele 5.10, prema korelaciji koju predlaže Marchetti (1980). Korelacija je potvrđena poređenjem računskih sleganja sa izmerenim kod dva značajna objekta fundiranih u aluvionu Dunava. Korelacija Marchetti (1980) nije primenljiva u sledećim situacijama:
 - u tvrdoj, ispucaloj glini iznad nivoa podzemne vode gde znatno precenjuje laboratorijsku vrednost edometarskog modula. U toj situaciji preporučuje se upotreba jednačine 5.34 ili da se usvoji da je $E_{oed}=E_D$. Jednačina 5.34 važi za $K_D>5$ i $0.6<I_D<1.2$.
 - u prašinastim sedimentima čija se granulometrijska kriva nalazi unutar granica prikazanih na slici 6.7. U toj situaciji preporučuje se upotreba jednačine 6.2.
14. Prelazni DMT parametri I_D i K_D mogu da posluže za izdvajanje kolapsibilnih zona u lesu. Kolapsibilni les se prepoznaje po sledećim vrednostima parametara: $I_D>3$, $K_D<0.6$. Na osnovu rezultata DMT opita prema mehaničkom ponašanju les se ponaša kao rasteresiti pesak.
15. M_{DMT} određen iz korelacije koju daje Marchetti (1980) može da se koristi kao ekvivalentna vrednost E_{oed} za les „Zemunskog lesnog platoa“ (slika 7.9).
16. Odnos M_{DMT}/q_c može da se koristi za procenu indeksa kolapsibilnosti (CP) prema dijagramu prikazanom na slici 7.13.

Sve pomenute korelacije potrebno je dodatno istražiti kako bi se povećala njihova pouzdanost. Buduća istraživanja potrebno je usmeriti ka interpretaciji rezultata opita izvedenog u šljunku i ka uspostavljanju korelacija za određivanje potencijalne opasnosti od pojave likvefakcije na osnovu rezultata SDMT opita. Istraživanja se mogu unaprediti merenjem brzine kompresionih elastičnih talasa (V_p), što bi omogućilo određivanje debljine nezasićene zone tla iznad nivoa podzemne vode. To bi znatno doprinelo

određivanju potencijalno kolapsibilnih zona u lesu. Posebnu pažnju treba posvetiti merenju sile (F_{DMT}) neposredno iznad sečiva kako bi se utvrdio stvarni uticaj trenja između šipki i tla na izmerene penetracione otpornosti i teorijsku veličinu ugla smičuće čvrstoće određenog iz te sile.

Zavisnosti između DMT i CPTu opita postoje ali nisu jedinstvene i uglavnom su izvedene za mlada, normalno konsolidovana tla bez znatnog prisustva mikrostrukture. Tlo sa izraženom mikrostrukturom drugačije reaguje na utiskivanje sonde oblika sečiva (DMT) u odnosu na sondu oblika konusa (CPT) što je posledica različite veličine smičućih deformacija koje izazivaju te dve sonde.

9. LITERATURA

- 1) Abelev Y.K., 1948. *The essentials of designing and building on microporous soils*. Stroital Naya Promyshlemast, No. 10. 1948.
- 2) Ahmadi M.M. and Robertson P.K., 2005. *Thin layer effects on the CPT q_c measurement*. Canadian Geotechnical Journal, 42(9): 1302-1317.
- 3) Akbar A. and Clarke B.G., 2001. *A flat dilatometer to operate in glacial tills*. Geotechnical Testing Journal, 24(1), 51–60.
- 4) Akbar A., Kibria S. and Clarke B. G., 2005. *The Newcastle Dilatometer testing in Lahore cohesive soils*. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Rotterdam, 651–654.
- 5) Alonso E. E., Gens A., Josa A., 1990. *A constitutive model for partially saturated soils*. Geotechnique 40, No. 3, 405-430.
- 6) Amoroso S., Monaco P., Lehane B.M. and Marchetti D., 2014. *Examination of the Potential of the Seismic Dilatometer (SDMT) to Estimate In Situ Stiffness Decay Curves in Various Soil Types*. Soils and Rocks, São Paulo, 37(3): 177-194.
- 7) Amoroso S., Monaco P., Totani F. and Totani G., 2013. *Site characterization by Seismic Dilatometer (SDMT) in the area of L'Aquila following the April 6, 2009 earthquake*. Proc. ISC 4, Vol.1: 481-488.
- 8) Amoroso S., Rodrigues C., Viana da Fonseca A, Cruz N., 2015. *Liquefaction Evaluation of Aveiro Sands from SCPTU and SDMT Tests*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 293-300.
- 9) Andresen A., Kolstad P., 1979. *The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials*. Proc. of the Int. Conference on Soil Sampling, Singapore, 1–9.
- 10) Andrus R. D., Hayati H., Mohanan N. P., 2009. *Correcting Liquefaction Resistance for Aged Sands Using Measured to Estimated Velocity Ratio*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 6, 735-744.
- 11) Andrus R.D. and Stokoe K.H., II., 2000. *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. Jnl. GGE, ASCE, 126(11), 1015-1025.
- 12) Andrus R.D., Mohanan N.P., Piratheepan P., Ellis B.S. and Holzer T.L., 2007. *Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance*. Proceedings of Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.
- 13) ASTM D2487-11 (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International. www.astm.org.
- 14) ASTM D4452-14 (2014). *Standard Practice for X-Ray Radiography of Soil Samples*. ASTM International. www.astm.org.
- 15) ASTM D5778-95 (2007). *Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocene Penetration Testing of Soils*. ASTM International. www.astm.org.
- 16) ASTM D6635-01 (2001). *Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer*. ASTM International. www.astm.org.
- 17) ASTM D7400-08 (2008). *Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing*. ASTM International. www.astm.org.
- 18) Atkinson J., 2007. *The Mechanics of Soils and Foundations*. Second edition. Routledge, Taylor and Francis Group.

- 19) Atkinson J.H., 2000. *Non-linear soil stiffness in routine design*. Geotechnique 50, No. 5, 487-508.
- 20) Balachowski L. and Kurek N., 2015. *Vibroflotation Control of Sandy Soils using DMT and CPTU*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 185-190.
- 21) Baldi G., Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Marchetti S. and Pasqualini E., 1986. *Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers*. Proc. In Situ '86 ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geot. Eng.". Virginia Tech, Blacksburg, VA., ASCE Geot. Special Publ. No. 6: 431.
- 22) Baldi G., Bellotti R., Ghionna V.N., Jamiolkowski M. and Lo Presti D.F.C., 1989. *Modulus of sands from CPTs and DMTs*. In Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro. Balkema Pub., Rotterdam, Vol.1, pp. 165-170.
- 23) Baldi G., Bellotti, R., Ghionna V. and Jamiolkowski M., 1988. *Stiffness of sands from CPT, SPT and DMT –A critical review*. ICE Proc. Conf. Penetration Testing in the UK, Univ. of Birmingham, Paper 42 : 299-305.
- 24) Baligh M.M. and Scott, R.F., 1975. *Quasi Static Deep Penetration in Clays*. ASCE Jnl. GE, Vol. 101, No. GT11, 1119-1133.
- 25) Baligh M.M., 1985. *Strain path method*. ASCE Jnl GE, Vol. 111, No. GT9, 1108-1136.
- 26) Bao-Ping Wen, Ya-Jing Yan, 2014. *Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China*. Engineering Geology 168, 46–58.
- 27) Been K. and Jefferies M.G., 1985. *A state parameter for sands*. Geotechnique 35, No.2 99-112.
- 28) Been K. and Jefferies M.G., 1986. *Discussion on: A state parameter for sands*. Geotechnique 36, No. 1, 123-132.
- 29) Been K., Jefferies M. G. and Hachey J. E., 1991. *The critical state of sands*. Geotechnique 41, 365-381.
- 30) Bellotti R., Benoit J., Fretti C. and Jamiolkowski M., 1997. Stiffness of Toyoura Sand from Dilatometer Test. ASCE J. Geot. Geon. Eng., Vol. 123, No. 9., 836-846.
- 31) Bellotti R., Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F. and O'Neill D.A., 1996. *Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand*. Geotechnique 46, No. 1, 115-131.
- 32) Benoit J. and Stetson K.P., 2003. *Use of an instrumented flat dilatometer in soft varved clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(12), 1159–1167.
- 33) Berisljević D., Berisljević Z., Čebašek V., Šušić N., 2014. *Characterisation of collapsing loess by seismic dilatometer*. Engineering Geology 181, 180–189.
- 34) Berisljević D., Rakić D., Šušić N., 2015. *SDMT – a Tool for in Situ Identification of Collapsible Soils*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 457-463.
- 35) Berisljević D., Šušić N., Rakić D., Hadži-Niković G. i Berisljević Z., 2015. Određivanje vrste tla i mikrostrukture iz SDMT opita. Šesto naučno-stručno savetovanje SGIS "Geotehnički aspekti građevinarstva".
- 36) Bjerrum L. and Overland A., 1957. Foundation failure of an oil tank in Fredrikstad, Norway. Proc 4th ICSMFE, London, 287-290.
- 37) Bogdanović Lj., 1973. Sleganje krutih objekata (silosa) na mekom tlu malih penetracionih otpornosti. Saopštenja Instituta za ispitivanje materijala Srbije, broj 34, str. 1-46.
- 38) Bolton M.D., 1986. The strength and dilatancy of sands. Geotechnique 36, No. 1, 65-78.
- 39) Bowles J.E., 1996. *Foundation Analysis and Design*. Fifth edition. McGraw-Hill.

- 40) Božinović D., Čaki L., Marković G., 1982. *Modifikovani edometar za određivanje K.* Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- 41) Briaud J.L. and Gibbens R., 1999. *Behavior of five large spread footings in sand.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125(9): 787-796.
- 42) Briaud J.L., Miran J., 1992. The Flat Dilatometer Test. Departm. of Transportation - Fed. Highway Administr., Washington, D.C., Publ. No. FHWASA-91-044, 102 pp.
- 43) Brooker E.W. and Ireland H.O., 1965. *Earth pressures at rest related to stress history.* Canadian Geotechnical Journal, 2(1): 1–15.
- 44) Burland J. B., 1990. *On the compressibility and shear strength of natural clays.* Geotechnique 40, No. 3, 329-378.
- 45) Burland J.B., 1989. *The Ninth Bjerrum Mem. Lecture: Small is beautiful - the stiffness of soils at small strains.* Can. Geot. J. 26, 499-516.
- 46) Burland J.B., Broms B.B. and De Mello V.F.B. 1977. *Behaviour of foundations and structures.* Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. and Foundation Engineering, Tokyo, 2, 495-546.
- 47) Burns S.E. and Mayne P.W., 1998. *Monotonic and dilatory pore-pressure decay during piezocone tests.* Canadian Geotechnical J. 35 (6), 1063-1073.
- 48) Burns S.E. and Mayne P.W., 2002. Analytical cavity expansion-critical state model for piezocone dissipation in fine-grained soils. Soils and Foundations, Vol. 42, No. 2, 131-137.
- 49) Bustamante M. and Gianeselli L., 1982. *Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT.* Proc. ESOPT II, Amsterdam, 2, 493-500.
- 50) Campanella R. G., Robertson P. K., 1991. *Use and interpretation of research dilatometer.* Canad. Geotechn. Journal, Vol. 28, 113-126.
- 51) Campanella R.G., Gillespie D. and Robertson P.K., 1982. *Pore pressures during cone penetration testing.* In Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESPOT II. Amsterdam. A.A. Balkema, pp. 507-512.
- 52) Campanella, R.G., 1983. *Current research and development of the flat dilatometer.* In Proceedings: „First International Conference on the Flat Dilatometer”. Edmonton, Canada.
- 53) Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM, 2006. Fourth Edition. Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers, Vancouver, 488 p.
- 54) Cao L., Chang M., Teh C.I., 2015. *Analysis of Dilatometer Test in Clay.* Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 385-392.
- 55) Chang M.F., 1991. *Interpretation of overconsolidation ratio from in situ tests in recent clay deposits in Singapore and Malaysia.* Can. Geotech. J. 28 (2), 210–225.
- 56) Chen B.S-Y. and Mayne P.W., 1994. *Profiling the Overconsolidation Ratio of Clays by Piezocone Tests.* Report No. GITCEE/ GEO-94-1 to National Science Foundation by Georgia Tech, Atlanta, August 1994, 280 p.
- 57) Cho B.G.C. and Santamarina J., 2001. *Unsaturated Particulate Materials – Particle-Level Studies.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1, 84-96.
- 58) Chung S.F. and Randolph M.F., 2004. *Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers.* Proc. Int. Conf. Site Characterisation, Porto, Portugal, 1: 671–678.
- 59) Chung S.F., Randolph M.F., Schneider J.A., 2006. *Effect of penetration rate on penetration resistance in clay.* J. Geotech. and Geoenv. Engng, ASCE, 132(9): 1188–1196.
- 60) Colcott R. and Lehane B.M. 2012. *The design, development and application of a new DMT.* Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, Pernambuco, 565–570.
- 61) Consoli et. al., 2012. *Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sand.* J. Geotech. Geoenvir. Eng. Vol. 138, No. 1, 100-109.

- 62) Consoli et.al., 2007. *Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 133, No. 11, 1466-1469.
- 63) Consoli N. C., Casagrande M. D. T. and Coop, M. R., 2005. *Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 131, 11, 1434–1436.
- 64) Coop M.R., 1990. *The mechanics of uncemented carbonate sands*. Geotechnique 40, No. 4, 607–626.
- 65) Coop M.R., 2004. *Particle breakage during shearing of a carbonate sand*. Geotechnique 54, No. 3, 157–163.
- 66) Cotecchia F., Chandler R. J., 1997. *The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay*. Geotechnique 47, No. 3, 523-544.
- 67) Cox C. and Mayne P.W., 2015. *Soil Stiffness Constitutive Model Parameters for Geotechnical Problems: A dilatometer Testing Approach*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 393-400.
- 68) Cruz N., 2010. *Modelling geomechanics of residual soils by DMT tests*. PhD thesis, 691 University of Porto, Portugal, www.nbdfcruz.drupalgardens.com.
- 69) Cruz N., Rodriguez C., Viana da Fonseca A., 2012. *Detecting the present of cementation structures in soils, based in DMT interpreted charts*. In Geotechnical and geophysical site characterization, Couthino and Mayne (eds), Taylor and Francis group, London, pp. 1723-1728.
- 70) Cuccovillo T., Coop M. R., 1997. *Yielding and pre-failure deformation of structured sands*. Geotechnique 47, No. 3, 491-508.
- 71) Cuccovillo T., Coop M. R., 1999. *On the mechanics of structured sands*. Geotechnique 49, No. 6, 741-760.
- 72) Davis R.O. and Selvadurai A.P.S., 2002. Plasticity and Geomechanics. Cambridge University Press.
- 73) De Groot D.J., Lunne T. and Tjelta T.J., 2011. *Recommended best practice for geotechnical site characterisation of cohesive offshore sediments*. Gourvenec&White, (eds) Frontiers in offshore Geotechnics II. Perth Western Australia. Taylor and Francis Group, London, pp. 33-57.
- 74) Delage P. and Pereira J., 2011. Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess. *Géotechnique Letters*.
- 75) Devincenzi, M.J., Canicio, M., 2001. *Geotechnical characterization by in situ tests of a loess-like deposit in its natural state and after saturation*. Proc. International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 159-166.
- 76) Diaz-Rodriguez J. A., Santamarina J. C., 2001. *Mexico city soil behavior at different strains: observations and physical interpretation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 9, 783-789.
- 77) Durgunoglu T. H., Mitchell J. K., 1973. *Static penetration resistance of soils*. Prepared for NASA Headquarters, Washington, D. C. under NASA Grant NGR 05-003-406, "Lunar Soil Properties and Soil Mechanics".
- 78) Eslaamizaad S. and Robertson P.K., 1996. *Seismic cone penetration test to identify cemented sands*. In Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference. St. John's, Newfoundland. September, pp. 352 – 360.

- 79) Eslami A. and Fellenius B.H., 1997. *Pile Capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories*. Canadian Geotechnical Journal, 34(6): 880-898.
- 80) EUROCODE 7, 1994. *Geotechnical design – Part 1: General rules*, EC for standardization. Eurocode 7 (1997). *Geotechnical design - Part 3: Design assisted by field testing, Section 9: Flat dilatometer test (DMT)*. Final Draft, ENV 1997-3, Apr., 66-73. CEN - European Committee For Standardization.
- 81) Fahey M. and Carter J.P., 1993. *A finite element study of the pressuremeter in sand using a nonlinear elastic plastic model*. Canadian Geotechnical Journal, 30(2): 348-362.
- 82) Failmezger R., 2015. *Redesign of shallow foundations using dilatometer tests—more case studies after DMT'06 conference*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15. Roma, Italy.
- 83) Fellenius B.H., 2009. *Basic of Foundation Design – electronic edition*. www. Fellenius.net, 342 p.
- 84) Fernandez A., Santamarina J. C., 2001. *Effect of cementation on the small strain parameters of sands*. Can. Geotech. J., 38(1), 191–199.
- 85) Finno R.J., 1993. *Analytical Interpretation of Dilatometer Penetration Through Saturated Cohesive Soils*. Geotéchnique, 43, No. 2, 241-254.
- 86) Fioravante V., Giretti D., Jamiolkowski M. and Rocchi G.F., 2012. *Triaxial tests on undisturbed samples of gravelly soils from the Sicilian shore of Messina Strait*. Bull. Earthquake Eng., 10:1717–1744.
- 87) Fleming K., Weltman A., Randolph M. and Elson K., 2009. *Piling Engineering*. Third edition. Taylor and Francis Group.
- 88) Fleming, W.G.K., 1992. *A new method for single pile settlement for prediction and analysis*. Géotechnique, 42(3): 411–425.
- 89) Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C., 2015. *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. CRC Press.
- 90) Fretti C., Lo Presti D. and Salgado R., 1992. *The Research Dilatometer In Situ and Calibration Chamber Test Results*. Riv. Italiana di Geotecnica, 26, 4 : 237-243.
- 91) Gasparre A., Coop M. R., 2008. *Quantification of the effects of structure on the compression of a stiff clay*. Can. Geotech. J. 45, 1324–1334.
- 92) Giacheti H. L., Peixoto A. S. P., De Mio G., Carvalho D., 2006. *Flat Dilatometer Testing in Brazilian Tropical Soils*. Second International Conference on the Flat Dilatometer, Washington. ASCE. Washington - DC - USA: R A Failmezger and J B Anderson Editors. v. 1. p. 103-110.
- 93) Gibbs H.H. and Holland W.Y., 1960. *Petrographic and engineering properties of loess*. US Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, vol. 28 (37 pp.).
- 94) Gravesen S., 1960. *Elastic Semi-Infinite Medium Bounded by a Rigid Wall with a Circular Hole*. Laboratoriet for Bygninsteknik, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse No. 10, Copenhagen.
- 95) Hamamdshiev K.B. and Lutenegger A.J, 1985. *Study of OCR of loess by flat dilatometer*. Proc. 11th Int. Conf. SMFE, San Francisco, 4, 2409-2414.
- 96) Handy R.L. and Ferguson E.G., 1994. *Lithomorphic stresses and cleavage of loess*. Engineering Geology, 37, 235-245.
- 97) Handy R.L., 1995. *A stress path model for collapsible loess*, in: E. Derbyshire et al. (Eds.), Genesis and properties of collapsible soils. Kluwer Academic Publishers, pp. 33-47.

- 98) Hardin B. O., 1985. *Crushing of soil particles*. J. Geotech. Engng, Proc. ASCE 111, No. 10, 1177–1192.
- 99) Hayati H., Andrus R. D., 2009. *Updated Liquefaction Resistance Correction Factors for Aged Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 11, 1683-1692.
- 100) Hayes J.A., 1990. *The Marchetti Dilatometer and Compressibility*. Seminar on "In Situ Testing and Monitoring", Southern Ont. Section of Canad. Geot. Society, Sept., 21 pp.
- 101) Hegazy Y.A. and Mayne P.W., 1995. *Statistical correlations between V_s and cone penetration data for different soil types*. Proc. International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95, Linkoping, Sweden, 2, Swedish Geotechnical Society, 173-178.
- 102) Heineck K. S., Coop, M. R., Consoli N. C., 2005. *Effect of Microreinforcement of Soils from Very Small to Large Shear Strains*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 8, 1024-1033.
- 103) Hepton P., 1988. *Shear wave velocity measurements during penetration testing*. Proc. Penetration Testing in the UK: 275-278. ICE.
- 104) Institut IMS, 2010. *Elaborat o geotehničkim istraživanjima za potrebe rekonstrukcije rezervoara R-27 u Smederevu*.
- 105) Institut IMS, 2014. *Elaborat o geotehničkim uslovima fundiranja rezervoarskog prostora $2x500 m^3$ za biodizel na skladištu naftnih derivata u Smederevu*.
- 106) Jamiolkowski M. Ladd C.C., Germaine J.T. and Lancellotta R., 1985. *New developments in field and laboratory testing of soils*. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 57-153.
- 107) Jamiolkowski M., 1995. *Opening address*. Proc. Int. Symp. on Cone Penetration Testing CPT'95, Swedish Geot. Soc., Linköping, Vol. 3, 7-15.
- 108) Jamiolkowski M., 2012. *Role of Geophysical Testing in Geotechnical Site Characterization*. Soils and Rocks 35(2):117-137.
- 109) Jamiolkowski M., Ghionna V., Lancellotta R. and Pasqualini E., 1988. *New Correlations of Penetration Tests for Design Practice*. Proc. ISOPT- 1, Orlando, FL, 1: 263-296.
- 110) Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F, Manassero M., 2001. *Evaluation of relative density and shear strength of sands from cone penetration test (CPT) and flat dilatometer test (DMT)*. ASCE Geotechnical Special Publication No. 119, 201–238.
- 111) Jamiolkowski M., Masella A., 2015. *Geotechnical Characterization of Copper Tailings at Zelazny Most Site*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 25-42.
- 112) Janbu N., 1985. Soil models in offshore engineering. Geotechnique, 35, No. 3. 241-281.
- 113) Janbu N., 1998. *Sediment deformations*. University of Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Geotechnical Institution, Bulletin 35, 86 p.
- 114) Jefferies M.G., 1993. *Nor-Sand: a simple critical state model for sand*. Geotechnique 43, No. 1, 91-103.
- 115) Jefferies, M.G. and Been, K., 2006. *Soil Liquefaction – A critical state approach*. Taylor & Francis, ISBN 0-419- 16170-8 478 pages.
- 116) Jennings J.E., Knight K., 1957. *The additional settlement of foundations due to collapse of sandy soils on wetting*. Proc of the 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, pp. 316-319.

- 117) Jiang M., Zhang F., Hu H., Cui J. and Peng J. 2014. *Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests*. Engineering Geology 181, 249–260.
- 118) Jotisankasa A., Ridley A., Coop M. R., 2007. *Collapse Behavior of Compacted Silty Clay in Suction-Monitored Oedometer Apparatus*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 7, 867-877.
- 119) Jovičić V. and Coop M.R., 1997. *Stiffness of coarse-grained soils at small strains*. Geotechnique 47, No. 3, 545-561.
- 120) Kamey T. and Iwasaki K., 1995. *Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a Flat Dilatometer*. Soils and Foundations, 35, 2, 111-116.
- 121) Kim K., Prezzi M., Salgado R. and Lee W., 2008. *Effect of penetration rate on cone penetration resistance in saturated clayey soils*. J. of Geotech. Geoenviron. Eng., 134(8): 1142-1153.
- 122) Kirkpatrick W.M. and Khan A.J., 1984. *The reaction of clays to sampling stress relief*. Geotechnique 34, No. 1, 29-42.
- 123) Kirkpatrick W.M., Khan A.J. and Mirza A.A., 1986. *The effects of stress relief on some overconsolidated clays*. Geotechnique 36, No. 4, 51 I-525.
- 124) Knight K., 1963. *The origin and occurrence of collapsing soils*. Proc. of the 3rd Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 127-130.
- 125) Konrad J.M., 1988. *Interpretation of flat plate dilatometer tests in sands in terms of the state parameter*. Geotechnique 38, No. 2.263-277.
- 126) Kosovoprojekt, 1982. *Elaborat o izvedenim inženjersko-geološkim istraživanjima terena za potrebe izgradnje Termoelektrane „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu*.
- 127) Ku T., Mayne P.W., 2013. Yield stress history evaluated from paired in-situ shear moduli of different modes. Engineering Geology 152, 2013, 122–132.
- 128) Ku T., Mayne P.W., 2015. *In Situ Lateral Stress Coefficient (K_0) from Shear Wave Velocity Measurements in Soils*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2015, 141(12): 06015009.
- 129) Kulhawy F.H., Mayne P.W., 1990. *Estimating Soil Properties for Foundation Design*. EPRI Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306 p.
- 130) Kung G.T., Lee D.H. and Tsai P.H., 2010. *Examination of existing DMT-based Liquefaction Evaluation methods by side-by-side DMT and CPT Tests*. 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, CA.
- 131) Lacasse S. and Lunne T., 1988. *Calibration of Dilatometer Correlations*. Proc. ISOPT-1, Orlando, FL, Vol. 1, 539-548.
- 132) Ladd C.C. and DeGroot D.J., 2003. *Recommended practice for soft ground site characterization*. Soil and Rock America, Vol. 1 (Proc.12th PanAmerican Conf., MIT), Verlag Glückauf, Essen: 3-57.
- 133) Ladd C.C. and Foott R., 1974. *New design procedure for stability of soft clays*. J. of the Geotech. Eng. Div., 100(GT7), 763-786.
- 134) Ladd C.C., Foot R., Ishihara K., Schlosser F. and Poulos H.G., 1977. *Stress-Deformation and Strength Characteristics*. Proc. 9 th ICSMFE. Tokyo. 2: 421-497.
- 135) Lambe T. W., Whitman R.V., 1969. *Soil mechanics*. John Wiley & Sons Inc., New York.

- 136) Larsson R. and Ahnberg H., 2005. *Note: On the evaluation of undrained shear strength and preconsolidation pressure from common field tests in clay*. Can. Geotech. J. 42: 1221–1231.
- 137) Larsson R., 1980. *Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays*. Can. Geotech. J. 17 (4), 591–602.
- 138) Larsson R., 1989. *Dilatometerförsök* (Dilatometer tests) (In Swedish). Swedish Geotechnical Institute, Information No 10, Linköping.
- 139) Lee M., Choi S., Kim M. and Lee, W., 2011. *Effect of Stress History on CPT and DMT results in Sand*. J . Engrg. Geology, Elsevier, 117, 259-265.
- 140) Lee M., Hong S-J., Choi J-M. and Lee W., 2010. *Evaluation of deformation modulus of cemented sand using CPT and DMT*. Engrg. Geology, Elsevier, 115, 28-35.
- 141) Lehane B.M. and Fahey M., 2004. *Using SCPT and DMT data for settlement prediction in sand*. In Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC'2. Porto: 2, 1673–1679.
- 142) Lehane B.M., Doherty J.P. and Schneider J.A. 2009. *Settlement prediction for footings on sand*. Keynote Lecture, Proc. 4th International Symposium on deformation characteristics of Geomaterials, Atlanta, 1, 133–152, IOS press, The Netherlands.
- 143) Leonards G.A. and Frost J.D., 1988. *Settlements of Shallow Foundations on Granular Soils*. ASCE Jnl. GE, Vol. 114, No. 7, July, 791-809.
- 144) Leroueil S. and Hight D.W., 2003. *Behaviour and properties of natural soils and soft rocks*. Proc. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Tan et al. (eds.). Swets and Zeitlinger, pp. 29-253.
- 145) Leroueil S., Vaughan P. R., 1990. *The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks*. Geotechnique 40, No. 3, 467-488.
- 146) Lunne T., Berre T., Andersen K.H., Strandvik S. and Sjursen M., 2006. *Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays*. Can. Geotech. J. 43: 726–750.
- 147) Lunne T., Jonsrud R., Eidsmoen T. and Lacasse S., 1987. *The Offshore Dilatometer*. 6th Int. Symposium of Offshore Engineering, Brasil Offshore '87, Rio de Janeiro.
- 148) Lunne T., Lacasse S., Rad N.S. and Decourt L., 1989. *SPT, CPT, Pressuremeter Testing and Recent Developments on In Situ Testing*. Norwegian Geotechnical Institute, Report No591390-1.
- 149) Lunne T., Powell J. J. M., Hauge E. A., Uglow I. M., Mokkelbost K.H., 1990. *Correlation of Dilatometer Readings to Lateral Stress*. Paper Submitted to Specialty Session on Measurement of Lateral Stress. 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC., USA.
- 150) Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M., 1997. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publ., New York, 1997, 312 pp.
- 151) Lutenegger A.J. and Kabir M.G., 1988. *Dilatometer C reading to help determine stratigraphy*. Proc. ISOPT-1, Orlando, FL, Vol. 1, 549-554.
- 152) Lutenegger A.J. and Saber R.T., 1988. *Determination of collapse potential of soils*. Geotechnical testing journal, ASCE, Vol. 11, No. 3, 173-178.
- 153) Lutenegger A.J., 1988. *Current Status of the Marchetti Dilatometer Test*. Proc. 1st Int. Symp. on Penetration Testing, Vol. 1: 137-155.
- 154) Lutenegger A.J., 2006. *Cavity expansion model to estimate undrained shear strength in clay from Dilatometer*. Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, 319-326.

- 155) Lutenegger A.J., 2015. *Dilatometer Tests in Sensitive Champlain Sea Clay: Stress History and Shear Strength*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 473-480.
- 156) Lutenegger A.J., Donchev P., 1983. *Flat Dilatometer Testing in Some Meta-Stable Loess Soils*. Proceedings of the International Symposium on In-Situ Testing for Soil and Rock Properties, Vol. 2, pp. 337-340.
- 157) Luzzani L. and Coop M. R., 2002. *On the relationship between particle breakage and the critical state of sands*. Soils Found. 42, No. 2, 71–82.
- 158) Maatouk A., Leroueil S. and La Rochelle P., 1995. *Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil*. Geotechnique 45, No. 3, 465-477.
- 159) Maksimović M.M., 1995. *Mehanika tla*. Gros knjiga, Beograd.
- 160) Marchetti S. 1997. *The flat dilatometer: design applications*. Proc. Third Intl. Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Soil Mechanics and Foundation Research Laboratory, Egypt: 423-448.
- 161) Marchetti S. and Crapps D.K., 1981. *Flat Dilatometer Manual*. Internal Report of G.P.E. Inc.
- 162) Marchetti S. and Totani G., 1989. *C_h Evaluations from DMT-A Dissipation Curves*. Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1, 281-286.
- 163) Marchetti S., 1979. *The in Situ Determination of an "Extended" Overconsolidation Ratio*. Proc. 7th ECSMFE, Brighton, 2: 239-244.
- 164) Marchetti S., 1980. *In situ tests by flat dilatometer*. J. Geotech. Eng. 106 (3), 299–321.
- 165) Marchetti S., 1982. *Detection of liquefiable sand layers by means of quasi-static penetration probes*. ESOPT II Amsterdam 2 : 689-695.
- 166) Marchetti S., 1985. *On the Field Determination of K_o in Sand*. Proc. XI ICSMFE, S. Francisco, Vol. 5: 2667-2672.
- 167) Marchetti S., 2010. *Sensitivity of CPT and DMT to stress history and aging in sands for liquefaction assessment*. CPT 2010 Int.Symposium, Huntington Beach, California.
- 168) Marchetti S., 2014. *The seismic dilatometer for in situ soil investigations*. Proc. Indian Geotechnical Conference IGC-2014, Kakinada, India.
- 169) Marchetti S., 2015. *Some 2015 Updates to the TC16 DMT Report 2001*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 43-65.
- 170) Marchetti S., 2016. *Incorporating the Stress History Parameter K_D of DMT into the Liquefaction Correlations in Clean Uncemented Sands*. Jnl Asce GGE, 142, No. 2, 4pp.
- 171) Marchetti S., Monaco P., Totani G. and Marchetti D., 2008. *In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT)*. Proceedings From Research to Practice in Geot. Engng. Geot. Special Publ. No. 180: 292-311. (book honoring J.H. Schmertmann).
- 172) Marchetti S., Totani G., Calabrese M. and Monaco P., 1991. *P-y curves from DMT data for piles driven in clay*. Proc. 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, DFI, Stresa, Vol. 1, 263-272.
- 173) Marchetti S., Totani G., Campanella R.G., Robertson P.K. and Taddei B., 1986. *The DMT-σ_{hc} Method for Piles Driven in Clay*. Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 765-779.
- 174) Marchetti S., 2011. *Discussion of CPT-DMT Correlations by P. K. Robertson*. J. Geotech. Geoenvirons. Eng., 137(4), 441–442.

- 175) Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M., 2001. *The flat dilatometer (DMT) in soil investigations (ISSMGE TC16)*. Proc. International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 95–131.
- 176) Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Marchetti, D., 2008. *In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT)*. In J.E. Laier, D.K. Crapps & M.H. Hussein (eds), From Research to Practice in Geotechnical Engineering, ASCE Geotech. Spec. Publ. No. 180 (honoring Dr. John H. Schmertmann), pp. 292-311.
- 177) Marković G., 1987. *Geotechnical properties of loess terrains with special emphasis on urban construction*. Ph.D. thesis, Univ. of Belgrade, Serbia (in Serbian).
- 178) Martin G.K. and Mayne P.W., 1997. *Seismic Flat Dilatometer Tests in Connecticut Valley Varved Clay*. Geot. Testing J. 20(3): 357-361. ASTM.
- 179) Massarsch K.R., 1994. *Settlement Analysis of Compacted Granular Fill*. Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, Vol. 1, 325-328.
- 180) Mayne P. W., 2014. *Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests*. Proc. 3rd Intl. Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, 47-73.
- 181) Mayne P. W., 2015. *Peak Friction Angle of Undisturbed Sands using DMT*. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 237-242.
- 182) Mayne P.W. 2001. *Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests*. Proc. Intl. Conf. on In-Situ Measurements of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia: 27- 48.
- 183) Mayne P.W. and Kulhawy F.H., 1982. *K_o-OCR relationships in soil*. Journal of Geotechnical Engineering 108 (GT6), 851-872.
- 184) Mayne P.W. and Martin G.K., 1998. *Seismic flat dilatometer test in Piedmont residual soils*. Proc. First Int. Conf. on Site Characterization ISC '98, Atlanta, GA, Apr., Vol. 2, 837-843.
- 185) Mayne P.W., 1987. *Determining preconsolidation stress and penetration pore pressures from DMT contact pressures*. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, No. 3., 146-150.
- 186) Mayne P.W., 1988. *Determining OCR in Clays from Laboratory Strength*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1, 76-92.
- 187) Mayne P.W., 1991. *Determination of OCR in clays by piezocone tests using cavity expansion and critical state concepts*. Soils and Foundations, Vol. 31 (2), 65-76.
- 188) Mayne P.W., 2000. *Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Test*. Invited lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University. pp 95-120.
- 189) Mayne P.W., 2007. *Invited overview paper: In-situ test calibrations for evaluating soil parameters*. Characterization and Engineering Prop. of Natural Soils, Vol. 3, Taylor and Francis, London: 1601-1652.
- 190) Mayne P.W., 2007. NCHRP Synthesis “Cone Penetration Testing State-of-Practice”. Transportation Research Board Report Project 20-05. 118 pages. www.trb.org.
- 191) Mayne P.W., Schneider J.A. and Martin G.K. 1999. *Small- and large-strain soil properties from seismic flat dilatometer tests*. Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 1 (Proc. Torino), Balkema, Rotterdam: 419-426.
- 192) Mayne, P.W., Coop, M.R., Springman, S.M., Huang, A.B, and Zornberg, J.G., 2009. *Geomaterial behaviour and testing*. State of the Art (SOA) paper, 17th ICSMGE Alexandria.

- 193) Meigh A.C., 1987. *Cone penetration testing - methods and interpretation*. CIRIA Ground Engineering Report: In-situ Testing. Butterworths.
- 194) Mesri G., 1975. *Discussion of "New Design Procedure for Stability of Soft Clays*, by Ladd C.C. and Foott R. Jnl GED, ASCE. 101, 4 : 409-412.
- 195) Mesri G., Hayat T.M., 1993. *The coefficient of earth pressure at rest*. Canadian Geotechnical Journal, 30(4): 647-666.
- 196) Milović D. i Đogo M., 2009, *Problemi interakcije tlo-temelj-konstrukcija*. Monografija, Srpska akademija nauka i umetnosti, Ogranak u Novom Sadu.
- 197) Milovic D., 1988. *Stress deformation properties of macroporous loess soils*. Engineering Geology, 25, 283-302.
- 198) Mingjing Jiang, Fuguang Zhang, Haijun Hu, Yujun Cui, Jianbing Peng, 2014. *Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests*. Engineering Geology 181, 249–260.
- 199) Mlynarek Z., Wierzbicki J., Manka M., 2015. *Geotechnical Parameters of Loess Soils from CPTU and SDMT*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 481-488.
- 200) Monaco et al., 2014. *Overconsolidation and stiffness of Venice Lagoon Sands and Silts from SDMT and CPTU*. Jnl Asce GGE. Jan 2014 : 215-227.
- 201) Monaco P. and Marchetti S., 2004. *Evaluation of the coefficient of subgrade reaction for design of multipropelled diaphragm walls from DMT moduli*. 2nd International Conference on Site Characterization ISC-2, At Porto, Portugal, Volume: Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Vol. 1, 993-1002, A. Viana da Fonseca and P.W. Mayne (eds), Millpress, Rotterdam.
- 202) Monaco P. and Marchetti S., 2007. *Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history*. Proc. 4th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki .Paper #1626 : 12p.
- 203) Monaco P. and Schmertmann J. H., 2007. *Discussion of "Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential"* by Leon, E. et al. (in J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 2006, 132(3): 363- 377). J. Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE, 133(9): 1177-1179.
- 204) Monaco P., Marchetti S., Totani G. and Calabrese M., 2005. *Sand liqueifiability assessment by Flat Dilatometer Test (DMT)*. Proc. XVI ICSMGE. Mill press, Rotterdam, The Netherlands, pp. 2693–2697.
- 205) Monaco P., Totani G. and Calabrese M., 2006. *DMT predicted vs observed settlements: a review of the available experience*. Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 244-252.
- 206) Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G., Marchetti, D. 2009. *Interrelationship between small strain modulus G_0 and operative modulus*. In T. Kokusho, Y. Tsukamoto & M. Yoshimine (Eds), Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering- from Case History to Practice, Proc. IS-Tokyo 2009, Tsukuba, Japan, June 15–17, 1315–1323. Taylor & Francis Group, London (CD-Rom).
- 207) Moss R.E.S., Seed R.B., and Olsen R.S. 2006. Normalizing the CPT for overburden stress. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(3): 378-387.
- 208) Mulabdić M., Minažek K., 2015. *Use of Dilatometer in Unusual Difficult Soils – a Case Study*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 497-504.
- 209) Nash D.F.Y., Powell J.J.M. and Lloyd I.M., 1992. *Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar*. Geotéchnique, 42, No. 2, 163-181.

- 210) NAVFAC DM-7.1, 1986. *Soil mechanics-Design manual 7.01*. Department of the Navy.
- 211) Nouaouria M.S., Guenfoud M. and Lafifi B., 2008. *Engineering properties of loess in Algeria*. Engineering Geology 99, 85–90.
- 212) Olsen R.S., and Mitchell J.K., 1995. *CPT stress normalization and prediction of soil classification*. In Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, Vol.2, Swedish Geotechnical Society, Linkoping, pp. 257-262.
- 213) Ortigao J. A. R., 1994. *Dilatometer tests in Brasilia porous clay*. 7th International Congress of the International Association of Engineering Geology, Lisbon, Portugal.
- 214) Ortigao J. A. R., Cunha R. P., Alves L. S., 1995. *In situ tests in Brasilia porous clay*. Can. Geotech. J., 33, 189–198.
- 215) Parsons R.L., Johnson R.M., Brown D.A, Dapp S. and Brennan J.J., 2009. *Characterization of Loess for Deep Foundations*. DFI Journal 3 (2), 11-21.
- 216) Petrović R., 1974. *Silos na dunavskoj obali u Beogradu*. Časopis „Izgradnja” – posebno izdanje: „Geomehanika i fundiranje”.
- 217) Poulos H.G. and Davis E.H., 1980. *Pile Foundation Analysis and Design*. Rainbow-Bridge Book Co.
- 218) Poulos H.G., 1989. Pile behaviour – theory and application. Geotechnique 39, No. 3, 365-415.
- 219) Poulos H.G., 2000. Foundation settlement analysis – Practice versus research. 8th Spencer J. Buchanan Lecture.
- 220) Powell J. J. M., Uglow I. M., 1988. *The Interpretation of the Marchetti Dilatometer Test in UK Clays*. ICE Proc. Conf. Penetration Testing in the UK, Univ. of Birmingham, Paper No. 34, 269-273.
- 221) Randolph M. and Susane G., 2011. *Offshore Geotechnical Engineering*. Spon Press.
- 222) Reyna F. and Chameau J.L., 1991. *Dilatometer Based Liquefaction Potential of Sites in the Imperial Valley*. Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geot. Earthquake Engrg. and Soil Dyn., St. Louis, May.
- 223) Rinaldi V.A., Redolfi E.R., Santamarina J.C., 1998. *Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing*. Proc. First. Int. Conf. on Site Characterization, ISC '98, vol. 1, Atlanta, Georgia.
- 224) Rinaldi V.A., Santamarina J.C., 2008. *Cemented soils: small strain stiffness*. Deformational Characteristics of Geomaterials, Vol. 1, pp. 267-274.
- 225) Rivera-Cruz I., Howie J., Vargas-Herrera L. A., Coto-Loria M., Luna-Gonzalez O., 2012. *A new approach for identification of soil behaviour type from seismic dilatometer (SDMT) data*. In Geotechnical and geophysical site characterization, Couthino and Mayne (eds), Taylor and Francis group, London, pp. 947-954.
- 226) Rix G.J. and Stokoe K.H., 1991. *Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance*. Proc, 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing/ISOCCT1, Postdam, New York, A.-B. Huang, ed., 351-362.
- 227) Robertson P. K., 2010b. *Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, USA. www.cpt10.com.
- 228) Robertson P. K., 2012. *Interpretation of in-situ tests – some insights*. J.K. Mitchell Lecture, Proc. 4th Int. Conf. on Site Charactrization, ISC'4, Porto de Galinhas, Brazil, 3-24.

- 229) Robertson P. K., 2015. *Soil Behavior Type using the DMT*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 243-250.
- 230) Robertson P.K. and Campanella R.G., 1986. *Estimating Liquefaction Potential of Sands Using the Flat Plate Dilatometer*. ASTM Geotechn. Testing Journal, Mar., 38-40.
- 231) Robertson P.K., 1990. *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, 27(1): 151-158.
- 232) Robertson P.K., 2009a. *Interpretation of cone penetration tests – a unified approach*. Canadian Geotechnical Journal, 46:1337-1355.
- 233) Robertson P.K., 2009b. *DMT – CPT correlations*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, December: 135:1762-1771.
- 234) Robertson P.K., 2010a. *Soil behaviour type from the CPT: an update*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, USA.
- 235) Robertson P.K., and Campanella, R.G. 1983b. *Interpretation of cone penetration tests – Part II (clay)*. Canadian Geotechnical Journal, 20(4): 734-745.
- 236) Robertson P.K., and Campanella, R.G., 1983a. *Interpretation of cone penetration tests – Part I (sand)*. Canadian Geotechnical Journal, 20(4): 718-733.
- 237) Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D. and By, T., 1988. *Excess Pore Pressures and the Flat Dilatometer Test*. Proc. ISOPT-1, Orlando, FL, Vol. 1, 567-576.
- 238) Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D. and Rice A., 1986. *Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112(8): 791-803.
- 239) Robertson P.K., Davies M.P. and Campanella R.G., 1987. *Design of Laterally Loaded Driven Piles Using the Flat Dilatometer*. Geot. Testing Jnl, Vol. 12, No. 1, Mar., 30-38.
- 240) Rocha B. P., Castro B. A. C., Giacheti G. L., 2015. *Seismic DMT Test in a Non-Text Book Type Geomaterial*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 505-512.
- 241) Rogers C.D.F., Dijkstra T.A. and Smalley, I.J., 1994. *Hydro-consolidation and subsidence of loess: Studies from China, Russia, North America and Europe*. Engineering Geology, 37, 83–113.
- 242) Roque R., Janbu N. and Senneset, K., 1988. *Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests*. Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Florida, Vol.1,577-587.
- 243) Rudarsko-geološki fakultet – katedra za rudarska merenja, Beograd, 1985. *Elaborat o izvršenoj obradi i analizi geodetskih merenja na oskultaciji rezervoara R-27*.
- 244) Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A. and Zettler T.E., 2002. *Manual on Evaluating Soil & Rock Properties*. Geotechnical Engineering Circular No. 5, Report No. FHWA-IF-02-034, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 385 pages.
- 245) Sally J. P., 1991. *Measurement of in situ lateral stress during fulldisplacement penetration tests*. Ph.D. Thesis, Univ. Brit. Columbia, Vancouver, B. C., Canada, pp. 485.
- 246) Sanglerat G., 1972. *The Penetrometer and Soil Exploration*. Elsevier Pub., 488 pp.
- 247) Schmertmann J.H., 1978. *Guidelines for cone penetration test, performance and design*. Report FHWA-TS-78-209, Washington, 145 pp.
- 248) Schmertmann J.H., 1982. *A method for determining the friction angle in sands from the Marchetti dilatometer test (DMT)*. Proc. 2nd European Symp. on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, Vol. 2, 853-861.

- 249) Schmertmann J.H., 1983. *Revised Procedure for Calculating Ko and OCR from DMT's with $I_D > 1.2$ and which Incorporates the Penetration Measurement to Permit Calculating the Plane Strain Friction Angle.* DMT Digest No. 1. GPE Inc., Gainesville, FL.
- 250) Schmertmann J.H., 1984. *Comparing DMT with CPT in NC/OC Sand Bucket test.* Digest No. 4 Section 4D. GPE Inc., Gainesville, Florida, U.S.A.
- 251) Schmertmann J.H., 1987. *Some interrelationship with p_0 in clays.* DMT Digest No. 9, Item 9A, Schmertmann Ed., May.
- 252) Schmertmann J.H., 1988. *Guidelines for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Special Studies, Report No. FHWA-PA- 87-023+24, Vol. 3-4.
- 253) Schmertmann J.H., 1991. *Pressure Dissipation Tests. A-B-C vs A₂ vs A.* DMT Digest No. 12, Section 12C, Schmertmann Ed.
- 254) Schmertmann J.H., Baker W., Gupta R. and Kessler K., 1986. *CPT/DMT Quality Control of Ground Modification at a Power Plant.* Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 985-1001.
- 255) Schmertmann, J.H., 1986. *Dilatometer to compute Foundation Settlement.* Proc. In Situ '86, ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering", Virginia Tech, Blacksburg, VA, June, ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 303-321.
- 256) Schnaid F., 2005. *Geo-characterisation and properties of natural soils by in situ tests.* Proc. 16th international conference on Soil mechanics and geotechnical engineering, vol. 1, Osaka, Millpress, Rotterdam, pp. 3-45.
- 257) Schnaid F., 2009. *In Situ Testing in Geomechanics – The main tests.* Taylor and Francis Group.
- 258) Schnaid F., Odebrech E., 2015. *Challenges in the Interpretation of the DMT in Tailings.* Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 13-23.
- 259) Schneider J. A., Moss R. E. S., 2011. *Linking cyclic stress and cyclic strain based methods for assessment of cyclic liquefaction triggering in sands.* Geotechnique Letters, 1, 31-36.
- 260) Schneider J.A., Randolph M.F., Mayne P.W. & Ramsey N.R. 2008. *Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocene tip resistance and pore pressure parameters.* Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engrg. 134 (11): 1569-1586.
- 261) Schofield A.N. and Wroth C.P., 1968. *Critical state soil mechanics.* London: McGraw-Hill.
- 262) Sharif E., 2015. *Early Applications of DMT in Dubai in Two Main Projects for Natural Sharif Artificial Earthfill Silty Sand.* Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15. Roma, Italy.
- 263) Shen H., Haegeman W., Peiffer H., 2015. *Instrumented DMT: Review and Analysis.* Proc. 3rd Int. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15, Roma, pp 377-382.
- 264) Shuttle D.A. and Cunning J., 2007. *Liquefaction potential of silts from CPTu.* Canadian Geotechnical Journal: 44: 1-19.
- 265) Simonini P., 2004. *Characterization of Venice lagoon silts from in-situ tests and performance of a test embankment.* Proceedings 2nd International Conference on Site Characterization, ISC'2, Geotechnical & Geophysical Site Characterization, Porto, Vol. 1, 187-207.

- 266) Singh V.K., Chung S.G., 2015. *Evaluation of overconsolidation ratios from laboratory and in situ tests on Busan clay*. Engineering Geology 199, 38–47.
- 267) Smith M. G., Housby G. T., 1995. *Interpretation of the Marchetti dilatometer in clay*. In Proceedings of 11th ECSMFE, Vol. 1, pp. 247-252.
- 268) Stetson K.P., Benoit J. and Carter M.J., 2003. *Design of an instrumented flat dilatometer*. Geotechnical Testing Journal, 26(3), 302–309.
- 269) Stokoe K.H. and Santamarina J.C., 2000. *Invited Paper, Seismic-Wave-Based Testing in Geotechnical Engineering*. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, pp. 1490-1536.
- 270) Stokoe K.H., Lee J.N. and Lee S.H., 1991. *Characterization of soil in calibration chambers with seismic waves*. Proc, 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing/ISOCCT1, Postdam, New York, A.-B. Huang, ed., 363-376.
- 271) Swedish Geotechnical Society, 1994. *Recommended Standard for Dilatometer Test*. SGF Report 1:95E.
- 272) Tanaka H. and Tanaka M., 1998. *Characterization of Sandy Soils using CPT and DMT*. Soils and Foundations, Japanese Geot. Soc., Vol. 38, No. 3, 55-65.
- 273) Teh C.I., and Housby G.T. 1991. *An analytical study of the cone penetration test in clay*. Geotechnique, 41 (1): 17-34.
- 274) Terzaghi K., Peck R.B. and Mesri G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, NY.
- 275) Tomlinson M. and Woodward J., 2008. *Pile Design and Construction Practice*. Fifth edition. Taylor and Francis Group.
- 276) Totani G., Marchetti S., Monaco P. and Calabrese M., 2001. *Use of the Flat Dilatometer Test (DMT) in Geotechnical Design*. IN SITU 2001, Bali, Indonesia.
- 277) Totani G., Monaco P., Marchetti S. and Marchetti D., 2009. *Vs measurements by Seismic Dilatometer (SDMT) in non penetrable soils*. Proc. 17th ICSMGE Alexandria Egypt. Oct. 2009.
- 278) Tsai P.H., Lee D.H., Kung G.T.C. and Juang C.H., 2009. *Simplified DMT-based methods for evaluating liquefaction resistance of soils*. Engineering Geology, Vol 103, No 1-2, pp 13-22.
- 279) Uzielli M., Mayne P. W., Cassidy M. J. 2013. *Probabilistic assessment of design strengths for sands from in-situ testing data*. Modern Geotechnical Design Codes of Practice, Advances in Soil Mechanics & Geotechnical Engineering (series), Vol. 1, IOS-Millpress, Amsterdam: 214-227.
- 280) Viana da Fonseca A., Carvalho J., Ferreira C., Santos J. A., Almeida F., Pereira E., Feliciano J., Grade J., Oliveira A., 2006. *Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques*. Geotech. Geol. Eng. 24, 1307–1348.
- 281) Viggiani G. and Atkinson J. H., 1995. Stiffness of fine-grained soil at very small strains. Geotechnique 45, No. 2, 249-265.
- 282) Wen B. and Yan Y., 2014. *Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China*. Engineering Geology, 168, 46–58.
- 283) Wood D.M., 1990. *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge University Press.
- 284) Wood D.M., 2007. *The magic of sands – The 20th Bjerrum Lecture, presented in Oslo, 25 November 2005*. Can. Geotech. J., 44, 1329-1350.

- 285) Wroth C.P., 1984. *The interpretation of in-situ soil tests*. Rankine Lecture, Geotechnique(4).
- 286) Yamamuro J. A., Wood F. M., Lade P. V., 2008. *Effect of depositional method on the microstructure of silty sand*. Can. Geotech. J. 45, 1538–1555.
- 287) Yu H.S., 2006. *In situ soil testing: from mechanics to interpretation*. 1st J. K. Mitchell Lecture, Geomechanics and Geoengineering: An International Journal Vol. 1, No. 3, 165-195.
- 288) Yu H.S., 2000. *Cavity expansion methods in geomechanics*. 1st edition, Springer Science.
- 289) Yu H.S., Carter J.P. and Booker J.R., 1992. *Analysis of the Dilatometer Test in Undrained Clay*. Proc. Wroth Memorial Symp. Predictive Soil Mechanics, Oxford, July, 783-795.
- 290) Yuan Z.X., Wang L.M., 2009. *Collapsibility and seismic settlement of loess*. Engineering Geology, 105, 119-123.
- 291) Yun T.S., Santamarina J.C., 2005. *Decementation, Softening, and Collapse: Changes in Small-Strain Shear Stiffness in k_0 Loading*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., vol. 131, no. 3, pp. 350-358.

DODATAK I

I.1. UVOD

U ovom Dodatku prikazana je Schmertmann-ova (1982, 1988) metoda za određivanje vršnog ugla smičuće čvrstoće tla (ϕ_{pps}) u grubozrnim materijalima. Metoda je zasnovana na određivanju otpora tla na prodor sečiva prema teoriji prodora klina koju daju Durgunoglu i Mitchell (1973) i ravnoteže vertikalnih sila koje deluju na sečivo, proširivač i šipke prilikom utiskivanja. Utiskivanje sečiva može da se posmatra kao dvodimenzionalni problem u uslovima ravnog stanja deformacije (odnos širine/debljine sečiva iznosi 6.2). U tom slučaju iz otpora na prodor sečiva (q_D) može da se odredi vršni ugao smičuće čvrstoće tla za ravno stanje deformacije (Schmertmann, 1982).

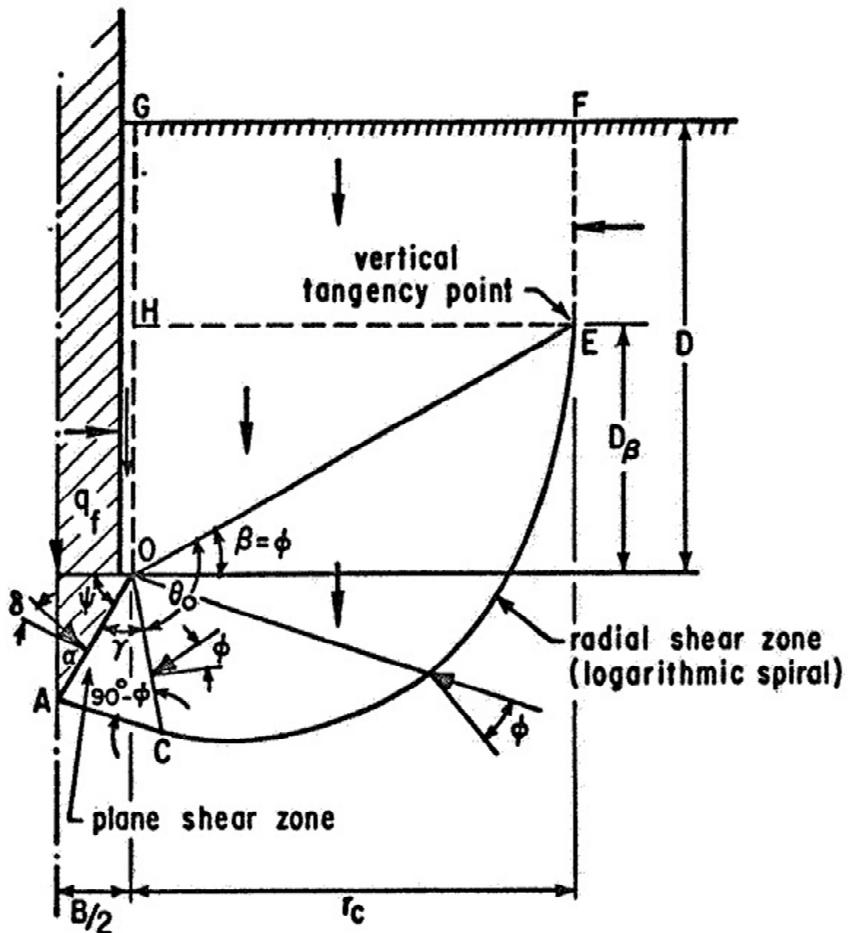
I.2. OSNOVE D&M METODE

I.2.1. Mehanizam loma tla u okolini sečiva

Durgunoglu i Mitchell (1973) eksperimentalnim radom utvrdili su mehanizam loma tla koji se javlja kada se statičke penetracione sonde različitog oblika utiskuju u pesak. Mehanizam loma (kod sečiva) za dubine veće od „kritične dubine“ prikazan je na slici I.1. Za manje dubine, od kritične, postupak određivanja ugla β je iterativan, a tačka (E) gde tangenta na liniju loma postaje vertikalna preseca površinu terena. Kritična dubina kod DMT opita manja je od 0.3 m (Schmertmann, 1988).

Sa slike I.1 vidi se da postoje dve smičuće zone: *ravanska* i *radijalna*.

Ravanska zona postoji neposredno ispod vrha sečiva, a njene dimenziije mogu da se odrede ukoliko su poznati *polovina ugla vrha sečiva* (α), *ugao γ i ugao smičuće čvrstoće* (ϕ). Kod DMT sečiva ugao vrha je poznat i iznosi $\alpha=12^\circ$. Ugao γ zavisi od hrapavosti sečiva, odnosno odnosa δ/ϕ . Sa povećanjem hrapavosti ugao γ se smanjuje, a za potpuno hrapavo sečivo $\gamma=0$. Zavisnost ugla γ od ϕ je izraženija kod sečiva sa manjom hrapavostti. Smičuća površ kod radijalne zone aproksimirana je logaritamskom spiralom koja ili preseca površinu terena u tački E (za dubine manje od kritične dubine) ili prelazi u vertikalu u tački E (dubine veće od kritične dubine). Kod penetracionih opita dubine ispitivanja su gotovo uvek veće od kritične dubine s obzirom na malu širinu sečiva ili prečnik konusa.



Slika I.1. Mehanizam loma tla prilikom utiskivanja sonde oblika sečiva za dubine veće od kritične dubine (Durgunoglu i Mitchell, 1973)

I.2.2. Formulacija metode

Otpor tla na prodor sečiva ($q_D = q_f$) može da se odredi iz jednačine I.1. U izvornom obliku Durgunoglu i Mitchell (1973) daju opšti oblik jednačine koji uzima u obzir i uticaj kohezije na penetracionu otpornost. Međutim, u jednačini I.1 taj član je izostavljen s obzirom da se Schmertmanov postupak odnosi isključivo na određivanje ϕ peska.

$$q_f = \gamma_s B N_{\gamma q} \xi_{\gamma q} \quad (I.1)$$

Pri čemu je:

q_f – granična nosivost tla (otpor na prodor sečiva),
 γ_s – prosečna efektivna zapreminska težina tla iznad sečiva,
 B – širina DMT sečiva (1.5 cm),
 $N_{\gamma q}$ – faktor nosivosti za trenje i težinu nadsloja i
 $\xi_{\gamma q}$ – faktor oblika (za sonde oblika sečiva iznosi 1).

Rešavanje jednačine I.1 svodi se na određivanje faktora nosivosti ($N_{\gamma q}$), koji zavisi od sledećih parametara:

- a) ugla smičuće čvrstoće tla (φ),
- b) polovine vrha ugla sečiva (α),
- c) hrapavosti sečiva (δ/φ) i
- d) relativne dubine sečiva (D/B).

U daljem tekstu prikazan je uticaj parametara navedenih pod a), c) i d) za poznati ugao $\alpha=12^\circ$ na veličinu $N_{\gamma q}$.

I.2.3. Određivanje faktora nosivosti ($N_{\gamma q}$)

Faktor nosivosti određuje se iz jednačine I.2.

$$\begin{aligned}
 N_{\gamma q} = & \frac{\cos(\psi - \delta)}{\cos \delta} \frac{(1 + \sin \varphi \sin(2\gamma - \varphi))}{\cos \varphi \cos(\gamma - \varphi)} \left\{ \frac{\cos^2(\gamma - \varphi)}{4\cos^2 \psi \cos^2 \varphi} I_\theta \right. \\
 & + \frac{3 \cos(\gamma - \varphi) \cos^2 \beta}{4\cos \psi \cos \varphi} e^{2\theta_0 \tan \varphi} \left(m - \frac{2}{3} m' \right) \\
 & \left. - K \frac{\cos \psi \cos \varphi}{\cos(\gamma - \varphi)} (m - m')^2 (m + 2m') + K \frac{\cos \psi \cos \varphi}{\cos(\gamma - \varphi)} m^3 \right\} - \frac{\tan \psi}{4}
 \end{aligned}$$

Pri čemu je:

$$m = D/B$$

$$m = \frac{D_\beta}{B} = \frac{\sin\beta \cos(\gamma - \varphi)}{2\cos\psi \cos\varphi} e^{(\theta_0 \tan\varphi)}$$

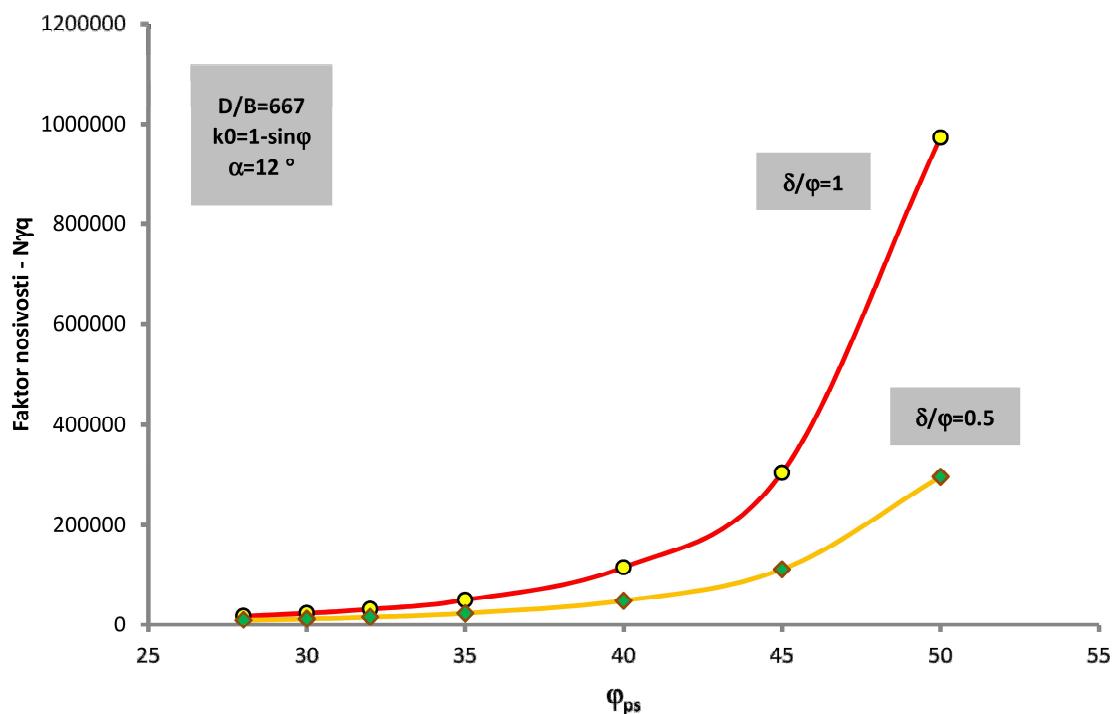
$$\tan\gamma = (\sin\varphi + \sqrt{1 + 2\cos\varphi})/(2 + \cos\varphi)$$

$$\psi = 90^\circ - \alpha$$

$$\theta_0 = 180^\circ - (\psi + \gamma) + \beta$$

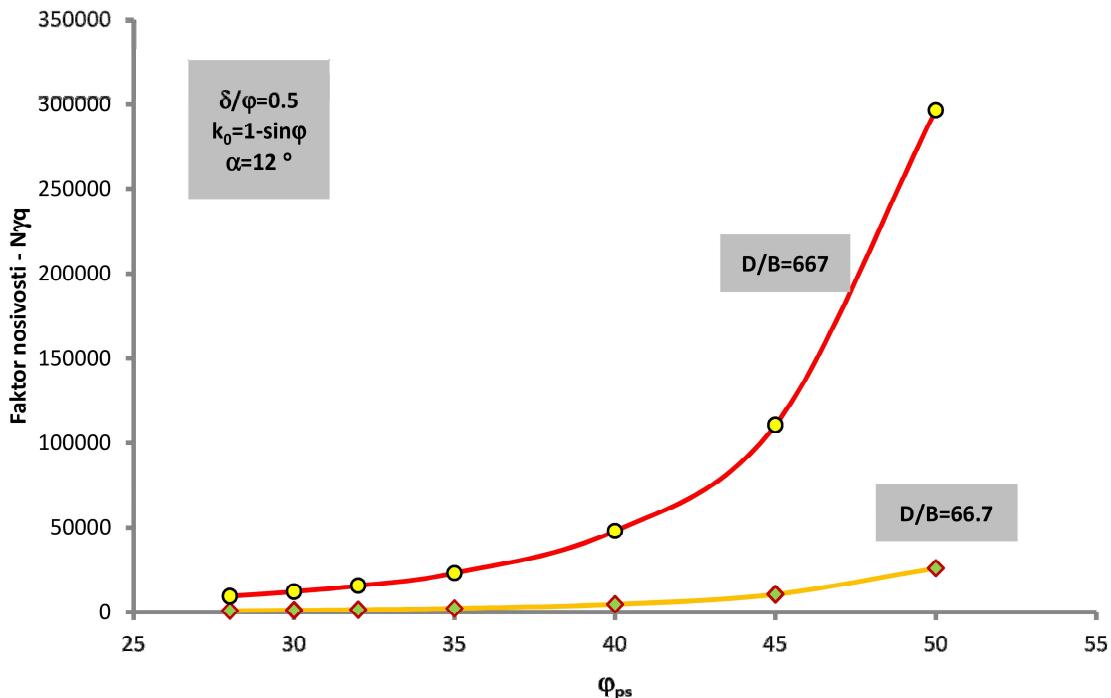
$$I_\theta = \frac{1}{1 + 9\tan^2\varphi} \left\{ 3\tan\varphi \left\{ e^{3\theta_0 \tan\varphi} \cos\beta - \cos(\theta_0 - \beta) \right\} + \left\{ e^{3\theta_0 \tan\varphi} \sin\beta + \sin(\theta_0 - \beta) \right\} \right\}$$

Uticaj hrapavosti na $N_{\gamma q}$ prikazan je na slici I.2. Sa slike se vidi da hrapavost sečiva znatno doprinosi povećanju $N_{\gamma q}$, odnosno što je veća hrapavost sečiva potrebna je veća sila da se ono utisne u tlo za istu veličinu ugla smičuće čvrstoće.



Slika I.2. Uticaj δ/φ na $N_{\gamma q}$

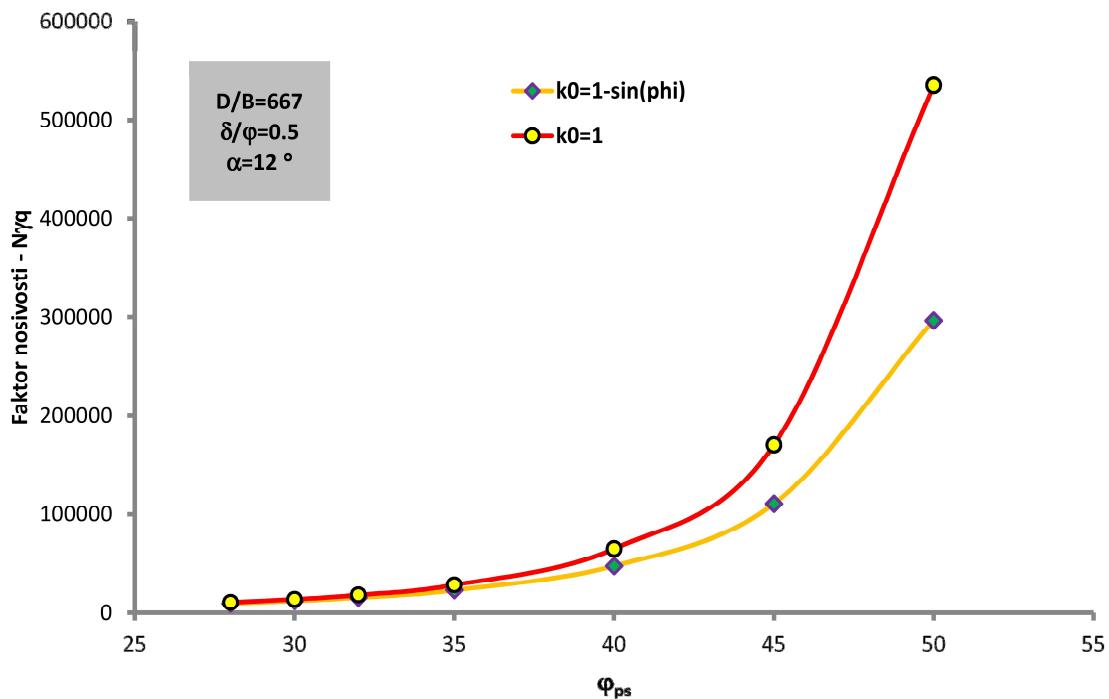
Na slici I.3. prikazan je uticaj relativne dubine D/B na $N_{\gamma q}$. $D/B=667$ odgovara dubini sečiva od 10.0 m, a dubina $D/B=66.7$ odgovara dubini sečiva od 1.0 m. Sa slike se vidi da je uticaj relativne dubine na $N_{\gamma q}$ izražen i da raste sa povećanjem φ .



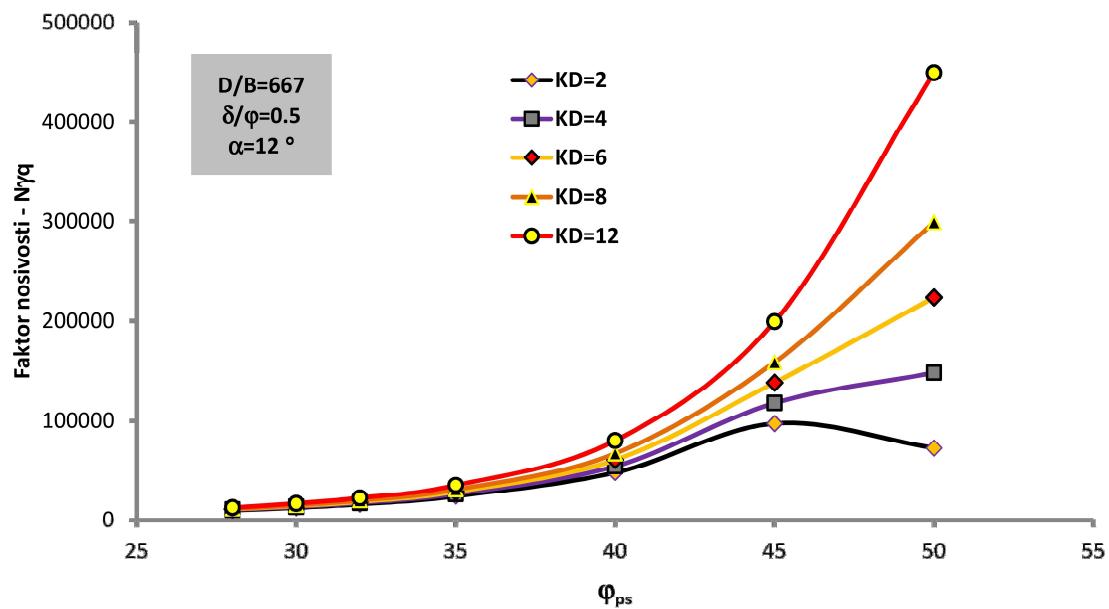
Slika I.3. Uticaj D/B na $N_{\gamma q}$

D&M postupak uzima u obzir koeficijent bočnog pritiska tla (k), što se može videti iz jednačine I.2. To je ujedno prednost metode s obzirom na značaj horizontalnih naponi kod određivanja granične nosivosti, ali je i mana jer je k teško pouzdano odrediti u praksi. Uticaj različite pretpostavke za k na veličinu $N_{\gamma q}$ prikazan je na slici I.4. Sa slike se zapaža da $N_{\gamma q}$ raste sa povećanjem k . Za niže vrednosti ugla smišuće čvrstoće ($\phi_{ps} < 35^\circ$) k ima mali uticaj na veličinu $N_{\gamma q}$. D&M koeficijent bočnog pritiska određuju iz dobro poznate relacije $k=1-\sin\varphi$. Schmertmann (1988) usvaja da je $k=k_0$ pri čemu k_0 određuje iz jednačine prikazane u tabeli 5.7 (videti poglavlje 5.6.2.2).

Uticaj indeksa horizontalnog napona (K_D) na $N_{\gamma q}$ prikazan je na slici I.5. Sa slike se vidi da K_D ima veliki uticaj na $N_{\gamma q}$ za vrednosti ϕ_{ps} veće od 35° . Treba zapaziti da pri manjim vrednostima K_D (2-3) za ugao ϕ_{ps} preko 45° $N_{\gamma q}$ opada. Razlog za to može se tražiti u formulaciji jednačine za k_0 koju daje Schmertmann (1983). To se najbolje vidi sa slike 5.27 koja ukazuje da za niske vrednosti K_D i visok ugao smišuće čvrstoće k_0 može da bude i negativan. To je fizički nemoguće pa se preporučuje da se metoda u takvoj situaciji ne primenjuje, odnosno treba usvojiti drugačiju formulaciju za k_0 (npr. $k_0=1-\sin\varphi$).



Slika I.4. Uticaj k na $N_{\gamma q}$



Slika I.5. Uticaj K_D na $N_{\gamma q}$

I.3. METODA ZA ODREĐIVANJE ϕ_{ps}' - SCHMERTMANN (1988)

I.3.1. Određivanje k_0 iz K_D (Schmertmann, 1983)

Schmertmann (1988) preporučuje da se koeficijent bočnog pritiska tla u izrazu za $N_{\gamma q}$ (jednačina I.2) odredi iz jednačine I.3.

$$k_0 = \frac{40 + 23K_D - 86K_D(1 - \sin\varphi'_{ax}) + 152(1 - \sin\varphi'_{ax}) - 717(1 - \sin\varphi'_{ax})^2}{192 - 717(1 - \sin\varphi'_{ax})} \quad (I.3)$$

U jednačini I.3 figuriše osno-simetrični ugao smičuće čvrstoće (φ_{ax}'), dok u jednačini I.2 figuriše ugao za ravno stanje deformacije (φ_{ps}'). Zato Schmertmann (1988) preporučuje empirijske zavisnosti između φ_{ps}' i φ_{ax}' prikazane u tabeli I.1.

Tabela I.1. Određivanje φ_{ax}' iz φ_{ps}' (Schmertmann, 1988)

za $\varphi_{ps}' \leq 32^\circ$	$\varphi_{ax}' = \varphi_{ps}'$
za $\varphi_{ps}' > 32^\circ$	$\varphi_{ax}' = \varphi_{ps}' - \frac{\varphi_{ps}' - 32}{3}$

I.3.2. Značaj naponskog stanja kod određivanja φ_{ps}'

Da bi se uzela u obzir zavisnost ugla smičuće čvrstoće od efektivnog naponskog stanja potrebno je da se definiše naponsko stanje koje postoji u tlu tokom izvođenja DMT opita. Schmertmann (1988) predlaže da se srednji normalni efektivni napon u ravni loma (σ_{ff}') tokom penetracije odredi iz jednačine I.4.

$$\sigma_{ff}' = \sigma_v'(1 + \sin\varphi_{ps}') \quad (I.4)$$

Pri čemu je:

σ_v' – vertikalni geostatički napon određen iz DMT opita.

Nakon definisanja inicijalnog napona u ravni loma, da bi se uzela u obzir nelinearnost anvelope, Schmertmann (1988), na osnovu rezultata koje je dobio Baligh (1976),

predlaže da se odredi referentni sekantni ugao smičuće čvrstoće φ_0' za referentni normalni efektivni napon u ravni loma $\sigma_{ff}'=2.72$ bara i ugao koji definiše zakrivljenost envelope $\alpha=6^\circ$, prema jednačini I.5 (videti sliku I.6).

$$\tan \varphi_0' = \tan \varphi_{ps}' + 0.105 \log \sigma_{ff}' - 0.046 \quad (I.5)$$

Sekantna vrednost ugla smičuće čvrstoće (φ_i') za bilo koji napon u ravni loma (σ_{ffi}'), može da se odredi iz φ_0' preko jednačine I.6.

$$\tan \varphi_i' = \tan \varphi_0' + 0.046 - 0.105 \log \sigma_{ffi}' \quad (I.6)$$

Veličina σ_{ffi}' zavisi od vrste inženjerskog problema koji se razmatra. Dakle, suština je da se odredi operativni ugao φ_i' koji bi se dalje koristio za rešavanje određenog inženjerskog problema. Taj ugao se određuje na osnovu dva parametra σ_v' i φ_{ps}' (jednačine I.4 do I.6) koji se dobijaju iz DMT opita. Prethodno je potrebno poznavati normalni napon u ravni loma σ_{ff}' što je u najboljem slučaju gruba aproksimacija realnog stanja. Jamiolkowski i sar. (2001) daju preporuke kako da se odredi σ_{ffi}' za problem plitkog i dubokog fundiranja.

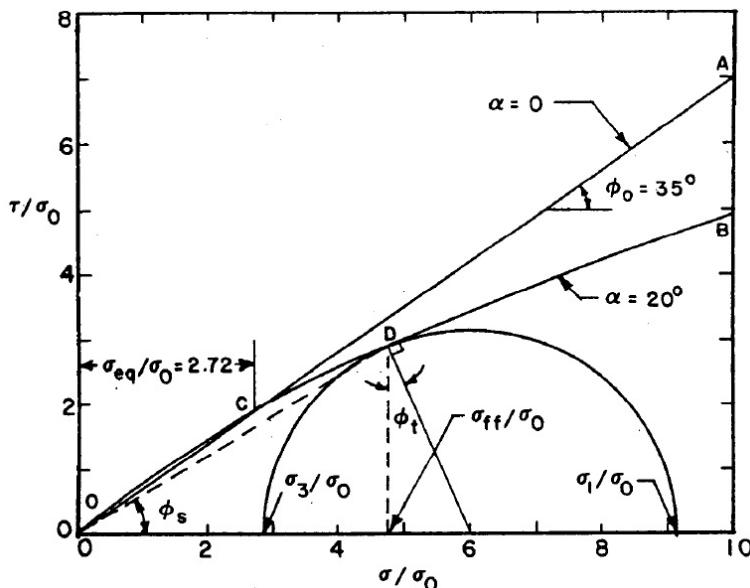
Uticaj nelinearnosti envelope na veličinu ugla smičuće čvrstoće dat je u tabeli I.2.

Tabela I.2. Uticaj nelinearnosti envelope na ugao smičuće čvrstoće tla (lokacija 18)

			Jedn. I.4	Jedn. I.5	$\sigma_{ff}' < \sigma_{ff}' (\sigma_{ff}' > \sigma_{ff}')$	Jedn. I.6
z (m)	σ_v' (bar)	φ_{ps}' ($^\circ$)	σ_{ff}' (bar)	φ_0' ($^\circ$)	σ_{ffi}' (bar)	φ_i' ($^\circ$)
10.2	1.11	38.9	1.80	38.2	0.5 (5)	40.9 (37.2)
10.4	1.13	39	1.84	38.4	0.5 (5)	41.0 (37.4)
10.5	1.15	37.2	1.84	36.5	0.5 (5)	39.3 (35.5)

Iz tabele može se videti da φ_{ps}' , određen prema Schmertmann (1988) metodi, može da se razlikuje od operativnog ugla φ_i' u zavisnosti od veličine napona σ_{ffi}' . Za slučaj kada je $\sigma_{ffi}' < \sigma_{ff}'$ operativni ugao je veći, a razlika raste sa smanjenjem σ_{ffi}' . Kada je $\sigma_{ffi}' > \sigma_{ff}'$ obrnuto važi. Prosečan normalni napona u ravni loma je u praktičnim situacijama teško

proceniti zato se preporučuje da se kao projektna veličina za ugao smišuće čvrstoće koristi ϕ_{ps}' bez da se uzima u obzir zavisnost ugla smišuće čvrstoće od normalnog napona.



Slika I.6. Zakriviljenost anvelope loma u pesku (Baligh, 1976)

I.3.3. Ravnoteža vertikalnih sila

Schmertmann (1982, 1988) preporučuje da se ugao smišuće čvrstoće odredi iz ravnoteže vertikalnih sila koje deluju na sečivo tokom utiskivanja (slika I.7). Metoda važi za drenirano tlo ($I_D > 1.2$). Schmertmann (1988) usvaja da je kontakt između sečiva i tla delimično hrapav, odnosno $\delta/\varphi=0.5$. Na osnovu prepostavke da je trenje između šipki i tla zanemarljivo ugao ϕ_{ps}' može da se odredi iz sledeće jednačine:

$$\tan(\phi_{ps}'/2) = [\text{pritisak} - (\pi/4) * P\check{S}^2 * u_0 * 1.019 - (A + (\pi/4) * d^2 - B * d) * q_f + W * (Z + 2)] / F_H \quad (I.7)$$

Pri čemu je:

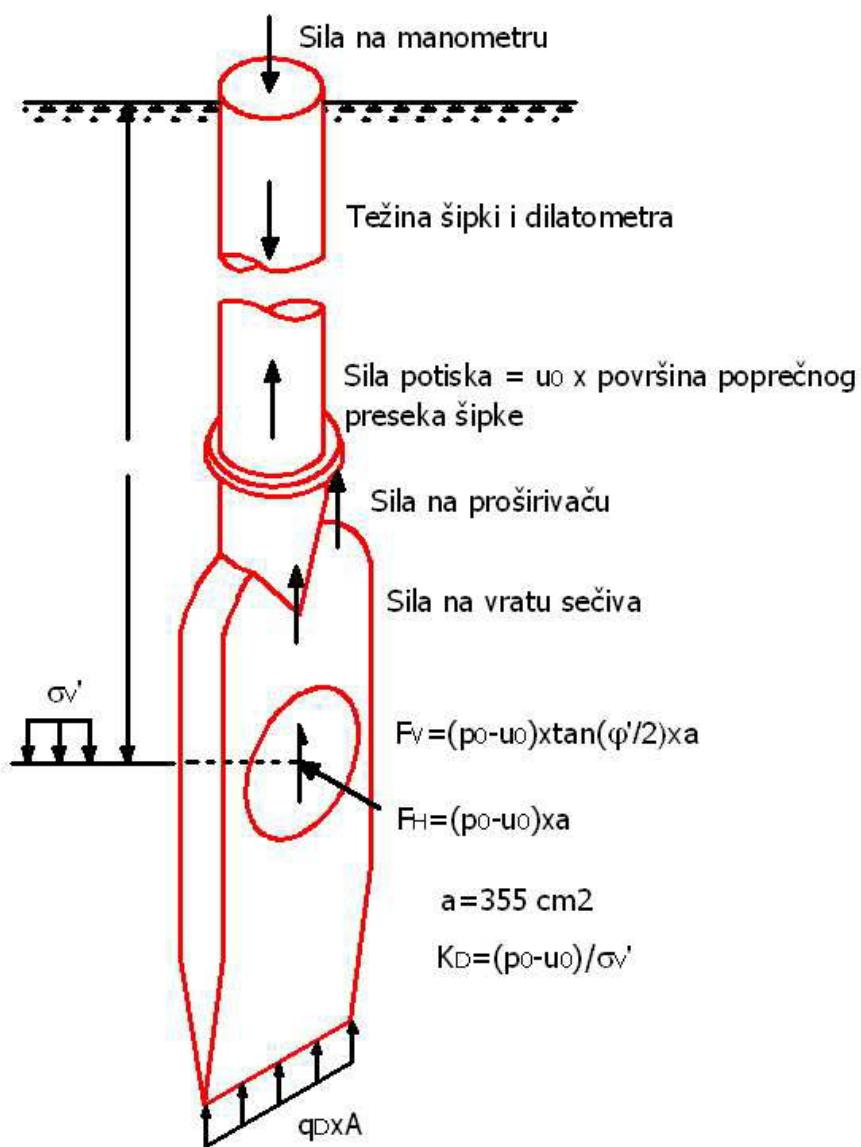
pritisak – pritisak na manometru (kg),

$P\check{S}$ – prečnik šipke (cm),

u_0 – hidrostatički porni pritisak (bar),

A – površina sečiva u osnovi (14 cm^2),

d – prečnik friкционog reducira (cm),
 B – debljina sečiva (1.5 cm),
 q_f – D&M granična nosivost (kg/cm^2) – prema jednačini I.1,
 W – težina šipki po m dužnom (6.5 kg/m),
 Z – dubina izvođenja opita (m),
 $F_H = (p_0 - u_0) * a * 1.019$ – horizontalna sila upravna na sečivo,
 a – površina strana sečiva (355 cm^2) i
 p_0 – korigovano prvo čitanje „A“ (bar).



Slika I.7. Vertikalne sile koje deluju na sečivo tokom penetracije

I.3.4. Iteracijom do ϕ_{ps}'

Rešenje jednačine I.7 traži se iterativnim postupkom na sledeći način:

- 1) prepostavi se ϕ_{ps}' ,
- 2) izračuna se k_o iz jednačine I.3,
- 3) izračuna se $N_{\gamma q}$ iz jednačine I.2,
- 4) odredi se prosečna zapreminska težina za tlo iznad sečiva (γ_s),
- 5) izračuna se ϕ_{ps}' iz jednačine I.7 i
- 6) ponavljaju se koraci 1)-5) sve dok razlika računskog i prepostavljenog ugla ne bude manja od 1° .

I.3.5 Uticaj hrapavosti (δ/φ) na ϕ_{ps}'

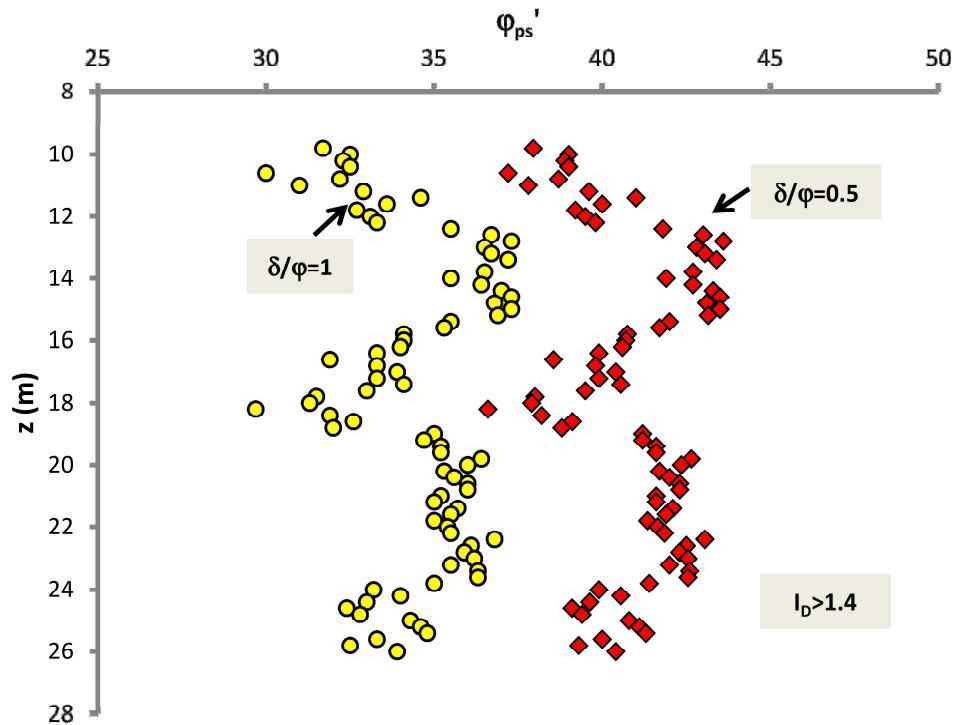
Prethodno je pokazano (slika I.2) da hrapavost može znatno da utiče na $N_{\gamma q}$. Da bi se pokazao uticaj hrapavosti na ϕ_{ps}' razmotriće se dva slučaja. U prvom slučaju ϕ_{ps}' je određen iz jednačine I.7 za prepostavku da je $\delta/\varphi=0.5$. U drugom slučaju ϕ_{ps}' je određen za prepostavku da je $\delta/\varphi=1$ (potpuno hrapav kontakt). To zahteva da se u jednačini I.7 umesto $\tan(\phi_{ps}'/2)$ koristi $\tan(\phi_{ps}')$ i da je ugao $\gamma=0$. Poređenje je izvršeno za kvarcni pesak bez znatne mikrostrukturi sa lokacije 18. Rezultat je prikazan na slici I.8. Sa slike se zapaža sledeće:

- sa povećanjem hrapavosti za istu silu utiskivanja smanjuje se ϕ_{ps}' . To znači da bi se pri istoj sili utisnulo hrapavije sečivo pesak treba da ima manju čvrstoću
- Hrapavost može znatno da ograniči mogućnost utiskivanja sečiva u zbijene, dilatantne peskove

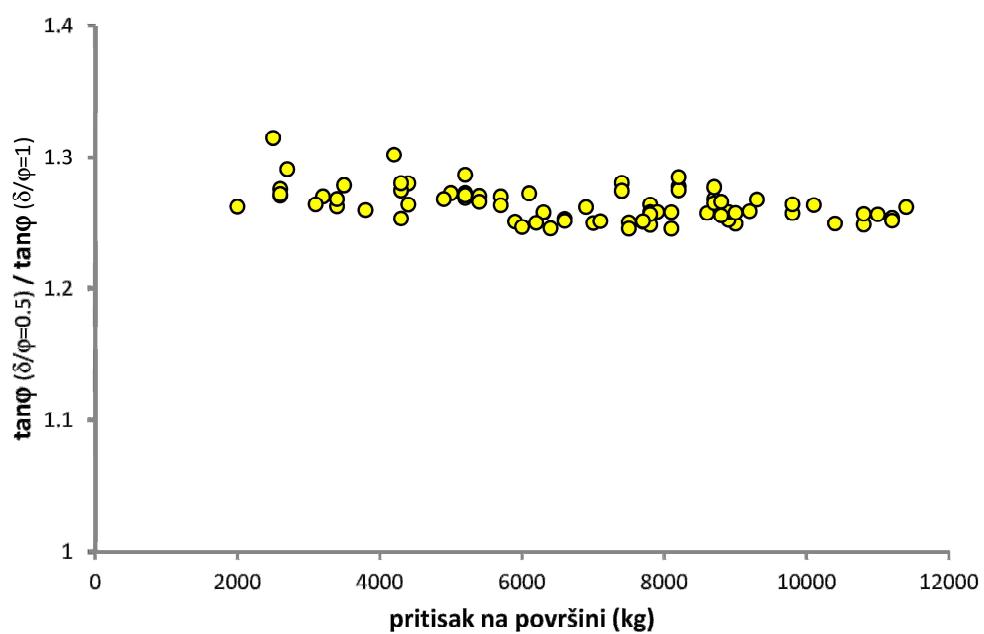
Praktična preporuka može da bude da se stara, često upotrebljavana sečiva smatraju potpuno hrapavim ($\delta/\varphi=1$), a nova sečiva da se smatraju delimično hrapavim ($\delta/\varphi=0.5$). Radi validacije pomenute prepostavke potrebno je dodatno istraživanje.

Zavisnost odnosa ϕ_{ps}' novog i starog sečiva od pritiska na površini prikazan je na slici I.9. Sa slike se može videti da da je odnos praktično konstantan i nezavisan od sile, što

znači da bi se staro sečivo utisnulo na određenu dubinu za istu silu čvrstoća peska mora da bude manja nego kod delimično hrapavog sečiva.



Slika I.8. Zavisnost ϕ_{ps}' od hrapavosti sečiva (lokacija 18)



Slika I.9. Zavisnost odnosa ϕ_{ps}' starog i novog sečiva od pritiska na površini

DODATAK II

II.1. UVOD

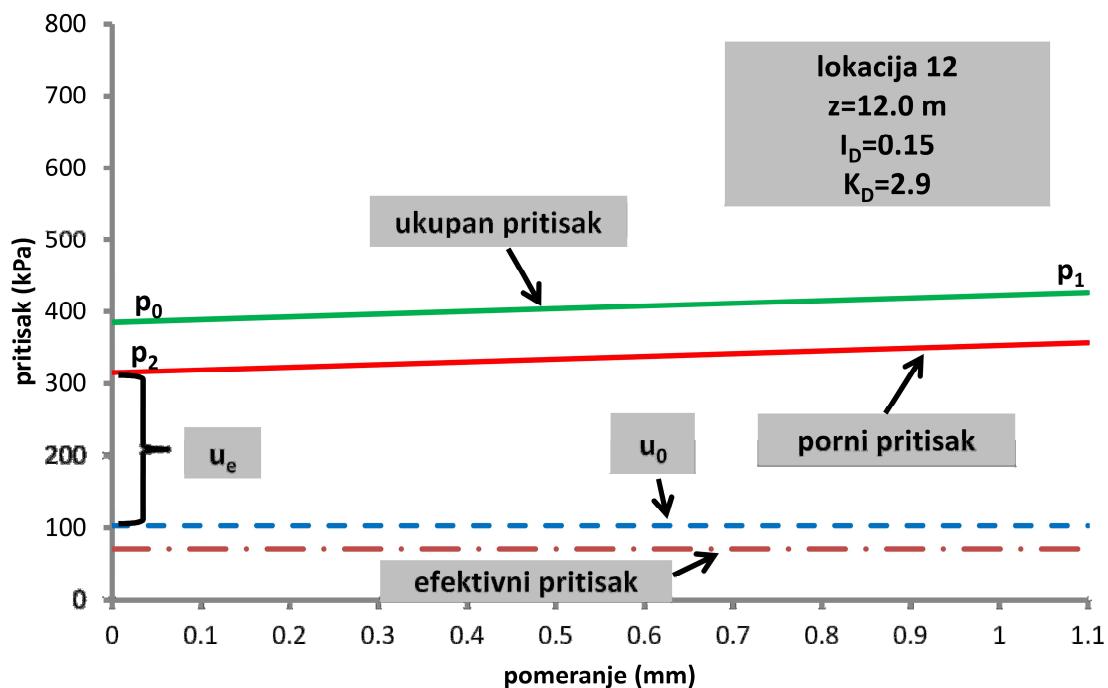
U ovom dodatku prikazani su postupci čijom primenom mogu da se utvrde uslovi dreniranja koji vladaju tokom izvođenja opita. To je posebno značajno kod prašina čiji granulometrijski sastav omogućava delimično dreniranje pornih pritisaka u fazi ekspanzije membrane.

II.2. USLOVI DRENIRANJA

U pesku DMT opit se izvodi u potpuno dreniranim uslovima. Porni nadpritisici (u_e) su zanemarljivi i približno jednaki 0.

U glini opit je nedreniran, odnosno za vreme potrebno da se izvede opit (oko 1 min) nema značajnije dissipacije pornih pritisaka.

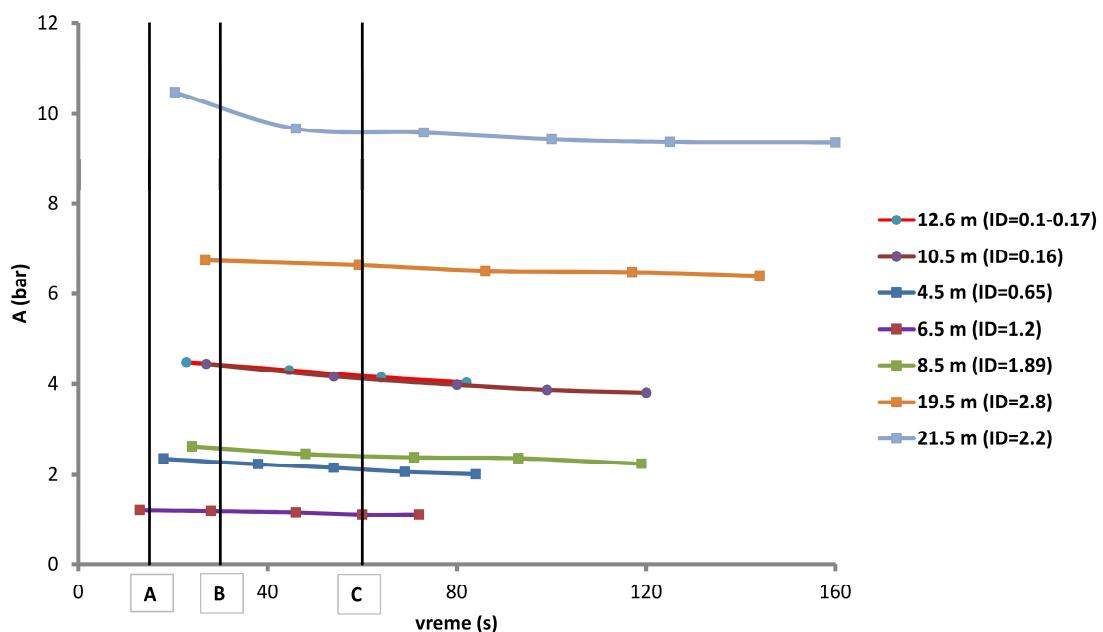
Dakle, u oba slučaja porni pritisici u tlu u okolini sečiva su konstantni u vremenu. U pesku $u_e = u_0$, a u glini nema dissipacije u_e . Odnos ukupnih i efektivnih pritisaka prikazan je na slici II.1 za CL tlo sa lokacije 12.



Slika II.1. Idealizacija izmerenih pritisaka u mekoj glini (lokacija 12)

Postoji grupa tla kod koje je moguće delimično dreniranje pornih pritisaka za vreme trajanja opita. U tom slučaju B čitanje, koje prati A, je malo usled delimične disipacije pornih pritisaka koje nastaje u fazi ekspanzije membrane od A do B. Posledica toga je mala razlika između B i A čitanja, pa svi parametri čije određivanje zavisi od te razlike imaju suviše male vrednosti (I_D , E_D , M_{DMT}). Niske vrednosti I_D ($I_D=0.1 - 0.2$) mogu da ukažu na takvo tlo. Međutim, prethodno je potrebno da se utvrdi da li je I_D mali zato što je tlo „prava glina“ ili zato što je došlo do delimične disipacije pornih pritisaka. To je moguće utvrditi na sledeće načine:

- u međuintervalu dubine izvođenja opita (npr. na 10 cm) treba više puta ponoviti A čitanje (nakon svakog A čitanja ispušta se vazduh iz sistema) u trajanju od približno jednog minuta. Na taj način moguće je osmatrati pad A pritiska u vremenu. Ukoliko je taj pad značajan radi se o delimično dreniranom opitu. Rezultat opita ponovljenog A čitanja na različitim dubinama na lokaciji 23 prikazan je na slici II.2.
- ukoliko je parametar pornog pritiska (jednačina 4.12) između 0 (vodopropusno tlo) i 0.7 (vodonepropusno tlo) moguće je da je pretpostavka da je opit delimično dreniran tačna.

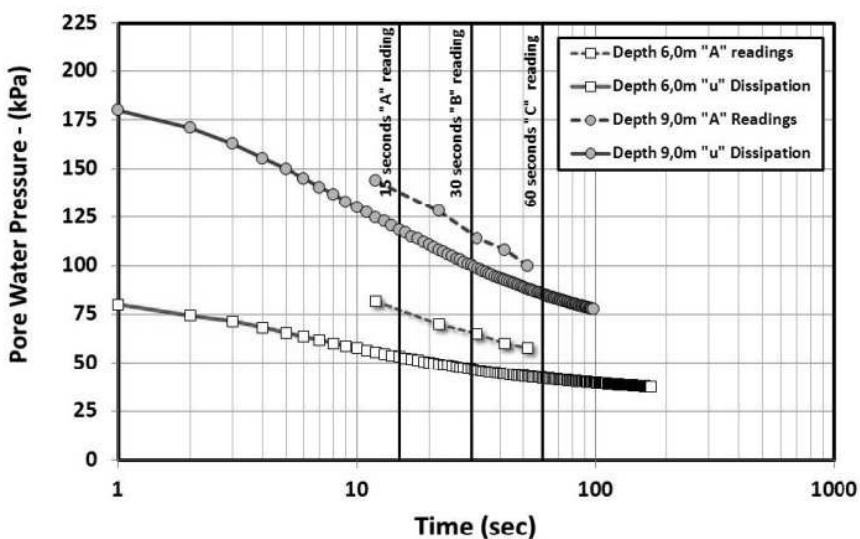


Slika II.2. Promena A pritiska u vremenu (lokacija 23)

Na slici II.2 prikazan je rezultat merenja 4 do 6 ponovljena A pritiska u vremenu za različite vrednosti I_D . Na apcisi prikazano je vreme od početka espanzije membrane, odmah nakon utiskivanja sečiva. Tu je uračunato i vreme potrebno da se membrana vrati u inicijalni položaj nakon svakog A čitanja (prosečno 2-3 sekunde). Prema ASTM D 6635 prvo čitanje A treba da se dostigne za 15-30 sekundi od početka ekspanzije membrane, a drugo B čitanje 15-30 sekundi nakon prvog čitanja. Sa slike se vidi da je ta procedura ispoštovana. Svi opiti izvedeni su ispod nivoa podzemne vode. Sa slike II.2 zapaža se sledeće:

- A čitanje je približno konstantno u vremenu za sve prikazane vrednosti I_D . Pad A pritiska je manji od 10 % za vreme približno 60-90 sekundi.
- opiti izvedeni na 10.5 m i 12.6 m dubine, kod kojih je I_D oko 0.1, predstavljaju „prave gline“ s obzirom da je A čitanje približno konstantno, što ukazuje da nema disipacije pornih pritisaka u vremenu potrebnom da se izvede opit.

Schnaid i Odebrecht (2015) daju rezultat ispitivanja flotacijske jalovine prikazan na slici II.3. Na slici je pored A čitanja prikazana i disipacija merenih pornih pritisaka. Vidi se da A čitanje opada približno istom brzinom kao i porni pritisci. Brz pad pornih pritisaka ukazuje da je opit delimično dreniran, a posledica je da je razlika B-A mala. U takvoj situaciji interpretacija opita nije moguća.



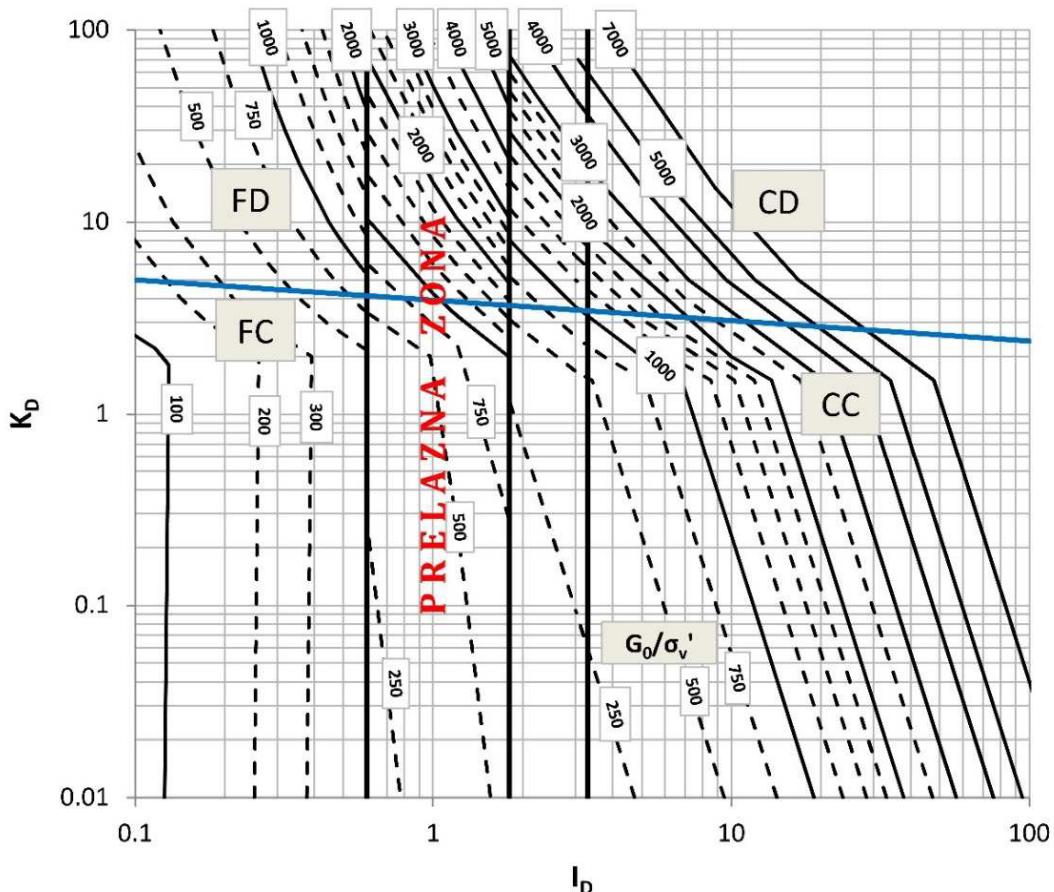
*Slika II.3. Porni pritisci u DMT opitu dobijeni ispitivanjem flotacijske jalovine
(Schnaid i Odebrecht, 2015)*

Na slici 6.7 prikazane su granice granulometrijskog sastava tla kod koga je opit delimično dreniran. U takvom tlu treba probati da se poveća brzina dotoka gasa u sečivo, tako da se A čitanje dostigne za približno 7 sekundi, a B čitanje za približno 7 sekundi nakon A čitanja. Na taj način bi opit bio nedreniran. Taj postupak se naziva „brzi postupak”. Prethodno je potrebno proveriti uslove dreniranja na jedan od pomeutih načina. U tlu kao što je flotacijska jalovina (slika II.3), čak ni prikazani brzi postupak nije dovoljan da bi se održali nedrenirani uslovi. U toj situaciji interpretacija rezultata nije moguća i opit nije primenljiv.

DODATAK III

III.1. UVOD

U ovom dodatku prikazani su parovi tačaka $I_D - K_D$ koji definišu linije G_0/σ_v' na SBT dijagramu prikazanom na slici III.1 (isto slika 5.14 u tekstu).

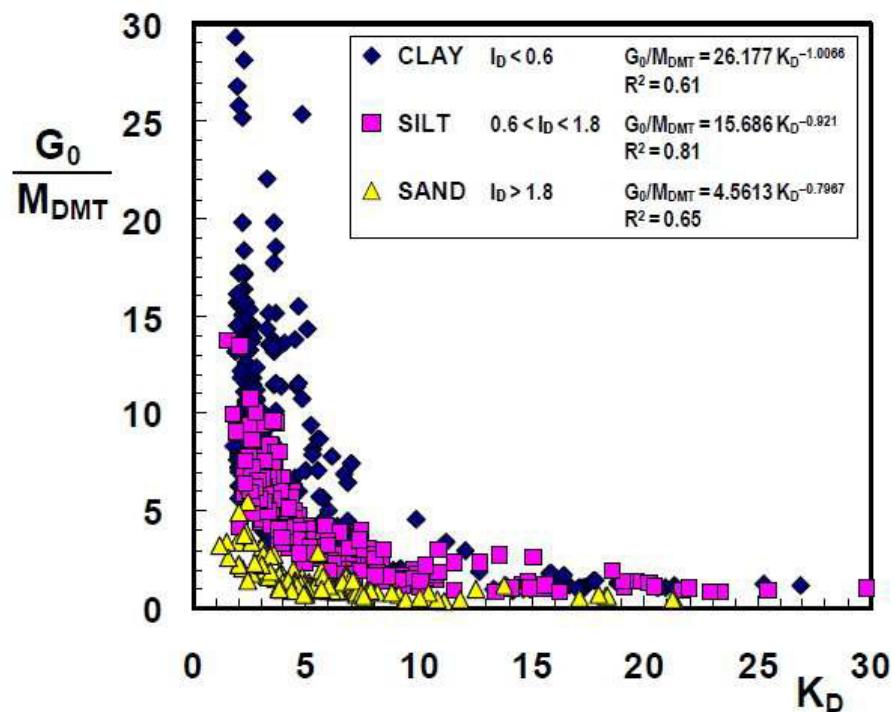


Slika III.1. SBT dijagram za određivanje vrste tla i prisustva mikrostrukture

III.2. PAROVI TAČAKA

Parovi tačaka izvedeni su tako što se M_{DMT} , u jednačinama prikazanim na slici III.2, izrazi preko jednačina prikazanih u tabeli 5.10, jednačine 5.31 i jednačine 5.3. To omogućava da se odrede parovi tačaka $I_D - K_D$ koji definišu linije G_0/σ_v' prikazane na slici III.1. Iz pomenutih jednačina indeks materijala može da se izrazi u funkciji K_D , G_0/σ_v' i R_M . Za slučaj kada je $0.6 < I_D < 3$ postupak je iterativan, s obzirom da je R_M funkcija i I_D i K_D . U tabeli III.1. prikazani su parovi tačaka koji mogu da se iskoriste za konstruisanje linija

G_0/σ_v' . Zbog sveobuhvatnosti dijagrama, u tabeli III.1 do III.4 dat je raspon vrednosti I_D i K_D koji je daleko veći od praktično mogućih vrednosti.



Slika III.2. Zavisnost G_0/σ_v' od K_D za raličite vrste tla (Monaco i sar., 2009)

Tabela III.1. Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($I_D < 0.6$)

ID<0.6									
G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	
100	0.123746159	0.001	200	0.251282198	0.01	300	0.376923297	0.01	
	0.129599975	1.1		0.26004381	1.8		0.390065715	1.8	
	0.129742945	1.3		0.260092884	2		0.390139326	2	
	0.129865541	1.5		0.175183754	3		0.262775631	3	
	0.130021905	1.8		0.142360614	4		0.213540921	4	
	0.116720857	2.2		0.08942123	10		0.134131845	10	
	0.102636043	2.5		0.071153568	20		0.106730352	20	
	0.100031125	2.57		0.066787972	25		0.100181959	25	
500	0.598386944	2.15	750	0.596989218	3.4	1000	0.598822724	5.35	
	0.437959385	3		0.57313323	3.6		0.56364218	6	
	0.355901536	4		0.533852303	4		0.522451648	7	
	0.310874686	5		0.466312029	5		0.491403227	8	
	0.28182109	6		0.422731635	6		0.466965978	9	
	0.223553075	10		0.335329612	10		0.44710615	10	
	0.177883921	20		0.266825881	20		0.355767842	20	
	0.159019777	30		0.238529666	30		0.318039555	30	
	0.147939944	40		0.21056861	50		0.280758147	50	
	0.121248061	100		0.17561381	120		0.234151747	120	
1250	0.598136495	8.5	1500	0.582944336	15	2000	0.251282198	0.01	
	0.539752314	11		0.533651762	20		0.26004381	1.8	
	0.485786947	15		0.477059332	30		0.260092884	2	
	0.417424827	25		0.443819832	40		0.175183754	3	
	0.36984986	40		0.42113722	50		0.142360614	4	
	0.32592458	70		0.391109496	70		0.08942123	10	
	0.309506382	90		0.371407658	90		0.071153568	20	
	0.303120153	100		0.363744184	100		0.066787972	25	
	0.297573317	110		0.357087981	110		0.251282198	0.01	
	0.292689683	120		0.27725145	501		0.26004381	1.8	

Tabela III.2. Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($0.6 < I_D < 1.8$)

0.6 < $I_D < 1.8$									
G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	
250	0.609	0.221	500	0.609	3.325	750	0.609	5.936	
	0.7	0.038		0.978	2		1	2.91	
	1.12	0.0001		1.2	0.27		1.2	2.353	
				1.8	0.0016		1.79	0.2855	
1000	0.609	10.15	1250	0.6098	17.15	1500	0.6098	28	
	1	4.23		1	6.02		1	8.43	
	1.2	3.26		1.2	4.45		1.2	5.985	
	1.79	1.995		1.79	2.518		1.79	3.153	
1750	0.6098	44.3	2000	0.6098	68.2	2250	0.6098	102.5	
	1	11.687		1	16.1		1	21.85	
	1.2	7.9554		1.2	10.48		1.2	13.739	
	1.79	3.92		1.79	4.84		1.79	5.94	
2500	0.7	91.3	2750	0.7	128.7	3000	0.8	108.6	
	1	29.3		1	38.82		1	50.9	
	1.2	17.85		1.2	22.962		1.2	29.3	
	1.79	7.243		1.79	8.78511		1.79	10.605	
3500	0.9	123.9	4000	0.9	205.5	5000	0.9	515.5	
	1	85.1		1	137.47		1	330	
	1.2	46.56		1.2	72		1.2	160.185	
	1.79	15.215		1.79	21.46		1.79	40.72	

Tabela III.3. Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($1.8 < I_D < 3$)

1.8 < $I_D < 3$									
G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	
250	1.81	1.15	500	1.81	3.09	750	1.81	5.17	
	2.2	0.44		2.2	2.435		2.2	3.902	
	2.8	0.134		2.8	1.823		2.8	2.79	
	2.99	0.097		2.99	1.683		2.99	2.547	
1000	1.81	8	1250	1.81	11.69	1500	1.81	16.37	
	2.2	5.85		2.2	8.34		2.2	11.419	
	2.8	4.035		2.8	5.594		2.8	7.505	
	2.99	3.651		2.99	5.03		2.99	6.7061	
1750	1.81	22.17	2000	1.81	29.23	2250	1.81	37.68	
	2.2	15.14		2.2	19.6		2.2	24.868	
	2.8	9.81		2.8	12.415		2.8	15.435	
	2.99	8.72		2.99	11.048		2.99	13.651	
2500	1.81	47.6521	2750	1.81	59.32	3000	1.81	72.815	
	2.2	31.02		2.2	38.15		2.2	46.3	
	2.8	18.911		2.8	22.8829		2.8	27.4	
	2.99	16.65		2.99	20.06		2.99	23.91	
4000	1.81	148.35							
	2.2	91.05							
	2.8	51.46							
	2.99	44.35							

Tabela III.4. Parovi tačaka $I_D - K_D$ za određene vrednosti odnosa G_0/σ_v' ($I_D > 3$)

ID>3									
G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	G_0/σ_v'	I_D	K_D	
250	4.739177	0.01	500	9.478355	0.01	750	14.21753	0.01	
				4.747164	0.3		7.120746	0.3	
	3.416665	0.05		4.123204	0.6		6.184806	0.6	
				3.71649	1		5.574735	1	
	3.005149	0.094		3.413657	1.5		5.120486	1.5	
				3.161213	1.6		3.734552	2	
1000	18.95671	0.01	1250	23.69589	0.01	1500	28.43506	0.01	
	9.494328	0.3		11.86791	0.3		14.24149	0.3	
	8.246408	0.6		10.30801	0.6		12.36961	0.6	
	7.43298	1		9.291225	1		11.14947	1	
	6.827315	1.5		8.534143	1.5		10.24097	1.5	
	4.979403	2		6.224253	2		5.212398	3	
	3.001152	3.63		3.003888	4.99		3.018778	6.6	
1750	33.17424	0.01	2000	37.91342	0.01	2500	47.39177	0.01	
	16.61507	0.3		18.98866	0.3		23.73582	0.3	
	14.43121	0.6		16.49282	0.6		20.61602	0.6	
	13.00771	1		14.32503	1.2		18.58245	1	
	11.9478	1.5		13.65463	1.5		17.06829	1.5	
	6.081131	3		9.958805	2		6.992346	4	
				3.164987	10		4.195468	9	
	3.141438	8		3.011729	10.9		3.342227	13.5	
3000	56.87013	0.01	4000	75.82684	0.01	5000	94.78355	0.01	
	28.48298	0.3		37.97731	0.3		47.47164	0.3	
	24.73922	0.6		32.98563	0.6		41.23204	0.6	
	22.29894	1		29.73192	1		37.1649	1	
	20.48194	1.5		27.30926	1.5		34.13657	1.5	
	7.199794	5		9.599725	5		11.99966	5	
	3.789891	15		5.053189	15		6.316486	15	
	3.002463	23.7		3.031227	43		3.06706	70	
7000	132.697	0.01							
	66.46029	0.3							
	57.72486	0.6							
	52.03086	1							
	47.7912	1.5							
	16.79952	5							
	8.84308	15							
	3.004004	170							

DODATAK IV

IV.1. UVOD

U ovom dodatku prikazani su rezultati izvedenih DMT i SDMT opita na teritoriji Republike Srbije u periodu 2011.-2016. godine. Sva ispitivanja izvedena su opremom Instituta za ispitivanje materijala Srbije.

IV.2. PRIKAZ REZULTATA DMT/SDMT OPITA

Rezultati su prikazani u vidu dijagrama za svaku lokaciju posebno. Dijagrami se sastoje od sledećih prelaznih i interpretiranih parametara:

I_D – Indeks materijala (poglavlje 4.3.1., strana 55),

K_D – Indeks horizontalnog napona (poglavlje 4.3.3., strana 61)

U_D – Indeks pornog pritiska (poglavlje 4.3.4., strana 62)

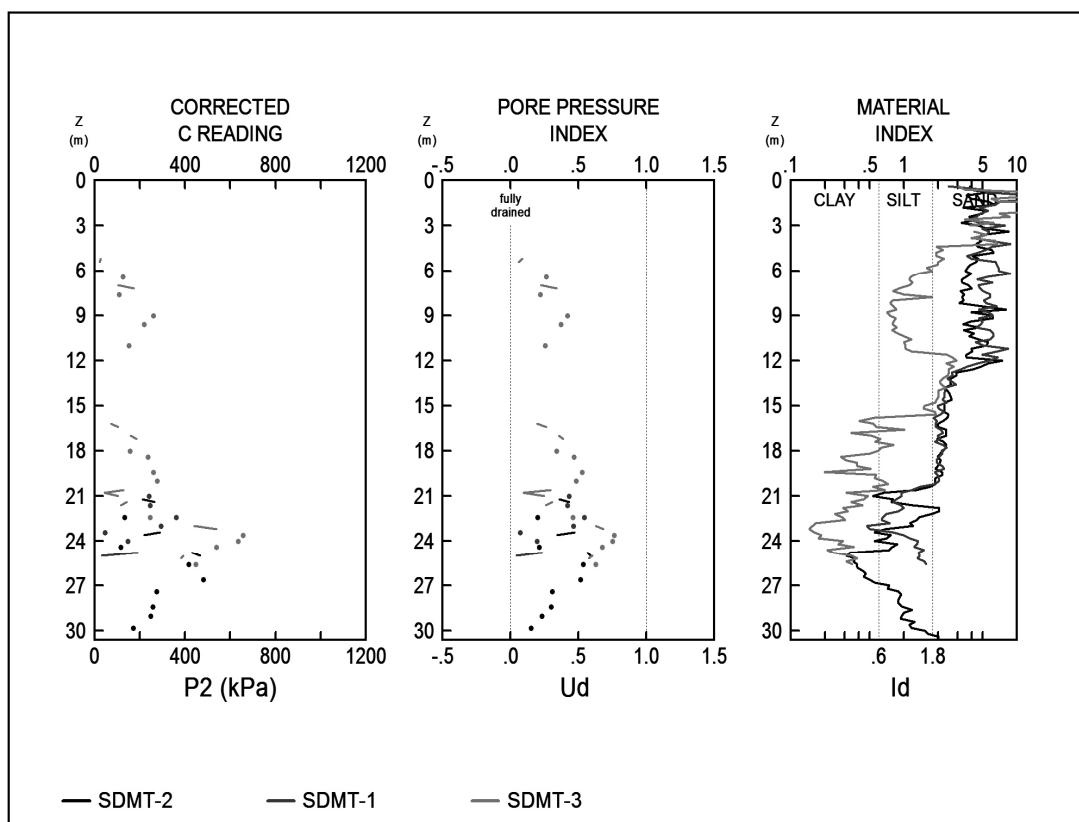
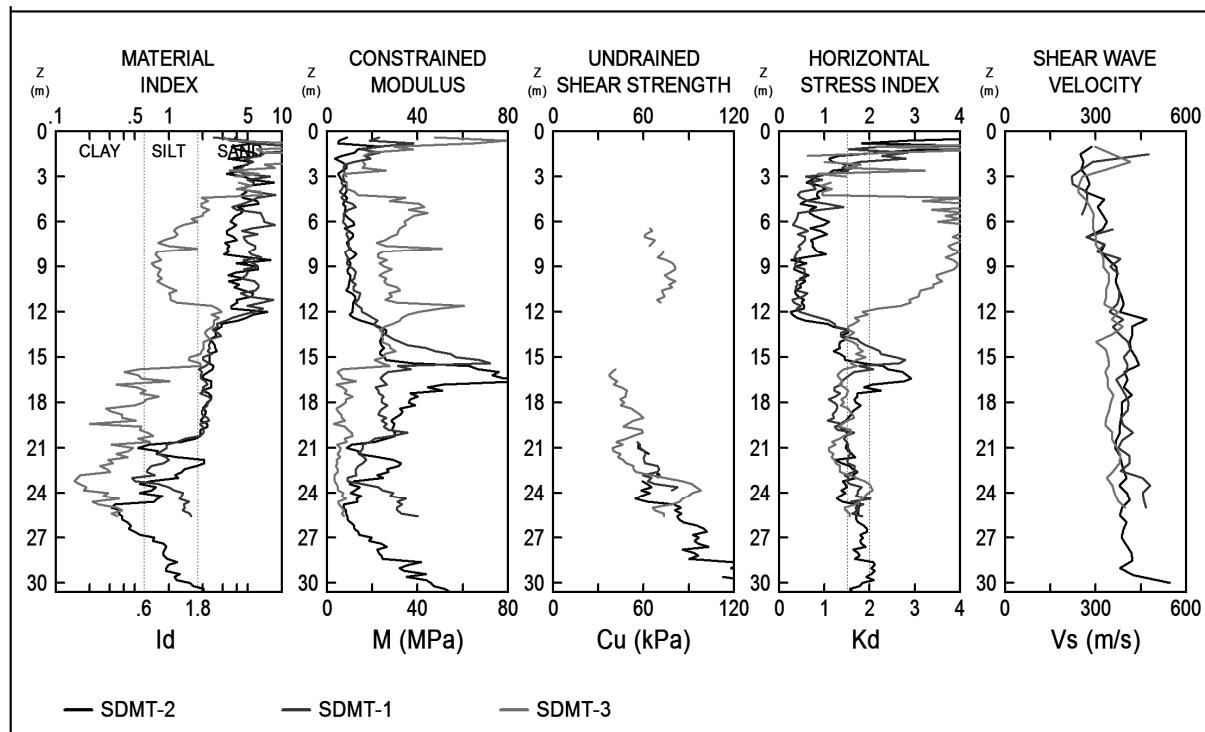
M_{DMT} – Modul stišljivosti (poglavlje 5.9.3., strana 141)

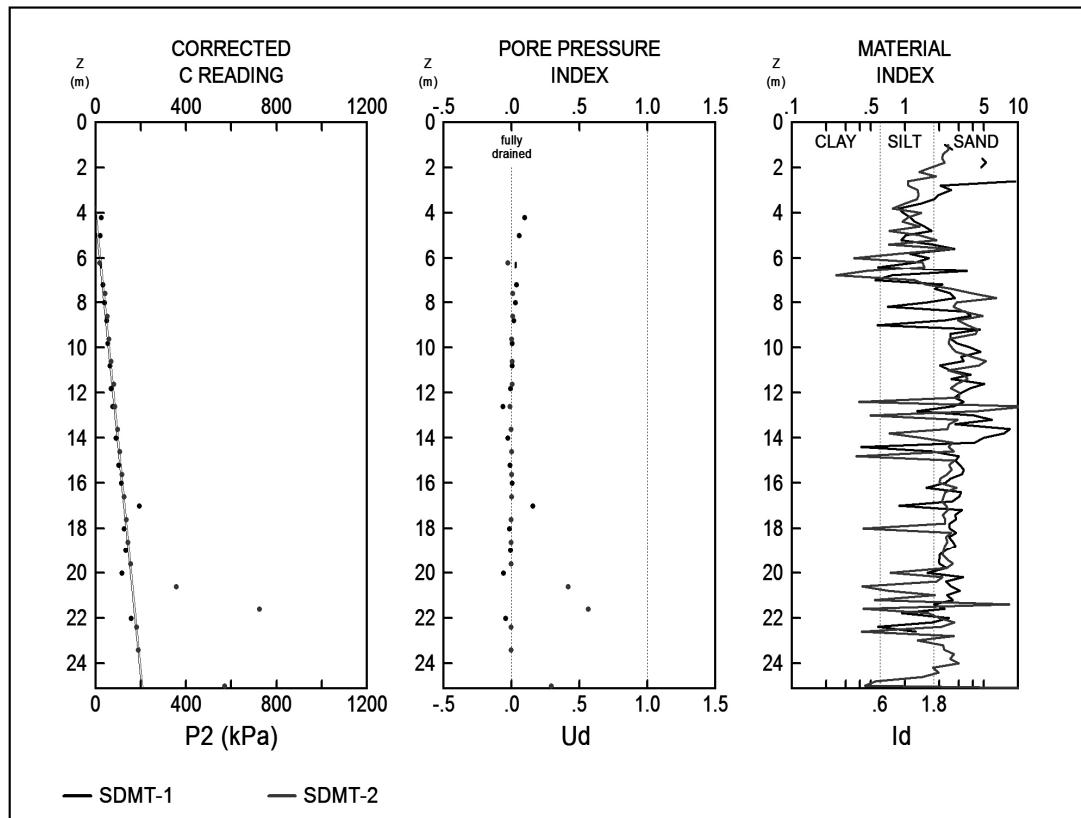
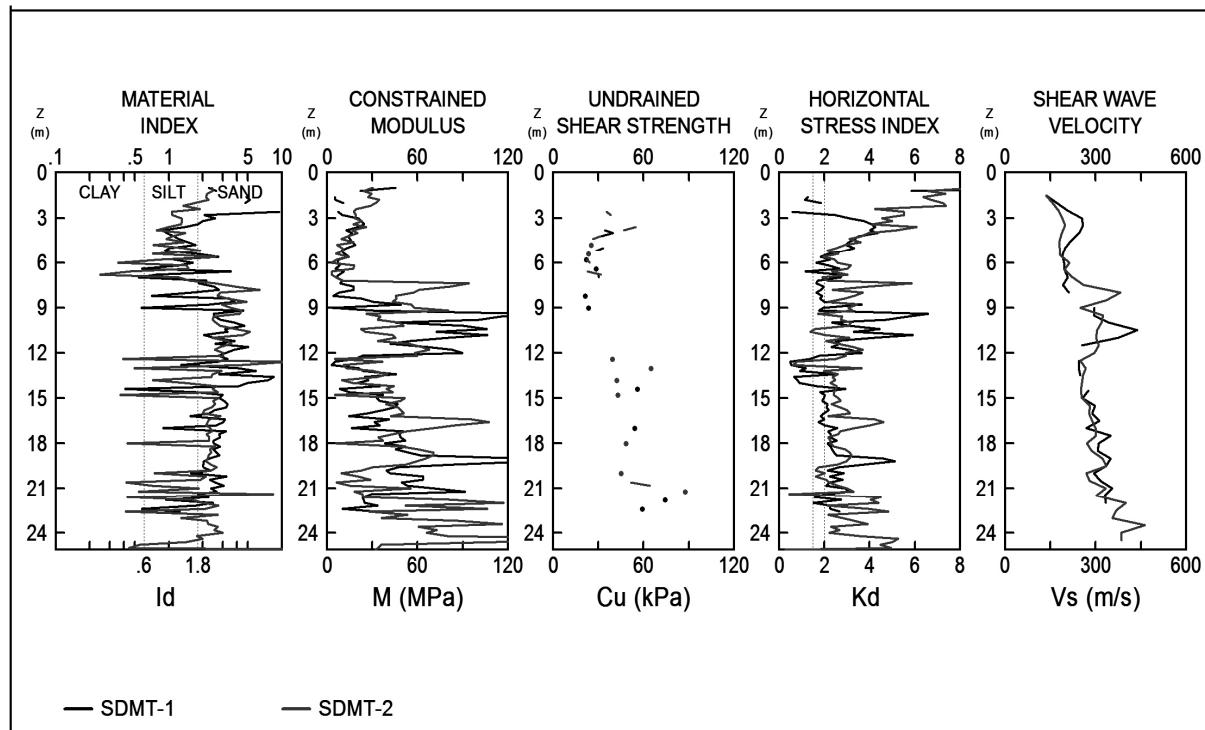
s_u (c_u) – nedrenirana smičuća čvrstoća (poglavlje 5.7.2., strana 122)

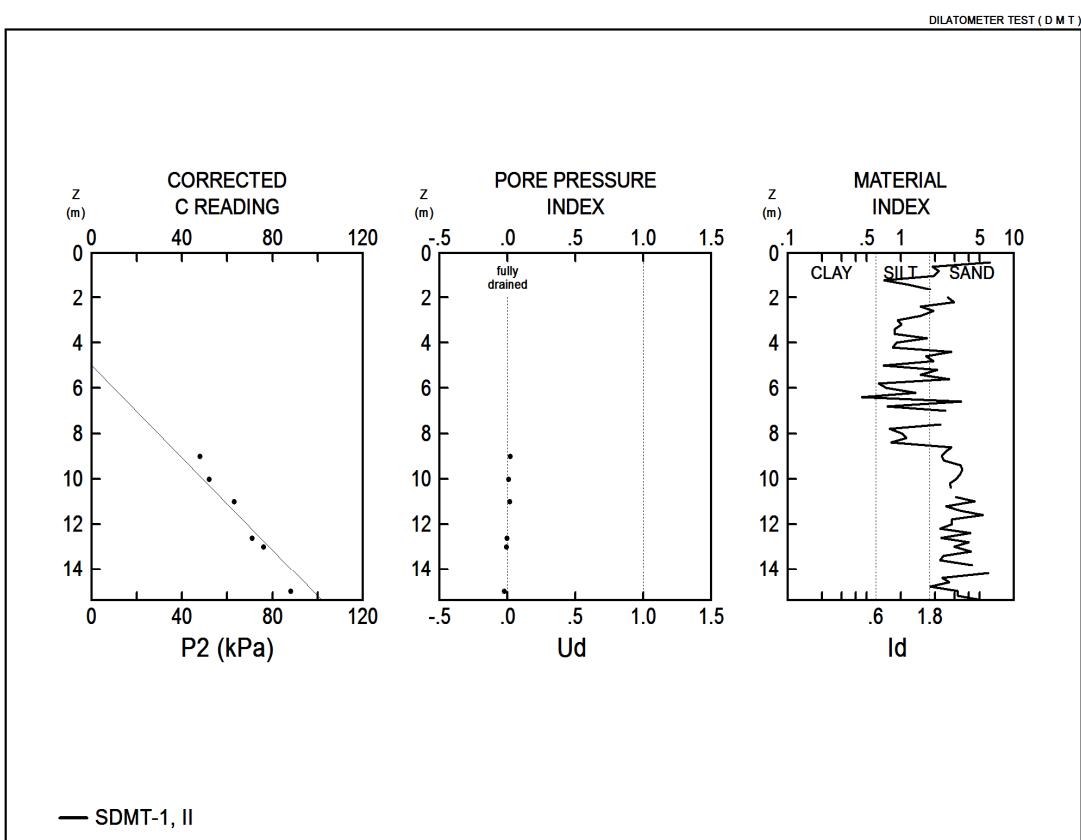
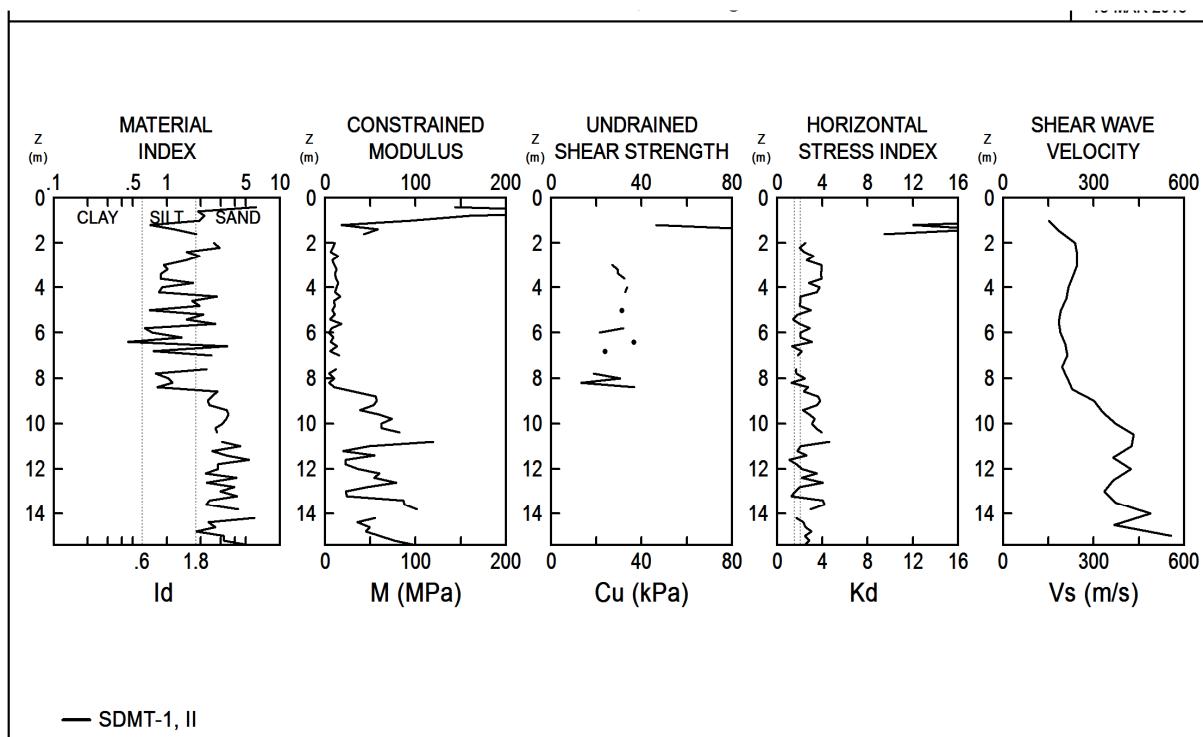
φ' – ugao smičuće čvrstoće peska (poglavlje 4.3.1., strana 55)

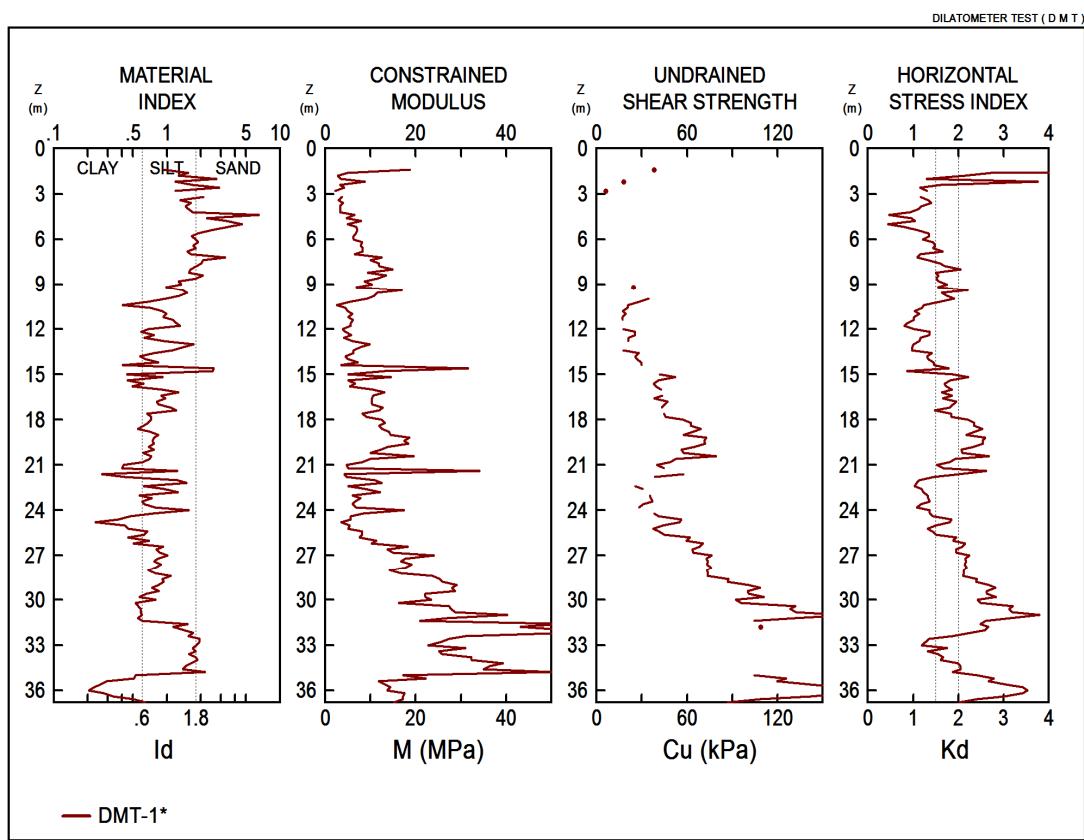
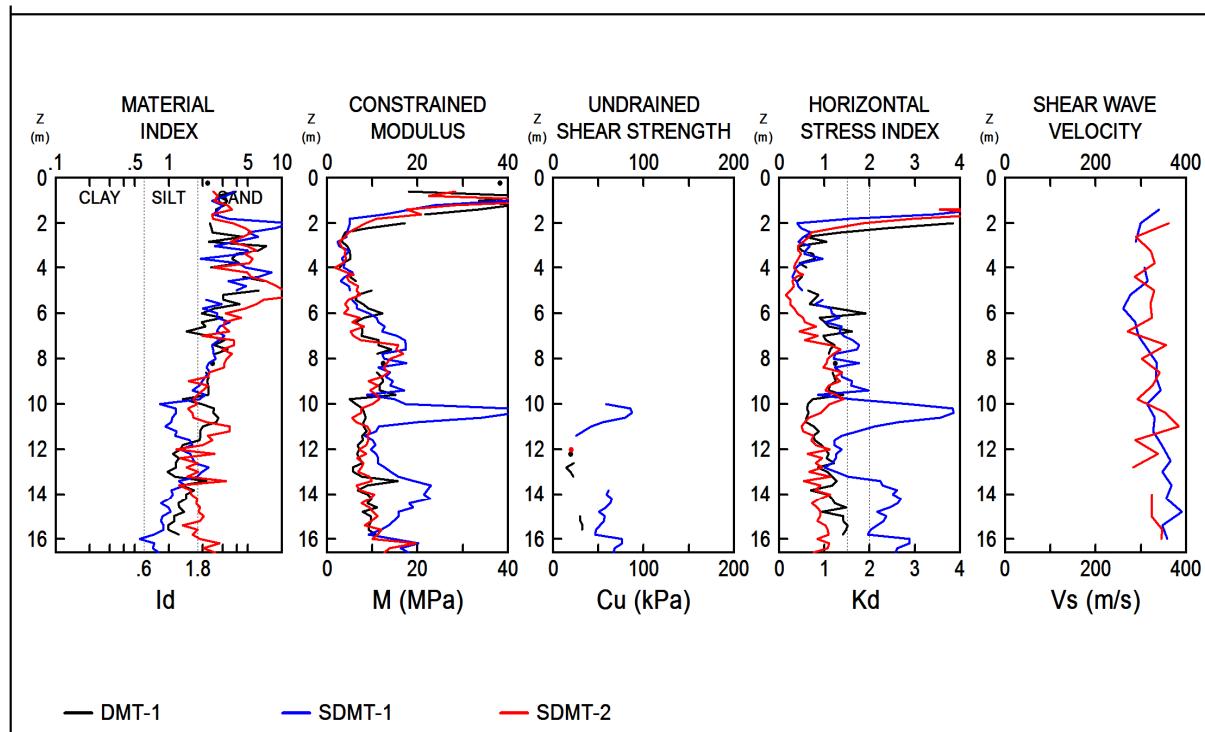
V_s – brzuna smičućih talasa (poglavlje 5.7.1., strana 112)

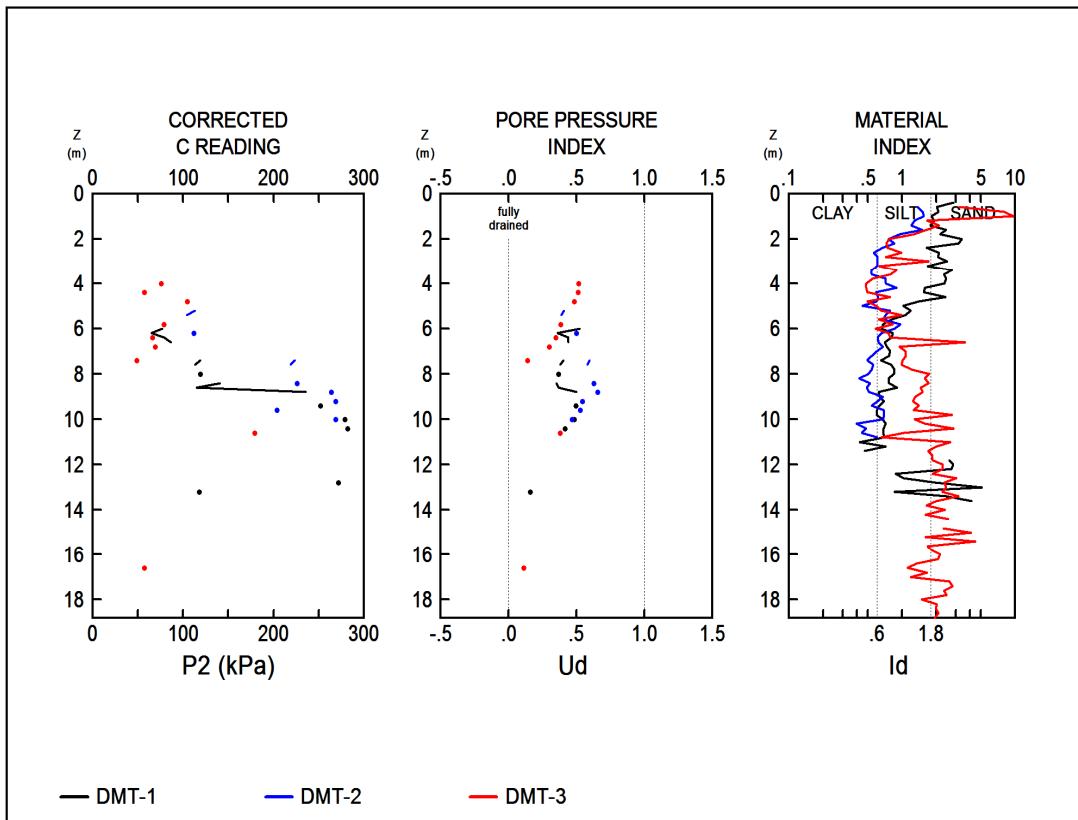
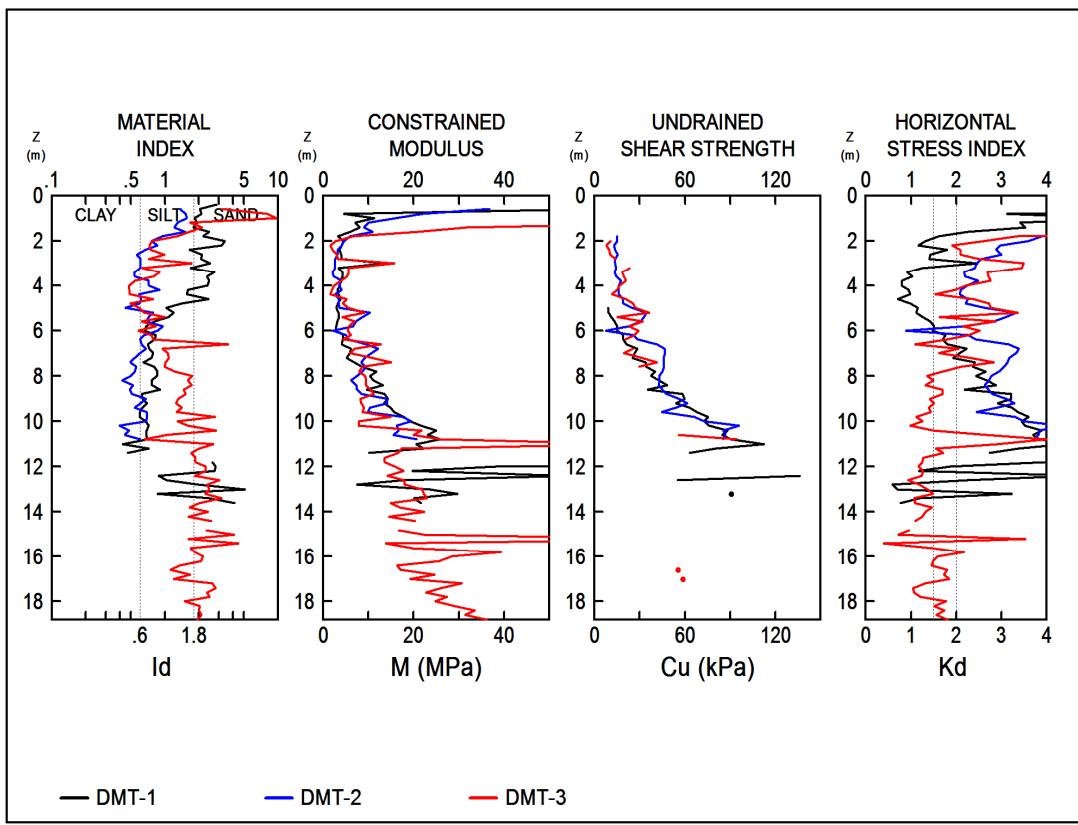
Indeks pornog pritiska U_D prikazan je na lokacijama na kojima je meren pritisak **p₂** (pritisak **C**). Na dijagramima je prikazan samo jedan parametar čvrstoće (s_u ili φ') u zavisnosti da li je na lokaciji dominantno prisustvo finozrnog ($I_D < 1.2$) ili grubozrnog materijala ($I_D > 1.2$).

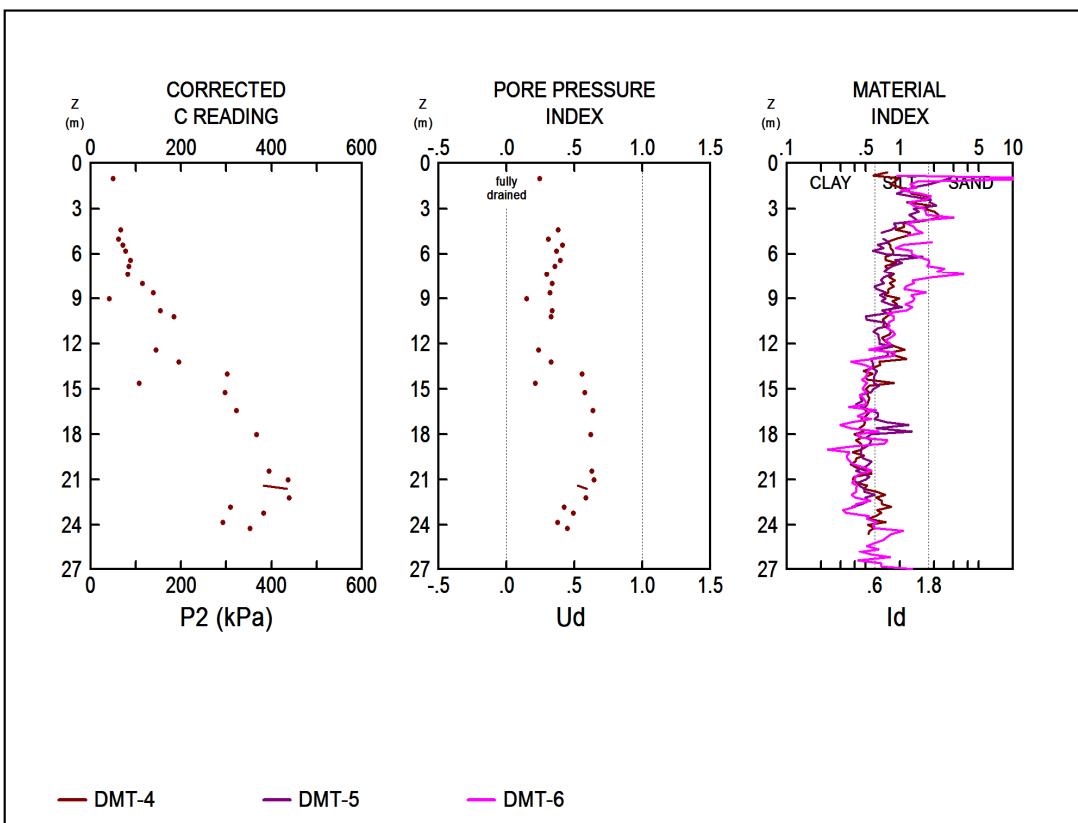
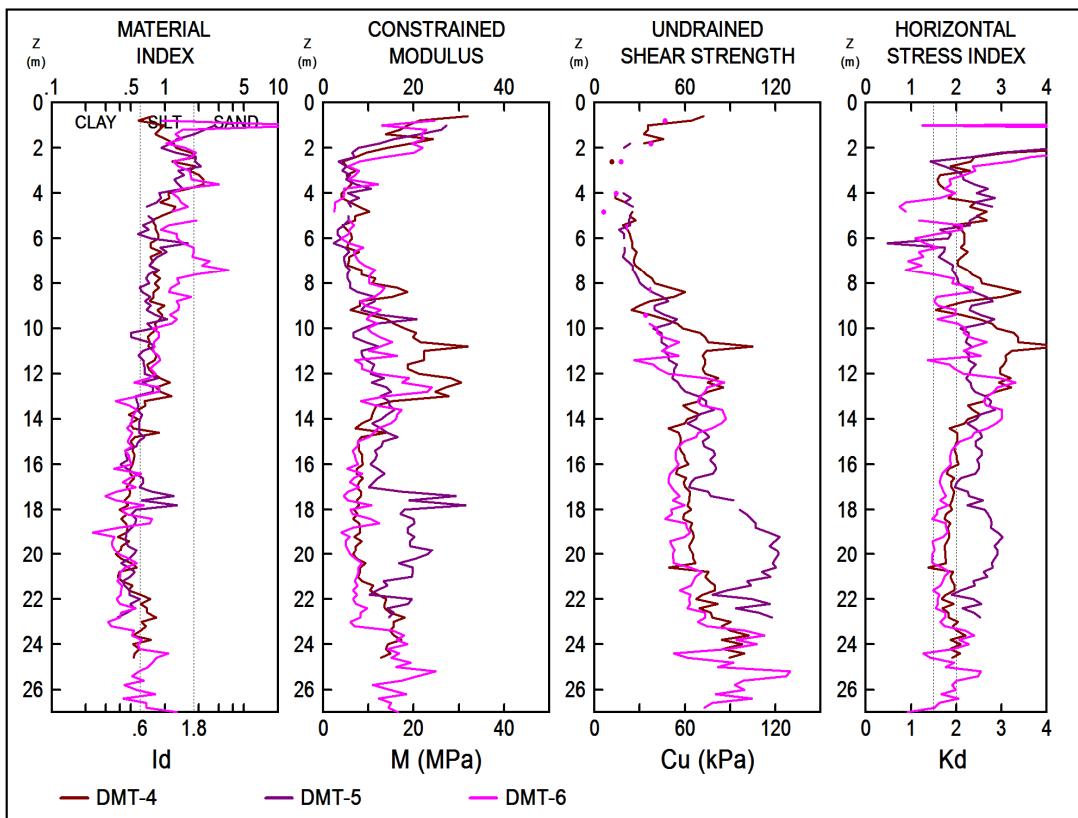


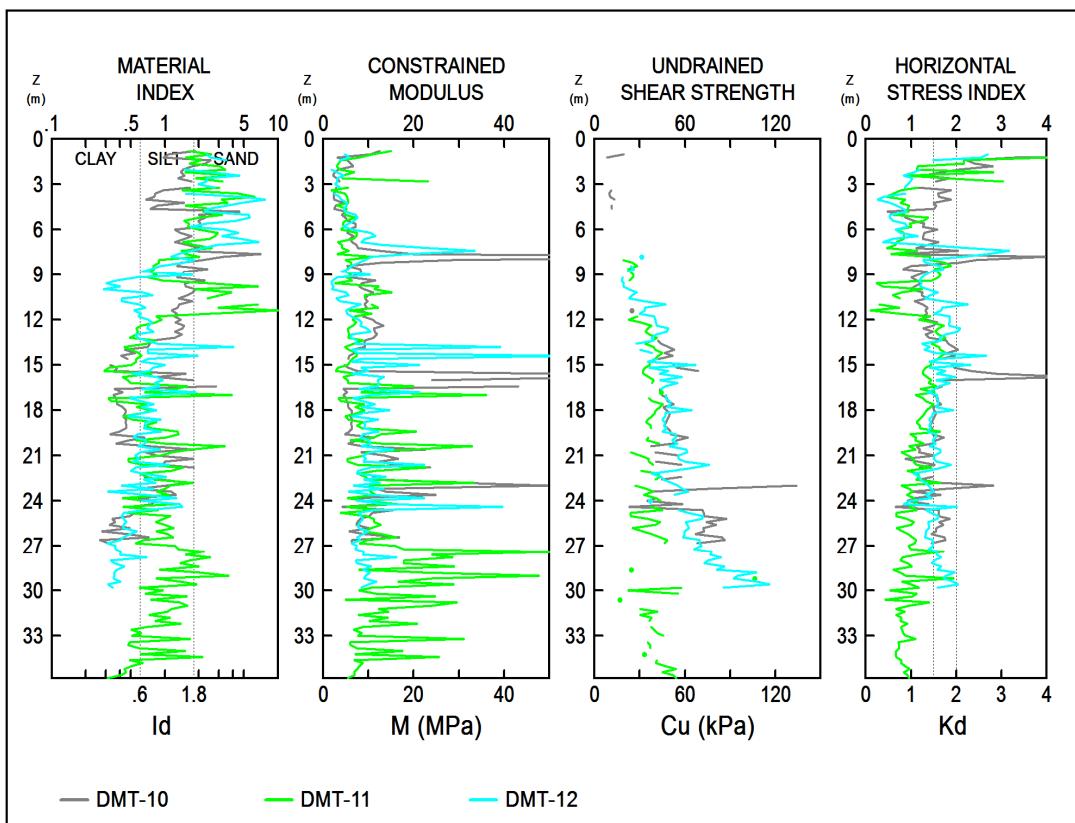
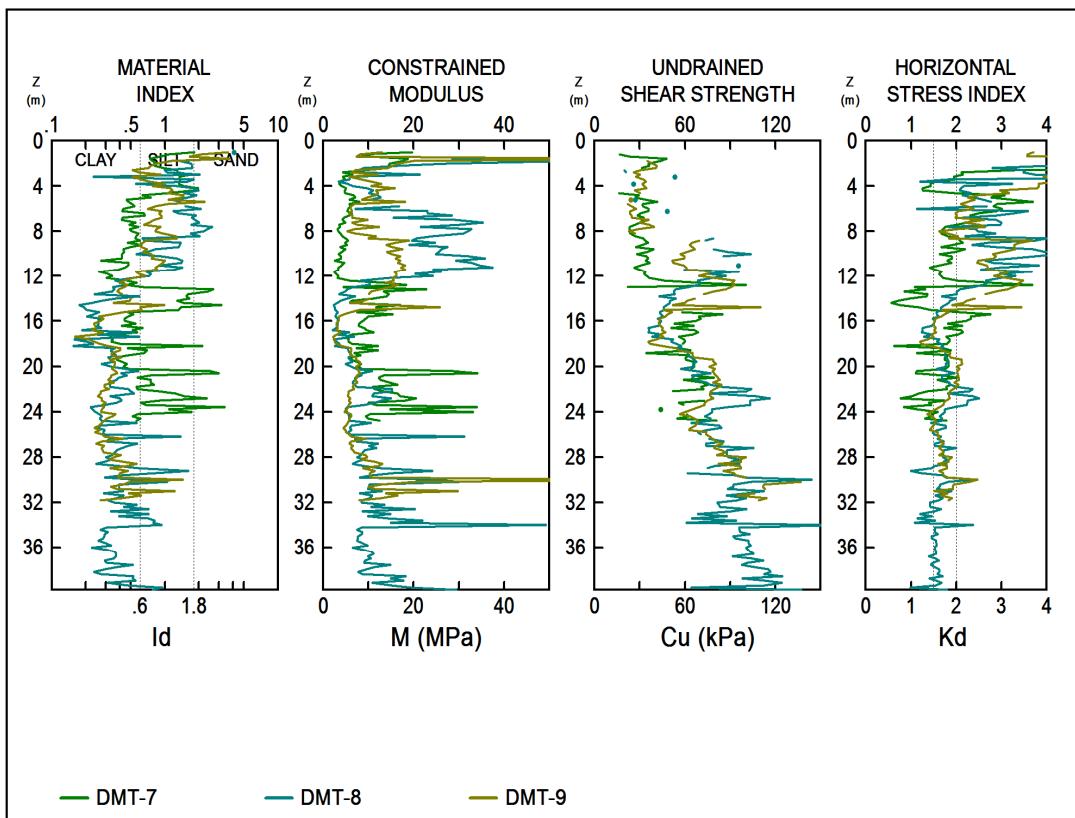


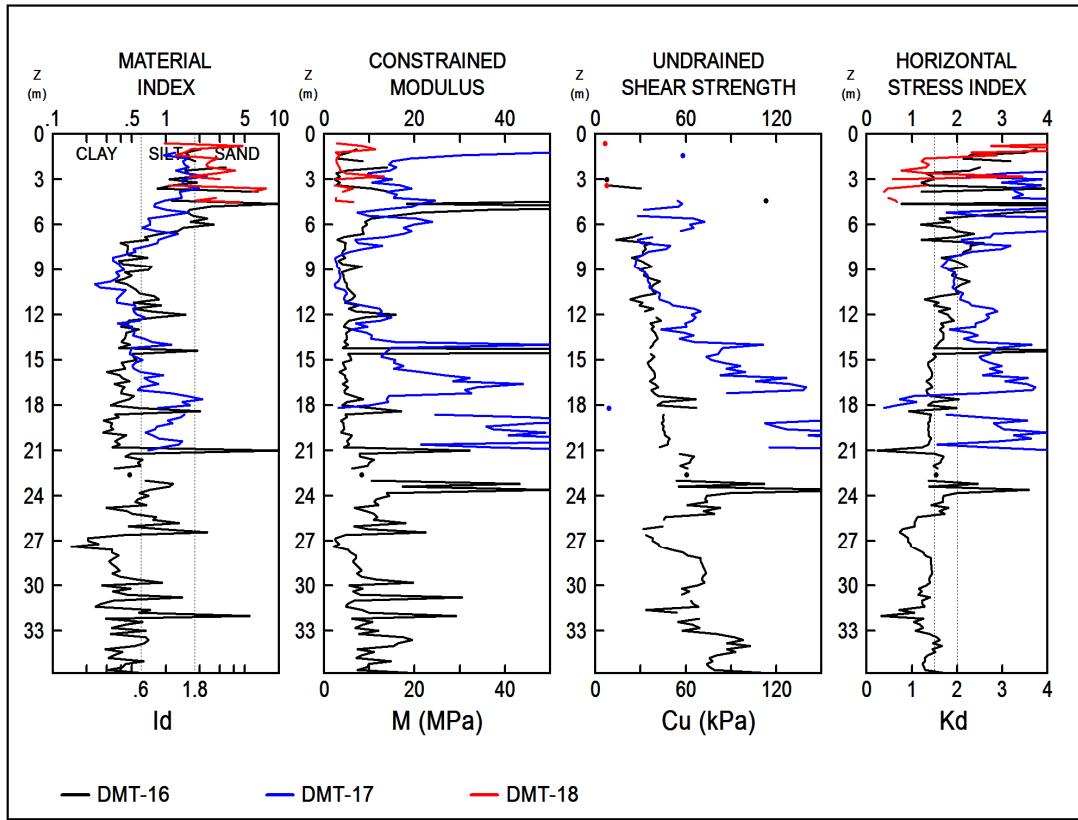
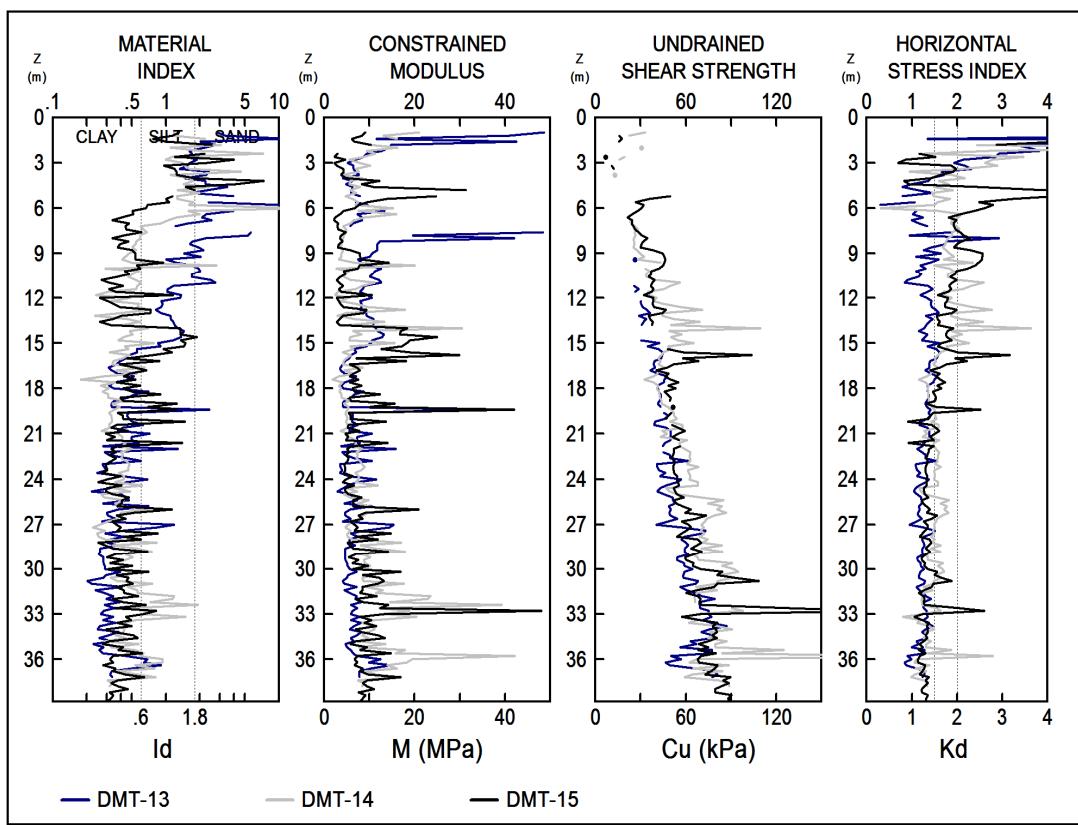


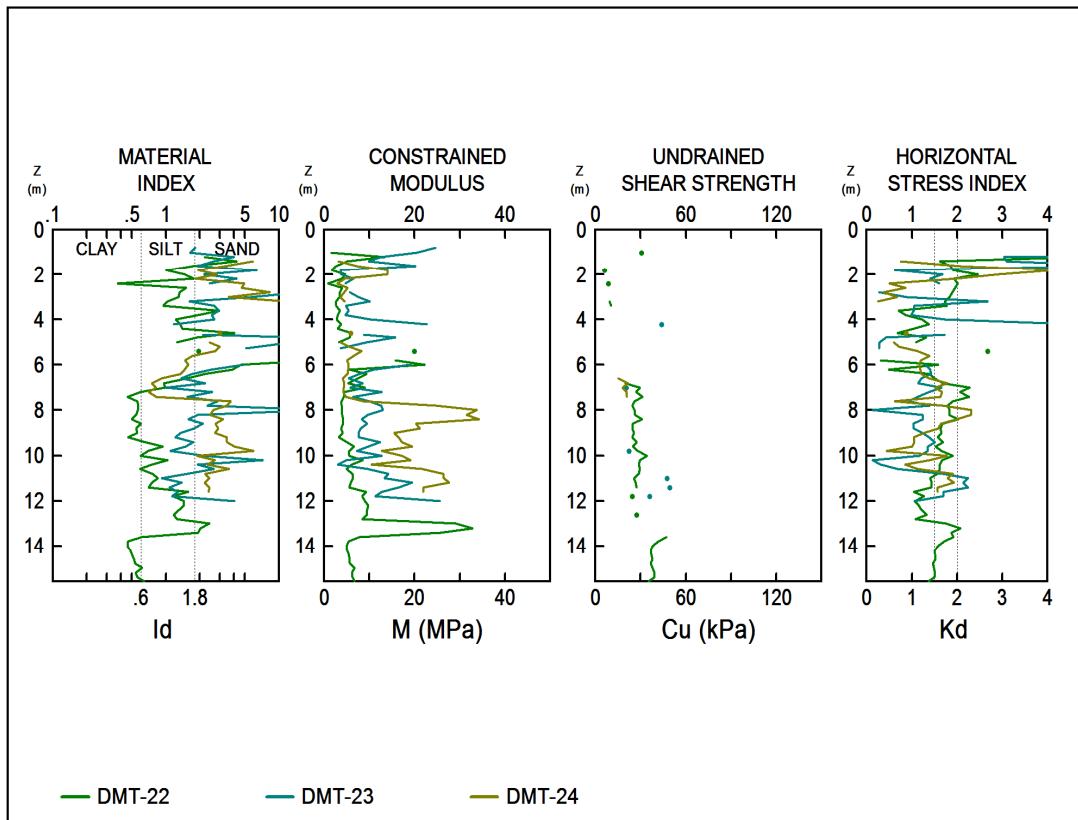
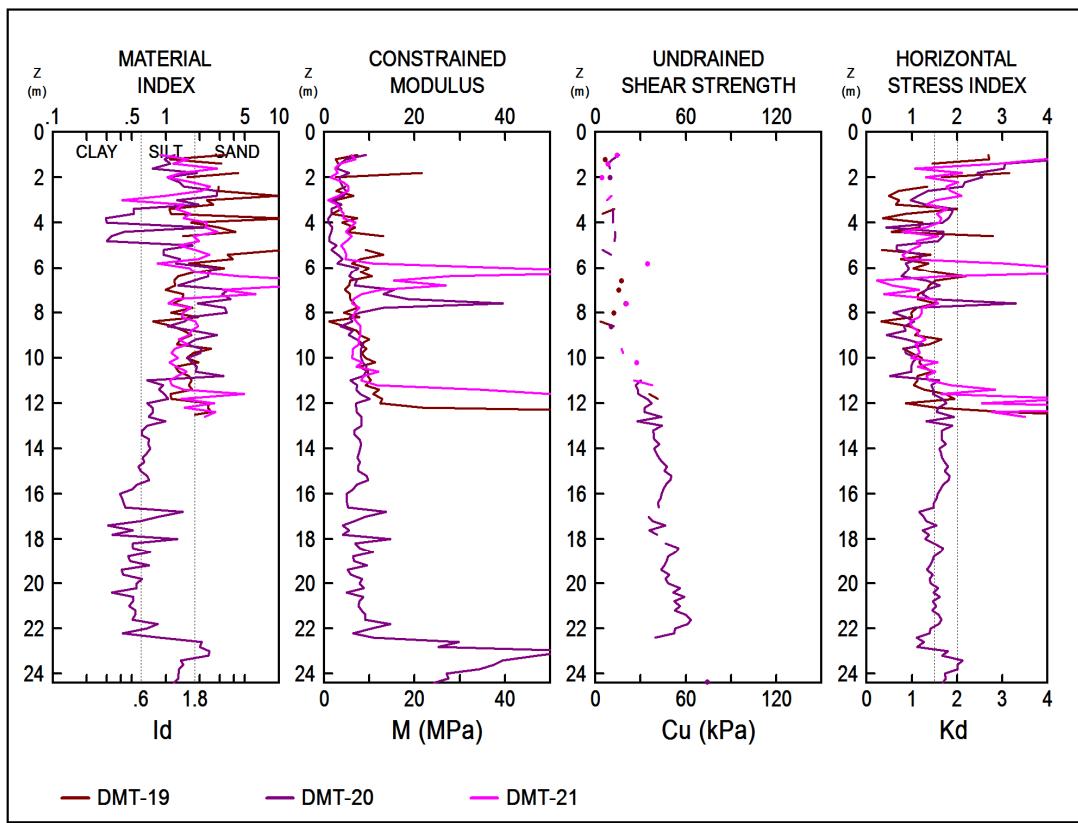


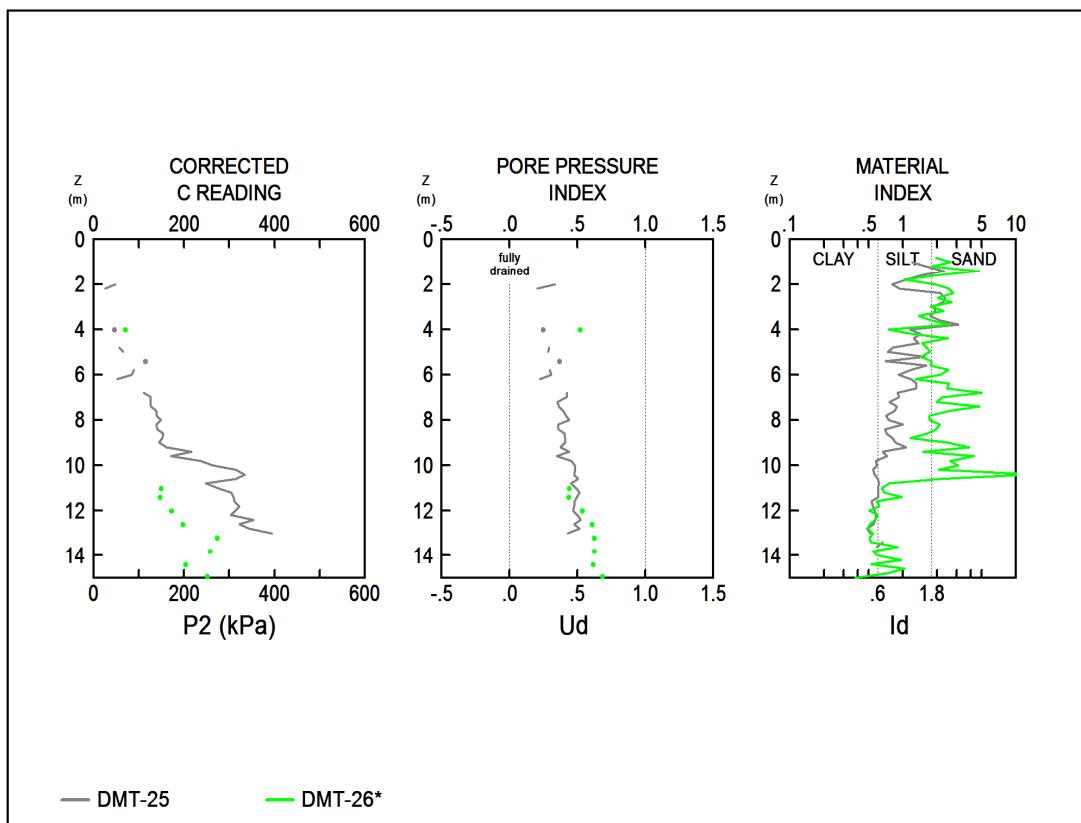
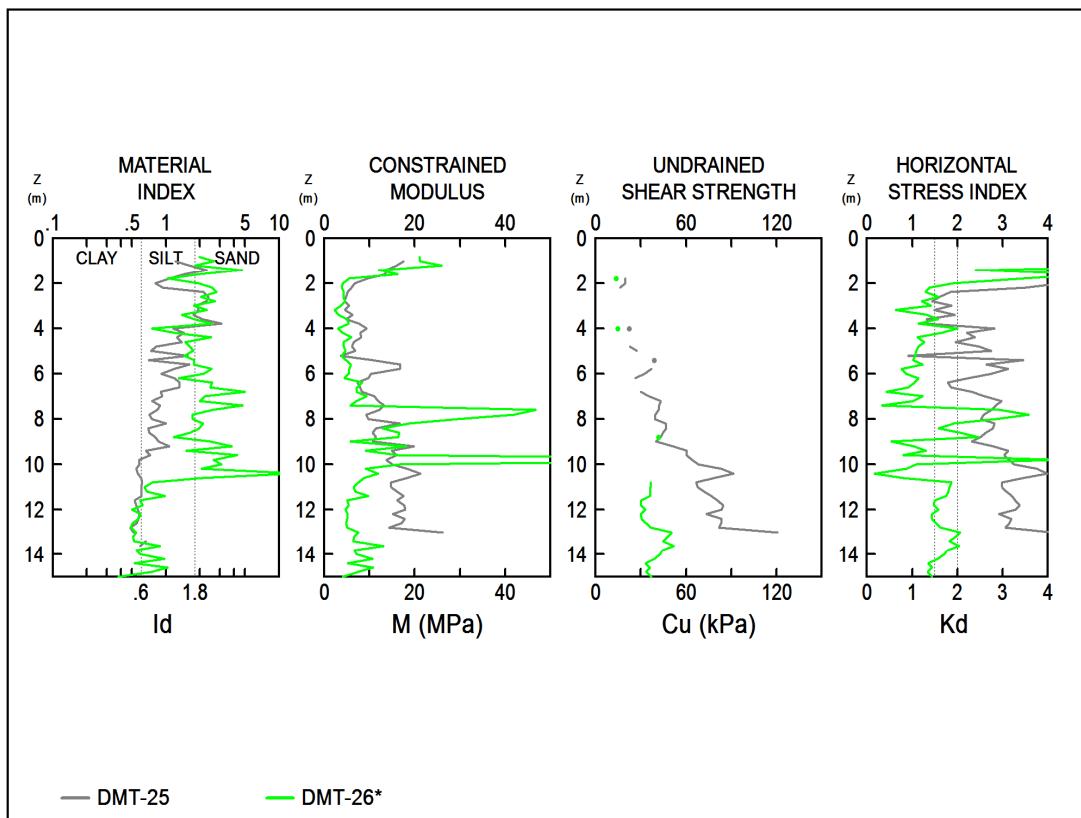


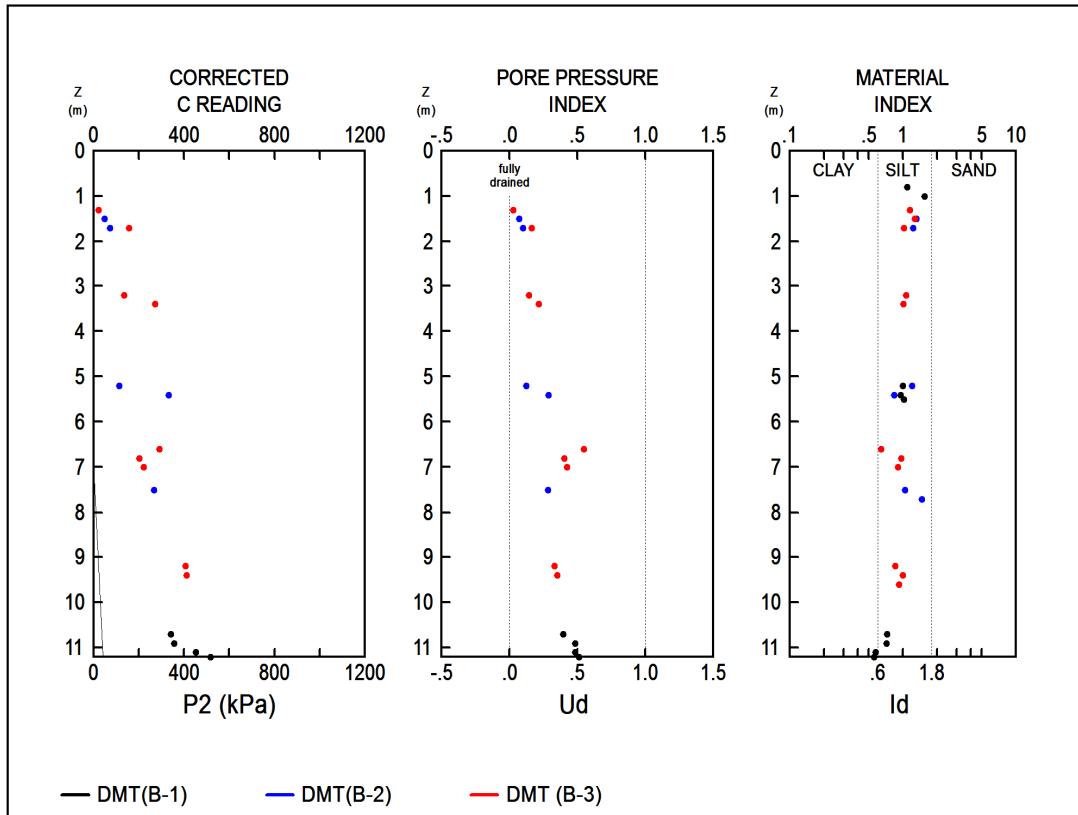
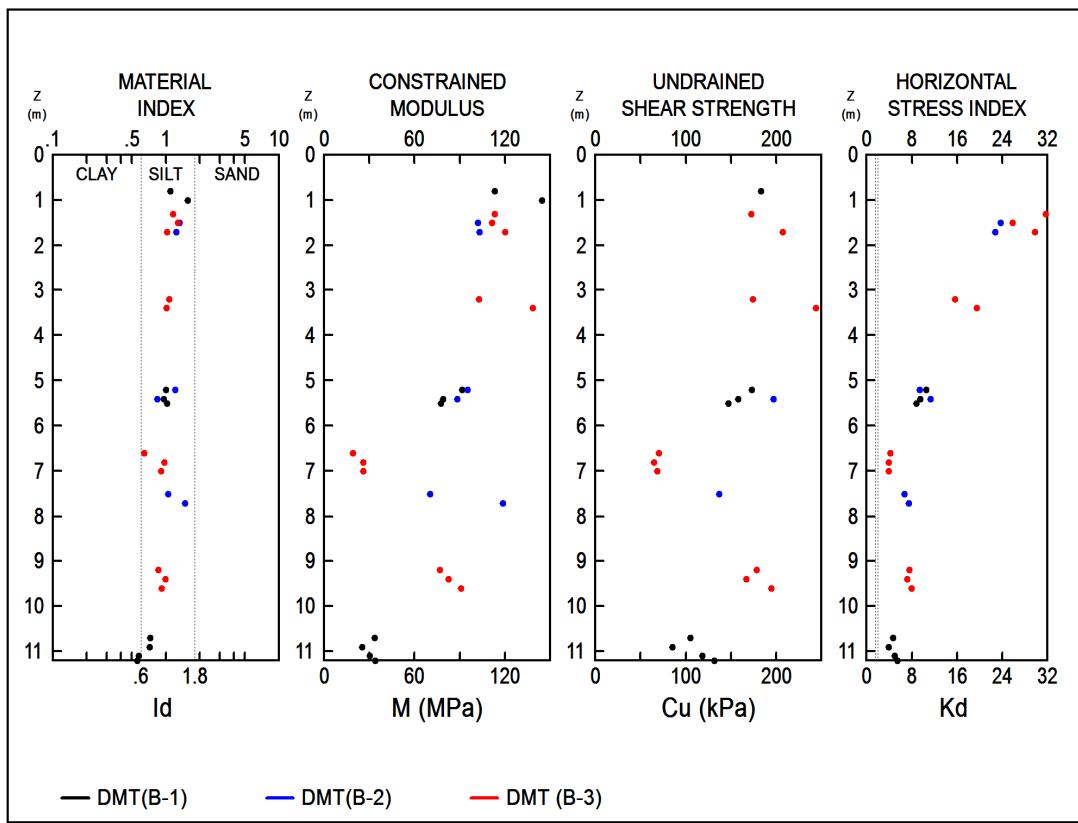


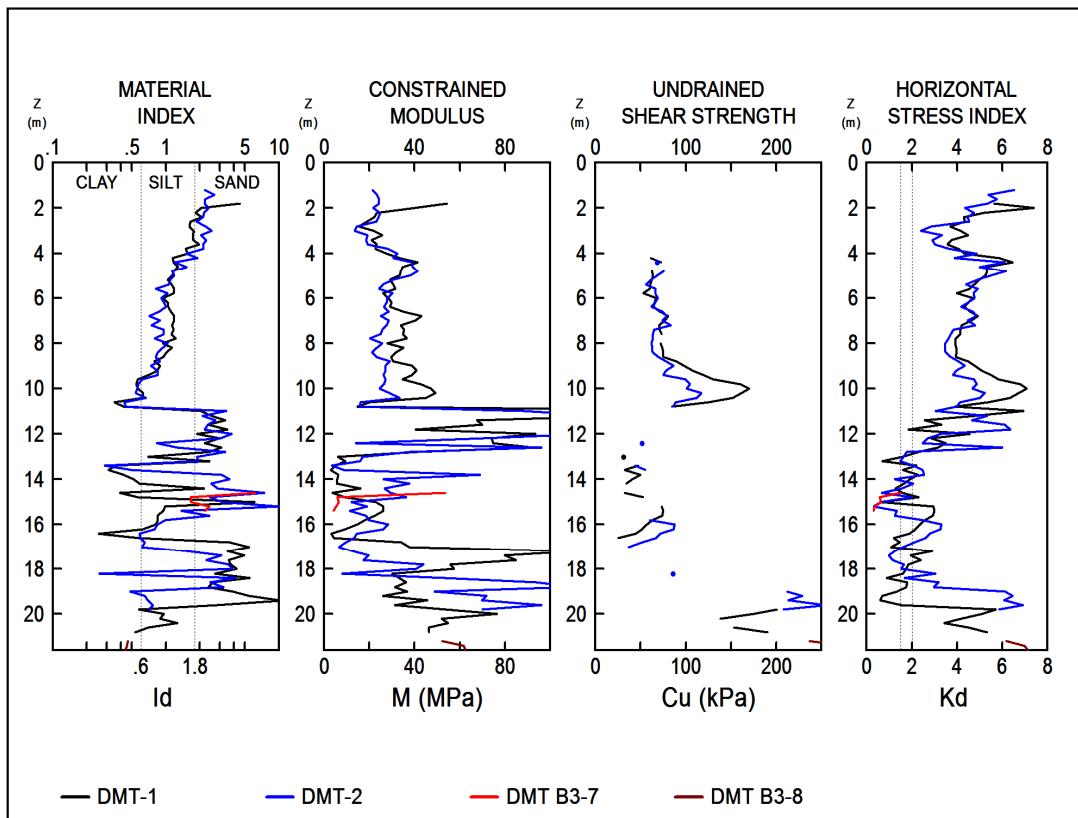


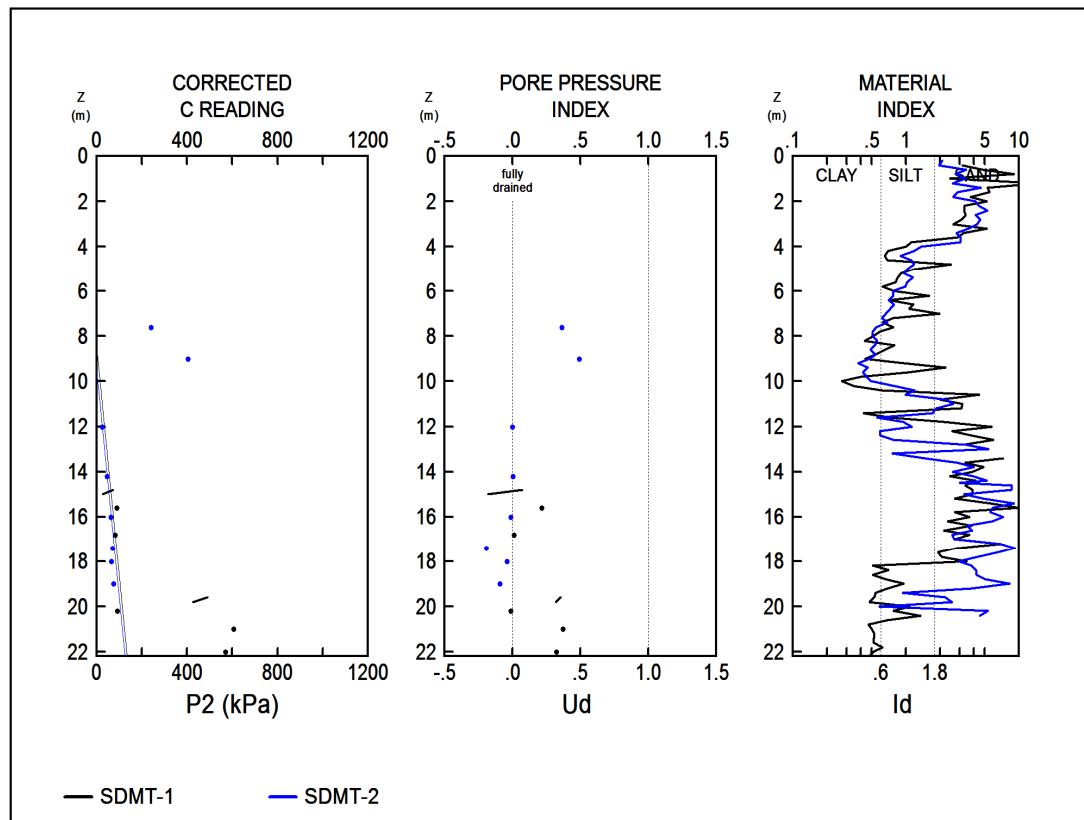
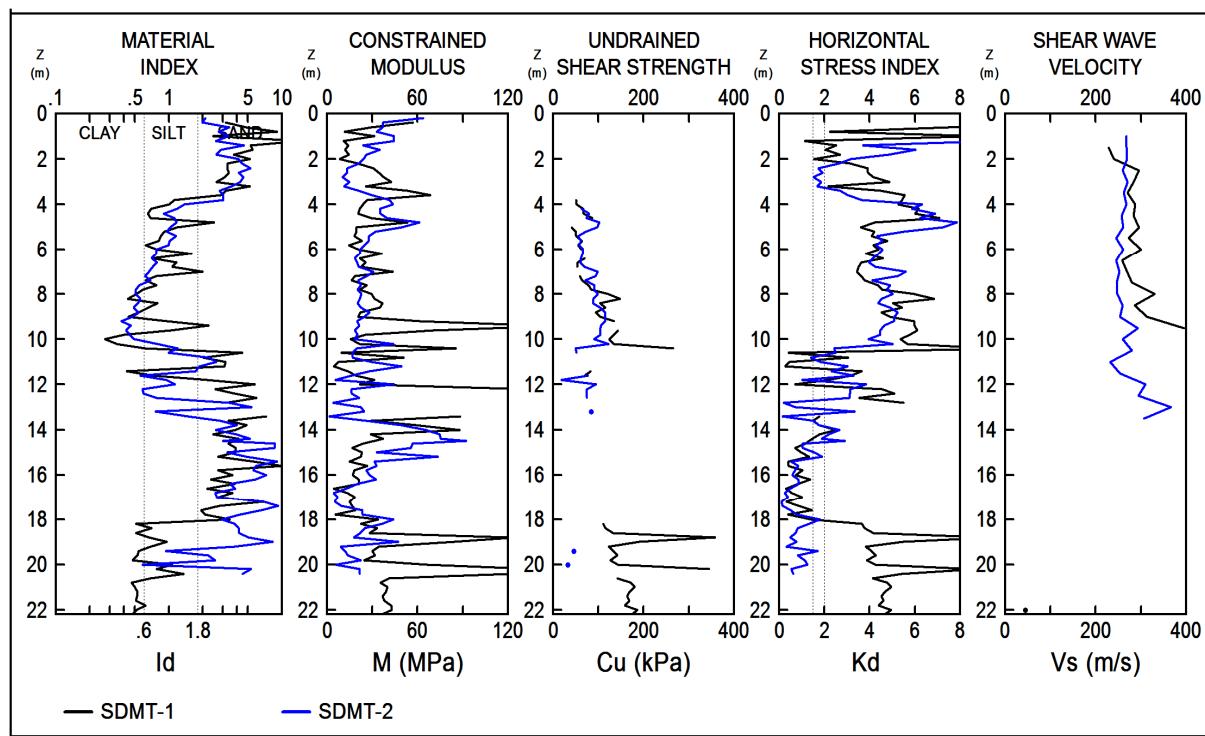


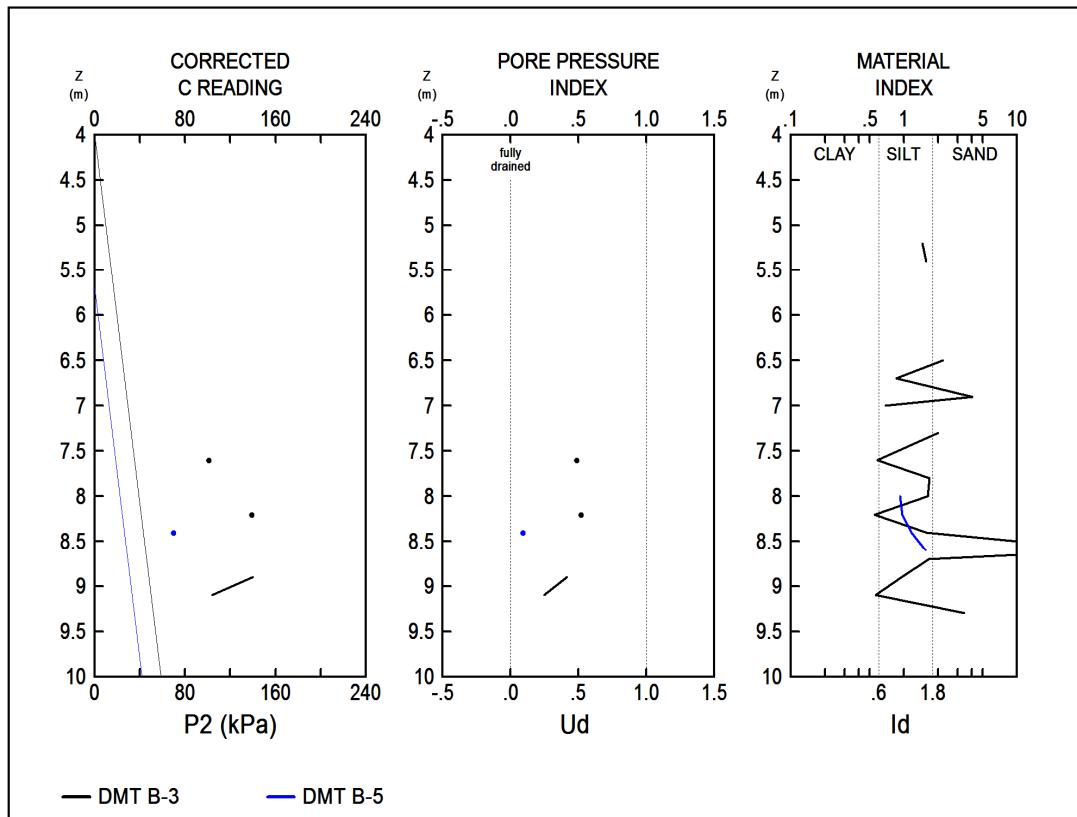
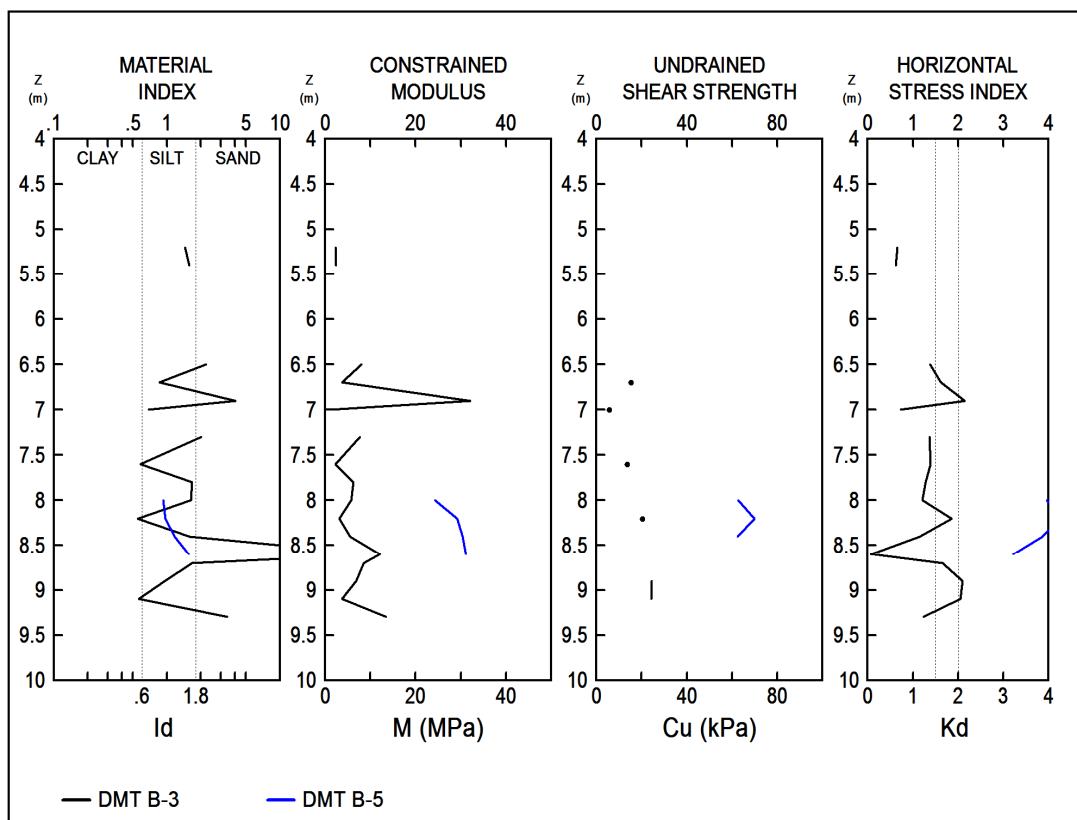


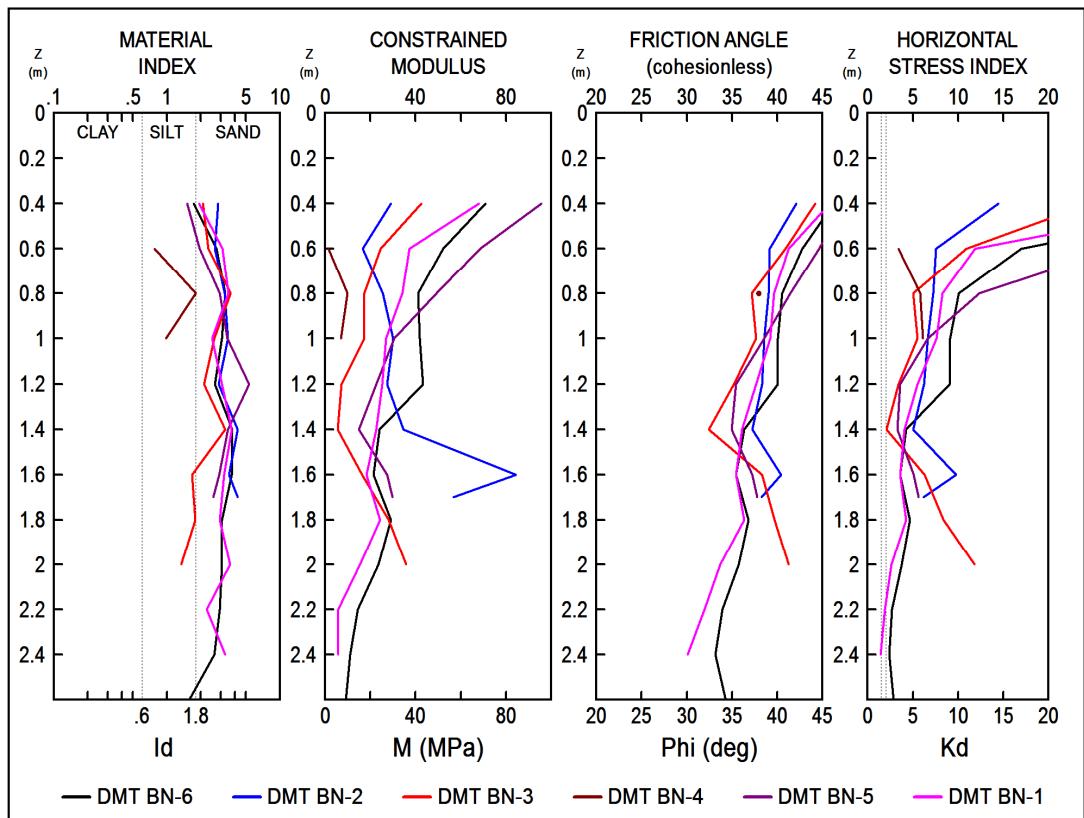


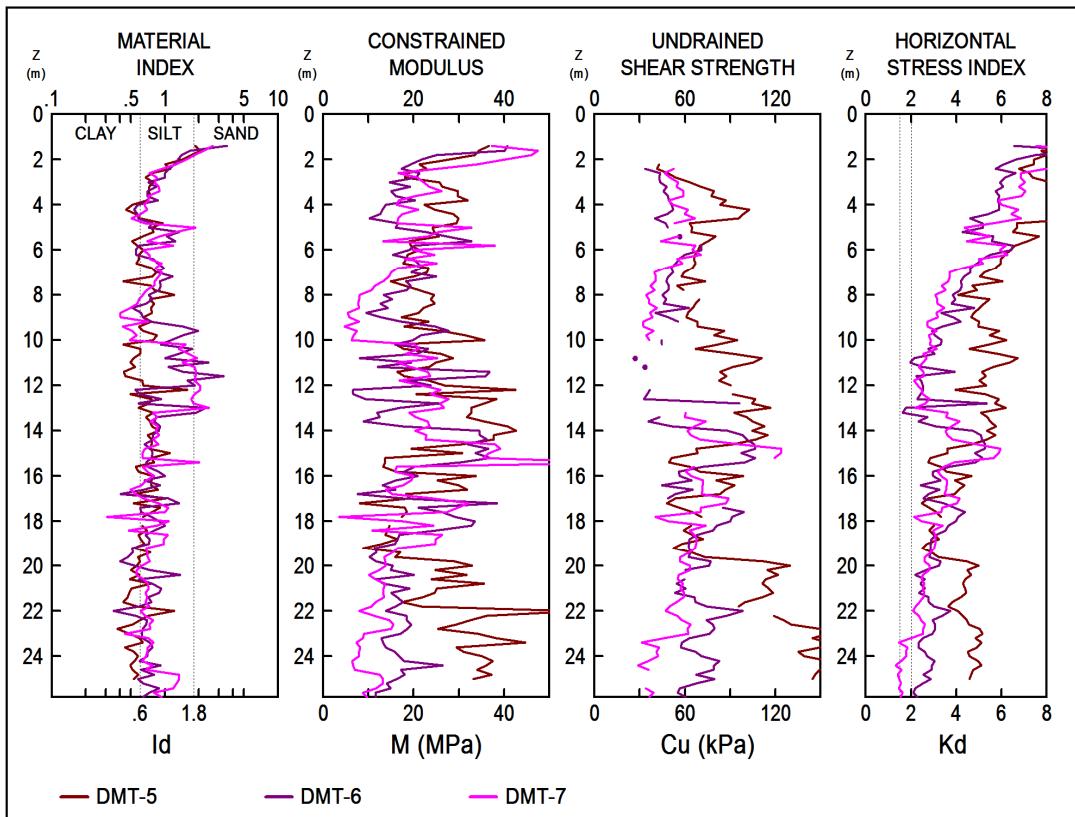
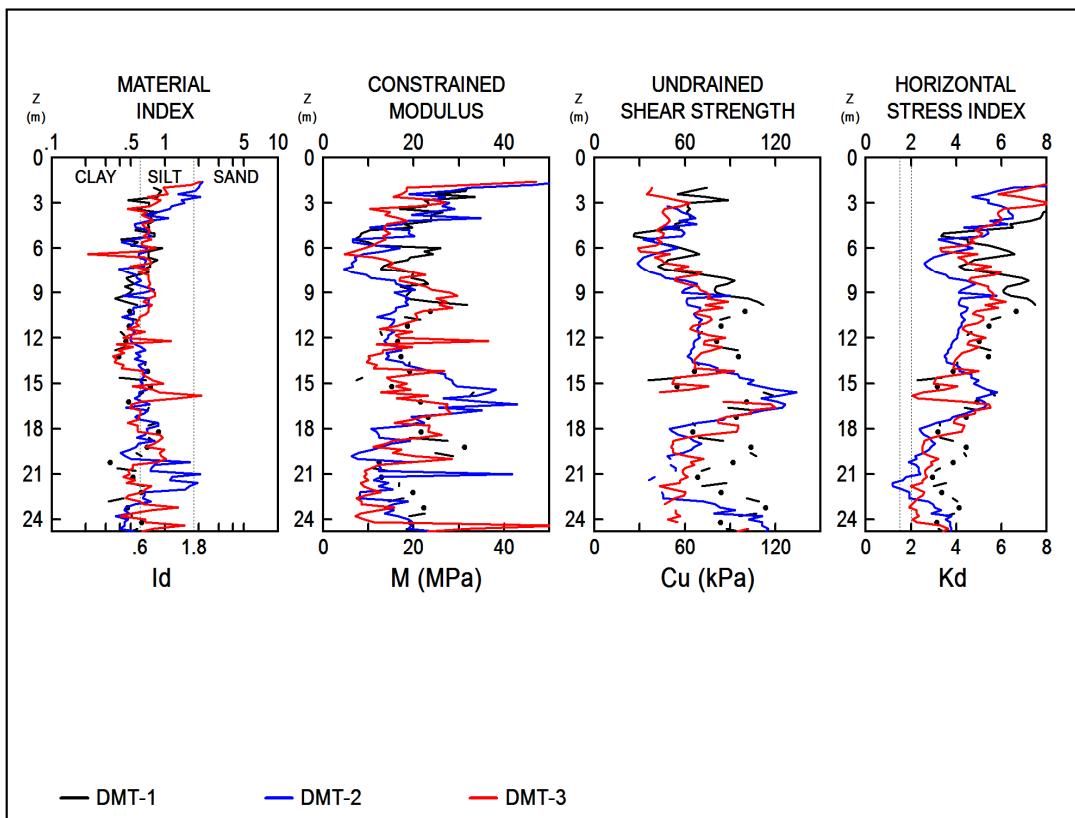


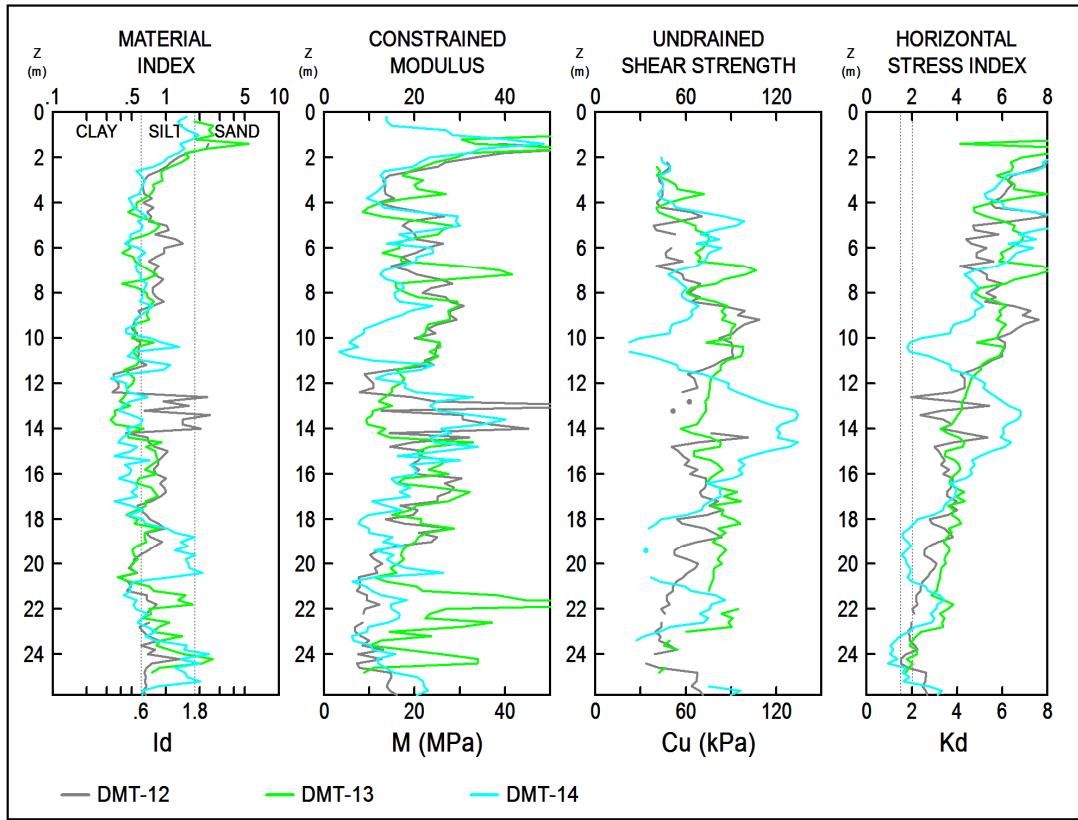
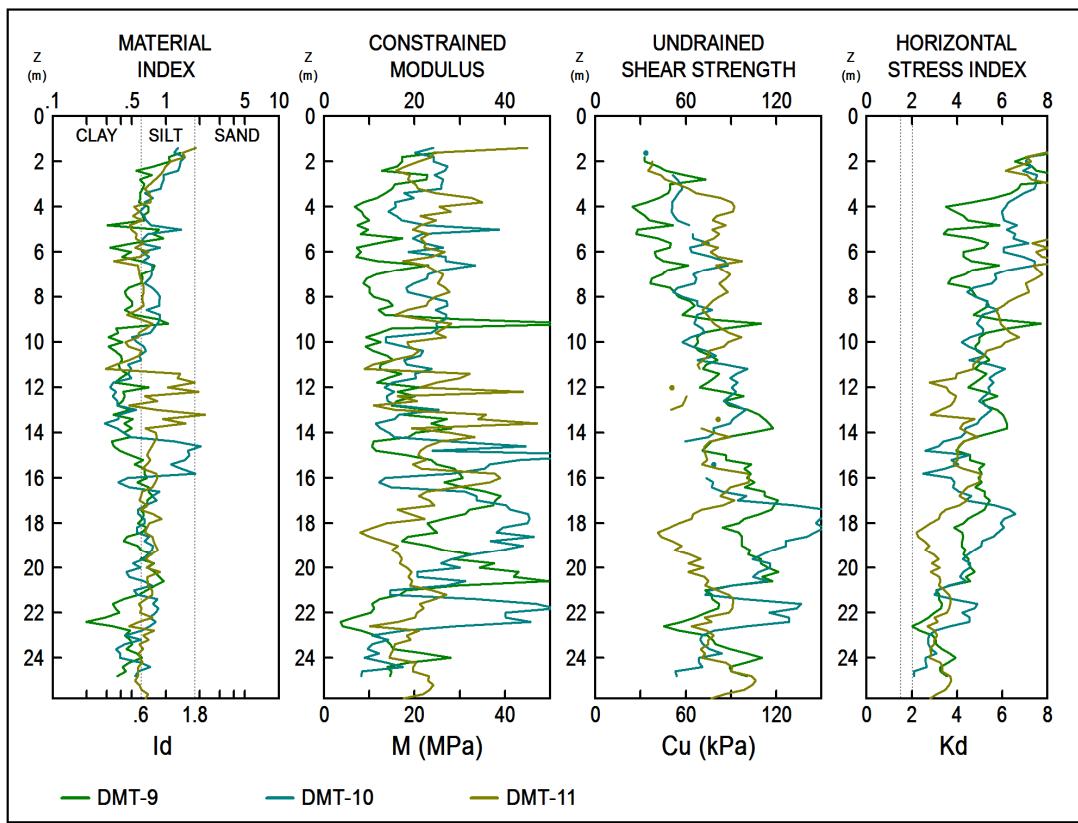


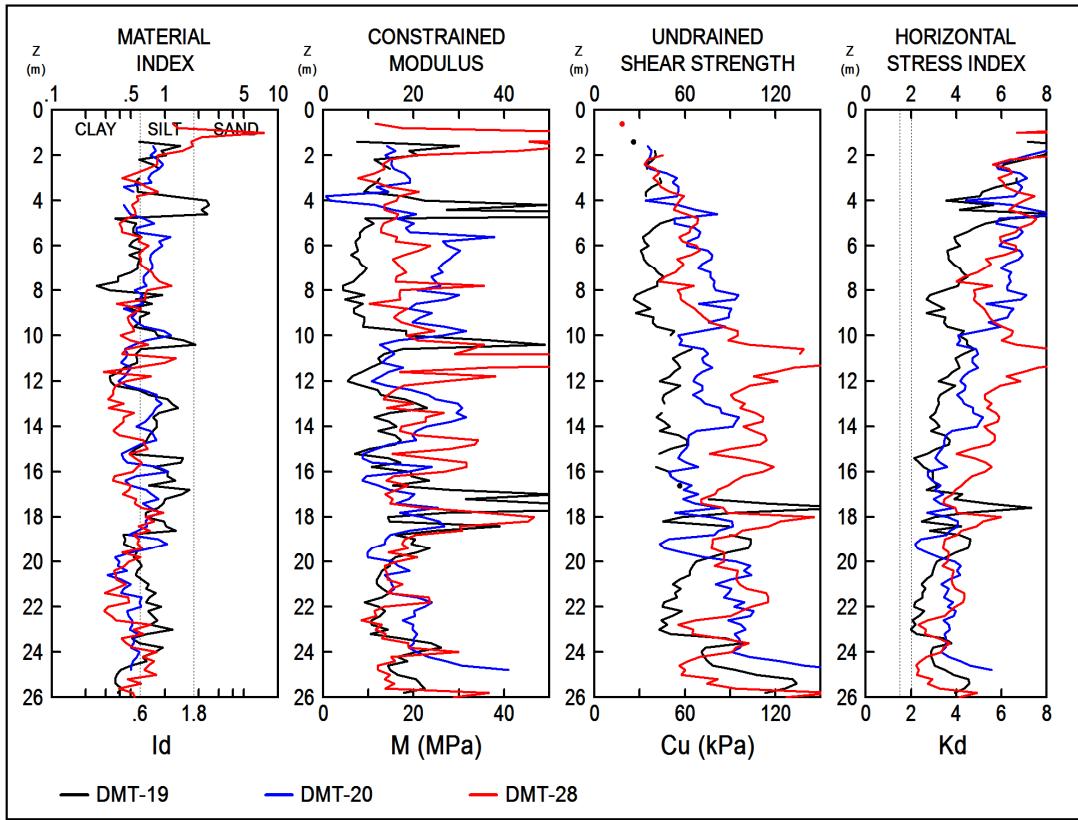
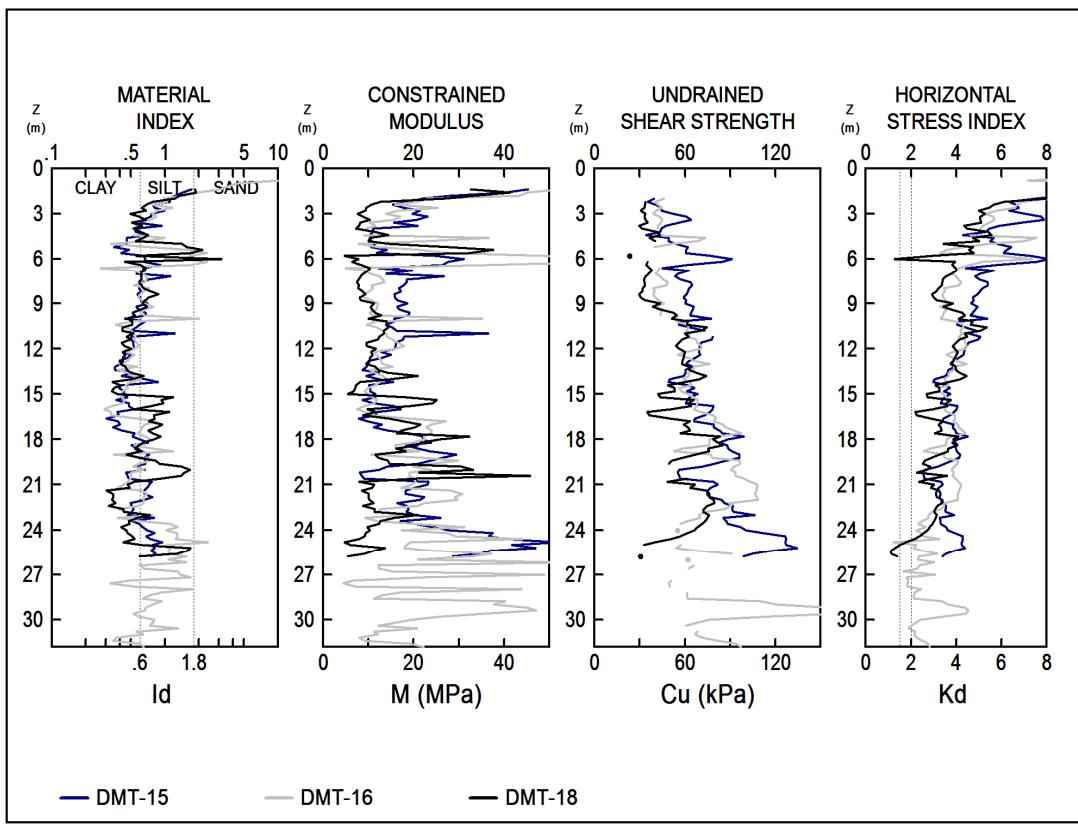


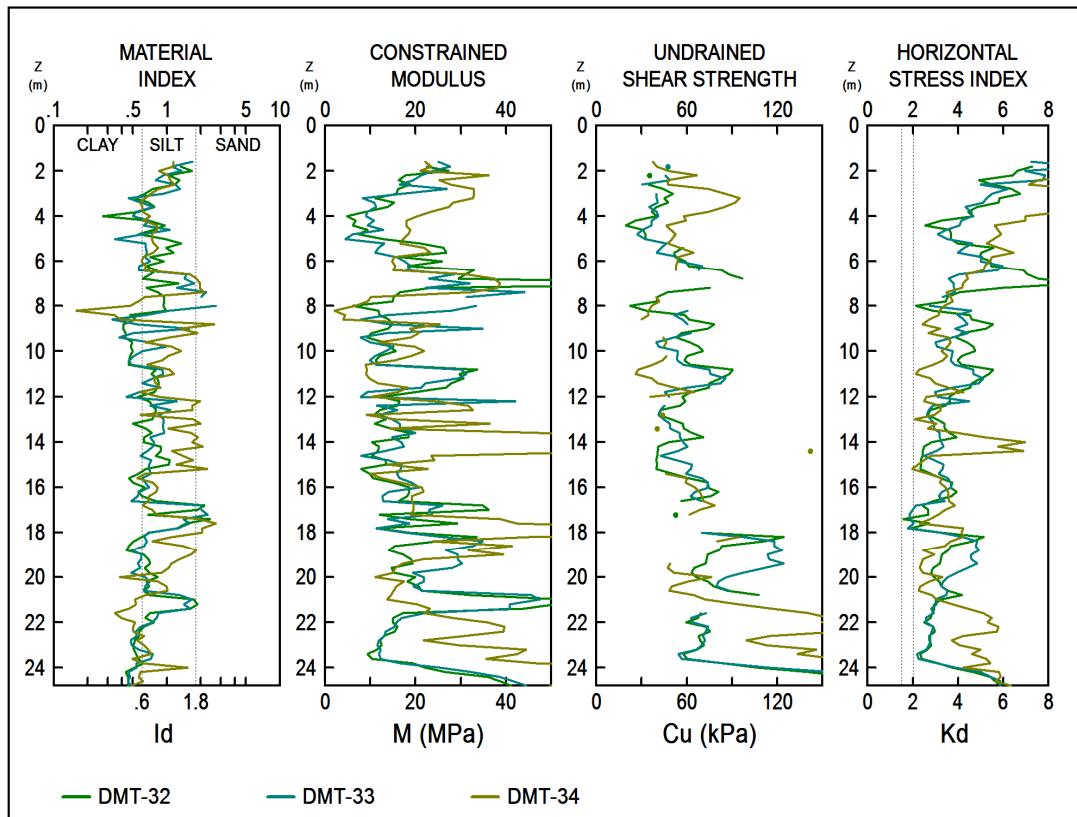
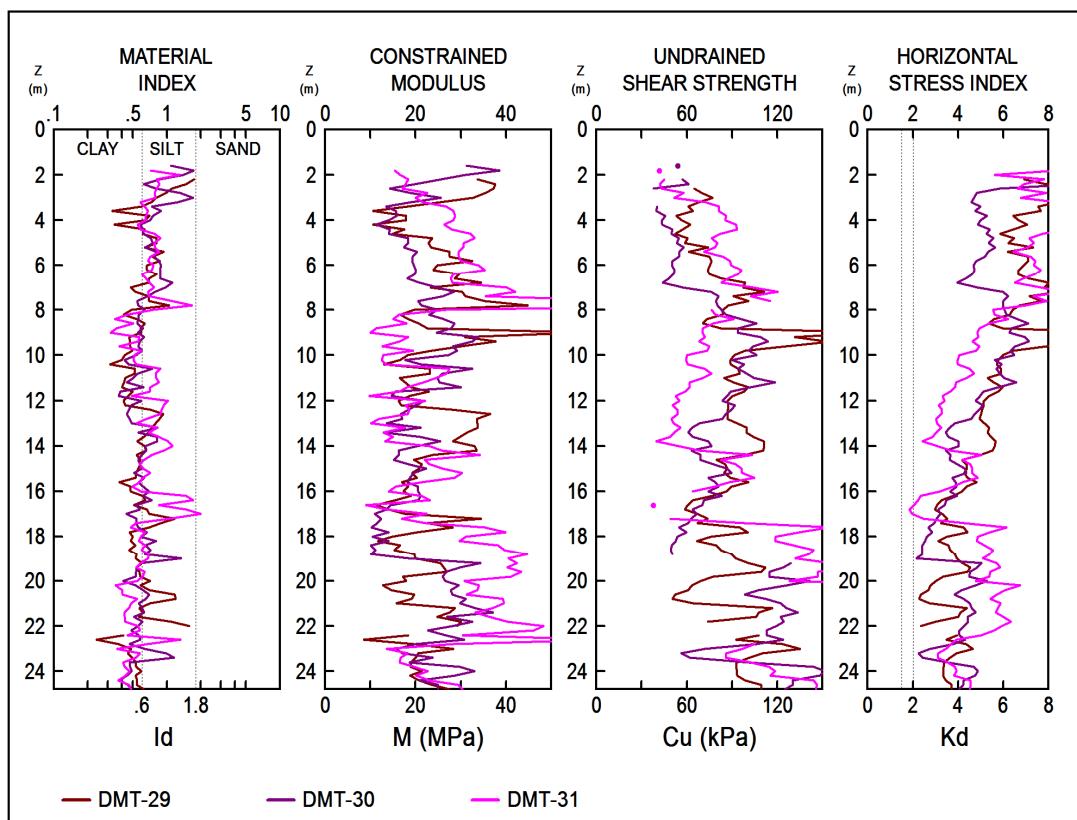


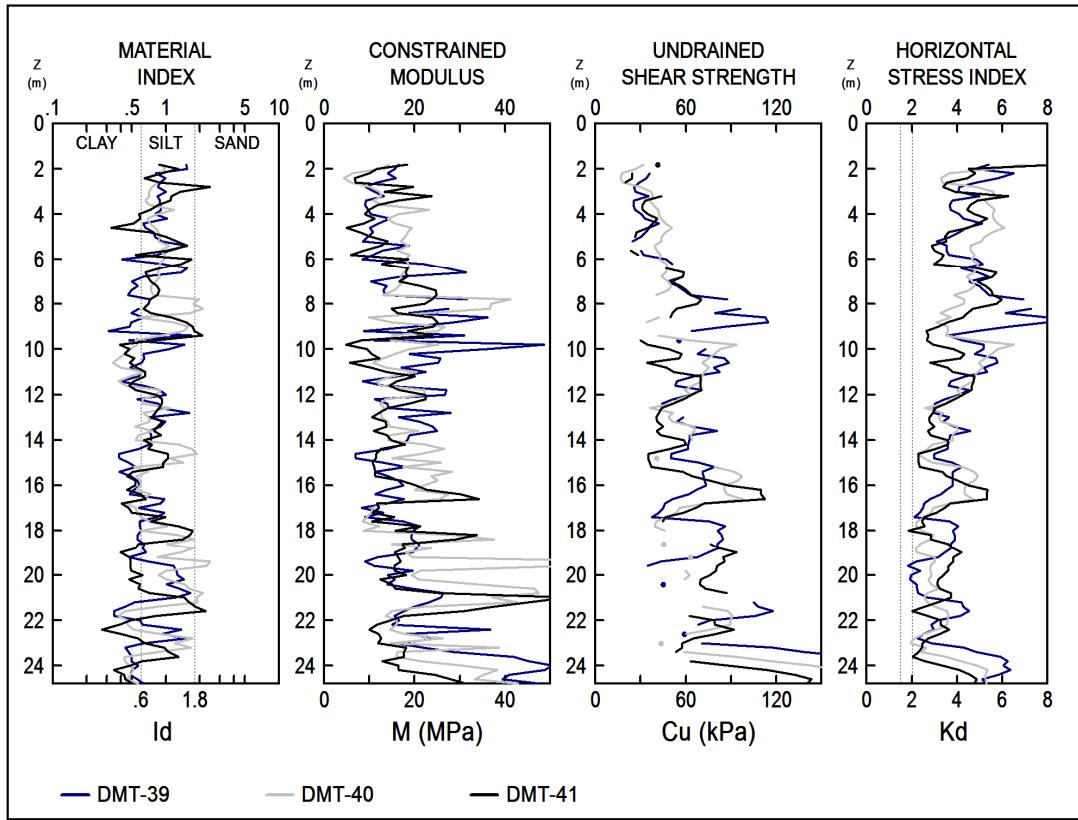
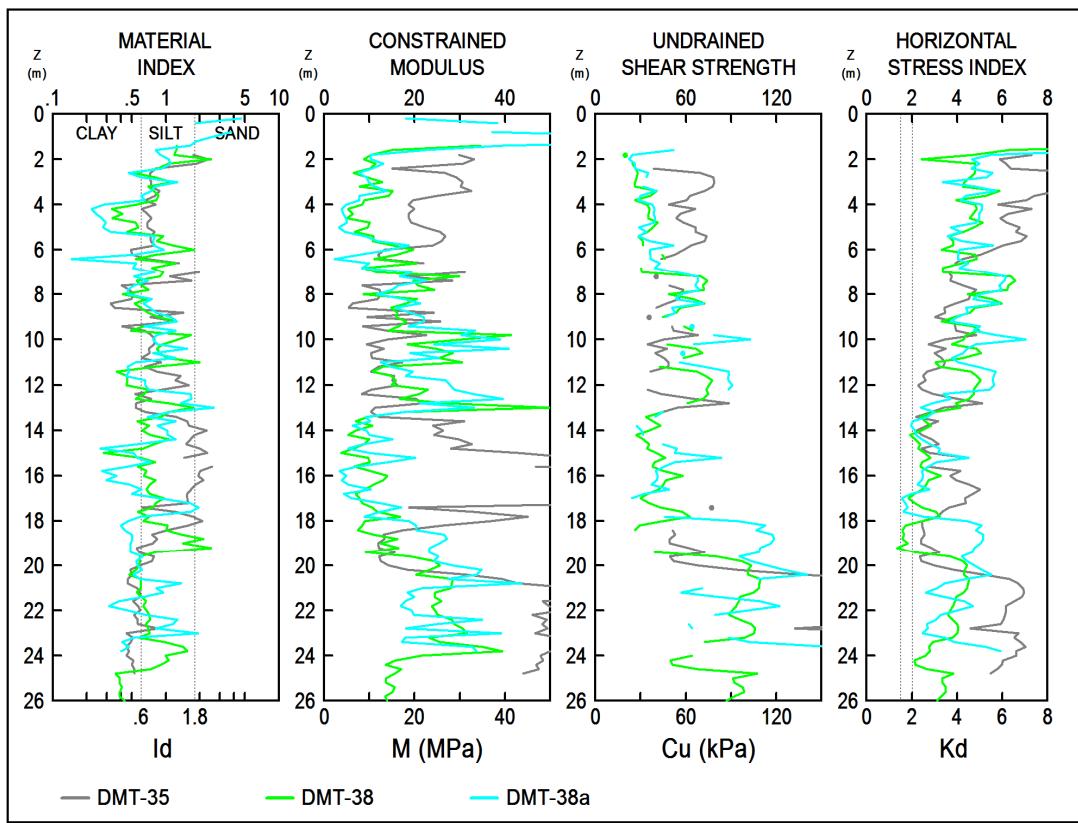


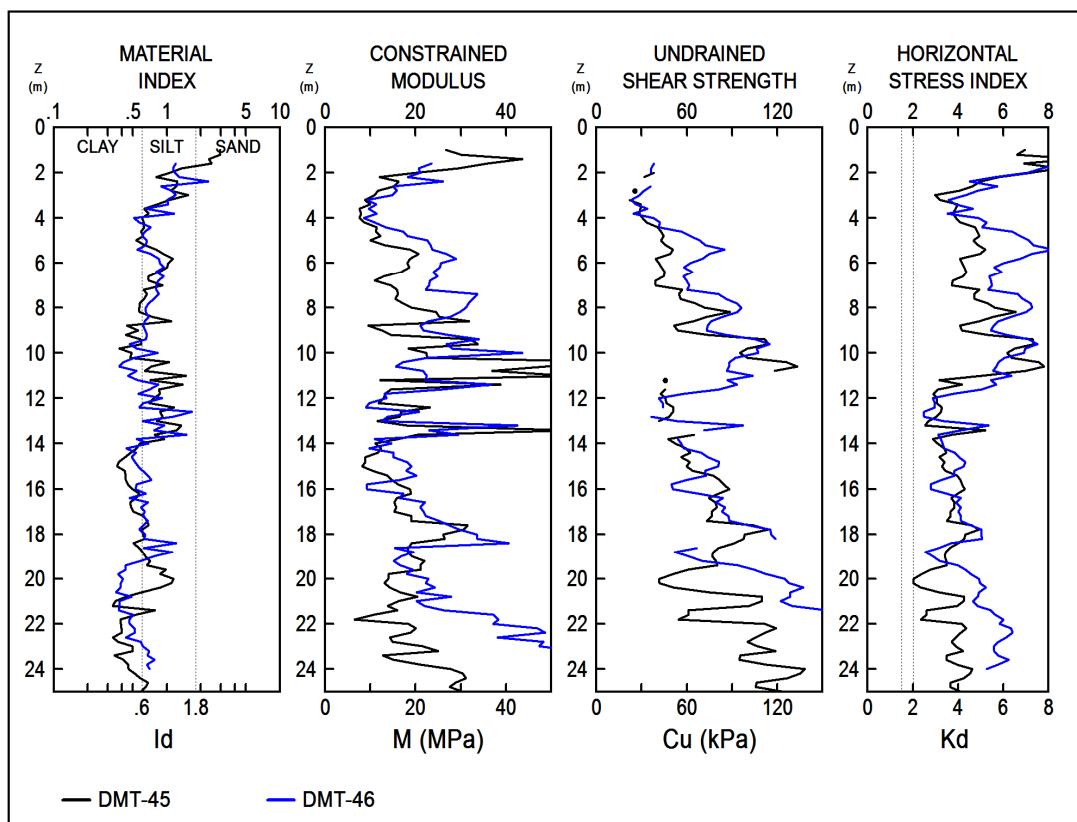


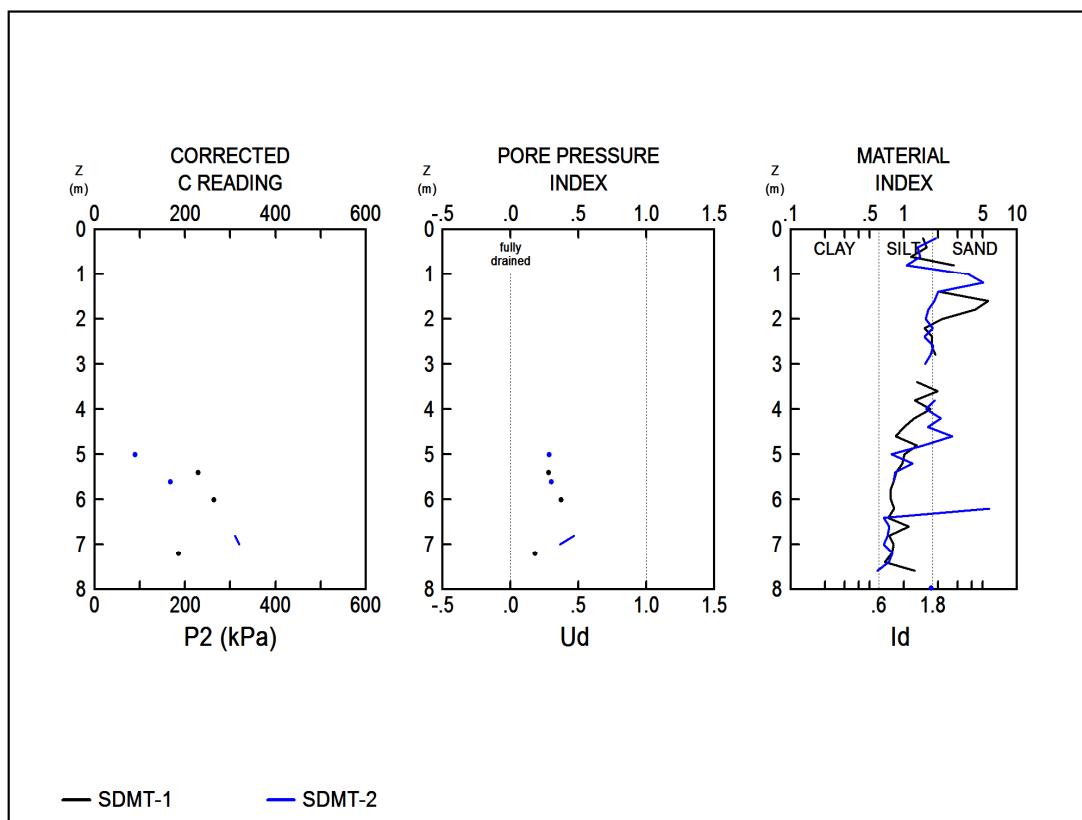
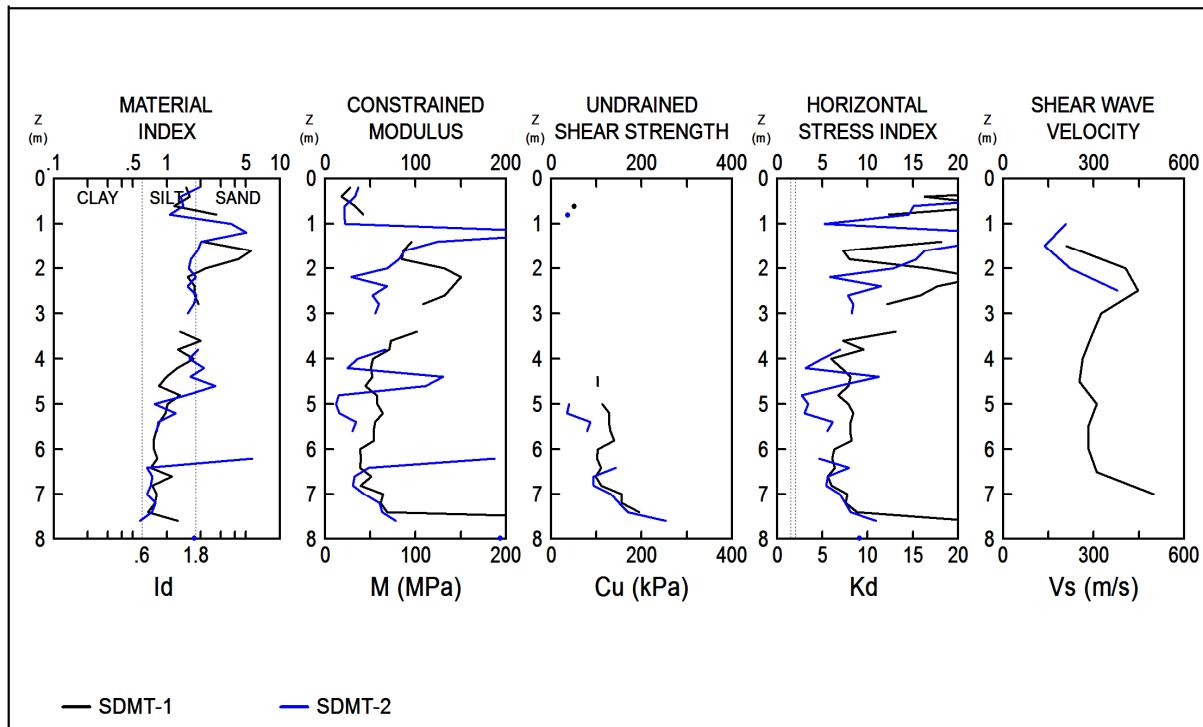


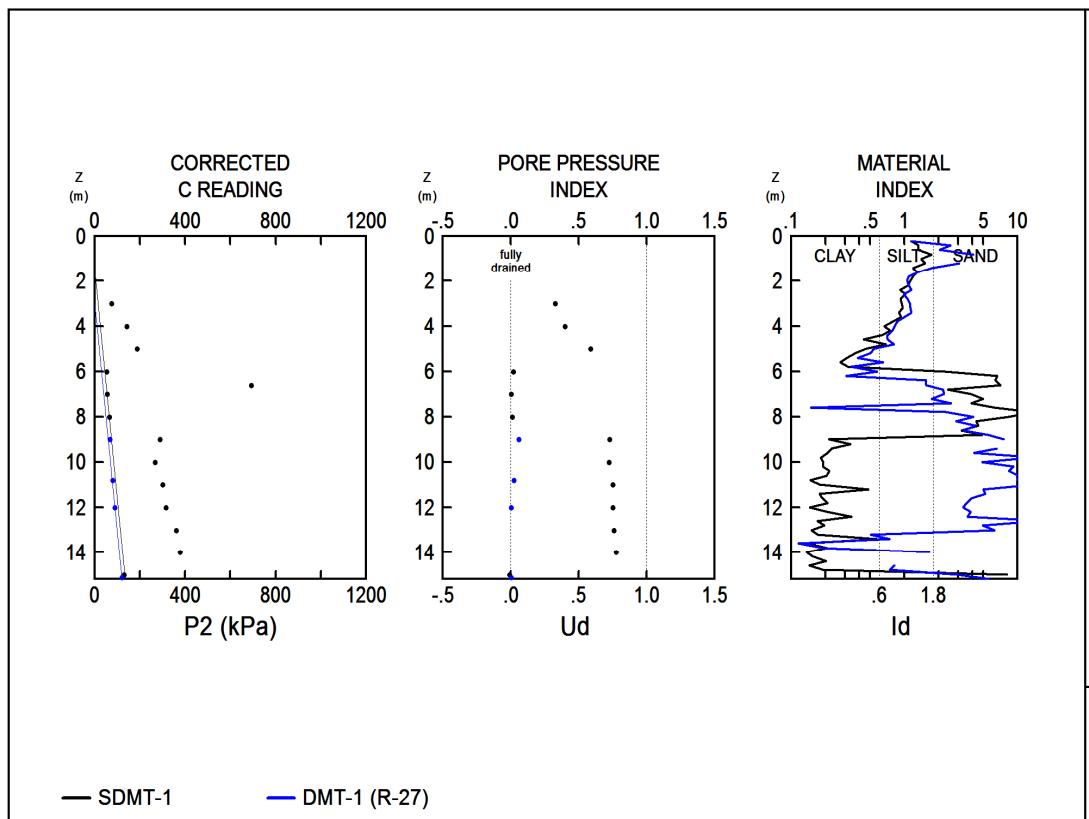
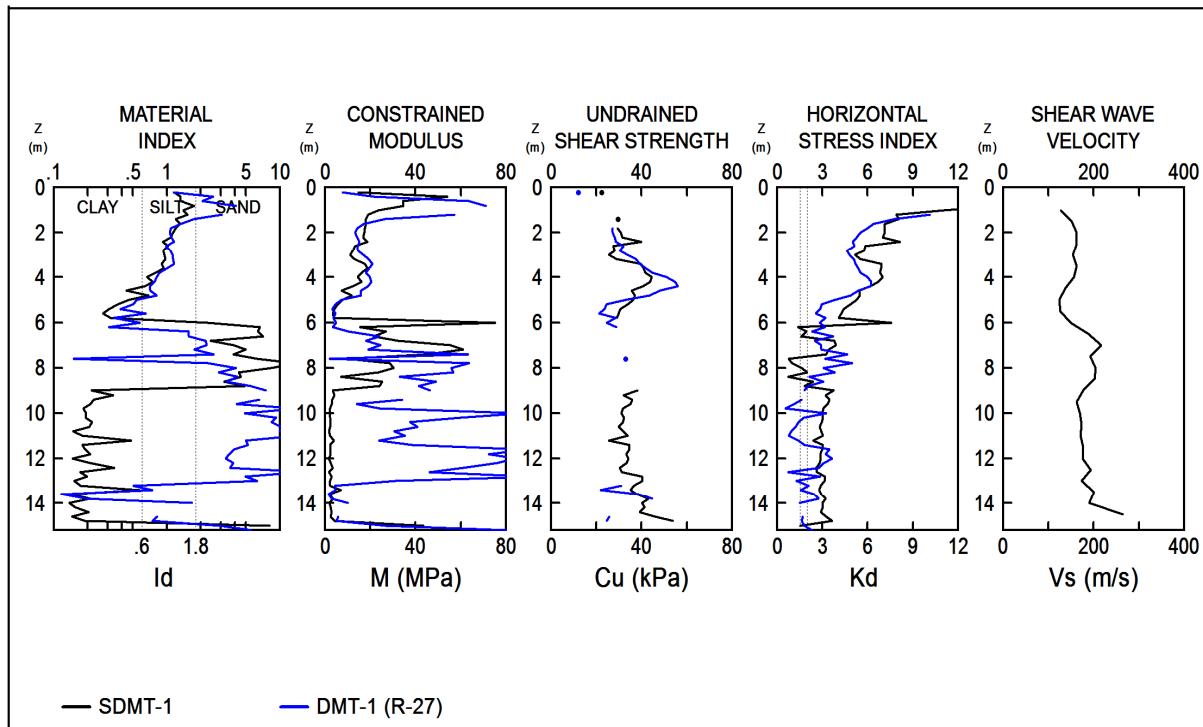


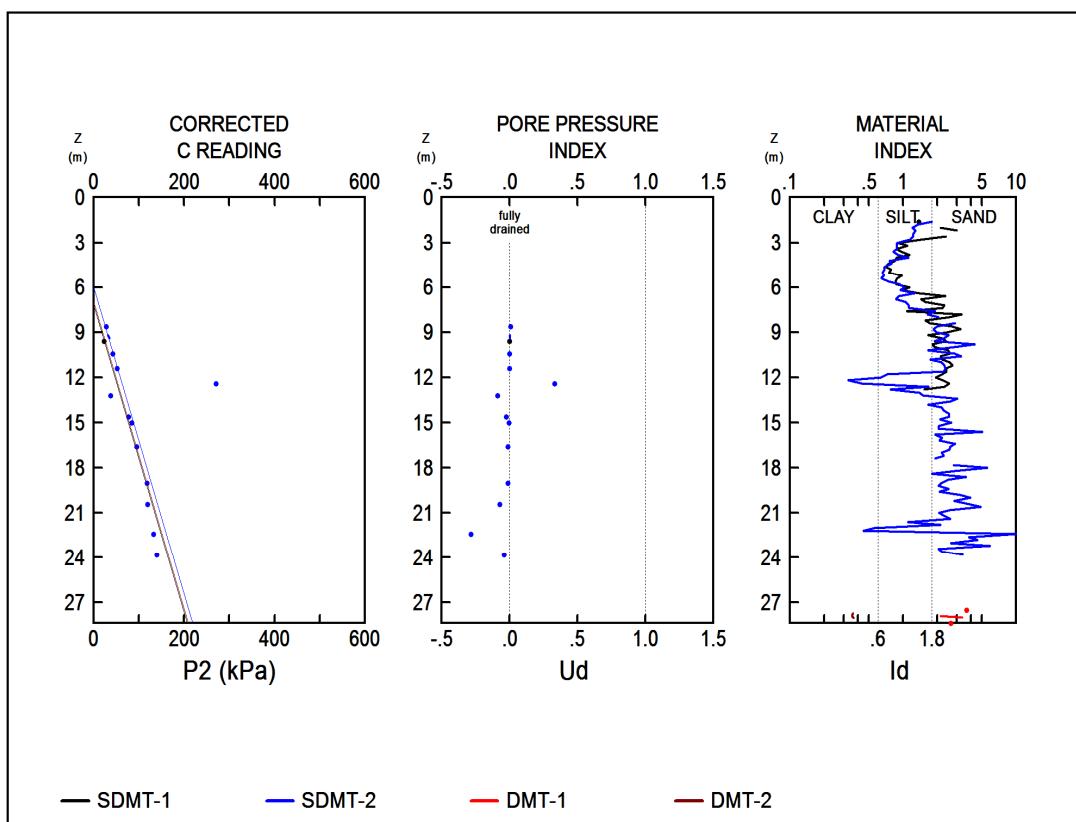
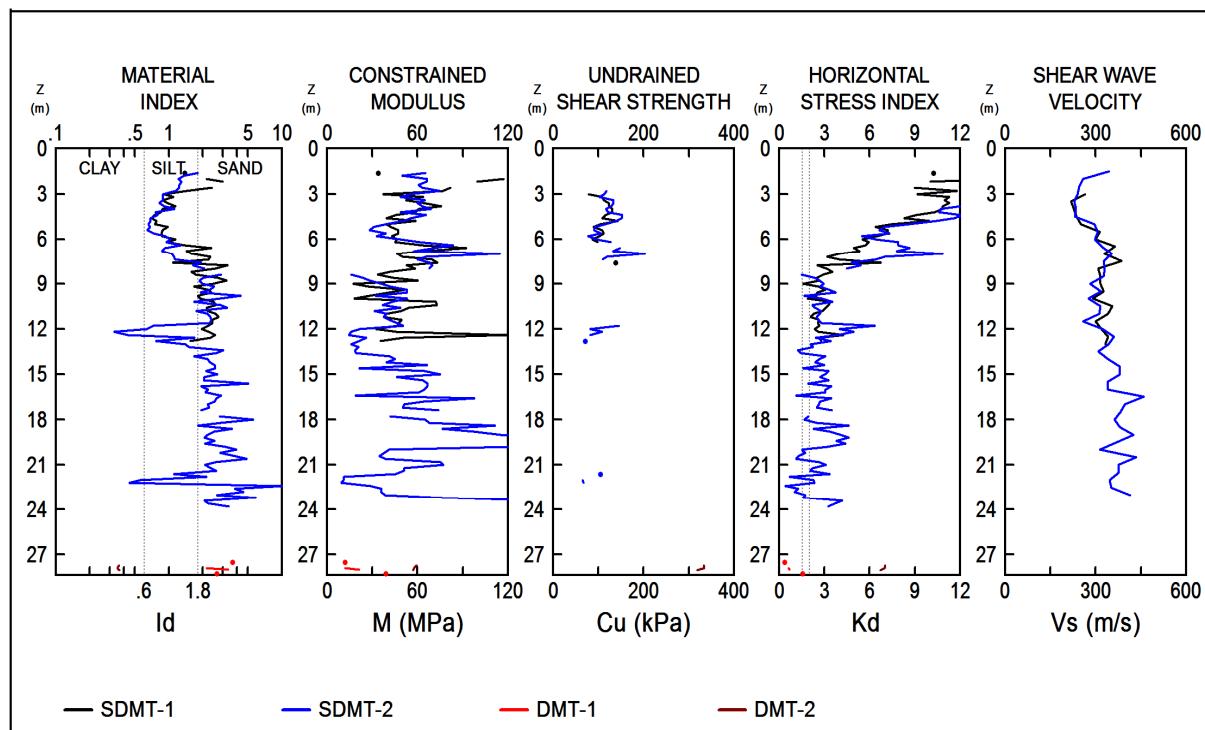


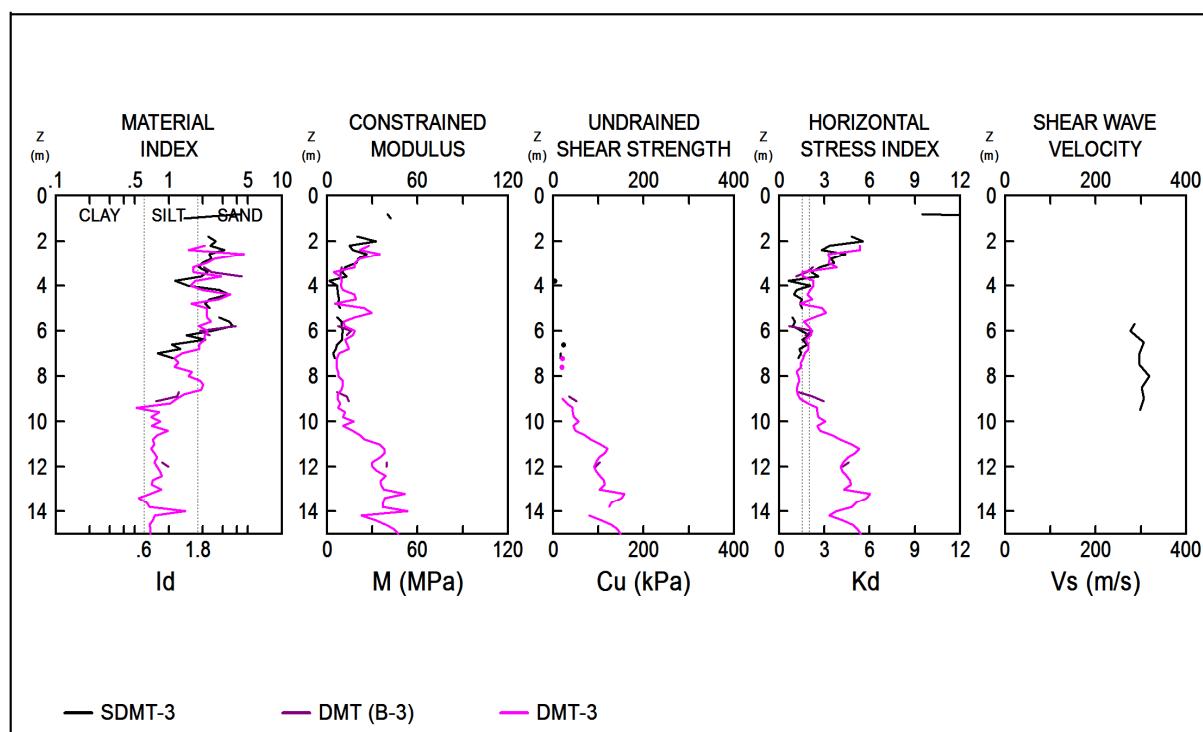
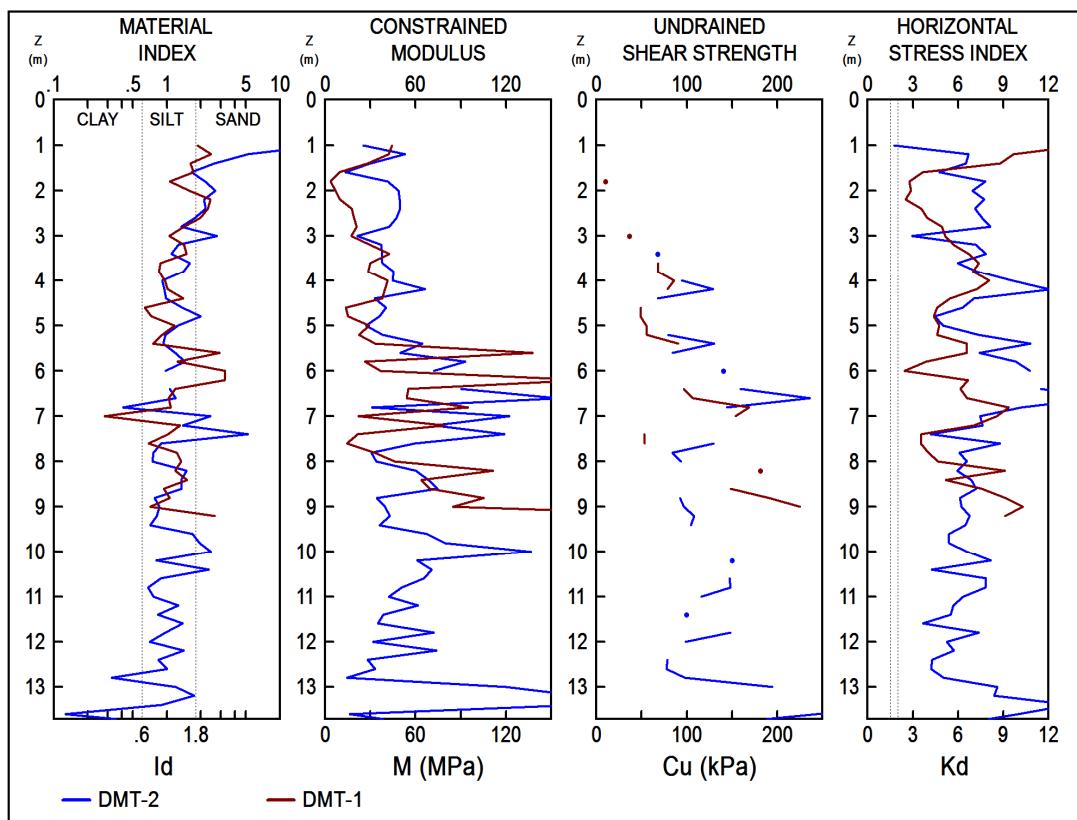


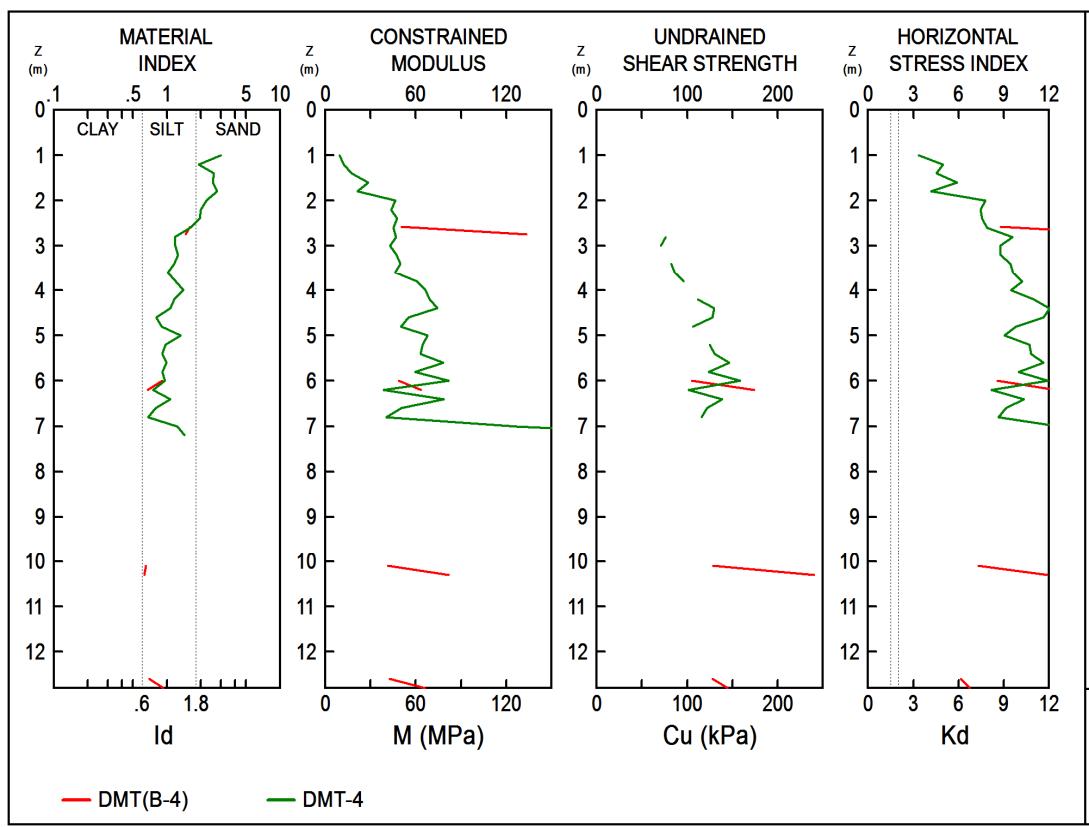


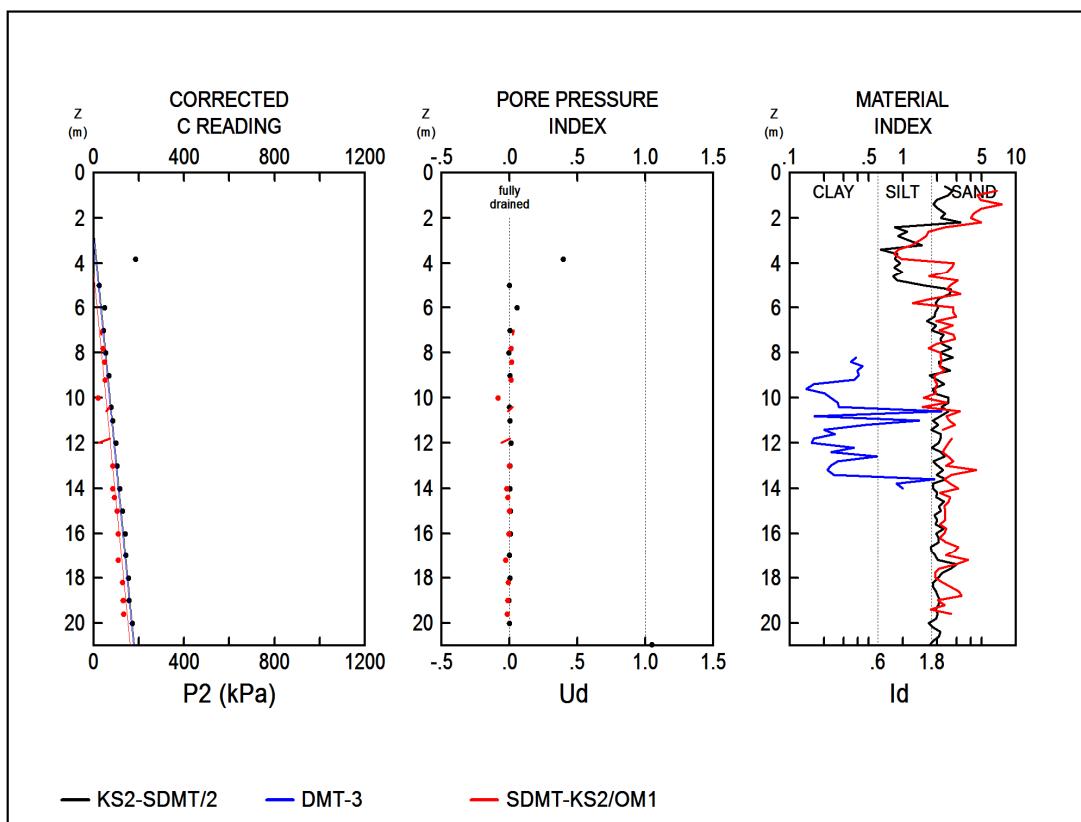
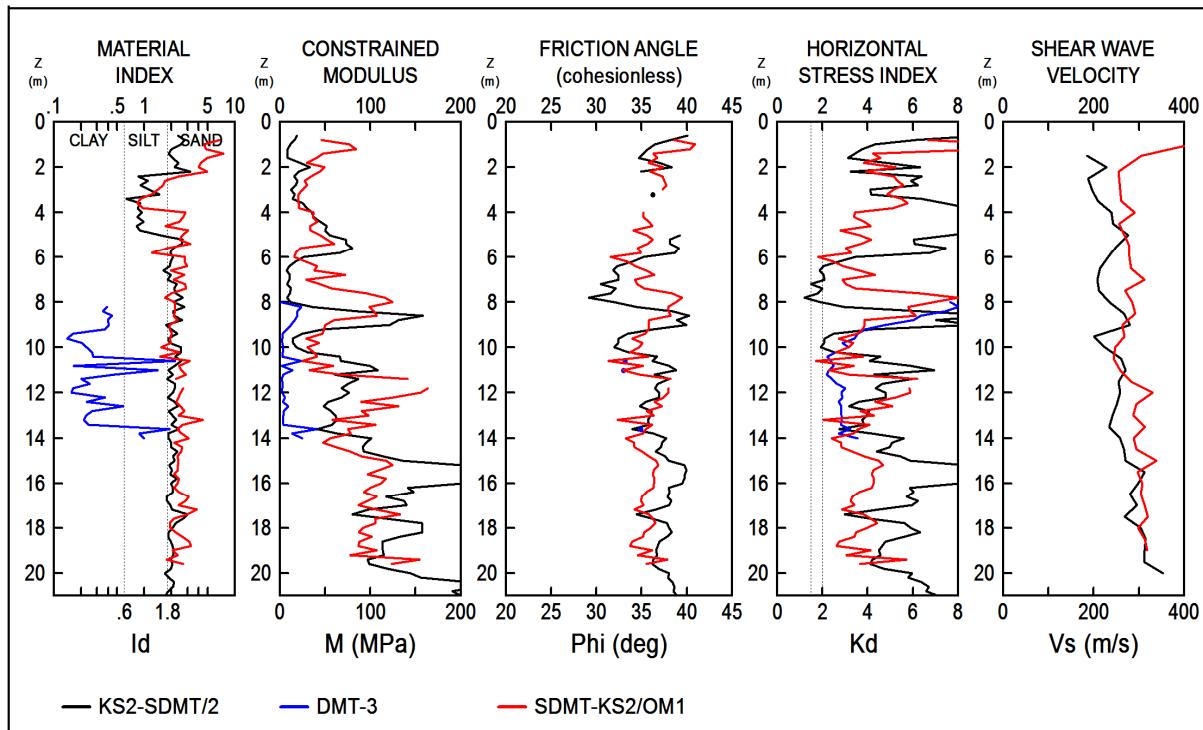




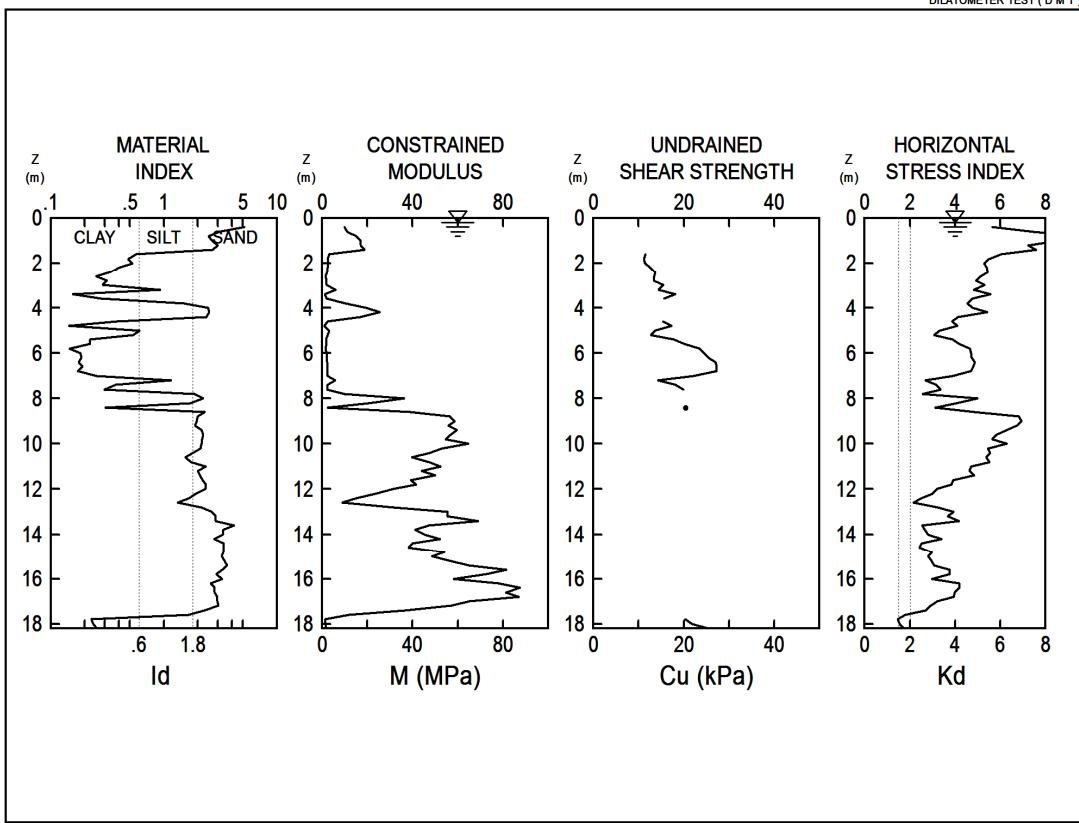




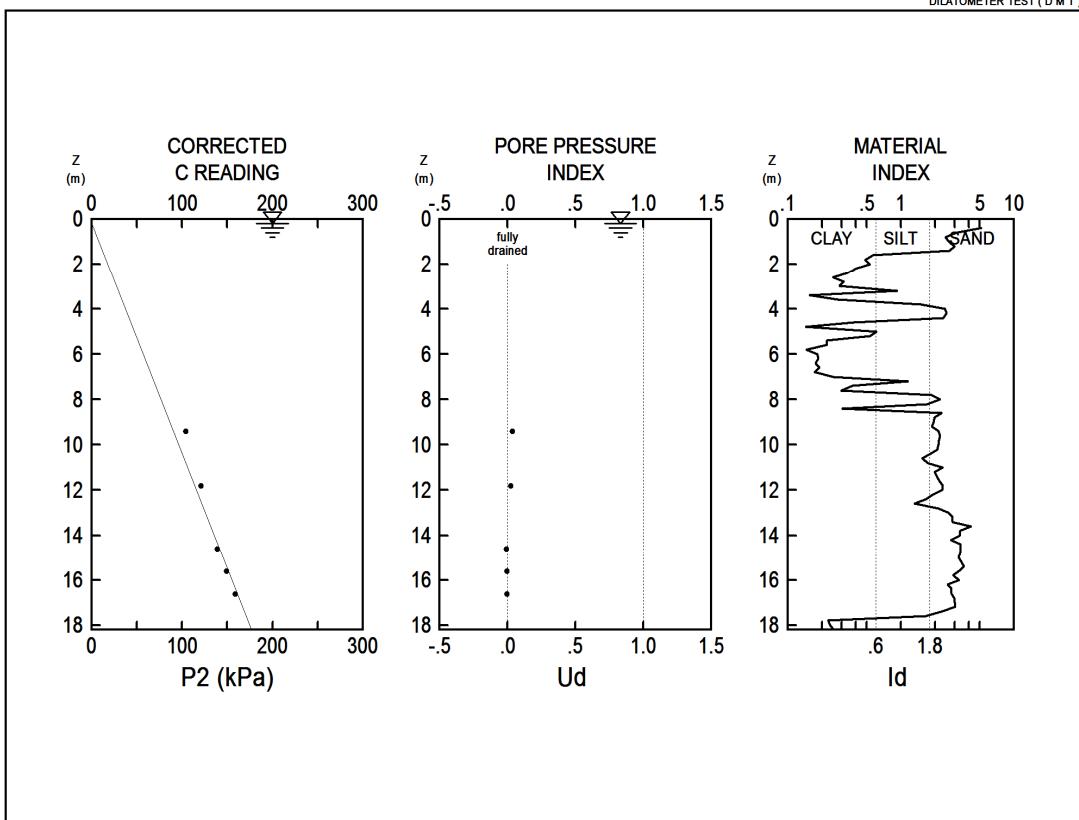


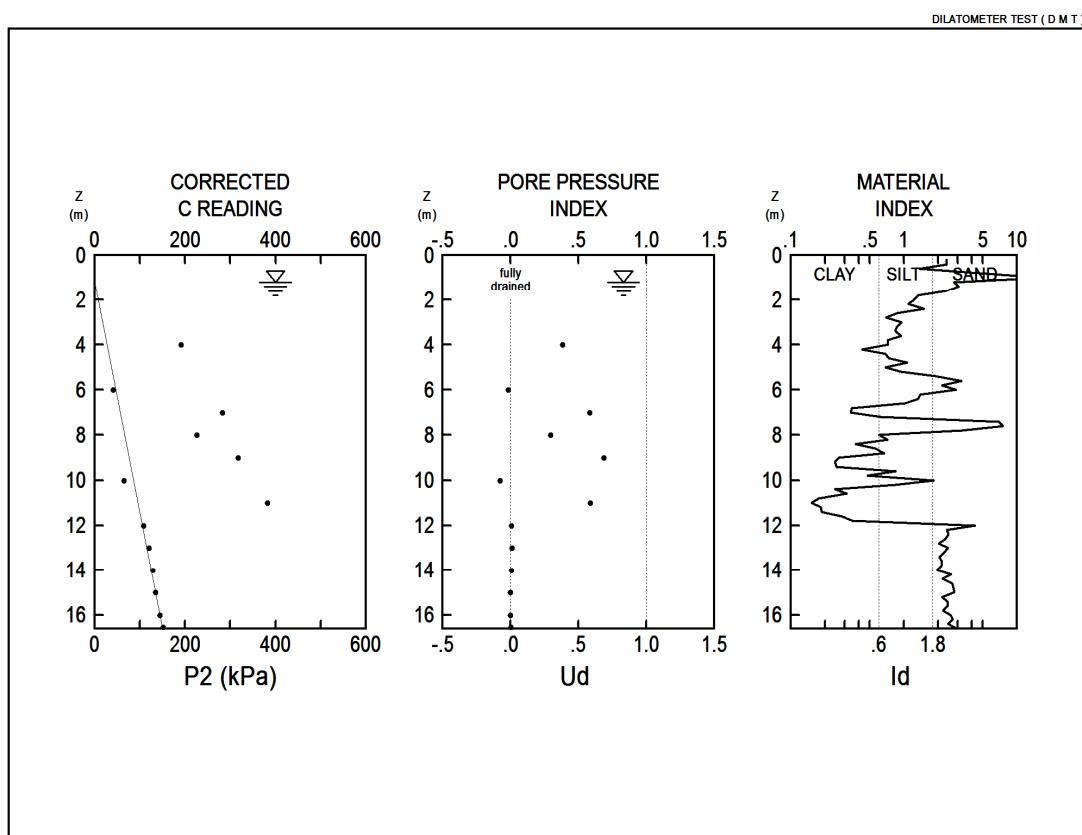
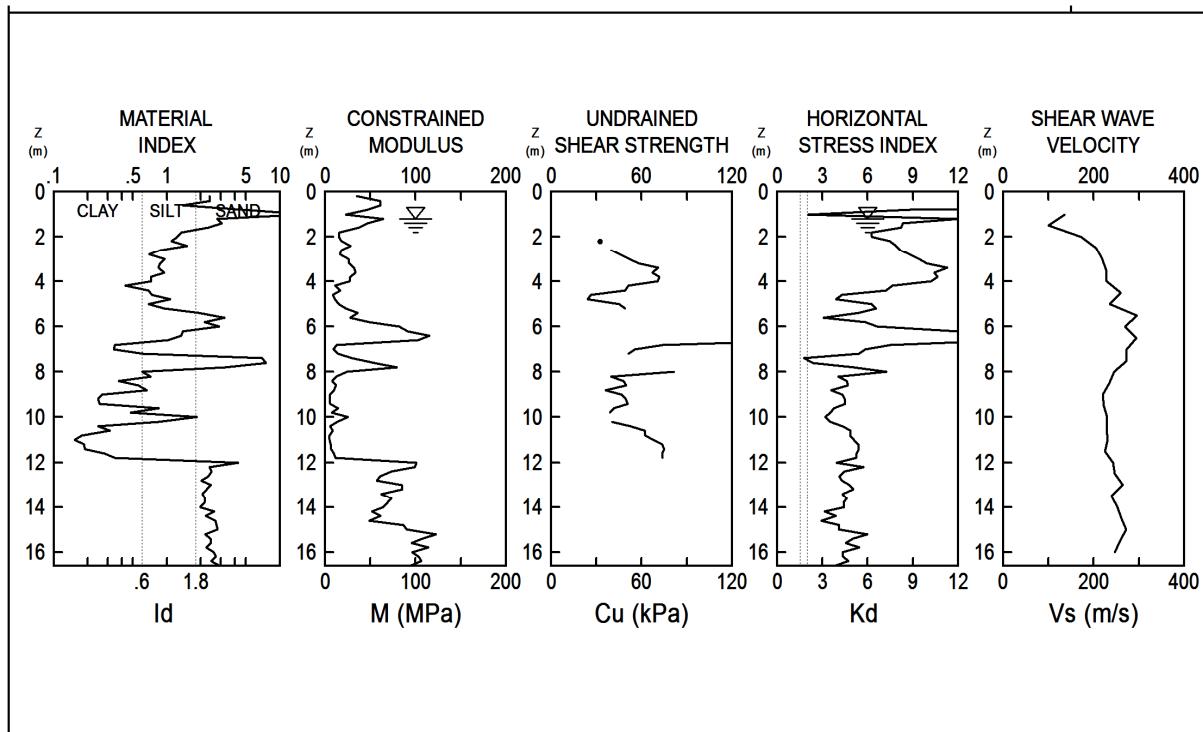


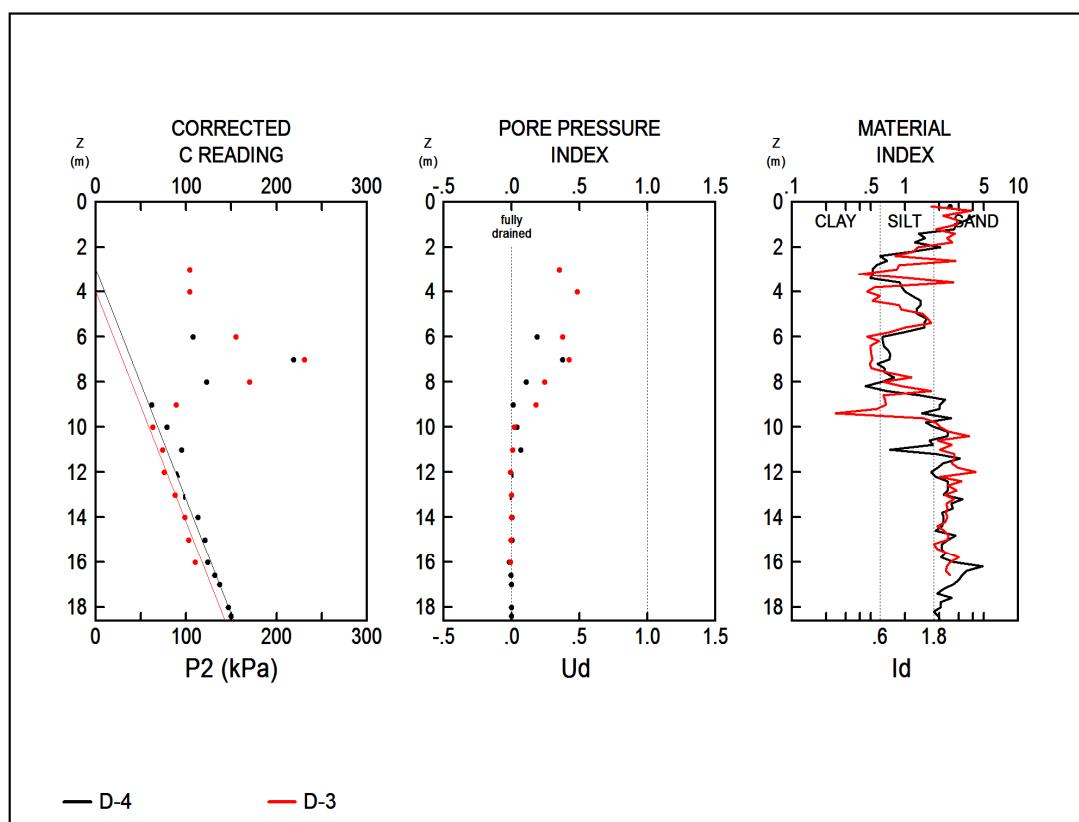
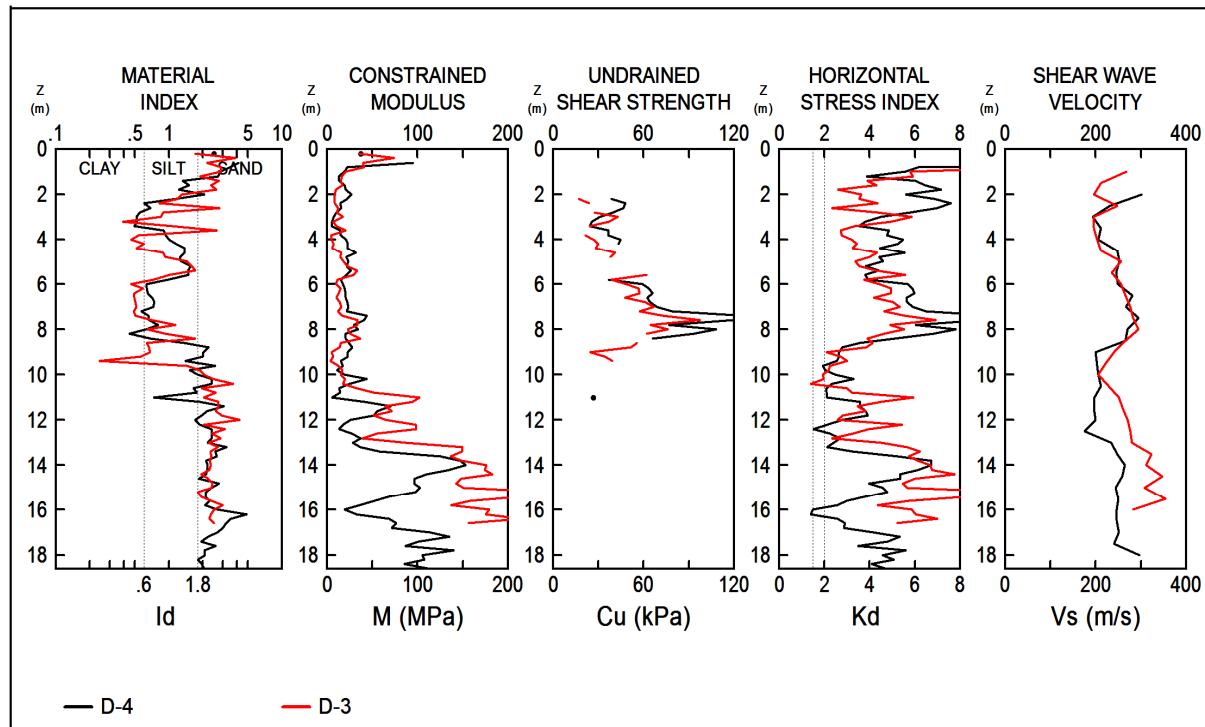
DILATOMETER TEST (D M T)

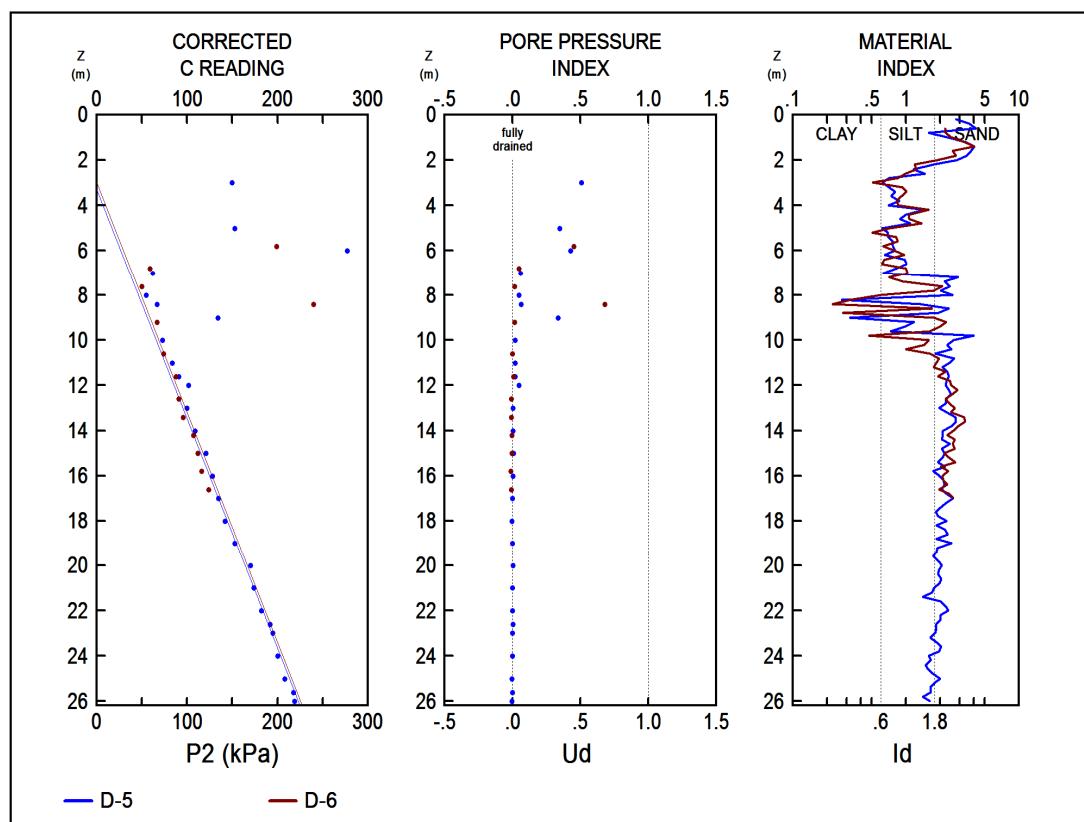
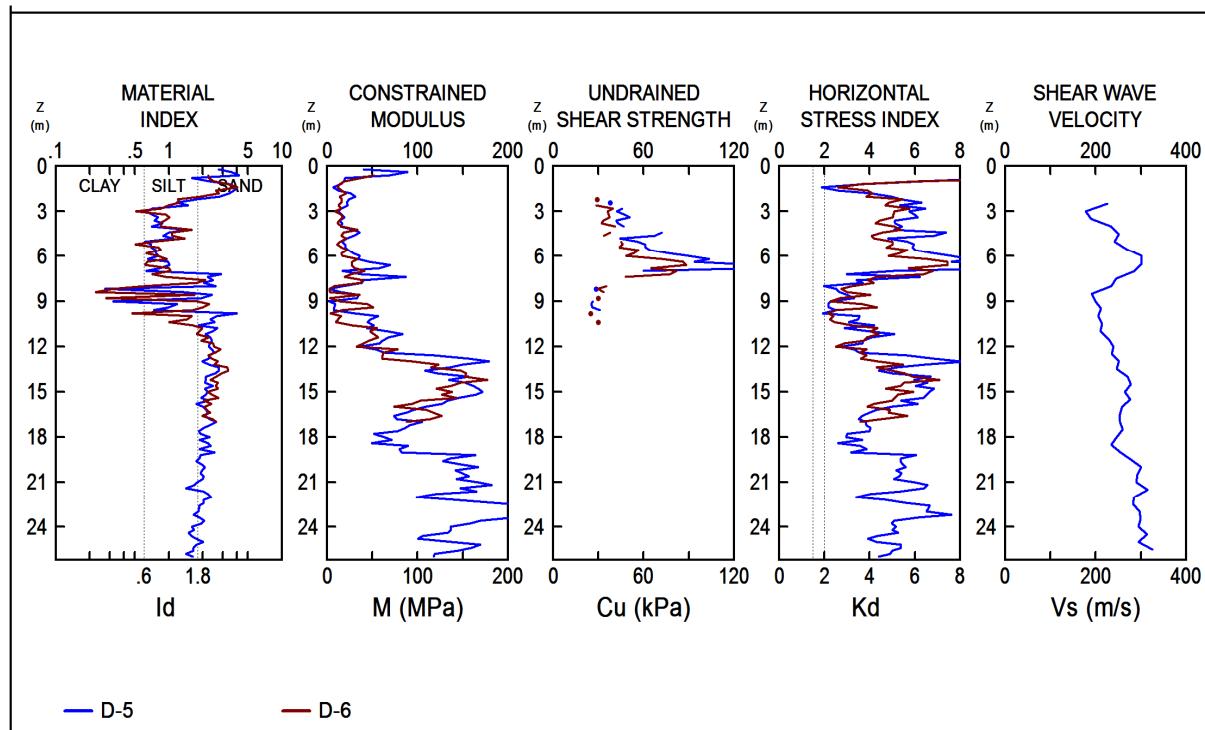


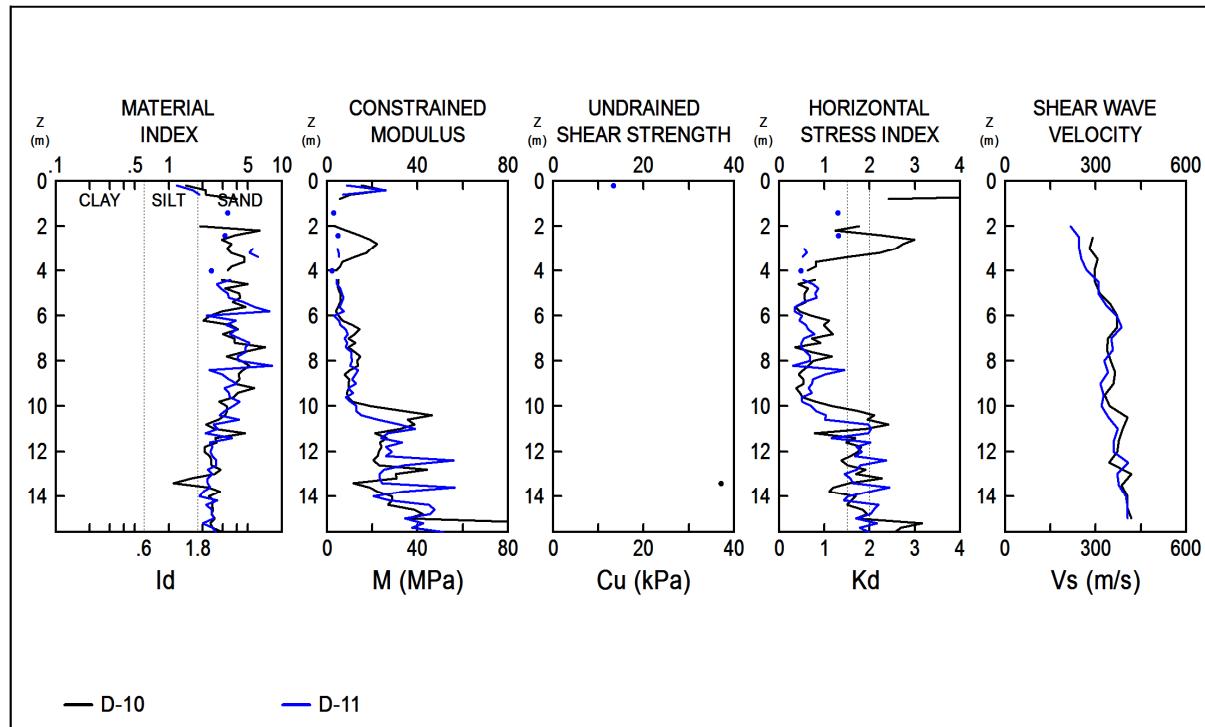
DILATOMETER TEST (D M T)



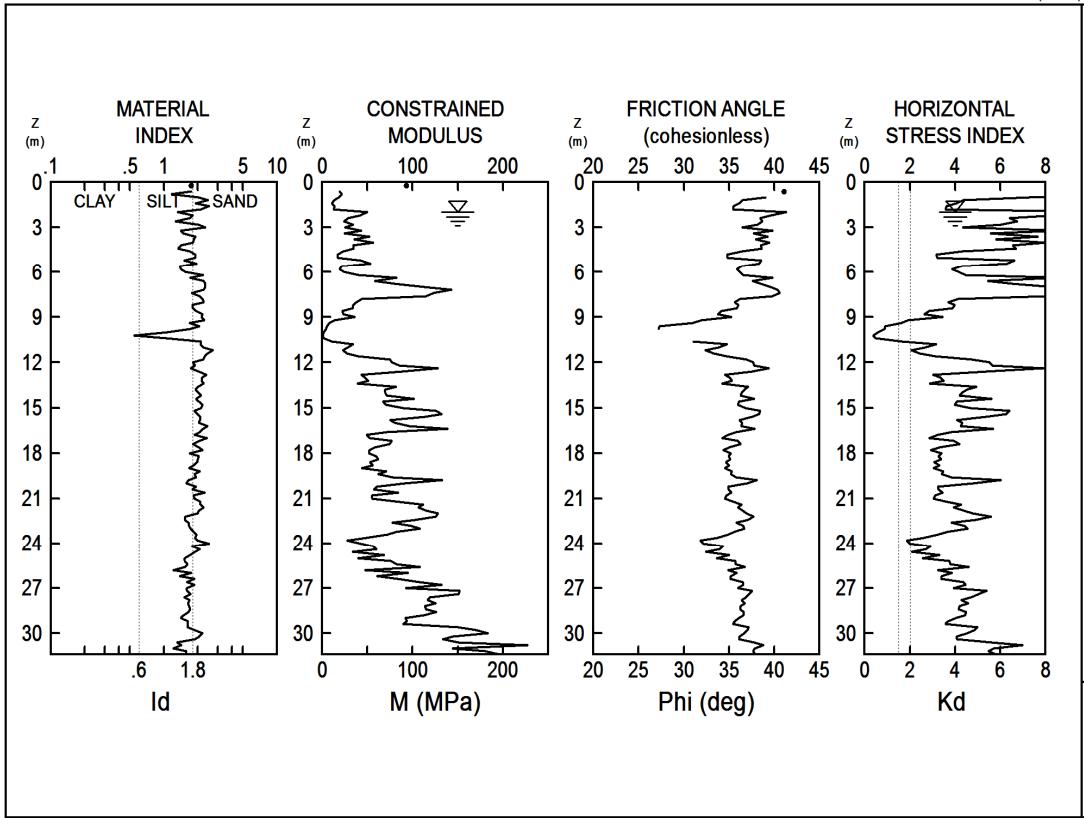




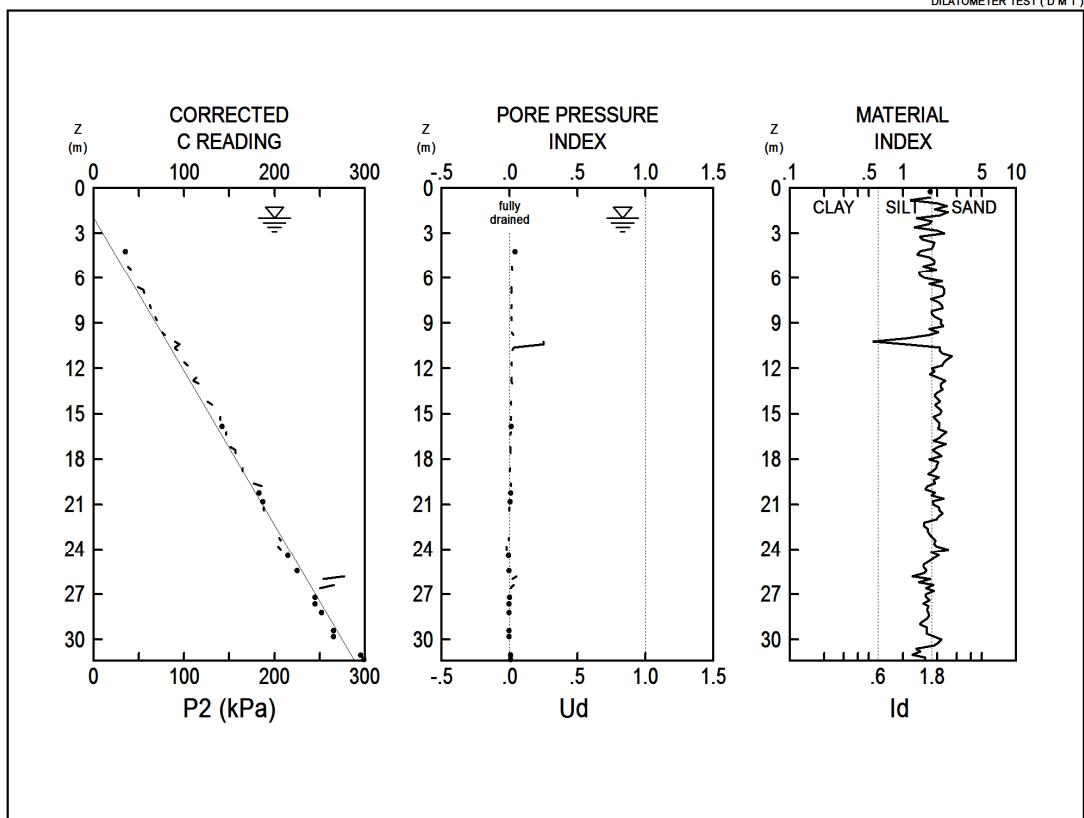


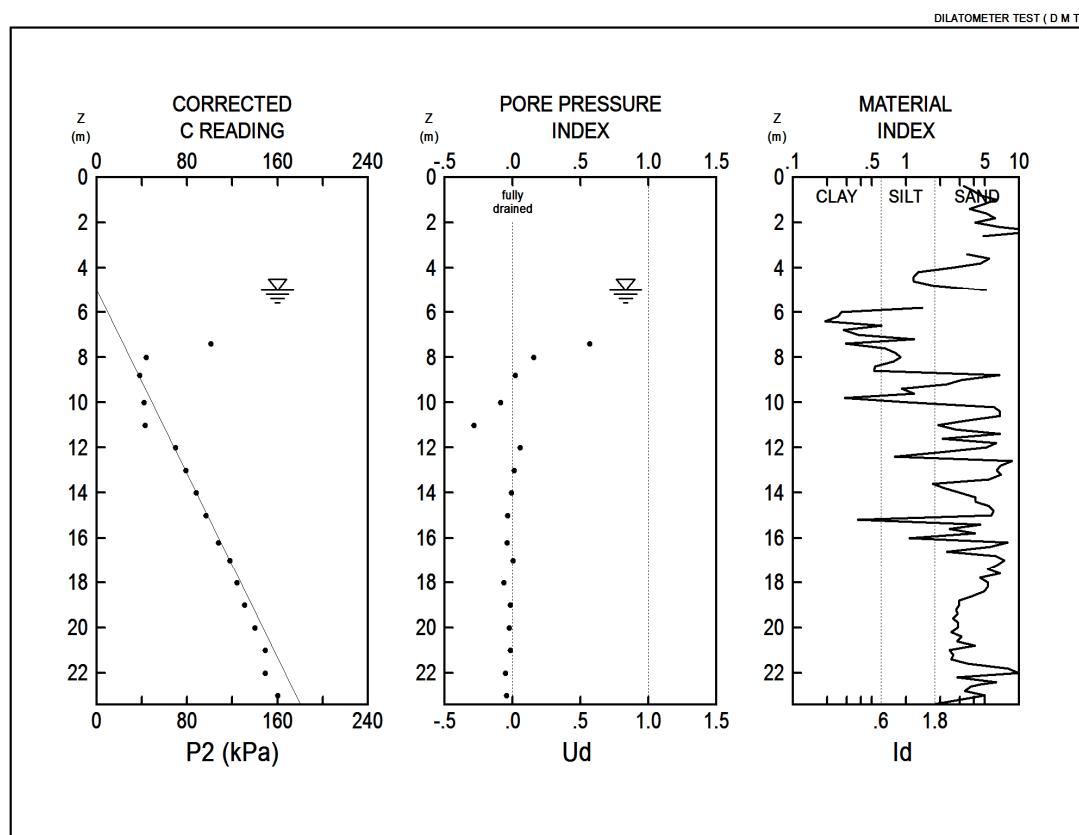
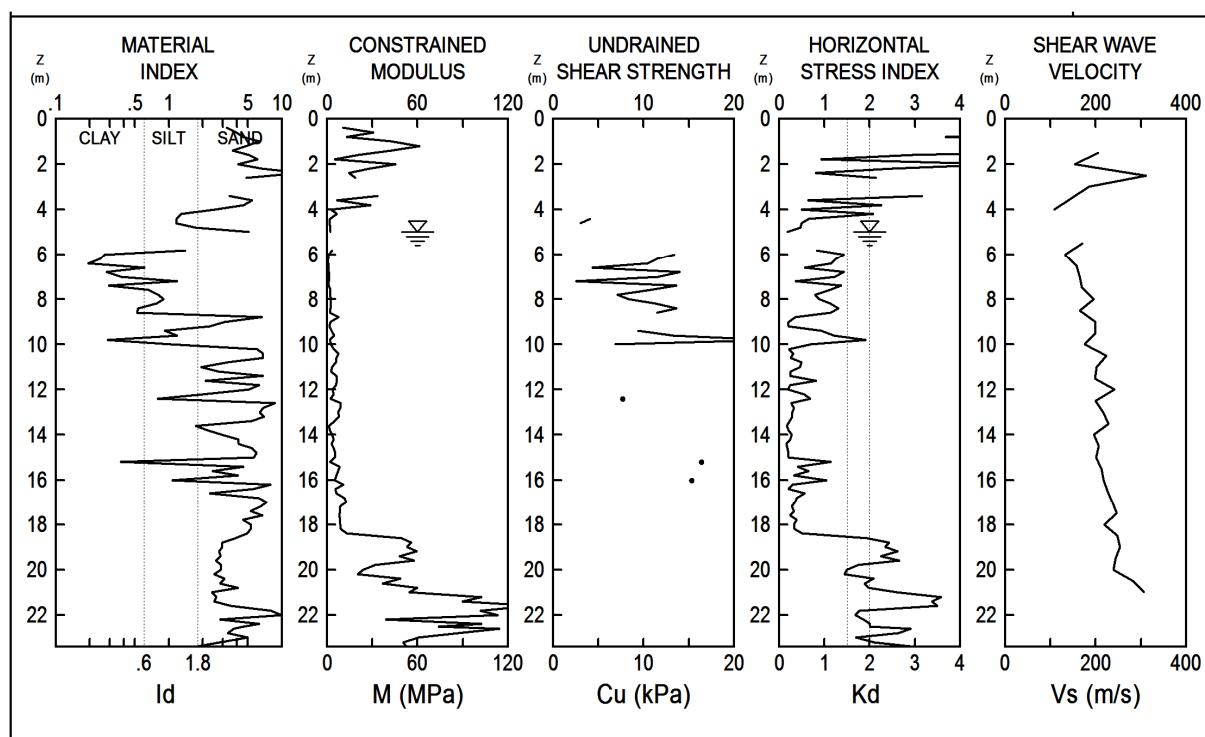


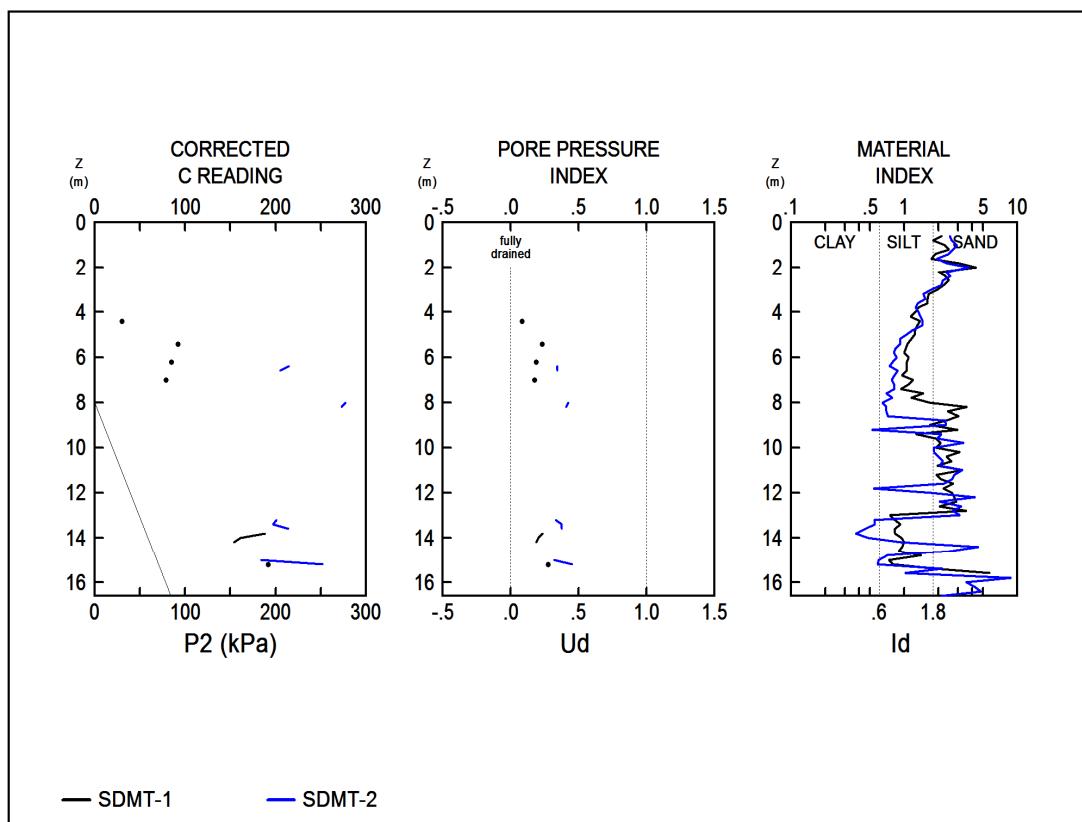
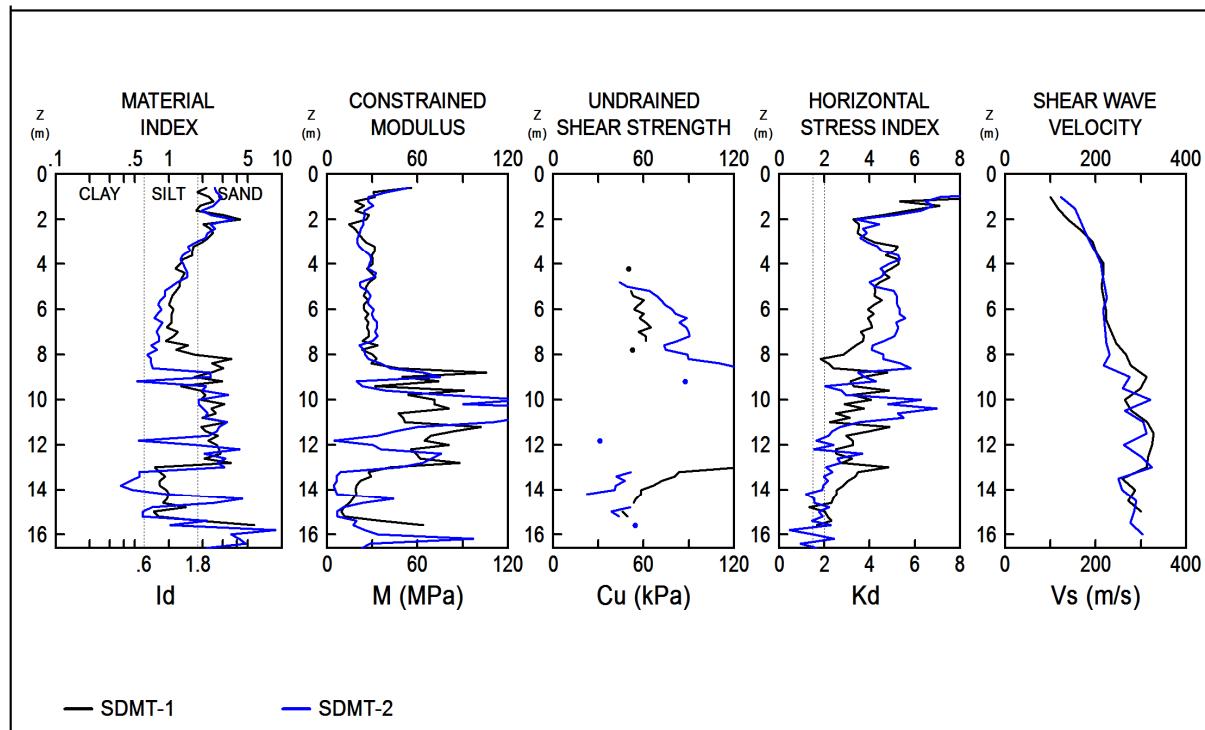
DILATOMETER TEST (D M T)

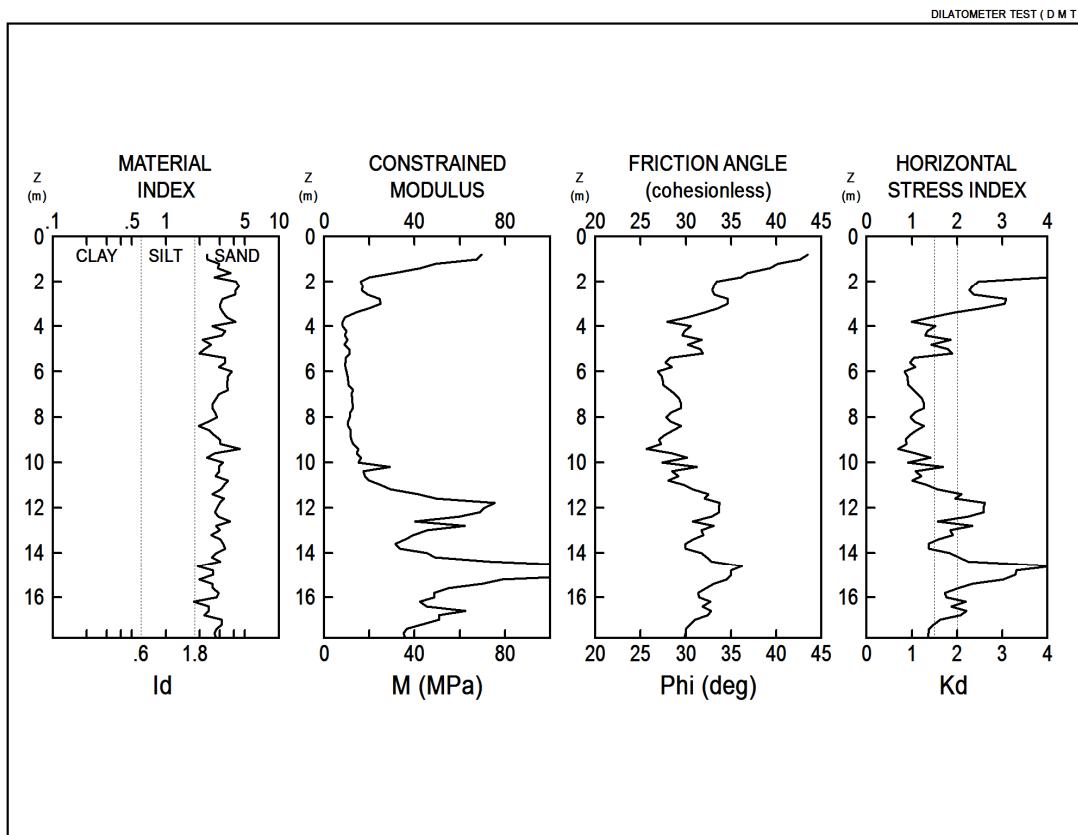


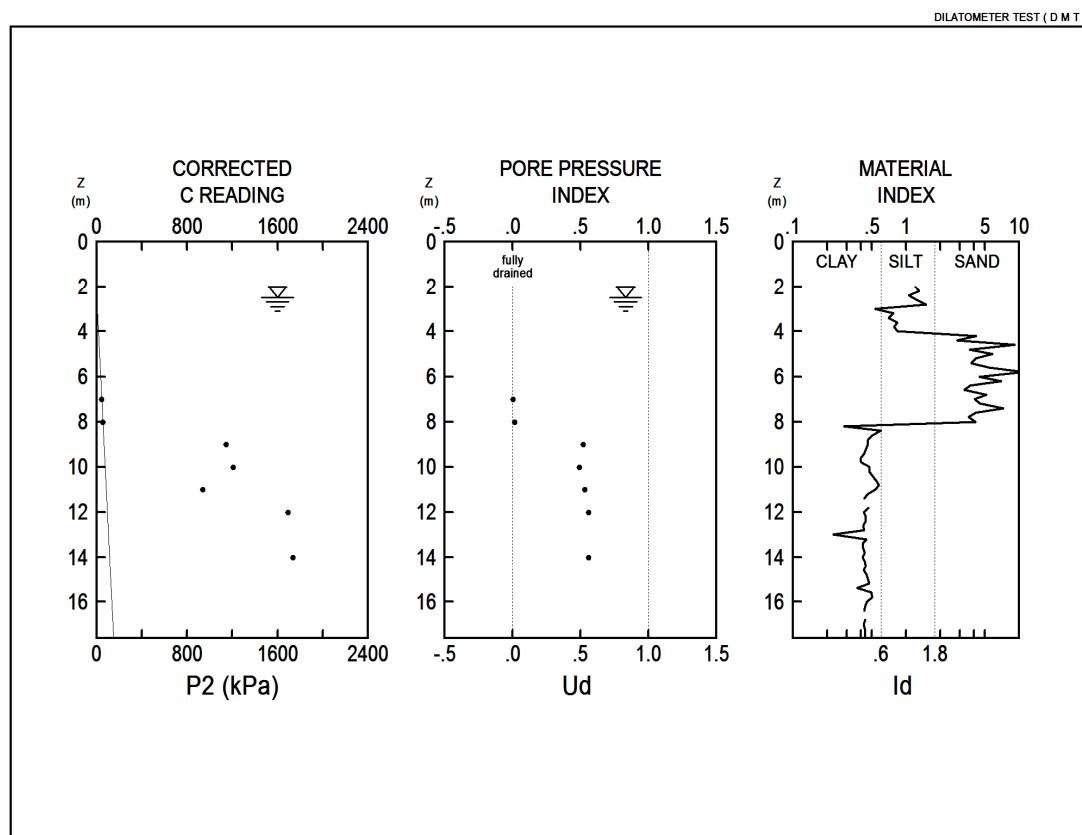
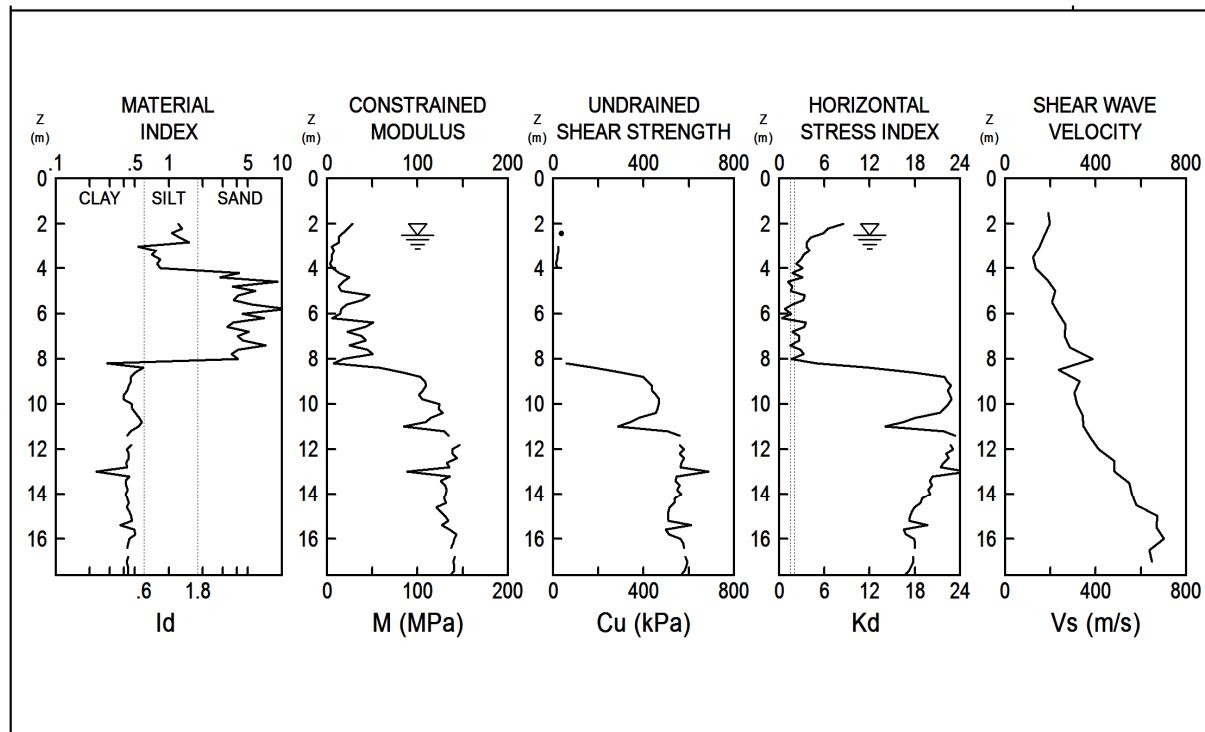
DILATOMETER TEST (D M T)

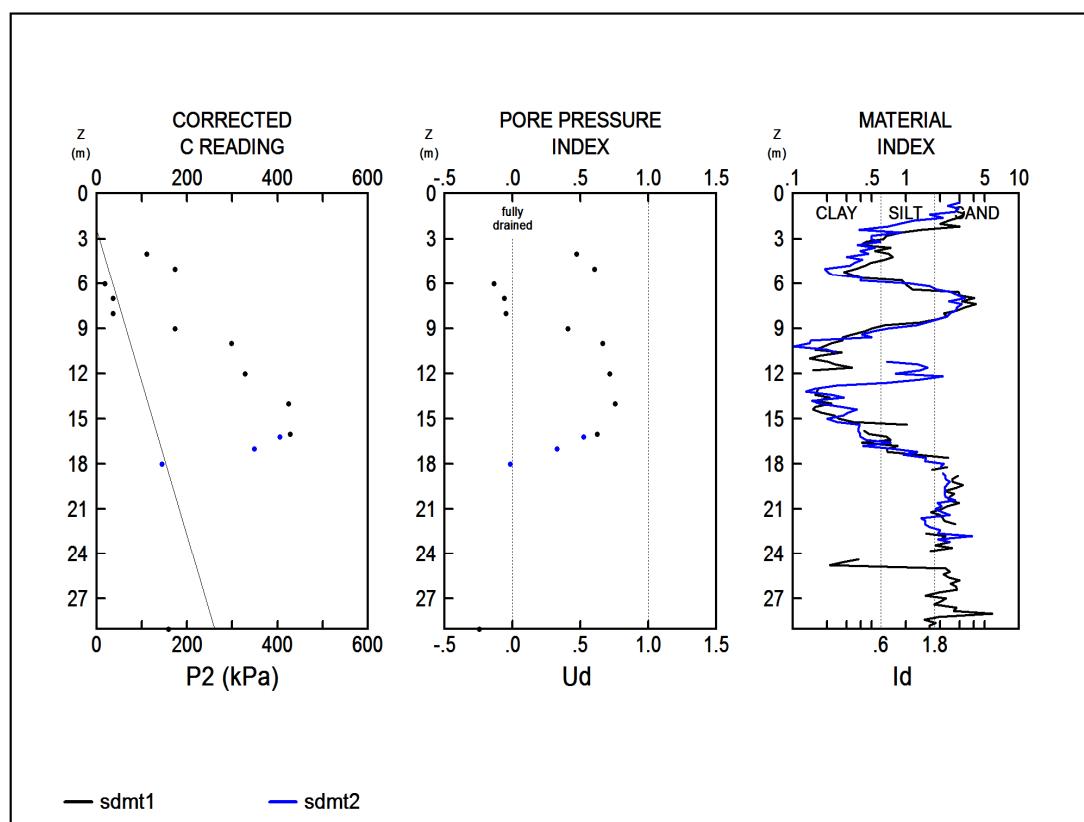
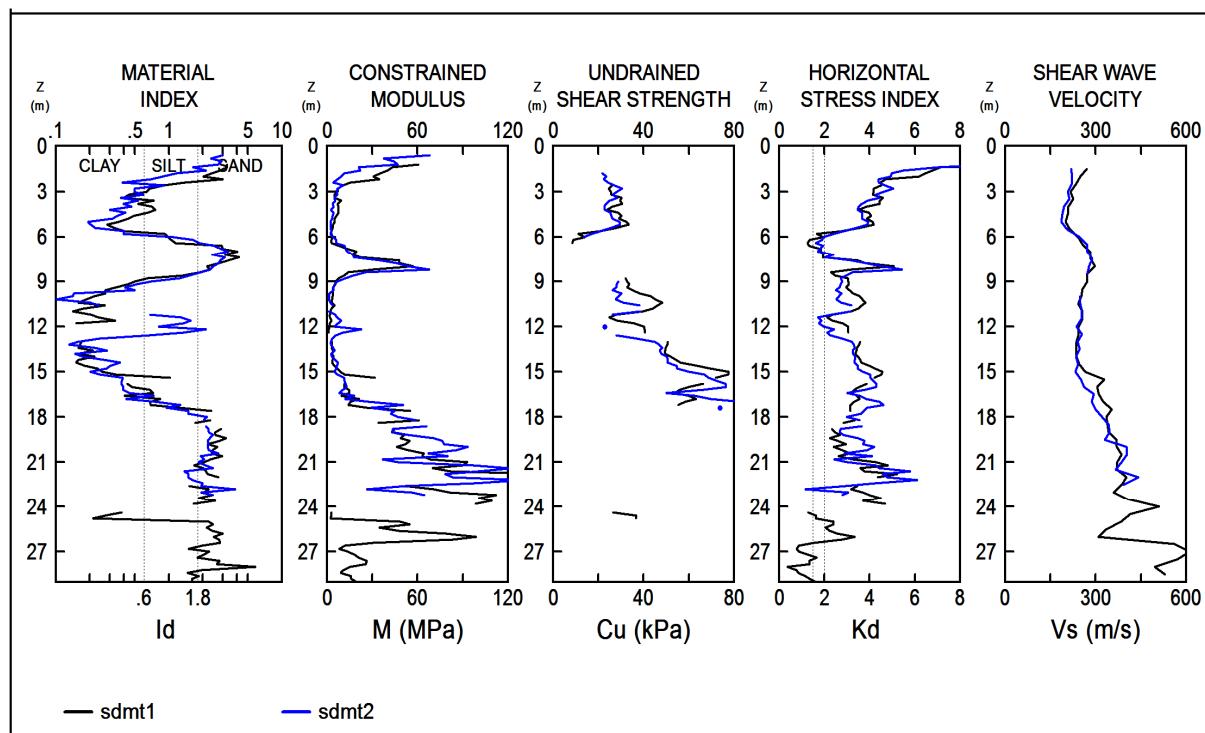












BIOGRAFIJA

Berisavljević Dušan rođen je 19. maja 1984. godine u Beogradu gde je završio osnovnu školu i srednju elektrotehničku školu „Nikola Tesla“. 2009. godine diplomirao je na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu na smeru za geotehniku sa temom: „Geotehnički uslovi izgradnje trgovinskog centra Tuš-Merkur u Kragujevcu“ i time stekao zvanje diplomirani inženjer geologije za geotehniku. 2009. godine zaposlio se u Institutu za ispitivanje materijala iz Beograda gde dobija stipendiju za doktorske studije, koje upisuje 2010. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu na smeru Rudarsko inženjerstvo. 2010. godine stiče naučno zvanje istraživač saradnik.

Kao mladi istraživač zaposlen u Institut IMS nekoliko nedelja provodi na specijalizaciji u instranstvu:

- u Češkoj za upotrebu opreme i metoda za ispitivanje integriteta šipova,
- u Holandiji za ispitivanje šipova dinamičkim probnim opterećenjem,
- u Turskoj na usavršavanju veština iz oblasti primene metode konačnih elemenata u geotehnici,
- u Italiji na obuci za korišćenje seizmičkog dilatometra i
- u Nemačkoj na usavršavanju znanja iz oblasti projektovanja šipova

2012. odlikovan je priznanjem za uvođenje u praksu nove ispitne opreme i tehnologije pri ispitivanju šipova – za doprinos i angažovanje u poslovanju Instituta IMS u 2012. godini. 2015. godine bio je član tehničkog komiteta treće međunarodne konferencije: „International conference on the flat dilatometer DMT’15“. Autor je velikog broja radova publikovanih u međunarodnim časopisima i na domaćim i međunarodnim konferencijama gde je održao predavanje po pozivu. Od 2010. do 2016. godine učestvovao je u realizaciji Projekta pod nazivom: “Geotehnički aspekti istraživanja i razvoja savremenih tehnologija građenja i sanacija deponija komunalnog otpada“, koji je finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Istraživanja kandidata usmerena su ka izvođenju i interpretaciji rezultata terenskih opita i geotehničkom proračunu plitkih i dubokih temelja. Praktično iskustvo stekao je učestvovanjem u realizaciji brojnih infrastrukturnih projekata u Srbiji i inostranstvu.

Od 2016. godine zaposlen je u Saobraćajnom institutu CIP u Zavodu za geotehniku. Oženjen je i ima dve čerke.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Душан М. Берисављевић

Број индекса P712/10

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**„Геотехничко моделирање тла на основу параметара одређених
сеизмичким дилатометром”**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 07.03.2017.

Берисављевић Д.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Душан М. Берисављевић

Број индекса P712/10

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада „Геотехничко моделирање тла на основу параметара
одређених сеизмичким дилатометром”

Ментор Проф. др Владимир Чебашек

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 07.03.2017.

Берисављевић 2.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Геотехничко моделирање тла на основу параметара одређених сеизмичким дилатометром“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 07.03.2017.

Светозар Марковић 2.

- 1. Ауторство.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
- 2. Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
- 4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
- 5. Ауторство – без прерада.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
- 6. Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцима, односно лиценцима отвореног кода.