

# Primjena statičkog penetrometra (CPT) u geoinženjerstvu okoliša

---

Mikša, Tajana

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:980468>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Primjena statičkog penetrometra (CPT) u geoinženjerstvu okoliša

---

**Mikša, Tajana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:980468>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Tajana Mikša

PRIMJENA STATIČKOG PENETROMETRA (CPT) U  
GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

Završni rad

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PRIMJENA STATIČKOG PENETROMETRA (CPT) U  
GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

Završni rad

KANDIDAT:

Tajana Mikša

MENTOR:

doc.dr.sc. Boris Kavur

VARAŽDIN, 2018.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: TAJANA MIKŠA

Matični broj: 2316 - 2013./2014.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

PRIMJENA STATIČKOG PENETROMETRA (CPT) U GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

- Rad treba sadržati:
1. Uvod
  2. Statički penetrometar (CPT)
  3. Dodatna osjetila i uređaji
  4. Zaključak
  5. Literatura
  6. Popis slika
  7. Popis tablica
  8. Popis kratica

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 22.03.2018.

Rok predaje: 06.07.2018.

Mentor:

Doc.dr.sc. Boris Kavur



Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

## **IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

**Primjena statičkog penetrometra (CPT) u geoinženjerstvu okoliša**

(naslov završnog rada)

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Borisa Kavura.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, \_\_\_\_\_

Tajana Mikša

## PRIMJENA STATIČKOG PENETROMETRA (CPT) U GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

Student: Tajana Mikša

### SAŽETAK:

U radu suprikazane mogućnosti i prednosti korištenja statičkog penetrometra (CPT) i različitih dodatnih osjetila i uređaja za karakterizaciju onečišćenog tla kojom se omogućava cjelovit uvid u problem pronosa i sudbine onečišćenja u tlu. U uvodnom poglavlju opisana je problematika karakterizacije onečišćenog tla. Uloga statičkog penetrometra, razvoj istog kroz povijest te postupci ispitivanja i identifikacije tipa tla opisani su u drugom poglavlju. U trećem poglavlju opisana su dodatna osjetila i uređaji koji mogu biti korišteni zajedno sa CPT sondom ili samostalno, za mjerenje/detekciju: električne provodljivosti tla EC osjetilom, relativne hidrauličke provodljivosti tla HPT osjetilom, prisutnosti hlapljivih organskih spojeva u tlu i podzemnoj vodi MIP osjetilom, prisutnosti izvorne faze NAPL onečišćivala LIF osjetilom, prisutnosti teških metala u tlu XRF osjetilom, te uređaji za uzorkovanje tla tehnologijom izravnog utiskivanja.

Ključne riječi: statički penetrometar, karakterizacija onečišćenog tla, identifikacija tipa tla, detekcija onečišćivala u tlu

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 2. STATIČKI PENETROMETAR (CPT) .....   | 5  |
| 2.1. Uloga statičkog penetrometra .....                                      | 5  |
| 2.2. Povijest.....   | 6  |
| 2.3. Sonda statičkog penetrometra (CPT) i piezo-penetrometra (CPTu) .....    | 7  |
| 2.4. Potisna oprema .....  | 9  |
| 2.5. Postupak ispitivanja tla .....  | 10 |
| 2.6. Identifikacija tipa tla i stratigrafije.....                            | 11 |
| 3. DODATNA OSJETILA I UREĐAJI .....  | 14 |
| 3.1. EC osjetilo za mjerenje električne provodljivosti tla .....             | 14 |
| 3.2. HPT osjetilo za mjerenje relativne hidrauličke provodljivosti tla ..... | 16 |
| 3.3. MIP osjetilo za detekciju hlapljivih onečišćivala.....                  | 17 |
| 3.4. LIF osjetilo za detekciju NAPL onečišćivala.....                        | 17 |
| 3.5. XRF osjetilo za detekciju teških metala.....                            | 24 |
| 3.6. Uzorkivač za izravno utiskivanje u tlo.....                             | 25 |
| 4. ZAKLJUČAK.....  | 27 |
| 5. LITERATURA .....  | 28 |
| 6. POPIS SLIKA.....  | 30 |
| 7. POPIS TABLICA .....   | 31 |
| 8. POPIS KRATICA.....  | 31 |



## 1. UVOD

Posljednjih godina povećava se broj geoinženjerskih projekata iz domene zaštite okoliša ili otklanjanja i sanacije šteta u okolišu koje su posljedica aktivnosti čovjeka ili pak djelovanja prirodnih pojava. Neki od tih projekata uključuju rješavanje problema onečišćenja tla koja se u njemu mogu pojaviti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju. Jedno od glavnih područja interesa geoinženjerstva okoliša je zaštita tla odnosno sprječavanje njegovog onečišćenja te remedijacija onečišćenog tla.

Pronos i sudbina onečišćujućih tvari u tlu je vrlo kompleksan inženjerski problem koji najčešće zahtjeva multidisciplinarni pristup jer niti jedna od klasičnih tehničkih disciplina nema samostalno dovoljno znanja i alata za njegovo cjelovito sagledavanje i zadovoljavajuće rješavanje [1].

U slučajevima pojave opasnih onečišćenja u tlu i podzemnoj vodi nužno je kao prvi korak obaviti odgovarajuću karakterizaciju koja s jedne strane ima za cilj utvrditi fizikalna, biološka i kemijska svojstva tla koja mogu utjecati na pronos i sudbinu onečišćujućih tvari, a s druge strane, utvrditi koncentraciju i distribuciju tih tvari u tlu i podzemnoj vodi, stupanj njihove izmjene uslijed kemijskih i biokemijskih promjena itd. [1]. Karakterizacija onečišćenog tla tako predstavlja složen inženjerski zadatak naročito kada se radi o vrlo toksičnim tvarima koje za čovjeka mogu biti opasne i pri vrlo niskim koncentracijama [1].

Uobičajene metode karakterizacije onečišćenog tla koje uključuju bušenja istražnih bušotina i klasične tehnike kontinuiranoga uzorkovanja tla podrazumijevaju poduzimanje kompliciranih i skupih zdravstveno-sigurnosnih mjera na terenu, ali i kasnije u laboratoriju. Bušači i drugo osoblje koje je uključeno u provedbu istraživanja treba biti upućeno u sve opasnosti koje se mogu pojaviti na onečišćenoj lokaciji i u kontaktu s onečišćujućim tvarima odnosno odgovarajuće osposobljeni za rad u takvim uvjetima te fizički zaštićeni odgovarajućom osobnom zaštitnom opremom (slika 1). Bušaće alatke su nakon operacije bušenja u onečišćenom tlu kontaminirane te ih treba obavezno dekontaminirati odgovarajućim postupcima (ovisno o vrsti kontaminacije).



Slika 1. Bušaći u zaštitnim odijelima, zaštitnim maskama i uređajima za disanje[2]

Najveći dio uzorkovanog tla, osim reprezentativnih uzoraka odabranih za ispitivanja u različitim laboratorijima, treba odgovarajuće sanitarno odložiti, a bušotine propisno zapuniti brtvenom masom na bazi cementa i bentonita kako bi se uklonili novootvoreni putevi mogućeg širenja onečišćenja tлом i podzemnom vodom. Ako se fizikalna svojstva tla: granulometrijski sastav, poroznost, gustoća, vlažnost, hidraulička provodljivost itd. planiraju odrediti u laboratoriju to može biti vrlo problematično jer geotehnički laboratoriji najčešće nemaju osoblje koje je osposobljeno za rukovanje onečišćenim tлом kao ni odgovarajuću opremu niti prikladne ispitne postupke za takve uzorke [1].

Zbog toga se karakterizaciju onečišćenog tla i detekciju prisutnih onečišćenja nastoji obaviti korištenjem in-situ metoda ispitivanja relevantnih svojstava tla te in-situ analize onečišćujućih tvari kojima se uzorkovanja i manipulacije onečišćenim tлом reduciraju na najmanju moguću mjeru odnosno onoliko koliko je stvarno neophodno [1].

Postupak ispitivanja tla statičkim penetrometrom (engl. Cone Penetration Test, kratica CPT) je danas opće prihvaćena in-situ metoda kojom se dobiva kontinuiran zapis

mjerenih parametara po dubini istraživanog tla. Na temelju CPT mjerenih parametara: otpora na šiljku, trenja na plaštu i pornoga tlaka, moguće je identificirati tipove penetriranoga tla, njegovu stratigrafiju te procijeniti relevantna fizikalna svojstva. Tijekom penetracije, ispitivano tlo se razmiče izravnim utiskivanjem CPT sonde malog poprečnog presjeka (10 ili 15 cm<sup>2</sup>) bez vađenja tla na površinu terena što je u slučaju onečišćenog tla od velike važnosti. Kontakt osoblja, koje rukuje CPT uređajima odnosno obavlja ispitivanja na onečišćenoj lokaciji, s onečišćujućim tvarima je vrlo ograničen, a potrebne zdravstveno-sigurnosne mjere su znatno jednostavnije nego kod klasičnog bušenja ili kopanja istražnih jama jer je ugroza osoblja minimalna. CPT sondu i potisne šipke moguće je relativno jednostavno dekontaminirati zbog njihovog malog promjera i jednostavne konstrukcije. Nakon završetka CPT penetracije, a u fazi izvlačenja CPT sonde i potisnih šipki, nastala bušotina maloga promjera, ispunjava se injektiranjem odgovarajuće cementno-betonitne smjese [1].

U zadnjih 20-25 godina, na principu ispitivanja statičkim penetrometrom odnosno tehnologije izravnog utiskivanja (engl. „direct-push technology“) u tlo, razvijen je čitav niz osjetila i uređaja koji se najčešće koriste u različitim kombinacijama sa CPT sondom ili samostalno sa svrhom dodatne in-situ karakterizacije onečišćenog tla, detekcije različitih tipova onečišćujućih tvari u tlu i podzemnoj vodi, te uzorkovanja tla, podzemne vode i para u tlu itd. [1]. Dodatnim osjetilima i uređajima moguće je primjerice mjeriti električnu provodljivost tla tzv. EC osjetilom (engl. „electrical conductivity“, kratica EC) da se dobije dodatni podatak radi lakše identifikacije stratigrafskih granica i tipova tla, izmjeriti relativnu hidrauličku provodljivost tla tzv. HPT osjetilom (engl. „hydraulic profiling tool“, kratica HPT) radi procjene uvjeta i mogućnosti pronosa onečišćujućih tvari u tlu, detektirati prisutnost i procijeniti koncentraciju hlapljivih organskih spojeva u tlu i podzemnoj vodi tzv. MIP osjetilom (engl. „membrane interface probe“, kratica MIP), detektirati tip i stanje izvorne faze tzv. NAPL (engl. **n**on-**a**queous **p**hase **l**iquid) onečišćivala primjenom inducirane fluorescencije takvih spojeva svjetlom pomoću LIF osjetila (engl. „laser induced fluorescence“, kratica LIF) ili rendgenskim zrakama (engl. „x-ray fluorescence“, kratica XRF) pomoću tzv. XRF osjetila radi detekcije prisutnosti teških metala u tlu itd. Na temelju podataka registriranih navedenim osjetilima moguće je racionalizirati proces uzorkovanja tla i podzemne vode odnosno napraviti ciljano uzorkovanje u kritičnim zonama s detektiranim onečišćenjima.

Cilj ovoga rada je prikazati mogućnosti i prednosti korištenja statičkog penetrometra (CPT) pri karakterizaciji onečišćenog tla, te prikazati dio raspoložive tehnologije izravnog utiskivanja različitih dodatnih osjetila i uređaja u kombinaciji sa CPT sondom sa svrhom sigurne i efikasne in-situ karakterizacije onečišćenog tla radi pružanja mogućnosti valjane analize problema pronosa i sudbine onečišćenja u tlu kao i remedijacije onečišćenog tla.

U drugom poglavlju rada opisat će se mjerna i potisna oprema, postupak ispitivanja statičkim pentrometrom te načini identifikacije tipova tla i određivanja stratigrafskih granica među različitim slojevima na temelju registriranih CPT mjernih parametara.

U trećem poglavlju rada prikazat će se dodatna in-situ osjetila i uređaji za uzorkovanje tla izravnim utiskivanjem pomoću CPT potisne opreme te ukratko opisati njihova primjena i način rada pri karakterizaciji onečišćenog tla.

## 2. STATIČKI PENETROMETAR (CPT)

### 2.1. Uloga statičkog penetrometra

Ciljevi geotehničke karakterizacije tla su odrediti sljedeće:

- Sastav tlate slijed i granicemeđu slojevima (geološki režim)
- stanje podzemnih voda (hidrološki režim)
- fizička i mehanička svojstva slojeva tla

Za geoinženjerska istraživanja na mjestima gdje su moguće prisutna onečišćenja, navedeni ciljevi imaju dodatan uvjet za utvrđivanje, a to je određivanje distribucije, količine i koncentracije onečišćujućih tvari. Onečišćenja mogu biti prisutna u plinovitom, tekućem ili krutom stanju.

Raznolikost u geološkim uvjetima i raspon u zahtjevima projekta su često kompleksni. Postoje mnoge tehnike kako bi se zadovoljili ciljevi istraživanja koji uključuju terenska istraživanja i istraživanja u laboratoriju. Idealni istražni program uključuje „in-situ“ i laboratorijska istraživanja [3].

Pokus statičkim penetrometrom (CPT) i njegove poboljšane verzije s dodatnim osjetilima imaju veliku primjenu u širokom rasponu tla. Iako je CPT prvenstveno ograničen na mekana tla, s modernom opremom za utiskivanje i robusnijom izvedbom sonde, može se koristiti i u čvrstim tlima, a u nekim slučajevima i u mekim stijenama [4].

Prednosti statičkog penetrometra (CPT-a) [4]:

- brzo i kontinuirano profiliranje
- ponovljivi i pouzdani podaci (neovisni o operateru)
- ekonomičnost i produktivnost
- snažna teorijska osnova za interpretaciju podataka
- moguća dodatna osjetila

Nedostaci statičkog penetrometra (CPT-a) [4]:

- visoki kapitalni troškovi
- potrebni su kvalificirani ispitivači
- nema uzorka tla
- penetracija može biti ograničena u šljunkovitom tlu

## 2.2. Povijest

Pokus statičkog penetrometra je in-situ tehnika ispitivanja koja se koristi za određivanje tipa tla i geotehničko-inženjerskih svojstava bez uzimanja uzorka. CPT je jedna od najkorištenijih metoda in-situ ispitivanja tla širom svijeta. U povijesti, CPT je bio neučinkovit za vrlo mekana tla, interpretacija podataka bila je zahtjevna, penetracija je bila relativno plitka i dr.

1932. godina

CPT razvijen je 1932.godine u Nizozemskoj. Prvi statički penetrometri sastojali su se od plinske cijevi vanjskog promjera 35 mm s unutarnjom čeličnom šipkom promjera 15 mm koja se mogla slobodno vertikalno kretati unutar plinske cijevi. Šiljak je bio površine  $10 \text{ cm}^2$  s konusom od  $60^\circ$  pričvršćen na unutarnje čelične šipke. Maksimalna dubina penetracije bila je 10-12 metara, dok se otpor očitavao na manometru [4].

1935. godina

Delft Laboratorij za mehaniku tla izradio je prvi ručni penetracijski stroj.

1948. godina

Daljnijim razvojem konstruirani su mehanički penetrometri koji se i danas dosta koriste (u Nizozemskoj) zbog jednostavnosti ispitivanja i ekonomičnog održavanja. Oni mjere silu koja je potrebna za utiskivanje šiljka u tlo, a ta se sila mjeri manometrom koji se nalazi na površini tla. Rezultati mjerenja mehaničkim penetrometrom prihvatljivi su za homogena tla, ali ne i za mekana. Izvorni nizozemski mehanički šiljak poboljšan je dodavanjem plašta iznad samog vrha šiljka. Cilj novog modela bio je blokiranje ulaska tla u prazninu između kućišta i unutarnjih šipki.

1953. godina

Novi model sadrži mjerenje lokalnog trenja na rukavcu koji se nalazi iznad šiljka. Mjerenja su se ponavljala svakih 20 cm i po prvi puta korišten je omjer trenja i otpora na šiljku za identifikaciju tipa tla [4].

1965. godina

Razvijen je električni statički penetrometar čiji su oblik i dimenzije osnova za moderne standardne statičke penetrometre [4].

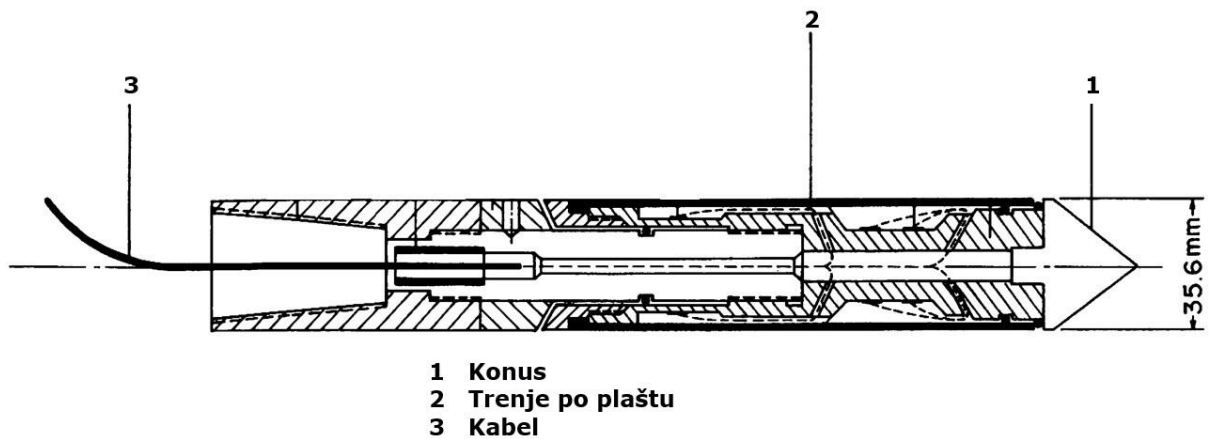
1974. godina

Razvijen je novi model statičkog penetrometra ili tzv. piezo-penetrometar pomoću kojeg je moguće mjerenje pornog tlaka u tlu. Uređaj za mjerenje pornog tlaka može biti smješten na samom šiljku ili između šiljka i plašta za mjerenje trenja, što je i standardan slučaj [4].

### 2.3. Sonda statičkog penetrometra (CPT) i piezo-penetrometra (CPTu)

Osnovna oprema za ispitivanje se sastoji od: sonde statičkog penetrometra, potisne opreme (za utiskivanje) i sustava za prikupljanje mjernih podataka.

Sonde statičkog penetrometra (slika 2) proizvode se danas u dvije standardne veličine poprečnog presjeka: 10 cm<sup>2</sup> i 15 cm<sup>2</sup>. Ipak, postoje i mini-sonde vrlo malog poprečnog presjeka od 2 cm<sup>2</sup> i sonde velikog poprečnog presjeka od 40 cm<sup>2</sup>. Mini-sonde se koriste za vrlo plitka ispitivanja tla, dok se sonde velikog poprečnog presjeka koriste šljunčanim tlima [4].



Slika 2. Poprečni presjek sonde statičkog penetrometra (CPT)(modificirano iz [5])

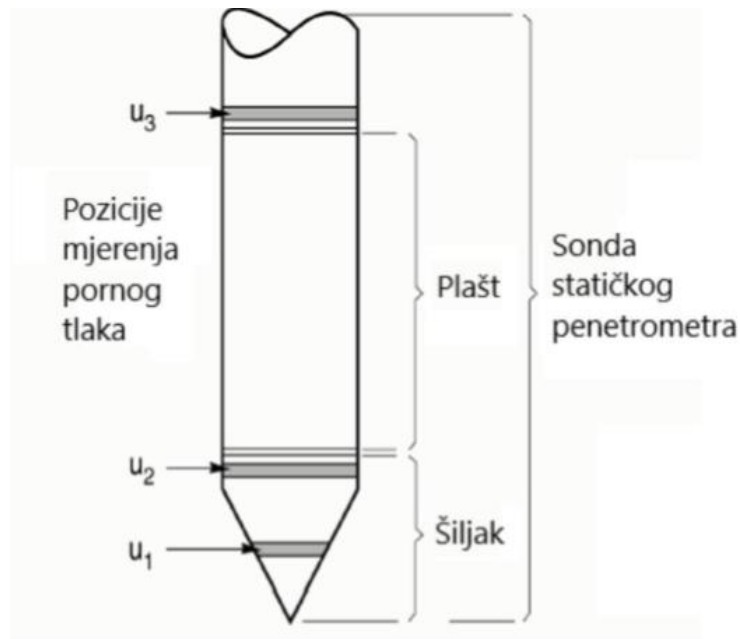
Statički piezo-penetrometar (engl. Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurements, kratica CPTu) je penetrometar kojem je sonda opskrbljena uređajem za mjerenje pornog tlaka u tlu. Uređaj za mjerenje pornog tlaka može biti smješten na šiljku ili neposredno ispod rukavca (plašt) za mjerenje trenja odnosno iza šiljka, kao što je prikazano na slici 3.

CPTu mjeri otpor prodiranja šiljka, trenje na plaštu i porni tlak. Porni tlak mjeri se mjernim pretvornikom tlaka. Registrirane promjene pornoga tlaka omogućavaju dobru identifikaciju tipa tla. Visoki generirani porni tlak ukazuje na penetraciju u sitnozrnatom tlu poput gline.

Ukoliko se penetracija obavlja u pijesku obično se pojavljuje visok otpor prodiranja šiljka, relativno nizak koeficijent trenja po plaštu uz niske vrijednosti pornoga tlaka. U normalno konsolidiranim glinama javlja se relativno nizak otpor prodiranja šiljka, visok koeficijent trenja po plaštu i često relativno visoki generirani porni tlak.

Prednost ispitivanja CPT, odnosno CPTu verzijom penetrometra je dobivanje pouzdanog i ponovljivog kontinuiranog zapisa mjernih podataka po dubini istraživanog tla.





Slika 3. Shema statičkog piezo-penetrometra (modificirano iz [1])

#### 2.4. Potisna oprema

Potisna oprema sastoji se od potisnih šipki, hidrauličkih cilindara za potiskivanje i reakcijskog sustava. Ključna zadaća potisne opreme je statičko utiskivanje sonde penetrometra u tlo. CPT se može izvoditi u tlu i na vodi. Pokusi u tlu najčešće se izvode potisnom opremom koja je montirana na teški kamion (slika 4) ili gusjeničar ili pomoću malih mobilnih strojeva koje je potrebno usidriti u tlu da bi se osigurala potrebna reakcija za utiskivanje [4].

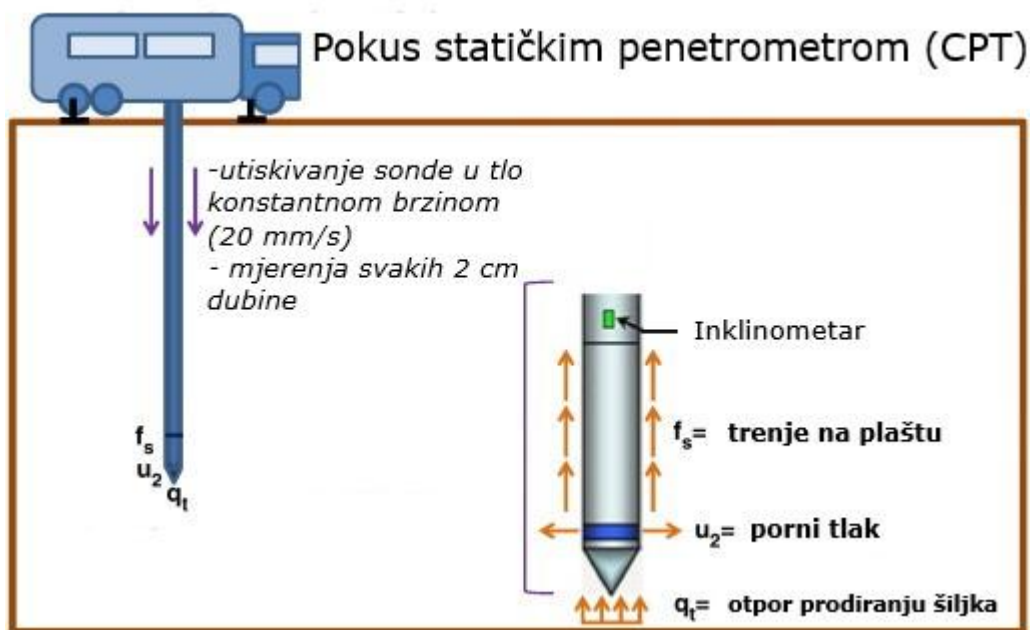


Slika 4. CPT kamion [6]

## 2.5. Postupak ispitivanja tla

Nakon dolaska na lokaciju istraživanja slijedi postavljanje potisne opreme CPT-a. Pomoću hidrauličkih dizalica, CPT kamion s opremom se podiže iznad površine tla kao što je prikazano na slici 5. CPT ispitivanje se provodi utiskivanjem sonde statičkog penetrometra u tlo konstantnom brzinom (20 mm/s) pri čemu se kontinuirano obavljaju mjerenja (mjerni podatak svakih 2 cm dubine): sile otpora prodoru šiljka, sile trenja na plaštu, porna tlaka, nagiba sonde itd. Sonda se utiskuje u tlo hidrauličkom potisnom opremom koja je smještena unutar kamiona.

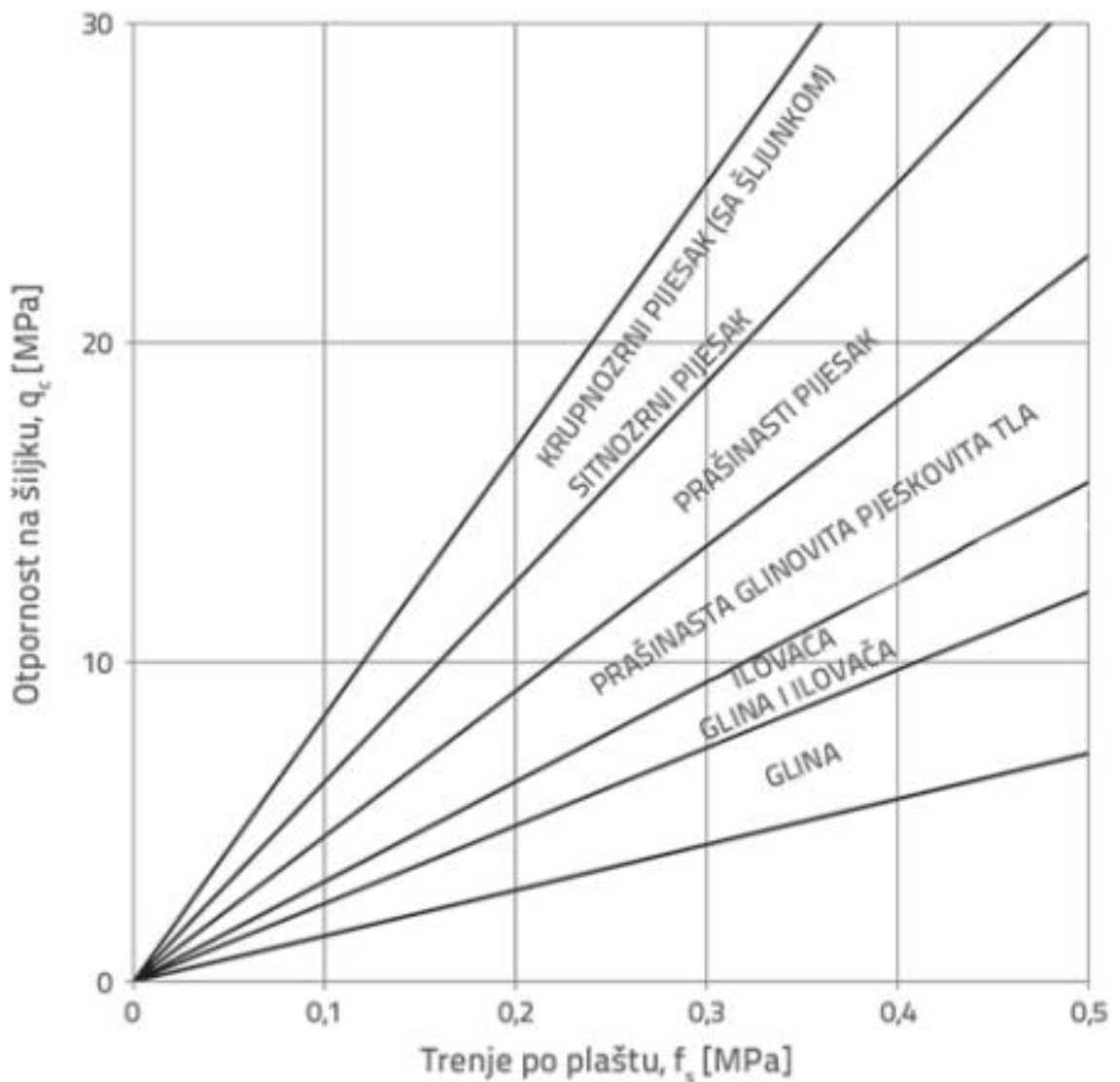
Ukupni otpor prodiranju šiljka ( $q_c$ ) je omjer ukupne sile koja djeluje na šiljku ( $Q_c$ ) i površine šiljka ( $A_c$ ). Dok trenje na plaštu ( $f_s$ ) daje omjer ukupne sile trenja na plaštu ( $F_s$ ) i površine plašta ( $A_s$ ) [3].



Slika 5. Shema prikaza pokusa statičkim penetrometrom(modificirano iz [7])

## 2.6. Identifikacija tipa tla i stratigrafije

Prvi dijagram za identifikaciju tipa tla na temelju CPT pokusa predložio je Begemann 1965.godine (slika 6). On je utvrdio da krupnozrnata tla imaju veće vrijednosti otpora na šiljku ( $q_c$ ) i trenja na plaštu ( $f_s$ ) od sitnozrnatih tala. Begemannov dijagram ovisnosti trenja na plaštu ( $f_s$ ) i otpora na šiljku ( $q_c$ ) temeljen je na mehaničkom šiljku u nizozemskim tlima i vezan je na geološke uvjete na kojima je razvijen, te iz tog razloga danas nema široku primjenu. Taj dijagram je primjenjiv samo za mehanički tip CPT-a odnosno ne može se koristiti za interpretaciju standardnih električnih CPT-a.



Slika 6. Begemann-ov dijagram za identifikaciju tipa tla[8]

Nakon toga razvijene su mnoge inačice takvog dijagrama. 1986. godine Robertson je uveo korekciju otpora na šiljku i predložio drugačiji dijagram. Na os ordinata nanosi se otpor prodiranju šiljka, dok se na os apscisa nanosi trenje na plaštu [8].

CPT ne može pružiti procjenutipa tla na temelju njegovih fizičkih karakteristika (veličina zrna) već samo na temelju mehaničkog ponašanja tla tijekom penetracije [4].

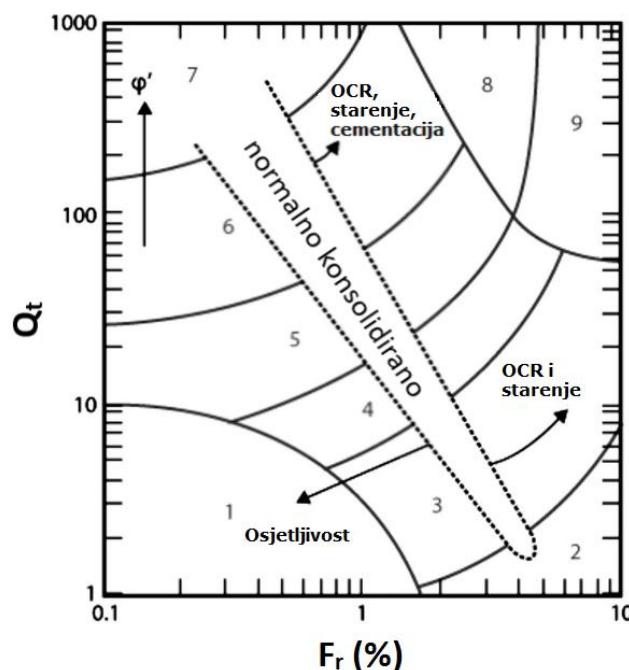
## NORMALIZIRANI SBT DIJAGRAMI

Budući da otpor na šiljku i trenje na plaštu rastu s povećanjem dubine uslijed porasta vertikalnog efektivnog naprežanja, moguće su pogreške u interpretaciji tipa tla, ako se ta činjenica ne uzme u obzir. U istom tipu tla će tako dijagrami koji nisu temeljeni na normaliziranim parametrima, uputiti na promjenu tipa tla samo zbog porasta otpora na šiljku s povećanjem dubine.

Normalizirani SBT (engl. Soil Behaviour Type, kratica SBT) dijagram za identifikaciju tipa tla prema njegovom mehaničkom ponašanju tijekom penetracije predložio je Robertson 1990. godine i takav se dijagram danas najčešće koristi.

Parametri za identifikaciju tipa tla SBT dijagramom su sljedeći [4]:

- normalizirani otpor na šiljku ( $Q_t$ )
- normalizirani koeficijent trenja ( $F_r$ ).



### TIPOVI PONAŠANJA TLA

1. osjetljiva sitnozrnata tla
2. organska tla - treset
3. gline do prašinate gline
4. prahovi; glinoviti prahovi do prašinate gline
5. pijesci; prašinati pijesci do pjeskoviti prahovi
6. pijesci; čisti pijesci do prašinati pijesci
7. šljunkoviti pijesci do pijesci
8. vrlo zbijeni pijesci do glinoviti pijesci
9. vrlo kruta sitnozrnata tla

Slika 7. Normalizirani SBT dijagram tipa ponašanja tla (modificirano iz [9])

U tablici 1. prikazani su tipovi ponašanja tla prema zonama (1-9) s pripadajućim indeksom tipa ponašanja tla ( $I_c$ ).

Tablica 1. Tablica normaliziranog tipa ponašanja tla [4]

| Zona | Tip ponašanja tla  | $I_c$        |
|------|--|--------------|
| 1    | Osjetljivo, sitnozrnato tlo                              | Bez podataka |
| 2    | Organsko tlo do glina                                    | >3.6         |
| 3    | Gline – prašinasta glina do glina                        | 2.95 – 3.6   |
| 4    | Mješavine praha – glinoviti prahovi do prašinasta glina  | 2.60 – 2.95  |
| 5    | Mješavine pijeska – prašinski pijesak do pjeskoviti prah | 2.05 – 2.60  |
| 6    | Pijesci – čisti šljunak do prašinski pijesak             | 1.31 – 2.05  |
| 7    | Šljunkoviti pijesak do zbijeni pijesak                   | <1.31        |
| 8    | Vrlo kruti pijesak do glinoviti pijesak*                 | Bez podataka |
| 9    | Vrlo kruto sitnozrnato tlo                               | Bez podataka |

Radi pojednostavljenja SBT dijagrama, parametri ( $Q_t$ ) i ( $F_r$ ) mogu se kombinirati u jedan parametar tzv. indeks tipa ponašanja tla ( $I_c$ ) koji predstavlja radijus koncentričnih kružnica kojim su definirane granice tipova tla na originalnom SBT dijagramu kako je prikazano na slici 7. Indeks tipa ponašanja tla ( $I_c$ ) definiran je sljedećom relacijom [4]:

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

Gdje je [10]:

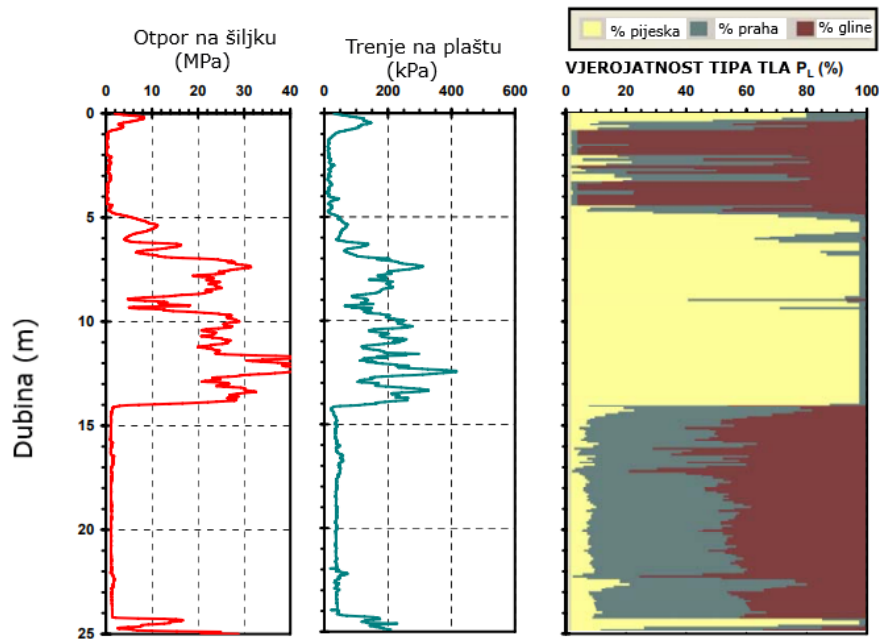
$Q_t$  = normalizirani otpor na šiljku statičkog penetrometra (bezdimezionalan parametar)

$$= (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$$

$F_r$  = normalizirani koeficijent trenja

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

Na temelju rezultata statičkog penetrometra moguće je tzv. probabilističkom metodom procijeniti vjerojatnost udjela frakcije pijeska, praha i gline u istraživanom tlu (slika 8).



Slika 8. Vjerojatnost određenog tipa tla pomoću CPT-a(modificirano iz [6])

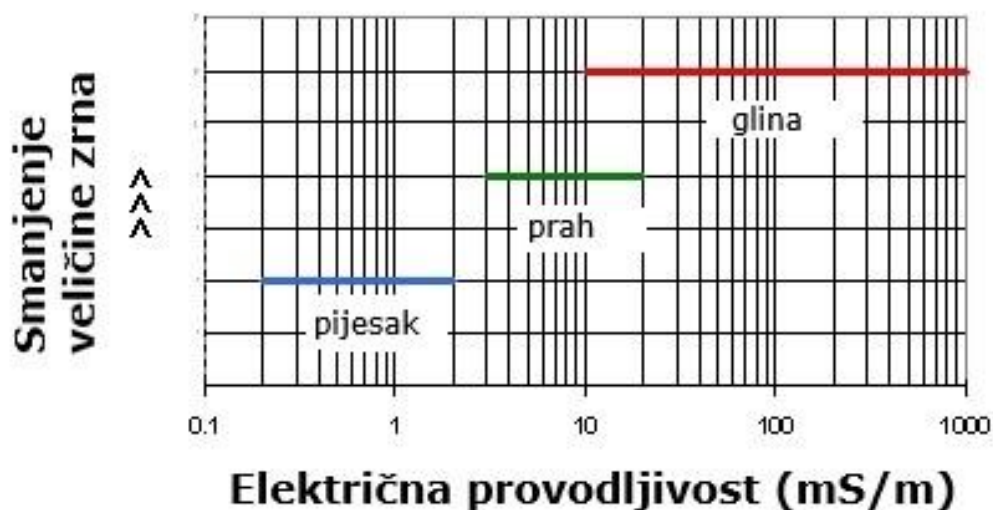
### 3. DODATNA OSJETILA I UREĐAJI

#### 3.1. EC osjetilo za mjerenje električne provodljivosti tla

Mjerenje električne provodljivosti tla moguće je zajedno sa CPTU sondom ili samostalno radi određivanja stratigrafije i identifikacije tipa tla, detekcije saliniteta podzemne vode i onečišćenja tla. Provodljivost općenito varira s veličinom zrna. Sitnozrnata tla poput praha ili gline imaju veću električnu provodljivost nego krupnozrnata tla kao pijesak i šljunak (slika 9). EC se često koristi za karakterizaciju onečišćenih lokacija. Područja niske provodljivosti ukazuju na krupnozrnate, propusnije materijale.

EC osjetilo (slika 10) se lako može kombinirati i sa drugim osjetilima.

## Tipične vrijednosti električne provodljivosti za određene tipove tla



Slika 9. Prikaz ponašanja električne provodljivosti na temelju veličine zrna(modificirano iz [11])



Slika 10. EC osjetilo i mjerna oprema[11]

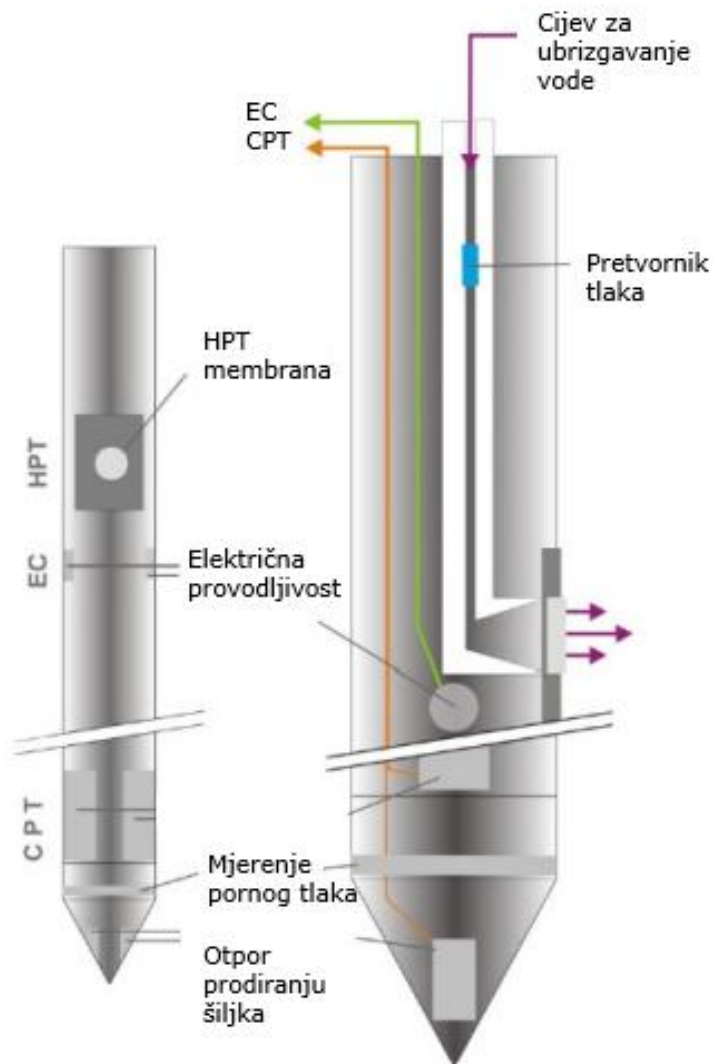


### 3.2. HPT osjetilo za mjerenje relativne hidrauličke provodljivosti tla

Mjerni pretvornik tlaka mjeri hidraulički otpor tla, odnosno sustava podzemne vode prema količini ubrizgane vode HPT-om. Voda penetrira u slojeve ovisno o hidrauličkim svojstvima tla. Niska vrijednost hidrauličke provodljivosti javlja se u većini slučajeva u sitnozrnatom tlu, dok su visoke vrijednosti hidrauličke provodljivosti prisutne u krupnozrnatom tlu. HPT osjetilo se uspješno koristi za otkrivanje potencijalnih puteva migracije onečišćenja[12].

Na temelju zapisa HPT osjetila mogu se odrediti propusne zone, potencijalni procesi pronosa onečišćenja i dr.

Na slici 11 prikazana je shema HPT osjetila zajedno sa EC osjetilom.



Slika 11. HPT osjetilo (modificirano iz [13])



### 3.3.MIP osjetilo za detekciju hlapljivih onečišćivala

Tzv. MIP osjetilo ili membranska sonda s grijačem koristi se za detekciju hlapljivih organskih spojeva (engl. **v**olatile **o**rganic **c**ompound, kratica VOC), kao što su tetrakloreteni, trikloreteni i aromatski ugljikovodici.

MIP osjetilo ima hidrofobnu, propusnu membranu kroz koju lako prolaze hlapljiva organska onečišćivala u plinovitom stanju. Grijač ispod membrane uzrokuje prijelaz prisutnih onečišćenja u plinovito stanje. Onečišćivala koja prođu kroz membranu bivaju transportirana pomoću inertnog dušika do plinskog kromatografa kojim se obavlja analiza uzorka.

MIP osjetilose koristi u nezasićenim i zasićenim zonama tla za detekciju onečišćenja u izvornoj tekućoj fazi, otopljenoj (vodenoj) fazi ili u plinovitom stanju koje se javlja u nezasićenom tlu. MIP se prvenstveno koristi za pronalaženje izvora onečišćenja, ali i za njegovo praćenje (širenje oblaka onečišćenja u podzemnoj vodi).

MIP osjetilo je prikazano na slici 12.



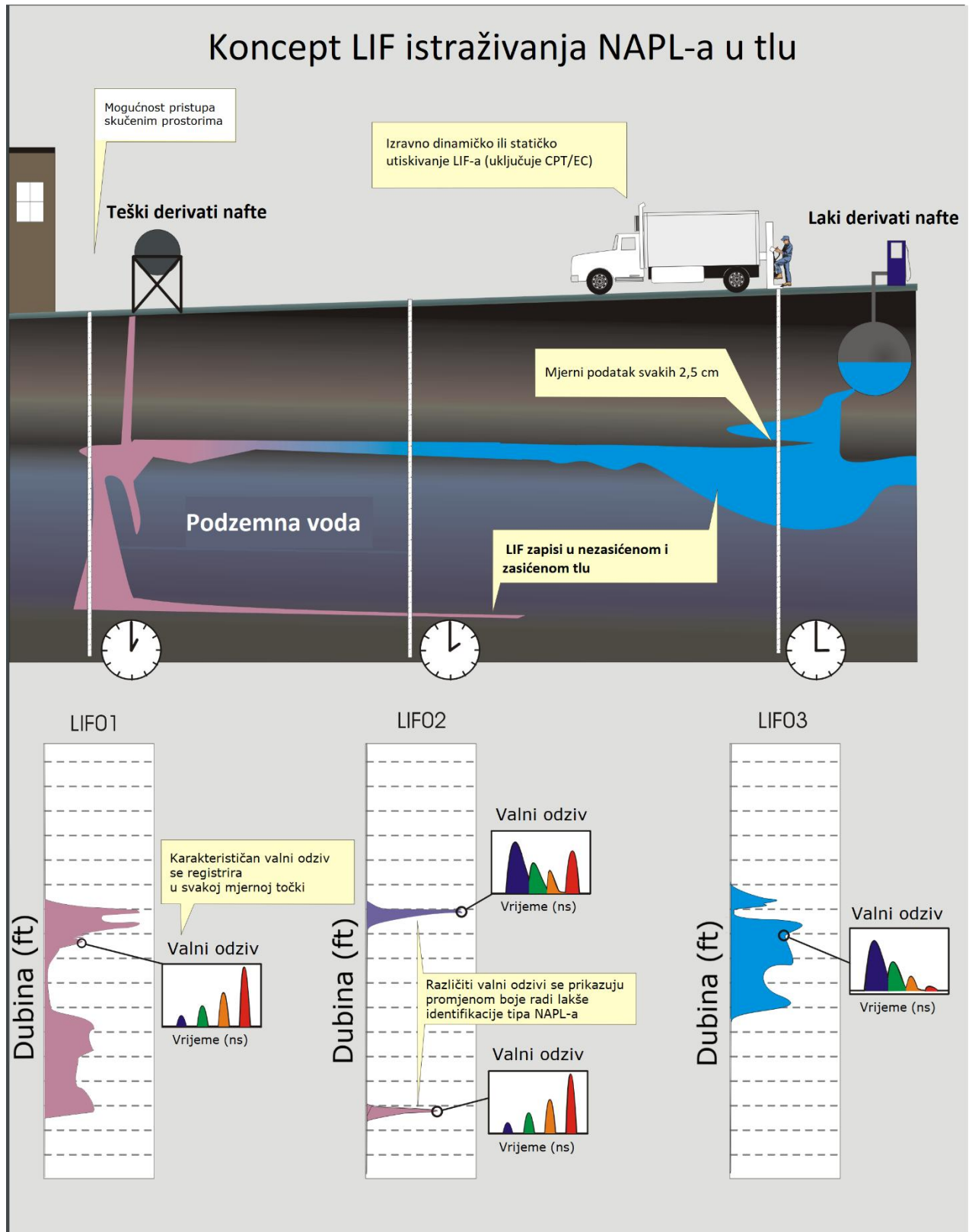
Slika 12. Osjetilo MIP[14]

### 3.4.LIF osjetilo za detekciju NAPL onečišćivala

Tzv. LIF osjetilo ili optička sonda se koristi za detekciju NAPL (engl. **n**on-**a**queous **p**hase **l**iquid, kratica NAPL) onečišćivala (slika 13). LIF osjetilo se zasniva na pojavi fluorescencije kod većine PAH (engl. **p**olycyclic **a**romatic **h**ydrocarbon, kratica PAH) spojeva (policiklički aromatski ugljikovodici, goriva, ulja) nakon izlaganja djelovanju fotona.

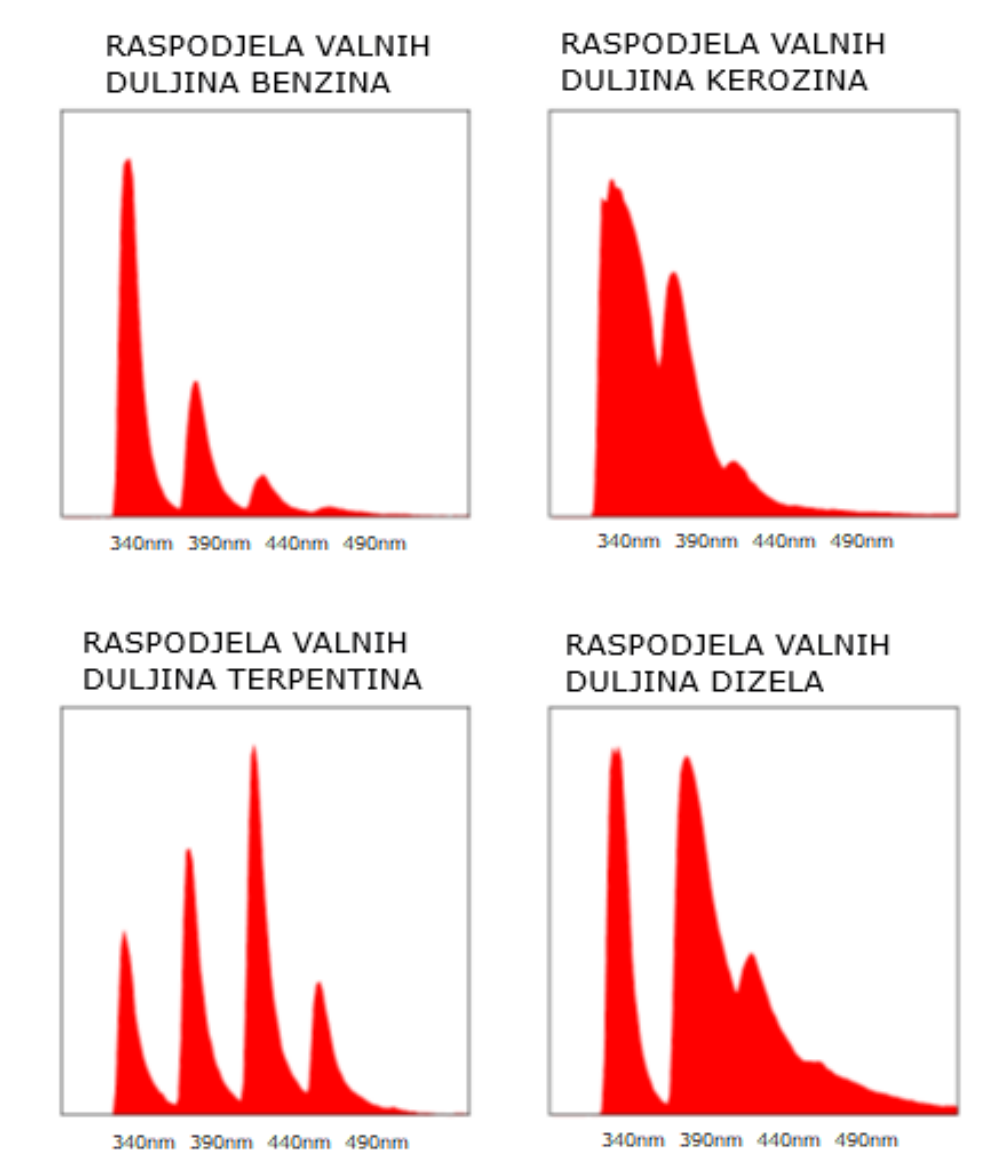
Policiklički aromatski ugljikovodici su jako fluorescentni zbog molekularne strukture. Općenito, ultra-ljubičasto svjetlo (UV) koristi se za pobuđivanje PAH spojeva i

zauzvrat proizvodi ljubičastu do zelenu fluorescenciju. Nafta gotovo uvijek sadrži dovoljno PAH spojeva koji mogu biti detektirani LIF-om.

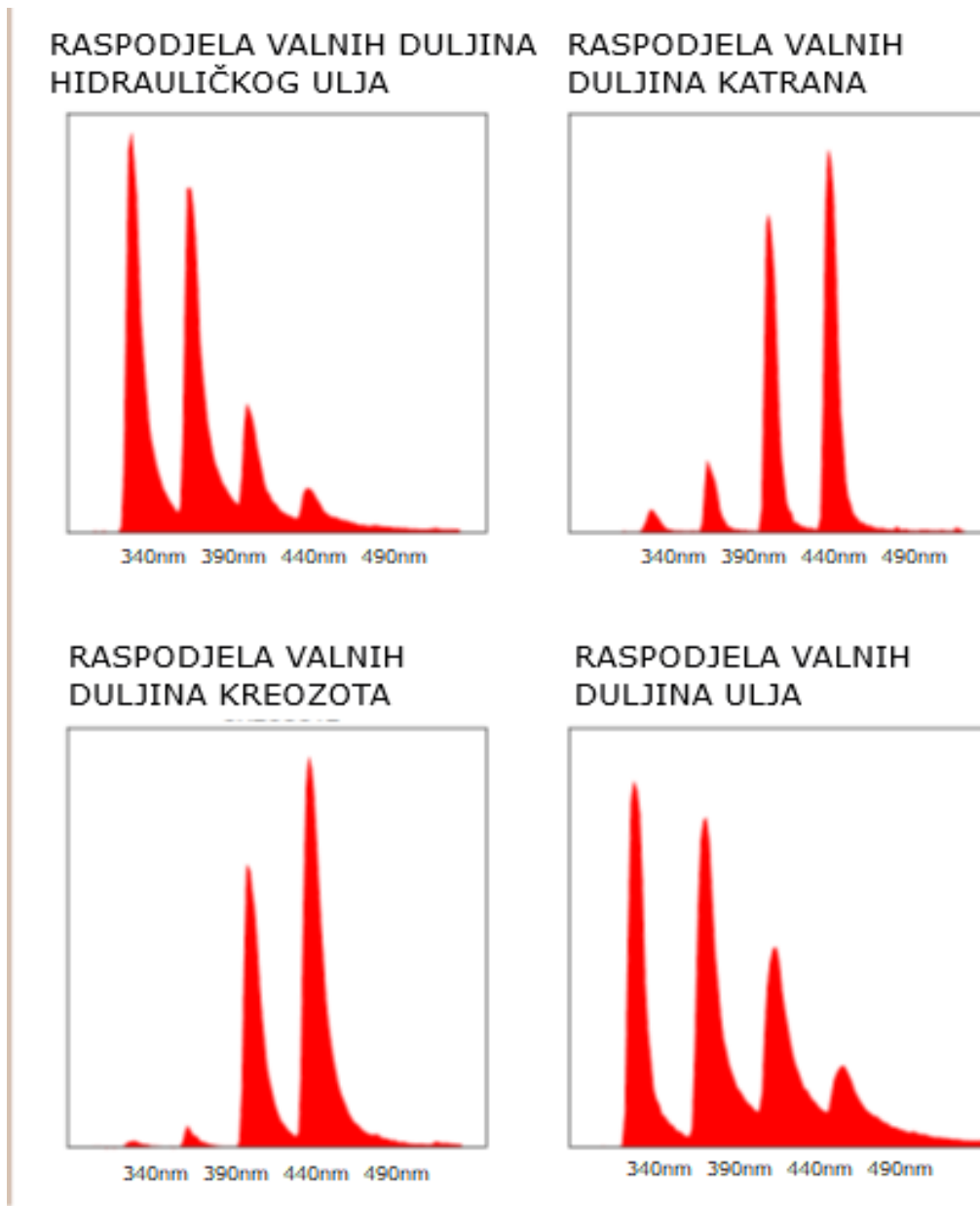


Slika 13. Koncept LIF istraživanja NAPL-a u tlu (modificirano iz [15])

Različiti PAH spojevi daju karakterističan odziv fluorescencije koja se registrira na kanalima različitih valnih duljina pomoću LIF tehnologije. Različiti PAH spojevi imaju tipične odzive fluorescencije tzv. „fingerprint“ pomoću kojih se mogu identificirati. Neki od karakterističnih odziva su prikazani na slikama 14 a) i 14 b).



Slika 14 a). Karakteristični fluorescentni odzivi („fingerprint“)dobiveni LIF tehnologijom za različita onečišćivala(modificirano iz [16])



Slika 14 b). Karakteristični fluorescentni odzivi („fingerprint“)dobiveni LIF tehnologijom za različita onečišćivala(modificirano iz [16])

Vrlo sofisticirana i robusnavorzija LIF tehnologije je tzv. UVOST sustav koji pouzdano detektira NAPL onečišćivala, kao što su benzin, dizel, sirova nafta, kerozin i drugi ugljikovodici.

UVOST sustav se može koristiti s bilo kojom vrstom tzv. „direct push“(izravno utiskivanje) tehnologije.

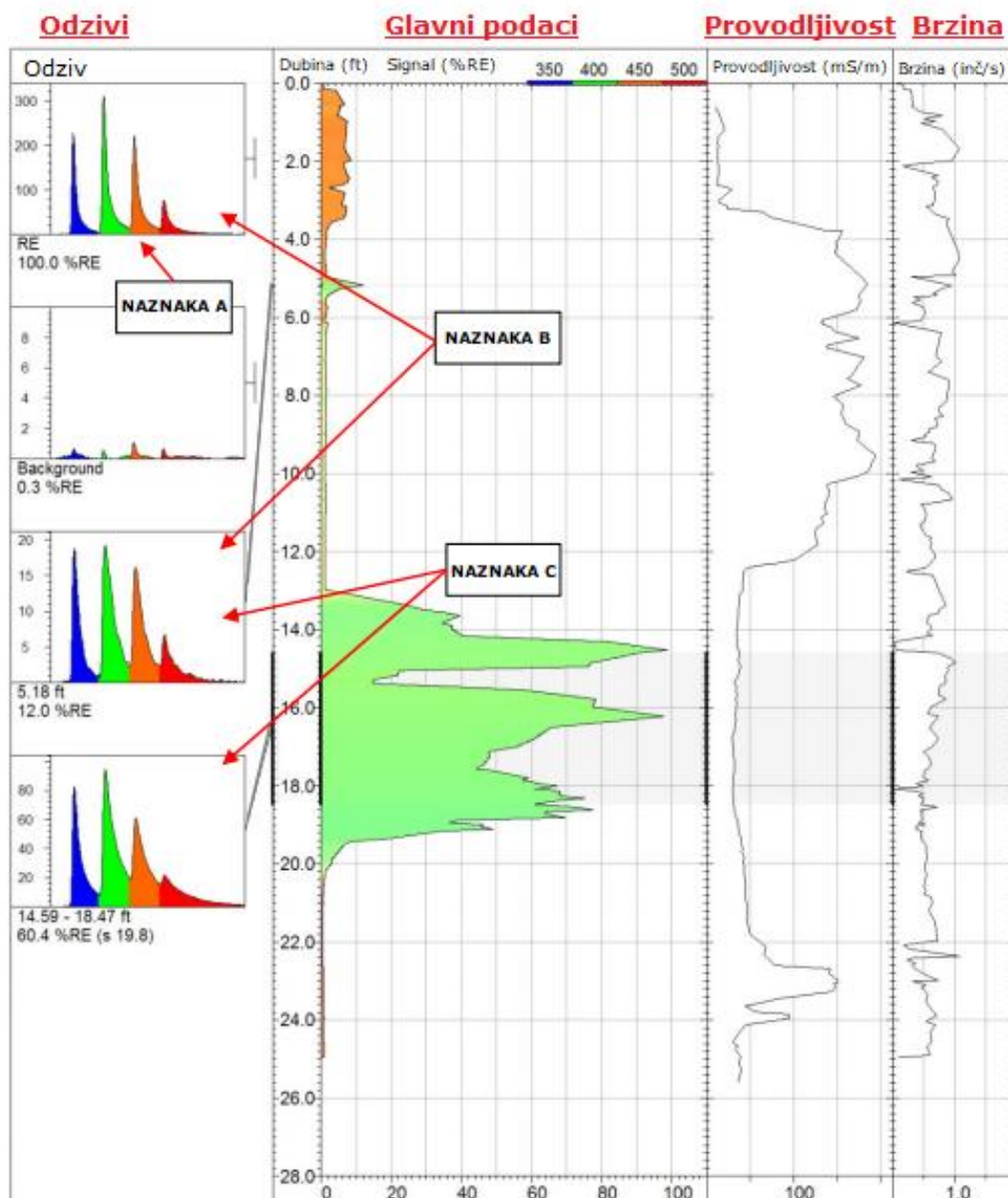
Prednosti UVOST-a [15]:

- Podaci u stvarnom vremenu (ukazuju na lokaciju uzorkovanja)
- Informacije na licu mjesta bez prenošenja ili skladištenja uzoraka
- Brzo istraživanje
- Obojeni kodirani dijagrami (vrhunski kvalitativni podaci)
- Visoka osjetljivost (granice detekcije)
- Dokazana tehnologija

Od prvog korištenja 1997.godine UVOST LIF sustav se uspješno primjenjuje i validiran je uzorkovanjem i laboratorijskim ispitivanjima na brojnim projektima.

PAH spojevi fluoresciraju i emitiraju različite valne duljine. Fluorescirano svjetlo seregistrira pomoću četiri kanala od kojih svaki detektira određeni raspon valnih duljina.

Na slici 15 prikazani su rezultati ispitivanja tla UVOST-om.



Slika 15. Prikaz rezultata istraživanja UVOST-om(modificirano iz [15])

**Naznaka A:**

Na apscisi dijagrama je vrijeme, a na ordinati napon u milivoltima (mV). Takav odziv („fingerprint“ ili „callout“) odgovara količini svjetla koja se registrira foto-osjetilom.

**Naznaka B:**

Registrirani su odzivi s različitim valnim oblicima. U gornjem dijagramu radi se o mješavini NAPL-ova, a u donjem o dizelskom gorivu.

### Naznaka C:

Može se prikazati jedna određena dubina (treći odziv) ili raspon dubina (četvrti odziv). Raspon je zabilježen na osi dubine punom linijom.

Odzivi na slici 15 su prikazani iz odabranih dubina ili raspona dubina. U svakom odzivu su četiri vrha zbog fluorescencije registrirane na četiri valne duljine (tzv. „kanali“). Svakom od tih „kanala“ dodijeljena je zasebna boja. Različiti NAPL-ovi imat će jedinstven odziv („callout“) kako je opisano (vidi slike 16 i 17).

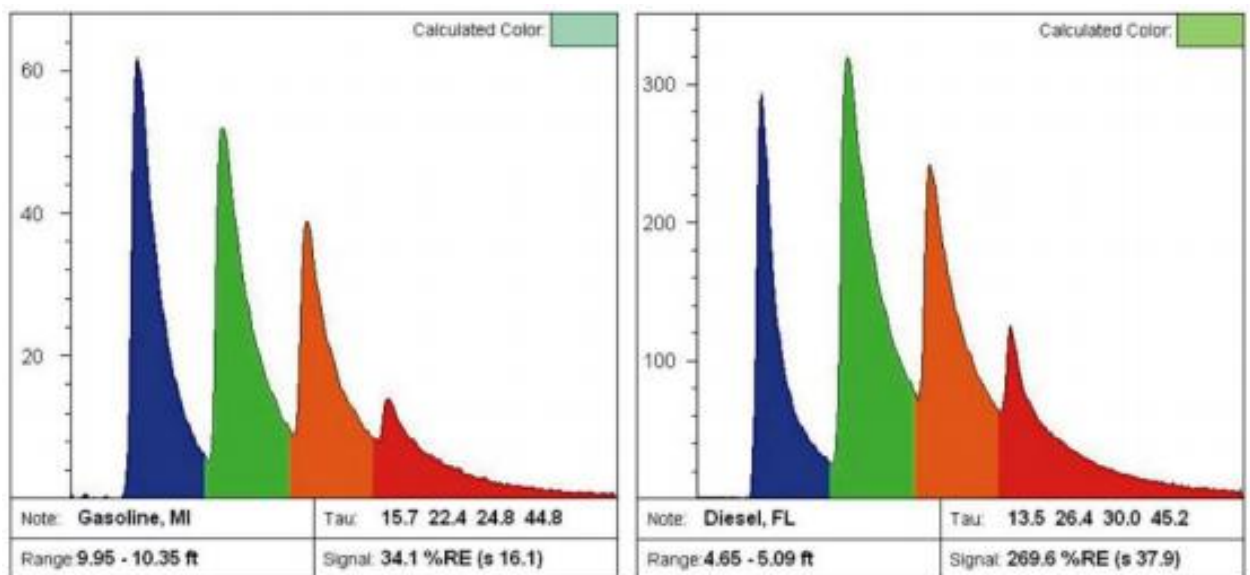
Električna provodljivost (EC) tla može se detektirati istodobno s podacima UVOST-a kao u primjeru prikazanom na slici 15. EC ukazuje na stratigrafiju tla. Pad električne provodljivosti odgovara pojavi pijeska, a povećanje sitnozrnatom tlu (prah ili glina).

Standardna brzina utiskivanja LIF odnosno UVOST sonde je 2 cm/s. Znatna pad brzine prodiranja ukazuje na pojavu šljunka odnosno teže uvjete penetracije.

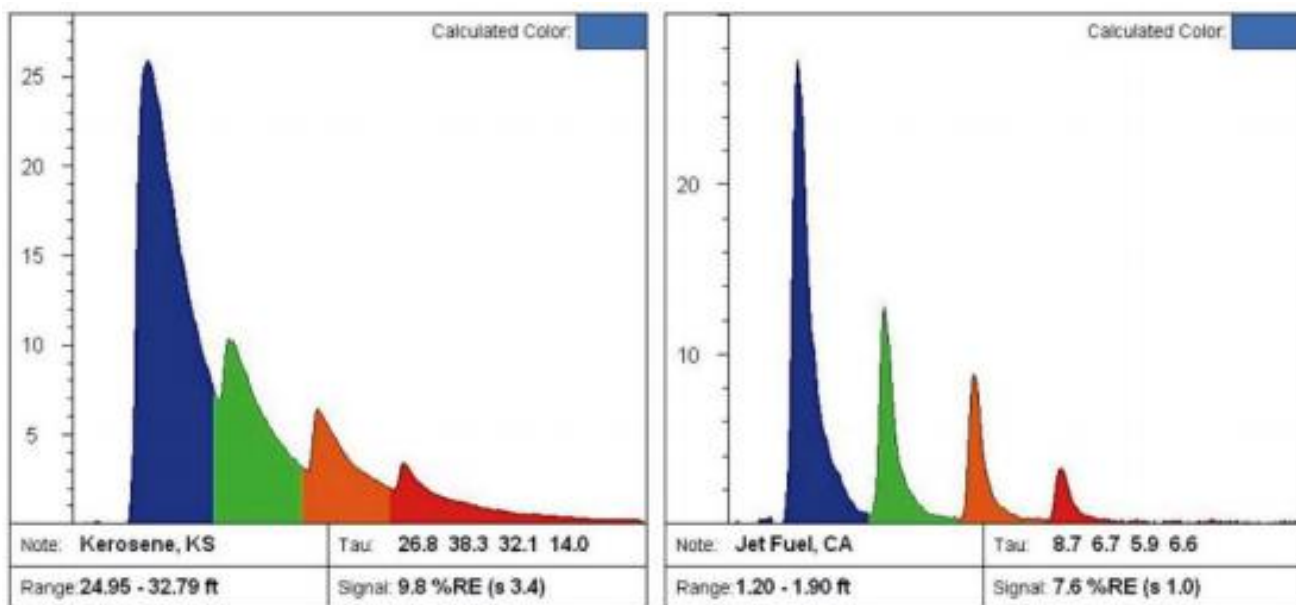
Napomena:

Ispitivanje prikazano na slici 15 nije prekinuto zbog „odbijanja“ penetracije, već proizvoljno (nagli pad brzine na konačnoj dubini).

Za cjelovito sagledavanje odnosno analizu problema onečišćenog tla kao i poduzimanje uspješnog remedijacijskog tretmana potrebno je detaljno poznavanje distribucije onečišćenja u tlu. LIF odnosno UVOST tehnologija može dati takve podatke. Tradicionalnim tehnikama uzorkovanja tla i podzemnih voda se ne mogu dobiti takvi kontinuirani podaci [15].



Slika 16. Dijagram lijevo prikazuje LIF odziv benzina, a dijagram desno LIF odziv dizela [15]



Slika 17. Dijagram lijevo prikazuje LIF odzivkerozina,a dijagram desno LIF odzivmlaznog goriva [15]

### 3.5.XRF osjetilo za detekciju teških metala

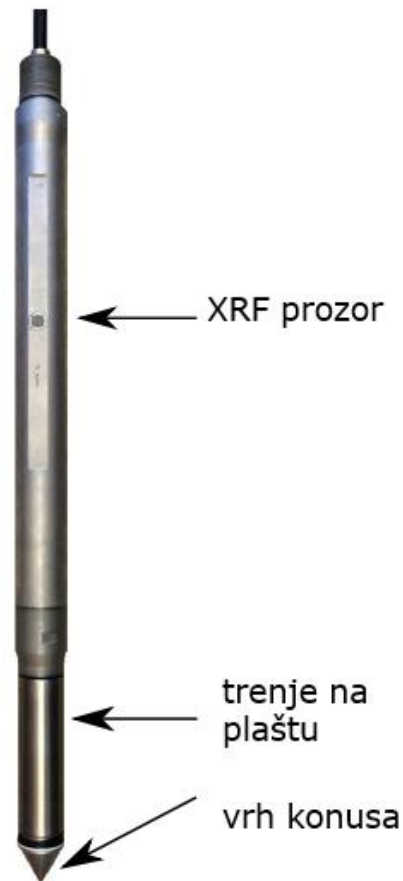
XRF osjetilo za detekciju teških metala u tlukoristi se tehnologijom izravnog utiskivanja u tlo kao i CPT sonda[17]. Glavne karakteristike XRF osjetila su visoka razlučivost i jednostavna primjena kod velikih dubina [18].

CPT sondom zajedno sa XRF osjetilom(slika 18) može se istraživati razne vrste tla. Također je moguće istraživati i morsko dno do dubine oko 15 metara.

Način rada XRF osjetila temelji se na principu rendgenske fluorescencije za identifikaciju i procjenu koncentracije teških metala. Sonda generira snop rendgenskih zraka koje usmjerava kroz prozor kućišta prema okolnom tlu. Takav snop pobuđuje atome teških elemenata prisutnih u tlu koji zatim zrače specifičnom fluorescencijom koju se registrira XRF osjetilom.

XRF se često primjenju za detekciju minsko-eksplozivnih sredstava u tlu (zaostale avio-bombe iz rata), zatim za istraživanje koncentracije teških metala u istaloženom mulju koji nastaje kao otpad u procesima oplemenjivanja ruda ili za istraživanje distribucije teških metala u muljevitim nanosima rijeka u deltama, lukama, plovnim putevima i kanalima.

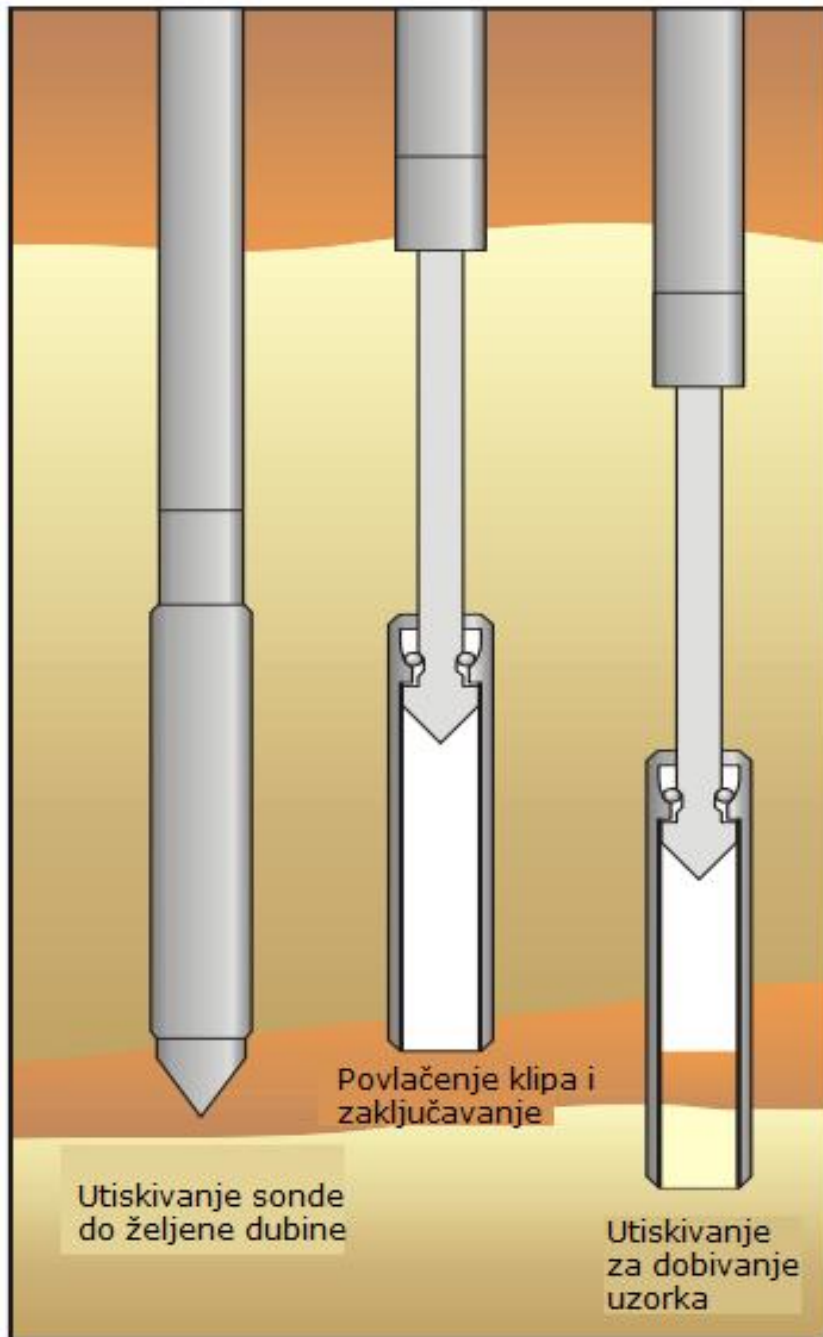




Slika 18. XRF osjetilo[17]

### 3.6. Uzorkivač za izravno utiskivanje u tlo

Tzv. CPT Push Sampler, odnosno CPT uzorkivač za uzimanje uzoraka tla tehnologijom izravnog utiskivanja sadrži unutarnju šipku i klip, te vanjski cilindar i mehanizam za zaključavanje/otključavanje. Kada je mehanizam zaključan, tada je vanjski cilindar povezan sa unutarnjom šipkom. U slučaju kada je mehanizam otključan, tada vanjski cilindar ostaje statičan, dok je unutarnja šipka s klipom pokretna. Sa zaključanim mehanizmom, CPT se utiskuje do određene dubine, zatim se mehanizam otključa te se vanjski cilindar potisne u tlo. Nakon toga se mehanizam ponovno zaključa te se uzorkivač zajedno s uzorkom vadi iz tla [19].



Slika 19. Shematski prikaz uzorkovanja tla sa CPT uzorkivačem(modificirano iz [4])

#### 4. ZAKLJUČAK

Postupak ispitivanja tla statičkim penetrometrom je danas opće prihvaćena in-situ metoda kojom se dobiva kvalitetan, pouzdan i ponovljiv kontinuirani zapis mjerenih parametara po dubini istraživanog tla. Na temelju CPT mjerenih parametara: otpora na šiljku, trenja na plaštu i pornoga tlaka, moguće je identificirati tip tla, njegovu stratigrafiju te procijeniti relevantna fizikalna svojstva.

Na temelju podataka registriranih dodatnim osjetilima (kao npr. EC, HPT, MIP, LIF, XRF, i dr.) moguće je racionalizirati proces uzorkovanja tla i podzemne vode odnosno napraviti ciljano uzorkovanje u kritičnim zonama s detektiranim onečišćenjima.

Optička sonda tipa LIF koristi se za detekciju NAPL onečišćivala. LIF se zasniva na pojavi fluorescencije kod većine PAH spojeva (policiklički aromatski ugljikovodici, goriva, ulja) nakon izlaganja djelovanju fotona. Policiklički aromatski ugljikovodici imaju jaku fluorescenciju zbog svoje molekularne strukture. Nafta gotovo uvijek sadrži dovoljno PAH spojeva koji mogu biti detektirani LIF-om. Različiti PAH spojevi daju karakterističan odziv fluorescencije, koja se registrira na kanalima različitih valnih duljina pomoću kojih se mogu identificirati.

Primjena CPT-a zajedno s opisanim osjetilima i uređajima omogućava sigurnu, efikasnu i detaljnu karakterizaciju onečišćenog tla koja otvara mogućnost cjelovite analize problema pronosa i sudbine onečišćenja u tlu te izbor i provedbu odgovarajućeg sanacijskog tretmana.

## 5. LITERATURA

- [1] Kavur, B. Nastavni materijali za kolegij Geotehničko-ekološki zahvati. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2017/18.
- [2] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bruin-lagoon-drilling.jpg> (datum pristupa 19.lipnja 2018.)
- [3] Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M., (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Padstow, Cornwall: TJI Digital.
- [4] Robertson, P.K., and Cabal, K.L. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. Gregg Drilling and Testing, Inc. California, USA. 6th edition 2015.
- [5] David Rogers, J., (2006). Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test. *Environmental and Engineering Geoscience* (2006) 12 (2): 161-179. Doi: <https://doi.org/10.2113/12.2.161>(datum pristupa: 29. lipnja 2018.)
- [6] Mayne, P.W. 2007. Synthesis 368: Cone Penetration Testing. NCHRP, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, DC [http://www.mcipin.com/publications/CPT/nchrp\\_syn\\_368.pdf](http://www.mcipin.com/publications/CPT/nchrp_syn_368.pdf) (datum pristupa: 19. lipnja 2018.)
- [7] Ku, T., Moon, S.W., Gutierrez, B.J.:Advanced application of seismic cone penetration test at complex ground conditions ,*Engineering Geology*, Volume 210, 5 August 2016, Pages 140-147, doi: <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.009>(datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [8] Librić, L., Jurić-Kaćunić, D., Kovačević, M. S.: Application of cone penetration test (CPT) results for soil classification, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 1, pp. 11-20, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1574.2016>(datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [9] CPT-DMT correlations - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/Normalized-SBT-charts-for-CPT-after-Robertson-1990\\_fig3\\_245294747](https://www.researchgate.net/Normalized-SBT-charts-for-CPT-after-Robertson-1990_fig3_245294747) [datum pristupa: 02.srpnja 2018.]
- [10] Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1): 151–158. doi:10.1139/t90-014.

- [11] <https://geoprobe.com/ec-electrical-conductivity> (datum pristupa: 28. svibnja 2018.)
- [12] Fugro (2016). HPT-CPT Probe, <https://www.fugro.com/docs/default-source/Expertise-docs/Our-Services/Geotechnical/hpt-cpt.pdf?sfvrsn=0> (datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [13] Neuhaus, M.: High-Resolution Characterization of Contaminated Sites using Innovative In Situ Sensor and Direct Push Methodologies, <https://www.fugro.com>(datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [14] <https://geoprobe.com/mip-membrane-interface-probe> (datum pristupa: 28. svibnja 2018.)
- [15] <http://www.dakotatechnologies.com> (datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [16] Kavur, B. Nastavni materijali za kolegij Geotehnika i zaštita okoliša. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak.god. 2017/18.
- [17] Fugro (2016). Site characterisation. XRF-CPT-Cone, <http://www.fugro.com/docs/default-source/Our-Services/site-characterisation/xrf-cpt-cone.pdf?Status=Master&sfvrsn=2> (datum pristupa: 30. svibnja 2018.)
- [18] Volkering, F., Schmeits J., Koomans R. (2015). Screening tools for heavy metals, doi: [https://www.intersol.fr/download/26032015/download.php?f=Frank\\_Volkering\\_Tauw\\_Intersol\\_2015.pdf](https://www.intersol.fr/download/26032015/download.php?f=Frank_Volkering_Tauw_Intersol_2015.pdf)(datum pristupa: 17. lipnja 2018.)
- [19] Robertson, P.K. and Cabal, K.L. 2008. *Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering*. Gregg Drilling & Testing, Inc. 2nd Edition.

## 6. POPIS SLIKA

Slika 1. Bušaći u zaštitnim odijelima, zaštitnim maskama i uređajima za disanje

Slika 2. Poprečni presjek sonde statičkog penetrometra (CPT)

Slika 3. Shema statičkog piezo-penetrometra

Slika 4. CPT kamion

Slika 5. Shema prikaza pokusa statičkim penetrometrom

Slika 6. Begemann-ov dijagram za identifikaciju tipa tla

Slika 7. Normalizirani SBT dijagram tipa ponašanja tla

Slika 8. Vjerojatnost određenog tipa tla pomoću CPT-a

Slika 9. Prikaz ponašanja električne provodljivosti na temelju veličine zrna

Slika 10. EC osjetilo i mjerna oprema

Slika 11. HPT osjetilo

Slika 12. Osjetilo MIP

Slika 13. Koncept LIF istraživanja NAPL-a u tlu

Slika 14 a). Karakteristični fluorescentni odzivi („fingerprint“) dobiveni LIF tehnologijom za različita onečišćivala

Slika 14 b). Karakteristični fluorescentni odzivi („fingerprint“) dobiveni LIF tehnologijom za različita onečišćivala

Slika 15. Prikaz rezultata istraživanja UVOST-om

Slika 16. Dijagram lijevo prikazuje LIF odziv benzina, a dijagram desno LIF odziv dizela

Slika 17. Dijagram lijevo prikazuje LIF odziv kerozina, a dijagram desno LIF odziv mlaznog goriva

Slika 18. XRF osjetilo

Slika 19. Shematski prikaz uzorkovanja tla sa CPT uzorkivačem

## 7. POPIS TABLICA

Tablica 1. Tablica normaliziranog tipa ponašanja tla

## 8. POPIS KRATICA

CPT (engl. **c**one **p**enetration **t**est) – statički penetrometar

CPTu (engl. cone penetration test with pore pressure measurements)– statički piezo-penetrometar s mjerenjem poreznoga tlaka

SBT (engl. **s**oil **b**ehaviour **t**ype) – tip ponašanja tla

EC (engl. „**e**lectrical **c**onductivity“) – električnprovodljivost

HPT (engl. „**h**ydraulic **p**rofilng **t**ool“) – osjetilo za hidrauličko profiliranje tla

MIP (engl. „**m**embrane **i**nterface **p**robe“) – membransko osjetilo za detektiranje hlapljivih organskih spojeva

NAPL (engl. **n**on-**a**queous **p**hase **l**iquid) – ne-vodene tekućine (tekućine koje se ne miješaju s vodom)

LIF (engl. „**l**aser **i**nduced **f**luorescence“, kratica LIF) – laserom inducirana fluorescencija za detekciju NAPL onečišćivala

PAH (engl. **p**olycyclic **a**romatic **h**ydrocarbon) - policiklički aromatski ugljikovodici

UVOST (engl. **u**ltra-**v**iolet **o**ptical **s**creening **t**ool) – optička sonda za detekciju onečišćivala ultra ljubičastim svjetlom

VOC(engl. **v**olatile **o**rganic **c**ompound) – hlapljivi organski spojevi

XRF (engl. „**x**-**r**ay **f**luorescence“, kratica XRF) – fluorescencija inducirana X-zrakama za detekciju teških metala