

PRIROČNIK



PRIROČNIK ZA IZVEDBO GEOTEHNIČNIH PREISKAV



PRIROČNIK ZA IZVEDBO GEOTEHNIČNIH PREISKAV

Pripravili:
dr. Dragotin Ocepek
dr. Stanislav Škrabl
Jasna Jerman
Marjeta Car

Recenzija:
dr. Evgen Dervarič
dr. Željko Vukelić

Oblikovanje:
Mirjam Pezdirc

Izdala:
Inženirska zbornica Slovenije
Jarška cesta 10/b, Ljubljana

Oblika izdaje:
Elektronska verzija, dostopno na www.izs.si

Ljubljana, april 2018



Vsebina

POGLAVJE I.

1. UVOD	5
1.1 Namen	5
1.2 Cilji	5
1.3 Razdelitev in skupni temelji povezanih strok	6
1.3.1 Gradbeništvo	7
1.3.2 Inženirska geologija	7
1.3.3 Geotehnologija in rudarstvo	7
1.4 Pomen	8
1.5 Načrtovanje geotehničnih raziskav	9
1.5.1 Projektna naloga	11
1.5.2 Pomen in zanesljivost geotehničnih raziskav	13

POGLAVJE II.

2. GEOMEHANIKA	14
2.1 Načrtovanje in organizacija geotehničnih raziskav	14
2.2 Geotehnične terenske preiskave in »in situ« meritve	15
2.3 Laboratorijske preiskave	15
2.4 Vrednotenje terenskih in laboratorijskih preiskav	16
2.5 Opredelitev pogostosti terenskih in laboratorijskih geotehničnih raziskav	18

POGLAVJE III.

3. INŽENIRSKA GEOLOGIJA	22
3.1 Načrtovanje terenskih preiskav in meritev	22
3.2 Izvedba terenskih preiskav in meritev	22
3.2.1 Inženirskogeološko kartiranje	23
3.2.2 Delitev inženirskogeoloških lastnosti in pojavov	24
3.3 Laboratorijske preiskave in način pridobivanja vzorcev na podlagi sondažnih preiskav	25
3.4 Določitev dinamičnih procesov na plazovitih področjih in brežinah za potrebe sanacije	25
3.5 Klasifikacija plazov	26

3.6 Geotehnične preiskave pri podzemnih gradnjah in zahtevnih objektih	29
3.6.1 Podrobno kartiranje	29
3.6.2 Sondažne preiskave z »in situ« meritvami ter odvzemom vzorcev	29
3.7 Sinteza zbranih podatkov inženirskogeoloških preiskav	30

POGLAVJE IV.

4. GEOFIZIKALNE PREISKAVE ZA POTREBE GEOLOŠKO-GEOTEHNIČNIH RAZISKAV	31
4.1 Splošno o geofizikalnih preiskavah	31
4.2 Geofizikalne preiskave za potrebe geološko-geomehanskih raziskav	31
4.2.1 Vrste, načini in izvedba geofizikalnih preiskav	31
4.2.2 Načrt geofizikalnih preiskav	33
4.2.3 Prednosti, omejitve in točnost geofizikalnih preiskav	33
4.2.4 Oprema za izvajanje geofizikalnih meritev	35
4.2.5 Postopek izvajanja geofizikalnih preiskav	35
4.2.6 Nekaj priporočil pri načrtovanju geofizikalnih preiskav	37
4.2.7 Pregled najprimernejših geofizikalnih preiskav	39
4.3 Seizmične metode preiskav	41
4.3.1 Seizmično refrakcijsko profiliranje in refrakcijska tomografija	43
4.3.2 Seizmična refleksija in visokoresolucijska seizmična refleksija	43
4.3.3 Meritve površinskih valov z metodo MASW	44
4.4. Geoelektrične metode preiskav	45
4.4.1 Geoelektrično upornostno sondiranje VES	46
4.4.2 Geoelektrična upornostna tomografija ERT	46
4.5 Elektromagnetne metode	47
4.5.1 Georadar	47
4.6 Geofizikalne preiskave v vrtinah	49

POGLAVJE V.

5. SKLEP	52
-----------------	-----------

POGLAVJE VI.

6. PRAKTIČNI PRIMERI	53
6.1 Geomehanika	53
6.1.1 Vpliv geološke zgradbe na geotehnične konstrukcije	53
6.1.2 Sinteza rezultatov terenskih in laboratorijskih preiskav	54
6.2 Inženirska geologija	55
6.3 Geofizika – nekaj primerov uporabe geofizikalnih preiskav v geotehniki	58
6.3.1 Ugotavljanje geološke strukture	58
6.3.2 Pogoji temeljenja energetskega objekta	59
6.3.3 Ugotavljanje zakraselosti pod načrtovanim objektom s predlogom sanacije	60
6.3.4 Kontrola izboljšave temeljnih tal	61
6.3.5 Pregled območja načrtovanega objekta v okolju z zakraselo podlago	62
6.3.6 Določanje globine tesnilne zavese	63

POGLAVJE I

1. UVOD

1.1 NAMEN

Priročnik je namenjen tako pooblaščenim inženirjem pri poklicnem delu kot naročnikom pri pripravi in izdelavi projektnih nalog ter kakovostnejšemu vodenju investicijskih projektov.

Tudi za projektne vodje, lastnike in upravljavce izvajalskih podjetij je priročnik pomemben za skupno uveljavljanje kakovosti pri načrtovanju trajnostne gradnje ter končno za ustrezno umešitev načrtovane gradnje v dano naravno okolje ter zmanjšanje morebitnih negativnih vplivov na okolje.

S podrobno predstavitvijo poteka, izvedbe, vrednotenja ter poznavanja prednosti in pomembnosti širše ali ožje zastavljenih geotehničnih preiskav se dviguje kakovost dela pooblaščenih inženirjev in hkrati uveljavlja dobra inženirska praksa.

1.2 CILJI

Priročnik je ciljno naravnani kot pripomoček potencialnim manj poučenim investitorjem, izvajalcem geotehničnih raziskav, inženirjem ter mlajšim, manj izkušenim, geotehničnim inženirjem in projektantom, ki prevladujejo v slovenski inženirski stroki.

Cilji pričujočega dokumenta so strokovne usmeritve in priporočila izvajalcem geotehničnega projektiranja pri izvajanju geotehničnih raziskav in terenskih meritev pri načrtovanju zahtevnejših geotehničnih projektov v inženirski praksi. Dokument obravnava metode in postopke pri izvedbi geotehničnih raziskav za določanje materialnih lastnosti zemljin in kamnin ter drugih geotehničnih pogojev, ki predstavljajo osnovne podatke za inženirsko presojo mehanske odpornosti, stabilnosti in uporabnosti zahtevnejših stavb in inženirskih objektov. Za geotehnične, inženirske in druge gradbene projekte, katerih izpolnjevanje bistvenih zahtev je v veliki meri odvisno od geotehničnih pogojev temeljnih tal, ki so v vplivnem območju posameznih objektov, sta neposredno odgovorna **odgovorni geotehnični inženir** (v nadaljevanju geotehnik) in **odgovorni projektant objekta** (v nadaljevanju projektant), ki morata biti zato nenehno medsebojno usklajena pri sprejemanju ključnih odločitev v vseh fazah projektiranja in gradnje zahtevnejših objektov. V okviru pogodbenih obveznosti največji del odgovornosti zagotovo prevzema vodja projekta, ki imenuje odgovorne projektante ter neposredno odgovarja za usklajenost posameznih faz projekta in izpolnjevanje drugih obveznosti, ki so določene s pogodbo o projektiranju.

Glavni cilj priročnika je dosežen z njegovo uporabo tako, da so s pravilnim načrtovanjem preiskav že v fazi naročanja geotehnične preiskave ustrezno zasnovane, med samo izvedbo pa ustrezno narejene ter v nadaljevanju pravilno vrednotene.

1.3 RAZDELITEV IN SKUPNI TEMELJI POVEZANIH STROK

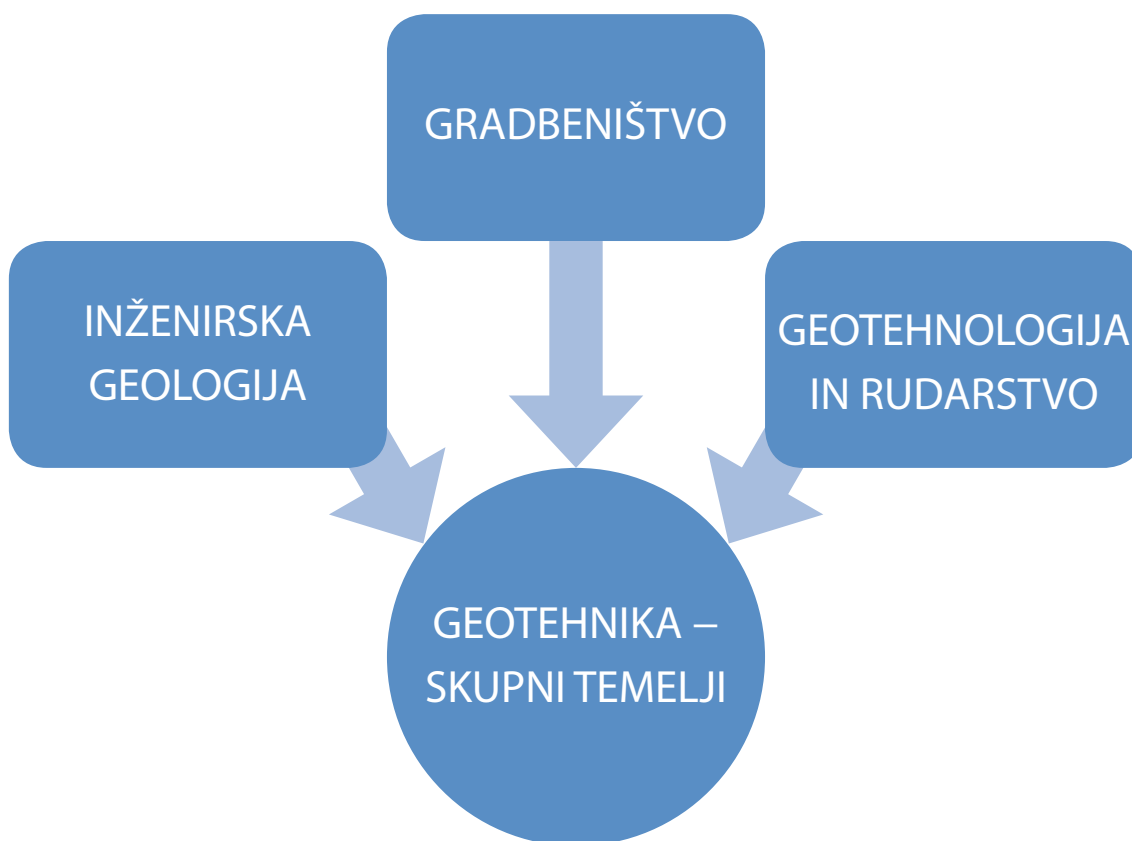
Geotehnične raziskave lahko razdelimo na inženirskogeološke, hidrogeološke, geomehanske ter inženirsko geofiziko.

Vsem je **skupni temelj GEOTEHNIKA**, ki se med njimi prepleta in služi tako gradbenikom kot inženirskim geologom, geotehnologom ter rudarjem.

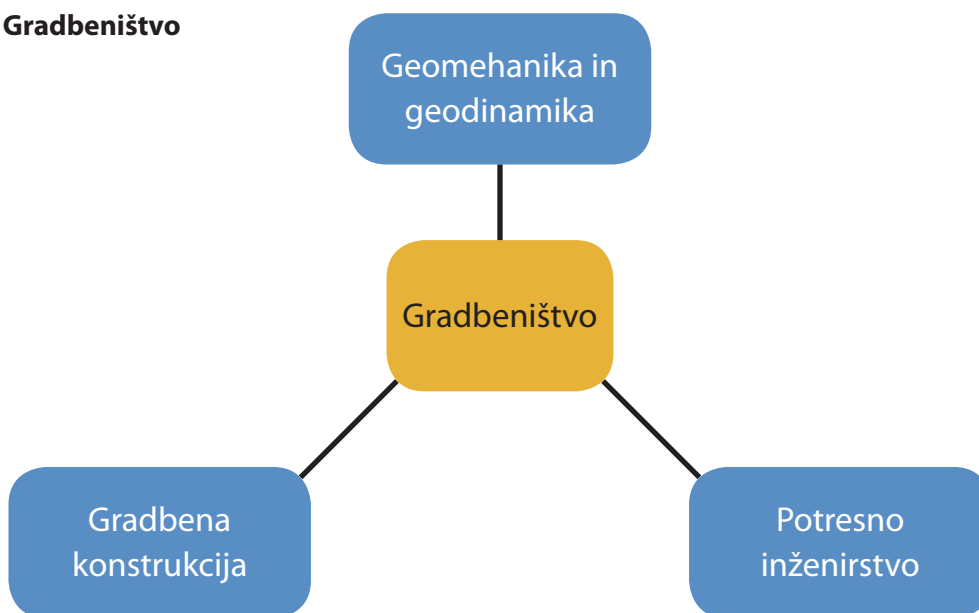
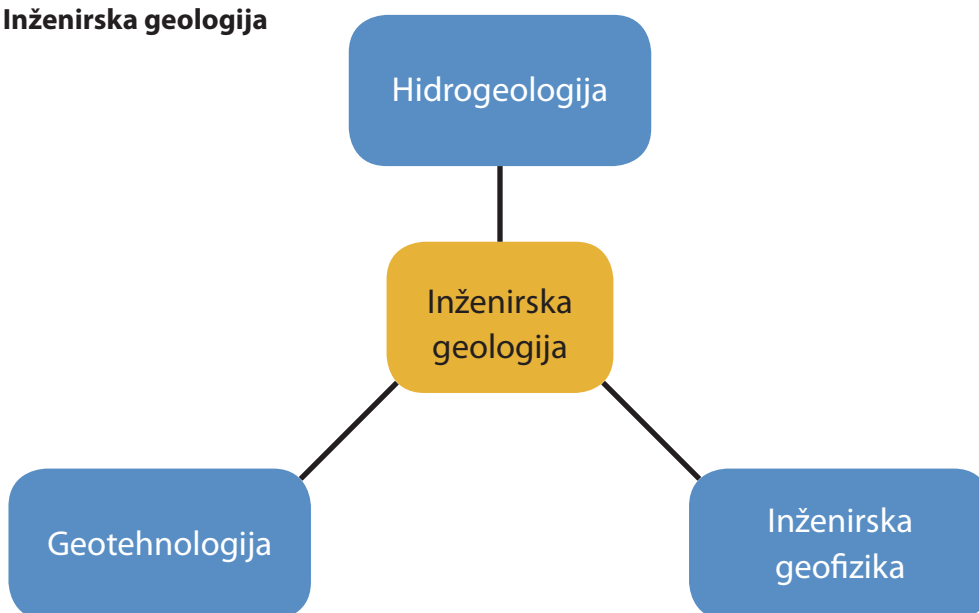
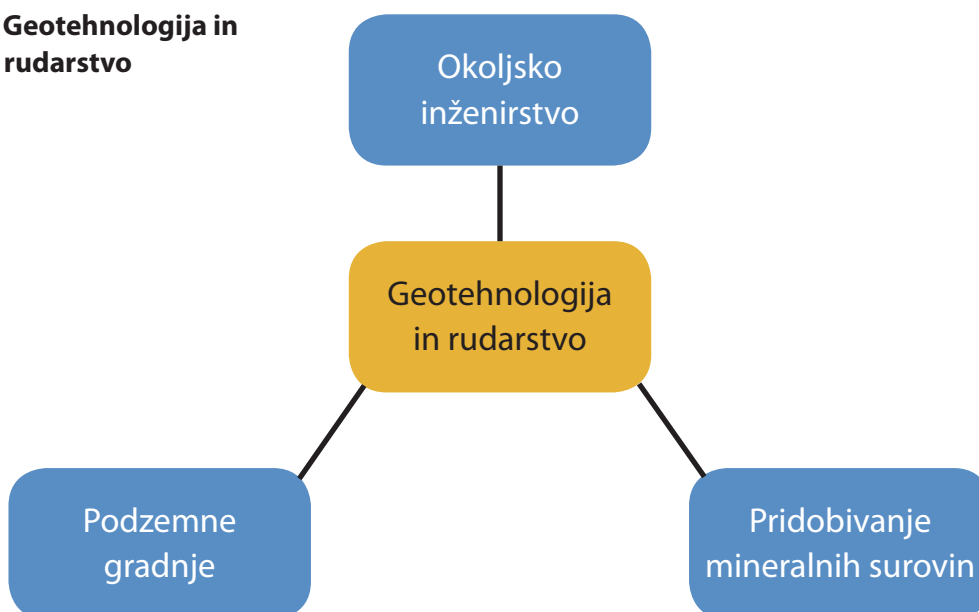
Definicija geotehničnega inženiringa

V Združenem kraljestvu so se že leta 1999 trudili poenotiti vse geotehnične dejavnosti z naslednjo definicijo:

»**Geotehnični inženiring** je uporaba znanosti mehanike zemljin in hribinske mehanike, inženirske geologije ter drugih gradbenih ved, ki se ukvarjajo s konstrukcijami, industrijo pridobivanja mineralnih surovin in hrambo odpadnih snovi kot tudi varovanjem okolja. Geotehnični inženiring igra glavno vlogo pri vseh projektih gradenj tako nad kot tudi pod zemljo. Ključen je tudi pri določitvi naravnih tveganj, kot so potresi in plazovi ter poplave. Geotehnični inženiring je zaradi delovanja zemljinskih in hribinskih mas v naravi, povezanih z naravnimi notranjimi in zunanji silami (težnost, voda, toplota in drugo), popolnoma različen od vseh drugih inženirskih vej, saj mora geotehnični inženir upravljati z zemeljskimi materiali, pri čemer večina ne more kontrolirati njihovih fizikalnih lastnosti« (prirejeno po Anon, 1999, Morgenstern, 2000).



Slika 1: GEOTEHNIKA – SKUPNI TEMELJI TREH POVEZANIH STROK

1.3.1 Gradbeništvo**1.3.2 Inženirska geologija****1.3.3 Geotehnologija in rudarstvo**

1.4 POMEN

Geotehnične raziskave so namenjene najprej pravilni umestitvi kakršnega koli objekta v prostor, nato pridobitvi ustreznih parametrov za projektiranje ter nadaljnji optimizaciji med samo izvedbo.

V fazi naročanja ustrezno zasnovane geotehnične preiskave, kot tudi pravilna izdelava in vrednotenje 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.

Izvedbo geotehničnih del lahko v grobem razdelimo na:

- temeljenje,
- preventivne ukrepe in varovanje brežin,
- preventivne ukrepe in sanacije plazov,
- preventivne ukrepe in sanacije poplavnih območij,
- preventivne ukrepe za izboljšave tal,
- pridobivanje mineralnih surovin in
- določitev ukrepov za varovanje okolja.

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 investicije.



Slika 2: Proces sodelovanja geotehničnih preiskav z nadaljnjim projektiranjem

1.5 NAČRTOVANJE GEOTEHNIČNIH RAZISKAV

Pri načrtovanju gradenj ima pomembno vlogo inženir oz. vodja gradnje investitorja, ki praviloma pripravi projektno nalogo ter tako posredno določa tudi obseg in kakovost projektnih raziskav in odloča o izvedbi dodatnih raziskav, če se ugotovi, da so te potrebne. Zato tudi prevzema svoj del odgovornosti za zanesljivost gradnje v deležu, ki izhaja iz zanesljivosti pridobljenih geotehničnih podatkov, če je neutemeljeno zavrnil zahteve za izvedbo dodatnih raziskav.

Za sedanje obdobje je zaradi zastoja pri izvajanju večjih investicijskih projektov v preteklih letih značilna relativno nizka raven slovenske geotehnične stroke, ki je posledica pomanjkanja izkušenih kadrov tako na področju geotehničnih raziskav kot tudi na področju projektiranja. V slovenski geotehniko se dela v glavnem izvajajo skladno z določili veljavnih evropskih standardov, vendar pogrešamo celovito izpolnjevanje temeljnih pogojev uporabe teh standardov, ki se nanašajo na ustrezno usposobljeno in izkušeno osebje v vseh fazah projektiranja in gradnje ter na nujne povezave in komunikacije ter razumevanje projektnih zahtev med različnimi udeleženci posameznih procesov v vseh fazah gradnje. Ocenjujemo, da prav pomanjkanje usposobljenih in izkušenih kadrov ter komunikacij in razumevanja med geotehniko in projektanti objektov predstavljajo glavni vzrok večjih pomanjkljivosti in napak v geotehnični praksi. Pričakujemo, da bo pričujoči dokument (priročnik) mogoče koristno uporabiti za povečanje kakovosti in učinkovitosti slovenske geotehnične stroke.

V zadnjih dvajsetih letih so se uveljavili številni novi postopki in metode pri izvajanju geotehniških raziskav, ki so prešli iz akademske na praktično raven ter se izvajajo v geotehniški praksi in uporabljajo za določanje materialnih lastnosti zemljin in kamnin (presiometer, 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 v podobnih geotehničnih razmerah. Zato so pri geotehničnih raziskavah zelo pomembne individualne praktične izkušnje geotehniko in projektanta, ki sta zadolžena za pripravo racionalnega programa terenskih in laboratorijskih raziskav ter drugih izhodišč za oceno materialnih lastnosti in geotehničnih pogojev, ki morajo biti dodatno potrjeni z rezultati laboratorijskih preizkusov 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.

Odgovorni geotehnik in **odgovorni projektant** morata upoštevati, da le pri nekaterih terenskih raziskavah dobljeni rezultati dejansko predstavljajo vrednosti mehanskih lastnosti zemljin in kamnin, praviloma so te le izkustveno ocenjene iz rezultatov meritev posrednih mehanskih količin. Zato ni nujno, da je območje dobljenih vrednosti rezultatov terenskih in laboratorijskih raziskav povsem skladno s pričakovanimi vrednostmi za obravnavane materiale. V takšnih primerih morata opraviti podrobno analizo dobljenih vrednosti ter utemeljiti vzroke nepričakovanih odstopanj med rezultati različnih raziskav in smiselno utemeljiti izbrane projektne podatke.

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) in
- preostali objekti z neobičajno velikimi tveganji, zelo zahtevnimi pogoji tal, izjemnimi obtežbami in/ali objekti na področjih z veliko seizmičnostjo (geotehnična kategorija 3).

Pri objektih z zanemarljivimi tveganji je mogoče osnovne projektne zahteve izpolniti na osnovi izkušenj in rezultatov **kvalitativnih geotehničnih preiskav**, kjer je tveganje globalne stabilnosti in premikov tal zanemarljivo in kadar primerljive lokalne izkušnje kažejo, da so pogoji tal dovolj preprosti. Za projektiranje in gradnjo takšnih objektov se lahko uporabijo rutinske metode.

Pri gradnji običajnih objektov in temeljenj brez izjemnih tveganj in zahtevnih tal ter obremenitev je treba pri dokazovanju izpolnjevanja bistvenih projektne zahteve upoštevati **kvantitativne geotehnične podatke**. Pri določanju obsega raziskav in izvedbi terenskih in laboratorijskih preizkušanj se praviloma uporabljajo standardizirane metode.

V kategorijo običajnih vrst konstrukcij in objektov prištevamo:

- temeljenja na točkovnih in pasovnih temeljih;
- temeljenja na temeljnih ploščah;
- globoka temeljenja na pilotih in kesonih;
- konstrukcije za podpiranje in opiranje pobočij in zadrževanje vode;
- izkope;
- temeljenje premostitvenih objektov;
- nasipe in druga zemeljska dela;
- vse vrste geotehničnih sider in
- predore v trdnih, nerazpokanih kamninah brez dodatnih posebnih zahtev.

Objektov oz. posameznih konstrukcijskih sklopov, za katere so značilna izjemna tveganja, tako z vidika posledic izgube človeških življenj kot ogromne materialne škode, zgoraj citirani standard za geotehnično projektiranje podrobno ne obravnava. Pri takšnih projektih je treba upoštevati za izpolnjevanje bistvenih projektne zahteve priporočila, alternativne predpise in pravila, ki so bolj rigorozna od zahtev veljavnega slovenskega standarda za geotehnično projektiranje.

Med objekte oz. posamezne konstrukcijske sklope, za katere so značilna izjemna tveganja, prištevamo:

- zelo velike in nenavadne konstrukcije;
- visoke pregrade, konstrukcije z neobičajno visokimi tveganji in z izjemno zahtevnimi pogoji temeljenja ali obtežbami ter
- objekte na območjih z veliko seizmičnostjo in konstrukcije na območjih, kjer obstaja verjetnost nestabilnosti terena ali stalnih premikov, kar zahteva posebne preiskave in posebne ukrepe.

V geotehnični praksi lahko tudi gradnje z zmernimi tveganji, pri katerih izpolnjevanje vseh bistvenih zahtev ni mogoče oz. bi zahtevalo izvajanje geotehničnih ukrepov, katerih stroški večkratno presegajo vrednost gradnje, uvrstimo v **geotehnično kategorijo 3**. Pri projektiranju, izvedbi in uporabi takšnih gradenj upoštevamo **pravila geotehničnega projektiranja po monitoring metodi**, ki jo **dopušča veljavni standard SIST EN 1997**.

Pogosti so primeri takšnih gradenj cestnih in drugih infrastrukturnih objektov na meliščih in globokih fosilnih plaziščih, katerih dinamika gibanja je v opazovanem obdobju ocenjena za sorazmerno majhno, vendar naravna pobočja še vedno niso dosegla svojega stabilnega ravnotežja.

Obravnavani dokument je ciljno usmerjen k izvedbi potrebnih raziskav za običajne projekte geotehnične kategorije 2, ki predstavljajo največji delež projektov v slovenski geotehnični praksi.

1.5.1 Projektna naloga

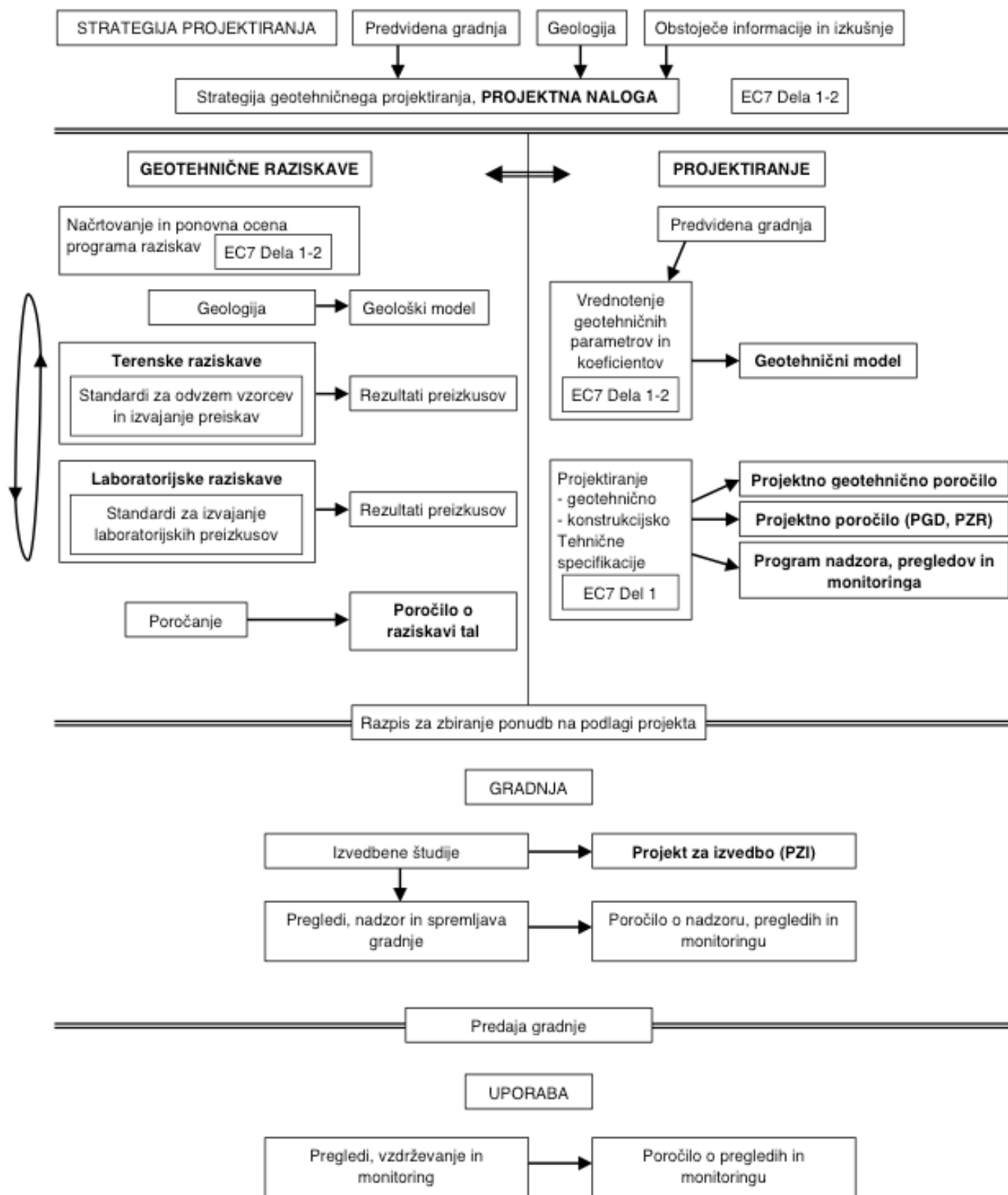
Projektno nalogo za izdelavo različnih faz projektne dokumentacije v procesu graditve stavb in inženirskih objektov praviloma pripravi naročnik oz. pooblaščen ustanova, ki se ukvarja z gradbenim in/ali geotehničnim inženiringom. Projektna naloga mora obsegati vse ključne podatke o nameravani gradnji, lokaciji, projektnih pogojih in razpoložljivi obstoječi dokumentaciji, ki jo je treba upoštevati pri načrtovanju oz. pri projektiranju. V pričujočem dokumentu, ki obravnava le vidik geotehničnih raziskav in le delno tudi geotehnično projektiranje, je navedena le vsebina projektne naloge, ki obravnava prej navedeni področji:

- kratek opis predvidene lokacije in gradnje;
- vire obstoječih geotehničnih podatkov z vplivnega območja gradnje;
- dostopnost lokacije za izvajanje terenskih raziskav;
- kratek opis načrtovanih posegov, predvideno geološko zgradba;
- pogoje, ki izhajajo iz prostorskih aktov, varovanje podtalnice in varstva okolja;
- oceno pričakovanih neugodnih vplivov na tla;
- seznam predvidenega obsega in kakovosti sondažnih raziskav, terenskih preizkusov, meritev in modelnih preizkusov ter laboratorijskih preizkusov, ki so potrebni za izdelavo geotehnične projektne dokumentacije, in
- navedbo standardov in drugih tehničnih specifikacij, ki jih je treba upoštevati pri izvedbi raziskav za pridobitev zanesljivih projektnih podatkov.

Za pripravo projektne naloge so potrebna znanja in izkušnje s področja načrtovanja stavb in inženirskih objektov ter geotehničnih raziskav in geotehničnega projektiranja.

Pri izdelavi projektne naloge je treba upoštevati časovni potek posameznih dejavnosti pri gradnjah zahtevnejših objektov, ki je shematično prikazan na Sliki 3.

Upoštevati je treba, da dele s področij projektnih geotehničnih raziskav, geotehničnega načrtovanja in gradbenega dela projektiranja stavb in inženirskih objektov v praksi ni mogoče izvajati ločeno. Zato sta skladno z veljavnimi predpisi (SIST EN 1997-1 in 2) in pripadajočimi standardi predvideni časovno ločeno poročanje o rezultatih opravljenih geotehničnih raziskav ter poročanje o rezultatih geomehanskih analiz in izvedbi dokazov zanesljivosti (Slika 3).



Slika 3: Potek dejavnosti v procesih graditve objektov (prilagojeno po shemi št. B.1 Stages of ground investigations in geotechnical design, execution of works and exploitations of the structure, SIST EN 1997-2:2007)

1.5.2 Pomen in zanesljivost geotehničnih raziskav

Zanesljive geotehnične podatke, ki so pomembni za izpolnjevanje bistvenih lastnosti načrtovanih stavb in inženirskih objektov, je mogoče pridobiti le, če je zagotovljeno stalno sodelovanje med vodjo projekta in odgovornimi projektanti v vseh fazah izvedbe geotehničnega projektiranja. Projektanti (prevladujejo diplomirani inženirji gradbeništva), ki praviloma dobro poznajo glavne značilnosti načrtovanih gradenj, morajo skupaj z geotehniko (prevladujejo diplomirani inženirji geologije, geotehnologije in gradbeništva), ki obvladajo geotehnične pogoje in značilnosti tal, določiti glavne cilje geotehničnih raziskav z upoštevanjem pričakovanih vplivov gradenj na temeljna tla ter okolje v vplivnem območju gradnje. Geotehnik v sodelovanju s projektantom in inženirjem oz. naročnikom, z upoštevanjem pričakovane geološke zgradbe in karakteristik gradnje, smiselno določi optimalni obseg in kakovost potrebnih geotehničnih raziskav za pridobivanje geotehničnih podatkov, ki so pomembni za zagotavljanje zanesljivosti načrtovane gradnje.

Izvajanje geotehničnih raziskav vodi geotehnik ter izvaja potrebne dejavnosti za doseganje pričakovane zanesljivosti (prikazane so s krožnim potekom na Sliki 3), ki je opredeljena z veljavno zakonodajo.

Po zaključku raziskav geotehnik izdelata »**Poročilo o raziskavah tal**«, katerega vsebina in obseg sta določena v **standardu SIST EN 1997-1 in 2**.

V fazi projektiranja stavbe ali inženirskega objekta geotehnik in/ali projektant izdelata »**Geotehnično projektno poročilo**«, ki mora vsebovati potrebne dokaze o zanesljivosti gradnje ter druge vsebine, ki so opredeljene z določili standarda SIST EN 1997-1 in 2.

Oba dokumenta obsegata besedilni del in grafične priloge ter skupaj predstavljata »**GEOTEHNIČNI PROJEKT**«, ki je pomemben sestavni del projektne dokumentacije vseh zahtevnejših geotehničnih gradenj.

- Zaradi interdisciplinarnosti, ki je značilna za proces načrtovanja pomembnejših gradenj, priporočamo, da se naročilo za izvedbo projektne geotehnične raziskave in projektiranja gradnje odda hkrati le enemu usposobljenemu izvajalcu.
- Z naročilom oz. s pogodbo je treba določiti pomembne ključne kadre za posamezne faze projektiranja, ki morajo svojo usposobljenost dokazati z ustreznimi referenčnimi deli.
- Natančno mora biti opredeljena odgovornost posameznih udeležencev projektiranja gradnje tako v smislu doseganja zahtevane kakovosti in izpolnjevanja zastavljenih rokov kot drugih obveznosti, ki so določene s pogodbo za projektiranje.
- Pri določanju obsega, vrste in kakovosti geotehničnih raziskav priporočamo izdelovalcem projektne naloge, da upoštevajo priporočila, ki so podana v Tabeli 1 in Tabeli 2 pričujočega priročnika, ter druge mednarodne standarde.
- Inženir oz. naročnik se mora zavedati pomena vsebine in kakovosti projektne naloge, ki je osnovni pogoj za kakovostno izvedbo preiskav in geotehničnega projekta vsake zahtevnejše gradnje. Projektne naloge z določilom »geomehanske preiskave po oceni projektanta« je treba oceniti kot neprimerne in zelo škodljive za inženirsko stroko.

POGLAVJE II

2. GEOMEHANIKA

2.1 NAČRTOVANJE IN ORGANIZACIJA GEOTEHNIČNIH RAZISKAV

Za odgovorno načrtovanje geotehničnih raziskav je treba pridobiti in analizirati obstoječe podatke o temeljnih tleh na mikrolokaciji predvidene gradnje, projektne pogoje ter ključne podatke o načrtovanih objektih, vplivih na temeljna tla, predvidenih izkopih in potencialnih vplivih na objekte in infrastrukturo v vplivnem območju.

Pri **zelo zahtevnih in obsežnih projektih** se geotehnične raziskave izvajajo v več zaporednih fazah projektiranja. Tako v odvisnosti od zahtevnosti projektov razlikujemo med predhodnimi, projektnimi, dopolnilnimi in kontrolnimi geotehničnimi raziskavami. V takšnih primerih je načrtovanje geotehničnih raziskav sorazmerno preprosto, ker temelji na osnovi rezultatov geotehničnih raziskav, doseženih v predhodnih fazah, in na dejanskih projektnih podatkih gradnje iz prejšnjih faz projektiranja.

Pri **manjših projektih**, ki sicer predstavljajo prevladujoč delež geotehničnih del v inženirski praksi, se praviloma izvajajo geotehnične raziskave in projektiranje hkrati, ker prevladujejo osnovni cilji naročnikov, da bi le bila gradnja končana v predvidenih časovnih in finančnih okvirjih. Zato naročnik izbranemu projektantu običajno naroča izdelavo projekta za izvedbo (PGD in PZI) brez vmesnih faz (IDZ in IP) preverjanja geotehničnih in drugih projektnih zahtev.

Načrtovanje oz. prvo oceno obsega in vrednosti potrebnih raziskovalnih del mora izdelati že **investitor v okviru izdelave projektne naloge** za projektiranje in razpisne dokumentacije za oddajo del. Zato mora investitor imeti ustrezno strokovno znanje in izkušnje s področja geotehničnega projektiranja oz. v nasprotnem primeru izdelavo ocene pričakovanega obsega geotehničnih raziskav zaupa drugim ustrezno usposobljenim kadrom.

Odgovorni geotehnik praviloma **organizira in nadzira izvedbo posameznih raziskav** ter je **odgovoren za rezultate geotehničnih raziskav**, izdelavo **poročila o opravljenih raziskavah ter geotehničnega projektne naloge poročila – načrta**, ki ga izdelata **skupaj s projektantom gradnje**. Projektant mora z vidika poznavalca načrtovane gradnje, predvidenih gradbenih posegov in vplivov na tla ter obstoječih objektov in infrastrukture v vplivnem območju usmerjati izvedbo geotehničnih raziskav tako, da bodo pridobljeni vsi potrebni geotehnični podatki za inženirske presoje mehanske odpornosti, stabilnosti, trajnosti in sprejemljivosti vplivov na okolje med gradnjo in eksploatacijo načrtovane gradnje. Prav tako mora v sodelovanju z geotehnikom sodelovati pri izdelavi Poročila o geotehničnem projektu, kot je to opredeljeno v tč. 2.8 veljavnega slovenskega standarda SIST EN 1997:2005. Inženir spremlja in nadzira izvajanje raziskav ter usmerja potek posameznih faz geotehničnega projektiranja.

Vodja projekta odgovarja za skladnost posameznih segmentov projektne dokumentacije, skladnost gradnje s prostorskimi in okoljskimi pogoji, usklajuje delo posameznih odgovornih projektantov ter odgovarja za izpolnjevanje vseh pogodbenih obveznosti, ki izhajajo iz naročila za projektiranje gradnje. Glede na velikost in zahtevnost posameznega projekta lahko dela geotehnik in projektanta izvaja ista oseba, če lahko z referenčnimi deli dokaže usposobljenost za obe področji geotehničnega projektiranja.

Osnovni cilj geotehničnih raziskav je zagotavljanje zanesljivih geotehničnih podatkov o pogojih temeljnih tal v vplivnem območju načrtovane gradnje. Z raziskavami je treba pridobiti vse potrebne podatke za določitev bistvenih lastnosti temeljnih tal, karakterističnih vrednosti materialnih lastnosti ter drugih pomembnih geotehničnih pogojev za projektne izračune. Pri načrtovanju geotehničnih raziskav je treba upoštevati značilnosti projekta, pogoje načrtovane gradnje, zahteve glede pričakovanega obnašanja gradnje oz. gradbenih konstrukcij, sprejemljivost vplivov na obstoječe objekte ter pogoje in zahteve, ki izhajajo iz prostorskih aktov. Pri običajnih (rutinskih) terenskih in laboratorijskih preiskavah je treba te izvajati ter dobljene rezultate iz vrednotiti in interpretirati v skladnosti z veljavnimi tehničnimi predpisi SIST EN 1997 in mednarodno priznanimi priporočili in standardi.

2.2 GEOTEHNIČNE TERENSKÉ PREISKAVE IN »IN SITU« MERITVE

Med rutinske geotehnične terenske preiskave prištevamo:

- sondažne preiskave s strukturnimi in geomehanskimi vrtinami, sondažnimi razkopi, sondažnimi okni in galerijami ter utežno sondiranje, statično in/ali rotacijsko;
- standardni penetracijski preizkus (SPT);
- dinamični penetracijski preizkus (DP);
- preizkus s terensko krilno sondo (FVT);
- konusni penetracijski preizkus in disipacijsko preizkušanje (CPT, CPTU);
- presiometrski preizkus (PMT);
- dilatometrské preizkuse (FDT, DMT) in
- preizkus s togo ploščo (PLT).

Med standardne terenske meritve, ki se v geotehnični praksi izvajajo pri načrtovanju gradenj v zahtevnejših okoljih in pri zahtevnejših pogojih tal, prištevamo:

- geofizikalne preiskave (GP),
- občasne meritve horizontalne inklinacije (HIM),
- občasne meritve nivojev talne vode v odprtih piezometrih (GWO),
- kontinuirane meritve nivojev talne vode v odprtih piezometrih (CGWO),
- kontinuirane sektorske meritve pornih tlakov v zaprtih piezometrih (GWC) in
- terenske preiskave prepustnosti s črpalnimi in nalivalnimi preizkusi (KFT).

Med izvajanjem sondažnih vrtin je treba zagotoviti kontinuirano pridobivanje jedra za klasifikacijo zemljin in kamnin, določanje mej pod posameznimi plastmi, dotokov vode, vlažnih in razmočenih con, morebitne drsine ter plastovitosti, razpokanosti kamnin in oceno RQD- in/ali GSI-indeksa (v odvisnosti od tehnologije vrtanja: RQD – določitev kakovosti hribine je mogoča zgolj pri vrtanju z uporabo diamantnih kron in vodnega hlajenja).

2.3 LABORATORIJSKE PREISKAVE

Za izvedbo laboratorijskih preiskav je treba odvzeti primerne vzorce zemljin in kamnin. Zavedati se je treba, da povsem nepoškodovanega vzorca iz vrtine dejansko niti ni mogoče pridobiti. V odvisnosti od poškodovanosti je treba razlikovati med petimi kakovostnimi razredi vzorcev, ki omogočajo določanje različnih materialnih lastnosti.

Za določanje gostote, poroznosti, prepustnosti, stisljivosti in strižne trdnosti, ki so pri geotehničnem projektiranju praviloma najpomembnejše materialne lastnosti, je treba pridobiti neporušene nedotaknjene vzorce zemljin (kategorija A po EN ISO 22475-1).

Med rutinske laboratorijske preiskave prištevamo:

- Indeksne preiskave za identifikacijo in klasifikacijo zemljin: vlažnost; prostorninska teža; specifična gravitacija, analiza zrnivosti, konsistenčne meje, relativna gostota, disperzivnost glinastih zemljin, preizkus nabrekanja in meja krčenja.
- Preiskave kemične lastnosti zemljin in vode: vsebnost organskih sestavin, prisotnost karbonatov, sulfatov, kloridov, določitev pH-vrednost in prisotnost kloridov v talni vodi.
- Preiskave trdnostnega indeksa zemljin: laboratorijska krilna sonda, »fall cone« – standardni lab. konusni preizkus.
- Preiskave strižne trdnosti zemljin: enoosna tlačna trdnost, nekonsolidirana nedrenirana triaksialna kompresijska preiskava, konsolidirana triaksialna kompresijska preiskava in konsolidirana direktna ali rotacijska strižna preiskava.
- Preiskave stisljivosti in deformabilnosti: edometriški preizkus, triaksialne preiskave deformabilnosti.
- Preiskave zbitosti: Proctorjevi preizkusi, preiskave CBR.
- Preiskave prepustnosti: preiskave s konstantnim in spremenljivim hidravličnim padcem v edometru in/ali v triaksialnih celicah.
- Preiskave kamnin: identifikacija kamnin, geološki opis, vlažnost, gostota in poroznost; preizkus enoosne tlačne trdnosti in deformabilnosti, točkovni trdnostni indeks, brazilski preizkus in triaksialne kompresijske preiskave.

2.4 VREDNOTENJE TERENSKIH IN LABORATORIJSKIH PREISKAV

Pri vrednotenju rezultatov terenskih in laboratorijskih preiskav je treba upoštevati določila standardov, ki so navedeni v SIST EN 1997-2:2007.

Projektant najprej izdela **zasnovo projektne rešitve načrtovane gradnje** z glavnimi konstrukcijskimi elementi ter oceno pričakovanih neugodnih vplivov in predlog primernih tehnologij za izvedbo gradnje.

Geotehnik izdela **pričakovani model tal in oceni primernost predvidene gradnje** na izbrani lokaciji.

Investitor, geotehnik in/ali projektant lahko okvirno ocenijo obseg, pogostost in vrsto potrebnih geotehničnih raziskav glede na pričakovane značilnosti projekta ter z upoštevanjem pričakovanih pogojev temeljnih tal.

Glede na značilnosti posameznih gradenj so najpomembnejša **mejna stanja**, za katera je treba z inženirsko presojo dokazati, da je verjetnost njihovega pojava med in po izgradnji zanemarljivo majhna.

Potrebni geotehnični podatki za izvedbo dokazov mejnih stanj in primerne standardne vrste terenskih in laboratorijskih preiskav za določanje geotehničnih podatkov so prikazani v naslednjih preglednicah:

Preglednica 1: Merodajna mejna stanja, geomehanski podatki in vrste preiskav v odvisnosti od projekta

VRSTA PROJEKTA	INŽENIRSKA PRESOJA MEJNIH STANJ	GEOMEHANSKI PODATKI	TERENSKÉ PREISKAVE	LABORATORIJSKE PREISKAVE
PLITVO TEMELJENJE	<ul style="list-style-type: none"> – Projektna odpornost, – posedki (velikost, časovni potek), – vplivi na obstoječe gradnje, – ekstremni projektni vplivi, – krčenje in nabrekanje, – kemična združljivost betona in zemljin ter – dvig tal zaradi zmrzovanja. 	<ul style="list-style-type: none"> – Profili tal (sloji zemljin in kamnin, nivoji talne vode), – parametri strižne trdnosti, – začetne napetosti in OCR, – stisljivost in konsolidacijski parametri, – globina zmrzovanja, – kemične lastnosti zemljin, – globina sezonskih sprememb vlažnosti, – prostorninska teža in – inženirskogeološko kartiranje kamnin vključno z oceno orientacije in lastnosti diskontinuitet. 	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne vrtine in penetracijske sonde ali razkopi, – SPT, CPT, CPTU, – krilna sonda, – dilatometri, – presiometri, – izotopne meritve vlage in gostote, – preizkus s togo ploščo, – določitev RQD-ja in GSI-ja ter – geofizikalne raziskave. 	<ul style="list-style-type: none"> – 1D-edometer, – direktna strižna preiskava, – triaksialni preizkusi, – preizkus zrnivosti, – vlažnost in konsistenca, – pH, preizkus el. upornosti, – prostorninska teža, – preizkus potenciala pojava kolapsa in nabrekanja – enoosna tlačna trdnost ter deformabilnost intaktne kamnine.
GRADNJA IN TEMELJENJE NASIPOV	<ul style="list-style-type: none"> – Posedki (velikost in časovni potek), – odpornost tal pod nasipom, – stabilnost tal in pobočij pred gradnjo, – hkratna presoja stabilnosti nasipa in tal in presoja stabilnosti nasipnih brežin, – bočni tlaki, – ocena materialnih virov (kvantiteta in kvaliteta nasipnih materialov), – potrebna armatura in – vplivi na obstoječe gradnje in okolje. 	<ul style="list-style-type: none"> – Profil tal (sloji zemljin, kamnin in nivoji talne vode), – parametri stisljivosti, – parametri strižne trdnosti, – prostorninska teža, – koeficienti časovnega poteka konsolidacije, – koeficienti horizontalnih zemeljskih tlakov, – parametra trenja in adhezije med armaturo in tlemi, – odpornost proti izvlekom, – trdnostne lastnosti kamnin in diskontinuitet ter – krčenje, nabrekanje in preperavanje nasipnih materialov. 	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažno vrtnanje in penetracijsko ali utežno sondiranje, – izotopna gostota, – preizkus s preizkusno ploščo, – poskusni nasip, – SPT, CPT, CPT-U, – dilatometer, – krilna sonda, – indeks RQD, GSI, – geofizikalne preiskave in – inženirskogeološko kartiranje kamnin, ocena orientacije in lastnosti diskontinuitet. 	<ul style="list-style-type: none"> – 1D-edometer, – triaksialni preizkusi strižne trdnosti zgoščenih nasipnih materialov, – preizkus direktne strižne trdnosti, – preizkus zrnivosti, – vlažnost in konsistenčne meje, – prostorninska teža, – preizkus prepustnosti, – Proctorjevi preizkusi, – preizkušanje geotekstila in – preizkusi krčenja in nabrekanja zemljin in kamnin ter sukcijskih podtlakov.
PODPORNE KONSTRUKCIJE	<ul style="list-style-type: none"> – Mehanska odpornost in stabilnost konstrukcij, – deformacije tal in podpornih konstrukcij, – globalna stabilnost, – odpornost tal pod temelji podpornih zidov, – ravnotežja v vertikalni smeri pri sidranih vpetih konstrukcijah, – stabilnost začasnih izkopov in delovnih platojev, – odpornost vseh vrst geotehničnih sider, – dvig dna izkopa in/ali hidravlična porušitev, – odvodnjavanje, – trajnost delovanja drenažnih sistemov in – presoja vplivov na obstoječe gradnje. 	<ul style="list-style-type: none"> – Prečni in vzdolžni geotehnični profili (sloji zemljin, kamnin in nivoji talne vode), – strižna trdnost zemljin in kamnin vključno z diskontinuitetami, – trenje in adhezija med podpornimi konstrukcijami in tlemi, – prostorninska teža, – deformabilnost zemljin in kamnin, – hidrostatični pritiski in porni nadtlaki, – koeficienti časovnega poteka konsolidacije, – začetne napetosti in OCR, – koeficienti prepustnosti in – potenciala krčenja in nabrekanja. 	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažno vrtnanje in penetracijske sonde ter razkopi, – SPT, CPT in CPTU, – krilna sonda, – dilatometer, – presiometer, – meritve s piezometri, – določitev RQD-ja, – geofizikalne raziskave, – preizkusna sidra, – poskusni kampadni izkopi pri podpornih zidovih in – inženirskogeološko kartiranje kamnin z oceno orientacije in trdnosti vzdolž diskontinuitet. 	<ul style="list-style-type: none"> – Preizkusi direktne strižne trdnosti, – vlažnost, – konsistenčne meje, – prostorninska teža, – enoosna tlačna trdnost zemljin, – meritve triaksialne preiskave strižne trdnosti in deformabilnosti, – enoosna tlačna trdnost in preizkus deformabilnosti intaktne kamnine, – točkovni trdnostni indeks in – preizkus potencialov krčenja in nabrekanja ter sukcije.

2.5 OPREDELITEV POGOSTOSTI TERENSKIH IN LABORATORIJSKIH GEOTEHNIČNIH RAZISKAV

Zahtevnejša je smiselna opredelitev pogostosti posameznih terenskih in laboratorijskih geotehničnih raziskav. Dejansko sta pogostost in število posameznih raziskav odvisna predvsem od sestave, stratigrafije in geotehnične zahtevnosti temeljnih tal ter zahtevnosti načrtovane gradnje.

Pri gradnjah, za katere niso značilna izredno velika tveganja v smislu ogrožanja številnih življenj in materialne škode, ki bi ogrozila državno ekonomijo, je pri načrtovanju obsega raziskav mogoče koristno uporabiti podatke, ki so prikazani v Tabeli 2 tega priročnika.

Pri sestavi pričakovanega obsega geotehničnih raziskav so upoštevani priporočila, podana v Anex B (informative), Planning of geotechnical investigations, SIST EN 1997-2 ter GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR No. 5, Evaluation of Soil and Rock Properties, FHWA-IF-02-034, USA, in praktične izkušnje avtorjev.

Preglednica 2: Predlog primernega obsega sondažnih del ter drugih geotehničnih preiskav

VRSTA PROJEKTA	SONDAŽNE RAZISKAVE	POGOSTOST DOPOLNILNIH GEOTEHNIČNIH RAZISKAV
PLITVO TEMELJENJE	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne raziskave (vrtine, DP, CPT, CPTU, penetracijske sonde ali razkopi) v kvadratni mreži s stranico 20–60 m v odvisnosti od homogenosti tal in nagiba terena (s sondami ter razkopi se lahko nadomesti do 50 % vrtin); – na urbanih območjih so lahko potrebne dodatne raziskave ob obstoječih gradnjah; – pri gradnjah na pobočjih je treba območje raziskav razširiti v smeri padnice pobočja za oceno globalne stabilnosti gradnje; – za plitve temelje velikosti do 30 m² na stabilnih tleh najmanj ena vrtina, na stabilnostno ogroženih območjih najmanj 3 vrtine v smeri kritičnega profila; – vrtine morajo segati v stabilna tla do globine, kjer dodatne vertikalne napetosti ne presegajo 10 % vrednosti kontaktnih tlakov med temelji in tlemi. 	<ul style="list-style-type: none"> – SPT v vsaki nekoherentni plasti zemljin na 2,5 m globine, odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – CPT, CPTU, presiometrijske in dilatometrijske preiskave pri zahtevnejših gradnjah in zahtevnejših pogojih tal; – geofizikalne preiskave pri večjih objektih v začetnih fazah projektiranja ter na težko dostopnih lokacijah; – preiskave strižne trdnosti, deformabilnosti in indeksne preiskave se opravijo na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno projektne odpornosti in izračun posedkov; – preostale preiskave iz Tabele 1 se predvidijo v odvisnosti od dejanskih geotehničnih pogojev temeljnih tal na mikrolokaciji.
GLOBOKO TEMELJENJE (ZABITI PILOTI)	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne vrtine in penetracijske sonde (DP, CPT, CPTU) ter razkopi v kvadratni mreži s stranico 20–60 m v odvisnosti od homogenosti tal in nagiba terena (s sondami in razkopi se lahko nadomesti največ 50 % predvidenih sondažnih vrtin); – na urbanih območjih so lahko potrebne dodatne raziskave ob obstoječih gradnjah – vibracije; – pri gradnjah na pobočjih je treba območje raziskav razširiti v smeri padnice pobočja za oceno globalne stabilnosti gradnje; – za temelje velikosti do 30 m² na stabilnih tleh najmanj ena vrtina, na stabilnostno ogroženih območjih najmanj 3 preiskave v smeri kritičnega profila; – pri temeljenju večjih objektov naj vsaj tri vrtine segajo v stabilna tla v globino 3,0 m pod dno zabitih pilotov. 	<ul style="list-style-type: none"> – SPT v vsaki nekoherentni plasti zemljin na 2,5 m globine, odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – presiometrijske ali dilatometrijske preiskave, pri zahtevnejših gradnjah in zahtevnejših pogojih tal tudi CPT in CPTU; – edometrijske preiskave za oceno stisljivosti, konsolidacijskih parametrov in OCR-ja; – preiskave strižne trdnosti in indeksne preiskave se opravijo na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno odpornosti in izračun posedkov zabitih pilotov; – preizkusni pilot; – geofizikalne preiskave pri večjih objektih; – obseg preostalih preiskav iz Tabele 1 je odvisen od dejanskih geotehničnih pogojev.

VRSTA PROJEKTA	SONDAŽNE RAZISKAVE	POGOSTOST DOPOLNILNIH GEOTEHNIČNIH RAZISKAV
GLOBOKO TEMELJENJE (UVRTANI PILOTI IN KESONI)	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne vrtine in penetracijske sonde DP, CPT, CPTU ter razkopi v kvadratni mreži s stranico 20–60 m v odvisnosti od pričakovane homogenosti tal in nagiba terena; – s penetracijskimi sondami ter razkopi se lahko nadomesti največ 50 % sondažnih vrtin; – pri gradnjah na pobočjih je treba območje raziskav razširiti v smeri padnice pobočja za oceno globalne stabilnosti gradnje; – piezometer za meritve nivojev talne vode in/ali pornih tlakov; – za temelje velikosti do 30 m² na stabilnih tleh najmanj ena vrtina ter na stabilnostno ogroženih območjih najmanj 3 preiskave v smeri kritičnega profila; – pri temeljenju večjih objektov naj vsaj tri vrtine segajo v stabilna tla v globino 3,0 m pod dno uvrtnih pilotov oz. kesonov. 	<ul style="list-style-type: none"> – SPT v vsaki nekoherentni plasti zemljin na 2,5 m globine, odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – presiometriške ali dilatometriške preiskave, pri zahtevnejših gradnjah in zahtevnejših pogojih tal tudi CPT in CPTU; – edometriške preiskave za oceno stisljivosti, konsolidacijskih parametrov in OCR-ja; – preiskave strižne trdnosti in indeksne preiskave se opravijo na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno odpornosti in izračun posedkov uvrtnih pilotov in kesonov; – terenske preiskave prepustnosti pri večjih kesonih; – geofizikalne preiskave pri večjih objektih; – preiskave strižne trdnosti in deformabilnosti kamnin v območju dna pilotov oz. kesonov; – preostale preiskave iz Tabele 1 v odvisnosti od pričakovanih geotehničnih pogojev temeljnih tal na mikrolokaciji.
GRADNJA IN TEMELJENJE NASIPOV	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne vrtine in penetracijske sonde DP, CPT in CPTU ter razkopi na medosni razdalji 20–60 m v odvisnosti od homogenosti tal in nagiba terena (s penetracijskimi sondami ter razkopi se lahko nadomesti največ 50 % sondažnih vrtin); – v kritičnih prečnih profilih, kjer je nasip najvišji oz. kjer so pogoji za temeljenje najbolj kritični, je treba izdelati vsaj tri vrtine ali DP- oz. CPT-sonde do stabilne podlage za oceno globalne stabilnosti gradnje; – kadar pričakovani model ali že izvedene raziskave kažejo na zahtevnejše pogoje temeljenja, je treba vgraditi piezometre za meritve nivojev talne vode in/ali pornih tlakov; – globina vrtin mora znašati najmanj 6,0 m oz. najmanj 80 % predvidene višine nasipov, na pobočnih lokacijah morajo raziskave segati v stabilna nepodajna tla; – vrtine morajo segati v stabilna tla v globino, do katere se aktivira 90 % pričakovanih posedkov. 	<ul style="list-style-type: none"> – SPT v vsaki nekoherentni plasti zemljin na 2,5 m globine, odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – krilna sonda oz. CPT in CPTU pri gradnjah večjih nasipov na koherentnih tleh; – meritve nivojev talne vode in pornih tlakov; – edometriške preiskave za oceno stisljivosti, konsolidacijskih parametrov in OCR-ja; – preiskave strižne trdnosti in indeksne preiskave se opravijo na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno odpornosti tal pod nasipom; – optimalna vlaga in gostota (Proctor) ter sukcijski potencial pri mehkih kamninah; – preiskave deformabilnosti, dilatacije, strižne trdnosti in prepustnosti zgoščenih nasipnih materialov; – geofizikalne preiskave v začetnih fazah projektiranja, pri večjih objektih ter na težko dostopnih lokacijah; – preostale preiskave iz Tabele 1 v odvisnosti od pričakovanih geotehničnih pogojev temeljnih tal na mikrolokaciji nasipa.

VRSTA PROJEKTA	SONDAŽNE RAZISKAVE	POGOSTOST DOPOLNILNIH GEOTEHNIČNIH RAZISKAV
VKOPI IN ODPRTE GRADBENE JAME	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne vrtine in penetracijske sonde DP, CPT, CPTU ter razkopi v osi vkopa oz. izkopa na medsebojni razdalji 20–60 m v odvisnosti od homogenosti tal in nagiba terena (sonde ter razkopi lahko nadomestijo največ 50 % vrtin); – pri gradnjah na pobočjih je treba v kritičnem prečnem profilu izdelati vsaj tri vrtine ali DP- oz. CPT penetracijske sonde do stabilne podlage za oceno globalne stabilnosti gradnje; – kadar pričakovani model kaže na zahtevnejše pogoje izkopavanja, ki se nanašajo na vodne pritiske, je treba vgraditi piezometre za meritve nivojev talne vode in/ali pornih tlakov; – pri gradbenih jamah je treba predvideti dodatne sondažne raziskave z vrtinami izven območja predvidenega temeljenja ter ob temeljih gradenj, ki bodo ob izvedbi izkopa gradbene jame potencialno ogrožene; – globina vrtin mora segati vsaj 2,0 m oz. najmanj 40 % predvidene globine izkopov pod dno izkopa, na pobočnih lokacijah morajo raziskave segati v stabilna tla; – kadar nivo talne vode ali piezometrična višina hw sega nad koto predvidenega izkopa, mora globina vrtin segati najmanj do globine hw + 2,0 m pod dno predvidenega izkopa. 	<ul style="list-style-type: none"> – SPT v vsaki nekoherentni plasti zemljin na 2,5 m globine, odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – geofizikalne preiskave v začetnih fazah projektiranja, pri večjih objektih ter na težko dostopnih lokacijah; – pri zelo globokih gradbenih jamah v prepustnostno heterogeno sestavljenih tleh pod nivojem podtalnice je treba opraviti sektorske meritve pornih tlakov; – krilna sonda oz. CPT in CPTU pri gradnjah večjih vkopov in gradbenih jam v koherentnih tleh; – meritve nivojev talne vode in pornih tlakov; – edometrske preiskave za oceno stisljivosti, konsolidacijskih parametrov in OCR-ja; – preiskave strižne trdnosti in indeksne preiskave se opravijo na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno stabilnosti vkopnih brežin; – preostale preiskave iz Tabele 1 se opravijo v odvisnosti od zahtevnosti pričakovanih geotehničnih pogojev na mikrolokaciji vkopa ali gradbene jame.
PODPORNE KONSTRUKCIJE	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne raziskave (vrtine, penetracijske sonde, razkopi) v medsebojni osni razdalji 20–60 m v vzdolžni smeri plazju, za manjše plazove najmanj tri preiskave, kar pa ne velja za zelo težko dostopne lokacije (sonde in razkopi lahko nadomestijo največ 50 % sondažnih vrtin); – pri gradnjah podpornih konstrukcij na pobočjih je treba v enem ali več kritičnih prečnih profilih izdelati vsaj tri vrtine v stabilno podlago za izračun vplivov na konstrukcijo in dokazovanje globalne stabilnosti gradnje; – pri sidranih podpornih konstrukcijah so potrebne raziskave v osi konstrukcije, v območju veznih delov sider ter pod podporno konstrukcijo; – pri varovanju sten izkopov pod nivojem talne vode ali pod piezometrično višino pri arteških tlakih je treba vgraditi tudi piezometre; – pri načrtovanju podpornih konstrukcij za varovanje gradbenih jam so potrebne raziskave ob obstoječih gradnjah v vplivnem območju izkopov; – globina vrtin mora segati vsaj 2,0 m oz. najmanj 40 % predvidene globine izkopov pod koto dna pilotov ali zagatnih sten pri varovanju izkopov in pri gradnjah podpornih konstrukcij, na pobočnih lokacijah morajo raziskave segati v stabilna tla; – kadar nivo talne vode ali piezometrična višina hw pri arteških tlakih sega nad koto predvidenega izkopa, mora globina vrtin segati najmanj do globine hw + 2,0 m pod dno pilotov ali zagatnih sten oz. drugih podpornih konstrukcij za zavarovanje izkopov. 	<ul style="list-style-type: none"> – Geofizikalne preiskave v začetnih fazah projektiranja, pri zahtevnih podpornih konstrukcijah ter na težko dostopnih lokacijah (najmanj vzdolžni in prečni geofizikalni profil); – pri zelo globokih vkopih in gradbenih jamah v prepustnostno heterogeno sestavljenih tleh pod nivojem podtalnice je treba opraviti kontinuirane ali občasne sektorske meritve pornih tlakov; – SPT v vsaki plasti nekoherentnih zemljin na 2,5 m globine; – odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v plasteh nekoherentnih zemljin; – krilna sonda oz. CPT ali CPTU pri gradnjah večjih podpornih konstrukcij na koherentnih tleh; – edometrske preiskave za oceno stisljivosti, konsolidacijskih parametrov in OCR-ja; – preiskave strižne trdnosti in indeksne preiskave je treba opraviti na vzorcih vseh plasti zemljin, ki so pomembne za oceno odpornosti tal, vplivov na podporne konstrukcije ter globalno stabilnost; – testna sidra (najmanj tri sidra); – poskusni izkop po odsekih za oceno primernosti izbrane tehnologije izvedbe podpornih zidov; – enoosna tlačna trdnost in test deformabilnosti intaktne kamnine na vzorcih, odvzetih na območju vpetosti podpornih konstrukcij ali pod temelji podpornih zidov.

VRSTA PROJEKTA	SONDAŽNE RAZISKAVE	POGOSTOST DOPOLNILNIH GEOTEHNIČNIH RAZISKAV
PLAZOVI IN SANACIJE	<ul style="list-style-type: none"> – Sondažne raziskave (vrtine, penetracijske sonde, razkopi) v medsebojni osni razdalji 20–60 m v vzdolžni smeri plazu, za manjše plazove najmanj tri preiskave, kar pa ne velja za zelo težko dostopne lokacije (sonde in razkopi lahko nadomestijo največ 50 % sondažnih vrtin); – za presoje stabilnosti je v enem ali več kritičnih prečnih profilov treba v odvisnosti od velikosti plazu izdelati vsaj po tri vrtine oz. druge sondažne raziskave do stabilne podlage pod porušnico; – če plaz resno ogroža obstoječe gradnje v vplivnem območju, so potrebne dodatne raziskave ob temeljih bližnjih zgradb; – kadar iz geodetskih podatkov, odlomnih in izravnih robov ter globine nepodajne podlage ni mogoče zanesljivo določiti poteka in globine diskontinuitete (porušnice), je treba vrtine opremiti z inklinometri za meritve horizontalnih premikov in/ali spremljanje piezometričnih nivojev; – pri plazovih v heterogeno sestavljenih pobočjih z globino več kot 10,0 m se po potrebi izvedejo sektorske meritve pornih tlakov; – pri sanacijah plazov s podpiranjem oz. z globokimi drenažami so potrebne raziskave tudi v vzdolžni osi podporne konstrukcije oz. vzdolž osi glavnih drenažnih reber; – pri sanacijah s sidranimi podpornimi konstrukcijami ter pri sistemskih sidranjih nestabilnih pobočjih morajo biti tla ustrezno raziskana v območjih veznih delov prednapetih geotehničnih in/ali pasivnih sider; – globina raziskav mora segati najmanj 3,0 m pod porušnico, pri sanacijah z vpetimi podpornimi konstrukcijami 2,0 m pod dno pilotov in najmanj 2,0 m v neprepustno podlago; – na lokacijah plazov, kjer v vplivni globini ni nepodajne in neprepustne podlage, mora globina raziskav segati 5,0 m pod temelje zidov oz. 5,0 m pod dno vpetih podpornih konstrukcij. 	<ul style="list-style-type: none"> – Geofizikalne preiskave v začetnih fazah projektiranja, pri velikih plazovih ter na težko dostopnih lokacijah (najmanj vzdolžni in prečni geofizikalni profil); – meritve premikov točk na površju (najmanj tri točke na območju plazu ter tri točke izven predvidenega območja plazu); – meritve premikov z inklinometri oz. ekstenziometri (najmanj v eni vrtini po tri serije kontrolnih meritev); – občasne ali kontinuirane meritve nivojev vode in pornih tlakov v piezometrih (najmanj ena sonda); – SPT v vsaki plasti na 2,5–3,0 m globine, CPT in CPTU po potrebi v odvisnosti od geotehničnih pogojev; – odvzem vzorcev kategorije A v vsaki plasti koherentnih zemljin ter kategorije B v nekoherentnih zemljinah; – vane preizkus, v odvisnosti od vrste tal; – presiometer (najmanj dve meritvi); – preizkusna sidra (najmanj tri testna sidra); – poskusni izkop (pri globoko temeljenih zidovih); – direktne strižne preiskave (v vsaki plasti koherentnih zemljin); – preiskave rezidualne strižne trdnosti (na vzorcih, odvzetih v območju diskontinuitete); – zrnavost in indeksni pokazatelji (najmanj tri preiskave); – vlažnost, konsistenca, prostorninska teža (najmanj tri preiskave); – 1D-edometer (v primerih temeljenja podpornih konstrukcij v koherentnih zemljinah); – prepustnost pri visokih nivojih talne vode in/ali pri velikih hidravličnih padcih; – enoosna tlačna trdnost in preizkus deformabilnosti intaktne kamnine; – točkovni trdnostni indeks.

POGLAVJE III

3. INŽENIRSKA GEOLOGIJA

3.1 NAČRTOVANJE TERENSKIH PREISKAV IN MERITEV

Načrtovanje raziskav se priporoča glede na:

- a) namen (npr.: sanacija plazov, zaščita gradbenih jam, brežin, temeljenje, predorogradnja);
- b) projektna raven raziskav (poročilo, elaborat IDZ, PGD, geotehnološki načrti PGD, PZI in PID) in
- c) raziskave, načrtovane glede na različne IG-lastnosti in litološko zgradbo terena:
 - ravninski teren: **stisljivi do visoko stisljivi sedimenti**;
 - ravninski teren: **malo do srednje stisljivi sedimenti**, kot so aluvialni nanosi, morski sedimenti, deluvij, odložen na ravninah, večinoma dobro konsolidirani sedimenti;
 - pobočja, prekrita z deluvialnimi/koluvialnimi sedimenti (zemljine); stabilna do plazljiva območja;
 - teren, zgrajen iz **polhribin do mehkih kamenin** ali **mešanih mehkih do trdih hribinskih mas**; **stabilna do plazljiva območja** in
 - teren – **trdne kamnine, stabilna področja**.

3.2 IZVEDBA TERENSKIH PREISKAV IN MERITEV

1. Inženirskogeološko kartiranje

(v primeru kameninske zgradbe uporaba hribinskih klasifikacij RMR, Q, SMR, GSI, v primeru zemljin uporaba uveljavljene modificirane AC-klasifikacije) in po potrebi z dopolnilnimi geofizikalnimi meritvami (geoelektrična ali seizmična tomografija, georadarske meritve).

2. Sondiranje terena s plitvo do srednje globoko ležečo osnovno hribino:

- jaški in razkopi z meritvami prostorske lege in odvzemom vzorcev osnovne hribine (v primeru plitvo ležeče hribinske podlage);
- raziskovalno vrtanje (v primeru globoko ležeče hribinske podlage) z »in situ« meritvami (SPT, PMT, DMT, SDMT, »crosshole«, »down hole«).

3. Sondiranje terena z globoko ležečo osnovno hribino:

- v primeru litološke zgradbe iz koherentnih do nekoherentnih zemljin je priporočljivo sondiranje terena s statičnim (CPTu) in/ali dinamičnim penetrometrom (DPSH – standardna težka penetracijska sonda – ali DPL – lahka penetracijska sonda za težje dostopne terene, uporabna za plitvejšje preiskave do pribl. 5,0 m);
- SDMT (seizmični dilatometer) za določitev modulov elastičnosti pri majhnih deformacijah in hkrati nedrenirane strižne trdnosti ter pornih tlakov; takšne preiskave omogočajo skupaj z laboratorijskimi preiskavami tudi klasificiranje zemljin za potrebe potresno varne gradnje in določitve likvefakcijskega potenciala za potrebe gradnje objektov geotehnične kategorije 3;
- v primeru sondiranja terena v koherentnih zemljinah s statično penetracijsko sondo CPTu je možno s posebnim vzorčevalnikom odvzeti neporušene vzorce zemljin, hkrati poleg trenja meriti porne tlake in izvesti disipacijske teste za določitev prepustnosti na posameznih odsekih različne litološke zgradbe (npr.: morski sedimenti z vložki drobnega peska in melja).

3.2.1. Inženirskogeološko kartiranje

Osnovni geološki podatki, vključno s tektoniko in splošno genezo, se pridobijo po Osnovni geološki karti Slovenije (OGK 1 : 100.000, izjemoma 1 : 50.000).

Sledi inženirskogeološko kartiranje terena, ki služi za prostorska planiranja pri OPPN-ju in vseh prostorskih načrtovanjih v gradbeništvu, rudarjenju idr.

Pomembno je za nadaljnje **načrtovanje ustreznih geotehničnih raziskav**, v odvisnosti od registriranih IG-enot, lastnosti in pojavov.

Za inženirskogeološko kartiranje terena – katerega končni izdelek je **inženirskogeološka karta z legendo** – je treba pridobiti geodetski posnetek terena, osnovne geološke, geografske, morfološke in hidrogeološke podatke terena in določiti genezo ozemlja ter nastopajočih litoloških členov.

IG-karte se izdelujejo za **različne ravni projektiranja v naslednjih predlaganih merilih** za potrebe projektiranja prometnic in objektov:

- IDZ – M = 1 : 5000 do 1000,
- PGD – M = 1 : 1000 do 500 in
- PZI – M = 1 : 500 do 100.

Za manjše objekte se priporoča izdelava IG-karte v merilih 1 : 500 do 1 : 100.

Najprej se zberejo inženirskogeološki podatki o nastopajočih zemljinah in kamninah, na podlagi OGK, nato pa se podatki dopolnjujejo s podrobnim kartiranjem in pridobljenimi rezultati sondažnih preiskav v različnih projektnih fazah.

Inženirskogeološka karta mora vsebovati vse nastopajoče IG-enote, ločene po geološki starosti, genezi in IG-lastnostih enot.

Pri kartiranju sledimo vsem nastopajočim **inženirskogeološkim enotam in pojavom ter procesom**:

- ločevanju meje preperine z osnovno hribino;
- ločevanju različnih litoloških enot (aluvij, deluvij, koluvij, umetni nasip ...);
- opazovanju strukturno tektonskih elementov v hribini: merjenju vpada plasti in razpok z določitvijo površinskega stanja in oceno GSI-ja (geološki trdnostni indeks);
- ločevanju labilnih pobočij, plazov in usadov;
- erozijskim grapam;
- odsekom vlažnega terena, izvirov, ponorom in
- morebitnim kraškimi pojavi.

Na cestah podrobno registriramo tudi večje razpoke oziroma posedke v asfaltu in morebitne drugačne poškodbe.

3.2.2 Delitev inženirskogeoloških lastnosti in pojavov

1. Inženirskogeološki pojavi in procesi:

- plaz, usad
(odlomni, narivni, izrivni in stranski robovi, razpoke, narinjene in izrinjene mase plazine);
- labilno pobočje;
- intenzivno delovanje erozije, erozijske grape;
- zakraselost in
- preperelost hribin.

2. Hidrogeološke karakteristike in geološki pojavi in procesi:

- vodotoki (večji, manjši, hudourniški, presihajoči, občasni), kanali;
- zamočvirjen teren;
- jezera, mlake;
- izviri, močila, ponori in
- vodnjaki.

3. Geomorfološki pojavi in oblike:

- jama (kraška, umetna),
- vrtača,
- terase in
- melišča.

4. Strukturno tektonski elementi:

- vpad plasti;
- vpad razpok;
- prelomi, prelomne cone, narivne cone in
- antiklinale ter sinklinale.

5. Oznake nastopajočih inženirskogeoloških enot:

- šrafura/barva in simbol na IG-karti – ustrezne polne in prekinjene črte in
- simbol in šrafura na IG-profilih – ustrezne polne in prekinjene črte
(za domnevne litološke meje).

Oznake nastopajočih inženirskogeoloških enot je treba kronološko podati v legendi. V legendi so podani tudi vsi ugotovljeni IG-pojavi in IG-procesi.

3.3 LABORATORIJSKE PREISKAVE IN NAČIN PRIDOBIVANJA VZORCEV NA PODLAGI SONDAŽNIH PREISKAV

a) V primeru hribinske zgradbe:

- točkovni trdnostni indeks (pri plitvo ležeči hribinski podlagi je možno pridobiti vzorce tudi v sondažnih jaških, sicer zadostuje izvedba udarnorotacijskega vrtanja – suho);
- preiskave enoosne tlačne trdnosti z meritvami deformacij (možno pridobiti vzorce tudi z odvzemom na odprtih kopih z diamantnim vrtanjem ali s strukturnim vrtanjem z diamantnimi kronami in vodnim hlajenjem) in
- direktne, rotacijske ali triosne strižne preiskave z meritvami pornih tlakov (za vzorčevanje je treba izvajati sondažne preiskave z diamantno krono in vodnim hlajenjem, v primeru mešane hribinske zgradbe je možno pridobiti jedra samo z uporabo polimerne izplake, ki obda vzorec, da ta ne razpade, ob hkratnem vodnem hlajenju).

b) V primeru zemljinske ali mešane zgradbe:

- nedrenirana strižna trdnost (koherentne zemljine);
- direktne, rotacijske ali triosne strižne preiskave in
- preiskave zrnivosti in prepustnosti ter stisljivosti.

Pri zelo zahtevnih objektih se izvedejo tudi meritve sukcijskih tlakov (pri direktnem ali triosnem strigu, tudi pri oedometriških preiskavah stisljivosti).

3.4 DOLOČITEV DINAMIČNIH PROCESOV NA PLAZOVITIH PODROČJIH IN BREŽINAH ZA POTREBE SANACIJE

- Postopek za določitev stabilizacijskih procesov pri sanacijah brežin (vkopi, nasipi) s podrobno definicijo problema in geotehnološko rešitvijo;
- določitev vzroka, vrste in obsega poškodbe;
- ugotovitev geološko-litološke zgradbe območja in
- določitev potrebnega obsega sanacije.

Obvezen je podroben inženirskogeološko-geotehnični pregled terena za ugotovitev vzrokov, vrste in obsega poškodb na plazovitem območju ali brežinah ter možnih vplivov na bližnjo in daljno okolico ter ustrezen načrt vrste in obsega geotehničnih terenskih in laboratorijskih preiskav:

- erozijske poškodbe;
- stabilnostni problem;
- nihanje podtalnice;
- nihanje struge vodotoka, hudournika, valovanje morja;
- dinamična prometna ali drugačna obremenitev in
- kombinacija vzrokov in vrste poškodb.

3.5 KLASIFIKACIJA PLAZOV

Klasifikacijo osnovnih mehanizmov gibanja plazov v kamninah ali zemljinah sta opredelila Cruden in Varnes (1996):

1. Lezenje je gibanje kamnin ali zemljin z drsenjem, odbijanjem ali valjanjem. Vse je odvisno od naklona in materiala.

2. Usad je rotacijsko gibanje na strmih pobočjih, ki ga gradijo, ali plošče/gmote iz kamnine ali koherentne zemljine ob drsni ploskvah, ločenih z diskontinuitetami.

2. Plaz je rotacijsko in/ali translacijsko gibanje kamnin ali zemljin, drsenje po eni ali več bolj ali manj diskretnih prekinjenih površin porušitev.

3. Razširjeno plazenje je segmentno premikanje kamnin ali zemljin, pri čemer splazele mase druga drugo premikajo, spodrivajo ali se narivajo druga prek druge.

4. Drobirski tok je neprekinjeno gibanje s porazdelitvijo hitrosti, ki spominja na pretok tekočine.

Medtem ko gre pri klasifikaciji za preproste mehanizme, je njihova identifikacija na terenu pogosto precej težavna. Na primer:

- pri velikih drsni ploskvah v hribini lahko po premikanju na določeni razdalji robovi razpadejo v grušč, ki se nato neodvisno premika;
- nekateri zemeljski plazovi oz. blatni tokovi se premikajo pretežno z drsenjem po drsni ploskvah (Hutchinson, 1988);
- drugi vključujejo neprekinjeno izrivanje homogene kamnine ali zemljine – »lezenje« (Varnes, 1978).

Če izrazi temeljijo izključno na mehanizmu gibanja, brez kakršnih koli raziskav (meritev), so lahko pogosto dvoumni.

Zato Cruden in Varnes (1996) predlagata klasifikacijo plazov, ki temelji na taksonomski klasifikaciji. Imena plazov je treba sestaviti iz izrazov, ki opisujejo naslednje attribute (lastnosti):

- lokacija (geološka osnova);
- velikost, razširjenost;
- vrsta plazenja;
- stopnja gibanja;
- vsebnost vode;
- vrsta materiala in
- vrsta gibanja.

Ker se lahko med plazenjem določene lastnosti spreminjajo, je treba isti opis uporabiti v vseh fazah gibanja.

Preglednica 3: Poenostavljena verzija klasifikacije plazov

Vrsta plazenja	Vrsta materiala		
Hribinski podor	preperela kamnina	grobe zemljine	fine zemljine
Preperinski plaz	močno preperete kamnine		
Plaz	plazenje kamnine	plazina iz pobočnega grušča	plazina iz vršajskih sedimentov
Usad	hribinski usad	zemljinski usad	preperinski zdrs
Globok plaz	mešana zgradba medsebojno premešanih sedimentov zemjin in preperelih hribin		
Drobirski tok		drobirski tok	blatni tok

Preglednica 4: SLOVAR za opis klasificiranja plazenja

A – aktivnost

Stanje	Razširjenost	Vrsta
aktiven reaktiviran fosilen neaktiven mirujoč zapuščen stabiliziran relikten	napredovanje retrogresivno razširjen zaprt padajoč premikajoč se	kompleksen sestavljen večkraten zaporeden usad

B – opis premikanja

Hitrost plazenja	Hitrost	Vsebnost vode	Material	Tip
izjemno hiter	10 m/s	suho	kamnine	lezenje
zelo hiter	5 m/s	vlažno	grušči	kotaljenje
hiter	3 m/min	mokro	gline, melji	odbijanje
zmerno hiter	1,8 m/uro	zelo mokro	naplavine	padanje
hiter	13 m/mesec			plazenje
zelo počasen	1,6 m/leto			drobirski tok
izredno počasen	16 mm/leto			blatni tok

Preglednica 5: Vprašanja, ki se nanašajo na stabilnost brežin in preiskave plazov

1. TOPOGRAFIJA?	1.1 Vzrok plazenja in potencialna potovalna pot. 1.2 Učinek in časovni potek naravne in človeške dejavnosti na topografiji.
2. GEOLOŠKA NASTAVITEV?	2.1 Regionalna stratigrafija, strukturna geologija. 2.2 Lokalna geologija OGI, IG-procesi in pojavi, struktura, geneza. 2.3 Geomorfologija pobočja in pripadajočih območij.
3. HIDROGEOLOGIJA?	3.1 Regionalni in lokalni model podzemne vode. 3.2 Piezometrični tlaki. 3.3 Razmerje piezometričnih pritiskov v odvisnosti od padavin, sneženja in snežnih razmer, temperature, pretoki, nivoji vode v vodonosnikih. 3.4 Učinek naravne ali človeške dejavnosti. 3.5 Kemija podzemne vode in viri. 3.6 Letna verjetnost presežnih tlakov podzemne vode.
4. ZGODOVINA IN PREMikanJE PLAZU?	4.1 Hitrost, celotni premik in vektorji gibanja površine. 4.2 Vsi tekoči premiki in povezava s hidrogeologijo in drugimi naravnimi ali človeškimi dejavnostmi. 4.3 Podatki o zgodovini gibanja in pogostosti drsenja, npr. deponije jalovine. 4.4 Geomorfološki ali zgodovinski dokazi o premikih brežin ali mejnih pobočij.
5. GEOTEHNIČNA KARAKTERIZACIJA PLAZOV ali POTENCIALNIH PLAZOV?	5.1 Faze in načini premikanja. 5.2 Klasifikacija gibanja. 5.3 Materialni dejavniki (klasifikacija zemljin, hribin, stopnja nasičenosti z vodo).
6. MEHANIZMI in DIMENZIJE PLAZOV ali potencialnih zdrsov?	6.1 Konfiguracija mejnih in notranjih površin plazov. 6.2 Opis vseh elementov plazov. 6.3 Dimenzije – površine, volumen. 6.4 Drsne ploskve.
7. MEHANIKA STRIŽENJA IN TRDNOSTI DRSNIH POVRŠIN?	7.1 Povezava s stratigrafijo, nastankom predhodnih obstoječih drsni površin. 7.2 Drenirano ali nedrenirano striženje. 7.3 Prvič ali ponovitev plazenja. 7.4 Kontrakcijsko ali dilatacijsko striženje. 7.5 Nasičen ali delno nasičen. 7.6 Trdnost pred ali po poružitvi ter napetostno deformacijske karakteristike karakteristik.
8. OCENA STABILNOSTI?	8.1 Trenutni in verjetni dejavniki varnosti kot posledica hidroloških, seizmičnih in človeških vplivov. 8.2 Oblika in velikost drsne ploskve (dejavnik varnosti).
9. DEFORMACIJE IN POTOVANJE, RAZDALJA?	9.1 Deformacije pred in po plazenju. 9.2 Oddaljenost in hitrost plazenja. 9.3 Verjetnost hitrega drsenja.

3.6 GEOTEHNIČNE PREISKAVE PRI PODZEMNIH GRADNJAH IN ZAHTEVNIH OBJEKTIH



Slika 4: Dejavniki, ki vplivajo na strukturne lastnosti pri podzemnih gradnjah

3.6.1 Podrobno kartiranje

- Inženirskogeološko kartiranje,
- podrobno strukturno geološko kartiranje,
- hidrogeološko kartiranje in
- inženirskogeološka sprotna spremljava izkopa (kartiranje čela pri klasični gradnji ali sprotno kartiranje izkopnih faz površinskih kopov, kamnolomov, zahtevnih gradbenih jam).

3.6.2 Sondažne preiskave z »in situ« meritvami ter odvzemom vzorcev

Za meritve v vrtnah je treba izvesti strukturno vrtnje v vertikalni in horizontalni smeri, lahko tudi raziskovalni rov, v primeru klasične gradnje predora pa predvrtavanje.

Vrtanje v hribinah se izvaja izključno z uporabo diamantnih kron z vodnim hlajenjem, v mešanih hribinskih masah pa je treba med vrtnjem dovajati polimerno izplako, da se jedra vrtnin ustrezno zaščitijo pred izpiranjem in posledičnim razpadanjem. Takšna tehnologija vrtnanja nam omogoča pridobivanje vzorcev za laboratorijske preiskave.

V vrtnah in/ali raziskovalnih rovih se izvajajo naslednje geotehnične preiskave in meritve ter obvezen odvzem vzorcev za različne geomehanske laboratorijske preiskave:

- meritve primarnega napetostnega stanja;
- presiometrijske meritve;
- dilatometrijske meritve;
- »down hole« in »cross hole« meritve;
- karotažne meritve;

- meritve prepustnosti hribin z vodo pod pritiskom, s tesnjenjem po globini in s prekrivanjem po odsekih (VDP);
- meritve prepustnosti s pomočjo nalivalnih in črpalnih preizkusov;
- vgradnja in meritve piezometrov in inklinometrov in
- vgradnja in meritve specialnih celic za meritve napetosti in deformacij po času.

3.7 SINTEZA ZBRANIH PODATKOV INŽENIRSKOGEOLOŠKIH PREISKAV

Končni izdelek inženirskogeološkega kartiranja, vključno z interpretacijo geotehničnih preiskav, je izdelava karakterističnih inženirskogeoloških prerezov v vzdolžni in prečni smeri obravnavanega objekta ali prometnice.

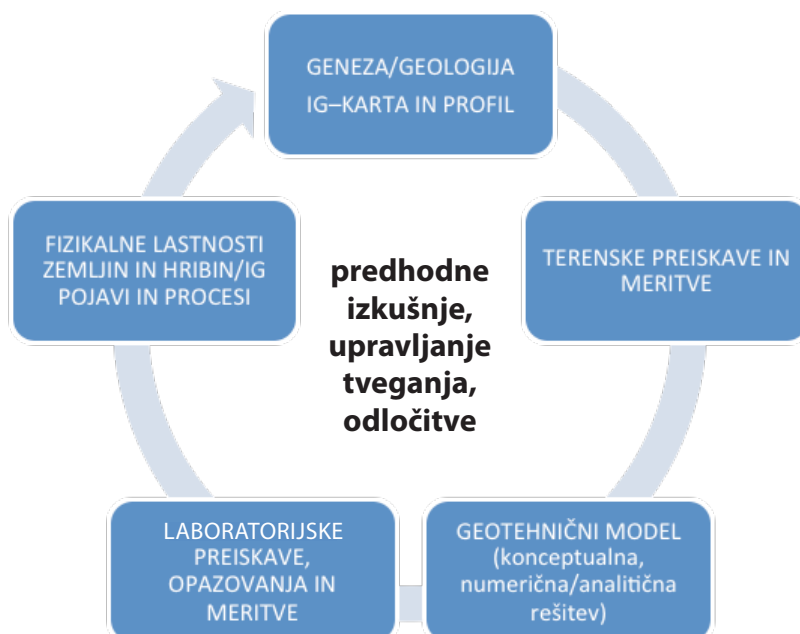
Inženirskogeološki prerez mora vsebovati poleg geološke zgradbe vse ugotovljene elemente, lastnosti, pojave in procese.

Primerna merila so za različne faze obdelave naslednja:

- IDZ – M = 1 : 200 do 500,
- PGD – M = 1 : 100 do 200,
- PZI – M = 1 : 100,
- PZI – M = 1 : 10 do 100, s podrobnimi prikazi geotehničnih ukrepov (npr.: piloti, sidra, »JG«-slopi ali prikaz različnih oblik temeljenja in/ali izboljšav tal), umeščenih v dano geološko sredino.

Inženirskogeološki prerezi služijo za izdelavo geotehničnega modela, ki služi nadaljnjim analizam vseh ugotovljenih inženirskogeoloških pojavov in procesov.

Geotehnični model naj bi čim bolj odražal vse naravne fizikalne procese, ki vplivajo na izvedbo gradnje, ugotovljene z inženirskogeološkimi in geotehničnimi ter geofizikalnimi preiskavami.



Slika 5: Potek in povezava inženirskogeoloških pojavov in procesov z geomehanskimi ter geotehničnimi preiskavami, upravljanjem tveganja in odločitvami ter rešitvijo geotehničnega modela

POGLAVJE IV

4. GEOFIZIKALNE PREISKAVE ZA POTREBE GEOLOŠKO-GEOTEHNIČNIH RAZISKAV

4.1 SPLOŠNO O GEOFIZIKALNIH PREISKAVAH

V geofiziki proučujemo fizikalne lastnosti zemlje oziroma njihovo spreminjanje v prostoru in/ali v času. 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 se različne snovi tudi ločijo med seboj. To dejstvo izkoriščamo v geofiziki. Tako lahko na podlagi spremembe v fizikalni lastnosti npr. določimo stik grušča, ki je odložen na kompaktno podlago, ločimo glino od peska, ugotovimo nivo talne vode, ob predhodni umeritvi ugotavljamo spreminjanje prepustnosti sedimentov, preverjamo, če in kje določene plasti izklinjajo, ali so presekae s prelomi, ugotavljamo kraške pojave in še številne druge aplikacije. Metode uporabne geofizike uporabljamo za študij geoloških struktur pod površjem, npr. pri odkrivanju mineralnih in energetskih surovin, v inženirski geologiji in hidrogeologiji, za potrebe geotehnike, arheologije, varovanja okolja, forenzike, arheologije idr.

V tem priročniku se bomo omejili na geofizikalne preiskave, ki se tipično uporabljajo za geološko-geotehnične namene.

V nadaljevanju bomo najprej podali nekaj informacij, ki veljajo za različne tipe in metode preiskav, nato pa bomo podrobneje predstavili najbolj uveljavljene geofizikalne preiskovalne metode za potrebe geoloških, geotehničnih, hidrogeoloških in okoljskih študij. Namen predstavitve uporabe geofizikalnih preiskav je pokazati, katere geofizikalne preiskave dajo v določenih okoljih najboljše rezultate pa tudi kakšne so njihove omejitve. Določene zelo specialne ali modificirane preiskave presegajo okvir tega priročnika, zato jih ne bomo obravnavali. Tu ne bomo podajali fizikalnih teoretskih osnov, ki so sicer podlaga za vse geofizikalne metode, prav tako se ne bomo spuščali v terenske postopke meritev in interpretacije podatkov. Za zaključek bomo podali še nekaj praktičnih primerov.

4.2 GEOFIZIKALNE PREISKAVE ZA POTREBE GEOLOŠKO GEOMEHANSKIH RAZISKAV

4.2.1 Vrste, načini in izvedba geofizikalnih preiskav

Glede na to, katero fizikalno lastnost kamnine proučujemo, ločimo naslednje glavne metode preiskav:

- seizmika,
- geoelektrika,
- elektromagnetne metode,
- gravimetrija,
- magnetometrija,
- geotermija in
- radiometrija.

Posebna oblika preiskav je geofizikalna karotaža, pri kateri vse zgoraj naštete metode izvajamo v vrtini. V geološko-geomehanski praksi največkrat uporabljamo prve tri naštete geofizikalne preiskave in geofizikalno karotažo.

Pri izboru primerne geofizikalne preiskave je bistveno poznavanje **fizikalnih lastnosti kamnin** in katera geofizikalna preiskava lahko zazna spremembe v določeni lastnosti. Na primer pri geoelektričnih upornostnih preiskavah preiskujemo električno polje pod površjem oziroma spremembe v padcih potenciala v različnih merskih točkah. Na podlagi izračunov ugotovimo, kje je upornostni električni kontrast, ki se pojavi ob stiku dveh snovi z različno električno upornostjo. To interpretiramo kot mejo med dvema geoelektričnima plastema. Z geofizikalnimi meritvami torej iščemo **anomalije**. Fizikalni pogoj za zaznavo anomalije pa je obstoj **fizikalnega kontrasta**, ki je posledica različnih lastnosti kamnin, plasti in con. Več o fizikalnih lastnostih, ki jih preiskujemo s posameznimi geofizikalnimi metodami, bo podano v poglavjih o geofizikalnih metodah.

S posameznimi geofizikalnimi metodami preiskujemo spreminjanje določene fizikalne lastnosti (npr. elastične lastnosti, električna upornost, dielektričnost idr.) pod površino, po vertikali (1D, govorimo o geofizikalnem sondiranju), v lateralni smeri (2D, profiliranje), s kombinacijo več profilov (3D, prostorske preiskave), določene meritve pa lahko tudi ponavljamo, tako da ugotovimo spreminjanje določenih lastnosti v času (4D, monitoring; to je zlasti uporabno pri preiskavah onesnaženj). Sodoben način preiskav je tehnika tomografije, kjer tako kot pri drugih aplikacijah (npr. v medicini in arheologiji) z veliko gostoto preiščemo izbran profil do določene globine. Označujejo jo tudi kot tehniko preslikavanja. Glede na to, da je ena od bistvenih prednosti geofizikalnih preiskav, da lahko poda geološko geomehansko stanje pod površino v obliki zveznega profila (vrtina pa je le točkovni podatek), v zadnjih letih, če je le mogoče, izvajamo preiskave v tomografski tehniki (seizmična refrakcijska tomografija, električna upornostna tomografija).

Odvisno od izbrane geofizikalne metode in tehnike se preiskave za potrebe geologije in geotehnike najpogosteje izvajajo:

- na površini (točkovno, v linijah, na zaključenem območju);
- v posamezni vrtini, med dvema ali več vrtinami;
- med vrtino in površino ter
- v podzemnih prostorih (npr. predorska cev, rudniški rov) in med več rovi.

Geofizikalne preiskave izvajamo **v različnih raziskovalnih fazah**. Tako kot se spreminjata raven raziskav in zahtevnost projektiranja, morata temu slediti tudi obseg in fokus geofizikalnih preiskav. V fazi idejnih zasnov je dovolj, če neko območje samo okvirno okarakteriziramo (litološko, okvirne globine do podlage), za fazo izvedbe pa je treba podati kvantitativne in kvalitativne podatke z zahtevano gostoto, ločljivostjo in natančnostjo.

V okviru kompleksnih geološko-geomehanskih elaboratov se geofizikalne preiskave lahko **izvajajo pred drugimi preiskavami, vzporedno z njimi in tudi po že izvedenih** drugih geoloških in geomehanskih preiskavah, odvisno od stopnje raziskanosti določenega območja. Pogosto se začnejo geofizikalne preiskave v zgodnji fazi projekta. Prednost izvedbe v zgodnji fazi za naročnika je predvsem ta, da pridobi osnovne podatke o določenem (neznanem) terenu v začetni fazi raziskav, ko še lahko vpliva na načrtovanje in usmerja projekt. Tudi v primeru heterogeno grajenih območij/plasti so geofizikalni podatki koristni, saj z njimi lahko predhodno izločimo kritična mesta (npr. glineni žep, lečo konglomerata, pokrito staro strugo), kamor se kasneje za natančnejšo določitev anomalij usmerijo vrtine, razkopi oz. druge terenske preiskave. Geofizikalne preiskave v vrtinah (npr. seizmične »downhole« preiskave ali geofizikalne

karotažne meritve) se izvajajo po končanem vrtanju (lahko tudi večkrat med samim vrtanjem pred vstavitvijo cevitve). Koristno je, če je v času izvajanja geofizikalnih preiskav na voljo že kaj podatkov, še zlasti, če so določene anomalije že znane ali obstajajo določene domneve oziroma hipoteze. V tem primeru lahko geofizikalne preiskave bolj ciljno usmerimo tako prostorsko kot tudi vsebinsko (npr. problem tektonike rešujemo drugače kot problem litologije), zato so tudi končni rezultati bolj ciljno naravnani. Fazni pristop pri načrtovanju geofizikalnih preiskav je velikokrat zelo dobrodošel, saj v prvi fazi, ko so geološki podatki za določeno lokacijo še dokaj neznani ali nezanesljivi, naredimo geofizikalne preiskave z manjšo gostoto, na preliminarno ugotovljene anomalne cone pa usmerimo dodatne sondažne (vrtine) in druge geološko-geomehanske preiskave. Vrtine služijo geofiziku za umeritev geofizikalnih meritev, ki je odločilnega pomena za kakovostno interpretacijo. Nato pristopimo k drugi fazi geofizikalnih preiskav, kjer že upoštevamo podatke vrtin, preiskave pa usmerimo na kritična mesta (npr. na mesta podpor, na območja z izrazito zakraselostjo, na slabo nosilne cone).

4.2.2 Načrt geofizikalnih preiskav

Pred začetkom geofizikalnih preiskav je treba pripraviti načrt preiskav, pri čemer je treba upoštevati:

- zahtevnost objekta
(manjši prepust, zahteven podporni objekt, industrijski objekt z regalnimi žerjavnimi progami, prisotnost nevarnih snovi idr.),
- velikost načrtovanega objekta,
- že obstoječe podatke o preiskovani lokaciji,
- geološko-geotehnične razmere oz. kakšen problem rešujemo
(debelina nekonsolidiranih sedimentov, pogoji za temeljenje, tektonske razmere, kraški pojavi ipd.),
- primernost posamezne geofizikalne metode za reševanje specifičnega geološko-geotehničnega problema in
- izvedljivost geofizikalnih preiskav na terenu
(dostopnost, konfiguracija terena, viri motenj ipd.).

Pri načrtovanju preiskav morata sodelovati uporabnik/naročnik in izvajalec geofizikalnih preiskav. Prvi predstavi problematiko in vrsto posega v prostor ter kaj pričakuje, izvajalec geofizikalnih preiskav pa predlaga optimalen program preiskav (katere geofizikalne metode uporabiti, faznost preiskav, ustrezen globinski doseg in ločljivost) ter primeren obseg preiskav in njihovo razporeditev v prostoru (koliko merskih točk, kam jih umestiti, prečne ali vzdolžne profile ipd.). Pri tem je zadostno prekritje preiskovanega območja z merskimi točkami ključnega pomena za kakovostno interpretacijo in s tem tudi za uporabnost geofizikalnih podatkov za geotehnično in druge stroke.

4.2.3 Prednosti, omejitve in točnost geofizikalnih preiskav

Geofizikalne preiskave imajo nekaj prednosti pred drugimi preiskavami pa tudi omejitve. Glavna prednost je njihova **nedeaktivnost**. Bistvo nedeaktivnosti je, da z meritvami ne spreminjamo stanja kamnin, kot je to primer npr. pri vrtanju, kjer so stene vrtine vsaj deloma poškodovane, prav tako je lahko (mikro)poškodovano tudi jedro. Z geofizikalnimi preiskavami torej dobimo podatke o »in situ« fizikalnih lastnostih kamnin. Prav tako pomembna dimenzija nedeaktivnosti pa je, da skoraj vse preiskave, ki jih izvajamo na površini, pri izvedbi na terenu puščajo minimalne sledi (pohojena trava, lokalno zbita zemljina na površini), nikakor pa ne škode. To dejstvo je zelo pomembno pri preiskavah v občutljivem okolju (npr. postavljanje

omejitev s strani lastnikov zemljišč in plačevanje škode, kulturnozgodovinski objekti) ter pri posegih, kjer bi z vrtnimi deli lahko povzročili določene neželene učinke, kot na primer na odlagališčih odpadkov.

Druga pomembna prednost geofizikalnih preiskav pred npr. vrtinami, razkopi, presiometer-skimi preiskavami je, da jih lahko izvajamo zvezno v profilih (2D) ali celo v 3D-tehnikah. Na ta način bolj okarakteriziramo stanje pod površjem. Interpolacija oziroma ekstrapolacija točkovnih podatkov lahko namreč v okoljih, kjer plasti lateralno izklinjajo ali so strukture prelomljene, še zlasti pa v kraškem okolju, ne podasta nujno realne slike. Na primer vrtina pokaže kompaktno kamnino do določene globine, v kraškem okolju pa je lahko čisto blizu te vrtine kraški kanal ali brezno, ki ga s točkovno preiskavo popolnoma spregledamo. V določenih primerih (npr., če je na dotičnem mestu načrtovana podpora objekta) je lahko takšna napaka kritična.

Določene omejitve geofizikalnih preiskav izhajajo iz dejstva, da neko območje ni primerno za izvajanje določene geofizikalne preiskave (npr. v bližini transformatorske postaje bodo geoelektrične meritve motene ali celo neuporabne, obstoječe talne instalacije 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 možno izvesti. Če bi npr. želeli pridobiti podatke o elastičnih lastnostih vzdolž prometne ceste, bi lahko seizmične meritve, s katerimi preiskujemo hitrost širjenja elastičnega valovanja pod površino, izvedli tako, da bi cesto v času meritev zaprli za promet in s tem preprečili, da bi vibracije zaradi gibanja vozil maskirale naš koristni signal.

Časovno omejitev pri izvedbi geofizikalnih preiskav predstavljajo tudi vremenski pogoji. Za dobro delovanje večine elektronskih merilnih instrumentov z visoko natančnostjo je priporočljiva minimalna temperatura okolice 5 °C. Deževno vreme ali tudi zelo visoka zračna vlažnost lahko povzroči prebijanje med elektrodami ali med kablji in tlemi, posledica pa je, da so meritve padca električnega potenciala neuporabne. Atmosferske razelektritve (strele) so lahko zelo nevarne za izvajalce geoelektričnih meritev. Veter povzroča mikrovibracije, kar deluje kot motnja pri seizmičnih meritvah. To sicer lahko obidem tako, da seizmične senzorje (t. i. geofone) zakopavamo, kar pa je zelo zamudno. Vplivu vetra pa se ne moremo izogniti v bližini dreves, kjer se vibracije zaradi vetra 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 zelo priporočljivo, da georadarske meritve izvajamo v času sušnega vremena (oziroma vsaj nekaj dni po zadnjih padavinah). Pogosto si lahko že s samimi ugodnimi vremenskimi pogoji v času izvajanja meritev zagotovimo kakovostne merske podatke.

Omejitve geofizikalnih preiskav velikokrat izhajajo iz nezadostne fizikalne kontrastnosti med preiskovanimi plastmi. Pogosto se intervali za določeno fizikalno lastnost za različne materiale prekrivajo med seboj (npr. hitrost širjenja elastičnega valovanja v glini je lahko zelo podobna tisti v kompaktni hribini). To rešujemo s sočasno izvedbo komplementarnih geofizikalnih preiskav na določenem mestu. V prejšnjem 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.

Pri geofizikalni interpretaciji, še zlasti, če preiskave izvajamo v pasivnem načinu, se pogosto srečamo z večlično interpretacijo. Praviloma pri računanju uporabljamo eno enačbo, ki vsebuje več neznank, kar posledično pomeni, da enačba ni enolično rešljiva. Število neznank lahko zmanjšamo, če imamo na voljo neodvisne podatke npr. iz vrtin ali druge geološke podatke. Pri večličnih modelih se srečamo s problemom, da določenim merskim podatkom ustrezajo

različni računsko pravilni modeli, ki pa ne odražajo vedno dejanskega stanja v naravi. Najustrežnji model zato pogosto določimo šele ob sodelovanju strokovnjakov različnih strok.

Rezultat geofizikalne preiskave so kvantitativni podatki (npr. globine do podlage, hitrost valovanja longitudinalnih valov, na podlagi česar sklepamo o vrsti in kakovosti kamnine), zato točnost geofizikalnih napovedi pogosto primerjamo s podatki vrtin. 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 vrtnanja 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. Če z vrtino določena meja fizikalno ni kontrastna, geofizikalne preiskave na takem mestu ne bodo zaznale meje. Pri ocenjevanju točnosti moramo tudi preveriti, če je bil geofizikalni podatek pridobljen na mestu vrtine ali pa je od njega morda zamaknjen. Podatki iz vrtine veljajo namreč samo na mestu vrtnanja, geofizikalni podatki pa so pogosto (sploh če merimo fizikalna polja) odraz prostora.

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 naj to dejstvo upošteva pri nadaljnjih izračunih.

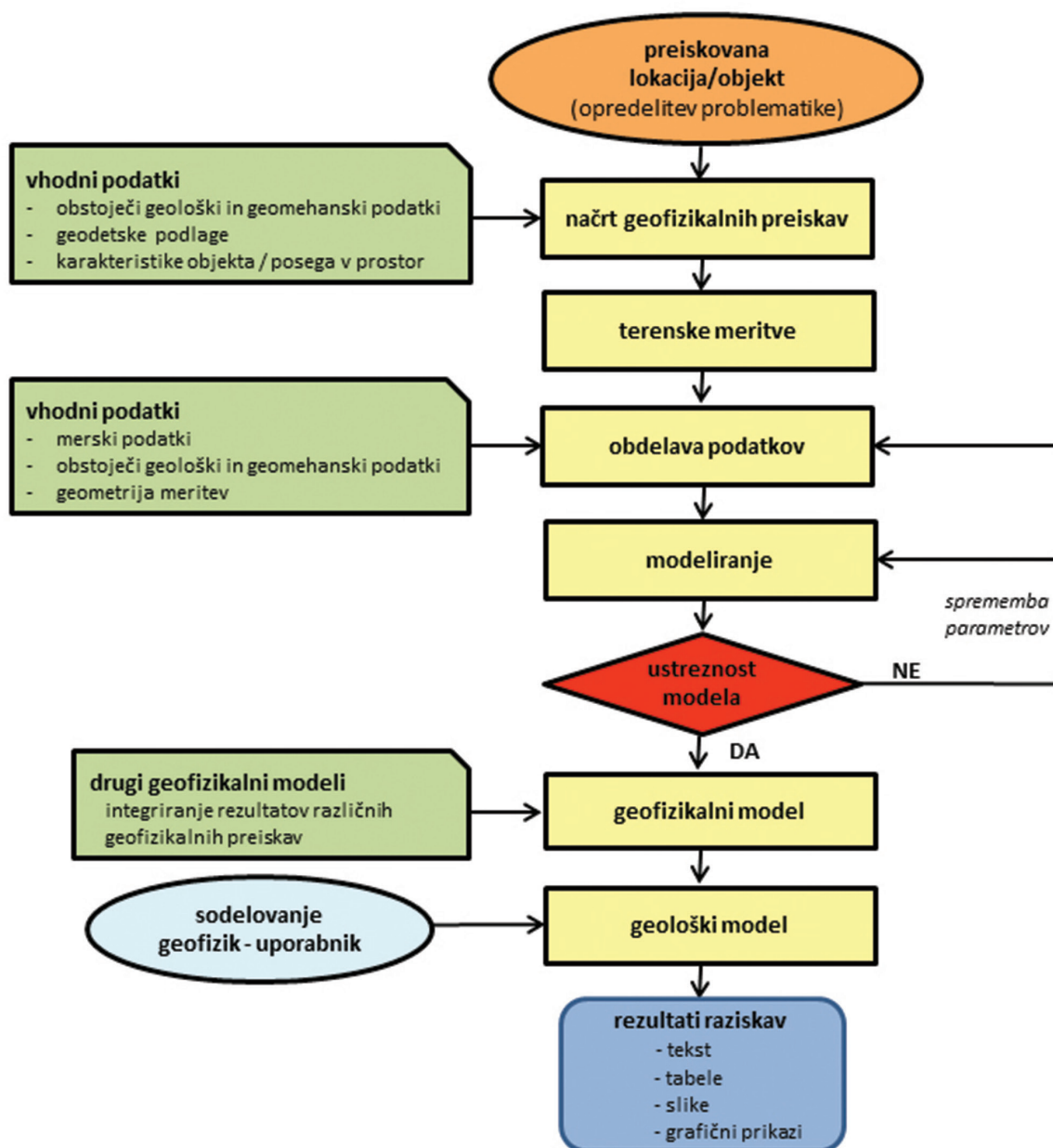
4.2.4 Oprema za izvajanje geofizikalnih meritev

Oprema za izvajanje geofizikalnih meritev je seveda odvisna od vrste metode in tehnike, ki jo uporabimo, od tega, ali pri preiskavah uporabimo naravna ali umetna fizikalna polja, od globine preiskav in od pogojev izvedbe. Za potrebe geološko geomehanskih raziskav se v največji meri uporabljajo umetno ustvarjena fizikalna polja oziroma signali, ki omogočajo ugodnejše razmerje koristni signal – šum, večjo ločljivost, pogosto pa tudi večji globinski doseg. Na tržišču je veliko komercialno dobavljive opreme, kljub temu pa so včasih potrebne prilagoditve merilne opreme specialnim izvedbenim pogojem. Terensko opremo lahko razdelimo na merilni instrument sam (z njim krmilimo meritve, merimo in beležimo merske podatke), oddajnike signala, sprejemnike fizikalnega odziva tal, povezovalne kable in drugo pomožno opremo. Kakovostna merilna oprema je robustna in prilagojena terenski izvedbi. Merilno opremo je treba primerno vzdrževati, pravilno hraniti in periodično kalibrirati (to določi proizvajalec opreme).

Za obdelavo in interpretacijo se uporabljajo osebni računalnik, specialni geofizikalni programski paketi za obdelavo in modeliranje ter splošno uveljavljeni programski paketi za prikaz rezultatov (profilov, kart, tabel ipd.).

4.2.5 Postopek izvajanja geofizikalnih preiskav

Za večino geofizikalnih preiskav lahko postavimo splošno shemo izvedbenih postopkov (Slika 6). Potek od postavitve problema do začetka terenske izvedbe smo že obdelali v poglavju 4.2.2. Terenska izvedba meritev je zelo pomembna faza, saj je kakovostna interpretacija močno odvisna od kakovostnih merskih podatkov. Pri izvajanju meritev je še zlasti pomembno paziti na pravilno postavitve merskih točk, profilov ipd. v prostoru in na primerno nastavitve merskih parametrov (določitev merilne skale, občutljivosti, ponovljivosti, filtracije šumov, določitev snemalnega časa idr.). Običajno pred začetkom pravih meritev opravimo testne meritve, kjer vse prej omenjene merske parametre nastavimo kar najbolj optimalno.



Slika 6: Geofizikalne preiskave od naročila do izvedbe – shematski prikaz

Posamezni postopki na shemi na Sliki 6 lahko odpadejo, če ni na voljo nobenih obstoječih podatkov, lahko pa se izvajajo večkrat. Modeliranje vedno izvajamo večkrat (tj. iterativno), saj se s spreminjanjem vhodnih parametrov približujemo računsko najustreznejšemu modelu. Pogosto tudi ponovimo/spremenimo postopke obdelave (npr. nastavitve filtrov, ojačanje določenih frekvenc ipd.). Umerjanje geofizikalnih podatkov lahko izvedemo že v začetni fazi modeliranja (če že imamo podatke vrtin ali druge zanesljive podatke) ali naknadno, lahko tudi več let kasneje, ko pridobimo dodatne podatke – v tem primeru govorimo o reinterpretaciji.

Merske podatke vsake uporabljene geofizikalne metode najprej neodvisno ovrednotimo. Šele kasneje primerjamo parcialne rezultate posameznih uporabljenih preiskovalnih metod in na podlagi določenih kriterijev postavimo enoten geofizikalni model. Na ta način zagotovimo večjo objektivnost v prvi fazi obdelave in modeliranja (»neokuženost« obdelovalca). Obstajajo različni načini interpretacije – od empiričnih do natančnih fizikalno-matematičnih relacij. Modeliranje v geofiziki poteka z direktno ali pa z inverzno interpretacijo. Geofizikalni model je

običajno 1D-, 2D-, 3D-prikaz, na katerem so prikazane spremembe določene fizikalne lastnosti (npr. električne upornosti, hitrosti širjenja elastičnih valov) po globini, v lateralni in vertikalni smeri ali v prostoru. Takšna oblika še ni razumljiva negeofiziku in tako zanj tudi še ni uporabna.

Kritična faza je prevedba geofizikalnega modela v geološki model. V tej fazi fizikalne parametre na podlagi izmerjenih, literaturnih, izkustvenih ali drugih podatkov prevedemo v najustreznejše litološke ekvivalente. Na primer na podlagi meritev na izdanku določimo električno upornost peščenjaka (take umeritve veljajo le za istovrstne litološke člene na omejenem območju, v nasprotnem primeru je lahko takšno vzporejanje zelo zavajajoče!). Kjer v geofizikalnem modelu nastopajo podobne vrednosti, kot smo jih izmerili na peščenjaku, sklepamo, da je na takem območju peščenjak in ne na primer meljevec. Umeritev pogosto izvajamo s pomočjo vrтин, kjer v model vnesemo »prave« debeline plasti na določenem mestu in predpišemo, da se vrednosti v takih vozliščih modela pri iteriranju ne spreminjajo (fiksiramo določene vrednosti). Na ta način je v modelu manj neznank, kar pomeni verjetnejši končni model. Pogosto pripravimo tudi variantne modele, to je takšne, ki so matematično in fizikalno vsi pravilni, geološko pa morda niso vsi enako verjetni. Pri prevajanju geofizikalnega modela v geološkega je treba vgraditi določeno mero geološke logike (kaj je strukturno geološko ali litološko sploh možno). Takšen kritični premislek (tudi če je tak model obremenjen z večjo računsko napako, kot nam ga je morda uspelo doseči z alternativnim modelom) je pomembnejši kot težnja k računsko popolnemu modelu, ki pa geološko ni smiseln. V tej fazi je stopnja subjektivnosti interpretacije največja in najbolj pridejo do izraza skrbnost in izkušnje obdelovalca. Praviloma naj bi pri prevedbi geofizikalnega modela v geološko geotehničnega sodeloval tudi strokovnjak geolog, hidrogeolog, geomehanik oz. drug strokovnjak, ki bo geofizikalne rezultate neposredno uporabljal. Dosledno interdisciplinarno prevajanje geofizikalnih modelov v geološke bi močno pripomoglo k realnejšemu poznavanju stanja pod površjem in s tem maksimiranju vložka v geofizikalne preiskave.

Rezultati geofizikalnih preiskav se predstavijo v obliki grafov, profilov, blok diagramov, tabel, slik in tudi besedilno. V besedilnem delu je treba obvezno podati diskusijo rezultatov, zaključke in morebitna priporočila. Naročniku geofizikalnih preiskav je treba predati vse merske podatke, obdelane podatke (modele, sheme idr.) in poročilo samo v tiskani in v elektronski obliki.

4.2.6 Nekaj priporočil pri načrtovanju geofizikalnih preiskav

Ustrezno načrtovanje geofizikalnih preiskav v okviru geološko-geomehanskih raziskav je kompleksno in je, kot je že bilo predstavljeno v poglavju 4.2.2, odvisno od številnih dejavnikov. Nekaj splošno veljavnih priporočil podajamo v nadaljevanju.

- Praviloma na vsakem raziskovalnem območju načrtujemo preiskave z **več komplementarnimi geofizikalnimi metodami**. Pri preiskavah za višje faze projektiranja (PGD, PZI) je tak način nujen. Na ta način nadgradimo omejitve posamezne geofizikalne preiskave in se v veliki meri lahko izognemo napačni interpretaciji. Primer: Po istih profilih izvedemo meritve z električno upornostno tomografijo in seizmično refrakcijsko tomografijo; včasih dodamo še nekaj točkovnih preiskav (geoelektrično sondiranje, meritve intervalnih seizmičnih hitrosti v vrтинah idr.) za umeritev.
- Če je le mogoče (če to prostor dopušča), poskušamo raziskovalno **območje prekriti prostorsko**, npr. z več vzporednimi profili, križnimi profili, z razporeditvijo točkovnih meritev v prostoru, na podlagi česar nato konstruiramo enoten geofizikalni model. Na ta način pridobimo širšo prostorsko sliko o zgradbi pod površino, s čimer kakovostno nadgradimo podatke vrтин, meritve na izdankih ipd. Tak pristop je še zlasti primeren v kompleksnejših geoloških okoljih (npr. s prelomi razsekana območja, kraško okolje).

- Pomembnost in dimenzije objekta/posega v prostor ter faza projektiranja, za katero se geološko-geomehanske raziskave izvajajo, določajo obseg geofizikalnih preiskav. Glede na to, kakšne detajle želimo ugotoviti oziroma **kakšno najmanjšo anomalijo želimo detektirati**, določimo ločljivost, ki jo običajno pogojuje razmik med senzorji (npr. razmik med sosednjimi elektrodami, horizontalno vzorčevanje pri georadarskih preiskavah, interval meritve v vrtinah idr.). Vsaka anomalija je po principu iz geometrije določena z dvema točkama, zato moramo imeti tudi pri geofizikalnih preiskavah možnost detektirati posamezno anomalijo na dveh sosednjih senzorjih. Na primer, če bo razmik med geofoni 4 m, ne bomo mogli detektirati anomalij dimenzije 3 m. Isto velja tudi za razmik merskih profilov. Ta zahteva je pri preiskavah, kjer preiskujemo fizikalna polja (npr. potencialna električna polja), nekoliko ublažena, prav tako k boljši ločljivosti pripomore tudi tomografska tehnika, vendar je kljub temu treba horizontalno in vertikalno ločljivost skrbno načrtovati.
- Vrtanje vrtin (še posebej globljih) je običajno relativno velik strošek, zato je smiselno, da se **iz take vrtnice pridobijo vsi možni podatki**, ki jih stroke omogočajo. Poleg odvzema jedra za različne laboratorijske preiskave je tako smiselno, da se v vrtini izvedejo tudi geofizikalne karotažne preiskave. Nabor ustreznih sond (vrste preiskav) se določi glede na pričakovano litološko zgradbo. Včasih se v vrtinah izvedejo še posebne vrtinske meritve, npr. meritve intervalnih seizmičnih hitrosti, še zlasti, ko želimo pridobiti podatke o »in situ« elastičnih dinamičnih karakteristikah na določenih lokacijah.
- Geofizikalno interpretacijo lahko izvedemo samostojno, lahko pa pri tem upoštevamo že znane podatke o zgradbi območja. Ti negeofizikalni podatki služijo **za umeritev fizikalnih parametrov** (npr., katero hitrostno območje je tipično za razpokano hribino ali kakšen je interval električnih upornosti za glino). Umeritve veljajo samo za območje, na katero se nanašajo, in za določeno litostratigrafsko enoto. Negeofizikalni podatki, ki jih uporabimo za umeritev, bistveno izboljšajo kakovost geofizikalnih modelov in zmanjšajo intervale možne napake v modelih. Zato je določen fond geofizikalnih preiskav (npr. 15–20 % vseh preiskav) smiselno načrtovati za umerjanje, sploh pri zahtevnejših preiskavah in posegih v prostor.
- V preiskave je treba **zajeti območje celotnega objekta** in praviloma še bližnje okolice (npr., če je dolžina načrtovanega viadukta 100 m, je priporočljivo, da so geofizikalni profili dolgi približno 120–130 m). Analogno velja za globinski doseg: če je niveleta objekta npr. 30 m globoko, naj globinski doseg geofizikalnih preiskav zajame vsaj 40 m globine.
- Za **zelo detajlno karakteriziranje manjših zaključenih območij** (npr. temeljenje pomembnih energetskih ali jedrskih objektov, umeščanje večjih premostitvenih objektov ipd.), kjer sta pomembni poznavanje lege plasti, tudi zelo tankih vmesnih vložkov, ter spreminjanje njihovih lastnosti v lateralni smeri, se poleg površinskih preiskav načrtujejo tudi vrtinske preiskave med več vrtinami (t. i. »crosshole« preiskave).
- Geofizikalne preiskave so zelo primerne **za izvajanje okoljskega monitoringa**. Prva prednost je nedestruktivnost geofizikalnih preiskav, druga pa njihova zveznost. Za spremljanje spreminjanja določene lastnosti pod površino v času moramo izvesti t. i. ničelne meritve, to je meritve pred posegom v prostor. Za umeritev je treba imeti na voljo nekaj vrtin, kjer se spremljajo določeni parametri (npr. koncentracije določenih snovi) točkovo. Geofizikalne meritve se periodično ponavljajo (npr. mesečno, polletno), vedno po istih merskih profilih. Takšen monitoring je primeren za spremljanje onesnaženja iz odlagališč ter preverjanje puščanja pregrad ali nasipov.
- Z geofizikalnimi preiskavami lahko uspešno **preverimo kakovost izvedbe sanacijskih posegov** (npr. zamenjave tal, sanacije kraških anomalij, uspešnost utrjevanja nasipov ipd.). Tudi v tem primeru izvedemo zvezne meritve v času n (običajno pred posegom), nato pa meritve ponovimo po izvedeni sanaciji. Pri tem lahko preverimo, če smo s sanacijskimi ukrepi dosegli zahtevane parametre tal (npr. zbitost nasipov, odstranitev glinastih žepov).

4.2.7 Pregled najprimernejših geofizikalnih preiskav

S posamezno geofizikalno metodo preiskujemo spremembe v eni (izjemoma več) določeni fizikalni lastnosti. Med fizikalnimi lastnostmi kamnin pogosto ni nobene korelacije, na primer dielektričnost peščenjaka nima nobene povezave z njegovo gostoto, prav tako električna upornost apnenca nič ne vpliva na razširjanje seizmičnih valov v njem. V takih primerih imamo opravka s komplementarnimi preiskovalnimi metodami, kar nam omogoča, da ob hkratni izvedbi dveh ali več metod določene omejitve prve metode nadgradimo s prednostmi druge in obratno. Vsaka geofizikalna metoda ima določene prednosti in omejitve – univerzalna preiskovalna metoda, ki bi dala optimalne rezultate v vseh geoloških okoljih in za vse aplikacije, ne obstaja. Primeren izbor preiskovalnih metod je ključ za kakovostno in čim realnejšo interpretacijo.

Z željo, da bi strokovnjakom različnih geostrok vsaj okvirno predstavili, katere geofizikalne preiskave so najuspešnejše pri reševanju določenih »tipskih« vprašanj, smo pripravili Preglednico 6. Pri pripravi preglednice smo pregledali nekatere vire (citirano spodaj), upoštevali pa smo tudi specifike slovenskega ozemlja in svoje praktične izkušnje. Vse preiskovalne metode so uveljavljene v inženirski praksi in so primerne za karakterizacijo podpovršja za potrebe geoloških, geotehničnih, hidrogeoloških in okoljskih raziskav. Pregled je omejen na preiskovalne metode, ki se največ uporabljajo za potrebe geologije in geotehnike, in na preiskave, ki se izvajajo s površine.

Preglednica 6:

Geofizikalne metode	Seizmika		Geoelektrika		Elektromagnetne metode			
	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/sladka 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).

Poenostavljen pregled primernih geofizikalnih preiskav za reševanje določenih tipskih vprašanj v geoloških, geotehničnih, hidrogeoloških in okoljskih študijah (upoštevani viri):

- ASTM D6429, 2011. Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. ASTM, ZDA.
- Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, 1995. US Army Corps of Engineers, Engineering and Design.
- Parasnis, D. H., 2007. Principles of Applied Geophysics. 5th edition, Chapman & Hall.
- Avtor, izkušnje v slovenskem prostoru.

4.3 SEIZMIČNE METODE PREISKAV

Vse seizmične metode temeljijo na dejstvu, da seizmični valovi skozi različne kamnine potujejo z različno hitrostjo. Hitrost je odvisna od elastičnih lastnosti kamnin in od njihove gostote. Načeloma so hitrosti večje v kamninah z večjo gostoto oziroma v kamninah, ki so geološko starejše, nerazpokane, nepreperene, konsolidirane in/ali zasičene z vodo. Za seizmično valovanje velja teorija elastičnosti. Razmerja med elastičnostjo in deformacijo v območju elastičnosti, ki jih uporabljamo za izračun elastičnih parametrov v geofiziki, so naslednja:

$$\text{Poissonov količnik } \nu \quad \nu = \frac{((V_p/V_s)^2 - 0,5) - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$$

$$\text{Modul elastičnosti } E \quad E = 2(1 + \nu) \sigma V_s^2$$

$$\text{Strižni modul } G \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$\text{Kompresijski modul } K \quad K = \frac{E}{3(1 + \nu)}$$

V_p, V_s, \dots hitrost longitudinalnega, strižnega valovanja

σ gostota snovi

Na podlagi razmerja med hitrostjo P in hitrostjo S (V_p in V_s v gornjih enačbah) in ob poznavanju gostote kamnin (označeno kot s v gornjih enačbah) izračunamo Poissonov količnik in dinamične elastične module. Dinamični moduli in statični moduli se zaradi fizikalnih pogojev, v katerih so pridobljeni, običajno razlikujejo.

Glede na to, kako seizmični valovi potujejo skozi plasti pod površjem, ločimo refrakcijske in refleksijske seizmične valove. Prvi se na meji plasti z različnimi elastičnimi lastnostmi lomijo, drugi pa odbijejo. Vsi refraktirani in reflektirani valovi sodijo v skupino prostorskih valov. Poleg prostorskih valov je za geotehniko pomembna tudi skupina površinskega valovanja. Skupine poimenujemo glede na to, kako se delci gibljejo: pri prostorskem valovanju ločimo P-valove (poimenovane tudi primarni, longitudinalni, vzdolžni valovi), kjer se delci gibljejo v smeri širjenja valovanja, in S-valove (poimenovane tudi prečni, transversalni ali strižni v.), kjer delci nihajo pravokotno na smer širjenja valovanja. Pri površinskih valovih pa ločimo valovanja, kjer se delci gibljejo retrogradno in hkrati eliptično, ter tista, kjer nihajo v horizontalni ravnini. P-valovi imajo največjo hitrost (zato tudi tako poimenovanje) in prvi dosežejo površino. Strižno valovanje je približno dvakrat počasnejše od longitudinalnega. Tekočine in plini nimajo strižne trdnosti, zato se S-valovi skozi njih ne širijo.

Opremo za izvedbo seizmičnih preiskav sestavljajo seizmograf, ki krmili meritve, vzorčuje, prikazuje in beleži podatke, sprejemniki seizmičnega valovanja – geofoni in vir seizmičnega valovanja, ki je lahko različen (kladivo, seizmična puška, eksploziv, padajoča utež, električni viri idr.) vse pa povezujejo seizmični kabli. Seizmografi so običajno večkanalni, od 6- do 48-kanalni

(še precej višje je število kanalov pri refleksiji). Za proženje instrumenta brez časovnega zamika uporabljamo še kabel za proženje (t. i. triganje). Funkcija geofona je, da valovanje pretvori v električni signal. Pri izbiri geofonov je treba upoštevati, kako je usmerjena merilna tuljava (to-rej, ali gre za P- ali S-geofone) in kakšna je njihova lastna frekvenca.

Tudi seizmične preiskave so podvržene motnjam. Naključne motnje zunanjega izvora so vibracije zaradi različnih naravnih in antropogenih virov (veter, valovanje morja, daljnovodi, gibanje vozil, večje blizupovršinske nehomogenosti, kot so na primer bloki kamnine v nasutju ali praznine v kamnini, idr.). Nekatere od teh motenj je možno omiliti ali odstraniti z določenimi postopki pri meritvah samih, nekatere pa s filtriranjem signala. Drugovrstne motnje pa so posledica fizikalnih zakonitosti razširjanja valovanja in vrste seizmičnega vira, ki jih tudi lahko delno odstranimo.

Seizmične metode imajo nekaj pomembnih prednosti, in sicer je interpretacija merskih podatkov (če so seveda podatki kakovostni in brez šumov) bolj dodelana kot pri drugih geofizikalnih metodah. Njihova uporabnost v geotehnikih temelji prav na neposredni povezavi med hitrostjo seizmičnega valovanja in elastičnimi parametri plasti. Seizmične metode dajejo zelo dobre rezultate v sedimentnih bazenih oziroma povsod, kjer mehkejša kamnine ležijo na trdnejši podlagi. Zato jih uporabljamo za določanje oblike podlage sedimentov, za ugotavljanje meje med nekonsolidiranimi in konsolidiranimi sedimenti, za določanje prelomov in razpokanih con, za določevanje nivoja talne vode, za ugotavljanje uspešnosti postopkov izboljšave tal ter za ugotavljanje »in situ« elastičnih lastnosti kamnin. Zaradi slednjega so seizmične meritve ustrezne tudi za ugotavljanje primernosti kamnine za ripanje (v kamnolomih, pri gradnji usekov) in za določanje tipa tal po zahtevah Evrokoda 8.

Pri geološko-geotehničnih raziskavah močno prevladujejo refrakcijske preiskave, refleksijske preiskave uporabimo samo izjemoma, in še to v visoko resolucijskem načinu. V zadnjih dvajsetih letih so v vzponu tudi metode, ki obravnavajo površinske valove – še zlasti metoda MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Vsako od teh treh bomo posebej obravnavali v nadaljevanju.

Preglednica 7:

Preiskovana fizikalna lastnost:	hitrost širjenja elastičnega valovanja (enota m/s)
Tehnike preiskav:	2D seizmično refrakcijsko profiliranje
	2D seizmična refrakcijska tomografija (SRT – Seismic Refraction Tomography)
	2D refleksijska seizmika
	3D refleksijska seizmika
	2D visokoresolucijska seizmična refleksija
	MASW
Globinski zajem:	do 50 m (za posebne namene tudi >> 100 m)
Ločljivost:	odvisna od dominantne frekvence valovanja, od seizmičnih hitrosti in od geometrije snemanja (razmika geofonov, položaja strelnih točk) (tipično 1–5 m, v visokoresolucijskem načinu < 0,5 m), pada z globino pri vseh tehnikah
Merski podatki:	refrakcija: diagrami čas – pot ($t - x$) refleksija: seizmogrami razdalja – dvojni čas
Rezultat interpretacije:	2D: spremljanje sprememb v hitrosti valovanja vzdolž profilov in v globino; kjer prihaja do odboja/loma seizmičnih valov, interpretiramo anomalije (meje dveh plasti, prelom idr.)

4.3.1 Seizmično refrakcijsko profiliranje in refrakcijska tomografija

Pri refrakcijski seizmiki smo osredotočeni na valove, ki se na mejah z različnimi elastičnimi lastnostmi lomijo oz. refraktirajo. Meritve potekajo vzdolž profila, na katerem so v običajno pravilnem razmiku razvrščeni geofoni. Vzdolž profila prožimo seizmično energijo v več točkah, ki so navadno razporejene simetrično. Z meritvami beležimo čas, ki ga potrebuje signal, da pripotuje od seizmičnega vira pod kritičnim kotom (kritični kot je pogoj za lom valov) do stika dveh seizmično različnih medijev, potuje vzdolž stika in se nato pod kritičnim kotom zopet odbije na površino, kjer ga zaznamo.

Pri refrakcijskih preiskavah merimo P- in pogosto tudi S-valovanje, za vsako pa moramo prilagoditi merilno opremo. Refrakcijsko profiliranje plitvega dosega izvajamo z medgeofonsko razdaljo 1–5 m, pri tem pa uporabimo nizko frekvenčne geofone (do 14 Hz) P- ali S-izvedbe, kot vir pa običajno zadostuje že kladivo. Običajen postopek sta seštevanje več udarcev na posamezni merski točki in ojačanje signalov, s čimer precej izboljšamo razmerje koristni signal – šum. Pri meritvah P-valovanja je smer udarca navzdol po ploščici, pri meritvah S-valovanja pa v bočni smeri, pri tem pa uporabimo v tla fiksirano klado. Na seizmografu simultano beležimo sledi potovanja seizmičnih valov za vse aktivne kanale/geofone.

Na diagramih čas prihodov valovanja – razdalja do geofonov odčitamo čase prvih prihodov, ki praviloma predstavljajo refraktiran val. S pomočjo geometrije sprejemnikov in strelnih mest ter odčitanih časov prvih prihodov z določenimi metodami (za preproste primere metoda presečnega časa in metoda razdalje prehitevanja, v primeru lateralnega spreminjanja hitrosti pa recipročne metode) izračunamo hitrosti širjenja valovanja skozi različne plasti ter z različnimi matematičnimi postopki tudi globine posameznih stikov. Kot izhodišče privzamemo, da so hitrosti znotraj ene plasti homogene in izotropne. Refrakcijsko tehniko zaradi fizikalnih zakonitosti lomljenja žarkov lahko izvajamo samo v okoljih, kjer se hitrost širjenja valovanja v sosednjih plasteh veča z globino, torej $v_1 < v_2 < v_3 \dots$. Nadaljnje omejitve pri uspešni uporabi te tehnike so lahko posledica premajhnega hitrostnega kontrasta ali pa pretanke plasti, kar lahko vodi v napačno interpretacijo. Pri preračunih moramo upoštevati tudi relief terena oziroma višinske razlike med geofoni.

Globinski doseg metode je močno odvisen od hitrosti medijev, geometrije refrakcijske razvrstitve in njene dolžine. Seizmične refrakcijske preiskave v grobem izvajamo v tehniki refrakcijskega profiliranja, v zadnjih letih pa tudi s tehniko refrakcijske tomografije. Kot smo že omenili, je pogoj za izvajanje refrakcijskega profiliranja povečevanje hitrosti z globino. Pri tomografski tehniki pa takšna razvrstitev plasti ni več pogoj, saj se za obdelavo in interpretacijo uporablja drugačen pristop, t. i. direktno modeliranje s pomočjo optimizacije. Metoda temelji na postavitvi optimalnega modela in izračunu prvih prihodov in njihovi primerjavi z izmerjenimi časi prvih prihodov. To je iterativna metoda, ki zahteva zmogljivo računalniško podporo. Kot je zahteva vsake tomografske tehnike, tudi pri seizmični refrakcijski tomografiji meritve izvajamo z gosto postavljenimi merskimi točkami in s povečanim številom strellov vzdolž merskega profila. Na ta način pridobimo gosto mrežo podatkov, ki jih lahko obdelamo na prej opisani način.

4.3.2 Seizmična refleksija in visokoresolucijska seizmična refleksija

Pri seizmičnih refleksijskih preiskavah preučujemo seizmične valove, ki se na svoji poti od izvora na površini odbijejo od mejnih ploskev med plastmi z različnimi elastičnimi lastnostmi in gostotami in se vrnejo na površino, kjer jih registriramo na geofonih. Tovrstne preiskave dajejo od vseh geofizikalnih metod najboljšo sliko strukturnih razmer v globini. Ločljivost je odvisna

od dominantne frekvence valovanja in tudi od njegove hitrosti in se z globino zmanjšuje. Merilne tehnike so različne, najbolj pa je uveljavljena tehnika skupne sredinske točke (t. i. CMP-metoda). Zapis merskih podatkov je seizmogram (graf razdalja – dvojni čas potovanja), na katerem je zabeleženo potovanje seizmičnega signala v globino na vsaki merski točki – geofonu. Obdelava seizmogramov in njihova prevedba v seizmične profile sta dokaj kompleksni in zahtevata različne korekcije, filtracije in druge računske postopke.

Seizmične refleksijske preiskave so sicer zelo prisotne pri študiju globokih geoloških struktur, predvsem pri raziskavah na ogljikovodike. Razvila pa se je tudi posebna aplikacija za plitve preiskave (globine približno 2–30 m), ki se uporabljajo v geološko-geotehnične namene. Govorimo o visokoresolucijski seizmični refleksiji. Za to je bila potrebna določena prilagoditev merilne opreme (predvsem seizmičnega vira, ki mora generirati signal visokih frekvenc reda velikosti 100 Hz). Omejitev predstavlja uporaba v okoljih, kjer je talna voda globlje kot nekaj metrov (4–5 m), in sicer zaradi močnega dušenja signala. Tovrstne preiskave so drage, v določenih pogojih pa opravičujejo visok vložek z zelo uporabnimi rezultati.

4.3.3 Meritve površinskih valov z metodo MASW

Metoda, ki temelji na proučevanju površinskih elastičnih valov in se je uveljavila v novjšem času, se imenuje MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Bistvo vseh metod, ki obravnavajo površinske seizmične valove, je določevanje strižne hitrosti V_s na podlagi meritev in modeliranja faznih hitrosti površinskih Rayleighjevih valov. Uporablja se predvsem za določitev »in situ« elastičnih parametrov tal in trdnosti tal v potresnem inženirstvu, pri kontroli zbitosti nasipov in pri kontroli izboljšanja temeljnih tal. Prednost MASW-metode pred drugimi seizmičnimi metodami, kjer tudi ugotavljamo elastične parametre (na primer »downhole«, »crosshole«), je v tem, da je preprostejša, hitrejša in cenovno ugodnejša metoda. Hkrati je to površinska in nedestruktivna metoda.

MASW-metodo lahko izvajamo v aktivnem načinu (površinsko valovanje vzbuja s seizmičnim virom) ali v pasivnem načinu (tu kot vir uporabimo seizmični šum ali mikrotremorje). Globinski doseg aktivne MASW-metode je odvisen od dolžine razvrstitve, običajno pa je manj kot 20 m. Pri pasivnem načinu je z uporabo geofonov z nizko lastno frekvenco (pod 4,5 Hz) možno registrirati dolgoperiodne oziroma nizkofrekvenčne površinske valove, zato je globinski doseg v pasivnem načinu večji kot v aktivnem načinu, odvisen pa je prav tako od dolžine razvrstitve.

Značaj amplitudnega spektra površinskih valov je disperzijski. Seizmični posnetek z določenim matematičnim postopkom transformiramo v diagram faza hitrost – frekvenca. Največje amplitude Rayleighjevih valov kažejo določen trend – to je disperzijska krivulja. Ker so hitrosti Rayleighjevih površinskih valov neposredno povezane s strižnim valovanjem, lahko z inverznim modeliranjem disperzijske krivulje izračunamo hitrosti strižnega valovanja. Rezultat vseh metod, ki uporabljajo površinske valove, so 1D-diagrami strižnih seizmičnih hitrosti. Če meritve izvajamo z dovolj veliko gostoto merskih točk vzdolž profila, pridobimo psevdo zvezne meritve (t. i. profile strižnega valovanja), s katerimi sklepamo na spremenljivost plasti v lateralni smeri.

4.4. GEOELEKTRIČNE METODE PREISKAV

Preglednica 8:

Preiskovana fizikalna lastnost:	električna upornost (enota ohmm)
Tehnike preiskav:	1D geoelektrično upornostno sondiranje (VES – Vertical Electrical Sounding)
	2D geoelektrična upornostna tomografija (ERT – Electrical Resistivity Tomography)
	3D električna upornostna tomografija
	4D električna upornostna tomografija
Globinski zajem:	1D >> 100 m
	2D do 50 m (za posebne namene možno tudi več)
Ločljivost:	odvisna od razmika elektrod in od el. razvrstitve (tipično 1–5 m); pada z globino pri vseh tehnikah
Merski podatki:	1D: merske krivulje (navidezna električna upornost kot funkcija elektrodnega razmika)
	2D: merska upornostna psevdosekcija (spreminjanje navidezne električne upornosti v profilu)
Rezultat interpretacije:	1D: razporeditev plasti z določenimi električnimi upornostmi v globino na merskem mestu (vsaka plast je določena z debelino in električno upornostjo)
	2D: spreminjanje električne upornosti vzdolž profilov in v globino; označimo lokacije anomalij (litološka, strukturna meja)

Geoelektrične metode temeljijo na fizikalni zakonitosti, po kateri se posamezne kamnine razlikujejo po električnih upornostih. Za uspešne raziskave mora obstajati zadosten upornostni kontrast med sosednjimi geoelektričnimi plastmi. Električna upornost neke snovi (npr. gline, apnenca) je odvisna od številnih dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši kemična sestava, prisotnost vode, razpokanost in preperelost, velikost in sestava zrn pri klastičnih sedimentih, kompaktnost idr. Nekateri dejavniki so medsebojno povezani, kot na primer razpokanost – prisotnost vode, preperelost – prisotnost glinene komponente in podobno. Litološko enaka kamnina ima lahko tudi za več faktorjev nižjo električno upornost, če je preperela, razpokana, zaglinjena ali je pod nivojem talne vode ali celo v prelomni coni. Nasprotno karbonatna in kremenova komponenta v obliki zrn ali morebiti kosov in odlomnih blokov karbonatnih ali s kremenom bogatih kamnin bistveno zvišuje električno upornost.

Intervali električnih upornosti kamnin so navadno zelo široki prav zaradi številnih možnih pojavnih oblik kamnin v naravi. Intervali za posamezne litološke ekvivalente geoelektričnih plasti se lahko tudi prekrivajo, zato je pogosto treba upoštevati različne možne geološke interpretacije. Možnost večlične interpretacije pri geoelektričnih metodah je velika, zato je umerjanje na vrtnah ali izdankih zelo koristno.

Pri električnih upornostnih metodah v zemlji umetno ustvarimo električno polje. Če bi bilo podpovršje homogen polprostor, bi bili padci napetosti med vsemi pari enako oddaljenih točk enaki. Ker pa to v naravi nikoli ni mogoče, z meritvami padcev napetosti v različnih točkah ugotavljamo anomalije v električnem polju, na podlagi česar sklepamo na prisotnost različnih kamnin in njihovo medsebojno lego.

Dejansko v geofiziki poleg električne upornosti lahko preiskujemo tudi druge lastnosti kamnin, med drugim tudi njihovo polarizivnost. Metoda se imenujejo inducirana polarizacija, meritve pa lahko izvajamo skupaj z geoelektričnim upornostnim sondiranjem. Metoda daje zelo dobre rezultate pri detekciji plasti z veliko gline in pri prospekcijski mineralnih surovin. Zaradi kompleksne izvedbe in nekaterih drugih omejitev pa se skoraj ne uporablja za geološko-geotehnične raziskave.

Vse do sedaj omenjene metode so temeljile na umetno povzročenih električnih poljih – to imenujemo aktivni način. Vendar pa v zemlji obstajajo tudi naravna električna polja (nastanejo zaradi elektrokemičnih procesov, pretakanja fluidov, atmosferskih razelektritev itd.), ki jih lahko preučujemo – to je pasivni način izvajanja preiskav. Ena od metod iz tega sklopa je meritev lastnega potenciala, ki pa se bolj kot za potrebe geotehnike uporablja za mineralno prospekcijsko in za preiskovanje toka podzemne vode, npr. v krasu.

Geoelektrične upornostne metode imajo številne aplikacije, najuporabnejše pa so za ugotavljanje litološke zgradbe in tudi sprememb znotraj določene litološke enote (npr. grušč je lahko zaglinjen, zameljen, čist), pri določanju geološke strukture in lege plasti, z njimi dosežemo večje globine preiskav bolj preprosto kot npr. s seizmiko, pri preučevanju iztekanj iz odlagališč ali pod pregradami/nasipi in v kraškem okolju.

V nadaljevanju zato podajamo podrobnosti samo za dve najbolj uporabljani tehniki preiskav za geološko-geotehnične raziskave.

4.4.1. Geoelektrično upornostno sondiranje VES

Geoelektrično upornostno sondiranje je 1D-tehnika izvedbe geoelektričnih metod. Z njim preiskujemo spreminjanje električne upornosti v globino na mestu meritve. Poleg ustrezne kontrastnosti preiskovanih kamnin mora biti preiskovano področje približno horizontalno plastovit, lateralno neomejen, homogen in izotropen polprostor z ravno površino. Sklepamo, da so ti pogoji v obsegu, s kakršnim običajno izvajamo geoelektrične preiskave za geološko-geotehnične namene, okvirno izpolnjeni. Pri terenskih meritvah uporabljamo različne elektrodne razporeditve.

Preiskave običajno izvajamo z dvema tokovnimi in dvema potencialnima elektrodama. Preko tokovnih elektrod v zemljo spustimo enosmerni tok znane jakosti, med potencialnima elektrodama pa izmerimo pri tem nastali padec napetosti. Z oddaljevanjem tokovnih elektrod povečujemo globino preiskav. Ločljivost spreminjamo z razmikom elektrod pa tudi z izbiro elektrodne razvrstitve. Rezultat so grafi (t. i. merske krivulje), kjer beležimo spreminjanje navidezne električne upornosti v odvisnosti od položaja tokovnih elektrod. V procesu interpretacije navidezne vrednosti prevedemo v prave vrednosti električnih upornosti, razdalje med tokovnimi elektrodama pa v globine.

4.4.2 Geoelektrična upornostna tomografija ERT

V osnovi je tehnika geoelektrične tomografije nadgradnja geoelektričnega upornostnega sondiranja in upornostnega kartiranja (to je bila starejša tehnika preiskav, ki se danes skoraj ne uporablja več) oziroma njuna sinteza. Bistveno zanjo je pridobivanje podatkov – v našem primeru navideznih električnih upornosti – z relativno veliko gostoto v ravnini profila v poljubni dolžini.

Pri terenski izvedbi vzdolž zelene linije postavimo serijo elektrod. Pri zaporednih meritvah te spreminjajo svojo vlogo: enkrat jih uporabimo kot tokovne, drugič kot potencialne. Podobno kot pri 1D-preiskavah pri vsaki meritvi v zemlji ustvarimo električno polje, ki ga preiščemo tako, da izmerimo padec napetosti v določenih točkah. Za pridobitev podatkov iz večjih globin postopno povečujemo dejavnik medelektrodnega razmika, ločljivost pa določamo z razdaljo med sosednjimi elektrodami. Z meritvami zgradimo mersko upornostno psevdosekcijo, ki je prikaz porazdelitve navideznih električnih upornosti vzdolž merskega profila. Psevdosekcija ima trapezno obliko – krajša stranica je spodaj, torej pri najglobljih meritvah. Zato morajo biti električni tomografski profili daljši, kot so načrtovane dimenzije objekta, saj dobimo popolno prekrivost do zahtevane globine le v osrednjem delu merske psevdosekcije.

Interpretacija merske upornostne psevdosekcije temelji na 1D- oziroma 2D inverziji po metodi najmanjših kvadratov in končnih diferenc. Tako mersko upornostno psevdosekcijo prevedemo v globinsko upornostno sekcijo, to pa z modeliranjem v geoelektrični model.

4.5 ELEKTROMAGNETNE METODE

Pri elektromagnetnih metodah (EM) preučujemo električno in magnetno komponento potencialnih polj, ki nastanejo ob uporabi izmeničnih virov napetosti. Vse EM-metode temeljijo na pojavu indukcije. Indukcija je pojav, ko primarno izmenično magnetno polje na površini v prevodnem telesu pod površino povzroči nastanek sekundarnega magnetnega polja. Primarno in sekundarno magnetno polje se razlikujeta po amplitudi in po fazi. Magnetna indukcija je funkcija magnetne permeabilnosti (brez dimenzije), ki pa je lastnost snovi, kamnin. Amplitudne razlike, fazne zamike in fizikalno lastnost magnetno permeabilnost izkoriščamo v geofiziki.

Frekvenčni spekter EM-metod je zelo širok, v geofiziki pa se običajno uporabljajo frekvence 10^0 do 10^4 Hz. Globinski doseg je v veliki meri odvisen od kožnega učinka in predstavlja določeno omejitev. Tehnike EM so zelo številne in uporabljajo različne vire EM-polj, oblike in položaje oddajne in sprejemne tuljave, meritve pa lahko izvajamo v časovni ali frekvenčni domeni ter v aktivnem ali pasivnem načinu. Pri pasivnem načinu kot vir izkoriščamo že obstoječa EM-polja, pri aktivnem načinu pa EM-polje umetno ustvarimo za potrebe geofizikalnih preiskav. Glavni slabosti EM metod sta zelo draga merilna oprema in omejena raba v urbaniziranem okolju zaradi motenj. EM-metode lahko izvajamo tudi brez stika s preiskovalno površino, kar omogoča njeno uporabo iz zraka.

EM-metode se največ uporabljajo pri prospekciji mineralov, za geotermalne in strukturne preiskave pa tudi v arheologiji in hidrogeologiji, manj pa za geološko geotehnične raziskave. EM-metode so najuspešnejše v okoljih, kjer je površina (zelo) nizko uporna, in jih uporabljamo na primer za ugotavljanje mešanja slane in sladke vode, pri iskanju prevodnih teles/struktur ipd. Tudi zaradi takih karakteristik se EM-preiskave v Sloveniji, kjer na površini prevladujejo srednje do višje uporne plasti pa tudi vdor slane vode v vodonosnike s pitno vodo ni aktualen, niso razširile.

4.5.1 Georadar

Georadar obravnavamo kot posebno obliko EM-metod, saj pri tovrstnih preiskavah ugotavljamo hitrost potovanja EM-valov skozi kamnino in ne karakteristik polarizacijske elipse kot pri drugih EM-preiskavah. Je ena od najpomembnejših in najučinkovitejših nedestruktivnih preiskovalnih metod v pogojih, kjer nastopa visokouporna kamnina in je prisotnost vode (v porah, razpokah ali vezana, kot je to v glini) čim manjša. Metoda temelji na ločevanju snovi (kamnina,

zrak, voda idr.) na podlagi razlik v dielektričnosti. Dielektričnost (brez enote) je še ena od lastnosti kamnin, ki jo izkoriščamo v geofiziki, in določa hitrost širjenja EM-valov pod zemljo. Poleg dielektričnosti širjenje pogojujeta tudi magnetna permeabilnost in električna upornost snovi, ki predvsem vpliva na dušenje EM-signalov.

Preglednica 9:

Preiskovana fizikalna lastnost:	dielektričnost (brez enote)
Tehnike preiskav:	refleksijsko profiliranje
	širokokotno refleksijsko in refrakcijsko snemanje, snemanje s skupno sredinsko točko
	radarska tomografija (v rovih, vrtinah, med vrtino/površino, presvetljevanje objektov)
Globinski zajem:	odvisno od antenskega sistema in električne upornosti (od nekaj cm do > 100 m)
Ločljivost:	odvisna od antenskega sistema in dielektričnosti (tipično 0,05–1 m), pada z globino pri vseh tehnikah
Merski podatki:	radargram (zapis pot/dvojni čas): beležimo reflekse in druge anomalije EM-signala vzdolž profila
Rezultat interpretacije:	2D: lega anomalij v profilu; anomalije razvrstimo po tipu (instalacija, praznina, razpoka, stik dveh plasti ipd.)

Pri preiskavah z georadarjem preko oddajne antene oddamo v zemljo zelo kratek impulz EM-valovanja z visoko frekvenco (najpogosteje 10–3000 MHz). Val potuje skozi podpovršje 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 v bistvu prepotuje dvakratno pot do anomalije, zato na radargramih (to je zapis georadarskega snemanja) na abscisi beležimo položaj anten, na ordinati pa dvojni čas potovanja signala do anomalij.

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

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 pa je ločljivost praviloma večja pri antenah z višjo frekvenco. Na ločljivost poleg antenskega sistema vpliva tudi dielektričnost okolice. 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: 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.

Merske podatke v procesu obdelave najprej očistimo nezaželenih vplivov, nato pa interpretiramo. Hitrost potovanja EM-valov izračunamo iz ustrezne (ocenjene, redko izmerjene) dielektričnosti kamnine. 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.

Georadarske preiskave so zelo uspešne v kraškem okolju, pri preiskavah zgornjega cestnega stroja, ugotavljanju učinkovitosti sanacije tal (odstranitev žepov z glino, zapolnitev praznin ipd.), določanju nivoja talne vode, lociranju podzemnih instalacij in pri preiskavi betonskih konstrukcij.

4.6 GEOFIZIKALNE PREISKAVE V VRTINAH

Vse geofizikalne preiskave, ki jih izvajamo s površine, so podvržene zmanjševanju ločljivosti z globino. V določenih aplikacijah, ko se zahteva zelo detajlna karakterizacija podpovršja (torej visoka ločljivost tudi v globljih plasteh), je primerna rešitev izvedba geofizikalnih preiskav v vrtinah. Drug razlog, da se odločimo za vrtinske preiskave, je, da iz njih lahko pridobimo fizikalne lastnosti intaktnih plasti pod površino.

Geofizikalne preiskave lahko izvajamo v posamezni vrtini, med parom vrtin ali tudi med več vrtinami. Obstajajo tudi posebni primeri, ko preiskave izvajamo med vrtino in površino ali med vrtino in podzemnim prostorom. Za vrtinske preiskave so primerne praktično vse geofizikalne metode. Seveda je izvedba vrtinskih preiskav povezana z uporabo specialne opreme (ta je pogosto nestandardna ali razvita za čisto določen projekt).

Najkompleksnejša vrtinska geofizikalna preiskava je **karotaža**. V vrtino zaporedno spuščamo različne merske sonde: upornostne električne sonde, sondo za meritev lastnega potenciala, akustično sondo, različne temperaturne sonde, pasivne in aktivne jedrske sonde in še druge, tudi TV-kamero. Meritve izvajamo bodisi zvezno bodisi na določenih intervalih vdolž celotne vrtine. Podatke po kablu pošiljamo v mobilno karotažno enoto na površini in jih nato obdelamo in interpretiramo podobno kot pri posameznih drugih geofizikalnih preiskavah. Namen geofizikalne karotaže je, da pridobimo čim več komplementarnih geofizikalnih podatkov, na podlagi katerih ugotovimo lastnosti prevrtanih plasti, tudi če nimamo na voljo jedra. Za izvedbo karotažnih preiskav sta najodločilnejša dejavnika cevitev vrtine (nekatero sonde je treba uporabiti le v odprti vrtini; vpliva tudi material cevitve) in premer vrtine (zaradi prehodnosti merskih sond).

Od seizmičnih metod v vrtinah najpogosteje izvajamo meritve intervalnih seizmičnih hitrosti, t. i. **seizmične downhole/uphole** meritve (to sta dve modifikaciji iste metode, in sicer je pri »downhole« izvedbi seizmični vir na površini, geofonska sonda pa v vrtini, pri »uphole« izvedbi pa je obratno) ali pa preiskujemo spreminjanje hitrostnega polja med parom vrtin (t. i. **seizmične crosshole meritve**). Merilna oprema je prilagojena izvedbi v vrtini, tako vira kot geofonov (navadno uporabljamo trikomponentno geofonsko sondo). Običajno merimo tako P- kot S valovanje, saj na podlagi njunega razmerja in poznavanja gostot kamnin izračunamo njihove elastične parametre. Obe vrsti seizmičnih vrtinskih preiskav sta se močno uveljavili v zadnjem desetletju, predvsem zaradi dejstva, da z njima pridobimo »in situ« dinamične elastične karak-

teristike nastopajočih plasti. Ti podatki bolj realno podajajo mehansko stanje kamnin, saj meritve zajemamo iz širše okolice vrtine in ne neposredno s stene vrtine in njenega zaledja, ki sta vedno do določene mere poškodovana. Prednost takih meritev pred drugimi, ki jih izvajamo v laboratorijih na vzorcih, je prav tako dejstvo, da je tudi vzorec mehansko (mikro)poškodovan, pa tudi zaradi dimenzij: pri seizmičnih meritvah tipično zajamemo metrske odseke, kar je v primerjavi z vzorcem 2–4-krat več. Velikost je zlasti pomembna v primeru heterogene zgradbe kamnin/plasti. Za natančno interpretacijo je zelo pomembno poznavanje lege vrtine (odklon od vertikale in smer odklona), saj izračuni v seizmiki neposredno temeljijo na merjenju časa, ki ga signal porabi za pot med virom in sprejemnikom.

V vrtinah se izvaja tudi **električne downhole/uphole** in **električne crosshole** preiskave. Te preiskave so zelo občutljive na spremembe v kemizmu okolice, torej tudi na spremembo vlažnosti, prisotnost gline in morebitno prisotnost kemikalij. Zaradi tega se največkrat uporabljajo za kontrolo zatekanja vode (npr. puščanje pregrad) ali pa v primeru sledenja onesnaženja (npr. iztekanje iz različnih odlagališč). Preiskave lahko uporabimo enkratno in podamo stanje v določenem trenutku, lahko pa jih periodično ponavljamo (izvajamo monitoring) in tako spremljamo razmere v daljšem časovnem obdobju. Če geoelektrične meritve izvajamo za spremljanje kemizma, moramo predhodno izvesti skrbno korelacijo kemijskih parametrov in električnih upornosti.

Tudi za izvedbo georadarskih preiskav obstaja prilagojena oprema za meritve v vrtinah. Tako lahko glede na to, kam razporedimo oddajno in sprejemno anteno, izvajamo georadarske preiskave v posamezni vrtini ali med vrtinama, običajno v tomografski tehniki. Vrtinske georadarske preiskave se uporabljajo v specialnih primerih, zlasti v kraškem okolju ali za preiskavo betonskih konstrukcij (npr. lega armature, razpokanost betona ipd.).

Literatura:

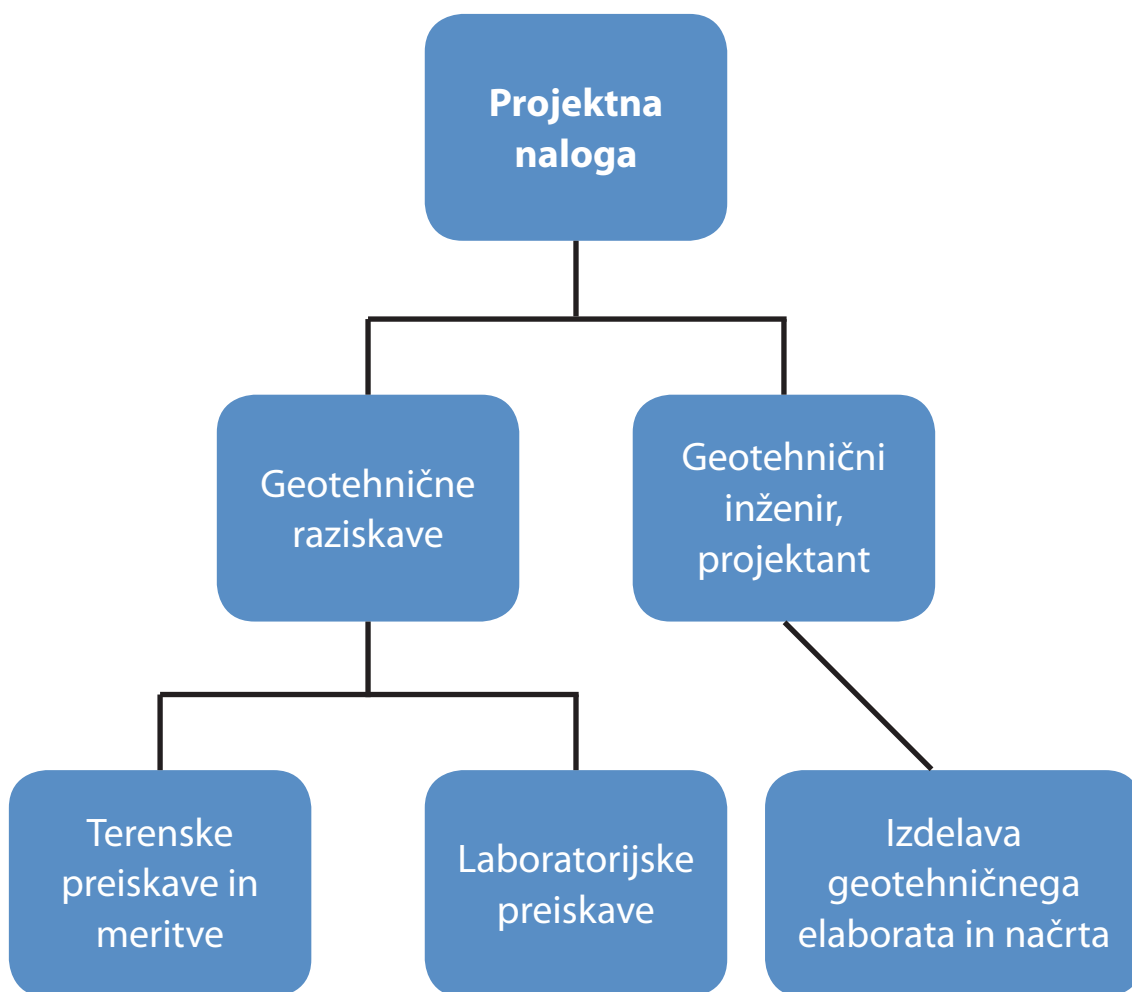
- ASTM D6429 Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. ASTM, ZDA.
- ASTM D420 Guide to Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes. ASTM, ZDA.
- Beg, D., Pogačnik A. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. IZS, 2009.
- BSC CP 2001. British Standard Code of Practice, Site Investigations.
- Fell, R., Hungr, O., Leroueil, S., Reimer, W. Geotechnical Engineering of the Stability of Natural Slopes and Cuts and Fills in Soil, Keynote Lecture; International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Geoeng 2000. Technomic Publishing Company, Inc., ZDA, Vol. 1, str. 21–120.
- Gosar, A., Ravnik, D., 2007. Uporabna geofizika. Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana.
- Hoek, E. in Diederichs, M. S. 2006 Empirical estimation of rock mass modulus, international Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (dostopno na spletu 2005), 203–215.
- Marinos, V., Marinos, P. in Hoek, E. The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005.
- Morgenstern, N. R. Common Ground, Keynote Lecture; International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000. Technomic Publishing Company, Inc. ZDA, Vol. 1, str. 1–20.
- Ocepek, D. in Vogrinčič G. Critical state approach to stability of clay shale designed structures of the motorway Trojane Blagovica, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000. Technomic Publishing Company, Inc. ZDA, Vol. 2, str. 25–31.
- Ocepek, D., Logar, J. Nastanek plazov med gradnjo odseka AC Blagovica–Kompolje in sanacijski ukrepi. Zbornik referatov 7. kongresa o cestah in prometu. Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, Portorož, Ljubljana, 2004, str. 395–401.
- Ocepek, D. New Trends in Rock Mass Characterisation for Designing Geotechnical Structures. Acta Geotechnica Slovenica, 2005, str. 38–51.
- Ocepek, D., Petkovšek, A. Analiza časovno pogojenih vplivov mehčanja karbonsko-permske mešane hribinske mase na globoko temeljene podporne konstrukcije na avtocestnem odseku A1 Blagovica–Kompolje. 10. slovenski kongres o cestah in prometu, Vilhar, M. Portorož, 2010.
- Ocepek, D., Likar, J. 2011 Design of deep excavation and retaining structures for the garage house and sewage farm under the road from Portorož to the old part of the city of Piran – Slovenia, *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Athens, ur.: A., Anagnostopoulos et al. IOS Press 2011, str. 1535–1540, RC.
- Sheriff, R. E. Encyclopedia Dictionary of Exploration Geophysics. Soc. Explor. Geophy, 2nd Edition, 1984.
- Ward, S. H. (ur). Geotechnical and Environmental Geophysics (3 volumes). Investigation in Geophysics No.5. Society of Exploration Geophysicists, ZDA, 1990.
- Žlender, B., Škrabl, S., Macuh, B. Characteristics of Permian–Carboniferous Rocks for Slope Stability Analysis. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoeng 2000*, Melbourne, Technomic Publishing Company, Inc., ZDA, 2000.

POGLAVJE V

5. SKLEP

Vsebina priročnika je namenjena mlajšim in manj izkušenim geotehničnim inženirjem ter potencialnim investitorjem, ki z javnimi razpisi naročajo projektantske storitve, katerih pomemben, a vendar pogosto preveč zapostavljeni del so geotehnične raziskave ter geotehnični projekti zahtevnejših gradenj. Ocenjujemo, da bodo cilji priprave priročnika doseženi, če bo ta prispeval k spremembi obstoječega stanja, kjer v mnogih primerih geotehnik organizira in vodi raziskave, čeprav dejansko niti ne ve, zakaj se raziskave izvajajo, ter da za številne manj poučne investitorje in projektante gradenj geotehnične preiskave in geotehnični projekti ne bodo več predstavljali le nepotrebnih dodatnih stroškov.

K izboljšanju obstoječega stanja v slovenski geotehnični stroki bi lahko obilo prispevali že potencialni investitorji, če bi spoznali dejanski pomen projektnih nalog, ki zagotovo predstavljajo osnovo vsakega projekta, ter bi sedaj prepogosta določila iz projektnih nalog in razpisne dokumentacije ter »geomehanske raziskave po presoji projektanta« postali le še spomin in opomin na sedanje obdobje, ki ni naklonjeno razvoju in dobrim poznavalcem geotehnične stroke.



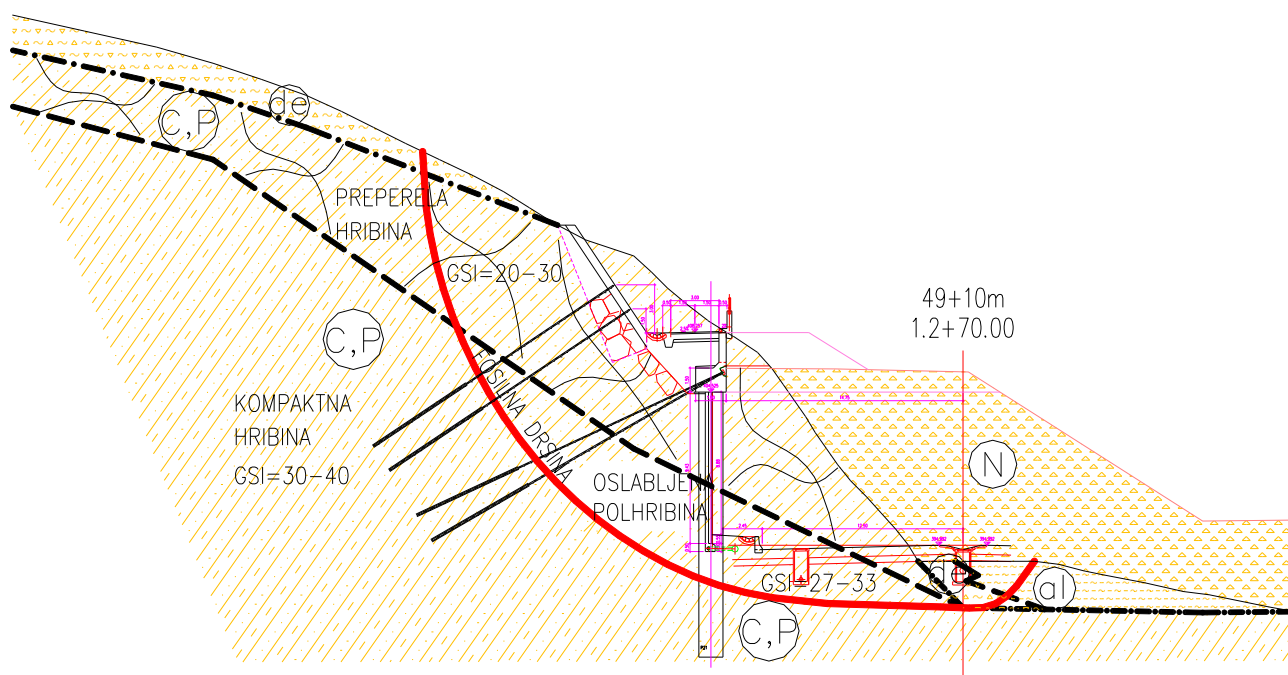
POGLAVJE VI

6. PRAKTIČNI PRIMERI

6.1 GEOMEHANIKA

6.1.1 Vpliv geološke zgradbe na geotehnične konstrukcije

Pri izdelavi numeričnih analiz za določitev pogojev izvedbe opornih in podpornih ukrepov služijo kot podlaga za diskretizacijo končnih elementov in razdelitev obravnavanih materialov **podrobno izdelani inženirskogeološki prerezi**. Ti morajo čim bolj realno odražati ugotovljeno litološko zgradbo obravnavanega področja ter inženirskogeološke pojave. Spodaj prikazujemo kritični prečni inženirskogeološki prerez, ki je služil za izdelavo **numerične analize interakcije mešane mehke hribinske mase s projektirano konstrukcijo OZ – 01 b** na odseku AC Blagovica–Kompolje, kjer so bile **v okviru monitoringa zaznane najbolj povečane deformacije**.



Slika 7: Geološko-geotehnični prerez, ki je služil za geostatično analizo.

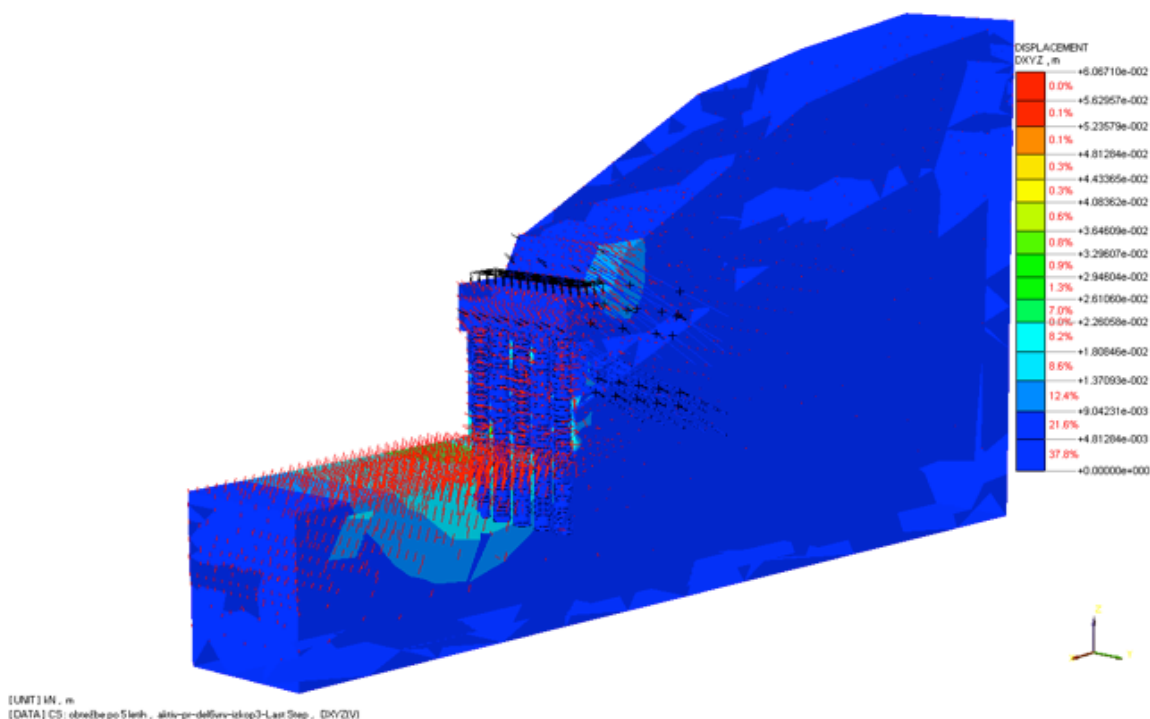
Hribina je razdeljena na tri kategorije. Zgoraj leži preperela hribina; v območju nad fosilno drsino – rdeča črta – leži oslABLJENA (v preteklosti splazela) hribina. Spodaj je kompaktna mešana hribinska masa mehkih kamenin: skrilav meljevec s polami drobnozrnatega peščenjaka in prehodi v glinast skrilavec (Ocepek et al, 2004).

6.1.2 Sinteza rezultatov terenskih in laboratorijskih preiskav

Na primeru **določitve trdnostno deformacijskih lastnosti mehke mešane hribinske mase** prikazujemo rezultate v laboratoriju izvedenih preiskav enoosne tlačne trdnosti (σ_c), direktnih strižnih preiskav (τ_{dir}), rotacijskih strižnih preiskav (τ_{rot}) in triosnih strižnih preiskav $\tau(t_{riax})$ (Ocepek, Vogrinčič, 2000). Deformacijske parametre pa smo določili z meritvami »in situ« s presiometrom v vrtinah. Vrtine za potrebe izvedbe »in situ« preiskav in vzorčevanja so bile izvedene z vrtanjem z diamantnimi kronami ter uporabo polimerne izplake. V Preglednici 10 podajamo rezultate terenskih in laboratorijskih preiskav z odseka avtoceste med Trojanami in Blagovico (Ocepek, Vogrinčič, 2000), dopolnjene z rezultati terenskih in laboratorijskih preiskav s pododseka avtoceste med Blagovico in Kompoljem (Ocepek, Logar, 2004, Ocepek, D., Petkovšek, A., 2010).

Preglednica 10: Trdnostni in deformacijski parametri mešane mehke hribinske mase

Opis in lega			Močno preperela mehka hribina, 2. plast	Oslabljena mehka hribina, 3. plast	Intaktna mehka hribina, 4. plast	Strižna cona
Laboratorijsko določena območja vrednosti	direktni strig	c (kPa)	0–20	0–24	0–88	0-17
		φ (°)	21–34	25–39	16–41	12-31
	rotacijski strig	c (kPa)	5–33	3–15	0–52	17-25
		φ (°)	24–29	27–29	24–37	25-27
	triksijalni testi	c (kPa)	2–30	0–6	0–61	0-15
		φ (°)	18–24	20–23	11–25	21-32
enoosna tlačna trdnost	σ_{ci} (kPa)	96–130	131–300	130–454	< 70	
Deformacijske preiskave	presiometrski modul	E_p (MPa)	8–35	20–78	55–651	6-11
	edometrski modul	E_{oed} (MPa)	7,7–8,1	5,7–9,0	8,2–12	4,0-12
Hoekov in Brownov porušitveni kriterij	strižna trdnost	c (kPa)	1–37	1–72	40–158	
		φ (°)	17–28	15–29	12–35	



Slika 8: Prikaz geostatične analize z deformacijami po zadnji fazi analize s konturami in vektorji. Pokazalo se je dobro ujemanje z meritvami v zalednem inklinometru V-4 ter meritvami geodetskih točk in ciljnih prizem na AB-gredi.

6.2 INŽENIRSKA GEOLOGIJA

Primer določitve trdnostno deformacijskih karakteristik hribine na podlagi terenskih in laboratorijskih preiskav v različnih fazah izvedbe objekta. Inženirskogeološko kartiranje se je izvajalo pred izvedbo objekta in v fazi gradnje.

Preglednica 11: Geološki trdnostni indeks GSI

Površinska kakovost sveže izkopane mešane hribinske mase fliša	GSI
1 Močno preperel fliš	25–27
2 Zmerno preperel fliš	28–38
3 Rahlo preperel do kompakten fliš	38–43



Slika 9: Prikaz zadnje izkopne faze in temeljenja garažne hiše Fornace

Za določitev ustrezne podgradnje s prilagajanjem opornih ukrepov nastalim razmeram (opazovalna metoda EC-7) je bila vsaka izkopna faza podrobno inženirskogeološko kartirana z določitvijo GSI-ja.

Preglednica 12: Presiometrski moduli E_{p1} / E_{p2}

Globina (m)	E_{p1} (MPa)	E_{p2} (MPa)
9,8	355,7	394,5
10,6	-59,3	126,6
11,4	665	965,1
16,9	2571,6	2894,5
17,7	1568,3	1816,7
18,5	1693,5	2001,7

Za določitev trdnostno deformacijskih karakteristik je bilo skozi umetni cestni nasip in deluvijalni sloj ter preperelo mešano hribinsko maso fliša izvedenih 8 preiskav težke dinamične penetracije (DPSH). Rezultati so podani v naslednji preglednici.

Preglednica 13: Trdnostno deformacijske karakteristike zemljin

Material	φ	c	Youngov modul
Cestni nasip	31,5°	0	23 MPa
Deluvij GC-GP	34°	0	31,7 MPa
Močno preperel fliš	19,1°	36 kPa	39,9 MPa

Na podlagi sinteze vseh zbranih terenskih in laboratorijskih preiskav (preiskave enoosne tlačne trdnosti in trisosne strižne preiskave s cikličnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem) ter meritev »in situ« v vrtinah so bile mešani hribinski masi fliša določene naslednje trdnostno deformacijske karakteristike:

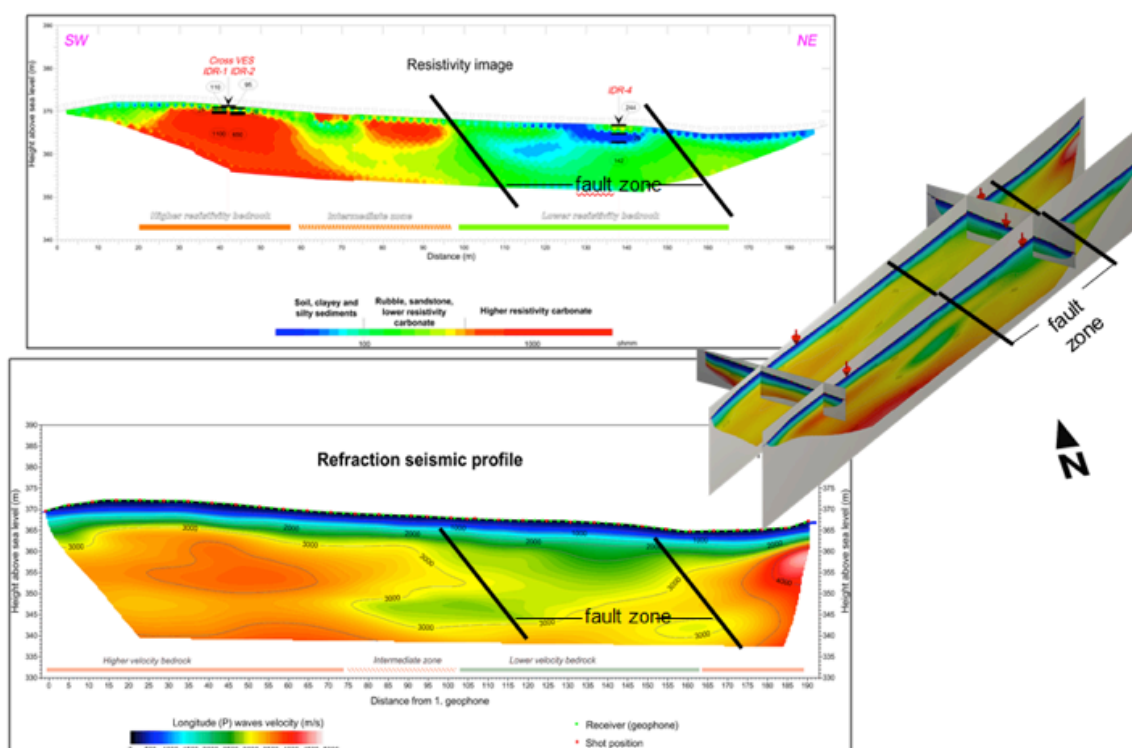
Preglednica 14: Trdnostno deformacijske karakteristike mešane hribinske mase fliša

Tip hribinske mase	φ	C	Deformacijski modul
Zmerno preperel fliš	30,3°	93 kPa	139,7 MPa
Rahlo preperel do kompakten fliš	44,3°	184 kPa	857,2 MPa

6.3 GEOFIZIKA – NEKAJ PRIMEROV UPORABE GEOFIZIKALNIH PREISKAV V GEOTEHNIKI

6.3.1 Ugotavljanje geološke strukture (Slika 10)

Geologi so želeli natančno locirati domnevni pokriti recentni prelom v karbonatni kamnini. Na površini so bili odloženi preperina in klasični sedimenti (gruč z meljem in glino), pod njimi pa karbonatna kamnina. Prečno na domnevni prelom smo izmerili po dva profila geoelektrične tomografije in dva profila seizmične refrakcijske tomografije. Globinski doseg je bil do 30 m. Prelomna cona se kaže z nižanimi električnimi upornostmi (karbonatna kamnina je v prelomni coni razpokana, zato je bolj vlažna, kar vpliva na znižanje električne upornosti) in nižanimi seizmičnimi hitrostmi (razpokan karbonat ima nižje vrednosti hitrosti seizmičnega valovanja). Poleg 2D-preiskav v prečni smeri smo prek anomalije in izven nje izmerili še dva ortogonalna profila in še nekaj 1D geoelektričnih sond. Tudi ti rezultati so potrdili pomembno znižanje fizikalnih karakteristik na območju prelomne cone. Velikosti premika ob prelomu samo na podlagi teh geofizikalnih preiskav ni bilo možno ugotoviti, zato so v naslednji fazi na mestu označene anomalije izkopal geološki jarek za detajlno geomorfološko analizo.

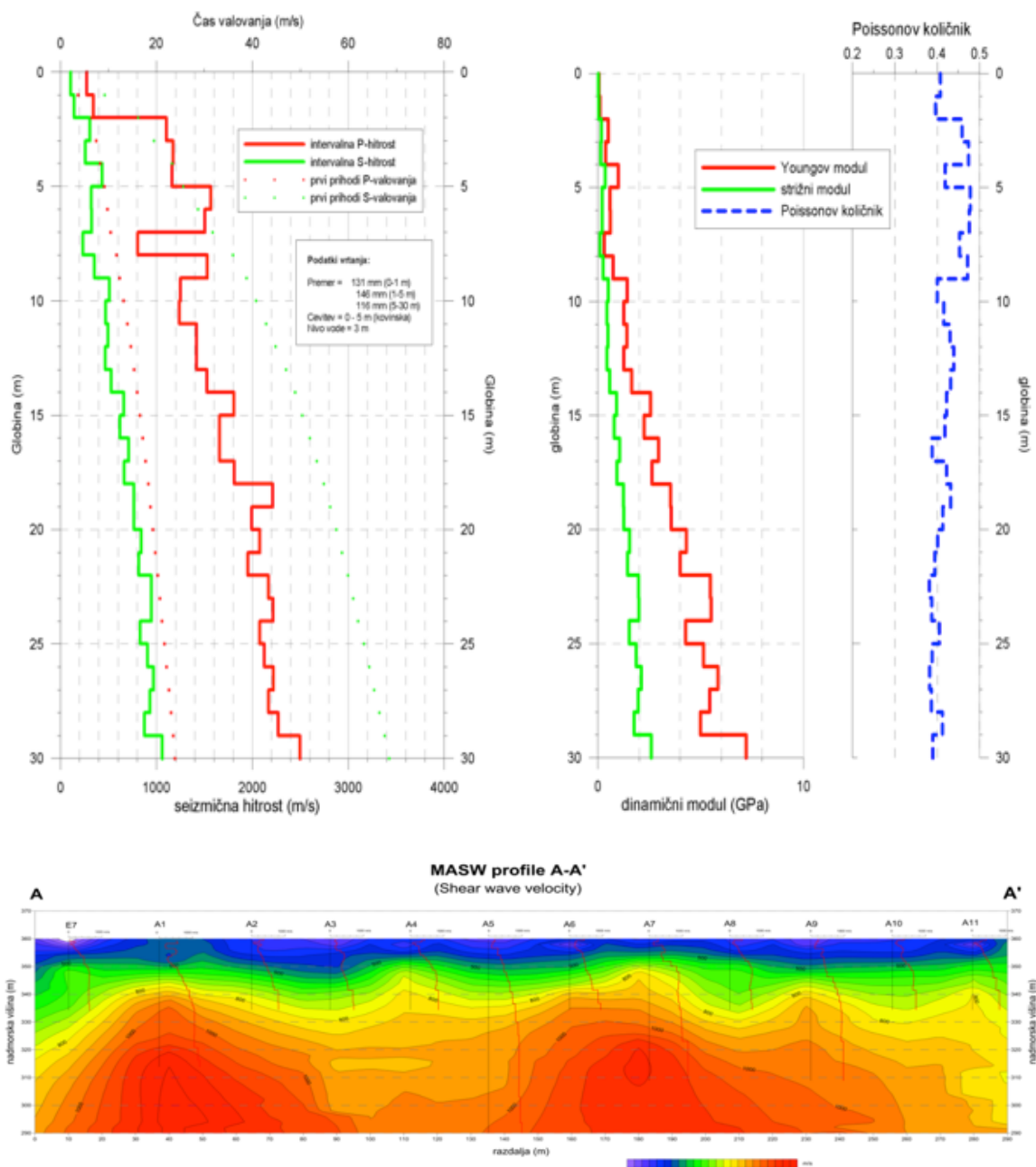


Slika 10: V prečni smeri na iskano strukturo smo izvedli 1D in 2D geoelektrične (levo zgoraj) ter 2D seizmične preiskave (levo spodaj). Prelomna cona se kaže kot območje z nižanimi električnimi upornostmi in nižanimi hitrostmi seizmičnega longitudinalnega valovanja.

Shematsko prikazujemo tudi 3D-položaj anomalije (desno).

6.3.2. Pogoji temeljenja energetskega objekta (Slika 11)

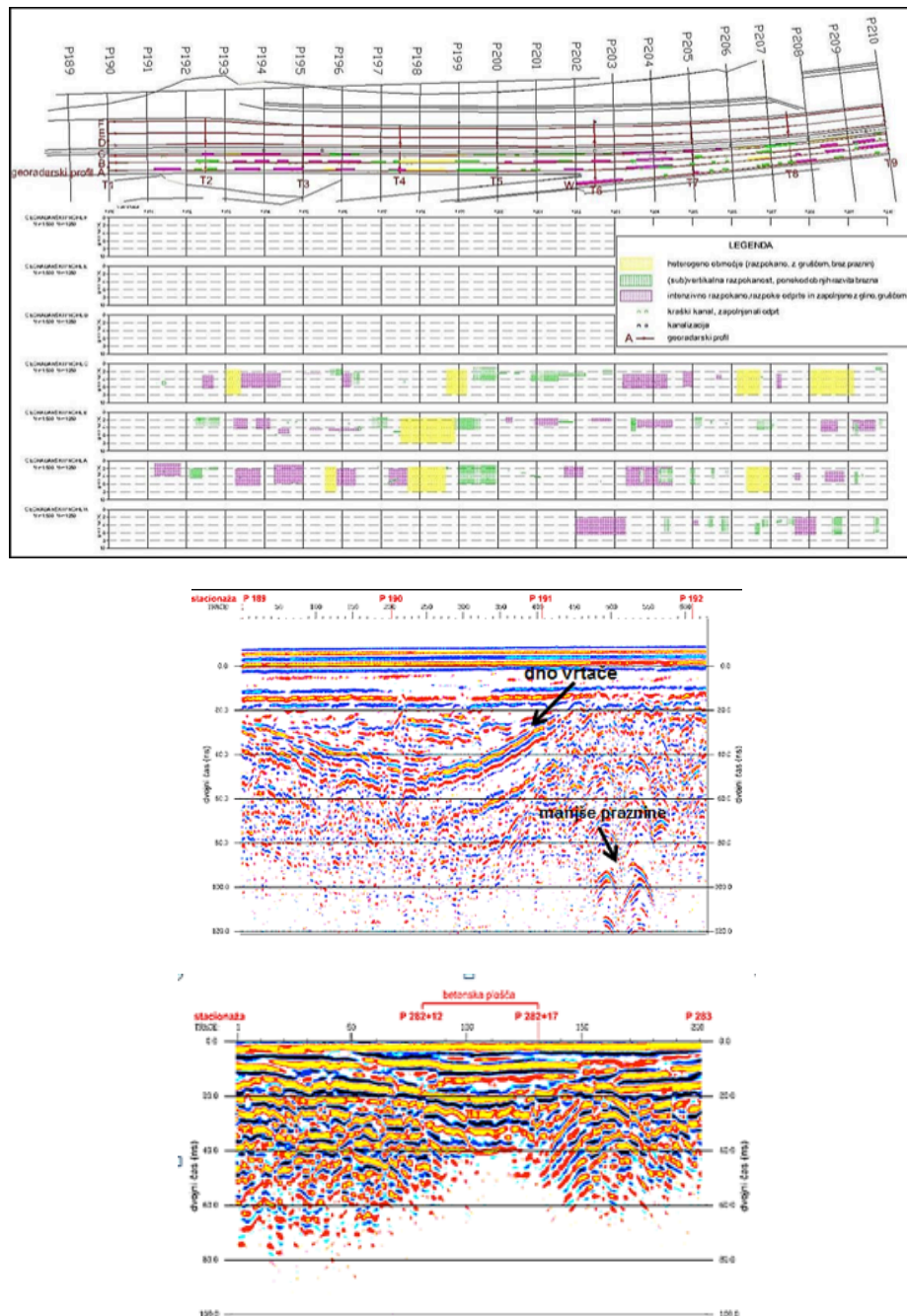
Obstoječi energetski objekt je bil predviden za dograditev. Območje objekta geološko gradijo meljevec, peščenjak in njihovi nevezani različki, na površini pa preperina. Zaradi velike tlačne obremenitve smo območje za rekonstrukcijo/nadgradnjo pregledali z geoelektrično upornostno tomografijo (z njo smo predvsem kontrolirali spreminjanje litologije vzdolž profilov) ter s seizmičnimi preiskavami, in sicer s seizmično refrakcijsko tomografijo (z njo smo dobili sliko spreminjanja longitudinalnega seizmičnega valovanja vzdolž profilov) ter MASW-meritvami v profilu, s katerimi smo preverjali spreminjanje strižnih seizmičnih hitrosti. Ugotovili smo lateralne spremembe pod površinsko preperino, ki kažejo na različno kompaktnost plasti. Poleg tega smo tudi izračunali podatek Vs30 (povprečna strižna hitrost v zgornjih 30 m), s katerim določimo vrsto tal po Evrokodu 8, ki ga je treba upoštevati pri potresni obtežbi.



Slika 11: Detajlna določitev elastičnih dinamičnih parametrov z vrtinskimi seizmičnimi meritvami (zgoraj) in spreminjanje kompaktnosti sedimentov vzdolž profila na podlagi MASW-meritev (spodaj)

6.3.3 Ugotavljanje zakraselosti pod načrtovanim objektom s predlogom sanacije (Slika12)

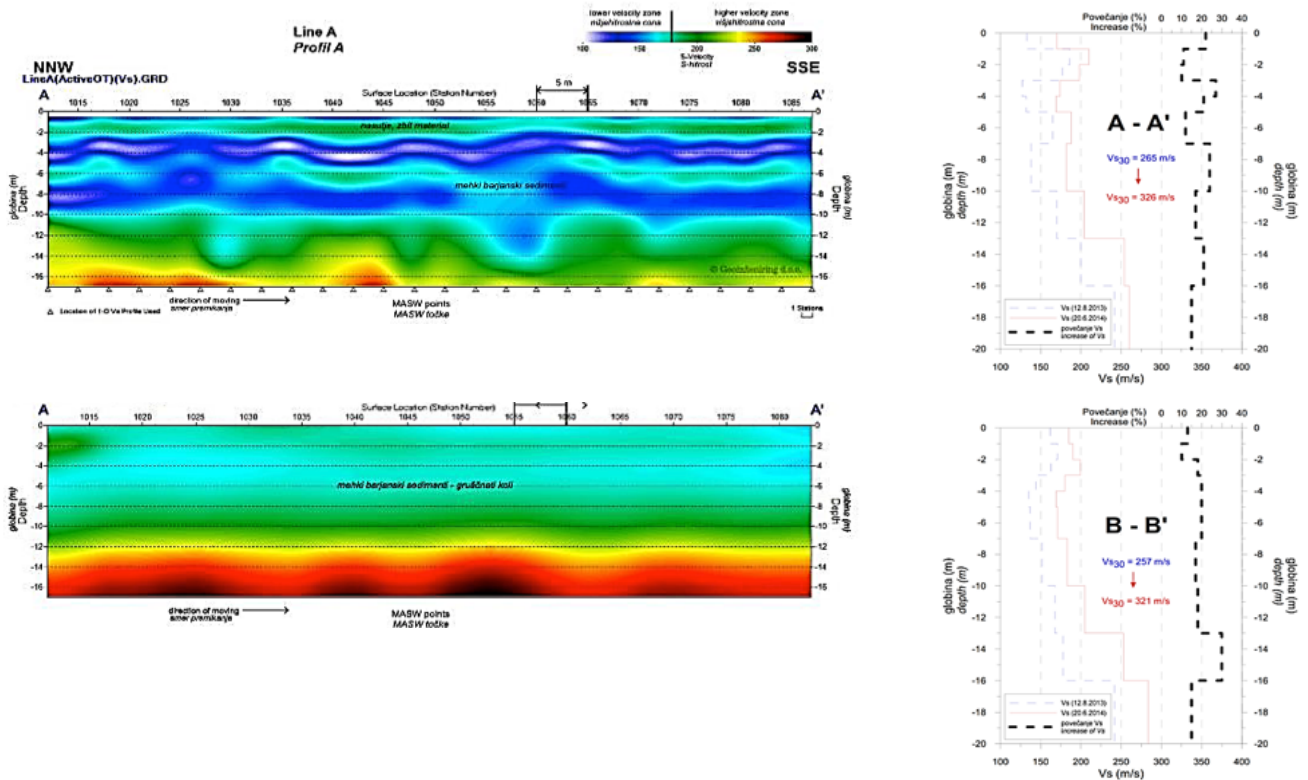
Traso prihodnje avtoceste, ki poteka po kraškem terenu, smo premerili z več vzdolžnimi georadarskimi profili (skupaj šest profilov za celotno širino ceste). Georadarske meritve so potekale po izvedbi tampona. V tej fazi je izvajalec gradbenih del že izvedel sanacije nekaterih mest. Georadarske preiskave so poleg nekaterih že saniranih mest odkrile še nekatere nove skrite kraške oblike. Na podlagi ugotovljenih georadarskih anomalij (žepi z glino, razpoke, kraški kanali) je geomehanik predlagal način sanacije (premostitev brezna z betonsko ploščo, odstranitev glinastih sedimentov z dna vrtače, zasutje manjših praznin in brezov z gruščem in pustim betonom).



Slika 12: Po trasi prihodnje avtoceste so bile izvedene georadarske meritve – 6 profilov na širino ceste. Ugotovljene anomalije, ločene po tipu (manjša heterogenost, razpoka, praznina ipd.), na šestih profilih so prikazane zgoraj. Spodaj sta primerata georadarskega profila, ki je prečkal lokacijo zapolnjene vrtače (v sredini) in lokacijo že saniranega brezna, ki so ga premostili z betonsko ploščo (spodaj).

6.3.4 Kontrola izboljšave temeljnih tal (Slika 13)

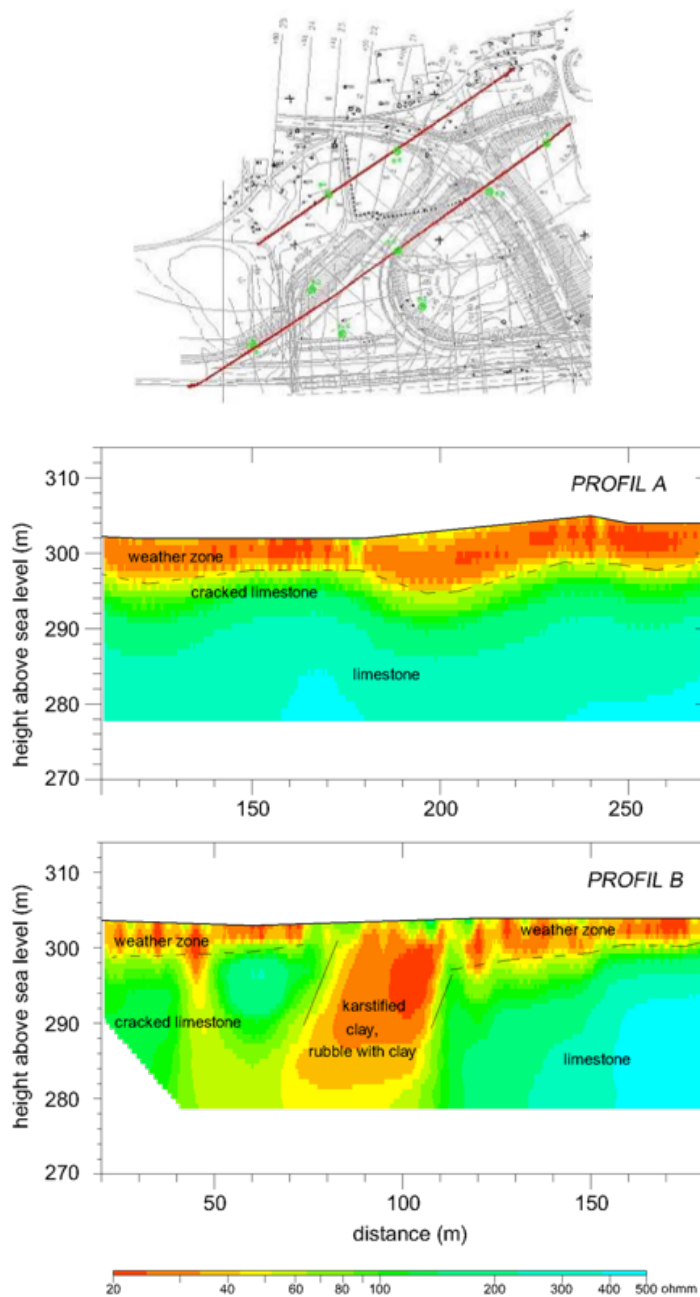
Na lokaciji prihodnjega obrata (čistilna naprava) na barjanskih tleh je izvajalec gradnje v prvi fazi izvedel nasutje. Preko območja smo izmerili dva profila MASW, ki sta v tem primeru predstavljala nulte meritve. Po izvedbi gruščnatih kolov smo po približno enem letu ponovili meritve po istih profilih. Na obeh profilih so se elastične lastnosti nasutja bistveno izboljšale – vrednosti V_{s30} so pred sanacijo ustrezale slabim tlom kategorije C po Evrokodu 8, po sanaciji pa so vrednosti V_{s30} že v območju C/B.



Slika 13: Po nasipu (fotografija) so se izvedle meritve MASW na profilih A in B. Primer profila A: zgornja slika prikazuje meritve pred izvedbo gruščnatih kolov, spodnja slika pa po njej. Povečanje strižnih seizmičnih hitrosti vzdolž profila je očitno. Na grafih (desno) so izračuni spreminjanja povprečne strižne seizmične hitrosti do globine 30 m (zahteva Evrokod) za profila A in B. Povišanje V_{s30} je vidno tudi z grafov.

6.3.5 Pregled območja prihodnjega objekta v okolju z zakraselo podlago (Slika 14)

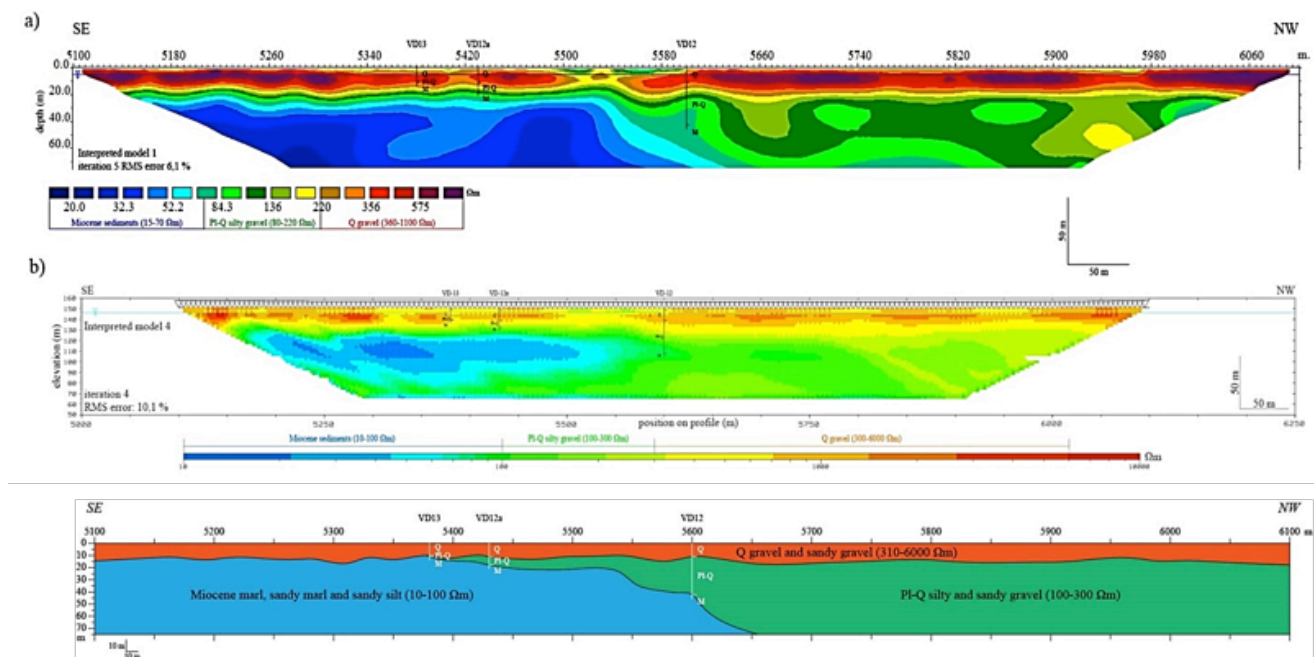
Vse objekte na avtocestni trasi v JV Sloveniji smo sistematično pregledali z geofizikalnimi preiskavami (kombinacija 1D in 2D geoelektričnih metod in 2D seizmike). Značilno za JV Slovenijo je, da kraški pojavi na površini največkrat niso tako jasno izraženi kot na primer v JZ Sloveniji. Tudi debelina površinske preperine in nekonsolidirane zemljine je zelo spremenljiva, občasno tudi močno povečana. Na prikazanem objektu (nadvoz) je bilo na enem od geoelektričnih profilov ugotovljeno brezno premera približno 20 m in globine, ki je presejala globinski doseg preiskav. Sosednji profil, ki je potekal približno 30 m vstran, te anomalije ni zaznal. Prav tako ni brezna zaznala nobena od do tedaj že izvedenih vrtin. Ugotovljeni kraški pojav je bil torej »pre-senečenje«. Projektant je rešitev pravočasno prilagodil novim dejstvom.



Slika 14: Vzporedno z prihodnjim objektom (manjša slika) sta bila izmerjena dva geoelektrična profila (spodaj). Profil A ne kaže posebnosti razen manjše spremenljivosti debeline preperile površinske plasti. Profil B pa je v osrednjem delu zaznal večjo kraško anomalijo premera 20 m in globine najmanj 20 m.

6.3.6 Določanje globine tesnilne zaves (Slika 15)

Vzdolž načrtovanih nasipov za hidroenergetski objekt smo izvedli geoelektrične tomografske preiskave. Namen preiskav je bil določiti mejo med polprepustnimi miocenskimi ter prepustnimi pliokvartarnimi (PI-Q) in kvartarnimi (Q) sedimenti za načrtovanje t. i. »jet grouting« tesnilne zaves, ki bo preprečevala lateralni odtok vode iz akumulacijskega bazena. Odebelitev prepustne plasti je bila zaznana že s predhodno izvedenimi vrtinami. Te vrtine so služile za umeritev geoelektričnih podatkov. Zvezne geoelektrične preiskave so jasno podale, kje se prepustna plast odebeli. Za prepustne sedimente so značilne višje električne upornosti, saj jih gradijo bolj debelozrnati sedimenti kot polprepustne, kjer prevladujeta melj in glina.



Slika 15: Poenostavljen geološki prerez (spodaj), izdelan na podlagi geoelektričnih raziskav in podatkov vrtin (dva alternativna geoelektrična modela zgoraj)

(Vir: Rajh, G., Car, M. & Gosar, A., 2014. *Electrical resistivity tomography investigations along the planned dykes of the HPP Brežice water accumulation basin. Raziskave z električno upornostno tomografijo vzdolž trase nasipov akumulacijskega bazena HE Brežice. Geologija*, 57/2, Ljubljana.)

