

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

GEORADAR (GPR)
PRI GEOMEHANSKIH PREISKAVAH TERENA
NA PRIMERU PILOTNE STENE

Kandidat: Davor Grgec

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: gradbeništvo

Mentor predavatelj: dr. Samo Peter Medved, u. d. i. g.

Mentor v podjetju: Tomo Tancer, univ. dipl. oec., inž. gr.

Lektor: Natalija Posavec, mag. prof. slovenskega jezika in knjiž.

Maribor, 2019

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Davor GRGEC, sem avtor diplomskega dela z naslovom GEORADAR (GPR) PRI GEOMEHANSKIH PREISKAVAH TERENA NA PRIMERU PILOTNE STENE, ki sem ga napisal pod mentorstvom mentorja predavatelja dr. Sama Petra Medveda.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel/a, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/2013 in 56/2015); (v nadaljevanju ZASP), prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, april 2019

Podpis študenta:

ZAHVALA

Zahvaljujem se celotnemu kolektivu v podjetju APROS d. o. o., ki so potrpežljivo vztrajali in me spodbujali, predvsem mentorju v podjetju g. Tomu Tancerju, inž. gr., za vso sprotno podporo pri pisanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi g. Bojanu Dapčeviću, univ. dipl. inž. gr. in mentorju predavatelju dr. Samu Petru Medvedu, univ. dipl. inž. gr. za vso strokovno pomoč in nasvete, ki so mi bili v veliko pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Iskrena hvala mojim najbližjim, ki so med študijem in ves čas verjeli vame, me bodrili, da naredim še ta zaključni korak ter mi vlivali potrebno voljo in moč.

POVZETEK

Namen izbrane teme diplomskega dela je s pomočjo strokovne literature, operativne prakse in lastnih izkušenj opozoriti na večjo vlogo geomehanika pri pripravi projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja. Predvsem želimo skozi poglavja diplomskega dela poudariti, kako pomembno je predhodno preiskati teren, vključiti geomehanika, ki na osnovi ogleda, izvedenih geomehanskih preiskav in odvzemov vzorcev zemljin z izdelavo geološko-geotehničnega poročila poda ključne podatke projektantu za izdelavo projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja ter tako bodočemu investitorju kot tudi izvajalcu pripomore k popolnejši in kvalitetnejši sliki obravnavanega območja ter zagotovi, da bo bodoči objekt varen in čim bolj funkcionalen.

Glede na vse bolj obširno gradnjo izven mestnih središč, na lokacijah kmetijskih zemljišč z lepim razgledom, a povečini strmim pobočjem, se zdi pomembno, da se bodoče investitorje opozori na geomehanska presenečenja, ki lahko prvotno načrtovano investicijo drastično povišajo. Vsako takšno območje ima svoje specifične geomehanske lastnosti tal, ki so očem skrite ter povečini pred samo gradnjo spregledane.

V uvodnem poglavju diplomskega dela smo postavili teze ter predstavili skupinsko delo v projektni skupini, nato so se v nadaljevanju navezali na inženirsko geologijo kot tudi na stroko, v kateri delujemo, to je geomehanika s predstavitvijo terenskih in laboratorijskih preiskav. Tema dvema poglavjema sledi praktični del diplomskega dela s predstavitvijo potrebnih geofizikalnih terenskih preiskav na primeru izvedbe pilotne stene v okviru projekta nadgradnje železniškega progovnega odseka Maribor–Šentilj–državna meja kot tudi uporaba georadarske metode skozi zgodovino, njene prednosti in slabosti z analizo, razlago in interpretacijo dobljenih rezultatov izvedenih terenskih meritev.

Glede na podatke izvedenih predhodnih terenskih preiskav izbranega območja smo v zaključku diplomskega dela podali primerjalno-stroškovno analizo spremljave sondažnega izkopa z vrtno garnituro in izvedbe predhodnih preiskav terena s pomočjo georadarske metode – GPR (ground-penetrating radar) ter nato postavljene teze v uvodu diplomskega dela v zaključku oziroma sklepu potrdili oziroma ovrgli.

Ključne besede: gradbeništvo, geologija, geomehanika, geomehansko poročilo, georadar – GPR, vrtna garnitura, primerjalno-stroškovna analiza

ABSTRACT

GEORADAR (GPR) IN GEOMECHANICAL SOIL INVESTIGATIONS FOR PILOT WALLS

The purpose of my diploma topic is to emphasise the increasing role of a geomechanics engineer in project preparation for obtaining a building permit with the help of technical literature, operational practice, and personal experience.

In particular, the chapters highlight the importance of preliminary soil investigation in building permit acquisition. I also emphasise the vital role of a geomechanics engineer at this stage who – by producing a geological – geotechnical report based on site reconnaissance, performed geomechanical investigations, and soil sample taking – provides project leader with key data for project implementation in obtaining a building permit. This way, both the future investor and building contractor can benefit from a complete and quality overview of the investigated area while also being assured that the future facility will be as safe and functional as possible.

Given the growing and wide-ranging construction outside urban city centers at agricultural locations with beautiful views but mostly steep slopes it is important to alert future investors to possible geomechanical surprises that can dramatically increase their initially planned investment. Each area has its own specific geomechanical properties of the soil hidden to the human eye and frequently overlooked prior to construction.

In the introductory chapter of my diploma paper, I define the hypotheses and present group work within the project team. Then, I refer to engineering geology as well as to the profession in which I work, that is geomechanics by providing field and laboratory investigations. These two chapters are followed by the practical part, which presents the necessary geophysical field investigations for implementing the pilot wall in the framework of the project for upgrading the railway line section Maribor - Šentilj – state border. In addition, I present the georadar method through history, its advantages and disadvantages with the analysis, explanation, and interpretation of the results obtained in the performed field measurements.

Based on the data gathered in the preliminary field investigations of the investigated area, I present a comparative - cost analysis of the monitoring of the probing excavation with the drilling set as well as the implementation of preliminary field investigations using the georadar

method, i.e. ground-penetrating radar. Finally, I either confirm or disconfirm the hypotheses defined in the introduction of my diploma paper.

Keywords: construction; geology; geomechanics; geomechanical report; georadar; drilling set; comparative - cost analysis.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	10
1.1	Opis področja in opredelitev problema.....	10
1.2	Namen, cilji in osnovne trditve.....	11
1.3	Predpostavke in omejitve	12
1.4	Uporabljene raziskovalne metode.....	12
2	DELO V PROJEKTNi SKUPINI	13
3	GEOTEHNIČNE PREISKAVE TERENA.....	16
3.1	Pomen geomehanike v gradbeništvu	16
3.2	Evrokod 7 – evropski standard za geotehniko	17
3.3	Geotehnične terenske preiskave.....	18
3.4	Laboratorijske preiskave kamnin/zemljin.....	21
3.5	Klasifikacija kamnin/zemljin	31
3.6	Geološko-geotehnično poročilo preiskanih tal	35
4	INŽENIRSKA GEOLOGIJA.....	38
4.1	Pomen geologije v gradbeništvu.....	38
4.2	Geološke razmere obravnavanega območja.....	39
4.3	Projektna dokumentacija.....	40
4.4	Tehnično poročilo obravnavanega objekta	41
4.5	Načrtovanje geotehničnih raziskav terena	42
4.6	Terenske preiskave obravnavanega območja.....	45
5	GEOFIZIKALNE PREISKAVE TERENA	48
5.1	Vrste, načini in izvedba predhodnih preiskav terena	48
5.2	Georadarska naprava, razvoj in področja uporabe.....	52
5.3	Primeri georadarskih preiskav	54
6	UPORABA GEORADARJA GPR	57
6.1	Postopek izvajanja dveh izbranih preiskav terena	57
6.1.1	Sondažni izkop s strojno vrtalno garnituro.....	57
6.1.2	Georadarska metoda – GPR	59
6.3	Analiza dobljenih rezultatov na individualnem gradbenem projektu	64
6.3.1	Raziskave terena na območju pilotne stene	64
6.3.2	Raziskave zgornjega ustroja na območju tira	68
6.4	Ocena stroškov uvedbe nove storitve (prednosti/slabosti).....	70

7	SKLEP.....	75
8	VIRI IN LITERATURA	79
9	PRILOGE	82

KAZALO SLIK

Slika 1: Oprema georadarske metode GPR	14
Slika 2: Gradbena situacija obravnavanega območja v merilu M 1:500	15
Slika 3: Razmerje volumnov v zemljini	23
Slika 4: Primer krivulje zrnivosti zmesi kamnitih zrn	25
Slika 5: Karakteristični prerez nove pilotne stene	42
Slika 6: Geološka karta Slovenije.....	45
Slika 7: Geološki vzdolžni profil predhodnih preiskav	46
Slika 8: Geološki prečni profil predhodnih preiskav	47
Slika 9: Primer vrtalne garniture	58
Slika 10: Oddajno sprejemna antena GPR	60
Slika 11: Kalibracija oddajno sprejemne antene	62
Slika 12: Posnetek terena z oddajno sprejemno anteno.....	62
Slika 13: Georadarski profil (delovni plato) v km 594 + 850 do 594 + 890 (P52 do P53)	65
Slika 14: Povzetek laboratorijskih preiskav	67
Slika 15: Georadarski profil v km 594 + 812 do 594 + 736 (GP od 1 do 2)	69
Slika 16: Georadarski profil v km 594 + 930 do 594 + 862 (GP od 3 do 4).....	70

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: MIT klasifikacija zemljin	24
Preglednica 2: Razlika konsistenčnih stanj zemljin	29
Preglednica 3: Klasifikacija zemljin.....	34
Preglednica 4: Kategorije zemljin	35
Preglednica 5: Geološko-geomehanski parametri zemljin	40
Preglednica 6: Potek dejavnosti v procesu graditve objekta	43
Preglednica 7: Pregled najprimernejših geofizikalnih preiskav	50
Preglednica 8: Terenske nastavitve oddajno-sprejemne antene	59
Preglednica 9: Povzetek klasifikacije izkopov pilotov pilotne stene	65
Preglednica 10: Popis sondažnih razkopov	68
Preglednica 11: Kalkulacija cene nove storitve GPR.....	72
Preglednica 12: Predračun izvajalca vrtnalne garniture	73

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

"Tla je ustvarila narava in ne človek, zato so produkti narave vedno kompleksni. Naravna tla so heterogena in njihove lastnosti se spreminjajo od točke do točke, medtem ko jih znanost omejuje le na nekaj točk (tam, kjer so odvzeti vzorci). Naloga mehanike tal je, med drugim, odkriti ustrezen model tal." (Terzaghi, Geotechnical Engineering, 1936)

Skozi diplomsko delo se navezujemo na področje geomehanike, svoje delovne izkušnje in želimo poudariti, kako pomembna je predhodna obravnava področja novogradnje in kako se na osnovi predhodnih preiskav določijo na pogled skrite lastnosti tal. Če kot primer vzamemo družino, ki se odloči kupiti zemljišče na čudoviti lokaciji s strmim naklonom in zgraditi tam hišo, ima za to potrebna sredstva, s katerimi želi uresničiti svojo željo. Ker pa pri ogledu lokacije nikoli ne vemo, na kakšna tla naletimo, geotehnična veja gradbeništva nikoli ni monotona, kar je bila še dodatna spodbuda za izbor te teme (Klun, 2014).

Pri načrtovanju in umeščanju objektov v prostor se povečini srečujemo s pomanjkanjem primerne prostora za gradnjo. Sčasoma bo takšnega vse manj. Tako se gradnja stanovanjskih hiš seli na strma, zahtevna področja, kjer se s samo gradnjo direktno posega v občutljive hribine in zemljine. Gradbeni posegi zato pogosto vplivajo na pogoje življenja sosednjih prebivalcev, poleg tega lahko takšna dela pogosto vplivajo tudi na nastanek poškodb obstoječih sosednjih objektov, komunalnih vodov in naprav. Pri izvajanju gradbenih del je zato treba posvetiti posebno pozornost tudi varnosti in možnim vplivom del na okolico v času gradnje kot tudi po njej.

V izogib negativnim vplivom na okolico in morebitni povzročni škodi v fazi izvedbe predhodnih preiskav obravnavanega območja smo v diplomskem delu prikazali smotrnost uporabe georadarske metode v sklopu predhodnih preiskav, ki je bistveno manj invazivna za okolico in nam lahko poda širšo sliko celotnega področja.

V tem diplomskem delu se zato primarno osredotočamo na geotehnične predhodne raziskave, ki so osnova za pridobitev ustreznih parametrov za projektanta oziroma za določitev pogojev temeljenja kot tudi pravilni umestitvi kakršnega koli objekta v prostor.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomskega dela je na osnovi izvedenih terenskih meritev z georadarsko metodo pridobiti kakovostno primerjalno-stroškovno in izvedbeno analizo (cena, izvedba, varnost, hitrost gradnje, kvaliteta) med dvema izbranimi načinoma predhodnih preiskav obravnavanega območja, kakor tudi smotrnost nabave posebne opreme za takšne preiskave v okviru mikropodjetja, kot je na primer podjetje, v katerem sem zaposlen.

Za izdelavo kakovostne projektne dokumentacije je treba najprej spoznati osnovne geofizikalne in mehanske značilnosti – fizikalne karakteristike temeljnih tal, spoznati in določiti potek terenskih preiskav in na osnovi dobljenih rezultatov predvideti temeljenje objektov.

Najpomembnejši vidiki varne uporabe gradbenega objekta in zdravega bivanja v stavbi in okolju, na katero le-ta vpliva, so združeni v dobro poznanih šestih bistvenih zahtevah:

1. mehanska odpornost in stabilnost,
2. varnost pred požarom,
3. higienska in zdravstvena zaščita in varovanje okolja,
4. varnost pri uporabi,
5. zaščita pred hrupom,
6. varčevanje z energijo in ohranjanje toplote.

Primarni cilj diplomskega dela je na praktičnem delu predstaviti geotehnične in geofizikalne preiskave na terenu, v navezavi s potrebnimi laboratorijskimi preiskavami odvzetih vzorcev, kakor tudi prednosti in slabosti uporabe georadarja – GPR (ground-penetrating radar) pri terenskih predhodnih preiskavah terena.

Na osnovi tega smo postavili naslednje hipoteze:

- H1: Georadar (GPR) je na zahtevnem terenu neuporaben.
- H2: Uporaba georadarja (GPR) poda kvalitetnejše oziroma popolnejše podatke preiskanega terena.
- H3: Nakup georadarja (GPR) je v majhnem podjetju ekonomsko upravičen.

1.3 Predpostavke in omejitve

Diplomsko delo je razdeljeno na teoretični in praktični del. Teoretični del obsega študijo dostopne strokovne literature na temo inženirske geologije in geomehanike in predstavitev različnih načinov preiskav na terenu, v povezavi z laboratorijskimi preiskavami odvzetih vzorcev zemljin. V praktičnem delu smo na izbranem objektu – nova pilotna stena (oporni zid desno v km 594+580 do km 595+034) v sklopu nadgradnje progovnega odseka Maribor–Šentilj–državna meja, na železniški postaji Maribor (izvedbeni načrt št. 13505_1_3/10, Projekt d. d., februar 2017) izvedli terenske meritve georadarske metode in dobljene podatke interpretirali in primerjali s podatki, pridobljenimi pri tekoči spremljavi izvedbe izkopov za pilote, sondažnimi razkopi, kakor tudi s podatki geološko-geomehanskega poročila podjetja Geoinženiring d. o. o. (Geoinženiring d.o.o., 2017)

Omejitve pri pisanju diplomskega dela so v razmeroma skromni domači literaturi, saj je georadarska metoda relativno nova pri geomehanskih predhodnih preiskavah terena in tako ni moč zaslediti veliko praktičnih primerov uporabe georadarja (GPR) v naših geološko znanih razmerah oziroma prostoru. Omejitev je tudi časovni okvir za izdelavo diplomske naloge, saj v zimskem času ni bilo veliko projektov v izvajanju, pa tudi vremenske razmere nam niso omogočale idealnih pogojev za izvedbo potrebnih terenskih meritev.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

Pri raziskavi diplomskega dela smo uporabljali deskriptivno metodo z opisovanjem obstoječih stanj in dejstev, metodo kompilacije s povzemanjem znanj, ugotovitev, stališč in mnenj ter študijem domače in tuje literature različnih avtorjev. Komparativna metoda nam je prišla prav pri primerjavi in ugotavljanju pridobljenih podatkov terenskih meritev in laboratorijskih preiskav geološke sestave terena, na osnovi katerih smo proučili in podali ugotovitve, kako najbolj učinkovito, kvalitetno ter stroškovno smotno uporabiti georadar (GPR) pri predhodnih preiskavah terena bodoče novogradnje.

2 DELO V PROJEKTNI SKUPINI

Za izdelavo diplomskega dela smo v okviru srečanj za pripravo diplomskega dela v prostorih Academie ustanovili projektne skupine na osnovi izvedenega testa osebnosti (Myers Briggs test) in Belbinovega popisa tima.

Na podlagi dobljenih rezultatov smo tako dodelili naloge udeležencem skupine. Pripravo dela in projektno skupino so sestavljali:

- vodja projekta,
- projektant,
- komercialist,
- kalkulant.

Naša naloga v skupini se je nanašala na pripravo projektantskega predračuna (komercialist) izbranega objekta. Na osnovi izvedbenega načrta smo preučili projektne pogoje, izvleček geološko-geomehanskih pogojev obravnavanega področja, terenske in geološke razmere, pridobljene na podlagi izvedenih predhodnih preiskav. S pomočjo predizmer in končnega popisa del smo pripravili okvirni projektantski predračun, ki se je glede na predpise in veljavne tehnične specifikacije za objekte na cestah in železnicah razlikoval samo v postavki predhodnih del raziskav terena.

Delo in usklajevanje udeležencev v projektni skupini je potekalo uspešno, saj smo s točno določenimi nalogami posameznika in argumentirano debato skupaj prišli do optimalne rešitve ter umestitve objekta v naravo.

Za potrebe raziskovanja in potrjevanja hipotez diplomskega dela smo na primeru območja izvedbe nove pilotne stene (slika 2) in v navezavi z izvedenimi terenskimi meritvami z georadarsko metodo primerjali podatke, pridobljene pri tekoči spremljavi izkopa pilotov, podatke iz sondažnih izkopov v območju tira 2, laboratorijske podatke preiskanih obstoječih zemljin in podatke iz geološko-geotehničnega poročila predhodnih preiskav obravnavanega območja za potrebe izvedbenega načrta (Geoinženiring d.o.o., 2017).

Z uvedbo projektne skupine smo si porazdelili naloge priprave in potek izvedbe zastavljenih ciljev, saj je s tem zagotovljeno boljše načrtovanje in opredelitev posameznih sklopov preiskav ter kasneje njihovo uspešno izvajanje. Z doslednim in natančnim izvajanjem navedenih

aktivnosti smo pridobili dovolj uporabnih informacij, da smo lahko v zaključku diplomskega dela potrdili oziroma ovrgli zastavljene hipoteze.

Prav tako smo navezali stik s proizvajalcem opreme GSSI za georadarsko metodo, ki nam je poslal brošure z navodili izvedbe terenskih meritev (Geophysical Survey Systems, Inc., 2017) in interpretacijo dobljenih podatkov preko georadarskih profilov, obdelanih s pripadajočo računalniško opremo. V zaključku smo na osnovi kalkulacije uvedbe nove storitve podali tudi primerjalno in stroškovno analizo, s katero smo lahko določili ponudbeno ceno, saj je ta velikokrat odločilni kriterij pri izboru najugodnejšega izvajalca predvidenih terenskih preiskav.

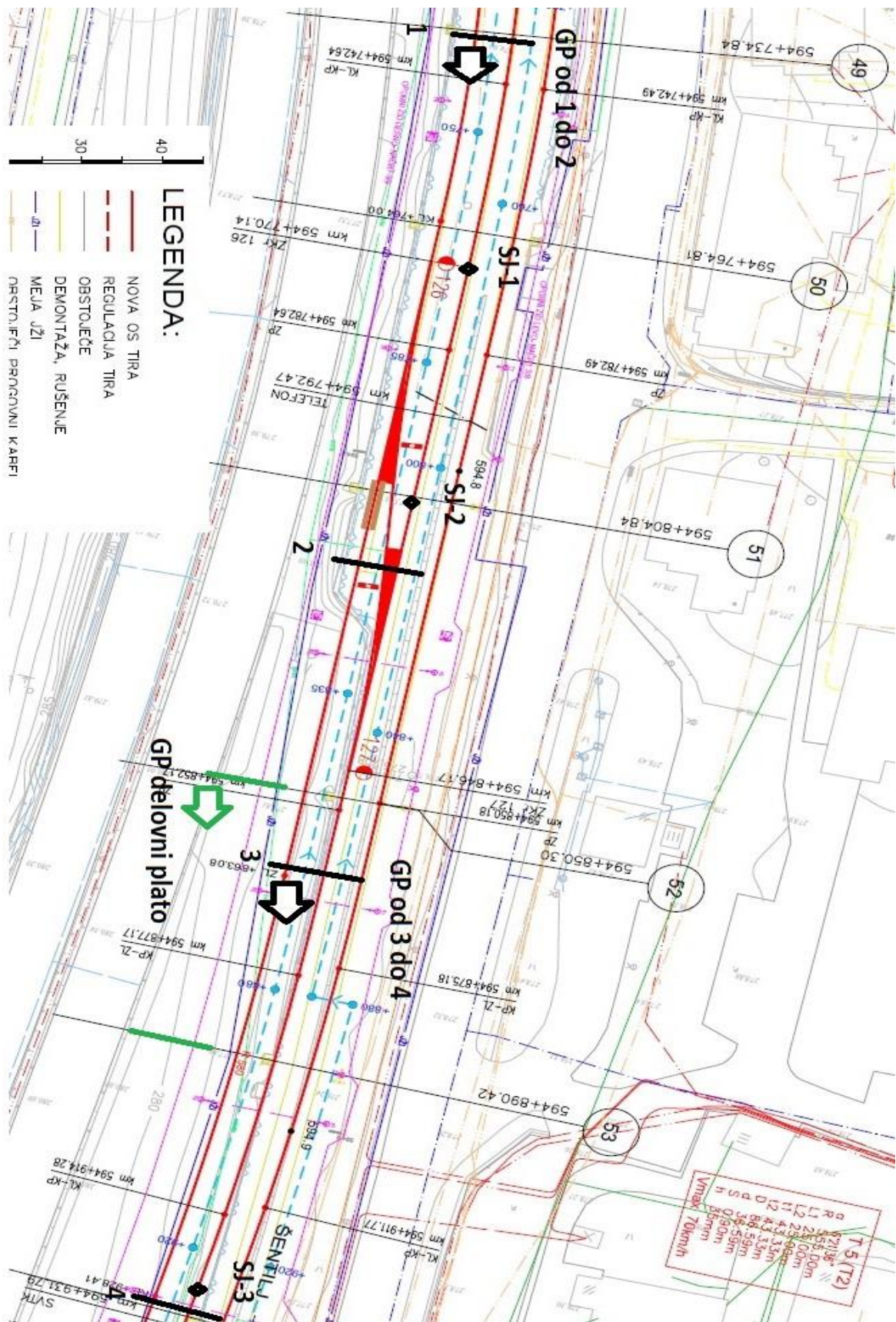


Slika 1: Oprema georadarske metode GPR

Vir: (<https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-SIR-4000-Manual.pdf>)

Vsako uspešno pridobljeno naročilo predstavlja za podjetje projekt, iz katerega pridobiva nova znanja in izkušnje pri zagonu nove storitve, planiranju in organiziranju izvajanja, pri reševanju kriznih situacij, obvladovanju stroškov ipd. Sprotno se je tako ustvarila podatkovna baza, v kateri so dokumentirane vse pridobljene izkušnje z namenom prenosa le-teh na prihodnje projekte in s tem na izboljšanje pri vodenju projektov.

Projektni način dela je tako predstavljal usmerjen način za doseganje določenih ciljev, bil je fleksibilen in v njem je skoncentrirana moč znanja in opreme.



Slika 2: Gradbena situacija obravnavanega območja v merilu M 1:500

Vir: (Projekt d. d., 2017)

3 GEOTEHNIČNE PREISKAVE TERENA

3.1 *Pomen geomehanike v gradbeništvu*

Grška predpona »geo« pomeni zemlja in mehanika, torej je geomehanika preučevanje obnašanja tal in kamnin. Dve glavni disciplini geomehanike sta mehanika zemljin in mehanika kamnin, ki obravnavata obnašanje tal v rangu manjšega obsega do obsega zemeljskega plazu. Mehanika zemljin in kamnin je disciplina, ki za napovedovanje mehanskega obnašanja tal uporablja načela inženirske mehanike, kot na primer kinematika, dinamika, mehanika tekočin in mehanika materialov. Skupaj z mehaniko hribin je podlaga za reševanje številnih inženirskih problemov v gradbeništvu (geotehnika), geofiziki in geologiji (Žlender, Vrecl, & Dolinar, 2013).

Geomehanika v gradbeništvu se je začela razvijati v 18. stoletju. Eden najpomembnejših raziskovalcev tega področja je bil Coulomb, ki se je ukvarjal s problemi zemeljskih pritiskov na oporne zidove in še danes so v uporabi nekateri njegovi postopki. Teorija za strižno trdnost se tako imenuje po njem (Kansky, 2004).

Francoska inženirja Collin, Darcy in Škof Rankine so v 19. stoletju prišli do pomembnih odkritij. Škof Rankine je razvil metodo računanja zemeljskih pritiskov na oporne zidove, Collin je raziskal porušitve glinenih področij in meril strižne trdnosti glin, Darcy pa je raziskal pretok vode skozi peščena tla.

Na začetku 20. stoletja so začeli sistemsko eksperimentalno ugotavljati fizikalno-mehanske značilnosti zemljin, ki so jih zaradi težav pri gradnji železnic in pristanišč začeli raziskovati Švedi. Še danes so v uporabi eksperimentalne in računske metode Atterberga, npr. ugotavljanje plastičnosti zemljin z mejami konsistence ali analiza stabilnosti pobočij s krožnimi potencialnimi porušnicami (prav tam).

Leta 1925 je Karl Terzaghi izdal knjigo *Mehanika tal* na osnovi fizikalnih lastnosti zemljin, v kateri je podal predloge za eksperimentalno določanje lastnosti zemljin in mehansko analizo poteka deformacij v tleh. Zaradi te knjige Karl Terzaghi šteje za očeta mehanike tal.

Od sredine dvajsetega stoletja je zanimanje za geomehaniko zelo naraslo, saj so začeli delovati številni laboratoriji za preiskave mehanskih lastnosti zemlji za potrebe temeljenja in gradnje zemeljskih objektov. Povečalo se je število avtorjev, publikacij in strokovnih člankov (prav tam).

Vse skupaj je doprineslo, da sodobna geomehanika, ki temelji na eksperimentalnih podatkih, lahko omogoči varno in ekonomično projektiranje konstrukcij (Šuklje, 1984).

3.2 Evrokod 7 – evropski standard za geotehniko

Geotehnika je skupen temelj treh povezanih strok, in sicer inženirske geologije (geotehnologija, hidrogeologija, inženirska geofizika), gradbeništva (geomehanika in geodinamika, gradbene konstrukcije, potresno inženirstvo) ter geotehnologije in rudarstva (podzemne gradnje, okoljsko inženirstvo, pridobivanje mineralnih surovin). (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018)

Geotehnične raziskave so namenjene najprej pravilni umestitvi objekta v prostor, nato pridobitvi ustreznih parametrov za projektiranje ter nadaljnji optimizaciji med samo izvedbo. Delimo jih na inženirsko geološke, hidrogeološke, geomehanske ter inženirsko geofiziko. Geotehnik v sodelovanju s projektantom in naročnikom ter z upoštevanjem pričakovane geološke sestave in karakteristik gradnje smiselno določi optimalni obseg in kakovost potrebnih geotehničnih raziskav za pridobivanje geotehničnih podatkov, ki so bistveni za zagotovitev zanesljivosti načrtovane gradnje (prav tam).

Evrokod 7 je krovni standard za geotehnično projektiranje. Sestavljata ga dva dokumenta, in sicer:

- Evrokod 7-1: SIST EN 1997-1:2005 – Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila s pripadajočimi dodatki;
- Evrokod 7-2: SIST EN 1997-2:2005 – Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 2. del: Preiskovanje in preskušanje tal s pripadajočimi dodatki.

Za uporabo v Sloveniji je SIST izdal tudi nacionalni dodatek k evrokodu 7-1 pod oznako:

- SIST EN 1997-1:2005/A101:2006 – Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.

Evrokod 7 je z letom 2008 dokončno nadomestil Pravilnik o temeljenju objektov iz leta 1991, ki je bil pred tem edini dokument s področja geotehničnega projektiranja gradbenih objektov, vendar je bil posvečen izključno temeljenju in ni pokrival geotehničnega projektiranja v celoti.

Evrokod 7 je širši in pokriva skoraj celotno področje geotehnike razen predorogradnje in geotehnike okolja, čeprav bistveni osnovni principi geotehničnega projektiranja iz Evrokoda 7 veljajo tudi za ti dve področji. Evrokod 7 tudi ne pokriva tematike geotehničnega projektiranja

na potresnih območjih in dinamično obremenjenih zemljin v splošnem. Ta vidik geotehničnega projektiranja obravnava Evrokod 8-5 s pripadajočim nacionalnim dodatkom.

Evrokod 7 je sodoben standard, plod sodelovanja mnogih vrhunskih evropskih geotehnikov. Dovoljuje različne načine projektiranja in ob tem izkušenim strokovnjakom omogoča uporabljati lastne izkušnje, neizkušenim pa pomaga s seznamami pomembnih vplivov, porušeni mehanizmov, ki veljajo za posamezne inženirske gradbene objekte, jih vodi pri sestavi poročil in opozarja na morebitne posebnosti (Beg & Pogačnik, 2017).

Za potrebe geotehničnih terenskih preiskav smo se osredotočili na Evrokod 7-2, ki dopolnjuje evrokod 7-1 s pravili, ki se nanašajo na:

- načrtovanje raziskav in poročanje o njihovih rezultatih,
- splošne zahteve glede obsega raziskav (števila najpogostejše uporabljenih laboratorijskih in terenskih preskusov),
- interpretacije in vrednotenja rezultatov preskusov.

Da bi določili minimalne zahteve glede obsega in vsebine geotehničnih raziskav in izračunov, je treba ugotoviti zahtevnost geotehničnega projekta in z njim povezanega tveganja.

Za lažje razvrščanje geotehničnih objektov in zemeljskih del glede zahtevnosti Evrokod 7 predlaga uvrstitev vsakega projekta v eno od treh geotehničnih kategorij:

1. kategorija: preprosti objekti zanemarljivega tveganja,
2. kategorija: večina objektov,
3. kategorija: geotehnično zahtevni objekti in objekti velikega tveganja.

Na uvrstitev v geotehnično kategorijo ne vplivajo samo geotehnične razmere, ampak tudi velikost in zasnova objekta, obtežba in pomembnost objekta (Beg & Pogačnik, 2017).

3.3 Geotehnične terenske preiskave

"Geotehnične lastnosti tal so odvisne od geoloških pogojev njihovega nastanka in razvoja ..., zato mora gradbeni inženir, ki se posveča mehaniki tal, poznati osnove geologije, svoje znanje o geologiji pa mora razširjati in poglobljati ..." (Šuklje, 1984)

Zgradbo in lastnosti zemljin preiskujemo z inženirsko-geološkim kartiranjem terena, s sondažnimi izkopi, jaški, rovi, zaseki, raziskovalnim vrtanjem, penetracijskim sondiranjem,

krilnimi sondami, presiometri, preskusno obremenitvijo, geofizikalnimi metodami (Gregorač, 2015).

Sestavo tal in njihove lastnosti je za razliko od drugih inženirskih materialov (kovine, beton, les) treba predhodno raziskati na terenu, kjer je predvidena gradnja.

Raziskave razdelimo v tri faze:

- predhodne (preliminarne) raziskave,
- glavne raziskave,
- dopolnilne (kontrolne) raziskave (Logar, 2019).

Na osnovi preliminarne raziskave želimo ugotoviti splošno primernost terena za načrtovano gradnjo, okvirno sestavo in kvaliteto tal, nastopanje podtalnice ipd. Treba je pridobiti dovolj podatkov, da je možna uvrstitev v ustrezno geotehnično kategorijo (1, 2 ali 3 po Eurocode 7) (Gregorač, 2015).

Treba oziroma potrebno je:

- pregledati geološke karte,
- pregledati obstoječe podatke iz bližnjih lokacij,
- pridobiti geodetske posnetke v primernem merilu,
- inženirsko geološko kartiranje (pregled terena, morfoloških značilnosti, hidrogeoloških značilnosti, izdankov hribine, obstoječih vkopov, nestabilnosti ...),
- pregledati letalske posnetke s stereoskopom (fotogeologija),
- pregledati podatke o potresni ogroženosti terena,
- če je obstoječih podatkov premalo ali jih sploh ni, je že v tej fazi potrebna izvedba razkopov, vrtin ali drugih primernih terenskih raziskav (Gregorač, 2015).

Glavne raziskave nam omogočajo natančneje spoznati sestavo tal in fizikalne karakteristike posameznih slojev tal, režim podtalnice ter vse pomembne posebnosti, da je možno varno in ekonomično načrtovati vse predvidene faze gradnje (Logar, 2019).

Na osnovi spoznanj preliminarne raziskave je treba pripraviti program glavnih raziskav. Obseg raziskav je odvisen od:

- stopnje predhodne raziskanosti terena,
- zasnove, velikosti in pomembnosti objekta,
- predvidenih obremenitev tal,
- vrste tal.

Pri načrtovanju preiskav je treba upoštevati veljavne tehnične standarde in lastno strokovno presojo ter izkušnje.

Obseg raziskav je po potrebi nujno prilagoditi sprotnim spoznanjem (Logar, 2019).

Dopolnilne (kontrolne) raziskave izvajamo v primeru, da se pri interpretaciji glavnih preiskav pojavljajo dvomi glede strukture ali karakteristik tal in režima podtalnice. Metode in obseg teh raziskav je treba smiselno izbrati glede na konkretne cilje dopolnilnih preiskav.

Možni načini izvedbe dopolnilnih raziskav:

- sondažne jame, jaški, rovi ali zaseke,
- sondažno vrtanje
 - udarno ali zabijalno (ni možen odvzem vzorca),
 - z izpiranjem (ni vzorca),
 - rotacijsko s polno krono, svedrom, žlico (porušen vzorec)
- rotacijsko z zveznim jedrovanjem (intaktni vzorci premera od cca 50 do cca 200 mm),
- težiti je treba k 100 % jedru visoke kvalitete, za kar je potrebna kvalitetna vrtalna oprema (dvo ali trostenski jedrniki),
- pri vrtanju je možno ostenje vrtine varovati z vodo, izplako ali zaščitno cevjo.

Lastnosti zemljin preiskujemo na porušenih in neporušenih vzorcih v laboratoriju ali s poskusi na terenu. Z raziskavami in preiskavami ne smemo ogroziti stabilnosti objekta, povzročati težav pri izvajanju del pri temeljenju objekta oziroma njegovega dela (prav tam).

Terenske preiskave temeljnih tal opravljamo:

- z žepnimi merilnimi instrumenti (žepni penetrometer, žepna krilna sonda),
- s preizkusi v vrtinah (krilna sonda, presiometer, standardna penetracijska preiskava SPT,
- z meritvami vodoprepustnosti (črpalni preizkus, nalivalni preizkus, disapacijski preizkus),
- z geofizikalnimi metodami (geoelektrične metode, geoseizmične metode, georadarska metoda) (prav tam).

Globina preiskave tal je odvisna od vrste razporeditve slojev v tleh, načina temeljenja, obtežbe tal, velikosti in pomena gradbenega objekta oziroma njegovega dela, občutljivosti objekta oziroma njegovega dela za posedanje ter od razpoložljivih geotehničnih podatkov o terenu, ki

ga preiskujemo. Globino preiskave tal računamo od dna temeljenja gradbenega objekta navzdol (Logar, 2019).

Osnovne mehanske lastnosti tal so:

- prepustnost k (cm/s) koeficient vodoprepustnosti,
- deformabilnost M_v ali E_{oed} (kN/m²) modul stisljivosti,
- strižna trdnost c' , ϕ , c_u (kN/m²) drenirana in nedrenirana.

3.4 Laboratorijske preiskave kamnin/zemljin

Za določitev inženirskih geotehničnih lastnosti temeljnih tal se izvaja geološko-geotehnično vrtanje z vnaprej določenimi terenskimi preiskavami zemljin oziroma hribin, ki se pojavljajo v temeljnih tleh. Za izvedbo je na voljo veliko različnih tehnik, od bolj enostavnih, ki so običajno hitreje izvedljive in manj zahtevne za izvedbo, do zelo zahtevnih (kompleksnih), ki zahtevajo drago opremo in zelo izkušene izvajalce, vendar podajo zanesljivejše in kvalitetnejše podatke območja temeljnih tal novogradnje (Oblak, 2006).

Obseg in število geološko-geotehničnih vrtin se lahko zmanjšata z uporabo različnih geofizikalnih metod. Na ta način je mogoče pridobiti tudi koristne podatke o legi in obliki posameznih plasti v tleh med samimi lokacijami izvedenih vrtin, vendar je uspešnost takšnih preiskav temeljnih tal odvisna od različnosti fizikalnih lastnosti posameznih slojev materialov v tleh in od lege ter kemične sestave podtalnice. Ne glede na izbrano vrsto preiskav morajo rezultati takšnih preiskav omogočati določitev naslednjih podatkov o temeljnih tleh:

- meje med plastmi različnih zemljin v celotni globini, kjer se še lahko pojavi vpliv temeljenja objekta,
- višino podtalnice oziroma pornih tlakov vode v temeljnih tleh,
- geotehnične lastnosti vseh zemljin in hribin, ki so v obravnavanem območju in
- napoved obnašanja temeljnih tal in predvidenih zemeljskih del ter konstrukcij (Oblak, 2006).

Vse potrebne geotehnične lastnosti zemljin in hribin je treba pridobiti tako, da v čim večji meri odražajo dejansko stanje v temeljnih tleh, tako je smiselno uporabiti najbolj ustrezno metodo, ki nam je na voljo (prav tam).

Le kvalitetna izvedba geološko-geotehničnega vrtanja nam daje potrebno osnovo za zagotavljanje kvalitetnih in zanesljivih rezultatov laboratorijskih in terenskih preiskav obravnavanega območja novogradnje (Oblak, 2006).

Pravilen odvzem vzorcev zemljin je izjemno pomemben. Odvzete vzorce glede kakovosti delimo na porušene in neporušene vzorce zemljin. Glede na preiskave, ki jih na vzorcih lahko opravimo, delimo vzorce v naslednje razrede kakovosti:

1. razred: klasifikacija, vlažnost, prostorninska teža, gostota, strižna trdnost, edometriški preizkus;
2. razred: klasifikacija, vlažnost, prostorninska teža;
3. razred: klasifikacija in vlažnost;
4. razred: samo klasifikacijski preizkusi.

Za 1. in 2. razred so potrebni neporušeni vzorci, medtem ko so za 3. in 4. razred dovolj porušeni vzorci.

Porušeni vzorci imajo enako zrnastostno sestavo kot naravna zemljina, iz katere so pridobljeni, vendar imajo strukturo deloma ali popolnoma porušeno. Tudi vlažnost se lahko razlikuje od vlažnosti zemljine v naravi. Navadno so to različni peski in prodi, ki jih pridobimo izkopom iz sondažnih jam, vodnjakov ali pri jedrovanju (Gregorač, 2015).

Pri geotehničnih raziskavah je najpomembnejši odvzem neporušenih vzorcev z najmanjšo mero poškodbe strukture zemljine. Najkakovostnejši neporušeni vzorci so tisti, pri katerih je ohranjena naravna vlažnost, koeficient poroznosti in struktura pa sta spremenjena v najmanjši meri. Neporušen vzorec odvajamo v sondah z jeklenimi cilindri z vtiskanjem v zemljino (prav tam).

Na intaktnih vzorcih lahko geomehanik izvaja vse vrste laboratorijskih preiskav. Pri porušeni vzorcih lahko izvajamo le nekatere glavne preiskave, kot so zrnastost, vlažnost in lezne meje zemljine. Vzorce mora po odvzemu geomehanik hraniti v neprodušnih zaprtih valjih z oznako gradbišča, vrtime, vzorca, metodo vzorčenja in datumom.

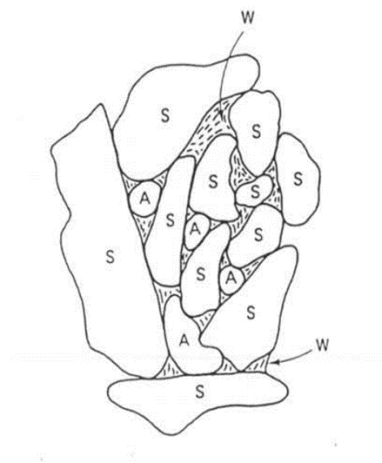
S preiskavami zemljin v laboratoriju ugotavljamo tiste geotehnične lastnosti, na osnovi katerih projektant lahko projektira – izbere način temeljenja objekta.

Osnovne fizikalne lastnosti tal so:

- vlažnost w (%),
- zrnavost (granulometrijski sestav),
- gostota ρ (Mg/m^3),
- poroznost (količnik por ... e , delež por ... n),
- meje plastičnosti,
- strižna trdnost (napetost ... τ ... KN/m^2).

- Vlažnost

V vsaki zemljini in hribini se pojavljajo trdni delci (zrna) in praznine (pore). Praznine lahko izpolnjujeta samo plin ali samo voda, lahko pa nastopata tako plin kot voda skupaj.



Slika 3: Razmerje volumnov v zemljini

Vir: (Kansky, 2004)

Postopek določanja naravne vlage materiala izvajamo v skladu s SIST EN 1097-5, poglavje 7.

Sčistimo in posušimo pladenj, na katerega bomo položili testni vzorec med sušenjem. Stehtamo in zapišemo maso pladnja (M_2). Vzorec razprostremo po pladnju. Stehtamo pladenj z mokrim testnim vzorcem in določimo maso testnega vzorca (M_1), tako da od mase pladnja in vzorca odštejemo maso pladnja (M_2). Položimo pladenj v sušilnik na $110 \pm 5^\circ\text{C}$, dokler ni dosežena konstantna masa (M_3) posušenega vzorca.

Rezultat preiskave je naravna vlaga vzorca, izražena v %. Vlaga (w) je enaka masi vode v testnem vzorcu, izražena kot odstotek mase suhega testnega vzorca.

Vsebnost vode v testnem vzorcu izračunamo po naslednji enačbi:

$$w = (M1 - M3) / M3 \times 100,$$

kjer je:

M1... masa (mokrega) testnega vzorca v gramih,

M3... konstantna masa posušenega testnega vzorca v gramih.

Rezultat izrazimo na 0,1 % natančno (Apros d.o.o., 2001).

- Zrnavost

Je sestava zemljine, prikazana z odstotnimi deleži vsebnosti zrn določenih intervalov. Pri navajanju intervalov moramo vedno vedeti, po kateri klasifikaciji smo jih določili. V mehaniki tal velja splošna razdelitev na intervale po MIT (Massachusetts Institute of Technology).

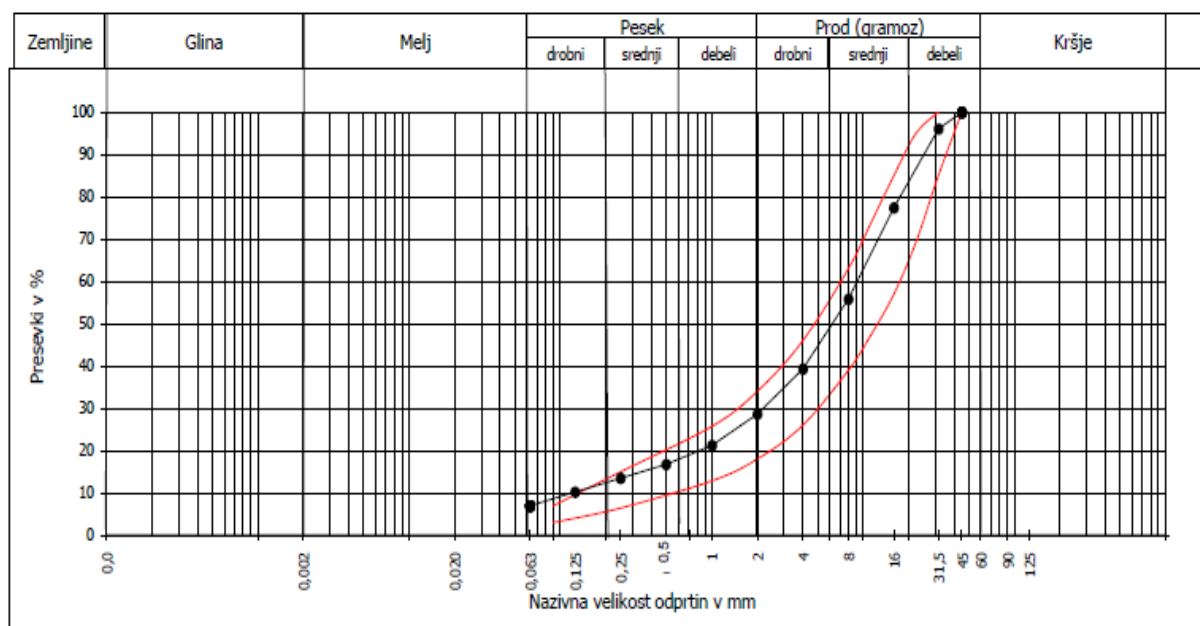
Preglednica 1: MIT klasifikacija zemljin

Drobljenec	gramoz	pesek	prah/melj	glina
Premer zrna	v s m	v s m	v s m	
mm	60 20 6	2 0,6 0,2	0,06 0,02 0,006	0,002

*Kratice premera zrn pomenijo v je velik, s je srednji, m je majhen

Vir: (Žitnik D., 2008)

Določimo jo s sejanjem na sitih in s sedimentacijo. Velikost zrn pri sejanju je določena z velikostjo odprtini na situ. Odsejek imenujemo količino zrnja, ki na situ ostane, presejek pa količino zrnja, ki pade skozi sito. Zrna manjša od 0,06 mm določamo s sedimentacijo. Pri tem uporabimo Stokesov zakon, ki pravi, da se enako velika zrna v vodni suspenziji posedajo enako hitro. Hitrost posedanja večjih zrn je večja, pri manjših zrnih je manjša. Z merjenjem gostote suspenzije v določenih časovnih intervalih lahko ugotovimo zrnasto sestavo finih delcev. Rezultate za določitev zrnivosti prikazujemo v diagramih tako, da nanašamo na absciso velikost zrn v logaritemskem merilu, na ordinato pa velikost presevka oz. odsevka. Sovisnico med velikostmi zrn in presevki imenujemo krivulja zrnivosti ali granulometrijska krivulja. Ekvivalentni premer zrn, ki ustreza ordinatni presevka, je 10 % in se imenuje učinkoviti premer, označimo ga z D_{10} . Premer, ki ustreza ordinatni presevka in je 60 %, imenujemo pretežni premer, označimo ga z D_{60} . $N = D_{60}/D_{10}$, to je količnik enakomernosti; čim manjši je, bolj je enakomernejša zrnivost zemlje. Če je količnik $N < 5$, je zemljina homogena, $N = 10-15$ zemljina je srednje homogena, $N > 15$ zemljina ni homogena (prav tam).



Slika 4: Primer krivulje zrnivosti zmesi kamnitih zrn

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

- Gostota (določanje laboratorijske referenčne gostote in deleža vlage)

Laboratorijska preiskava določitve optimalne vlažnosti in maksimalne suhe zgoščenosti, poznana kot Proctorjev preskus, je osnova za spremljanje kvalitete vgrajevanja materiala na terenu.

Preiskave se izvajajo v skladu s SIST EN 13286-2 Nevezane in hidravlično vezane zmesi – 2. del: Preskusne metode za določanje laboratorijske referenčne gostote in deleža vlage – Preskus po Proctorju.

V laboratorij dobimo vzorec, odvzet v skladu s standardom SIST EN 932-1:1999, metode vzorčenja.

Najprej izvedemo preiskavo zrnavostne sestave po SIST EN 933-1:2012 in se glede na rezultate odločimo za vrsto Proctorjeve preiskave. Po potrebi vzorec zreduciramo po standardu SIST EN 932-2:1999, Metode zmanjševanja laboratorijskih vzorcev.

Glede na rezultate sejalne preiskave izberemo sita za odsejanje nadmernih zrn.

Vzamemo ostanek vzorca materiala, na katerem je bila izvedena preiskava zrnivosti, ki smo ga medtem posušili na zraku in nadmerna zrna odsejemo skozi sito velikosti 31,5 mm in 63 mm za MPP, oziroma 16 mm za SPP oziroma drobnozrnat material. Za posamezno preiskavo po MPP vzorec materiala razdelimo na 5 točk oziroma enakih delov in za SPP na 3 točke.

Izračunamo vlažnost nadmernih zrn in % nadmernih zrn glede na celotni vzorec. Ostalemu materialu razdeljenemu na 3 (SPP) oz. 5 (MPP) delov dodamo določene količine vode, s čimer so vzorci pripravljeni za Proctorjev preskus.

Prvi del vzorca materiala nasipamo kot prvo plast v kalup valjaste oblike in zbijemo z ustreznim številom udarcev glede na predpisano energijo zbijanja (pri SPP običajno 25 udarcev/plast oziroma za MPP običajno 56 udarcev/plast). Po istem postopku nadaljujemo do zaključne plasti (pri MPP do 5. plasti, pri SPP do 3. plasti).

Po končanem zbijanju previdno odstranimo nastavek kalupa (nastavni obroč) z odvečnim materialom in poravnamo površino vzorca s hkratnim pritiskanjem ob ostali material v kalupu vzorca. Vzorec se vtisne in popolnoma poravna z gornjim robom kalupa. Nato previdno iztisnemo material iz kalupa na pladenj in ga stehtamo. V proctorjevi mokri teži je upoštevana vlaga, ki jo dobimo na terenu pri vgrajevanju.

Pladenj z vzorcem materiala nato položimo v sušilnik na $110 \pm 5^\circ\text{C}$, dokler ni dosežena stalna masa po SIST EN 1097-5. Vlažnost vzorca materiala nato določimo v skladu s SIST EN 1097-5. Iz dobljene mase materiala izračunamo suho prostorninsko maso.

Preiskave ponavljamo z deležem vlage, ki ga za vsako nadaljnjo preiskavo spremenimo za ocenjene %. Dodajanje vode, ki je primerno za peščeno prodne zmesi, je v območju med 1–2 % za posamezno točko. V območju optimalne vlažnosti se iščejo 3–4 točke z vsebnostjo vode optimalna vlaga $\times 0,8$ in $1,2$.

Naredimo 5 preiskav oz. ponavljamo postopek tako dolgo, da lahko določimo maksimalno suho gostoto zmesi pri optimalni vlažnosti.

Izračunati je treba prostornino kalupa v mililitrih (ml), ki jo označimo z V.

Izračunamo tudi gostoto stisnjenega mokrega materiala (ρ) po enačbi:

$$\rho = (m_2 - m_1)/V,$$

kjer je:

ρ ... gostota stisnjenega mokrega materiala, v megagramih na kubični meter (Mg/m^3),

m_1 ... masa kalupa in podstavka za klup v gramih (g),

m_2 ... masa kalupa, podstavka za kalup in stisnjene zmesi materiala v gramih (g),

V ... prostornina kalupa v mililitrih (ml).

Nato izračunamo še gostoto suhega stisnjenega materiala (ρ_d) za vsako točko z enačbo:

$$\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + w),$$

kjer je:

ρ_d ... suha gostota v megagramih na kubični meter (Mg/m³),

ρ ... gostota stisnjenega mokrega materiala, v megagramih na kubični meter (Mg/m³),

w ... vlaga v materialu v procentih (%).

Iz dobljenih izračunov preiskav izrišemo graf in določimo optimalno vlago in maksimalno suho gostoto zmesi. Kadar imamo v zmasi nadmerna zrna, s pomočjo korekcijskih formul naredimo korekcijo in dobimo korigirano optimalno vlažnost in korigirano optimalno suho prostorninsko maso. Brez upoštevanja korekture bi pri vzorcih s prekomernimi zrni dobili prenizko suho gostoto in previsoko vlago.

Rezultate preiskave vrednotimo v skladu z namenom uporabe, kot je navedeno v standardih (SIST), Tehničnih specifikacijah (TSC), Posebnih tehničnih pogojih (PTP) in projektni dokumentaciji. (Apros d.o.o., 2007).

- Poroznost je razmerje med volumnom por in celotnim volumnom.

Tri volumska razmerja so v geomehaniki zelo pomembna:

1. Količnik por e je razmerje med volumnom por V_v in volumnom trdih delcev V_s :

$$n = V_v / V_s$$

Poroznost se običajno izrazi v odstotkih, kjer je največji razpon vrednosti med 0 in 100 %. $n = 100 \times V_p / V_p + V_s$

Količnik por je razmerje med volumnom por in celotnim volumnom zrnja.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{in} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (\text{Žitnik, 2008})$$

- Atterbergove meje plastičnosti

Postopek za določitev Atterbergovih meja plastičnosti je v skladu s standardom:

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-6 Geotehnično preiskovanje in preskušanje – laboratorijsko preskušanje zemljin 6. del: Preskus s konusom in SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12 Geotehnično preiskovanje in preskušanje – laboratorijsko preskušanje zemljin 12. del: Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti.

Kadar je mogoče, se preskus izvede na vzorcu v naravnem stanju. Celoten vzorec se zmanjša na testni vzorec v skladu s SIST EN 932-2.

Vzorec se ne sme posušiti pod vlago, na kateri se bo izvedel preskus. Za določanje meje židkosti potrebujemo približno 200 g naravnega vzorca, presejanega na 0,4 mm situ ali na najbližjem drugem situ ali 300 g vzorca pripravljenega z dodajanjem vode (Apros d.o.o., 2014).

Ko so grobe frakcije odstranjene s sejanjem, se lahko določi začetna suha masa po naslednji enačbi (1):

$$M_d = 100 \times m_1/100 + w,$$

kjer je:

m_d ... suha masa zemljine (g),

m_1 ... masa neposušene zemljine (g),

w ... vsebnost vlage v zemljini (%)

suha masa frakcij, ki po sejanju na 0,4 mm (ali najbližjemu situ 0,4 mm) ostanejo na situ.

Ko se grobe frakcije zemljin odstranijo s sejanjem, se odstotek od suhe mase, ki ostane na situ (0,4 mm), izračuna po naslednji enačbi (2):

$$P_a = m_2/m_d \times 100 \%,$$

kjer je:

p_a ... frakcija, ki je ostala na situ 0,4 mm,

m_2 ... masa posušene zemljine, ki je ostala na situ (g) (Apros d.o.o., 2014).

Meja židkosti

Razmerje med vsebnostjo vlage v zemljini in penetracijo konusa naj se prikaže na pollogaritemskem grafu, z vsebnostjo vlage na linearni osi kot abscisna os (y os) in penetracijo konusa na logaritemski osi kot ordinatna os (x os).

Izriše se najboljše prilegajoča se ravna linija, ki poteka skozi določene točke. Iz grafa se odčita vsebnost vlage pri penetraciji konusa za 20 mm (konus 80 g/30°).

Pollogaritemski prikaz na grafu se lahko nadomesti z linearnima osema za vsebnost vlage kot tudi penetracijo konusa, če se uporablja konus 80 g/30°.

Meja plastičnosti

Določiti se mora vsebnost vlage (%) v obeh preiskovanih vzorcih, rezultat naj se napiše z enim decimalnim mestom. Če se oba rezultata razlikujeta za več kot za 0,5 % vsebnosti vlage v zemljini, se mora celotna preiskava ponoviti. Povprečje obeh vrednosti vlage v zemljini se izračuna in zapiše kot povprečni rezultat, ki je meja plastičnosti w_p .

Indeks plastičnosti

Indeks plastičnosti I_p se izračuna po naslednji enačbi (3):

$$I_p = w_L - w_p$$

Indeks židkosti

Indeks židkosti I_L se izračuna po naslednji enačbi (4):

$$I_L = w - w_p / w_L - w_p$$

Indeks konsistence

Indeks konsistence I_C se izračuna po naslednji enačbi (5):

$$I_C = w_L - w / w_L - w_p$$

Za zemljine, ki vsebujejo znaten delež grobih frakcij, je bolj realen indeks židkosti in indeks konsistence, izračunan iz vsebnosti vlage frakcij presejanih na situ 0,4 mm, namesto naravne vlažnosti w (Apros d.o.o., 2014).

Plastično konsistenco omejujeta meja plastičnosti w_p in meja lezenja w_L . Mejo krčenja w_s določa vlažnost, pri kateri se sušenju izpostavljen vzorec neha krčiti. Mejo plastičnosti določimo tako, da delamo iz zemlje svaljke in jih valjamo po filtrnem papirju na ravni podlagi. Svaljki se pri meji plastičnosti začnejo drobiti.

Glede na indeks konsistence razlikujemo konsistentna stanja:

Preglednica 2: Razlika konsistenčnih stanj zemljin

Konsistenca	Indeks konsistence
židka	$I_c < 0$
malo plastična	$0 < I_c < 1/3$
srednje plastična	$1/3 < I_c < 2/3$
trdo plastična	$2/3 < I_c < 1$
poltrda	$1 < I_c < (w_L - w_s) / I_p$
trda	$I_c > (w_L - w_s) / I_p$

Vir: (Žitnik, 2008)

- Strižna trdnost

Je ena najpomembnejših inženirskih lastnosti zemljin. Z njo dokazujemo stabilnost brežin pri zemeljskih delih, kar posledično zmanjšuje oziroma preprečuje drsenje pobočij. Preprečuje tudi izrivanje zemljine pod temelji, ki je posledica vertikalne obremenitve novogradnje. Nevarnost izrivanja zemljine pod temelji je še posebej velika pri plitvem temeljenju.

Strižna trdnost je odvisna od trenja med zrni in kohezije. To trenje med zrni imenujemo kot notranjega trenja ϕ ali strižni kot, silo med delci pa kohezija.

Prvi uporabni zakon strižne trdnosti je podal Coulomb (1876), tako imenovani Coulombov zakon definira strižno trdnost zemljine z empiričnim izrazom v enačbi:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi,$$

kjer je:

τ ... strižna trdnost (napetost, pri kateri se vzorec prestriže) (kPa), (kN/m²),

c ... kohezija ali kohezijska trdnost (kPa),

σ ... tlačna napetost ... (kPa), (kN/m²),

ϕ ... kot strižne trdnosti oziroma strižni kot (°),

$\tan \phi$... količnik strižne trdnosti oziroma strižni količnik (Gregorač, 2015).

Realni podatki laboratorijskih preiskav so zelo odvisni od kvalitete odvzetega vzorca materiala, ki ga preiskujemo. Stopnja poškodovanosti vzorca je zelo odvisna od uporabljene terenske opreme za odvzem vzorca iz temeljnih tal. Pri zelo občutljivih zemljinah so tako lahko lastnosti vzorcev, ki jih preiskujemo, daleč od lastnosti materiala v temeljnih tleh (Oblak, 2006).

Zaradi spoznanja pomanjkljivosti in občutljivosti laboratorijskih preiskav se je kmalu pojavil drugačen pristop k določevanju lastnosti materialov v temeljnih tleh. Namesto da bi odvzeli vzorce iz temeljnih tal in jih vozili v laboratorij na preiskavo, se preiskave izvajajo v temeljnih tleh na mestu predvidene gradnje (prav tam).

Pri terenskih preiskavah se preiskuje stanje, ki nastopa v temeljnih tleh pred izvedbo predvidenih del, zato ni mogoče vnaprej proučevati vpliva bodočih sprememb v temeljnih tleh, ki jih prinašajo načrtovana dela (prav tam).

Proučevanje dogajanja v temeljnih tleh zaradi predvidene gradnje je mogoče le na osnovi laboratorijskih preiskav s pazljivo izbiro robnih pogojev, ki bodo takrat nastopili (Oblak, 2006).

Z izvajanjem edometrskih preiskav lahko na osnovi računskih analiz pričakovanih posedkov temeljnih tal in razvoja takšnih posedkov zaradi konsolidacije spoznamo spremembe napetostnega stanja v temeljnih tleh pri načrtovane obtežbi temeljnih tal. Poznavanje napetostnega stanja pred in po dodatni obtežbi temeljnih tal je pomembno za določitev mehanskih lastnosti, kot so endometriski modul stisljivosti E_{oed} , elastični modul E , količnik prepustnosti k , nedrenirana strižna trdnost C_u zemljin in hribin, ki ustrezajo obravnavani spremembi napetostnega stanja. Nenazadnje je poznavanje novega napetostnega stanja, ki ga bo v temeljnih tleh povzročila načrtovana novogradnja, pomembno tudi za presojo, ali je novo napetostno stanje za zadostni količnik varnosti manjše od mejnega napetostnega stanja. (Oblak, 2006)

3.5 Klasifikacija kamnin/zemljin

V naravi obstajajo različne zemljine, določene vrste zemljin pa imajo tudi skupne značilnosti. V gradbeništvu je zelo pomembno, da zemljine pravilno prepoznamo in razvrstimo (klasificiramo) glede na njihove lastnosti.

Prepoznavanje (identifikacija) je določanje značilnih lastnosti zemljine, razvrščanje (klasifikacija) pa je določanje vrste zemljine na osnovi njenih značilnih lastnosti, določenih s terensko identifikacijo (vizualno) ali laboratorijsko določenih lastnosti (Gregorač, 2015).

Za splošno klasifikacijo je priročna zrnavost zemljin in nekateri klasifikacijski sistemi jo imajo za edini kriterij, toda za vezljive zemljine je še pomembnejši kriterij plastičnosti, ki je podan z mejo židkosti in z indeksom plastičnosti. Novejši sistemi jo zato obravnavajo kot bistveni element klasifikacije vezljivih (koherentnih) zemljin (Šuklje, 1984).

Inženirska klasifikacija zemljin razvršča nepregledne množice zemljin, zdrobljenih kamnin in materialov iz umetnih nasutij v manjše število skupin zemljin s podobnimi karakteristikami inženirskih lastnosti. Na osnovi klasifikacije ocenjujemo trdnostno deformacijsko in hidravlično obnašanje zemljin v različnih pogojih inženirske rabe, kot so temeljenje objektov, gradnja nasipov, presoja stabilnosti brežin, ocenjevanje zmrzilske varnosti, potenciala likvifikacije (utekočinjenja), nevarnosti notranje erozije in druge. Klasifikacijo izvajamo z uporabo rezultatov laboratorijskih raziskav, upoštevaje kriterije za izbrane indeksne kazalnike lastnosti: zrnavostno sestavo, Atterbergove meje plastičnosti ter vsebnost organskih primesi (Maček, Smolar, & Petkovšek, 2018).

Identifikacija in opisovanje zemljin je v nasprotju s klasifikacijo sklop postopkov za ocenitev vrste in stanja zemljine. Izvajamo jo na osnovi vizualnega pregleda, identifikacijskih preiskav in/ali kombinacije obojega. V opis in identifikacijo so poleg klasifikacije vključeni opisi gostotnih in konsistenčnih stanj, barve, vonja, mineralne sestave, geometrijskih značilnosti zrn in druge posebnosti. V praksi potekata opisovanje in identifikacija zemljin v dveh korakih. Zemljino najprej okvirno opišemo na osnovi vizualnega pregleda, končni opis pa izdelamo potem, ko so znani rezultati relevantnih terenskih in/ali laboratorijskih raziskav. (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018)

Prve osnutke inženirske klasifikacije zemljin je za potrebe gradnje cest pripravil Karel Terzaghi med delom na MIT (Massachusetts Institute of Technology) v letih 1927–1929. Za začetnika inženirske klasifikacije zemljin velja Artur Casagrande, Terzaghijev sodelavec na MIT in kasneje profesor na Harvardu, ki je za potrebe načrtovanja letališč med 2. svetovno vojno razvil tako imenovano AC (Airfield Classification System) klasifikacijo. Z manjšimi modifikacijami AC je leta 1952 nastala klasifikacija USCS (Unified Soil Classification System), prvič vključena v ameriški standard ASTM D 2487 leta 1966. Klasifikacijo USCS so različna strokovna združenja v osnovni ali lastnim potrebam prilagojeni obliki sprejela v nacionalne standarde, npr. Švica (SN 670 008), Nemčija (DIN 18196), Velika Britanija (BS 5930), nekdanja Jugoslavija (JUS U.B1.001) (prav tam).

Prepoznavanje in klasifikacijo zemljin v grobem delimo na dve skupini:

- nevezljive zemljine (prodi in peski),
- vezljive zemljine (gline in melji).

Za klasifikacijo zemljin obstaja cela vrsta klasifikacijskih sistemov, vendar strokovnjaki največkrat uporabljajo modificirano klasifikacijo AC Arturja Cassagrandeja. Ta klasifikacija označuje vsako zemljino z dvema simboloma. Prvi simbol označuje eno od šestih glavnih vrst zemljin, drugi pa pomaga pri nadaljnji delitvi vsake od skupin na podskupine, glede na porazdelitev velikosti zrn (zastopanost frakcij in obliko poteka krivulje zrnivosti) in značaj plastičnosti.

Glavne vrste zemljin so:

- G = gramoz (angl. gravel),
- S = pesek (sand),
- M = prah oz. melj (mo, silt),

- C = glina (clay),
- O = organski prah (fine grained organic soil),
- Pt = šolta (peat). (Gregorač, 2015).

Debelozrnati vrsti zemljin G (gramoz) in S (pesek) delimo v pet podskupin:

W = (well graded) dobro stopnjevana zrnavaost,

C = (clay binder) dobro stopnjevana zrnavaost z glinastim vezivom,

U = (uniformly graded) enakomerna zrnavaost, kjer prevladujejo zrna določenega ozkega intervala z malo ali nič drobnih zrn,

P = (poorly graded) slabo stopnjevana, neenakomerna zrnavaost z malo ali brez drobnih zrn,

F = (finest) slabo stopnjevana zrnavaost z znatno količino drobnih zrn in dobro stopnjevana zrnavaost s preobilno količino drobnih zrn (prav tam).

Drobnozrnate vrste zemljin M (prah), C (glina) in O (organski prah) delimo v tri skupine z naslednjimi oznakami:

- L (low compressibility) – malo stisljive zemljine,
- I (intermediate compressibility) – srednje stisljive zemljine
- H (high compressibility) – zelo stisljive zemljine.

Šotnih vrst ne delimo.

Ločimo osem vrst debelozrnatih zemljin, ki so nevezljivi materiali:

- GW – drobno granuliran prod,
- GP – slabo granuliran prod,
- GU – enakomeren prod,
- GC – prod s peščeno glinastim vezivom,
- SW – dobro granuliran pesek,
- SP – slabo granuliran pesek,
- SU – enakomeren pesek,
- SC – pesek z glinastim vezivom

in devet vrst drobnozrnatih zemljin, to so vezljivi materiali:

- ML – prah-melj z majhno plastičnostjo,
- CL – meljasta glina z majhno plastičnostjo,
- OL – organski melj ali glina z mejno plastičnostjo,

- MI – melj s srednjo plastičnostjo,
- CI – glina s srednjo plastičnostjo,
- MH – melj z visoko plastičnostjo,
- CH – glina z visoko plastičnostjo,
- OH – organska glina z visoko plastičnostjo (Žitnik, 2008).

Preglednica 3: Klasifikacija zemljin

skupina (soil group)	AC (Šuklje, 1979)*		ASTM D 2487*		EN ISO 14688-2:2004**		EN ISO 14688-1:2018		
							pod frakcije (sub-fractions)	simbol (symbol)	D (mm)
zelo debelo zrnata (very coarse grained)					velike skale (large boulder)	LBo	velike skale	lBo	> 630
			skale (boulder)		skale (boulder)	Bo	skale (boulder)	Bo	>200-630
	kamenje (cobble)		kamenje (cobble)		kamenje (cobble)	Co	kamenje (cobble)	Co	>63-200
debelozrnata (coarse grained)	dobro zrnat gramoz (well-graded gravel)	GW	dobro zrnat gramoz (well-graded gravel)	GW	gramoz (gravel)***	Gr	debel gramoz (coarse gravel)	cGr	>20-63
	slabo zrnat gramoz (poorly-graded gravel)	GP	slabo zrnat gramoz (poorly-graded gravel)	GP					
	eno (enovito) zrnat gramoz (uniform gravel)	GU					srednji gramoz (medium gravel)	mGr	>6,3-20
	glinast gramoz (clayey gravel)	GC	glinast gramoz (clayey gravel)	GC	glinast gramoz (clayey gravel)	clGr	droben gramoz (fine gravel)	fGr	>2,0-6,3
			meljast gramoz (silty gravel)	GM	meljast gramoz (silty gravel)	siGr			
		GF (GF _s , GF _c) ¹							
	dobro zrnat pesek (well-graded sand)	SW	dobro zrnat pesek (well-graded sand)	SW	pesek (sand)***	Sa	debel pesek (coarse sand)	cSa	>0,63-2,0
	slabo zrnat pesek (poorly-graded sand)	SP	slabo zrnat pesek (poorly-graded sand)	SP					
	eno (enovito) zrnat pesek (uniform sand)	SU					srednji pesek (medium sand)	mSa	>0,2-0,63
	glinast pesek (clayey sand)	SC	glinast pesek (clayey sand)	SC	glinast pesek (clayey sand)	clSa	droben pesek (fine sand)	fSa	>0,063-0,2
			meljast pesek (silty sand)	SM	meljast pesek (silty sand)	siSa			
		SF (SF _s , SF _c) ²							
drobnozrnata (fine grained)	nizko, srednje in visokoplastičen (low, mid- plastic and elastic)	ML	nizkoplastičen melj (silt) in visokoplastičen melj (elastic silt)	ML	melj (silt)	Si****	debel melj (coarse silt)	cSi	>0,02-0,063
		MI					srednji melj (medium silt)	mSi	>0,0063-0,02
		MH		MH			droben melj (fine silt)	fSi	>0,002-0,0063
	nizko, srednje in visokoplastična (low, mid and high plasticity fines)	CL	nizkoplastična in visokoplastična glina (lean and fat clay)	CL	glina (clay)	CI****	glina (clay)	CI	≤0,002
		CI							
		CH		CH					
organska (organic)	organske zemljine in šota (organic soil and peat)	OL, OI, OH, Pt	organske zemljine in šota (organic soil and peat)	OL, OH, PT	organske zemljine in šota (organic soil and peat)	Or (Pt)			
grajeno tlo (made ground)					umetni in naravni materiali (man-made and relaid natural materials)	Mg			

Vir: (Maček, Smolar, & Petkovšek, 2018)

Glede na zahtevnost izkopa ločimo naslednje kategorije zemljin.

Preglednica 4: Kategorije zemljin

Kategorija	Naziv kategorije	Opis materiala	Zrnavost materiala	Način izkopa	Ocena uporabnosti
1	Plodna zemlja	Je na površini terena, humusa, ruša s primesmi gramoza, peska, melja in/ali gline.	-	Buldožer, bager.	Primerna samo za ozelenitve, ni nosilna, ni stabilna, ni odporna proti eroziji.
2	Slabo nosilna zemljina	Je v lahkognetni do židki konsistenci ($I_c < 0,5$), lahko vsebuje organske snovi.	$> 15 \text{ m } \% f < 0,063 \text{ mm}$	Buldožer, bager.	V naravnem stanju ni uporabna.
3	Vezljiva in nevezljiva zrnata zemljina	Srednje gnetna do trda konsistenca zemljine ali zbito stanje peska, gramoza, grušča, jalovine.	$> 15 \text{ m } \% f < 0,063 \text{ mm}$ $< 15 \text{ m } \% f > 0,063 \text{ mm}$ $< 30 \text{ m } \% f > 63 \text{ mm}$	Buldožer, bager, Občasno buldožer z rijačem.	V naravnem stanju in ustreznem vremenu uporabna za nasipe, nosilnost in stabilnost sta odvisni od zunanjih vplivov.
4	Mehka kamnina	Lapor, fliš, skriljavec, tif, konglomerat, breča ter razpokani, drobljivi in prepereli peščenjak, dolomit in apnenec.	$> 30 \text{ m } \% f > 63 \text{ mm}$ $F < 300 \text{ mm}$	Buldožer z rijačem, bager s konico, rezkanje, miniranje (občasno).	Praviloma dobro nosilna in stabilna, ustrezne zrnavosti je primerna za nasipe in posteljico.
5	Trda kamnina sedimentnega porekla	Apnenec, kompaktni dolomit ali material z nad $50 \text{ m } \% \text{ kosov } f > 600 \text{ mm}$, ki jih je treba minirati.	Raščena hribina $F > 600 \text{ mm}$	Miniranje, rezkanje (izjemoma).	Ustrezne zrnavosti, je zelo dobro nosilna in stabilna ter primerna za nasipe in/ali predelavo.

Vir: (Družba za državne ceste d. o. o., 2001)

3.6 Geološko-geotehnično poročilo preiskanih tal

Rezultati izvedenih terenskih geotehničnih raziskav so zbrani v Poročilu o preiskavah tal (geološko-geotehnično poročilo), ki je sestavni del Poročila o geotehničnem projektiranju.

Sestavljajo ga tekstualni del z grafičnimi prilogami in rezultati raziskav, na osnovi katerih so rezultati računskih analiz.

V tekstualnem delu so bistvena poglavja:

- splošno o objektu in lokaciji,
- pregled opravljenih terenskih in laboratorijskih raziskav,
- opis geološko geotehničnih razmer na lokaciji,
- opis posameznih litoloških členov s povzetkom karakteristik,
- pogoji gradnje in temeljenja.

Grafične priloge obsegajo:

- inženirsko-geološka karta (situacija),
- vzdolžni in prečni geološko-geotehnični profili,
- legenda.

Rezultati raziskav so podani kot:

- profili izvedenih vrtin,
- rezultati vseh terenskih in laboratorijskih rezultatov v čim bolj pregledni grafični in tabelarni obliki.

Rezultati računskih analiz so predvsem:

- analize stabilnosti,
- analize posledkov in njihovega časovnega razvoja,
- nosilnost temeljnih tal.

Pri izdelavi poročila se morajo upoštevati naslednji predpisi, standardi in priporočila:

- Zakon o graditvi objektov ZGO-1 (Ur.l.RS, št. 110/02),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah zakona o graditvi objektov – ZGO-1B (Ur. l. RS, št. 126/07), ZGO-1C (Ur. l. RS, št. 108/09) in ZGO-1D (Ur. l. RS, št. 57/12),
- Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov (Ur. l. RS, št. 101/05),
- Pravilnik o projektni dokumentaciji (Ur. l. RS, št. 55/08),
- Standard SIST EN 1990:2004/A1:2006/AC:2010, Evrokod – Osnove projektiranja,

- Evrokod 1: SIST EN 1991-1-1:2004/A101:2005, Vplivi na konstrukcije – 1–1. del: Splošni vplivi – Postorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb – Nacionalni dodatek,
- Evrokod 1: SIST EN 1991-1-2:2004/A101:2006 Vplivi na konstrukcije – 1–2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije – Nacionalni dodatek,
- Evrokod 7, SIST EN 1997-1:2007; Geotehnično projektiranje,
- Evrokod 7, SIST EN 1997-2:2007; Preiskovanje in preizkušanje tal.

4 INŽENIRSKA GEOLOGIJA

4.1 *Pomen geologije v gradbeništvu*

Geologija je naravoslovna veda, ki se ukvarja s proučevanjem Zemlje. Iz najrazličnejših pogledov proučuje sestavo in zgradbo Zemlje, snovi, ki jo sestavljajo, njen nastanek in zgodovinski razvoj ter še mnoge druge lastnosti, pojave in procese. Delovno območje geologije obsegata dve primarni področji, imenovani splošna geologija in zgodovinska geologija in vrsta naravoslovno in tehnično usmerjenih geoloških ved, med katere spadajo geofizika, seizmologija, hidrologija, hidrogeologija, inženirska geologija in druge.

Uporabo geoloških znanj v inženirske namene imenujemo inženirska geologija. Največji obseg uporabe inženirske geologije je na področju rudarstva in energetike, vendar smo se v tem diplomskem delu omejili na inženirsko uporabo v gradbeništvu (Žlender, Vrecl, & Dolinar, 2013).

Za gradbeništvo je geologija pomembna predvsem na dveh področjih: pri proizvodnji gradbenih materialov in sami graditvi objektov (geotehnika). Pri gradnji stavb in ostalih inženirskih objektih so zato znanja geologije v veliko pomoč, saj se pri temeljenju stavb ukvarjamo z vprašanji stabilnosti izkopov in nasipov, pri gradnji predorov je na primer zelo pomembna nosilnosti izkopanega rova. Pri uporabi v gradbeništvo se geologija navezuje na geomehaniko, ki obravnava fizikalne in mehanske lastnosti tal. Delimo jo na mehaniko zemljin in mehaniko kamnin (prav tam).

Prvotno je geomehanika izhajala predvsem iz znanj geologije, šele Terzaghi jo je v 30. letih 20. stoletja utemeljil kot samostojno znanstveno disciplino. Ker se kamnine in zemljine po mehanskih lastnostih praviloma precej razlikujejo, so pristopi obravnavanja mehanskih lastnosti različni. Mehanika kamnin proučuje fizikalno mehanske lastnosti (prav tam).

Proučevanje tal kot osnova za gradnjo objektov v povezavi z ostalimi znanji gradbeništva imenujemo geotehnika ali geotehnično inženirstvo. Namen geotehnike je uporabiti znanja geologije in geomehanike ter v povezavi z ostalimi znanji (gradbene mehanike, gradbene tehnologije) načrtovati čim bolj optimalne objekte (prav tam).

4.2 Geološke razmere obravnavanega območja

Med železniško postajo Maribor in koncem obravnavanega odseka je obstoječa proga relativno plitvo vkopana in predvsem na levi strani opirana s kamnitimi zidovi proti regionalni cesti. Kasneje je prostor desno dodatno zaprt z izgradnjo hitre ceste Slivnica–Pesnica, ki je izvedena z niveleto na nasipu cca. 5–10 m nad progo. Vznožje (peta) nasipa hitre ceste se proti progi večinoma izteče takoj desno od projektiranega II. tira, na dveh 100–150 m dolgih odsekih pa je v spodnjem delu nasipa vgrajena armirana zemljina. Desno ob progi ali na bermi nad opornimi zidovi je speljan širok in večinoma tlakovan odvodnjevalni jarek. Z izgradnjo hitre ceste je pobočje desno nad progo v celoti umetno preoblikovano. Ozka naravna zajeda je zapolnjena z aluvialnimi melji in glinami, na prehodu v odprt prostor proti železniški postaji pa se v zajedo izklinjajo dravski prodi. Položna in terasasta pobočja so nad levo in desno v povprečnih debelinah več kot 5 m prekrita s pliokvartarnimi in spralinskimi mastnimi glinami z vložki peskov in zablatenih prodov. V podlagi so miocenski laporovci in meljevci ter podrejeno peščenjaki (Geoinženiring d.o.o., 2017).

Na začetku načrtovane pilotne stene se sicer lapornata podlaga nahaja že slab meter pod nivojem obstoječe železniške proge, se pa v smeri stacionaže hitro poglobi na nivo preko 14 m. Nad laporjem tla gradijo peščene in visoko plastične gline, ki so do globine 4–5 m v srednje do težko gnetnem konsistenčnem stanju, globlje pa pretežno v srednje gnetnem, pa tudi v srednje do lahko gnetnem konsistenčnem stanju. Sklenjenega nivoja podtalnice na tem pododseku ni, pojavijo se lahko manjši dotoki pobočne vode po slojih z večjo vsebnostjo peščenih frakcij.

Na podlagi poznavanja geoloških, hidrogeoloških in geomehanskih razmer na obravnavanem območju lahko v nadaljevanju podajamo geotehnične pogoje.

Geološko-geomehanske parametre za značilne sloje podajamo v spodnji preglednici.

Preglednica 5: Geološko-geomehanski parametri zemljin

Opis	IG enota/sloj	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	E _{oed} (MPa)
Nasip iz kamnitega materiala	NA	21	0	35	50
Zaglinjen in meljno peščen prod (GC-GM)	Q _{alp}	20	0	33	20
Visoko plastična in meljna glina (CH-CL) srednje do lahko gnetna	Q _{alg}	17	0	23	2
Peščena glina in zaglinjen pesek (SC-CL)	PI/Q _{alg}	19	0	30	5
Meljno peščena glina (CL) tgn. kons.	PI/Q _{alg}	18	0	25	4
Meljni pesek in peščeni melj (SM-ML)	PI/Q _{alm}	19	0	28	5
Peščena glina (CL) tg. do poltrdne kons.	PI/Q	19	0	26	5
Lapor s plastmi peščenjaka	M ₂ ¹	21	1000	33	250

Vir: (Geoinženiring d. o. o., 2017)

4.3 Projektna dokumentacija

Investitor oziroma naročnik v sodelovanju s projektantom v fazi pridobivanja projektne dokumentacije potrebuje poročilo, ki vsebuje zanesljive podatke geološke sestave in karakteristike tal zaradi nadaljnjega projektiranja objekta (izračuni temeljev objekta, varovanje gradbene jame, odvajanje odpadnih vod ...).

Geomehanik nato izda poročilo na podlagi terenskega ogleda širše lokacije, terenskih in laboratorijskih raziskav zemljin ter pregleda temeljnih tal na mikrolokaciji, kjer je predvidena gradnja objekta.

Za pridobitev geotehničnih lastnosti temeljnih tal in pogojev temeljenja geomehanik v dogovoru z naročnikom pripravi razkop v tla (sondažni izkop). Dimenzije razkopa niso pomembne, bolj pomembna je globina razkopa, saj tako dobimo globine posameznih slojev geološke sestave, ki je odvisna od temeljenja predvidenega objekta in same lokacije.

V primeru, da je lokacija res problematična (neposredna bližina plazišča, statično zahteven objekt, globoko temeljenje ...), se raziskave tal naredijo s pomočjo vrtanja ali izvedbe testa dinamičnih penetracij ter drugih geoloških raziskav (GeoMet, 2019).

Projektno dokumentacijo ureja in definira Gradbeni zakon (Ur. l. RS, št. 61/2017), podrobneje pa je opredeljena v njegovem podzakonskem aktu, tj. Pravilniku o podrobnejši vsebini

dokumentacije in obrazcih, povezanih z graditvijo objektov (Ur. l. RS, št. 36/2018) (Pravilnik o podrobnejši vsebini dokumentacije in obrazcih, 2018).

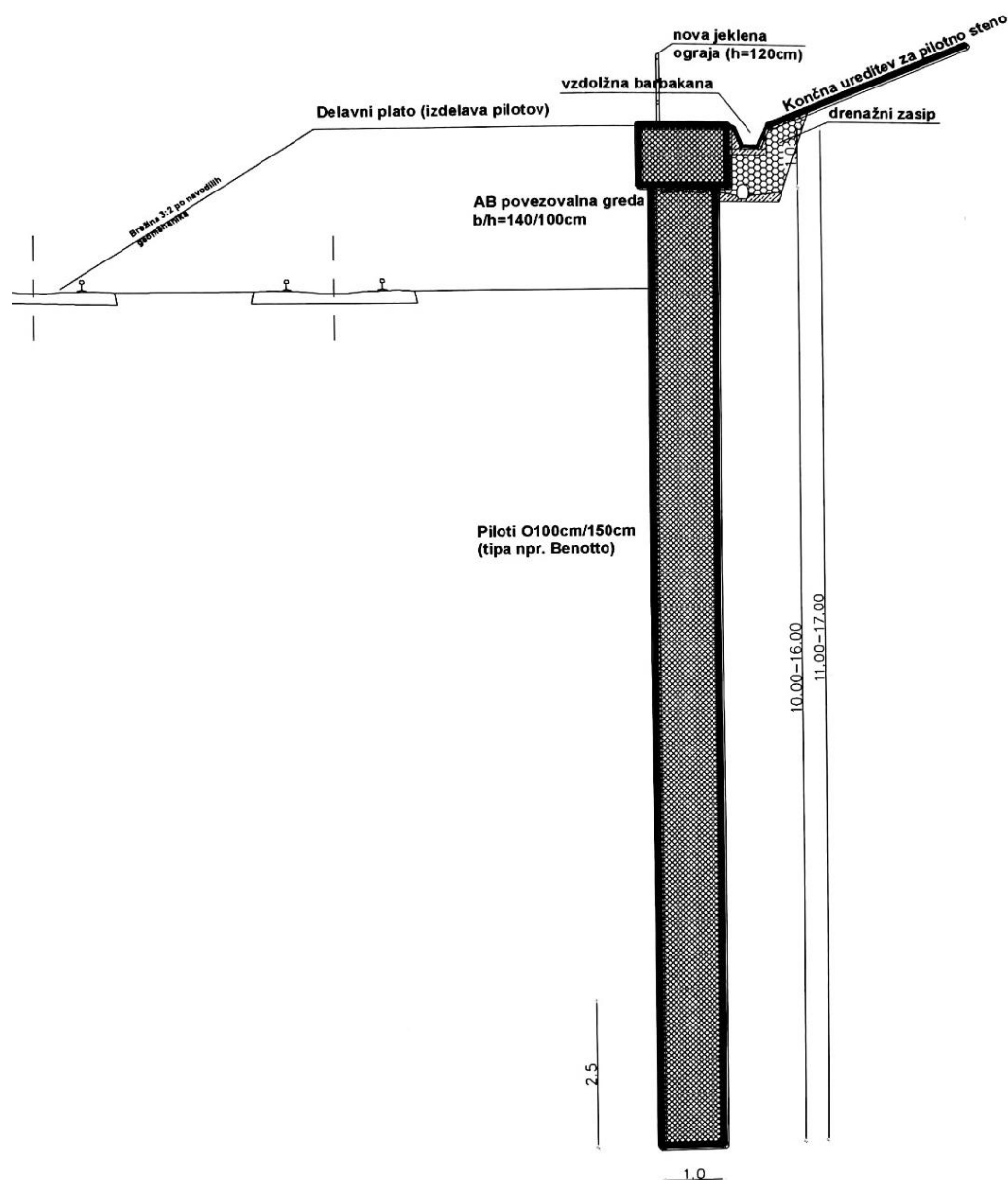
4.4 Tehnično poročilo obravnavanega objekta

Zbirno tehnično poročilo vsebuje opis objekta in njegovih značilnosti, povzetek tehničnih prikazov vseh načrtov in navedbo ter utemeljitev dopustnih manjših odstopanj od gradbenega dovoljenja, sheme in druge prikaze, iz katerih so razvidni bistveni podatki v zvezi z izpolnjevanjem bistvenih zahtev, izsledke predhodnih geoloških in geomehanskih raziskav, empirične podatke ter oceno vrednosti materiala in del (Pravilnik o podrobnejši vsebini dokumentacije in obrazcih, 2018).

V tehničnem poročilu izvedbenega načrta za novo oporno steno se navaja, da na obravnavani lokaciji stoji kamnito betonski zid skupaj z odvodno kanaletto. Zaradi zamikov tirov trase se bo na večjem delu odseka obstoječa konstrukcija odstranila in nadomestila z novo oporno konstrukcijo, ostala mesta stare konstrukcije pa se sanirajo. Železniška proga se na tem pododseku širi na desno stran, nekje do 12 m v obstoječo brežino. Višina vkopa ne bo presegala 3 m, ker pa je bila ugotovljena slaba nosilnost tal, je predvidena izgradnja nove pilotne stene. Da je teren nestabilen, se je izkazalo ob izgradnji hitre ceste malo višje v brežini desno (Projekt d.d. Nova Gorica, 2017).

Nova konstrukcija bo AB pilotna stena, zasnovana iz AB uvrstanih pilotov premera 100 cm, ki so v razmaku 1,5 m glede na os. Dolžina pilotov znaša od 10 do 16 m in je sorazmerna ugotovljenim geomehanskim lastnostim temeljne zemljine na tem območju. Vpetje v hribinsko osnovo za pilote je vsaj 3 m. Na odseku globlje hribinske osnove (od profila P57 do profila P58) je s piloti ni treba doseči, dolžina pilotov pa je najmanj 16 m. Preko pilotov se izvede AB pilotna greda širine 140 in višine 100 cm, ki poteka po celotni dolžini in ima dilatirana na rastru 15 m. Piloti se izvajajo po sistemu Benotto skladno z zahtevami TSC 07.205 za pilotne stene. Betonski deli konstrukcije se izvedejo iz betona kvalitete C30/37, XC4, XD3, XF4, PV-II. Armatura je kvalitete B500B (prav tam).

Za fazo izvedbenega načrta je bilo izdelano geološko-geomehansko poročilo, izdano s strani podjetja Geoinženiring d. o. o. iz Ljubljane (9/2 Geološko-geomehansko poročilo, št.elab.: 9806, februar 2017).



Slika 5: Karakteristični prerez nove pilotne stene

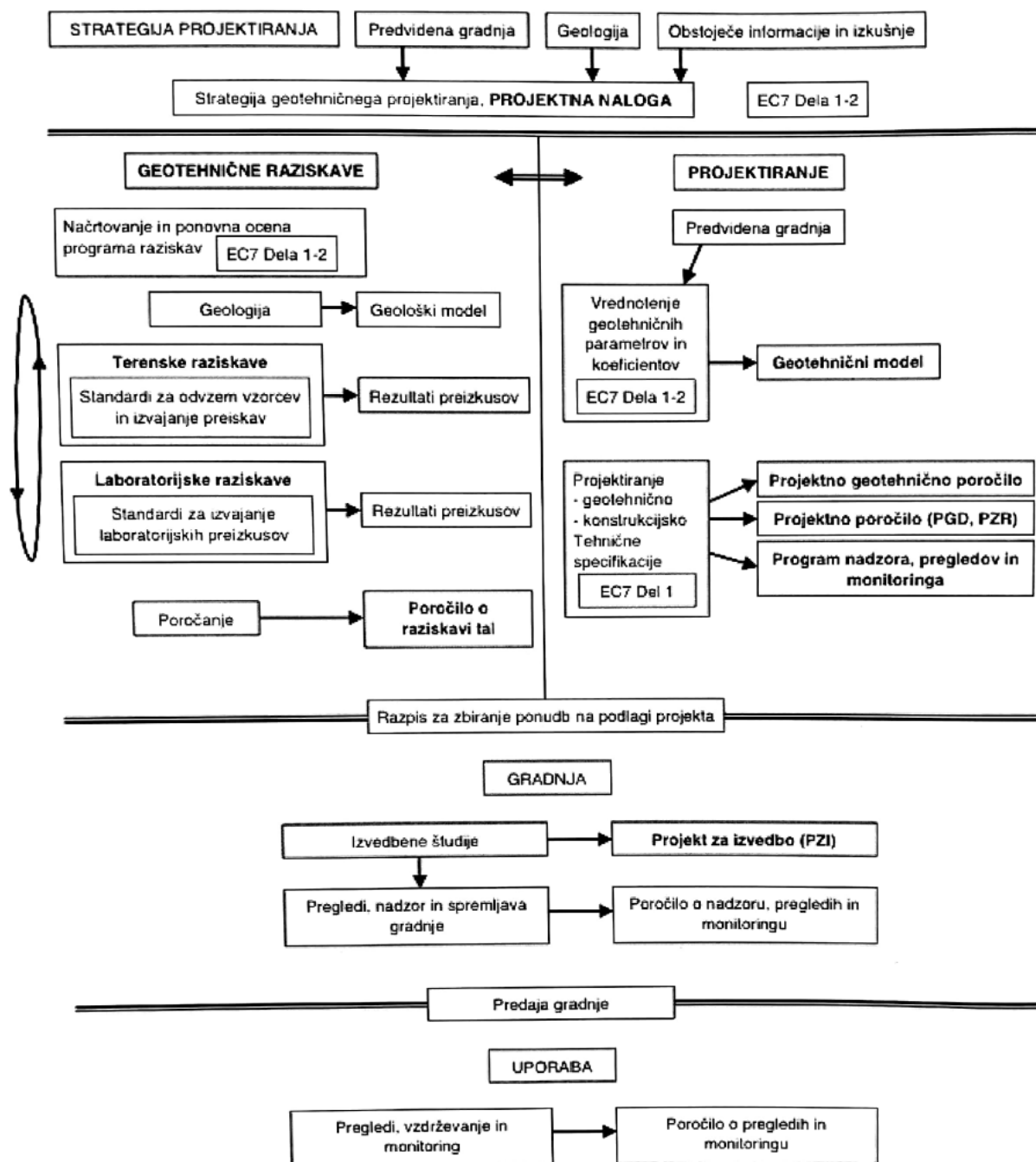
Vir: (Projekt d. d., 2017)

4.5 Načrtovanje geotehničnih raziskav terena

Geološko-geotehnične raziskave so namenjene najprej pravilni umestitvi kakršnegakoli objekta v prostor, nato pridobitvi ustreznih parametrov za projektiranje ter nadaljnji optimizaciji med samo izvedbo. V fazi naročanja ustrezno zasnovane geotehnične preiskave vključno s pravilno izdelavo in vrednotenjem v fazi izvedbe na koncu celostno vplivajo na kakovost izvedbenega projekta in hkrati na investicijsko vrednost celotnega projekta ter s tem na kakovost inženirske prakse (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Pravilna izbira različnih vrst posameznih vrst geotehničnih preiskav in njihova ustrezna kombinacija ter analize vhodnih podatkov, potrebnih za nadaljnje geotehnično projektiranje in konstruiranje, omogočajo trajnost in optimizacijo načrtovane investicije (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Preglednica 6: Potek dejavnosti v procesu graditve objekta



Vir: (Inženirska zbornica Slovenije, 2018)

V zadnjem desetletju ali dveh se vse bolj uveljavljajo novi postopki in metode pri izvajanju geotehniško-geomehanskih preiskav terena, ki so prešle iz akademske na praktično raven ter se

izvajajo v praksi in uporabljajo za določanje mehanskih in fizikalnih lastnosti zemljin in kamnin (presimeter, dilatometer, georadar itd.). Postopki temeljijo na meritvah posrednih mehanskih parametrov in omogočajo preverjanje geotehničnih pogojev in določanje mehanskih lastnosti v glavnem po semiempiričnih metodah, ki temeljijo na izkušnjah pri načrtovanju izvedenih projektov na podobnih geotehničnih razmerah. Pri geotehničnih preiskavah so zato zelo pomembne individualne praktične izkušnje geotehnika – geomehanika in projektanta, ki sta zadolžena za pripravo potrebnega programa terenskih in laboratorijskih raziskav ter drugih izhodišč za oceno lastnosti preiskanih materialov in geotehničnih pogojev, ki so potrjeni z rezultati laboratorijskih preiskav na reprezentativnih vzorcih posameznih zemljin in/ali kamnin. Razumeti morata pomen rezultatov in natančnosti dobljenih mehanskih parametrov za obravnavan projekt ter izdelati merila za vrednotenje pridobljenih podatkov na osnovi izkušenj in podatkov iz literature, pridobljenih v podobnih geotehničnih razmerah (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

V Republiki Sloveniji je pri načrtovanju geotehničnih raziskav in pri geotehničnem projektiranju obvezna uporaba standarda SIST EN 1997:2005, ki določa osnovne pogoje geotehničnega projektiranja v inženirski praksi. Navedeni standard pri načrtovanju obsega in vrste potrebnih raziskav v osnovi razlikuje med objekti po naslednjih kategorijah:

- objekti z zanemarljivimi tveganji (geotehnična kategorija 1);
- objekti brez izjemnih tveganj in zahtevnih tal ter obremenitev (geotehnična kategorija 2);
- preostali objekti z neobičajno velikimi tveganji, zelo zahtevnimi pogoji tal, izjemnimi obtežbami in/ali objekti na področjih z veliko seizmičnostjo (geotehnična kategorija 3).

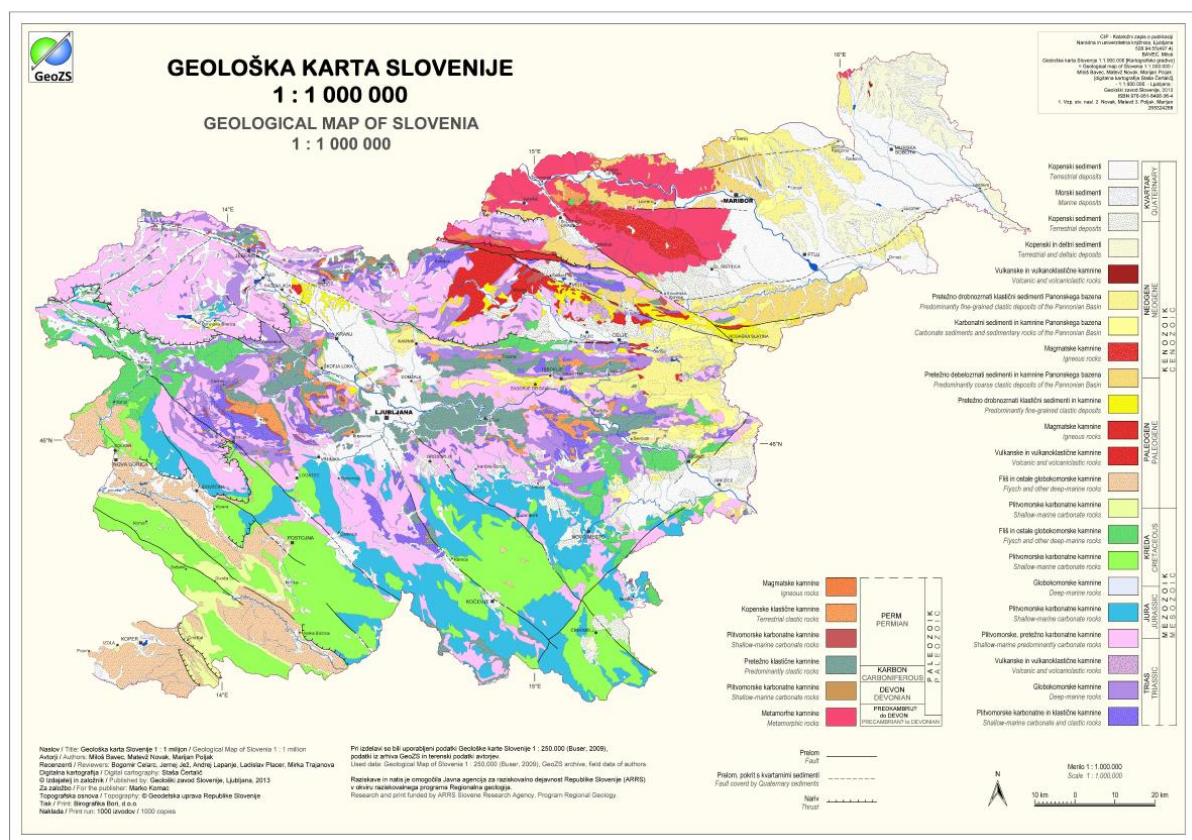
Za varno in ekonomično načrtovanje projekta je tako treba čim bolj natančno določiti geološko sestavo in geotehnične lastnosti posameznih zemljin in hribin, preiskanih v tleh na širšem območju tal, v katerih je predvidena izvedba objekta. Za načrtovanje so zlasti pomembni podatki o strižni trdnosti in prepustnosti zemljin in hribin. (prav tam)

Pri določevanju reprezentativnih vrednosti parametrov zemljin in hribin se je treba zavedati, da se lahko napetostno stanje in pogoji v temeljnih tleh po gradbenem posegu bistveno spremenijo, kar lahko močno vpliva na geotehnične lastnosti zemljin in hribin, ki v tleh nastopajo, zato se s predhodnimi preiskavami določijo čim bolj realne lastnosti zemljin in hribin, predvsem je pomembna strižna trdnost ter prepustnost zemljin in hribin glede na spremenjeno (novo) stanje v tleh, ki bo nastopilo v določenem času po izvedbi objekta. (prav tam)

4.6 Terenske preiskave obravnavanega območja

Terenske preiskave za potrebe načrtovanja in nadgradnje železniške proge bazirajo na pregledu obstoječih podatkov o raziskavah na koridorju proge ter na izvedbi raziskav z geomehanskimi vrtnjami ter strojnimi izkopi za fazo izvedbenega načrta. Širša in bližnja vplivna okolica železniške trase in deviacij cest je bila v preteklosti na določenih odsekih podrobno preiskana.

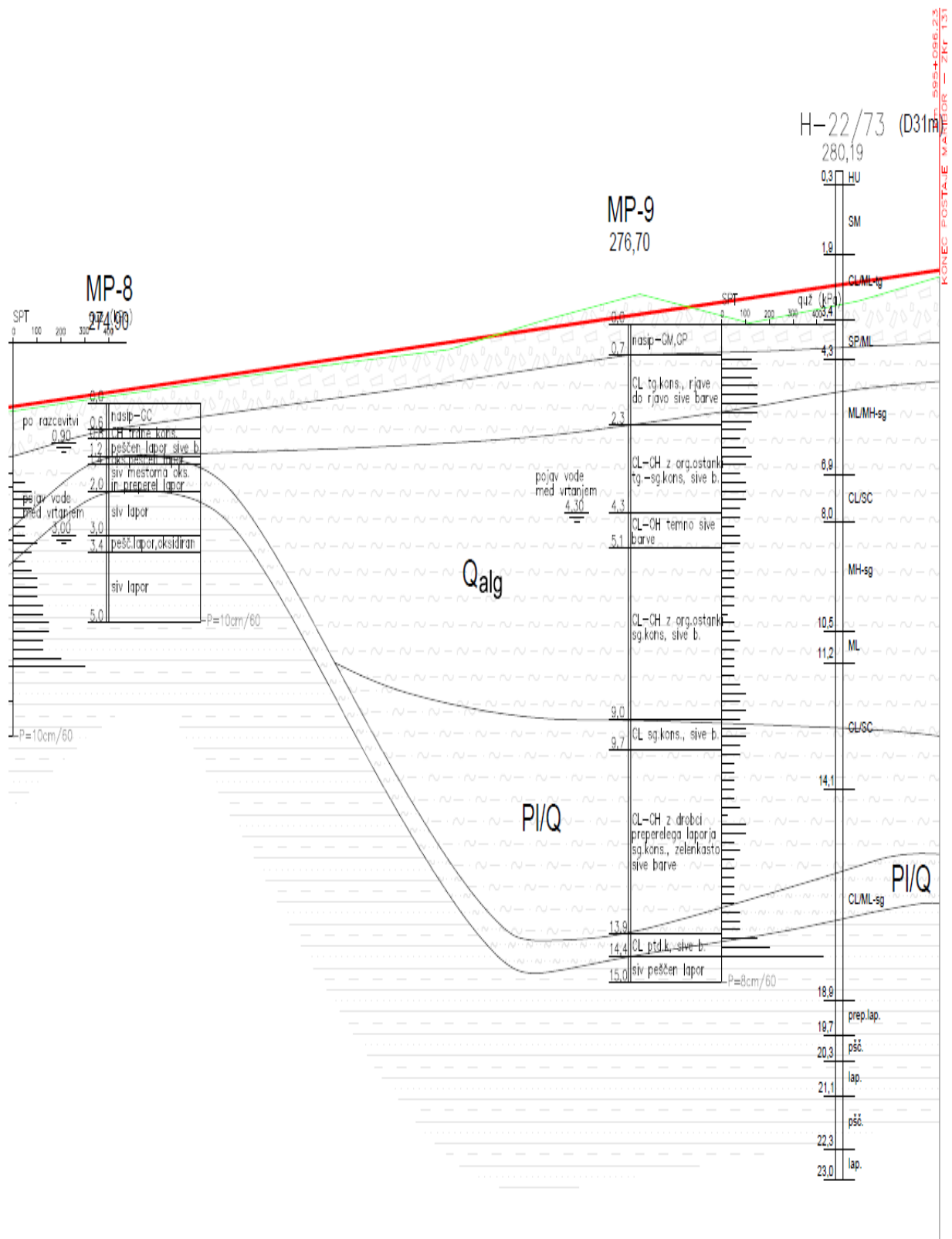
Osnovna geološka karta Geološkega zavoda Slovenije podaja splošne geološke razmere širšega prostora, globinska in površinska razmerja med posameznimi členi, tektonske razmere, pregled mineralnih surovin in okvirni zgodovinski nastanek prostora.



Slika 6: Geološka karta Slovenije

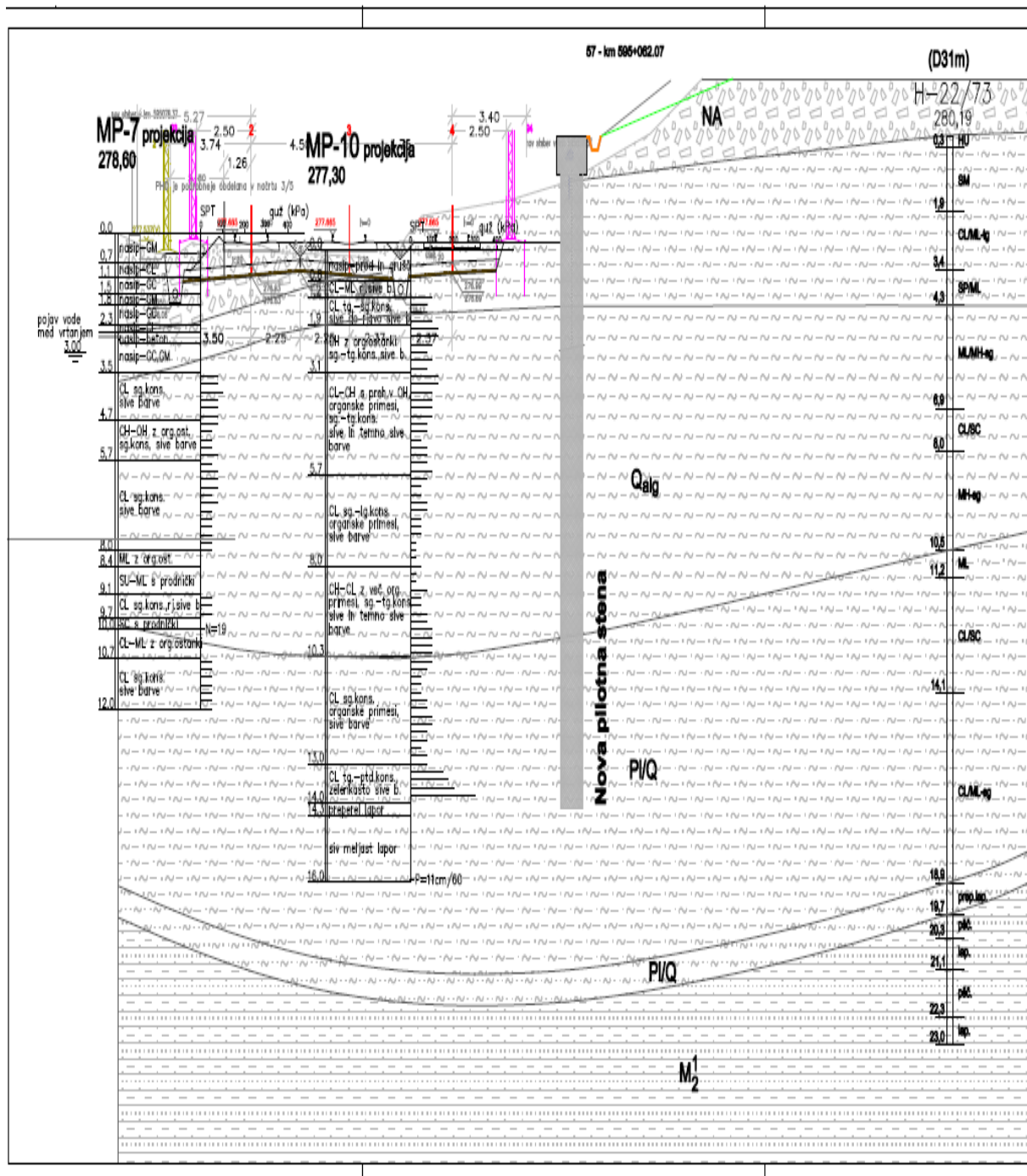
Vir: (http://www.geo-zs.si/images/GeoZS/GeoloskeKarte/OGE_knjiznica.jpg)

V nadaljevanju so iz geološko-geomehanskega poročila dokumentacije izvedbenega načrta prikazane ugotovljene geološke sestave predhodnih terenskih preiskav.



Slika 7: Geološki vzdolžni profil predhodnih preiskav

Vir: (Geoinženiring d. o. o., 2017)



Slika 8: Geološki prečni profil predhodnih preiskav

Vir: (Geoinženiring d. o. o., 2017)

Geološko-geomehanske razmere na območju tirov in pilotne stene v obravnavanem območju nadgradnje železniške proge smo ugotavljali z inženirsko geološkim in hidrogeološkim kartiranjem, izdelavo sondažnih ročnih razkopov med tiri, izdelavo sondažnih strojnih razkopov in sondažnih vrtin na območju objekta, izvedbo in-situ geotehničnih, geomehanskih in hidrogeoloških raziskav ter izvedbo laboratorijskih preiskav na odvzetih vzorcih.

5 GEOFIZIKALNE PREISKAVE TERENA

5.1 Vrste, načini in izvedba predhodnih preiskav terena

V geofiziki se proučujejo fizikalne lastnosti zemlje oziroma njihovo spreminjanje v prostoru. Vsaka snov (kamnine, voda, minerali) ima določene fizikalne lastnosti, kot so npr. gostota, hitrost širjenja elastičnega valovanja, električna upornost, dielektričnost, toplotna prevodnost idr., po katerih različne snovi razlikujemo in tudi ločimo med seboj. Na podlagi spremembe v fizikalni lastnosti snovi lahko določimo sloje zemljin, na primer stik grušča, odloženega na kompaktno podlago, ločimo glino od peska, ugotovimo nivo podtalne vode, ugotavljamo kraške pojave. Metode uporabne geofizike uporabljamo za študij geoloških struktur pod površjem, v inženirski geologiji in hidrogeologiji, za potrebe geotehnike, arheologije, varovanja okolja idr. (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018)

Geofizikalne preiskave terena spadajo med indirektne metode raziskav. Temeljijo na merjenju razlik posameznih fizikalnih količin glede na znano homogeno sredino. Iz teh razlik se nato oceni sestav tal. Uporaba geofizikalnih metod je primerna pri preiskavah večjih površin in linijskih objektov. S pomočjo teh preiskav se lahko izločijo manjša območja, ki jih je treba natančneje preiskati z dražjimi in natančnejšimi metodami. Vrsta uporabljene geofizikalne metode je odvisna od ciljev preiskav, geoloških in topografskih razmer (Žlender & Dolinar, Geologija, 2008).

Danes se uporablja veliko število geofizikalnih metod, ki se v grobem delijo na geoelektrične, geoseizmične, georadarske in radioaktivne metode, vendar so le-te podvržene zmanjševanju ločljivosti glede na globino (prav tam).

Geofizikalne preiskave so zato zelo primerne za izvajanje okoljskega monitoringa. Prva prednost je nedestruktivnost geofizikalnih preiskav, druga pa njihova zveznost.

Sodoben način geofizikalnih preiskav je tehnika tomografije, kjer z veliko gostoto preiskav preiščemo izbran profil do določene globine. Označujemo jo tudi kot tehniko preslikavanja. Ena od bistvenih prednosti geofizikalnih preiskav je ta, da lahko poda geološko geomehansko stanje pod površino v obliki zveznega profila (sondažni izkopi oziroma vtine so le točkovni podatek) (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Geofizikalne preiskave se izvajajo v različnih raziskovalnih fazah, pri katerih se spreminjata raven raziskav in zahtevnost projektiranja, temu pa sledita tudi obseg in fokus. V fazi idejnih

zasnov je dovolj, da neko območje samo okvirno okarakteriziramo (skeniramo), s čimer dobimo litološko sliko površine in okvirne globine do podlage. Za fazo izvedbe pa je treba dodati še kvantitativne in kvalitativne podatke z zahtevano gostoto, ločljivostjo in natančnostjo (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

V okviru obsežnih geološko geomehanskih poročil oziroma elaboratov se geofizikalne preiskave izvajajo pred drugimi preiskavami, vzporedno z njimi in tudi že po izvedenih geološko geomehanskih preiskavah, seveda odvisno od potrebne stopnje raziskanosti določenega območja. Najpogosteje se geofizikalne preiskave izvajajo v zgornji fazi projekta, saj tako naročnik brez gradbenega (fizičnega) posega pridobi osnovne podatke o določenem (neznanim) terenu, ko še lahko vpliva na načrtovanje in tako usmerja projekt. Tudi v primeru zelo različnih heterogenih temeljnih tleh so geofizikalni podatki koristni, saj nam predhodno podajo kritična mesta (npr. nivo podtalne vode, leče peska), kamor se kasneje za natančnejšo sliko anomalij usmerijo vrtine, sondažni razkopi oziroma druge terenske preiskave. Vrtine služijo geomehaniku za umeritev geofizikalnih meritev, ki so odločilnega pomena za kakovostno interpretacijo preiskanega območja (prav tam).

Da izberemo uporabno geofizikalno metodo preiskave terena, nam je v pomoč spodaj prikazana preglednica Inženirske zbornice Slovenije.

Preglednica 7: Pregled najprimernejših geofizikalnih preiskav

Geofizikalne metode	Seizmika		Geoelektrika		Elektromagnetne metode			
aplikacija	refrakcija	refleksija	upornostno sondiranje	upornostna tomografija	frekvenčna domena	časovna domena	VLF	georadar
litološka zgradba	A	B	A	A		B		B
geološka struktura (lega plasti, izklinjanje, tektonika)	A	A	B	B		B		B
globina do podlage sedimentov	A	B	B	B				A/B
debelina nekonsolidiranih sedimentov	A		A	A	B	B		B
globina do nivoja podzemne vode	A	B	B	B	B	B		B
razpokanost in prelomne cone	A	B		B			A	B
podzemne praznine	B	B	B	B				A
kraški pojavi (kanali, brezna, jame ipd.)				A				A
lastnosti zemljin/hribin	A		A	A	B			
»in situ« elastični dinamični moduli	A							
spremembe v prepustnosti			B	B	A	A		
iztekanje iz odlagališč				A	A	A		B
iztekanje pod pregradami ali nasipi				A	B			A
utrjenost nasipov	B		B	B				B
ugotavljanje zasutih jarkov in starih strug	B			B	A	B		A
meja slana/slodka voda				B	A	A		
iskanje podzemnih instalacij				B	B	B		A
iskanje zakopanih kovinskih predmetov				A	B	B		A
ripanje	A	B						

A ... prvi izbor (uspešna metoda v večini materialov), B ... pomožna metoda (uspešna v določenih ugodnih pogojih)

Vir: (Inženirska zbornica Slovenije, 2018)

Pomembna prednost geofizikalnih preiskav je njihova nedestruktivnost, saj skoraj vse preiskave, ki jih izvajamo na površini, pri izvedbi na obravnavanem območju puščajo minimalne sledi (pohojena trava, lokalno zbita zemljina na površini), nikakor pa ne škodo. To dejstvo je zelo pomembno pri preiskavah na občutljivem okolju (npr. pri nesoglasju s strani lastnikov zemljišč in morebitno plačevanje odškodnine za povzročeno škodo, kulturno zgodovinski objekti) ter pri posegih, kjer bi z vrtno garniture lahko povzročili določene neželene učinke. Z geofizikalnimi preiskavami tako pridobimo podatke o "in situ" fizikalnih lastnosti kamnin/zemljin (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Druga pomembna prednost geofizikalnih preiskav pred vrtinami, razkopi, presiometerskimi preiskavami je, da jih lahko izvajamo zvezno v profilih 2D ali celo v tehniki 3D. Na ta način dobimo bolj podrobno stanje pod površjem. Interpolacijo oziroma ekstrapolacijo točkovnih

izvedb preiskav lahko namreč na območjih, kjer se plasti lateralno izklinjajo ali so strukture prelomljene, še zlasti pa v kraškem okolju, ne podajo nujno realne slike. V določenih primerih je lahko takšna napaka kritična (npr. če je na dotičnem mestu načrtovana podpora objekta) (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Seveda imajo tudi geofizikalne preiskave svoje omejitve. Na območju, kjer je v bližini transformatorska postaja, bodo geoelektrične meritve motene ali celo neuporabne, obstoječe talne inštalacije prav tako povzročajo motnje, v bližini telekomunikacijskih oddajnikov so georadarske meritve lahko onemogočene. Omejitev lahko predstavlja tudi premajhen ali nedostopen (pozidan) prostor, kjer geofizikalnih terenskih preiskav fizično ni mogoče izvesti. Časovno omejitev predstavljajo tudi vremenski pogoji, saj je za dobro delovanje večine elektronskih merilnih instrumentov z visoko ločljivostjo priporočljiva minimalna temperatura zraka 5 °C. Deževno vreme ali zelo visoka zračna vlažnost lahko povzroči prebijanje med elektrodami ali med kabli in tlemi, posledično pa so meritve padca električnega potenciala neuporabne. Atmosferske razelektritve (strele) so prav tako zelo nevarne za izvajalce geoelektričnih meritev. Veter povzroča mikrovibracije, kar deluje kot motnja pri seizmičnih meritvah. Vplivu vetra se ne moremo izogniti v bližini dreves, kjer se vibracije preko korenin prenašajo v tla, kar povzroča motnje, ki jih ne moremo odstraniti. Za georadarske preiskave je vlaga v tleh dejavnik, ki izrazito povečuje dušenje elektromagnetnega signala v globino, zato je priporočljivo le-te izvajati v obdobju sušnega vremena. Pogosto si lahko že s samimi ugodnimi vremenskimi pogoji v času izvajanja meritev zagotovimo kakovostne merske podatke (prav tam).

Omejitve geofizikalnih preiskav velikokrat rešujemo s sočasno izvedbo komplementarnih geofizikalnih preiskav na določenem mestu. V tem primeru bi glino in hribino lahko dovolj zanesljivo ločili s preverjanjem njunih električnih upornostnih lastnosti. Izvajanje komplementarnih preiskav na izbranih mestih je bistven pogoj za kakovostno izvedbo geofizikalnih preiskav v večini geoloških okolij in bi moralo postati pravilo v praksi. Optimalno kombinacijo metod in tehnik določi geofizik glede na geološke in izvedbene pogoje (prav tam).

Rezultati geofizikalnih preiskav so kvantitativni podatki (npr. globine do podlage, hitrost valovanja longitudinalnih valov, na podlagi česar sklepamo o vrsti in kakovosti kamnine), zato je za točnost geofizikalnih preiskav potrebno primerjati podatke, pridobljene iz vrtin oziroma razkopov. To sicer ni popolnoma primerno, saj pri vrtanju neposredno dobimo podatke o globinah in morda tudi jedro samo, iz katerega lahko ocenimo kakovost kamnine (ob pogoju,

da jedro ni poškodovano zaradi vrtanja samega), pri geofizikalnih preiskavah pa merimo fizikalna polja ali fizikalne količine, ki so odraz fizikalnih lastnosti v prostoru, rezultat pa dobimo šele s prevedbo fizikalnih karakteristik v geološki jezik. Podatki iz vrtine veljajo namreč samo na mestu vrtanja, geofizikalni podatki pa so pogosto (sploh če merimo fizikalna polja) odraz merjenega področja (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Točnost geofizikalnih rezultatov torej lahko kvantificiramo šele, ko imamo na določenem mestu zanesljiv podatek o globini ali debelini neke plasti, to je, ko plasti prevrtamo ali odkopljemo. V stroki velja splošna ocena, da je točnost geofizikalnih podatkov $\pm 10\%$ oziroma $\pm 15\%$ v manj ugodnih pogojih. Uporabnik geofizikalnih podatkov mora zato to dejstvo upoštevati pri nadaljnjih izračunih (prav tam).

5.2 Georadarska naprava, razvoj in področja uporabe

Georadar (GPR – po angleško Ground penetrating radar) je novejša elektromagnetna visokoločljiva merilna naprava. Začetki njegovega razvoja segajo v prvo polovico 80. let. Pomemben preobrat je pomenilo leto 1985, ko je v sodelovanju z Geološkim zavodom Kanade podjetje A-Cubed Inc. razvilo zelo kakovosten digitalni sistem Pulse EKKO III. Danes je na tržišču nekaj georadarskih sistemov, med katerimi ni večje razlike v kvaliteti. Prednost Pulse EKKO pred drugimi je v tem, da je primeren za delo v težavnih terenskih razmerah, npr. na hribovitem površju, meritve so preproste tudi v bočni in stropni smeri. Merilne antene se ročno premikajo po koraku meritev (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

V Sloveniji se georadar prvič omenja leta 1991 na praktičnih primerih uporabe geološko-ekonomske, geotehnične in hidrogeološke narave. Tako se je pri nas najbolj uveljavil georadarski tip GSSI-SIR (Geophysical Survey System Inc.-Subsurface Interface Radar), kjer so antene pritrjene na voziček, ta pa je pripet na avtomobilsko vlečno kljuko oziroma ga prosto vlečemo po površini obravnavanega terena. GSSI-SIR radar je zato primernejši za geofizikalno kartiranje ravnih površin, kot so travniki, cestišča in mestne ulice. Poznamo še en sistem, ki je prirejen za meritve v raziskovalnih vrtinah. Razvilo ga je Swedish Geological Company s švedsko družbo ABEM AB in se imenuje RAMAC (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

Z georadarjem se največkrat snemajo predvsem kompaktne kamnine. V suhih sipkih kamninah je nepogrešljiv tam, kjer odpovedo druge cenejše geofizikalne metode, npr. na meliščih ali suhih prodnih zasipih. Splošno se največ uporablja v kamnolomih okrasnih kamnov za določitev kakovosti kamna in odkopnih zalog, tudi v rudnikih boksita pri iskanju boksitnih gnezd in

ločevanju kamninske boksitne podlage. V hidrogeologiji lahko z njim določujemo gladino podtalnice in hidrogeološko-litološke značilnosti kamnin, v kraškem področju pa razpakanost kamnin in podzemne jame. Zelo uporaben je tudi v arheologiji pri odkrivanju z zemljo prekritih ruševin in artefaktov (Vaughan, 1986). Nepogrešljiv je pri gradnjah predorov, cestogradnjah za določanje debelin preperine in geotehničnih ocenah kompaktnosti oziroma razpakanosti hribin. V urbanih okoljih ga uporabljajo za iskanje podzemne komunalne infrastrukture. Znani so primeri določitve debelin permafrosta, debeline večnega ledu, prav tako pri iskanju skritih smetišč oziroma odpadnih jam, pri ugotavljanju debeline snežne odeje na plazovih, pri ugotavljanju spremenjenega kemijskega stanja podtalnic (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

V splošnem je naloga georadarja razločevanje geofizikalnih anomalij, tj. mest, ploskev ali plasti z različnimi fizikalnimi lastnostmi. Pri tem je lahko anomalija kakršnakoli oblika ali snov, ki je predmet preiskav (npr. komunalna cev, prekriti zid ali temelj, podzemni rov, razpoka, spremenjena kompaktnost, litološke spremembe ...) (prav tam).

Z georadarjem preko oddajne antene, s katero potujemo po površini, pošiljamo impulze elektromagnetne energije in s sprejemno anteno hkrati registriramo čase in amplitude povratnih valov. Ločljivost in globino dosega georadarskega signala v praksi nadziramo z izbiro ustrezne centralne frekvence oddajne antene. Ker gre za metodo geofizikalnega sondiranja lahko ob ustrezni izvedbi akvizicije in obdelave izmerjenih radarskih signalov prikažemo in analiziramo geofizikalne anomalije – razlike. Najbolj razširjen način prikazovanja rezultatov je s t. i. časovnimi prerezi (time slices), ki pomenijo časovne reze serije vzporednih in praviloma enako oddaljenih radarskih profilov. Priporočljiva razdalja med vzporednimi profili je 0,5 m, izjemoma, kjer terenske okoliščine tega ne dopuščajo, pa 1 m. Rezultat časovnih rezov je diagram enakih amplitud odbojev v istem časovnem območju povratnih valov (Mušič, 2009).

Pri georadarski raziskavi nas poleg ločljivosti oziroma natančnosti posnetka, od katere je odvisna velikost objektov, ki jih še lahko zaznamo, zanima tudi največja efektivna globina dosega radarskih valov. Slednja je funkcija frekvence radarskih valov in fizikalnih lastnosti materiala, skozi katerega se širijo. Te so določene z dielektričnostjo, konduktivnostjo in magnetno permeabilnostjo. Dielektrični materiali dopuščajo prehod večine elektromagnetne energije brez posebnih izgub. Višja, kot je električna konduktivnost materiala, nižja je njegova dielektrična konstanta (ϵ). Največjo globino bomo torej dosegli v primeru, ko sta dielektrična konstanta in električna konduktivnost nizki (prav tam).

Ob tem je treba opozoriti na dejstvo, da pogosto ne moremo pričakovati povsem enakih hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja na celotni površini obravnavanega območja, še posebej ne, če gre za veliko površino. Na hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja namreč močno vpliva vlažnost terena, ki se spreminja zaradi spremenljive geološke sestave tal (Mušič, 2009).

Georadar je soočen s podobnimi težavami kot druge geofizikalne metode. Rezultati meritev so lahko večpomenski in je tako pri interpretaciji potrebna izkušnost geotehnika in poznavanje merilne tehnike. Meritve tudi niso merodajne oziroma so rezultati popačeni, v kolikor so na obravnavanem območju podzemni električni vodi, vodovodne cevi in razne podzemne inštalacije, ki niso predmet preiskav (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

5.3 Primeri georadarskih preiskav

Georadarska metoda se vse bolj uveljavlja, saj je sama metoda dokaj neobčutljiva na zunanje vplive, zato jo je mogoče uporabljati v različnih delovnih pogojih. Predvsem je primerna na težko dostopnih, prostorsko omejenih prostorih (urbana okolja), kjer so lahko druge metode raziskav terena občutljivejše na zunanje motnje (Živanović, 2019).

Značilnosti oziroma prednosti georadarske metode so:

- nedestruktivnost; vse meritve se izvajajo brez posega v preiskovano kamnino/zemljino, tako da ne povzroča oslavljenja ali poškodovanja materiala;
- meritve so »in situ«; izvajajo se na intaktnih snoveh v njihovem naravnem stanju, tako da posredujejo dejanske geofizikalne merske parametre;
- zveznost zajemanja podatkov; merski podatki so dvodimenzionalni časovni profili poljubne dolžine, ki se z obdelavo pretvorijo v dvodimenzionalne globinske sekcije;
- neomejen pristop in ponovljivost meritev, saj je možno meritve izvajati večkrat na istem območju in jih ponoviti z isto merilno opremo, upoštevajoč enake vhodne merske parametre;
- primerjava dobljenih podatkov, izmerjenih na istih merskih mestih, in njihova realna slika; časovno ponavljanje meritev dopušča opazovanje sprememb lastnosti v opazovanem materialu ter njihovo spreminjanje v času;
- spreminjanje elektromagnetnih parametrov v istem mediju nam podaja položaje razpok, sistem razpok ali večjih praznin. V nekoherentnih zemljinah (prod, pesek, melj) je možno natančno ugotoviti nivo oziroma podtalne vode;

- z merjenjem večjega števila vzporednih profilov je možno podatke obravnavati in prikazati kot tridimenzionalne, ki so bolj pregledni (Živanović, 2019).

Pri načrtovanju georadarskih raziskav obravnavanega območja moramo biti pozorni na:

- tipe zemljin/kamnin,
- globino posameznih plasnic zemljin/kamnin,
- fizikalno sestavo zemljin/kamnin,
- vrsto kamnin,
- možno prisotnost kovinskih teles,
- možnost laboratorijskih preiskav,
- topografijo terena,
- vlažnost zemljine,
- pogoje na terenu, ki lahko vplivajo na meritve,
- tip vegetacije (prav tam).

V Sloveniji se z izvajanjem georadarskih meritev ukvarja gradbeni inštitut ZRMK iz Ljubljane, predvsem njihov center za geotehniko in geologijo, ki ima potrebno opremo za izvedbo terenskih meritev in opremo za tolmačenje dobljenih rezultatov na osnovi izrisa georadarskih profilov. Zaslediti je, da so izvajali terenske preiskave predvsem za:

- odkrivanje lokacij, globin, orientacij, velikosti in oblik podzemnih kovinskih, betonskih ali plastičnih cevovodov, napeljav ter druge infrastrukture,
- odkrivanje najrazličnejših napeljav v objektih,
- določevanje oblik in globin temeljev in debelin temeljnih plošč,
- določanje kakovosti injektiranja objektov in določanjem morebitnih praznin v stenah,
- ugotavljanje poškodb cestišč,
- preiskave betonov in iskanjem armature,
- odkrivanje praznin v kamninah,
- raziskavo kraških oblik,
- določanje debeline ledu in morfologije kamninske podlage pod ledom,
- določanje prelomov, razpok in zapolnitev razpok v kamninah,
- odkrivanje najrazličnejših arheoloških ostalin,
- odkrivanje gladine podzemne vode ter
- širjenje onesnaževal v tleh (Komel & Pavlič, 2019).

Ker pri pripravi diplomskega dela nismo zasledili uporabe georadarskih meritev v namene predhodnih preiskav terena, se nam je ponudila priložnost, da v sklopu izvedbe nove pilotne stene (oporni zid desno) na postaji Maribor in na osnovi spremljave popisa izkopov pilotov naredimo primerjavo s posnetkom terena z georadarsko metodo – GPR, s katero smo želeli doseči globino kompaktne zemljine/hribine.

6 UPORABA GEORADARJA GPR

6.1 *Postopek izvajanja dveh izbranih preiskav terena*

Za primerjalno in stroškovno analizo smo izbrali dva postopka preiskav obravnavanega območja, in sicer smo povzeli podatke tekoče spremljave izkopov s strojno vrtalno garnituro (izvedba pilotne stene) in podatke izvedenih sondažnih izkopov v območju tira 2 ter le-te primerjali, tolmačili in vrednotili z rezultati georadarskih terenskih meritev z georadarjem GPR.

Kot je bilo omenjeno zgoraj, se praktični del diplomskega dela nanaša na preiskave terena v območju nove pilotne stene (oporni zid desno), ki je bila izvedena ob nadgradnji progovnega odseka železniške proge Maribor–Šentilj–državna meja, in sicer v km 594+580 do km 595+034 (po osi železnice), na odseku postaje Maribor (gradbena situacija prikazana v poglavju 2).

V nadaljevanju podajamo opis dveh preiskav, popis potrebne opreme za izvedbo, način in postopek izvedbe ter opremo za nadaljnjo obravnavo dobljenih podatkov, na osnovi katerih smo lahko v nadaljevanju podali primerjalno in stroškovno analizo.

6.1.1 *Sondažni izkop s strojno vrtalno garnituro*

Namen sondiranja je, da se preišče sestav tal, določi globino podtalne vode in odvzame vzorce za laboratorijske preiskave (Žlender, Vrecl, & Dolinar, Osnove temeljenja, 2013).

Kot že zapisano, se vrtanje oziroma sondiranje lahko izvaja z ročno ali strojno vrtalno garnituro.

Ročna vrtalna garnitura je zaradi nizke lastne teže, okretnosti in ekonomičnosti ter hitrosti dela, je zelo priročna za preiskave zgornjih slojev, nekje do globine 4 m. Ima tudi svoje omejitve, in sicer so otežena dela z njo v visokoplastičnih glinenih tleh, mastnih glinah in zelo grobem prodnatem materialu. Količina materiala, ki ga dobimo s to preiskavo, je zelo majhna in ga lahko uporabimo za vizualno klasifikacijo, vsebnost naravne vlage in v dobrozrnatih materialih tudi za granulometrijsko zrnastostno sestavo oziroma za določitev Atterbergovih meja plastičnosti (Stojadinović, 1984).

Strojna vrtalna garnitura se uporablja pri vrtanju do večjih globin in v težjih zemljinah (kamninah) oziroma razmočenih glinenih tleh. Takšne garniture imajo v primerjavi z ročnimi več strojne, predvsem hidravlične opreme, tako da so ročna opravila skoraj nepotrebna. Lahko so samohodne (na gosenicah) ali pa jih premikamo s tovornjaki. Poznamo več tipov garnitur,

ki se razlikujejo po načinih vrtanja, med drugim sondažna garnitura tipa "Benotto", udarna sondažna garnitura ali rotacijska sondažna garnitura (Stojadinović, 1984).



Slika 9: Primer vrtalne garniture

Vir: (<https://www.geodrill.si/images/02-Galerija/1856EF64-3AF5-40E1-ABD3-4EDD2F3F8A86-COLLAGE.jpg>)

Vrtanje se lahko izvaja v več smereh. Poteka postopno, ker je treba jedra zemljin sproti izvlačiti in sortirati v naprej pripravljene zaboje. Dolžina posameznih odsekov vrtanja je odvisna od vrste zemljin in namena vrtanja. Pri geotehničnih raziskavah so te dolžine največ 1m v vezljivih (gline) in 2 m v nevezljivih zemljinah (prodi, peski). Kadar obstaja nevarnost zaruševanja (nevezljive zemljine) ali stiskanja (razmočene vezljive zemljine), je potrebno vrtino sproti oblagati s jeklenimi cevmi, katerih premer je večji od premera vrtine (Žlender, Vrecl, & Dolinar, Osnove temeljenja, 2013).

Vrtanje poteka v zemljinah praviloma brez vode "na suho", v hribinah pa je treba v vrtino dovajati vodo za hlajenje vrtalne opreme (krone). Potek in pogoji vrtanja se za vsako

posamezno vrtino vpišejo v vrtalni obrazec, ki mora vsebovati naslednje podatke (naročnik del, oznaka vrtnice, končna globina, sestav tal v posameznih globinah, pojav podtalne vode spremljajoče raziskave v vrtini, vrtalno orodje, način vrtanja, imena izvajalcev, datum začetka in končanja del, vremenske razmere, različne popombe) (Žlender, Vrecl, & Dolinar, Osnove temeljenja, 2013).

6.1.2 Georadarska metoda – GPR

Georadarska metoda temelji na meritvah časa potovanja visoko frekvenčnih elektromagnetnih valov med oddajno anteno in povratnimi valovi od mejnih ploskev ter sprejemno anteno. Del elektromagnetne energije se namreč na meji snovi z različno dielektričnostjo odbije nazaj, preostali del elektromagnetnega vala pa potuje naprej. Večja, kot je dielektričnost površinske snovi, manjša je hitrost elektromagnetnega valovanja in ožji je snop eliptičnega stožca. Le-ta se širi počasneje, če si v globino sledijo plasti z vedno večjo dielektričnostjo. Z merjenjem dielektrične konstante in s poznavanjem prave hitrosti elektromagnetnega valovanja skozi snov čase valovanja pretvorimo v globino, ki nam na posnetku georadarskih profilov prikažejo debeline plasti (Mušič, 2009).

V sodelovanju z zunanjim partnerjem Gradbenim inštitutom ZRMK d. o. o. smo na terenu obravnavanega področja uporabljali zajemno enoto GSSI-SIR-3000 s sledečimi nastavitvami.

Preglednica 8: Terenske nastavitve oddajno-sprejemne antene

centralna frekvenca uporabljene antene	270 MHz
doseg v globino [m]	do 4,0 m
scan/sec	100
scan/meter	50
Samples (vzorci zajema)	512
način zajema	kolo
št. ojačitvenih (gain) točk	3
hitrost EMV (elektromagnetno valovanje)	0,1 m/nsec
dielektrična konstanta *	9,0

*Dielektričnost: snovna konstanta, ki opisuje razmerje gostote in jakosti električnega polja in se na terenu določi na osnovi materiala

Vir: (Gradbeni inštitut ZRMK d. o. o., 2019)

Hitrost elektromagnetnega valovanja je odvisna od dielektričnih lastnosti in prevodnosti zemljin oziroma od njihove dielektrične konstante in upornosti. Dielektrična konstanta je

odvisna od temperature in frekvence oddajne antene, kar pogojuje izbor antene. Na električno prevodnost oziroma upornost kamnin prav tako vplivajo poroznost, prevodnost porne tekočine, stopnja nasičenosti kamnine, oblika diskontinuitet oziroma razpok v hribini, temperatura in prisotnost mineralov v koherentnih zemljinah (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).



Slika 10: Oddajno sprejemna antena GPR

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Za terenske preiskave z georadarjem se preko oddajne antene oddaja v zemljo zelo kratek impulz EM (elektromagnetnega) valovanja z visoko frekvenco (najpogosteje med 10 in 1000 MHz). Val potuje skozi pod površje in se na mejnih ploskvah s kontrastnimi dielektričnostmi odbija, lomi in razprši. Koristni signal za georadar predstavlja samo odbito valovanje, ki ga registriramo s sprejemno anteno na površini. Mejne ploskve v geološkem jeziku pomenijo meje med različnimi kamninami ali anomalije, kot je na primer kraška jama ali podzemna instalacija. Z antenama se premikamo po profilu in tako spremljamo odboje v lateralni smeri. Merimo čas potovanja signala od oddajne do sprejemne antene. V tem času signal pravzaprav prepotuje dvakratno pot do anomalije, zato se na radargramih (to je zapis georadarskega snemanja) na abscisi beleži položaj anten, na ordinati pa dvojni čas potovanja signala do anomalij (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Merilni georadarski sistem sestavljajo krmilno-procesna enota, ki tudi generira EM-signal, enota za shranjevanje podatkov (običajni osebni računalnik) ter oddajna in sprejemna antena, ki sta lahko fizično dve ločeni enoti, lahko pa sta vgrajeni v eno enoto. Kakršenkoli je že dizajn

merilne opreme, se priporoča uporaba anten, ki oddajajo usmerjeno EM-valovanje. Vpliv okoliških motenj je tako bistveno zmanjšan. Izvajanje preiskav GPR je omejeno na bližino objektov posebnega pomena (npr. letališča, varnostno-obrambni objekti, astronomske postaje, lokacije zemeljskih radijskih, radarskih in mikrovalovnih oddajnikov idr.) (Ocepek, Škrabl, Jerman, & Car, 2018).

Glede na vrsto problema, ki ga rešujemo, izberemo eno ali več oddajno sprejemnih anten z določenimi centralnimi frekvencami. Izbor je odvisen od zahtevane preiskovane globine in želene ločljivosti, običajno pa je to kompromis. V praksi to pomeni, da bomo z antenskim sistemom npr. 250 MHz dosegli večje preiskovalne globine kot s 500 MHz sistemom, vendar je ločljivost praviloma večja pri antenah z višjo frekvenco. Na ločljivost poleg antenskega sistema vpliva tudi dielektričnost okolice oziroma snovi. Tako je pri dielektričnosti $\epsilon = 9$ ob uporabi 50 MHz antene ločljivost 1 m, s 100 MHz anteno je ločljivost 0,5 m, pri 200 MHz anteni pa 0,25 m. Gostoto vzorčevanja in druge snemalne parametre prilagajamo zahtevnosti problema. Poznamo različne snemalne tehnike, in sicer refleksijsko profiliranje, širokokotno refleksijsko in refrakcijsko snemanje (poseben način je snemanje s skupno sredinsko točko) ter tomografsko tehniko, ki jo uporabljamo v rovih, vrtinah ali za preiskavo geotehničnih objektov, npr. betonskih stebrov (prav tam).

Merske podatke v procesu obdelave najprej očistimo nezaželenih vplivov, nato pa interpretiramo. Na podlagi hitrosti prevedemo dvojni čas v globino, reflekse pa opredelimo po tipu anomalije (stik dveh plasti, razpoka, kaverna, žep z glino, armatura ipd.). Končni rezultat je 2D ali 3D prikaz anomalij (odvisno od načina zajema podatkov in obsega meritev), ki je razumljiv uporabniku (prav tam).

Pred začetkom terenskih meritev smo izvedli obvezno kalibracijo opreme, s katero zagotovimo točno dolžino posnetega območja glede na obrate vozička sprejemne antene. Na delu trase predvidenem za meritve se s tračnim metrov označi dolžina 15 m, ki jo nato dvakrat prevozimo s vozičkom oddajno-sprejemne antene ter pri tem beležimo obrate kolesa. Vrednosti se nato izenačijo s položenim metrom (slika 11).



Slika 11: Kalibracija oddajno sprejemne antene

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Kot je zgoraj opisano, smo georadarsko meritev izvajali po klasični odbojni merilni tehniki, kjer sta oddajna in sprejemna antena v neposredni bližini (v eni enoti). Antena ob premikanju po površini tal ali preko katerega drugega materiala, ki ga raziskujemo, odda in sprejema elektromagnetne (EM) valove.



Slika 12: Posnetek terena z oddajno sprejemno anteno

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Na ta način iščemo anomalije (spremembe dielektričnosti med posameznimi plastmi) pri omejenem globinskem dosegu in v območju znane ločljivosti. Geotehnik na osnovi poznavanja terena in lastnih izkušenj določi optimalno sestavljenost naprave, ki bi zagotavljala največji globinski doseg pri največji možni ločljivosti. Da dobimo uporabne podatke odbojev, moramo najprej razumeti in določiti optimalno ločljivosti, kar v praksi pomeni: kako daleč se lahko oddaljimo od dveh točkovnih zaznav, ki sta medsebojno oddaljeni in jih še vedno vidimo oziroma zaznamo. Ločljivost je obratno sorazmerna valovni dolžini in prenosorazmerna frekvenci. Pri georadarskih meritvah je spodnja meja ločljivosti enaka najmanjši debelini litološke plasti, za katero še lahko razločimo zgornjo in spodnjo mejo, kar v praksi pomeni blizu $1/4$ valovne dolžine. V merskem smislu je treba ločljivost določiti z ustreznim razmerjem glede na dolžino signala in širino frekvenčnega spektra. Krajšanje dolžine signala namreč povečuje širino frekvenčnega spektra, kar je v praksi nezaželeno, z zviševanjem frekvence pa povečamo ločljivost sistema. Ugotovljeno je, da se je bolje zadovoljiti z nekoliko manjšo ločljivostjo na račun večjega dosega (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

Podatki, ki so vidni na zaslonu geotehnika med terenskim meritvami, nam nudijo le okvirno informacijo o dejanskem stanju plasti na terenu. Vse terensko zbrane podatke je treba dodatno obdelati in s tem doseči jasno in razumljivo sliko struktur pod površjem. Terensko posnete georadarske profile smo obdelali (uporabili filtre) z računalniškim programom RADAN 7 ameriškega proizvajalca GSSI z instrumentom serije SIR SYSTEM DC-3000/1100. Pri kabinetni obdelavi je zunanji izvajalec vsak georadarski profil obravnaval kot zaključeno enoto in za vse profile uporabil enak vrstni red filtrov. Da pridobimo uporabne podatke iz sprejemne antene ter jih točno definiramo, se po navodilih proizvajalca opreme izvede natančen vrstni red posameznih filtrov:

- popravek pozicije (umerjanje razdalj – časovne intervale pretvori v intervale razdalje),
- odstranitev ozadja,
- IIR (neskončni impulzni odziv),
- dekonvolucija ali zglajevanje (iz zajete slike vzorca izločimo vpliv prenosne naprave),
- ojačitev signala (ojačitev šibkejših signalov, da postanejo vidni),
- Kirchoffova migracija (dvodimenzionalni proces, ki izboljša ločljivost).

6.3 Analiza dobljenih rezultatov na individualnem gradbenem projektu

Primerjalno in stroškovno analizo podajamo na osnovi:

- rezultatov predhodnih preiskav, ki jih je Geoinženiring d. o. o. izvajal od julija in avgusta 2016 (sondažni strojni razkop, sondažne vrtine, in-situ geotehnične, geomehanske in hidrogeološke raziskave ter laboratorijske raziskave),
- popisa sondažnih izkopov v območju tira 2 za ugotovitev sestave obstoječega spodnjega ustroja,
- spremljave izkopov pilotov z vrtalno garnituro s popisom izkopa (rojstni listi pilotov) pilotne stene (oporni zid desno),
- rezultatov izvedbe georadarskih meritev v območju pilotne stene in tira 2 v km 594 + 580 do km 595 + 034,
- kalkulacije cene podjetja za uvedbo nove storitve,
- predračuna izvajalca predhodnih preiskav terena z vrtalno garnituro.

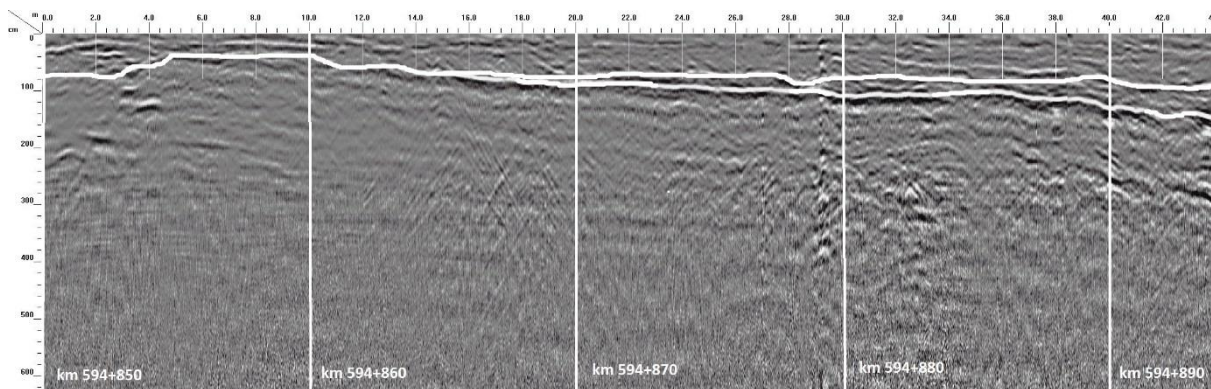
6.3.1 Raziskave terena na območju pilotne stene

Za izvedbo primerjalne analize med dvema izbranima preiskavami smo najprej izvedli georadarski posnetek delovnega platoja, ki ga je izvajalec izvedel s slojem obstoječega tolčenca, pomešanega z glinenim prodrom, in na katerem so se kasneje izvajali izkopi pilotov s sondažno vrtalno garnituro. Po navodilu geomehanske kontrole na gradbišču se je delovni plato izvedel v dveh plasteh v debelini vsaj 0,8 m.

Da bi si zagotovili podrobnejše in natančnejše podatke iz večjih globin smo uporabljali 200 Mhz oddajno-sprejemno anteno. Izbor je pogojen z želeno preiskovano globino v čim boljši ločljivosti, običajno pa je določena s strani geotehnika, ki izhaja iz svojih terenskih izkušenj.

Zastavili smo si cilj, da dosežemo globino kompaktne zemljine (sivega laporja), ki podaja osnovo za vpetost pilotov opornega zida desno na obravnavanem območju.

Na abscisi je kotirana dolžina terenskega posnetka v metrih, na ordinati pa globina. Orientacija oziroma območje spodaj navedenih georadarskih profilov je prikazano v gradbeni situaciji v poglavju 2.



Slika 13: Georadarski profil (delovni plato) v km 594 + 850 do 594 + 890 (P52 do P53)

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Z interpretacijo dobljenega posnetka georadarskega profila lahko v prvi vrsti ločimo debelino novo zgrajene plasti, tj. delovnega platoja, ki je v povprečju debelejša od zahtevane. V območju od km 594 + 890 do km 594 + 866 lahko rečemo, da je tudi vgrajevana v dveh plasteh. Skupaj z geotehnikom smo nato želeli določiti tudi naslednje plasti klasificiranih zemljin glede na poročila tekoče spremljave izkopov pilotov na tem odseku (rojstni listi pilotov od P107 do P121 so v prilogi), vendar smo že na terenskem monitorju opazili, da nam odboje elektromagnetnega valovanja na globini pod tremi metri povsem zaduši.

Preglednica 9: Povzetek klasifikacije izkopov pilotov pilotne stene

Oznaka pilota	Lokacija pilota po stacionaži	Globina plasti (m)	Opis zemljin oziroma raščeni tal (klasifikacija ISO (AC))
P121	Km 594+890	0,00-1,00 1,00-5,00 5,00-11,96	Tolčenec (U. N.), temno sive barve. Peščena glina do peščeni melj (CL–ML), srednje gnetnega kons. razreda, sive do sivo zelene barve. Siv meljast do peščen lapor.
P118	Km 594+885,5	0,00-1,30 1,30-3,70 3,70-4,70 4,70-11,93	Tolčenec, drobljenec, glineni prod (U. N.), sive barve. Peščena glina (CL), rjave barve. Peščena glina (CL), sivo zelene barve. Meljast do peščen lapor, sive barve.
P116	Km 594+882,5	0,00-1,20 1,20-3,80	Tolčenec, glineni prod (U. N.). Peščena glina (CL), rjave barve.

		3,80-5,00	Peščena glina (CL), sivo zelene barve.
		5,00-11,92	Siv meljast do peščen lapor.
P113	Km 594+878	0,00-1,00	Tolčenec, glineni prod (U. N.).
		1,00-3,80	Peščena glina (CL), rjave barve.
		3,80-5,00	Peščena glina (CL), sivo zelene barve.
		5,00-11,95	Siv meljast do peščen lapor.
P111	Km 594+878	0,00-1,00	Tolčenec, glineni prod (U. N.).
		1,00-3,80	Peščena glina (CL), rjave barve.
		3,80-5,00	Peščena glina (CL), sivo zelene barve.
		5,00-11,95	Siv meljast do peščen lapor.
P109	Km 594+872	0,00-1,00	Tolčenec, glineni prod (U. N.).
		1,00-3,80	Peščena glina (CL), rjave barve.
		3,80-5,00	Peščena glina (CL), sivo zelene barve.
		5,00-11,87	Siv meljast do peščen lapor.
P107	Km 594+869	0,00-1,00	Tolčenec, glineni prod (U. N.).
		1,00-3,80	Peščena glina (CL), rjave barve.
		3,80-5,00	Peščena glina (CL), sivo zelene barve.
		5,00-11,91	Siv meljast do peščen lapor.

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Iz posnetka georadarskega profila bi zato pod novozgrajenim delovnim platojem zelo težko določili posamezne plasti raščenih zemljin, ki smo jih klasificirali ter zabeležili v rojstnih listih pilotov, še manj pa določili globino in stik kompaktne zemljine (sivega laporja). V pogovoru z geotehnikom predvidevamo, da je razlog nedoseganja večjih globin dušenje elektromagnetnega valovanja, ki ga povzroča visoka naravna vlaga vrhnjih plasti. Pri koherentnih zemljinah je prevodnost namreč zelo odvisna od sestave zemljin. Bolj zrnata je sestava, manjša je poroznost in posledično nižja prevodnost. Delež glinenih delcev zelo vpliva na prevodnost, in sicer če je ta zelo visok (visokoplastične gline), je prevodnost višja (Brezigar, Tomšič, & Stern, 1995).

Na terenu smo tako ob zaznavi motenj še enkrat zamenjali oddajno-sprejemno anteno, vendar nismo dosegli želenega cilja. Na ta problem smo bili opozorjeni že pred začetkom terenske preiskave, vendar smo se želeli prepričati, če so v dobro prevodnih materialih, kot so zelo vlažne gline ali melji, odboji elektromagnetnega valovanja tako intenzivni (velike amplitude), da georadarska metoda odpove oziroma ni primerna.

Ob izkopu pilota (pilot št. 116) smo zato na obravnavanem območju odvzeli vzorec zgornjih plasti zemljine, s katerim smo zemljino laboratorijsko klasificirali (glina s peščeno zemljino (cl (CL)), zelo lahkega konsistenčnega razreda in določili delež naravne vlage materiala ($w = 34,22\%$) (slika 14).

OB 09.08/11-2

POVZETEK LABORATORIJSKIH PREISKAV Z OCENO PRIMERNOSTI VZORCA					
1.0 PODATKI O VZORCU:		Št.vzorca: 19-040		D.N.: 4339	
NAROČNIK:		Pomgrad GNG d.o.o.			
OBJEKT:		Oporni zid - desno (ŽP - MB)			
MESTO ODVZEMA:		Pilot P116	GLOBINA:		KT-2,50 m
IZVOR MATERIALA:		Raščen teren	DATUM ODVZEMA:		6.3.2019
VZOREC ODVZEL:		Davor Grgec	VRSTA MATERIALA:		Glina s peščeno zemljino
NAMEN UPORABE:		TTMU			
2.0 PODATKI O REZULTATIH LABORATORIJSKIH PREISKAV:					
KLASIFIKACIJA (SIST EN ISO 14688-2)		cl (CL), zelo lahko gnet.k.st.		PREISKAL: T.T.	
NARAVNA VLAGA (SIST EN ISO 17892-1, zemljin)		34,22 %		PREISKAL: T.T.	
HUMOZNOST (SIST EN 1744-1)				PREISKAL:	
KONSISTENČNE MEJE (SIST EN 17892-12)		$W_l =$	37,56 %	$I_p =$	16,45
		$W_p =$	21,11 %	$I_c =$	0,2
PREISKAVA ZRNAVOSTI (SIST EN ISO 17892-4)		zrna pod 63 $\mu m =$		%	PREISKAL:
		zrna pod 20 $\mu m =$		%	
		$C_u = d_{60}/d_{10}$			
		$C_c = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$			
PROCTORJEV PRESKUS (SIST EN 13286-2, DIN-18127)		neorig.	$\rho_d \max. =$	Mg/m^3	PREISKAL:
			$w_{opt.} =$	%	
		korig.	$\rho_d \max. =$	Mg/m^3	
			$w''_{opt.} =$	%	
MODUL OBLIKE ZRN (SIST EN 933-4)		4/8	%	16/31,5	%
		8/16	%	31,5/45	%
		SI	%		
METILEN MODRO (SIST EN 933-9)		MB	g/kg	PREISKAL:	
3.0 OCENA PRIMERNOSTI VZORCA:		USTREZNO		DA	
Maribor : 14.3.2019					
Nosilec DN: Jože Berden		Vodja laboratorijskih preiskav: Tomo Tancer, inž. gradb.			

Slika 14: Povzetek laboratorijskih preiskav

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Glede na to, da smo terenski posnetek z georadarsko metodo obravnavanega območja (delovni plato) morali izvesti pred začetkom izkopov za pilote, nismo mogli določiti boljših pogojev poteka meritev.

6.3.2 Raziskave zgornjega ustroja na območju tira

Ker nam v območju pilotne stene ni uspelo pridobiti želenih podatkov geološke sestave, smo se skupaj z geotehnikom gradbenega inštituta ZRMK še odločili, da na območju tira 2 izvedemo georadarski posnetek sestave obstoječega spodnjega ustroja železniške proge ter na ta način poskušamo pridobiti uporabne podatke za potrditev tez, navedenih v uvodu tega diplomskega dela.

Po pregledu dokumentacije in geološko-geomehanskega poročila, podanega s strani Geoinženiringa, smo na lokaciji ugotovili, da njihove predhodne preiskave niso zajele točno našega obravnavanega (posnetega) območja, zato smo v območju posnetka terena z georadarjem naknadno izvedli še tri sondažne razkope (točne lokacije prikazane v gradbeni situaciji v poglavju 2), iz katerih smo določili geološko sestavo z vizualno klasifikacijo po USCS klasifikaciji ter debeline posameznih slojev.

Preglednica 10: Popis sondažnih razkopov

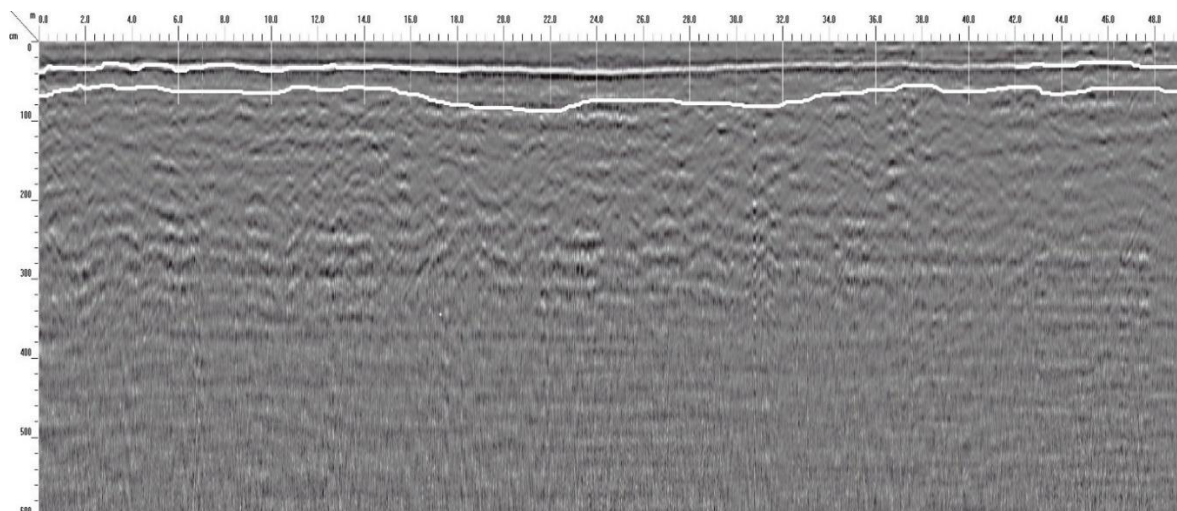
Oznaka jaška	Lokacija jaška po stacionaži	Globina plasti (m)	Opis materiala oziroma rašččenih tal
SJ-1	Km 594+926; tir 2	0,00–0,20	Tolčenec GP, temno sive barve.
		0,20–0,45	Tolčenec z malo peščeno meljnih frakcij GP, temno sive rjave barve.
		0,45–0,70	Peščen do zameljen prod GP–GM, rjavo sive barve.
		0,70–0,90	Peščeno meljna glina CL–ML težko gn. Kons., temno sive barve.
SJ-2	Km 594+805; tir 2	0,00–0,25	Tolčenec GP, temno sive barve.
		0,25–0,35	Tolčenec z malo peščeno meljnih frakcij GP, temno sive rjave barve.
		0,35–0,55	Peščen do zameljen prod GP–GM, rjavo sive barve.
		0,55–0,75	Grušč in prod GP s peščeno meljnimi frakcijami.
		0,75–1,00	Peščeno meljna glina CL–ML težko gn. kons., temno sive barve.

SJ-3	Km 594+770; tir 2	0,00–0,20	Tolčenec GP, temno sive barve.
		0,20–0,50	Tolčenec s peščeno meljnimi frakcijami GP, rjavo sive barve.
		0,50–0,70	Zameljen prod GP–GM, svetlo rjavo sive barve.
		0,70–0,90	Grušč in prod GP s peščeno meljnimi frakcijami.
		0,90–1,00	Peščena glina CL težko gn. kons., temno sive barve.

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

V nadaljevanju podajamo interpretacijo rezultatov posnetkov geotehnika gradbenega inštituta na osnovi obdelanih georadarskih profilov, ki nam prikazujejo posnetke sprejemnih anten naravnega, obstoječega stanja. Pridobljeni so podatki o geofizikalnih lastnostih, s katerimi smo si pomagali pri končni razlagi slojev in njihovih debelin. Hitrost elektromagnetnega valovanja skozi posamezni sloj snovi je odvisna od električne prevodnosti, ki je specifična za posamezne vrste materiala. V odvisnosti od teh lastnosti smo na terenu izbrali oddajno-sprejemno anteno 270 Mhz, saj smo na osnovi sondažnih izkopov vedeli, kakšen bo globinski doseg (max. 1,0 m).

Primerjali smo zgoraj navedene podatke sondažnih razkopov in prišli do naslednjih ugotovitev.

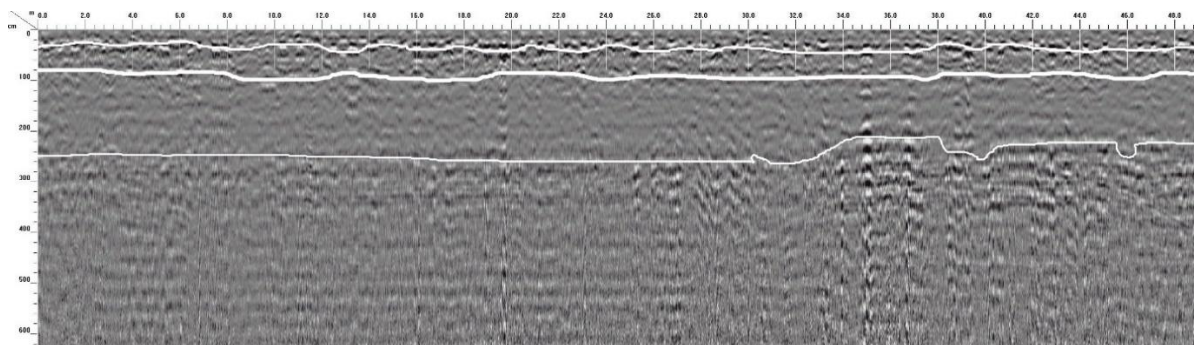


Slika 15: Georadarski profil v km 594 + 812 do 594 + 736 (GP od 1 do 2)

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Če primerjamo posamezne sloje sondažnih izkopov pod št. SJ-2 in SJ-3 in zgoraj prikazan georadarski profil v obravnavani stacionaži (lokacija prikazana v gradbeni situaciji v poglavju 2) vidimo, da so vidni posamezni sloji, tj. sloj zgornjega ustroja proge, tolčenca kot tudi spodnji ustroj, ki ga sestavlja prodno peščeno meljna zemljina. Globine sovpadajo z ugotovitvami

debelin plasti, določenih s sondažnimi izkopi (na sliki poudarjena bela črta). Samo na podlagi georadarskega posnetka je nemogoče klasificirati te sloje.



Slika 16: Georadarski profil v km 594 + 930 do 594 + 862 (GP od 3 do 4)

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Z interpretacijo zgornje slike georadarskega profila lahko prav tako določimo število slojev spodnjega ustroja železniške proge tira 2 na obravnavanem območju kot tudi debeline posameznih slojev. Te sovpadajo z ugotovitvami sondažnega izkopa SJ-1, izvedenega na tem območju. Po georadarskem profilu je na globini cca. 2,5 m pod površjem zaslediti drugačne odboje elektromagnetnega valovanja, kar bi lahko interpretirali kot pojav sloja zemljine z drugimi geofizikalnimi lastnostmi. Za točno klasifikacijo tega sloja bi bilo treba sondažne izkope izvesti do te globine.

6.4 Ocena stroškov uvedbe nove storitve (prednosti/slabosti)

Za ugotovitev smotrnosti uvedbe nove storitve za mikropodjetje, kot je podjetje, v katerem smo zaposleni, smo na osnovi stroškovne analize in s tem povezanih stroškov v nadaljevanju podali oceno stroškov podjetja, kiso izraženi s stroški delovne sile, osnovnih sredstev, materiala, zunanjih storitev in vzdrževanje opreme kot tudi režijski stroški podjetja na posameznem projektu.

Da podjetje posluje uspešno, je nujno, da vse stroške obvladujemo na nivoju projekta.

Najpomembnejša je delitev stroškov na stalne (fiksne) in spremenljive (variabilne).

Za stalne stroške je značilno, da niso odvisni od spremembe obsega storitev podjetja in se pojavljajo tudi, ko podjetje posamezno storitev ne izvaja.

Za spremenljive stroške je značilno, da se spreminjajo glede na obseg storitev. Spremenljive stroške enostavno določimo s pomočjo kalkulacije, s katero lahko rečemo, da so direktno

pripisani posamezni storitvi. Ti stroški so sorazmerni količini opravljenega dela in obratno sorazmerni za to delo porabljenemu času.

Spremenljivi stroški vsebujejo:

- stroške amortizacije opreme,
- bruto osebne dohodke (predvideni stroški za delo obravnavane storitve),
- stroške pripravljalnih del (morebitni strošek potrebnih dovoljenj, certifikati, kalibracije opreme),
- terenske dodatke (dodatki delavcem za terensko delo, prevozi).

V diplomskem delu smo se tako osredotočili samo na direktne stroške uvedbe nove storitve, in sicer nas zanima, ali je nakup georadarske opreme GPR ekonomsko upravičen in bi lahko na daljši rok bila dodana vrednost poslovanja mikropodjetja.

Za sprejemanje poslovnih odločitev uvedbe nove storitve je pomembno, da so znani celotni stroški nabave potrebne opreme oziroma reorganizacije delovne sile na podjetju, kar zahteva razčlenitev stroškov na neposredne in posredne.

Novo stroškovno mesto predstavlja učinkovito ugotavljanje uspešnosti delovanja posamezne storitve ter je kot tako prostorsko in stvarno zaokroženi del podjetja, na katerem lahko evidentiramo in spreminjamo stroške.

Tako smo v podjetju najprej določili ceno nove storitve na osnovi kalkulacije cene za uvedbo nove storitve in ponudbenega predračuna, poslanega od priznanega proizvajalca georadarske opreme. Formiranje cene se nanaša na različne postavke izvedbe storitve, ki so detajlno razčlenjene in določene na osnovi programa naročnika.

Preglednica 11: Kalkulacija cene nove storitve GPR

KALKULACIJA ZA FORMIRANJE CENE NOVIH STORITEV						
NAZIV STORITVE:		GEORADARSKA METODA - GPR				
OPIS POSTOPKA:		1)Geotehnik-inženir na terenu izvede posnetek - meritev terena z oddajno - sprejemno anteno in odvzemom vzorcev				
		2)Inženir podatke vnese in obdela z računalniškim programom ter izdela poročilo.				
		CENA SE POSTAVI ZA 8 ur ali 1 delovni dan dela z GPR in izdaja poročila.				
	OPREMA Z AMORTIZACIJO/MERITEV			ČAS stor./h V €		SKUPAJ
POSTOPEK	oprema-EUR	amort./št.preis.	amort./1preis.	čas stor./h	EUR	skupaj-EUR
Geološka geotehnična spremljava z odvzemi vzorcev in popisi- FOTOAPARAT, RAČUNALNIK	1000	500	2	4,00	45,0	182,00
Izvedba georadarskih meritev GPR - GEORADAR	21000	500	42	8,00	45,0	402,00
Čakanje - samo čas	0			0,15	45,0	6,75
Računalniška obdelava georadarskih profilov- PROGRAM ZA GPR	2400	500	4,8	4,00	45,0	184,80
Izdelava skupnega poročila geofizikalnih preiskav z interpretacijo- RAČUNALNIK,OFFICE 365	1000	500	2	4,00	45,0	182,00
Režija - Tehnična obdelava - kopiranje, fotodokumentacija in podobno (IdP) - KOPIRNI STROJ	1000	500	2	4,00	45,0	182,00
		STROŠKI SKUPAJ - EUR				1139,55
		NEPREDVIDENI STROŠKI-15%				170,93
		MAKSIMALNI POPUST-25%				284,89
		KALKULATIVNA CENA				1025,60
POSTAVLJENA CENA NOVE STORITVE				TOČK	EUR	VREDNOST TOČKE
				1025,60	1025,60	1,00
DOLOČENA CENA ZA 8 UR DELA Z GPR in IZDAJA POROČILA JE				1026,00	BREZ POPUSTA	
KALKULACIJO IZDELAL:		GRGEC DAVOR		DATUM:	19.3.2019	
PREGLEDAL:				DATUM:		
POTRDIL DIREKTOR:		MARJAN TANCER		DATUM:	20.3.2019	
		VELJAVNO OD DNE:				

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Nato smo pridobili predračun izvajalca predhodnih terenskih preiskav, ki se ukvarja s klasičnimi globokimi raziskovalnimi vrtinami in primerjali različne aktivnosti in tudi ocenili kvaliteto dobljenih rezultatov preiskave, potreben čas izvedbe in seveda ceno.

Preglednica 12: Predračun izvajalca vrtalne garniture

Opis meritve	Merska enota	Število preiskav	Število točk	Skupaj točk	Vrednost preiskave
Prevoz vrtalne garniture in opreme na delovišče in nazaj	kom	1	350	350	350,00
Cevitev vrtin z obložnimi cevmi	m	20	12	240	240,00
Geotehnična spremljava in popis jeder iz vrtin	dan	1	150	150	150,00
Odvzem neporušenih – intaktnih vzorcev	kom	2	50	100	100,00
SPT preiskava	kom	6	35	210	210,00
Premiki med vrtinami	kpl	1	150	150	150,00
Vrtanje v hribinah – 4. kategorija zemljine	m	6	55	330	330,00
Vrtanje v koherentnih zemljinah – 3. kategorija zemljine	m	14	45	630	630,00
Izdelava in izris geotehničnih profilov	m	20	10	200	200,00
Geomehansko – geotehnično poročilo	poročilo	1	350	350	350,00
		Skupaj vrednost (EUR):			2710,00

Vir: (Apros d. o. o., 2019)

Po izkušnjah z izvedbo raziskav tal s klasičnim vrtanjem z globokimi raziskovalnimi vrtinami globin do približno 10 metrov globine in primerjavo v tej nalogi izvedenih terenskih meritev z pomočjo georadarske metode GPR, lahko ocenimo, da je področje, ki ga lahko obdelamo z georadarsko metodo GPR v enem delovnem dnevu večje oziroma primerljivo s področjem, ki ga z vrtalno garnituro raziščemo s dvema globokima raziskovalnima vrtinama.

Glede na prikazano cenovno primerjavo med georadarskimi meritvami in dvema globokima raziskovalnima vrtinama lahko ocenimo, da je vrednost del predhodnih preiskav terena s klasičnimi globokimi raziskovalnimi vrtinami višja za približno 100 %.

Naslednja velika prednost georadarskih meritev z GPR je časovni prihranek, saj za izvedbo dveh globokih raziskovalnih vrtin (cca. 10 m vsaka) potrebujemo po navadi dva delovna dneva

časa za terenska dela. Eden od velikih stroškov je tudi prevoz potrebne opreme na samo lokacijo.

Pri določenih preiskavah je nedestruktivnost ena od glavnih zahtev naročnika (težko dostopen teren). Prednost georadarske metode je v tem, da obravnavamo območje samo površinsko raziskujemo oziroma posnamemo, hkrati pa ne posegamo vanj in s tem ne povzročamo njegove oslabitve.

Z direktno primerjavo in razlago dobljenih rezultatov ugotavljamo, da nam podatki georadarskega posnetka terena ne podajo dovolj uporabnih in kvalitetnih podatkov geološke sestave, saj so zelo skopi in jih je težko interpretirati.

Ocenjujemo, da bi bila najboljša preiskava terena kombinacija obeh, tj. posnetka terena z georadarsko metodo GPR in izvedba vsaj dveh sondažnih izkopov s popisom materialov, iz katerih pridobimo vzorce obstoječih zemljin oziroma hribin za laboratorijske preiskave na globini, kjer je predvideno temeljenja novogradnje ter tako na osnovi rezultatov preiskav pridobimo mehanske in fizikalne lastnosti zemljin z ustrezno klasifikacijo, ki jih potrebujemo za izdelavo geološko-geotehničnega poročila o pogojih temeljenja objektov in izračuna posedkov. Treba je vedeti, da nam vse te dodatne preiskave prvotno zastavljeno ceno georadarskega posnetka terena dodatno zvišajo.

7 SKLEP

Z izbrano temo diplomskega dela smo v prvi vrsti želeli izpostaviti, kako pomembno je pred začetkom izdelave projektne dokumentacije vključiti strokovnjaka za predhodne raziskave terena novogradnje, geomehanika, ki z izdelavo geomehanskega poročila projektantu, investitorju in navsezadnje izvajalcu pomaga in poda ugotovljene lastnosti materialov v temeljnih tleh ter na ta način pripomore k popolnejši in kvalitetnejši sliki obravnavanega območja.

Na praktičnem primeru uporabe georadarske metode GRP pri predhodnih preiskavah terena ter izvedenih terenskih meritev z vsemi interpretiranimi in dobljenimi rezultati v nadaljevanju podajamo ugotovitve, na osnovi katerih smo lahko potrdili oziroma ovrgli predpostavljene teze.

Skozi uvodna poglavja smo se navezali na inženirsko geologijo, osnove spoznavanja zgradbe temeljnih tal v navezavi z geomehaniko, ki proučuje fizikalne in mehanske lastnosti kamnin in zemljin. Skozi razlago načrtovanja predhodnih raziskav terena, predstavitev laboratorijskih preiskav in interpretacijo ter vrednotenjem dobljenih rezultatov terenskih in laboratorijskih preiskav smo s posnetkom terena območja pilotne stene z georadarsko metodo (ground penetrating radar) – GPR želeli doseči in določiti globino kompaktne zemljine (sivega laporja), osnove za vpetost pilotov pilotne stene. Dobljene rezultate georadarskih profilov smo nato primerjali, interpretirali in analizirali s podatki spremljave izkopov pilotov z vrtalno garnituro s popisom izkopa (rojstnimi listi pilotov v prilogi).

Iz georadarskega posnetka profila v km 594 + 850 do 594 + 890 (delovni plato za vrtalno garnituro izkopa pilotov) vidimo, da se novozgrajeni sloj iz tolčenca lepo loči od raščenih tal pod njim. Tudi debelina sloja je primerljiva podanim zahtevam geomehanske kontrole na gradbišču, deloma tudi vidimo, kje je grajen v dveh plasteh. Ker se globlje ni dalo na terenskem monitorju tako točno ločiti slojev materialov in se je odboj elektromagnetnega valovanja po cca. 3 m globine povsem zadušil, smo zamenjali oddajno-sprejemno anteno. Ponovno smo izvedli posnetek terena, vendar nam ta ni prinesel bistveno različnih oziroma želenih podatkov – določiti globino kompaktne sloja laporja, ki se s popisa izkopa pilotov na tem območju nahaja na globini 5m.

Skupaj z geotehnikom gradbenega inštituta ZRMK smo nato analizirali in interpretirali podatke ter tako na osnovi dobljenega posnetka prišli do zaključka, da je posledica dušenja elektromagnetnih valov v globini posledica visoke naravne vlage obravnavanih vrhnjih slojev.

Lahko potrdimo, da je samo iz posnetka georadarskega profila nemogoče klasificirati posamezne sloje, lahko pa sklepamo, da se da zelo natančno določiti nivo podtalne vode.

Iz georadarskega profila v km 594 + 812 do 594 + 736 smo na osnovi pridobljenih posnetkov georadarskih profilov in zaznave drugačnih odbojev elektromagnetnega valovanja razločili vrhnje sloje ustroja železniškega tira, in sicer debelino obstoječega tolčenca in debelino spodnjega ustroja do raščenih temeljnih tal in jih primerjali z izvedenimi sondažnimi razkopi na tem območju.

Ugotavljamo, da debeline posameznih slojev posnetih z georadarsko metodo GPR sovpadajo s popisom sondažnih razkopov obravnavanega območja (območje tira 2) in da so lepo vidni posamezni sloji, tj. sloj zgornjega ustroja proge, tolčenca kot tudi spodnji ustroj, ki ga sestavlja prodno peščena meljna zemljina. Ker raščena temeljna tla sestavljajo pretežno peščeno meljne gline, visoke naravne vlažnosti, nam globlje ni uspelo dovolj dobro razločiti naslednjih slojev.

Ocenimo lahko, da nam georadarska metoda GPR lahko poda uporabne podatke novozgrajenih plasti, npr. vgradnjo tamponskega sloja spodnjega ustroja železniške proge ali na primer debelino tolčenca. Prav tako bi potrdili, da se na ta način lahko precej natančno oceni oziroma določi debelina voziščne konstrukcije povoznih površin.

Na ta način lahko potrdimo prvo zastavljeno hipotezo:

H1: »Georadar (GPR) je na zahtevnem terenu neuporaben«, saj smo iz podatkov georadarskih profilov ugotovili, da georadarska metoda na koherentnih materialih ni primerna, saj materiali, kot so zelo vlažne gline ali melji, odboje elektromagnetnega valovanja preveč zadušijo in tako ni mogoče prodreti globlje v geološko strukturo terena.

Glede na ugotovitve drugo postavljeno hipotezo ovrzemo:

H2: »Uporaba georadarja (GPR) poda kvalitetnejše oziroma popolnejše podatke preiskanega terena«, saj smo ugotovili, da so podatki georadarskega posnetka terena zelo skopi in nam ne podajo dovolj uporabnih in kvalitetnih podatkov geološke sestave, sploh pa je samo na osnovi posnetka terena nemogoče klasificirati posamezne sloje in jih na ta način uporabiti pri določitvi geotehničnih lastnosti posameznih zemljin in hribin. Dovolj dobro se ločijo plasti novozgrajenih slojev, zelo dobro je možno pridobiti uporabne podatke v prodno peščenih in kamnitih plasteh.

V vsakem primeru lahko z georadarsko metodo (GPR) ločimo različne sloje materialov, ki so nad nivojem podtalne vode oziroma visokovlažnih zemljin, za klasifikacijo materialov pa je podatke posnetka GPR treba povezati z laboratorijskimi preiskavami materialov oziroma je treba za natančno interpretacijo vseh sprememb v temeljnih tleh poznati podatke o vgrajenih materialih, če gre za novo vgrajene plasti.

Georadarska metoda ima tudi prednosti pred ostalimi geotehničnimi preiskavami terena, in sicer je to nedestruktivnost same izvedbe posnetka terena, saj z georadarjem samo raziskujemo oziroma posnamemo teren in na ta način ne posegamo vanj ter s izvedbo ne povzročamo njegove oslabitve. Prav tako se lahko z georadarjem izvede preiskava na težko dostopnem terenu in tudi prevoz potrebne opreme na samo lokacijo ni stroškovno visoka. Možno je tudi večkrat ponoviti meritve z isto mersko opremo in na ta način opazovati morebitne spremembe oziroma slabitve v času.

V uvodu postavljeno tretjo tezo:

H3: »Nakup georadarja (GPR) je v majhnem podjetju ekonomsko upravičen« potrdimo, saj smo z oceno stroškov uvedbe nove storitve in s pridobljenim predračunom izvajalca predhodnih preiskav z klasičnimi globokimi vrtinami na osnovi primerjalno-stroškovne analize dokazali, da je cena storitve preiskave terena z georadarsko metodo (GPR) bistveno cenejša.

Na podlagi analize cen smo napravili izračune posameznih postavk in jih ovrednotili tako, da smo lahko določili ceno izvedbe posnetka z GPR (za lažje vrednotenje izberem oceno vrednosti za en delovni dan), z vsemi predvidenimi stroški in vključenimi odvzemi vzorcev zemljine za laboratorijsko klasifikacijo ter izdanim poročilom georadarske metode (GPR).

Skupna vrednost storitve preiskave terena z georadarsko metodo GPR tako znaša 1026,00 € za 8-urni delovnik z vsemi vključenimi stroški.

Če to primerjamo z vrednostjo poslanega predračuna s strani izvajalca predhodnih preiskav z vrtalno garnituro za klasične globoke vrtine (2710,00 €) ugotavljamo, da je preiskava terena s posnetkom georadarske metode (GPR) cenejša za vsaj 50 %.

Vredno je dodati, da je za ustrezno klasifikacijo materialov k ceni izvedbe posnetka GPR treba dodati še ceno pripadajočih laboratorijskih preiskav odvzetih vzorcev, ki bi na vrednotenem primeru znašale približno 350,00 €. Tako cena izvedbe posnetka terena z georadarsko metodo

GPR skupaj znaša $1026,00 + 350,00 = 1376,00$ €, kar je skoraj točno 50 % cene raziskave terena z klasično vrtalno garnituro za globoke raziskovalne vrtine.

V splošnem se moramo zavedati, da nam samo posnetek terena z georadarsko metodo (GPR) še ne poda vseh potrebnih podatkov obravnavanega terena zato ocenjujemo, kot smo navedli v poglavju 6.3, da bi bila najboljša predhodna preiskava terena kombinacija posnetka terena z georadarsko metodo (GPR) in izvedba sondažnih izkopov z popisom geološke sestave in odvzemom obstoječih zemljin, iz katerih pridobimo vzorce zemljin za laboratorijske preiskave na globini, kjer je predvideno temeljenja novogradnje in katerih rezultate laboratorijskih analiz potrebujemo za izdelavo geološko-geotehničnega poročila o pogojih temeljenja objektov in izračuna posedkov.

Na ta način bi preej natančno pridobili posnetek širšega območja novogradnje in na osnovi zaznanih kritičnih mest izvedli lokalne sondažne razkope, s katerimi bi lahko natančno klasificirali geološko sestavo temeljnih tal in pridobili potrebne parametre geomehanskih in geotehničnih lastnosti zemljin in hribin.

Velja opomniti, da je ta način geološko-geotehničnih raziskav mogoč le izven območja podtalne vode ali visokoplastičnih in vlažnih zemljin.

Uporaba metode umetne inteligence in samoučenja uporabe novih tehnologij bo v prihodnosti bistveno izboljšala uporabnost georadarjev, ravno na osnovi vzporednih raziskav. Z dovolj velikim številom primerjalnih analiz se bo diagnostika in uporabnost bistveno izboljšala, podobno kot se dogaja danes na področju geodezije, medicine ...

8 VIRI IN LITERATURA

Apros d. o. o. (2001). *Delovna navodila po (SIST EN 1097-5, str.6)*. Maribor.

Apros d. o. o. (2007). *Delovna navodila po (SIST EN 13286-2)*. Maribor.

Apros d. o. o. (2014). *Delovna navodila po (SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12)*. Maribor.

Beg, D., & Pogačnik, A. (2017). *Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih*. Pridobljeno iz Inženirska zbornica Slovenije: http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/publikacije-IZS/Prirocniki_IZS/EVROKODI-prirocnik-izsek-2017-www.pdf

Brezigar, A., Tomšič, B., & Stern, J. (1995). Georadar - visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava. *Geologija*, 437–458.

Geoinženiring d. o. o. (2017). *9/2 Geološko-geomehansko poročilo; odsek proge Maribor – Pesnica do km 595 + 870*. Izvedbeni načrt, Ljubljana.

GeoMet. (2019). *Geološko-geomehansko poročilo o sestavi tal*. Pridobljeno iz GeoMet d. o. o.: <http://geomet.si/index.php/storitve/geoloske-in-geomehanske-storitve/geolosko-geomehansko-porocilo-o-sestavi-tal>

Geophysical Survey Systems, Inc. (2017). *SIR 4000 Manual*. Pridobljeno iz Geophysical Survey Systems, Inc.: <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-SIR-4000-Manual.pdf>

Gregorač, V. (2015). *Mehanika tal, zemeljska dela in temeljenje*. Podsmreka: Pipinova knjiga.

Kansky, D. (2004). *Geotehnologija: Interno gradivo*. Zaris.

Klun, M. (2014). *Temeljenje enodružinske stanovanjske hiše na labilnem pobočju pri Jeličnem vrhu*. Pridobljeno iz Repozitorij Univerze v Ljubljani: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=85940&lang=slv>

Komel, P. & Pavlič, M. U. (2019). *Uporaba georadarja v geotehniki, geologiji in gradbeništvu ob praktičnih primerih*. Pridobljeno iz Gradbeni inštitut ZRMK d. o. o.: [http://www.gi-zrmk.si/publikacije/geotehnika_in_geologija/48/uporaba_georadarja_v_geotehniki_geologiji_in_gradbenistvu_ob_practicnih_primerih/](http://www.gi-zrmk.si/publikacije/geotehnika_in_geologija/48/uporaba_georadarja_v_geotehniki_geologiji_in_gradbenistvu_ob_prakticnih_primerih/)

Logar, J. (2019). *Terenske preiskave*. Pridobljeno iz Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/TERENSKE%20PREISKAVE.pdf>

Maček, M., Smolar, J. & Petkovšek, A. (2018). Klasifikacija zemljin v inženirske namene - kako naprej? *Geologija*, 33–48.

Mušič, B. (2009). *Arheološka geofizika III. del – georadarska metoda*. Ljubljana: Filozofska fakulteta. Pridobljeno iz Filozofska fakulteta.

Oblak, R. (2006). *Načrtovanje, gradnja in spremljava zemeljskih del pri gradnji prometnic - vkopi in nasipi*. Pridobljeno iz Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=84256&lang=slv>

Ocepek, D., Škrabl, S., Jerman, J. & Car, M. (April 2018). *Priročnik za izvedbo geotehničnih preiskav*. Pridobljeno iz Inženirska zbornica aSlovenije: http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/publikacije-IZS/Prirocniki_IZS/IZS_prirocnik_MSRG_Izvedba_geotehnicnih_preiskav_www.pdf

Pravilnik o podrobnejši vsebini dokumentacije in obrazcih. (2018). *Uradni list RS, št. 36/2018 in 51/2018 popr.* Pridobljeno iz Pravno informacijski sistem: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV13306>

Projekt d. d. Nova Gorica. (2017). *3/9 Oporni zid desno od km 594 + 580 do 595 + 034*. Izvedbeni načrt št. 13505_1_3/10, Nova Gorica.

Stojadinović, R. (1984). *Mehanika tla I*. Beograd: Gradjevinski fakultet.

Šuklje, L. (1984). *Mehanika tal*. Ljubljana: Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani.

Terzaghi, K. (1936). *The Father of Geotechnical Engineering*. Pridobljeno iz Geostructures, Inc.: <https://www.geostructures.com/news-article/news-in-honor-of-fathers-day-the-father-of-geotechnical-engineering-karl-von-terzaghi/#famousquotes>

Vaughan, C. J. (1986). Ground penetrating radar surveys used in archeological investigations. *Geophysics*, 595-604.

Žitnik, D. (2008). *Gradbeniški priročnik*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.

Živanović, M. (2019). *Georadar-nedestruktivna raziskovalna metoda*. Pridobljeno iz Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2002/Zivanovic2002.pdf>

Žlender, B., & Dolinar, B. (2008). *Geologija*. Maribor: Fakulteta za gradbeništvo.

Žlender, B., Vrecl, H. & Dolinar, B. (2013). *Osnove temeljenja*. Pridobljeno iz Univerzitetna knjižnica Maribor: <https://core.ac.uk/download/pdf/67577523.pdf>

9 PRILOGE

PRILOGA 1 – rojstni listi pilotov obravnavanega območja pilotne stene