Terenska ispitivanja i mjerenja u inženjerskoj geologiji

Jurković, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

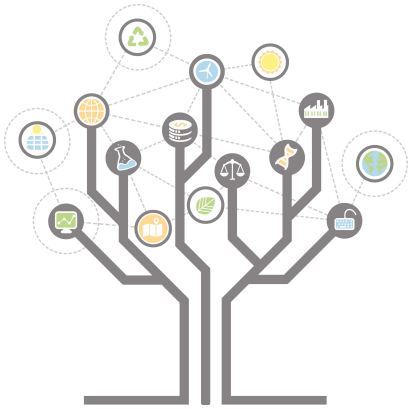
2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:823867

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

NIKOLA JURKOVIĆ

TERENSKA ISPITIVANJA I MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEOLOGIJI

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

TERENSKA ISPITIVANJA I MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEOLOGIJI

KANDIDAT:
Nikola Jurković

MENTOR:
izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški



VARAŽDIN, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: NIKOLA JURKOVIĆ

Matični broj: 2748 - 2016./2017.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

TERENSKA ISPITIVANJA I MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEOLOGIJI

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Svrha terenskih ispitivanja i mjerenja
3. Pregled terenskih ispitivanja i mjerenja
4. Zaključak
5. Popis literature
6. Popis slika i tablica

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

Zadatak zadan: 19.04.2019.

Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

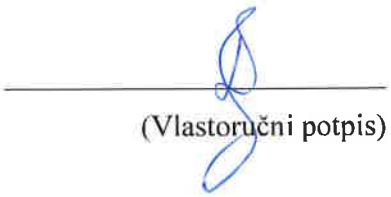
IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:
Terenska ispitivanja i mjerenja u inženjerskoj geologiji,
rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc Hrvoja Meaškog.

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, 9. rujna 2019.

NIKOLA JURKOVIĆ



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: NIKOLA JURKOVIĆ

NAZIV RADA: TERENSKA ISPITIVANJA I MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEOLOGIJI

Izvedba i projektiranje svakog zahvata u okoliš, izgradnja objekata te izrada profila tla zahtijevaju niz terenskih ispitivanja i mjerenja obuhvaćena područjem inženjerske geologije. U ovome radu prikazana su ispitivanja i mjerenja koji obuhvaćaju geološka, geotehnička i geofizička istraživanja. Ta ispitivanja sastoje se od kartiranja, in situ ispitivanja, izrade istražnih bušotina i mjerenja u njima. Razmatraju se i geofizičke metode, a rezultat su informacije o dubini pojedinih slojeva tla, dubine razine podzemne vode te osobine koje prikazuju ponašanje tla, poput čvrstoće i deformabilnosti. Većina ispitivanja ima dugu povijest koja je doprinijela iskustvu i detaljnim teorijskim razradama.

KLJUČNE RIJEČI: kartiranje, *in situ* ispitivanje, istražne bušotine, geofizičke metode

SADRŽAJ

1 UVOD 1

2 SVRHA TERENSKIH ISPITIVANJA I MJERENJA 3

2.1 Osnovni predmet istraživanja u inženjerskoj geologiji 3

2.1.1 Stijena i stijenska masa 3

2.1.2 Fizičko-geološki procesi i inženjersko geološke pojave 4

2.1.3 Inženjerski problemi 5

3 PREGLED TERENSKIH ISPITIVANJA I MJERENJA 7

3.1 INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE 7

3.1.1 Priprema za terensko istraživanje 7

3.1.2 Prikupljanje podataka za inženjerskogeološku kartu 7

3.1.3 Interpretacija prikupljenih podataka 10

3.2 PRIKUPLJANJE PODATAKA KROZ GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA 10

3.2.1 Jame i raskopi 10

3.2.2 Istraživačko bušenje 11

3.2.1 Mjerenja na terenu 21

3.3 PRIKUPLJANJE PODATAKA KROZ GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA 27

3.3.1 Površinska geofizička ispitivanja 28

3.3.2 Geofizička istraživanja u bušotinama 34

4 ZAKLJUČAK 36

5 POPIS LITERATURE 37

POPIS SLIKA I TABLICA 39

1 UVOD

Pri definiranju uvjeta koje treba udovoljiti pri izvedbi objekata, koriste se inženjersko-geološka istraživanja. Potrebno je poznavati mjerodavne značajke zahvata i prikupiti sve potrebne informacije o tlu kao što su primjerice vrsta tla, slojevitost, dubina sloja, granulometrijski sastav i razina podzemne vode. Prema definiciji udruge inženjer geologa (IAEG, 1969.), inženjerska geologija je disciplina koja „primjenjuje geološke podatke, tehnike i principe u istraživanju prirodnog nastanka stijena i tala ili podzemnih voda u svrhu jamstva da su geološki faktori koji utječi na lokaciju, planiranje, oblikovanje, projektiranje, građenje i održavanje inženjerskih konstrukcija, te otkrivanje rezervi podzemnih voda bili temeljito prepoznati, adekvatno interpretirani, korišteni i prikazani za primjenu u inženjerskoj praksi“ (Ortolan, 2013).

Inženjerska geologija povezana je s mehanikom tla i mehanikom stijena s kojima je u velikoj međuovisnosti. Kvalitativne i kvantitativne značajke stijenske mase u terenu, dobivaju se interdisciplinarnim pristupom, a sama istraživanja započinju inženjersko-geološkim kartiranjem čiji rezultati dalje usmjeruju na različite faze istraživanja kao što su: geofizička istraživanja, istraživačko bušenje, izrada raskopa, zasjeka, jama, okana, potkopa i sl. Navedena istraživanja potrebno je napraviti prije same gradnje objekta kako bi se na vrijeme spriječili štetni utjecaji terena na objekt. Potrebno je dobiti informacije o nosivosti terena te o izboru mehanizacije, optimalnog načina izvedbe, alata itd. (Šestanović, 1993).

Potrebno je napraviti istraživanje kojim se definira geološki i geotehnički model te kojima se specificiraju parametri i svojstva tla u inženjersko geološkom smislu (Ferrer i de Vallejo, 2011). Svako geotehničko istraživanje trebalo bi trajati sve dok uvjeti u podzemlju nisu dobro utvrđeni kako bi se planirani građevinski radovi mogli provesti sigurno. Cilj istraživanja podzemlja je utvrditi inženjerskogeološke uvjete i to: izravnim uvidom u stijene/tla kopanjem raskopa ili izradom bušotina iz kojih se uzimaju uzorci za laboratorijske pokuse te neizravnim uvidom u distribuciju značajki stijena/tla, pomoću *in situ* pokusa i geofizičkim metodama (Mihalić, 2007).

Terenska ispitivanja i mjerenja u inženjerskoj geologiji se provode za potrebe određivanja uvjeta građenja te se njihovim pravodobnim izvršavanjem mogu ukloniti štetni utjecaji suvremenih egzogenih i endogenih procesa te pojava (Ortolan, 2013).

Karl Terzaghi je rekao: „Nažalost, tla nastaju utjecajem prirode, a ne utjecajem čovjeka, a proizvodi prirode su uvijek složeni" (Clayton et al., 1995), iz čega se vidi da su istraživanja tla brojna i složena te se mogu podijeliti u tri skupine, a u ovom radu opisana su terenska ispitivanja:

1) Prikupljanje podataka kroz geološka istraživanja; inženjerskogeološko kartiranje bušotine, opis diskontinuiteta, utjecaj podzemnih i površinskih voda na stanje stijena i uvjete građenja, mjerenje razina podzemne vode
2) Prikupljanje podataka kroz geotehnička istraživanja; istraživačko bušenje, *in situ* pokusi, geomehanička laboratorijska ispitivanja
3) Prikupljanje podataka kroz geofizička istraživanja; seizmika (refleksija i refrakcija), geoelektrika, georadar

2 SVRHA TERENSKIH ISPITIVANJA I MJERENJA

Ispitivanjima tla na terenu i u laboratoriju se dobivaju svi potrebni podaci o tlu pomoću kojih se utvrđuju njegove vrste u raznim dubinama, njihovo prostiranje i zahtijevane osobine tla. Ispitivanja tla se mogu podijeliti u tri etape: prethodna ispitivanja, bušenje i vađenje uzoraka te mjerenje osobina tla *in situ*. Pomoću prethodnih istraživanja se prikupljaju i proučavaju postojeći podaci o geološkim prilikama, podzemnim vodama, o ispitivanju tla na susjednim područjima, podaci iz geotehničkog katastra i druge informacije koje mogu pružiti sliku o stanju tla i stijena. Na taj način dobivaju se informacije o morfologiji područja, sastavu tla na površini, prirodnim zasjecima, mogućim oštećenjima, vegetaciji i slično, a posebice o podzemnoj vodi. Također, potrebno je, uz geološke studije, imati i visinske i ostale geodetske podatke kako bi se pravilno interpretirali prikupljeni podaci (Nonveiller, 1979).

2.1 Osnovni predmet istraživanja u inženjerskoj geologiji

Stijene, stijenska masa, fizičko-geološki procesi te inženjerskogeološke pojave čine predmete istraživanja u inženjerskoj geologiji.

2.1.1 Stijena i stijenska masa

Stijena čini najmanji element stijenske mase koji nije presječen niti jednim oslabljenjem, a koristi se za utvrđivanje svojstava materijala koji izgrađuje stijensku masu. Stijenska masa predstavlja prirodnu geološku formaciju stijene sa svim svojim oslabljenjima (Slika 1). Izgrađena je od minerala, diskontinuiteta i njihovih ispuna, vode i/ili zraka te ugljikovodika, koji se nalaze unutar stijene ili između stijenki diskontinuiteta (Singh & Goel, 2011). Postoje tri osnovna aspekta istraživanja stijene i stijenske mase: kao sredina u kojoj se gradi, kao sredina na kojoj se gradi te kao građevni materijal (Meaški, Uvod, 2016).



Slika 1. Stijenska masa (Meaški, 2016)

2.1.2 Fizičko-geološki procesi i inženjersko geološke pojave

Događaji u Zemljinoj kori i na njezinoj površini koji se odražavaju na stanje nekoga terena nazivaju se fizičko-geološkim procesima. Mogu biti egzogeni (erozija i različiti tipovi kretanja stijenskih masa) te endogeni, vezani za seizmičke pojave potresa i raznih neotektonskih manifestacija.

Razlikuju se: erozija i akumulacija, klizanje, krški fenomeni, sufozija, volumne promjene tla (stezanje i bubrenje) te seizmički procesi. Erozija i akumulacija označavaju formiranje strmih padina, jaruga, a uz more strmih obala te uzrokuju nestabilnost potočnih, riječnih i morskih obala. Klizanje nastaje kretanjem mase stijena ili tla niz padinu. Krški fenomeni rezultat su otapanja stijena uslijed čega dolazi do formacije škrapa, ponikva, vrtača, ponora, jama, krških polja i ostalih oblika. Sufozija predstavlja ispiranje sitnih čestica iz nekonsolidiranih materijala (pijeska i šljunka) šupljine u tlu. Seizmički procesi pucanja i pokretanja stijena u podzemlju uzrokovani tektonikom nazivaju se potresima, dok su površinske manifestacije pojave rasjeda. Fizičko geološki procesi specifični za određena klimatska područja su: eolski procesi, permafrost i vulkanske aktivnosti .Fizičko-geološki procesi proučavaju se sa svrhom ocjene stupnja opasnosti za neki objekt i utjecaja na izvođenje radova (Cvetko Tešović, 2019).

Inženjerskogeološke pojave očituju se promjenom prirodnog stanja izazvane radom čovjeka zbog inženjerskih radova i eksploatacije nekih objekata (Cvetko Tešović, 2019):

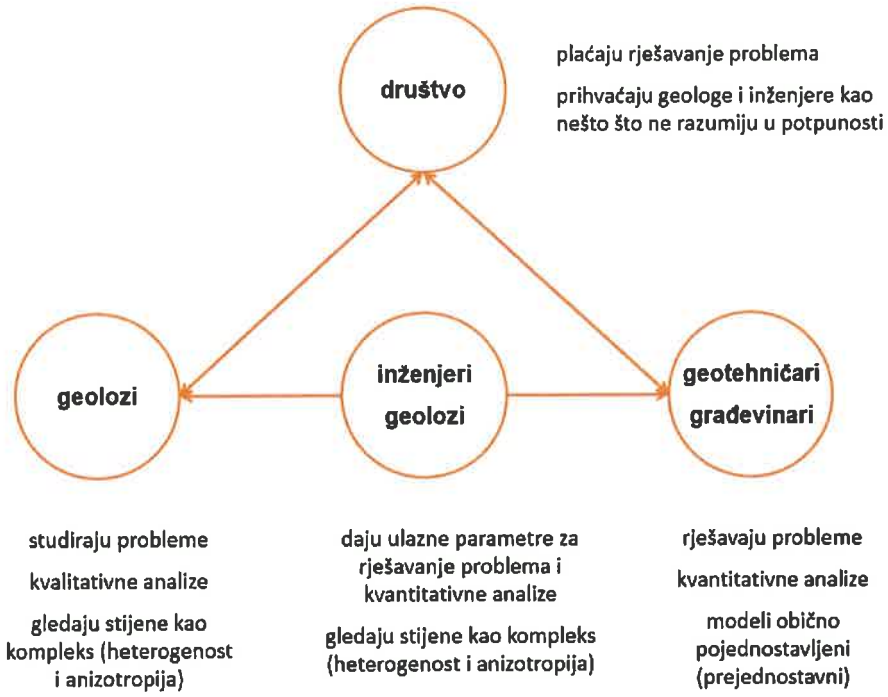
- zbijanje rastresitih stijena (umjetno snižavanje razine podzemne vode)
- slijeganje terena zbog težine objekta
- uzgon podzemnih voda
- postanak klizišta (zasijecanjem padine ili pod objektima na padini)
- pojačana erozija (uslijed devastacije šumskog pokrivača)
- deformacije u stijenskim radovima (utjecaj rudarskih radova).

Inženjerskogeološki uvjeti pri izvedbi inženjerskih radova i eksploataciji objekata ovise o geološkoj građi, hidrogeološkim prilikama, petrografskom sastavu zastupljenih stijena, fizičko-mehaničkim svojstvima stijena te geodinamičkom stanju terena (Cvetko Tešović, 2019).

2.1.3 Inženjerski problemi

U suradnji s drugim znanostima inženjerska geologija bavi se sljedećim inženjerskim problemima: preventivno djelovanje, razmatranje i planiranje, koje uključuje zoniranje terena s obzirom na geohazardne pojave,, utjecaj potresa na objekte i teren te proučavanje učinaka erozije; građenje (izgradnja temelja, stabilnost kosina, podzemne prostorije) te sanacija posljedica geohazardnih događaja poput klizišta, erozija, poplava i ostalih aktivnosti.

Temeljem inženjerskogeoloških istraživanja, inženjer geolog predviđa što sve može utjecati na objekt tijekom projektiranja, izgradnje i korištenja objekta. Inženjer geolog daje ulazne parametre za rješavanje problema i kvantitativne analize koji se koriste u daljnjem radu geotehničara i građevinara (Slika 2).



Slika 2. Uloga inženjer geologa (Meaški, 2016)

3 PREGLED TERENSKIH ISPITIVANJA I MJERENJA

3.1 INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE

Geofizičkim istraživanjima i istražnom bušenju, prethodi inženjerskogeološko kartiranje kojim se dobivaju podaci o litološkoj građi, morfološkim i hidrološkim pojavama, fizičko mehaničkim i strukturno-tektonskim značajkama stijena i egzogenim pojavama (Ortolan, 2013). Zasniva se na principima geološkog kartiranja, a kao rezultat nastaju inženjerskogeološke karte. Geološko kartiranje sastoji se od istraživanja izdanaka stijena i tla, sustavnog bilježenja podataka registriranih na izdanku te analize i interpretacije tih podataka (Mihalić, 2007).

3.1.1 Priprema za terensko istraživanje

Prikupljanju podataka i izradi inženjerskogeoloških karata prethodi priprema za istraživanje koja se temelji na određivanju veličine područja obuhvata i odabiru podloge za kartiranje.

Granice područja obuhvata ovise o vrsti istraživanja koje može biti regionalno, kartiranje određenih građevinskih lokacija ili kartiranje prilikom izgradnje podzemnih prostorija (tuneli i okna) kod kojih se detaljno kartiranje provodi tijekom samog građenja. Inženjerskogeološko kartiranje građevinskih lokacija sastoji se od preliminarnog kartiranja šire okolice građevina (preporučuje se obuhvatiti područje unutar radijusa od 8 km oko građevine) i detaljnog kartiranja lokacije budućeg objekta i njegove neposredne blizine. Podloge za inženjerskogeološko kartiranje su topografske karte, jer je za svaki podatak s terena potrebno odrediti njegov položaj u prostoru. Mjerila topografskih podloga ovise o detaljnosti i količini podataka koji će se prikupljati kartiranjem (Mihalić, 2007).

3.1.2 Prikupljanje podataka za inženjerskogeološku kartu

Podaci za izradu inženjerskogeološke karte temelje se na kartiranju izdanaka i kartiranju bušotina. Inženjerskogeološko kartiranje izdanaka obuhvaća snimanje prirodnih i umjetnih izdanaka (iskopa, zasjeka), izradu karte, vođenje terenskih dnevnika i skicu

inženjerskogeološkog problema. Na taj način prikupljaju se značajke stijena i tala, hidrogeološke pojave, geomorfološke značajke, geomorfološke pojave i procesi. Istraživanje značajki stijena i/ili tla za potrebe inženjerskogeološkog kartiranja podrazumijevaju proučavanje osobitosti, koje se svrstavaju u sljedeće skupine (Mihalić, 2007):

- litološki podaci (vrsta stijene i/ili tla, petrografska svojstva, genetski tip te teksturu tla),
- podaci o strukturi materijala, mase i diskontinuiteta,
- podaci o trošnosti materijala i mase,
- podaci o fizičko-mehaničkim svojstvima stijene i/ili tla (boja, indeksni pokazatelji fizičkih svojstava, čvrstoća materijala).

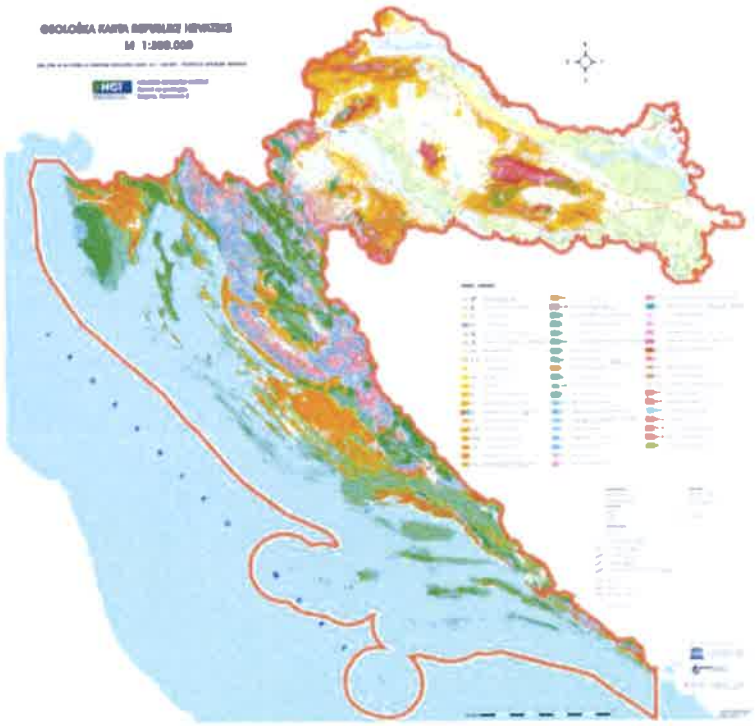
Inženjerskogeološko kartiranje bušotina temelji se na kontinuiranom zapisu vertikalnog profila stijene dobivene bušenjem, odnosno jezgrovanjem koji se svodi na opis jezgre bušotine – log bušotine. Rezultat čine informacije zabilježene na logu bušotine koje su vrijedan izvor podataka za buduće radove te zapis relevantnih informacija koje se mogu zabilježiti samo jednom, kao što je erupcija podzemne vode. Inženjerskogeološki opis stijena ili tala podrazumijeva determinaciju jezgre bušotine i inženjerskogeološki opis diskontinuiteta. Prilikom opisa jezgre bušotine važno je obratiti pažnju na količinu i tip materijala, stanje materijala dobivenog jezgrovanjem te zapise bušača (Mihalić, 2007).

Oprema za kartiranje obuhvaća: standardnu opremu za geološke kartiranje (terensko povećalo s povećanjem do 10x, geološki čekić i geološki kompas s klinometrom), priručnu identifikacijsku opremu za određivanje fizičko-mehaničkih svojstava (Schmidtov čekić, džepna krilna sonda i sl.).

Pri kartiranju terena, jezgre bušotine, zasjeka i slično, potrebno je obratiti pozornost na pukotine i pukotinske sustave jer se iz takvih podataka dobiva stvaran uvid u strukturnu geološku građu nekog područja (Šestanović, 1993).

Informacije o složenosti geološke građe dobivaju se iz već postojećih geoloških karata, a u tu svrhu se najčešće koriste osnovne geološke karte Republike Hrvatske M1:100.000. Prije početka kartiranja pripremaju se podloge na koje će se bilježiti

podaci, a te podloge su topografske karte jer se za svaki podatak s terena određuje položaj u prostoru. Mjerila topografskih podloga ovise o detaljnosti i količini podataka koju je potrebno prikupiti kartiranjem. Mjerila mogu iznositi M 1:500.000 do 1:25.000 za regionalno kartiranje (Slika 3) M 1:10.000 do 1:2.000 za preliminarno kartiranje pojedinačnih lokacija te M 1:1.000 do 1:200 za detaljno kartiranje pojedinačnih lokacija.



Slika 3. Prikaz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske, M 1:300.000 (HGI-CGS, 2009, preuzeto s *www.pmf.unizg.hr*)

Izmjereni podaci se zatim unose na topografsku podlogu, a opisuju u terenskim dnevnicima. Moguće je koristiti pribor za crtanje u mjerilu i fotografiranje cijelih izdanaka ili pojedinih dijelova. Svi valjani podaci bilježe se u radnu kartu pomoću simbola koje je razvila IAEG Komisija za inženjerskogeološke karte (engl. IAEG - *International Association for Engineering Geology and the Environment*) (Price, 2009). Postoje različiti simboli koji opisuju stijene, tla, hidrogeološke pojave, geomorfološka obilježja, geodinamičke pojave i slično te se koriste ovisno o mjerilu karte. Opširnije zabilješke se dodatno zapisuju u terenskom dnevniku. Ukoliko postoje prirodni izdanci na kojima su vidljive značajke stijenske mase, potrebno je napraviti skicu koju prate mjereni podaci (Mihalić, 2007).

3.1.3 Interpretacija prikupljenih podataka

U procesu interpretacije podataka izdvajaju se kreiranje modela geološke građe, koje karakterizira izdvajanje geoloških formacija s definiranim geološkim granicama i izrada inženjerskogeološkog modela (izdvajanje inženjerskogeoloških jedinica s granicama). Inženjerskogeološke karte dvodimenzionalni su prikaz površne terena, dok model geološke građe trodimenzionalnim prikazom obuhvaća i prostornu distribuciju geoloških jedinica po dubini (Mihalić, 2007).

3.2 PRIKUPLJANJE PODATAKA KROZ GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA

Podaci se prikupljaju izvedbom istražnih jama, bušotina, bunara i potkopa, što za cilj ima dobiti raspored slojeva tla po dubini ispod ili duž buduće trase ili tlocrta neke građevine. Najčešće se izvodi bušenje s jezgrovanjem, dok se raskopi, potkopi i bunari izvode primjerice prilikom temeljenja velikih brana i prilikom istraživanja za potrebe nekih tunela. Sljedeći cilj je uzorkovanje tla i stijene koje je opisano u Eurocode 7, dio 2. koji sadrži opise uzimanja uzoraka te terenskih i laboratorijskih ispitivanja tla (Roje-Bonacci, 2012). Uzorci mogu biti poremećeni i neporemećeni ovisno o zahtjevima daljnjih ispitivanja tla.

3.2.1 Jame i raskopi

Istražne jame služe za ocjenu količina raspoloživog tla, za uzimanje poremećenih uzoraka za daljnja laboratorijska ispitivanja kojima se određuju kakvoća i razredba tla u pozajmištu te se ispituje tlo na plitkim klizištima kako bi se utvrdila dubina klizne plohe. Jame i raskopi se izrađuju do dubine koja se može izvesti ručno ili pomoću jaružala (Roje-Bonacci, 2012). Sondažne jame pravilnog su geometrijskog oblika, a izrađuju se na dubinama do 6 metara (Slika 4).



Slika 4 Sondažna jama (Markić & Zovko, 2019)

Raskopi se primjenjuju za uzimanje uzoraka materijala iz podzemlja i kartiranje podzemnih značajki i uvjeta stijena i tla (Mihalić, 2007). Prema obliku, razlikuju se raskopi slični sondažnim jamama, rovovi i brazde.

U nekim slučajevima rade se bunari većih dubina ili potkopi s podgrađivanjem, dok se jame ne podgrađuju ukoliko se izvode u koherentnom tlu. Također, nije preporučljivo izvoditi istražne jame u nekoherentnim tlima i muljevima pri visokim razinama podzemne vode (Roje-Bonacci, 2012).

3.2.2 Istraživačko bušenje

Osnovni ciljevi istraživačkog bušenja su dobivanje jezgre stijene (po mogućnosti u prirodnom stanju kako bi se povećala točnost), uzimanje uzoraka za određene laboratorijske pokuse, određivanje indeksa kakvoće mase (RQD) i slično. Bušotine koje se izvode su malih dimenzija promjera, dubine oko 100 m, a izrađene su lakom, prilagodljivom i prenosivom opremom. Mjerenja u bušotinama ovise o vrsti materijala i načinu uzorkovanja i testiranja koji slijedi, a postoji: udarno bušenje, svrdlanje, bušenje ispiranjem te rotacijsko bušenje. Slika 5 prikazuje podjelu vrsta bušenja, a najčešći postupci koji se koriste su rotacijsko bušenje, bušenje sa svrdlom i udarno bušenje (Ferrer i de Vallejo, 2011).



Slika 5. Podjela vrsta bušenja (Meaški, 2018)

Tehnika bušenja, raspored i dubina bušenja ovise o svrsi i vrsti potrebnih informacija. Broj i razmak bušotina moraju omogućiti praćenje bočnih i vertikalnih promjena inženjerskogeoloških uvjeta kao što su rasjedi, bore, pukotine i slično, a tehnika bušenja, raspored bušotina i njihova dubina moraju omogućiti interpretaciju geološkog presjeka (Mihalić, 2007).

Bušivost stijena izražava se kao brzina prodiranja bušaće krune u jedinici vremena čistog bušenja, odnosno kao [m/h], [cm/min] ili [mm/min]. Bušivost ovisi o tvrdoći stijena, priboru za bušenje i projektiranju parametara režima bušenja (dobro odabranim režimom bušenja može se povećati brzina bušenja; brzina bušenja je veća kod krupnozrnatih stijena usporedno sa sitnozrnatim stijenama).

Na podatnost bušenju utječu:

1) Geološki čimbenici: vrsta stijene, mineralni sastav stijene, fizičko-mehanička svojstva, orijentacija folijacije, diskontinuiteti
2) Čimbenici postrojenja koji se mogu mijenjati: tip bušaćeg postrojenja, osno opterećenje, rotacija, tip krune, ispiranje
3) Radni proces koje se može mijenjati: metoda bušenja, rukovanje postrojenjem, održavanje postrojenja, iskustvo bušača, logistička potpora

Također, iz jezgre koja je dobivena bušenjem izvodi se i terenska identifikacija i klasifikacija tla pri čemu se bušenjem utvrđuje raspored slojeva tla istih svojstava po dubini, konzistentno stanje tla, primjese u tlu te osnovne fizikalni i mehanički parametri tla kao što su veličina zrna, boja, miris, granulometrijski sastav nekoherentnog tla i slično.

VRSTE BUŠOTINA

Bušotina je objekt u litosferi izrađen nekom od mehaničkih metoda, najčešće bušenjem. Ciljevi izrade bušotina su istraživanje i otkrivanje ležišta, pridobivanje fluida iz podzemlja i dobivanje informacija za izradu profila tla. Razmatrajući namjenu bušotina, razlikuju se prema svojim dimenzijama, ali i po projektom zadanom profilu. Profil bušotine može se sastojati od pravocrtnih i zakrivljenih dionica. Izvođač radova ima zadatak izraditi bušotinu čija se putanja podudara s projektom zadanom trajektorijom. Bušotine, s obzirom na trajektoriju, mogu biti vertikalne, horizontalne ili kose. Prilikom bušenja i izrade bušotine dolazi do odstupanja od idealne trajektorije uslijed geoloških, tehničkih i tehnoloških parametara stijene/tla (Kavedžija, 2012).

Vertikalna bušotina predstavlja pravocrtnu bušotinu čija se os poklapa s gravitacijskom vertikalom. Prilikom izrade vertikalne bušotine koriste se bušaće alatke koje obuhvaćaju dlijeto, teške šipke, stabilizatore, teške bušaće šipke i bušaće šipke. Nakon izrade pojedine dionice kanala bušotine, alatke se izvlače na površinu te se u bušotinu spušta niz zaštitnih cijevi odgovarajućeg promjera dok se izacijevni prostor popunjava cementom. Nakon stvrdnjavanja cementa, postupak se ponavlja do željene dubine (Gaurina-Međimurec et al., 2017).

Horizontalni kanal bušotine buši se paralelno s pružanjem naslaga stijena. Horizontalne bušotine izgrađuju se s ciljem povećanja dodira kanala bušotine s ležištima nafte i/ili plina i povećanjem djelotvornosti utiskivanja fluida.

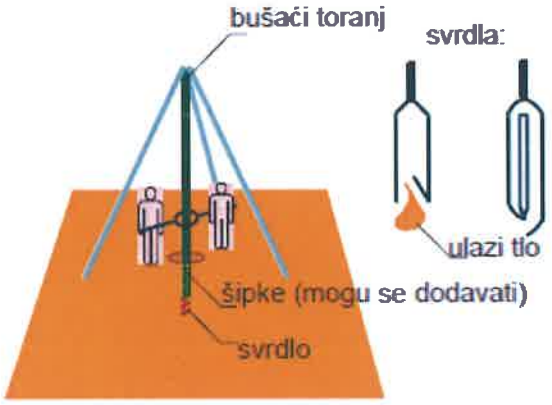
Koso usmjerene bušotine sadrže kanale bušotina pod željenim kutom otklona od vertikale. Grade se na nedostupnim mjestima i lokacijama, kada se ležište nalazi ispod rijeka, jezera, mora ili ispod naseljenog mjesta, prilikom bušenja iz neproduktivnog u

produktivni sloj radi daljnje eksploatacije, izrada eksploatacijskih bušotina te vraćanja bušotina u željeni pravac (Kavedžija, 2012).

Pravilan odabir trajektorije bušotine važan je zbog smanjenja rizika od urušavanja kanala bušotine, čišćenja kanala bušotine, odabira smjera nepovoljnije bušivosti te povećanje proizvodnje prilikom eksploatacije sirovina.

VRSTE BUŠENJA

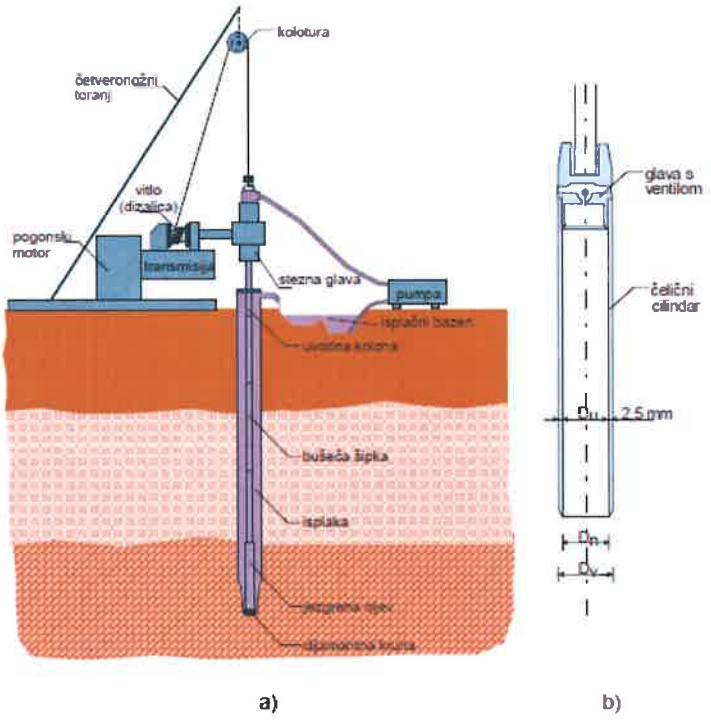
Prednosti **ručnog bušenja** (Slika 6) su sljedeće: potrebna su dvojica za obavljanje bušenja, transport je brz, potreban je mali manipulativni prostor i kako se često koristi na klizištima, moguće je pristupiti gotovo svakoj točki na klizištu.



Slika 6. Prikaz ručnog bušenja (Kvasnička i Domitrović, 2007)

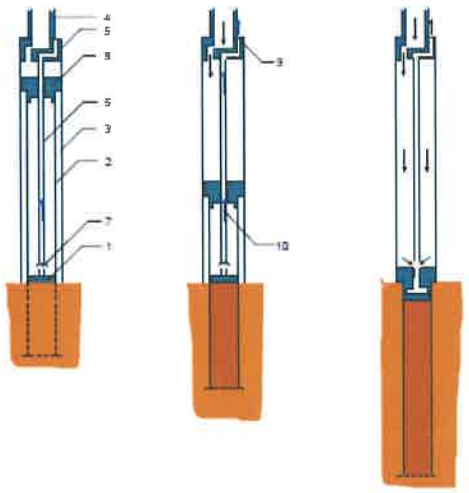
Kod ručnog bušenja, koje se i danas uvelike primjenjuje, buši se pomoću svrdla, maksimalno do 10 m i vade se poremećeni uzorci. Prvenstveno se rabi za određivanje dubine i sastava slojeva u tlu. Kvaliteta ovako izvađenih jezgri je slabija usporedno jezgrama vađenih strojno (Kvasnička i Domitrović, 2007).

Strojno bušenje (Slika 7) se izvodi svrdlom ili jezgrenom cijevi i dobivaju se poremećeni uzorci. Služi za određivanje slojeva po dubini i klasifikacijska ispitivanja. Ukoliko je potrebno izvaditi neporemećene uzorke, na traženoj dubini se bušotina prvo dobro očisti, a nakon toga se ugradi cilindar za vađenje neporemećenih uzoraka (Slika 8). Najčešće se neporemećeni uzorci vade pomoću tankostijenog cilindra i cilindra s fiksnim klipom (Kvasnička i Domitrović, 2007).



Slika 7. Vađenje uzoraka iz bušotina

a) Princip vađenja pomoću motorne garniture, b) tankostjeni cilindar za vađenje neporemećenih uzoraka (Kvasnička i Domitrović, 2007)



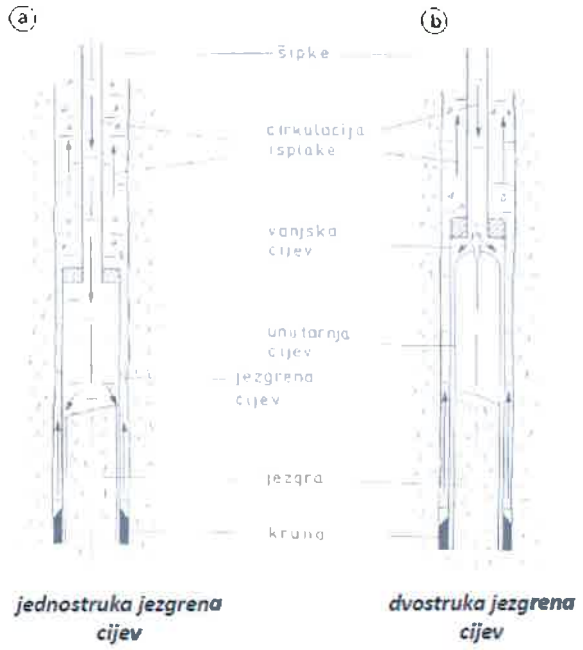
Slika 8. Cilindar s fiksnim klipom za vađenje neporemećenih uzoraka

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Napretkom tehnike razvilo se udarno bušenje u kojem se prati brzina prodiranja kroz stijensku masu, a vertikalni presjek bušotine se dobiva preko korelacije za vrstama stijena. Prednosti su velika brzina izvedbe i jeftiniji postupak. Ovaj postupak je vrlo

grub zbog čega je otežano određivanje slojeva i dobiveni uzorci tla su poremećeni. Osnovni princip bušenja je: dizanje i slobodan pad dlijeta s bušaćim alatkama obješenim na užetu, kako dijeto padne na dno bušotine tako razrušava stijenu i drobi je, a kako bi se postigla vertikalnost i cilindričnost bušotine potrebno je lagano zakretanje pribora kako bi dlijeto svaki put palo na nerazrušeno dno bušotine.

Najveći dio današnjih bušenja je pomoću ***wireline*** **metode** koja je uvedena 60-tih godina prošlog stoljeća. Kod ove metode unutrašnja cijev koja sadrži jezgru se odvoji od pribora kada je jezgrena cijev puna, zatim se unutrašnja cijev sa jezgrom podiže pomoću žice na površini. Zatim se jezgrena cijev isprazni te se unutrašnja cijev opet spusti na dno. Moguće su duboke bušotine, odnosno jezgra promjera većeg od 10 cm može se vaditi s dubine više od 4.500 m. Prednost korištenja wireline metode je dobivanje uzorka stijene/jezgre odnosno postupak jezgrovanja koji se izvodi jednostrukom ili dvostrukom cijevi (Slika 9).

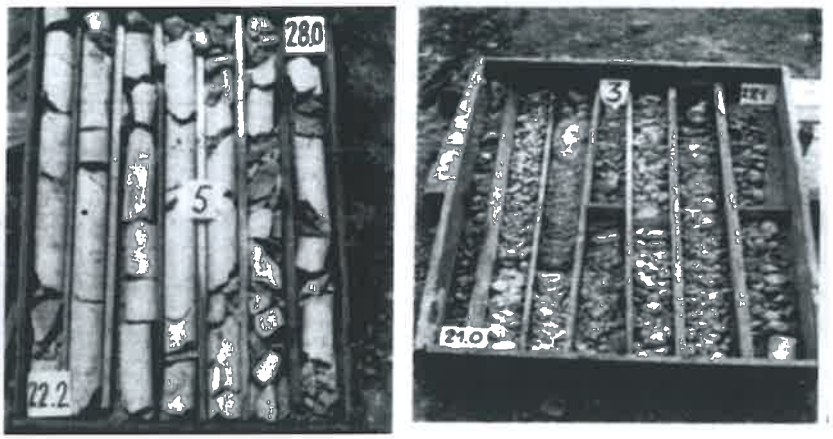


Slika 9. Prikaz a) jednostruke jezgrene cijevi, b) dvostruke jezgrene cijevi (Meaški, 2018)

Pri korištenju jednostruke jezgrene cijevi jezgra je u izravnom dodiru s isplakom (voda) pri čemu dolazi do gubitka jezgre, dok s druge strane, pri korištenju dvostruke jezgrene cijevi jezgra nije u izravnom dodiru s jezgrom te se dobiva veći postotak jezgre. Stoga se u praksi uglavnom upotrebljavaju uređaji s dvostrukom cijevi u različitim izradama.

Kako bi se dobila dobra jezgra u koherentnom tlu, bušenje se izvodi na suho (bez upotrebe isplake). U čvrstim glinama je potrebno naliti vodu u bušotinu kako vi se olakšalo prodiranje pribora u izrazito tvrda tla. nadalje, u okršenoj i razlomljenoj stijenskoj masi se može dogoditi da se ne uoče proslojci sitnozrnatog tla u ispuni pukotina jer ih voda ispere (Roje-Bonacci, 2012).

Izvađena jezgra se odlaže u sanduke koji imaju obilježen interval bušenja jer je za kartiranja i uzimanja uzoraka za razna fizičko-mehanička i kemijska svojstva potrebno znati kotu svakog komada jezgre (Slika 10).

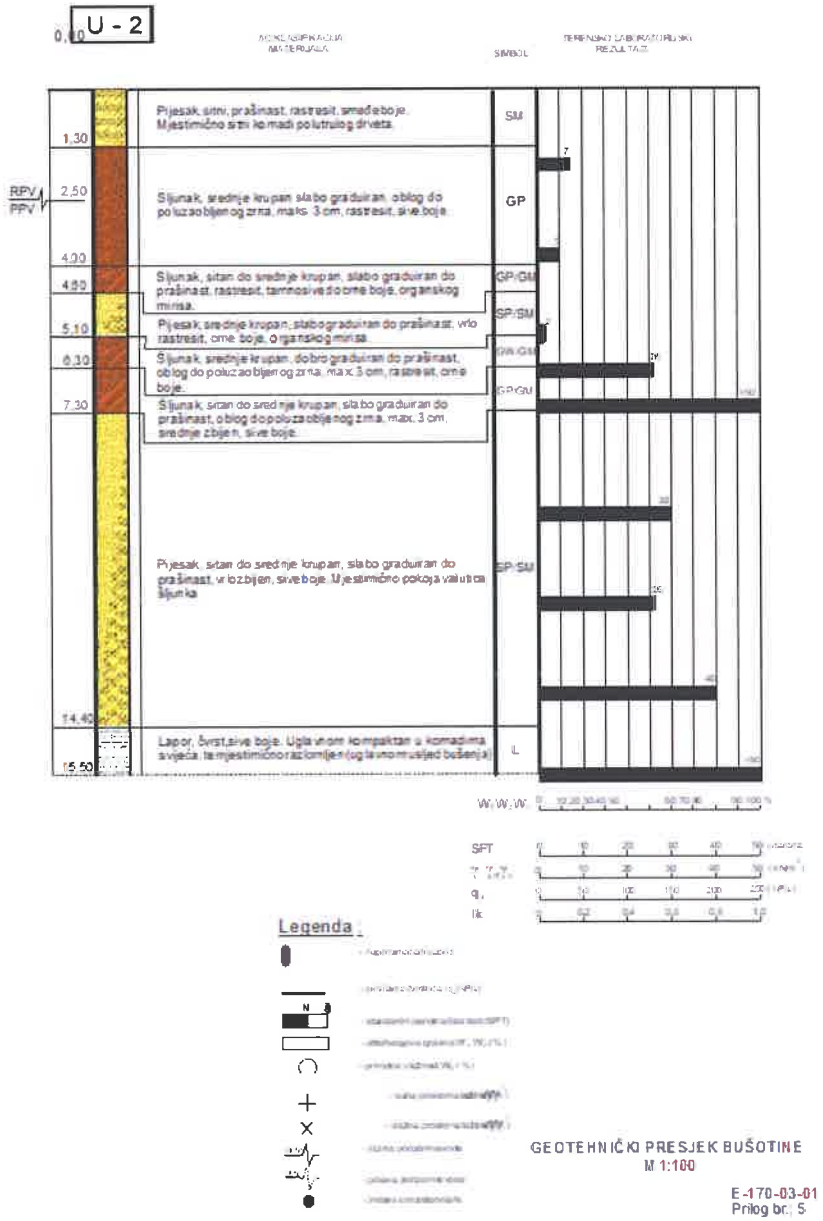


Slika 10. Jezgra složena u sanduke s oznakama dubine (Roje-Bonacci, 2012)

INŽENJERSKOGEOLOŠKO KARTIRANJE JEZGRE BUŠOTINE

Rezultati istraživanja prikazuju se u geotehničkom elaboratu, a moraju sadržavati rezultate terenskih i laboratorijskih ispitivanja u odgovarajućim prilozima, bušotinske profile s fotografijama jezgri i opisima tla na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja te podatke o kolebanju razine podzemne vode u bušotinama (Kvasnička i Domitrović, 2007).

Kontinuirani zapis vertikalnog profila stijene koji se dobiva bušenjem s jezgrovanjem naziva se opis jezgre bušotine, odnosno log bušotine sadrži vrijedne informacije koje služe svim budućim radovima. Prilikom opisa jezgre bušotine potrebno je staviti pažnju na četiri važna čimbenika: količinu materijala, tip materijala, stanje materijala dobivenog jezgrovanjem i zapise bušača.



Slika 11. Log bušotine

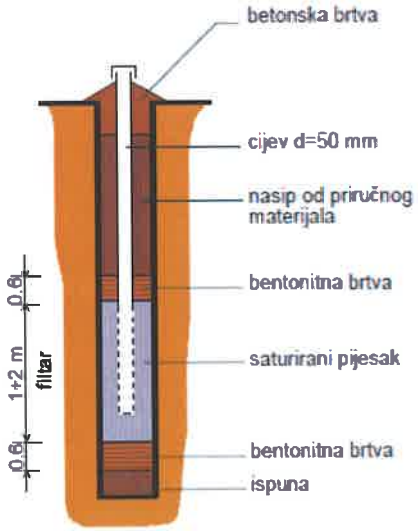
(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Kako bi se dobio kvalitetan log jezgre bušotine (Slika 11) potrebno je pratiti proceduru za opis materijala iz sanduka prema sljedećim koracima: pregled cijele jezgre, identifikacija glavnih promjena u materijalu (npr. boja, veličina klasta ili minerala), identifikacija manjih promjena unutar glavnih promjena (slojeva ili geoloških razdoblja) i stanje materijala dobivenog bušenjem (Mihalić, 2007).

MJERENJA U BUŠOTINAMA

U nekoherentnim tlima bušotine se zacjevljuju, a svaka zacjevljena bušotina kojoj dno seže u vodonosni sloj služi za mjerenje razine podzemne vode. Kada se u tlu pojavljuju vodonosni slojevi, u njih se mogu ugraditi piezometri. Postoje različiti tipovi piezometara, ovisno o okolnostima i zahtjevima, a oni općenito služe za opažanje razine podzemne vode, odnosno za opažanje piezometarskog potencijala, ispitivanje vodopropusnosti te za uzorkovanje podzemne vode iz vodonosnika zbog praćenja kvalitete vode ili pojave onečišćenja.

Mjerenja se mogu obavljati u otvorenom ili zatvorenom sustavu. Prilikom mjerenja u otvorenom sustavu u tlu su postavljenje otvorene cijevi ili cijevi s filtrima gdje je podzemna voda u izravnom kontaktu s atmosferom pri čemu se mjeri razina vode u bušotini (Slika 12). Ovaj tip mjerenja može se koristiti u slučaju vrlo propusnog homogenog tla i stijene, kao što su pijesak, šljunak ili stijena s raspuklinama jer nema opasnosti da će čestice tla ući u bušotinu ili cijev. S druge strane, kod zatvorenog sustava se umjesto cijevi u tlo ugrađuju osjetila za tlak koja imaju mogućnost praćenja tlaka elektronskim putem. Prednost ovog tipa mjerenja je u tome što mala količina vode mora doći u doticaj sa sondom kako bi se tlak izmjerio, a ova prednost je važna kod koherentnih tla. Unatoč tome, piezometri s otvorenom cijevi koji na donjem kraju cijevi imaju filtar su najčešće korišteni (Kvasnička i Domitrović, 2007).



Slika 12. Piezometar otvorenog sustava

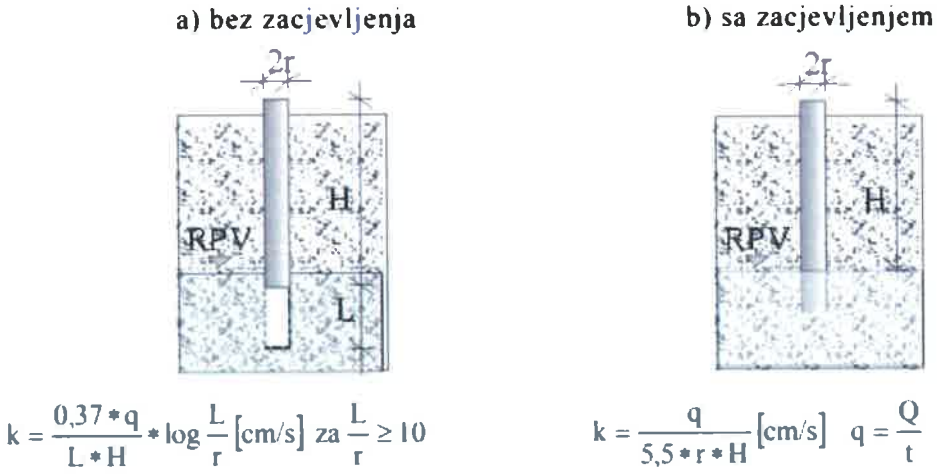
(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Nadalje, u bušotinama se izvode ispitivanja vodopropusnosti, a metode koje se koriste ovise o vrsti stijene pa tako postoje metoda utiskivanja (metoda Lugeona) koja se koristi u stijenama te metoda nalijevanja (metoda Lefranca) koja se koristi u tlima, a izvode se pomoću jedne bušotine. Kod metode Lugeona ispituju se dionice od 5 metara pod različitim tlakovima: rastući 2-5-10 bara po 5 minuta te padajući 10-5-2 bara po 5 minuta, pa je prema tome jedinica za prikaz 1 Lu = 1 L/min/m' kod 10 bara prema formuli (Roje-Bonacci, 2012):

$$VDP\ (Lu) = 10 \cdot \frac{V}{p \cdot L \cdot \Delta t}$$

pri čemu su: V - ukupni volumen vode tijekom pokusa (L), p – tlak na manometru (bar), L – dužina ispitne dionice (m), Δt – vrijeme trajanja pokusa (min).

Kod metode Lefranca se za tla veće propusnosti koristi metoda sa stacionarnim dotokom u bušotinu, a za manje propusna tla se vrši mjerenje s opadajućom razinom vode u bušotini. Ispitivanje se može vršiti s procjeđivanje samo kroz dno bušotine ili kroz dno i dio plašta. U nekoherentnim tlima potrebno je zacijeviti bušotinu ili ugraditi perforiranu cijev. Jednadžbe pomoću kojih se određuje koeficijent procjeđivanja su empirijske (Slika 13).

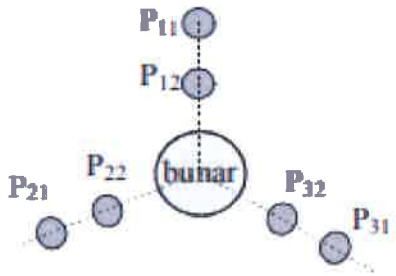


Slika 13. Mjerenje vodopropusnosti metodom Lefranc sa stalnim padom

a) bez zacjevljenja (koherentno tlo) i b) sa zacjevljenjem (u nekoherentnom tlu) s odgovarajućim formulama (Roje-Bonacci, 2012)

Složeniji postupak mjerenja vodopropusnosti je crpljenje pomoću bunara koje se izvodi pomoći šest piezometara koji leže na tri pravca oko bunara pod kutom od 120° (Slika 14). Uređaji koji služe za mjerenje protoka i razine vode, u ovom slučaju, moraju biti

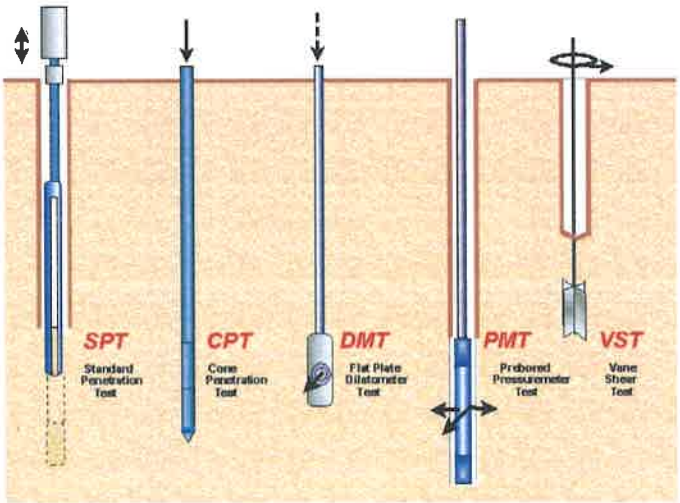
vrlo precizni i dovedeni u stacionarno stanje. Ovaj postupak može trajati dugo i zahtjeva rad bez prekida te je ova metoda također skupa i koristi se za potrebe velikih geotehničkih zahvata.



Slika 14. Tlocrtni položaj bunara i piezometara za mjerenje vodopropusnosti
(Roje-Bonacci, 2012)

3.2.1 Mjerenja na terenu

Pomoću *in situ* određuju se fizičko-mehanička svojstva tla iz kojih je teško dobiti neporemećen uzorak kao što su šljunci i pijesci. U Hrvatskoj se najčešće primjenjuju (Slika 15): statički penetracijski pokus i piezokon (CPT i CPTU), presiometarski pokus, standardni penetracijski pokus, terenska krilna sonda, plosnati dilatometar koji se izvode tijekom bušenja ili neovisno o njima. Pravila izvođenja pokusa opisana su u Eurocode 7, dio 2. „Istraživanja i ispitivanja tla" (Kvasnička i Domitrović, 2007).

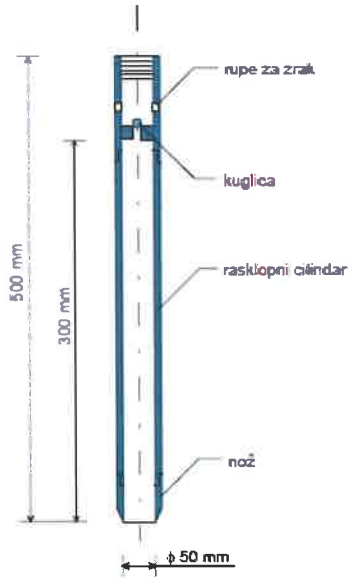


Slika 15. Najčešće korišteni *in situ* pokusi (*In-situ Testing devices*)

Ispitivanje uzroka tla *in situ* metodama provodi se u bušotini ili pokusnim iskopom pri čemu je važno napomenuti da iskopom dolazi do remećenja uzroka što može promijeniti svojstva. Također, iskopom se mijenjaju uvjeti naprezanja unutar ispitivanog uzorka, a s druge strane, voda i zrak koji se koriste za ispiranje bušotina mogu promijeniti sadržaj vlage u uzorku (Price, 2009).

STANDARDNI PENETRACIJSKI POKUS – SPP (ENGL. *STANDARD PENETRATION TEST*)

SPP-om se određuje otpor tla (na dnu bušotine) dinamičkom prodoru standardnog uzorkivača, a dobiven uzorak ispitivanog tla je poremećen. SPP je najraširenije terensko ispitivanje koje se prvenstveno rabi za nekoherentna pjeskovita tla za procjenu čvrstoće i deformacijskih svojstava, a sam pokus je definiran prema normi HRN EN ISO 22476-3. Izvodi se u bušotini gdje se cilindar standardnih dimenzija (Slika 16) postavlja na prethodno očišćeno dno bušotine, a preko bušaćih šipki je spojen s površinom (Kvasnička i Domitrović, 2007).



Slika 16. Cilindar za SPP

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Na vrhu potisnih šipki montira se sklop za zabijanje koji se sastoji od nakovnja, padajućeg utega, vodilice i automatskog okidača. Zatim se uzorkivač na šiškama spušta u bušotinu te se u tlo zabija udarcima utega koji ima definiranu masu (63,5±0,5 kg) i pada sa zadane visine (760±10 mm). Otpornost tla na prodiranje definira se kao broj udaraca (N_{30}) koji je potreban da se SPT uzorkivač zabije u tlo duž definirane

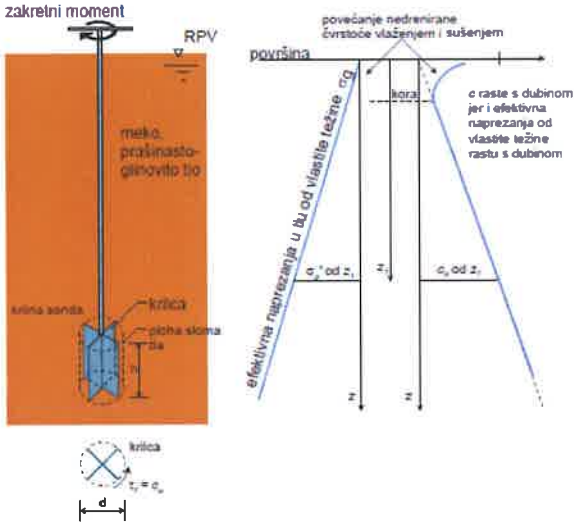
udaljenosti koja u većini slučajeva iznosi 0,30 m. U šljunkovitom pijesku se umjesto noža koristi šiljak (60°), a sam pokus se označava kao SPT(C). Također, potrebno je pažljivo očistiti dno bušotine te ukloniti sav rasuti materijal prije početka ispitivanja (Price, 2009).

Prednosti korištenja SPT-a su dobivanje uzorka tla i broja udaraca za penetraciju od 30 cm (N_{30}), jednostavnost pokusa i robusna oprema, pokus je prikladan u različitim tipovima tla, odnosno može se obaviti u mekim stijenama, a ulaganja u opremu su mala. S druge strane, nedostaci su sljedeći: dobiven je poremećen uzorak, broj udaraca je nedovoljan za kvalitetnu analizu te pokus nije prikladan za istraživanje u mekim glinama i prahovima (Rowe, 2001).

POKUS TERENSKOM KRILNOM SONDOM (FVT, ENGL. *FIELD VANE TEST*)

FVT-om je moguće odrediti vršnu i rezidualnu nedreniranu posmičnu čvrstoću i osjetljivost S_t, koja je kvocijent vršne i rezidualne posmične čvrstoće, koherentnog tla. Uz to što se može odrediti nedrenirana čvrstoća, ovaj pokus je ima jednostavnu opremu, moguće je određivanje osjetljivosti gline te ima dugu povijest korištenja koja je doprinijelo bogatom iskustvu. No, primjena je ograničena samo na koherentna tla, pokus zahtjeva vremena te je osjetljiv je na tanke slojeve pijeska, a same rezultate je potrebno korigirati (Rowe, 2001). Nadalje, mjerna oprema se sastoji od: uređaja za rotaciju krilca, mjerača okretnog momenta, šipki kojima se krile utiskuje u tlo i rotira, klizne spojke i krilca, a umjesto klizne spojke se može koristiti i neki drugi sklop za eliminaciju ili mjerenje trenja duž šipki. FVT se koristi u sondažnoj jami ili bušotini gdje se šipka s četiri ploče na dnu utisne u tlo i zakreće.

Krilna sonda se sastoji od četiri krilca koja su međusobno učvršćena pod kutom od 90° (Slika 17). Sonda se utiskuje izravno u tlo ili kroz bušotinu do zadane dubine, a zatim se zakreće s momentom tako da dođe do sloma tla u nedreniranim uvjetima. Krilnu sondu treba okretati stalnom brzinom, a da bi se ostvarili nedrenirani uvjeta ta brzina mora iznositi 0,1-0,2 °/s (Kvasnička i Domitrović, 2007).

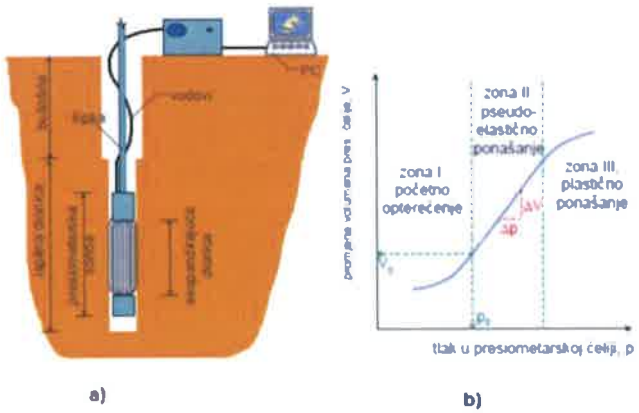


Slika 17. Prikaz krilne sonde i rezultata ispitivanja

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

POKUS PRESIOMETROM (PMT, ENGL. *PRESSUREMETER TEST)*

PMT se koristi za dobivanje odnosa između nanesenog opterećenja i rezultirajuće deformacije tla, određivanje deformabilnosti temeljem radijalnih deformacija koje se događaju na plaštu bušotine, a sama bušotina mora biti izvedena bez proširenja. Dobiveni parametri su modul elastičnosti i modul deformacija (Rowe, 2001).



Slika 18. Shema mjerenja presiometrom (a) i dijagram opterećivanja (b)

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

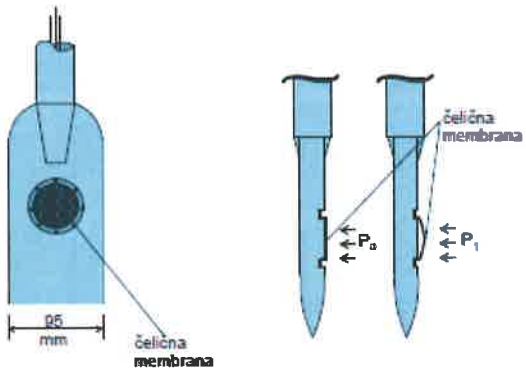
PMT se izvodi u sondažnoj jami ili bušotini, na dnu šipke se nalazi cilindrični čelični „balon" koji ispuni bušotinu na ispitivanoj dubini (Slika 18), a mjeri se horizontalna, radijalna deformacija tla, odnosno tlak i bočni pomak membrane, dok se bočni modul

tla određuje iz dijagrama naprezanja i promjene volumena ekspandirajuće dionice (Kvasnička i Domitrović, 2007).

PMT je moguće koristiti u svim tipovima tla i mekšim stijenama, a najčešće se koristi u slabo vezanim stijenama, mekanim čvrstim stijenama ili jako raspucanim čvrstim stijenama. Štoviše, za PMT postoji dobra teoretska podloga kojom se određuju parametri tla te pokus zahvaća veću ispitnu zonu, kao i razvoj kompletne σ-ε-τ krivulje. Međutim, procedura je kompliciran i zahtjeva visoku stručnost, a sam pokus je vremenski zahtjevan i skup (Price, 2009).

POKUS PLOSNATIM DILATOMETROM (DMT, ENGL. *FLAT DILATOMETER TEST*)

DMT se koristi za kontinuirano profiliranje tla, odnosno za određivanje stratigrafije, procjene *in situ* stanja bočnog naprezanja, deformacijskih svojstava i posmične čvrstoće tla. Pokus je najprikladniji za glinu, prah i pijesak te njihove mješavine, dok šljunak nije pogodan za ispitivanja zbog oštećenja membrana i nemogućnosti penetracije. Ovaj pokus je jednostavan, dobiveni ponovljivi rezultati ne ovise o ispitivaču, a procjene slijeganja tla su dobre. Nadalje, pokus je relativno brz i ekonomičan. No, sondu je teško utisnuti u dobro zbijena krupnozrnata ili kruta sitnozrnata tla, potrebna je kalibracija na neke lokalne geološke uvjete, a interpretacija se oslanja na empirijske korelacije (Rowe, 2001).



Slika 19. Shematski prikaz plosnatog dilatometra

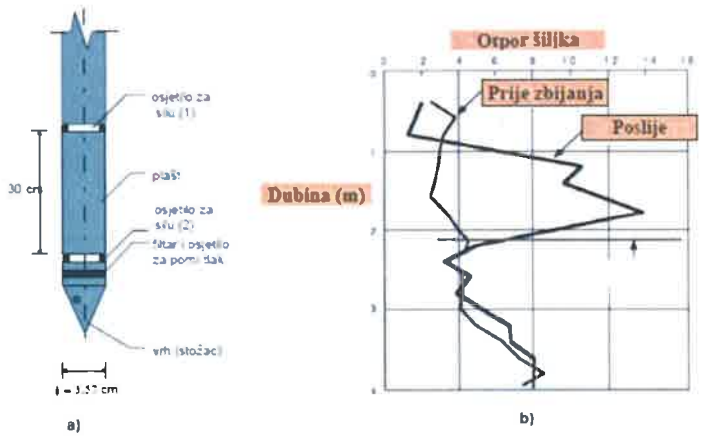
(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Plosnati dilatometar (Slika 19) je sječivo s tankom okruglom čeličnom membranom koja je poravnata s jednom plohom sonde. Ispitivanje se provodi na način da se sonda u tlo utiskuje vertikalno (u bušotinu) pri čemu se mjeri kontaktno naprezanje tla na

membranu dok je poravnata s jednom plohom sonde i još jedanput kad se izboči za 1,10 mm. (Kvasnička i Domitrović, 2007).

STATIČKI PENETRACIJSKI POKUS (CPT, ENGL. *CONE PENETRATION TEST*)

CPT-om se mjeri otpor prodiranju šiljka, trenje na plaštu, dinamički porni tlak i nagib sonde i to neposredno pokraj bušotine samostalnim uređajem. Penetracija se obavlja statičkim potiskom s brzinom prodiranja u tlo 20 $\pm$0,5 mm/s pri čemu se prvo mjeri sila utiskivanja šiljka standardiziranog profila, a nakon toga se mjeri trenje po plaštu. Tri su faze postupka: utiskivanje šiljka, utiskivanje plašta i utiskivanje šiljka i plašta zajedno (Slika 20). Ukoliko je iza konusa ugrađeno osjetilo za mjerenje pornog tlaka zovemo ga piezokon (CPTU), a tada se može odrediti i koeficijent konsolidacije. Ovim pokusom je moguće kontinuirano određivanje stratigrafije i identifikacija tipova tla, odnosno profiliranje tla, procjena vrijednosti geotehničkih parametara, izravno korištenje rezultata za geotehničko projektiranje dubokih temelja te kontrola kvalitete poboljšanja tla. CPT se obavlja kroz slojeve gline, praha, pijeska i njihovih mješavina, dok je kroz šljunkovito tlo teško penetrirati. Površina poprečnog presjeka konusa mora biti 100 mm^2, točnost mjerene sile treba biti unutar 5% (Price, 2009).



Slika 20. Vrh statičke penetracijske sonde (a) i primjer rezultata statičke penetracije (b)
(Kvasnička i Domitrović, 2007)

CPT-om je moguće dobiti kontinuiran zapis mjerenih parametara s dubinom, dobiveni ponovljivi rezultati ne ovise o ispitivaču, pokus je relativno brz i ekonomičan te postoji dobra teoretska podloga za interpretaciju CPT rezultata i mogućnost detekcije

onečišćenja u tlu. CPT-om se ne dobiva uzorak tla, a sofisticirana oprema zahtjeva stručnog ispitivača i složene kalibracijske postupke za mjernu opremu (Rowe, 2001).

3.3 PRIKUPLJANJE PODATAKA KROZ GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

Pomoću geofizičkih istraživanja, čiji je razvoj započeo sredinom prošlog stoljeća, određuju se dubine zone trošenja, debljina pokrivača, detektiraju se moguće kaverne, tektonske zone – dubina, razina podzemne vode i slično (Waltham, 2009). Nadalje, osnovna zadaća geofizičkih mjerenja je upotpuniti podatke koji nisu dobiveni inženjerskogeološkim kartiranjem površine i relativno plitkim bušenjem, a glavna primjena je kod interpolacije podataka iz bušotine (Mihalić, 2007).

Geofizička mjerenja spadaju u nedestruktivna i posredna, odnosno površinska ispitivanja koja daju podatke o prosječnom sastavu određenog volumena tla u dubini mjerenjem neke fizikalne veličine s površine. Služe za interpolaciju podataka o slojevima tla između postavljenih bušotina. Postoje tri vrste mjerenja: električna, seizmička i radioaktivna, a mogu se podijeliti u dvije grupe (Clayton et al., 1995):

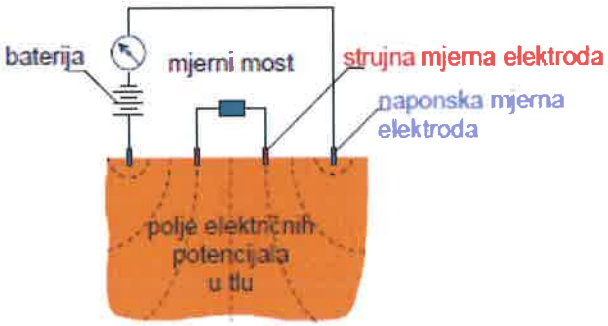
1. Pasivne tehnike čine promatranje tla kao što ono je te se na njih ne može utjecati. U pravilu se sastoje od mjerenja lokalnih promjena Zemljine energije kao što su gravitacija i magnetsko polje.
2. Aktivne tehnike čine mjerenja koja se postižu pomoću ulaznih signala u tlo i njihovim mjerenjem, a primjeri takvih tehnika su električna, seizmička i nuklearna mjerenja.

Bolji rezultati se postižu aktivnim tehnikama, ali su takve tehnike, usporedno s pasivnim tehnikama, skuplje. Nadalje, napredak tehnologije, odnosno digitalno očitavanje rezultata i obrada računalom osigurali su preciznija mjerenja i brži način rada. Također, brzina rada ovisi o pristupačnosti lokacije, no radovi se mogu izvoditi na svim terenima.

3.3.1 Površinska geofizička ispitivanja

Geoelektrična ispitivanja

Najširu primjenu ima metoda mjerenja specifičnog električnog otpora u tlu. Ispitivanje se vrši pomoću više međusobno razdvojenih i udaljenih elektroda po terenu na kojem se vrše mjerenja. Zatim se pušta napon u svaku te se mjeri potencijal između njih (Slika 21).



Slika 21. Shema geoelektričnih mjerenja

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Što su elektrode udaljenije, dobiva se prosječna vrijednost za veći volumen tla, po površini i dubini. Obratno, što su elektrode međusobno bliže, rezultati ispitivanja su detaljniji. Iz takvih podataka izračunavaju se promjene specifičnog otpora materijala s dubinom, a mjerenjem u više profila dobiva se slika o smještaju slojeva materijala jednakih električnih osobina. Mjerenja su moguća do dubine do 30 do 50 m (Nonveiller, 1979). Tablica 1 prikazuje određene vrste materijala i njihovo ponašanje, odnosno specifične otpore.

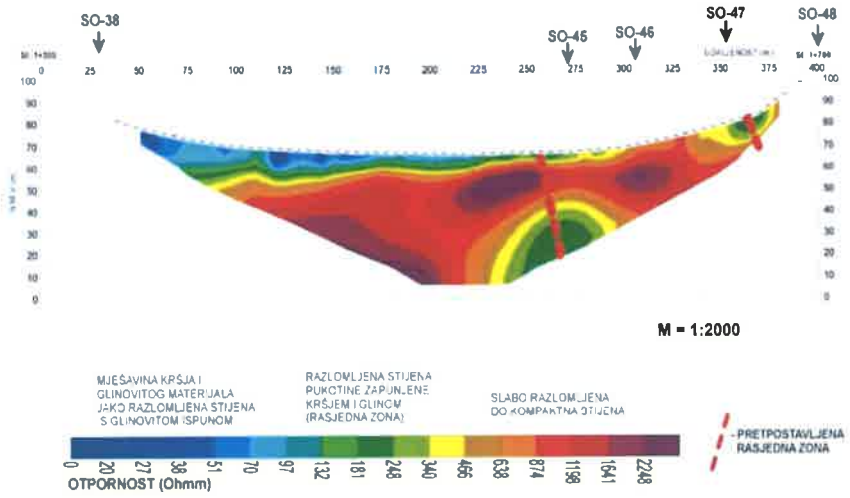
Mjerenje koje se vrši u vodoravno uslojenim tlima i kod hidrogeoloških istraživanja naziva se geoelektrično sondiranje. Vrši se na način da se odabere mjesto naponskih elektroda, dok se mijenja razmak mjernih elektroda čime se postepeno obuhvaća sve veća dubina tla u podzemlju, a središnja točka se ne pomiče. Tim putem, dobivaju se promjene otpora po dubini za središnju točku elektrodnog rasporeda. Mjerenje koje se koristi za istraživanje bočnih promjena u tlu, raspucalih područja i stupnja rastrošenosti površinskog dijela tla naziva se geoelektrično profiliranje kod kojeg se mjerni sklop pomiče po profilu s neizmijenjenim rasporedom i razmakom elektroda. Dobiveni

rezultat je podatak o promjeni otpora za odabranu dubinu, duž odabranog pravca (Roje-Bonacci, 2012).

Tablica 1. Geoelektrične karakteristike materijala u tlu (Nonveiller, 1979)

Materijal	Specifični otpor Ω m	
	Suho	Vlažno
Šljunak	50 - 5 000	40 - 600
Pijesak	50 - 2 000	30 - 200
Glina	-	1 - 200
Granit	100 - 30 000	-
Karbonatne stijene, malo raspucale	3 000 - 20 000	-
Karbonatne stijene s glinovitom ispunom	500 - 10 000	100 - 2 000
Laporovite	-	1 000 - 5 000

Geoelektrična tomografija je kombinacija geoelektričnog sondiranja i profiliranja. To je multielektrodni sustav za dvodimenzionalno mjerenje otpornosti podzemlja i koriste se razni rasporedi elektroda, pr. Wernerov raspored (Clayton et al., 1995). Ovom metodom moguće je dobro prikazati stanje u podzemlju pri čemu različite stijene imaju različita električna svojstva, odnosno visoku otpornost pružaju kompaktne do slabo raspucane stijene dok nisku otpornost prikazuju krš te pijesak i prah (Slika 22).



Slika 22. Rezultat geoelektrične tomografije

(Roje-Bonacci, 2012)

GEOMAGNETSKA ISPITIVANJA

Zemljino magnetsko polje je izazvano električnim strujama koje kruže u njegovom vanjskom polju. Razlike u jačini polja i smjeru polariteta su kontinentalnih razmjera i odnose se na razne geološke čimbenike. Manje i lokalne razlike ovise o prirodi i blizini površine geoloških materijala. Geološka tijela koja sadržavaju željezo imaju visoku magnetsku susceptibilnost zbog čega je intenzitet magnetskog polja iznad takvih tijela visok, a uređaji kojima se mjeri jačina Zemljinog magnetskog polja, odnosno prisutnost slojeva u tlu s visokom susceptibilnosti, nazivaju se magnetometri (Price, 2009).

ELEKTROMAGNETSKA ISPITIVANJA

Kod elektromagnetskih ispitivanja promatraju se reakcije tla na elektromagnetske impulse različitih frekvencija. U inženjerskoj geologiji koriste se dvije metode, a to su metoda indukcije i georadar. Kod metode indukcije kružno magnetsko polje je izazvano prolaskom električne struje kroz žičanu petlju ili kroz žicu koja je uzemljena na oba kraja. Frekvencija magnetskog polja je između 100 Hz i 5 000 Hz. Ukoliko postoji materijal unutar izazovnog magnetskog polja, on će zauzvrat izazvati magnetsko polje, odnosno uz primarno polje postoji i inducirano magnetsko polje. Mjerenje karakteristika ukupnog magnetskog polja ukazuje na otkrivanje vodiča (Price, 2009). Nadalje, metoda koja se koristi sve češće je mjerenje pomoću georadara prilikom kojeg se odašiljaju visokofrekventni elektromagnetski valovi i reflektirani valovi. Optimalna radna frekvencija georadara je 25 MHz – 1,5 GHz pri čemu se s povećanjem frekvencije povećava vertikalna točnost, ali se i smanjuje dubina dosega elektromagnetskih valova. Georadarom je moguće otkriti podzemne instalacije kao što su cijevi, provoditi arheološke studije, odrediti stanje posteljice ceste, odrediti kaverne i slično. Također, ova metoda nije preporučljiva za gline i lapore koji „guše“ elektromagnetske valove.

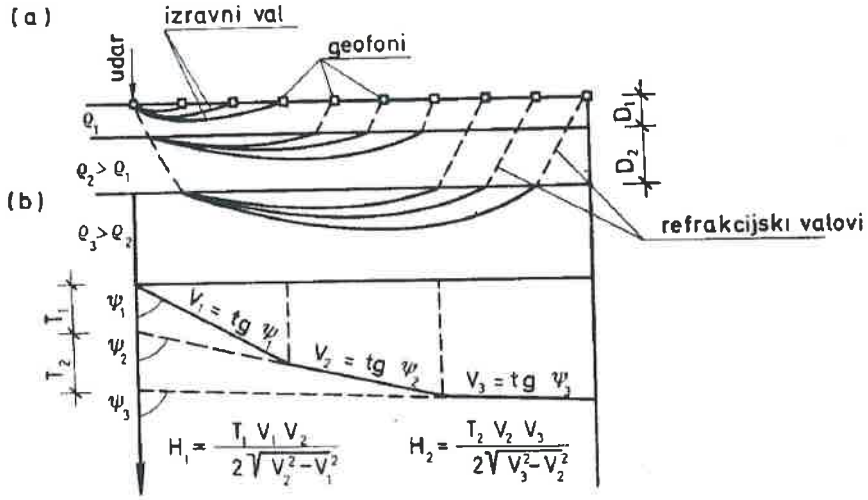
GRAVITACIJSKE METODE

Intenzitet gravitacijskog polja Zemlje može se mjeriti pomoću gravimetara koji su izrazito osjetljive ravnoteže, odnosno to su uređaji u kojima su vrlo mali pokreti, povezani s razlikama u gravitaciji između točaka promatranja, uvećani do čitljivosti pomoću mehaničkih ili optičkih uređaja. Na lokalnu vrijednost gravitacije utječu gustoća geološkog materijala, geografska širina, nadmorska visina, topografija i plima,

a njihovi utjecaji moraju se procijeniti korištenje različitih korekcija. Ova metoda ograničena je zbog velikih promjena gustoće u geološkoj strukturi. Međutim, posebna primjena je kod otkrivanja podzemnih šupljina u vapnencu čije anomalije mogu biti detektirane pomoću modernih gravimetara (Price, 2009). Nadalje, gravitacijskim metodama se mjere polja prirodnih sila što često daje nejasne podatke te je stoga interpretacija terenskih podataka kvalitativna (Clayton et al., 1995).

SEIZMIČKA ISPITIVANJA

U seizmičkim ispitivanjima mjere se brzine mehaničkih valova koji prolaze kroz različite slojeve materijala ili tla. Takvi valovi postižu se udarom čekića ili eksplozijom nakon čega se mjeri vrijeme njihovog dolaska na određenim mjestima u okolini izvora (ovisno o gustoći stijena kroz koje prolaze), a tu svrhu koriste se detektori pod nazivom geofoni. Dubina slojeva različitih materijala u tlu (Slika 23) izračunava se pomoću vremena putovanja izmjerenih izravnih, reflektiranih i refrakcijskih valova (Kvasnička i Domitrović, 2007).



Slika 23. Plitko seizmičko sondiranje s tri vodoravna sloja različitih osobina

(a) putanje kompresivnih valova do geofona, (b) hodogram brzina valova (Nonveiller, 1979)

Seizmička ispitivanja se mogu koristiti u ispitivanju sastava tla velikih dubina. Ukoliko je sloj gušći, valovi refrakcijom putuju najbrže paralelno s graničnom plohom u dubljem, gušćem sloju te stižu do geofona prije izravnih valova u gornjem, rjeđem sloju (Nonveiller, 1979). Na granicama slojeva se valovi odbijaju (refleksija i refrakcija) i

stižu do geofona na površini gdje se mjeri brzina nailaska vala. Dalje se te informacije obrađuju u računalu čime se ujedno može i ocijeniti ispravnost mjerenja.

Slika 24. Vrste mehaničkih valova u tluprikazuje valove koji prolaze kroz tlo (Kvasnička i Domitrović, 2007):

1. *Longitudinalni* (P) valovi koji se šire u obliku kružnica u smjeru seizmičke smetnje. Brži su od ostalih oblika valova, a šire se zbijanjem i razdvajanjem. Prolaze kroz vodu i tlo.
2. *Transverzalni ili poprečni* (S) valovi su dijagonalni valovi koji titraju okomito na smjer širenja. Trenjem se šire među česticama što im sprječava prolazak kroz vodu. Pomoću njih se određuju neka mehanička svojstva tla kroz koje ono prolazi.
3. *Površinski valovi* prolaze paralelno površini tla te su eliptičnog oblika. Gustoća valova ovisi o udaljenosti i gustoći tla kroz koje prolazi. Sporiji su od P i S valova.
4. *Love valovi* se javljaju kad se na površini ostvaruju P valovi manjih brzina nego oni u dubini. Smjer kretanja im je horizontalan i transverzalan, a slične su brzine kao S valovi.



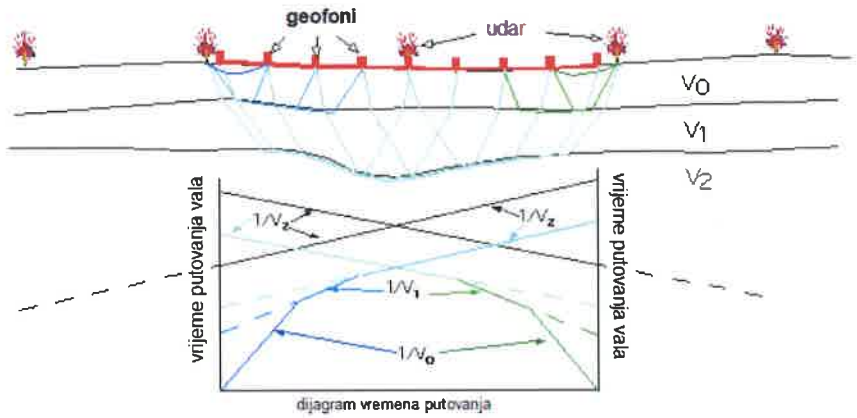
Slika 24. Vrste mehaničkih valova u tlu

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Seizmičke metode se zasnivaju na činjenici da elastična svojstva stijena/tla uvjetuju brzine širenja valova kroz njih, pri čemu vrijedi: što je veći modul elastičnosti, veća je i brzina širenja valova. Na brzinu valova utječu kristalinitet i porozitet. Nadalje, brzine valova su veće u stijenama koje imaju kristalastu teksturu i niski porozitet zbog većeg modula elastičnosti i više tlačne čvrstoće, dok porozitet ovisi o granulometrijskom sastavu i obliku zrna. Također, prisustvo gline u vapnencima smanjuje brzinu usporedno

s čistim vapnencima. Na smanjenje brzine širenja valova uz trošnost stijenske mase najviše utječu diskontinuiteti. Koriste se metode seizmičke refrakcije i refleksije (Mihalić, 2007).

Osnovni princip refrakcijske seizmike je određivanje brzina seizmičkih valova i lociranje značajnih elastičnih diskontinuiteta, a služi za kontinuirano praćenje prostornog rasporeda i promjena u fizičko-mehaničkim karakteristikama stijenske mase i materijala u podlozi. Temelj refrakcijske seizmike je refrakcija elastičnog vala na granici dviju sredina čije brzine zadovoljavaju uvjet: $v_2>v_1$ (v_1-brzina u gornjoj sredini, v_2-brzina u donjoj sredini). Elastični val se pobuđuje na površini terena i zatim se počinje širiti brzinom prve sredine pri čemu je najvažniji val koji na granici sredina dolazi pod kutom totalne refrakcije – širi se dalje duž granice brzinom donjeg medija v_2 te se vraća na površinu gdje pobuđuje postavljene geofone (Slika 25). Ovisno o geometriji rasporeda geofona i točke paljenja na površini terena, registriranih prvih nailazaka elastičnog vala formiraju se s-t dijagrami.

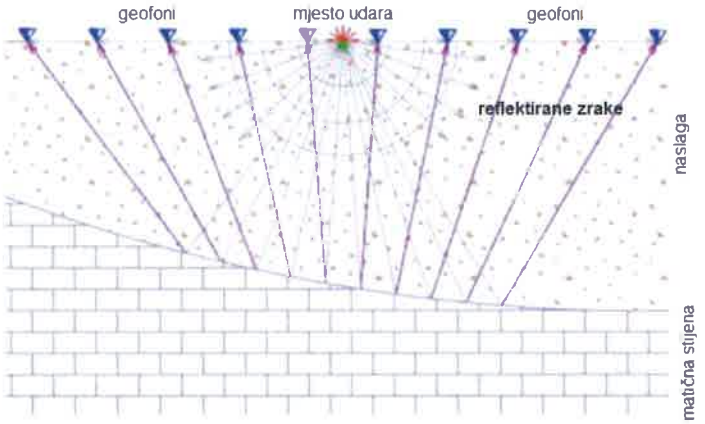


Slika 25. Shematski prikaz širenja valova kod refrakcijske seizmike

(modificirano iz Meaški, 2018)

Kod seizmičke refleksije se koristi slična oprema kao i kod refrakcije. U ovom slučaju su terenska mjerenja i procesiranje podataka usmjereni na povećavanje subvertikalnih valova (Slika 26). Refleksija ima bolju rezoluciju, ali je skuplja, stoga odluka ovisi o ekonomiji. Nadalje, refrakcija se najčešće koristi za dubine manje od 30 m dok se refleksija koristi za dubine veće od 15 m, prilikom refrakcije potrebne su pristupne dimenzije koje moraju biti veće od 5x dubine koju mjerimo što može biti ograničavajući

uvjet te efektivna dubina mjerenja kod refrakcije iznosi 1/5 do ¼ maksimalnog razmaka geofona, dok ista dubina kod refleksije iznosi više od 15 m.



Slika 26. Shematski prikaz širenja valova kod refleksijske seizmike

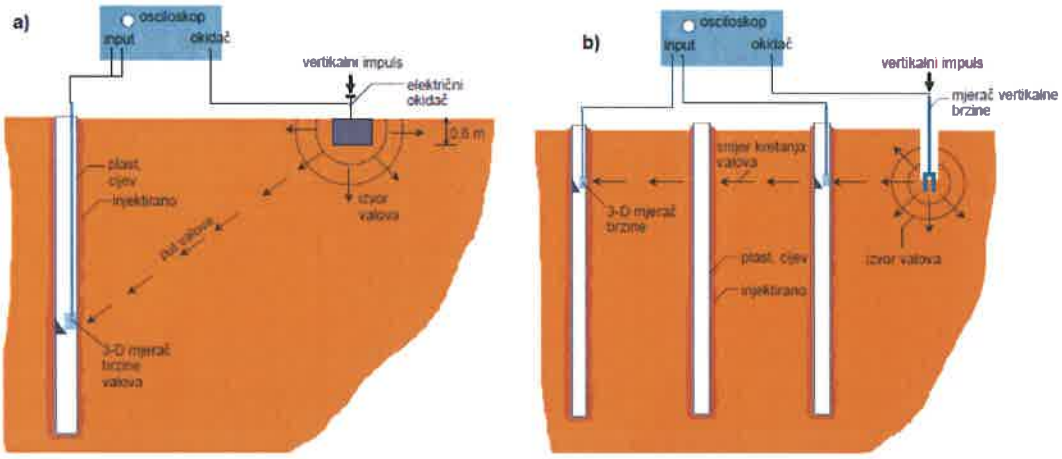
(modificirano iz Meaški, 2018)

3.3.2 Geofizička istraživanja u bušotinama

Geofizička istraživanja u bušotinama se zasnivaju na istim teoretskim temeljima kao i površinske geofizičke metode, ali razlika je u tome što se mjerenja provode duž kanala bušotine. Mjerenjima u bušotinama su, zbog ekonomske isplativosti i kraćeg trajanja, prvenstveno nastala kao zamjena skupom jezgrovanju. Naime, postoji mogućnost bušenja udarnom metodom koja je u pravilu brža te naknadno mjerenje u izvedenim bušotinama čime se dobivaju velike količine podataka o stijenskoj masi u neposrednoj okolici bušotine. Općenito, mjerenja u bušotinama nazivaju se karotažna mjerenja, a najbolje ih je kombinirati s drugim metodama kako bi se smanjio rizik kod donošenja odluke. Mjerenja se izvode spuštanjem sonde u kojoj se nalaze odgovarajući prijamnici i odašiljači ovisno o namjeni sonde u bušotini. Zatim se podaci šalju kabelom u instrumente koji se nalaze na površini terena gdje se primaju, obrađuju i spremaju.

Ovisno o načinu izvedbe postoje: up-hole (izvor je u bušotini, prijamnik je na površini), down-hole (izvor je na površini, prijamnik je u bušotini, cross-hole (izvor u jednoj bušotini, prijamnik u drugoj (Slika 27). Od ovdje navedenih metoda, cross-hole je najkvalitetnija, ali i najskuplja metoda. Ovim istraživanjima otkrivaju se nijanse u litološkom sastavu u užoj lokaciji bušotine i mjere se parametri kao što su gustoća i poroznost. Također, istraživanjima u bušotinama moguće je ukloniti pogrešku koju

stvaraju vodovodne cijevi i slične instalacije koje su „ubrzivači valova“ te stoje kao prepreka prolasku valova (Kvasnička i Domitrović, 2007).



Slika 27. Cross-hole (a) i down-hole (b) mjerenje brzine nailaska valova

(Kvasnička i Domitrović, 2007)

Mjerenja koja se izvode su:

1) *Karotaža otpornosti* – izvodi se u nezacijevljenoj bušotini duž koji se mjeri otpornost, moguće je odrediti vrste stijena, stanje stijena (pr. poroznost, razlomljenost i slično), definirati različite vrste naslaga u sklopu fliških naslaga
2) *Karotaža spontanog potencijala* – spontani potencijal (SP) je razlika između površinske elektrode i elektrode spuštene u bušotinu koja se iskazuje u mV, osnovna namjena je razdvajanje propusnih i nepropusnih naslaga pri čemu se najbolji rezultati dobivaju prilikom određivanja granica slojeva pijesaka unutar šejlova
3) *Radioaktivne karotažne metode* – prvenstveno služi za razdvajanje propusnih/niskoradioaktivnih naslaga (pijesci, pješčenjaci, karbonati) i nepropusnih/visokoradioaktivnih naslaga (gline, šejlovi, lapori)
4) *Karotaža gustoće*
5) *Akustična snimanja*
6) *Snimanja TV kamerama*

4 ZAKLJUČAK

Terenska ispitivanja i mjerenja u inženjerskoj geologiji čine osnovu poznavanja stijena i/ili tla na kojemu dolazi do zahvata u okoliš, poput izgradnje objekata ili eksploatacije mineralnih sirovina i isto tako, prirodnih procesa koji nastaju egzogenim ili endogenim procesima u Zemlji. Mjerenja koja se izvode u inženjerskoj geologiji na terenu sastoje se od prikupljanja podataka kroz geološka, geotehnička i geofizička istraživanja.

Prikupljanje podataka kroz geološka istraživanja izvodi se s ciljevima: izrade inženjerskogeoloških i geoloških karata izdanaka i bušotina, razumijevanja geološke građe, na čijoj osnovi je moguće planiranje budućih terenskih mjerenja. Izradu inženjerskogeološke i geološke karte prati bušenje koje može biti ručno ili strojno, ovisno o vrsti tla i željenim informacijama. Ciljevi bušenja su dobivanje jezgre stijene i uzoraka za laboratorijsku analizu. U izvedenim bušotinama izvode se *in situ* mjerenja koja uključuju: statički penetracijski pokus i piezokon, presiometarski pokus, standardni penetracijski pokus, ispitivanje terenskom krilnom sondom i plosnatim dilatometrom i mjerenja u podzemnoj vodi. Iz navedenih ispitivanja dobivaju se informacije kao što su čvrstoća i deformacijska svojstva tla, razina podzemne vode i slično.

Kako bi se dopunili i interpolirali podaci dobiveni iz bušotina – izvode se geofizička mjerenja koja su prvenstveno nastala kao zamjena skupom jezgrovanju. Geofizička istraživanja imaju svrhu određivanja dubine zone trošenja i debljine pokrivača, uočavanje mogućih kaverni, prikaz tektonskih zona i pomoć prilikom donošenja odluka koje smanjuju rizike. Glavne tehnike geofizičkih istraživanja su pasivne, gdje se mjere lokalne promjene Zemljine energije kao što su gravitacija i magnetsko polje, te aktivne, gdje se mjere uzrokovani signali u tlu.

5 POPIS LITERATURE

Clayton, C. R. I., Matthews, M. C. i Aimona, N. E. (1995) *Site investigation.* 2nd Edition.

Ferrer, M. i de Vallejo, L. I. G. (2011) *Geological Engineering.* London: CRC Press/Balkema.

Gaurina-Međimurec, N., Pašić B. i Mijić P. (2017) *Nove tehnologije izrade naftnih i plinskih bušotina.* Dostupno na: https://bib.irb.hr/datoteka/898268.Nove_tehnologije_izrade_naftnih_i_plinskih_buotina.pdf [2. rujna 2019.]

Geološko kartiranje (bez datuma). Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/GK1_P1_Geolosko_Kartiranje_2018_19.pdf [15. lipanj 2019.]

Cvetko Tešović, B (2019). *Geologija u graditeljstvu (građevinarstvu) - Inženjerska geologija.* [Online]. Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/Primijenjena_geol.7-INZENJERSKA_GEOL..ppt [2. rujna 2019.]

In-situ Testing devices (bez datuma). Dostupno na: http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/Research/devices/ [13. svibanj 2019.]

Kavedžija, B. (2012) *Tehnika izrade bušotina, Interna skripta RGN fakulteta.* Zagreb: Sveučilište u Zagrebu

Kvasnička, P. i Domitrović, D. (2007) „Mehanika tla : interna skripta", str. 216.

Markić, I. i Zovko V. (2019). *Geomehanički istražni radovi na Mostarskom blatu.* [Online]. Dostupno na: http://www2008.gf.sve-mo.ba/geomeh_mo_blato.htm [6. rujna 2019.]

Meaški, H. (2018) *Istraživački postupci u IG (nastavni materijali iz kolegija Inženjerska geologija na Geotehničkom fakultetu).* Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.

Meaški, H (2016) *Uvod (nastavni materijali iz kolegija Inženjerska geologija na Geotehničkom fakultetu).* Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.

Mihalić, S. (2007) *GEOTEHNIČKO ISTRAŽIVANJE: metode dobivanja podataka.* Dostupno na: http://rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/06_03_istrazivanjeGeotehni_LOG.pdf [7. kolovoz 2019.]

Mihalić, S. (2007) *Osnove inženjerske geologije, Interna skripta RGN fakulteta.* Zagreb:

Sveučilište u Zagrebu.

Nonveiller, E. (1979) *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Zagreb: Školska knjiga.

Ortolan, Ž. (2013) *Uloga inženjerske geologije u geotehnici - Prvi geotehnički okrugli stol HGD*. Zagreb.

Price, D. G. (2009) *Engineering Geology - Principles and practice*. Springer.

Roje-Bonacci, T. (2012) *Zemljani radovi*. Split: Sveučilište u Splitu. Dostupno na: https://bib.irb.hr/datoteka/602466.gotovi_tekst_za_tiskaru_.pdf [07. kolovoz 2019.]

Rowe, R. K. (2001) *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. New York: Kluwer Academic Publishers. doi: 10.1007/978-1-4615-1729-0.

Singh, B, Goel, R.K., (2011). Engineering rock mass classification. Elsevier, Oxford.

Šestanović, S. (1993) *Osnove inženjerske geologije*. Split: Sveučilište u Splitu.

Waltham, T. (2009) *Foundations od enfineering geology*. Abingdon: Spoon press.

POPIS SLIKA I TABLICA

SLIKA 1. STIJENSKA MASA (MEAŠKI, 2016) 4
SLIKA 2. ULOGA INŽENJER GEOLOGA (MEAŠKI, 2016) 6
SLIKA 3. PRIKAZ OSNOVNE GEOLOŠKE KARTE REPUBLIKE HRVATSKE, M 1:300.000 (HGI-CGS, 2009) 9
SLIKA 4 SONDAŽNA JAMA (MARKIĆ & ZOVKO, 2019) 11
SLIKA 5. PODJELA VRSTA BUŠENJA (MEAŠKI, 2018) 12
SLIKA 6. PRIKAZ RUČNOG BUŠENJA (KVASNIČKA I DOMITROVIĆ, 2007) 14
SLIKA 7. VAĐENJE UZORAKA IZ BUŠOTINA 15
SLIKA 8. CILINDAR S FIKSNIM KLIPOM ZA VAĐENJE NEPOREMEĆENIH UZORAKA 15
SLIKA 9. PRIKAZ A) JEDNOSTRUKE JEZGRENE CIJEVI, B) DVOSTRUKE JEZGRENE CIJEVI (MEAŠKI, 2018) 16
SLIKA 10. JEZGRA SLOŽENA U SANDUKE S OZNAKAMA DUBINE (ROJE-BONACCI, 2012) 17
SLIKA 11. LOG BUŠOTINE 18
SLIKA 12. PIEZOMETAR OTVORENOG SUSTAVA 19
SLIKA 13. MJERENJE VODOPROPUSNOSTI METODOM LEFRANC SA STALNIM PADOM 20
SLIKA 14. TLOCRTNI POLOŽAJ BUNARA I PIEZOMETARA ZA MJERENJE VODOPROPUSNOSTI 21
SLIKA 15. NAJČEŠĆE KORIŠTENI *IN SITU* POKUSI (*IN-SITU TESTING DEVICES*) 21
SLIKA 16. CILINDAR ZA SPP 22
SLIKA 17. PRIKAZ KRILNE SONDE I REZULTATA ISPITIVANJA 24
SLIKA 18. SHEMA MJERENJA PRESIOMETROM (A) I DIJAGRAM OPTEREĆIVANJA (B) 24
SLIKA 19. SHEMATSKI PRIKAZ PLOSNATOG DILATOMETRA 25
SLIKA 20. VRH STATIČKE PENETRACIJSKE SONDE (A) I PRIMJER REZULTATA STATIČKE PENETRACIJE (B) 26
SLIKA 21. SHEMA GEOELEKTRIČNIH MJERENJA 28
SLIKA 22. REZULTAT GEOELEKTRIČNE TOMOGRAFIJE 29
SLIKA 23. PLITKO SEIZMIČKO SONDIRANJE S TRI VODORAVNA SLOJA RAZLIČITIH OSOBINA 31
SLIKA 24. VRSTE MEHANIČKIH VALOVA U TLU 32
SLIKA 25. SHEMATSKI PRIKAZ ŠIRENJA VALOVA KOD REFRAKCIJSKE SEIZMIKE 33
SLIKA 26. SHEMATSKI PRIKAZ ŠIRENJA VALOVA KOD REFLEKSIJSKE SEIZMIKE 34
SLIKA 27. CROSS-HOLE (A) I DOWN-HOLE (B) MJERENJE BRZINE NAILASKA VALOVA 35

TABLICA 1. GEOELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE MATERIJALA U TLU (NONVEILLER, 1979) 29