

## GEOTEHNIKA PRI GRADNJI PROMETNIC SEVEROVZHODNE SLOVENIJE

*Ksenija Štern*

### Uvod

Za geotehnične rešitve lahko zanesljivo rečemo, da so dobre takrat, kadar so izvedeni ukrepi na terenu čim manj vidni in se o njih malo ali nič ne sliši in govori. To seveda ne pomeni, da se dobre in optimalne rešitve ponudijo kar same od sebe. Gradnja avtocest, hitrih cest in železnic je že sama po sebi zahteven poseg v prostor, toliko bolj izrazit kadar poteka po morfološko razgibanem terenu. Vodenje nivelete po takšnih terenih za načrtovalca ceste pomeni bolj ali manj globoke vkope, bolj ali manj visoke nasipe, krajše in daljše viadukte in seveda premostitve vodotokov z mostovi ter številna križanja v nadvozih, podvozih in podhodih. Za geotehnika pa so to problemi stabilnosti, nosilnosti, deformacij, uporabnosti in vgradnje razpoložljivih zemljin, kot osnovna poglavja geotehnike in velika priložnost za uvajanje novosti, skladno z razvojem tehnologij in umetnih gradbenih materialov.

Če kje lahko v geotehniko mirno poudarimo prednosti »domačega terena« kjer najbolj pridejo do izraza izkušnje pri gradnji primerljivih objektov v preteklosti. Največ izkušenj je pridobljenih ravno v sklopu tako kompleksnih gradenj kot so infrastrukturni objekti. Vedenja o specifičnostih obnašanja materialov in reševanje geotehničnih problemov v primerljivih pogojih se najbolj razvijejo v obdobjih intenzivne gradnje in na žalost tudi precej hitro, običajno z menjavo generacij, tudi zbledijo. Zato je še toliko bolj pomembno, da se izkušnje nesebično deli, tako med samimi geotehniko in projektanti, nadzornimi inženirji, investitorji in nenazadnje vsemi uporabniki cest skozi varno in prijazno vožnjo.

### Izkušnje z gradnjo prometnic

Prvi in velik izziv za slovensko geotehniko je bila gradnja avtoceste Vrhnika – Postojna čez barje (1970 – 1972). Izkušnje gradnje nasipov na slabo nosilnih barjanskih tleh so mnogo let kasneje dopolnili izzivi gradnje na morfološko razgibanih terenih najprej preko Trojan (1997–2005) na območju severovzhodne Slovenije pa gradnja cest od Šentilja do Gruškovja in od Dragučove do Vučje vasi. Nič manj ni bila zanimiva gradnja avtoceste po Dravskem polju med Slivnico in Draženci in ravninah Prekmurja med Vučjo vasjo do Lendave in dalje do Pinc na meji z Republiko Madžarsko. V smeri proti Republiko Madžarski je izvedena še ena prometna povezava ki je povezala dve sosednji in tudi edini državi, ki do takrat nista imeli neposredne železniške povezave. Gre za 24,5 m dolgi odsek železniške proge med Puconci in Hodošem (1999–2001), projektiranim za hitrosti 160 km/h in visokimi varnostnimi standardi. Večina križanj s progo je izven nivojskih. Na progi je zgrajen predor dolžine 320 m med Mačkovci in Stanjevci, 4 nadvozi, 2 podvoza, 5 podhodov, 14 mostov in 43 prepustov ter postaji Dankovci in Hodoš s postajnim objektom. Nove tehnične rešitve je prinesla tudi gradnja skozi strnjena pozidana naselja. Tukaj vidno mesto zavzema gradnja III. etape Hitre ceste skozi Maribor (1987–1989) stisnjene med zahodno pobočje

Meljskega hriba na eni in železnico in cesto na drugi strani. Prostorska stiska je je botrovala novim geotehničnim rešitvam s pionirskim projektom armirane zemljine (dr. Darinka Battelino, univ. dipl. inž. grad.) in izvedbo, do takrat pri nas manj uveljavljene, sidrane pilotne stene (dr. Štefan Faith, univ. dipl. inž. grad.). V zvezi z Meljskim hribom številni Mariborčani predvsem pa prebivalci Malečnika pomislijo na dolga leta zaprto najkrajšo povezavo med krajema, po levem bregu Drave, ko je bila do izgradnje nove galerije (2010 – 2012) cesta zaprta zaradi padanja kamenja iz strme južne brežine Meljskega hriba. Cestni projektanti se niso ustavili pred nobeno oviro, tudi ko so Novo Zrkovsko cesto pogumno speljali preko smetišča na Pobrežju (2006).



*Slika 1: Nasip iz armirane zemljine na HC skozi Maribor v Košakah. (K. Štern)*



*Slika 2: Pilotna stena na HC skozi Maribor v Košakah. (Google Earth)*

Za t.i. cestni program lahko z gotovostjo trdimo, da je doprinesel k najboljšejšim in najkvalitetnejšim geotehničnim izkušnje zadnjega četrta stoletja. Geotehnične raziskave so pridobile svoje mesto tako v primernem kvantitativnem obsegu še bolj pa v kvalitativnih vsebinah, tudi na račun uvedbe novih postopkov in metod.

Geotehnične pogoje načrtovanja in gradnje prometnic na severovzhodne Slovenije zaokrožujejo: konfiguracija terena, nehomogen sestav tal, raznovrstne konstrukcije velikih in spremenljivih

vplivov, prekrivanje posameznih cestnih odsekov z načrtovanjem in gradnjo ter izjemno spremenljivi roki, kot robni pogoj, tako za projektiranje kot samo gradnjo.

### **Obremenilne preizkušnje na uvrtonih pilotih**

Pri podajanju mejne računke nosilnosti ali projektne nosilnosti uvrtonih pilotov le to določimo na osnovi uveljavljenih računskih relacij z uporabo podatkov za mehansko fizikalne lastnosti zemljin, katere pridobimo iz preiskav izvedenih v vrtnah v sklopu raziskovalnega vrtnja ali v laboratoriju s preiskavami vzorcev zemljin in hribin.

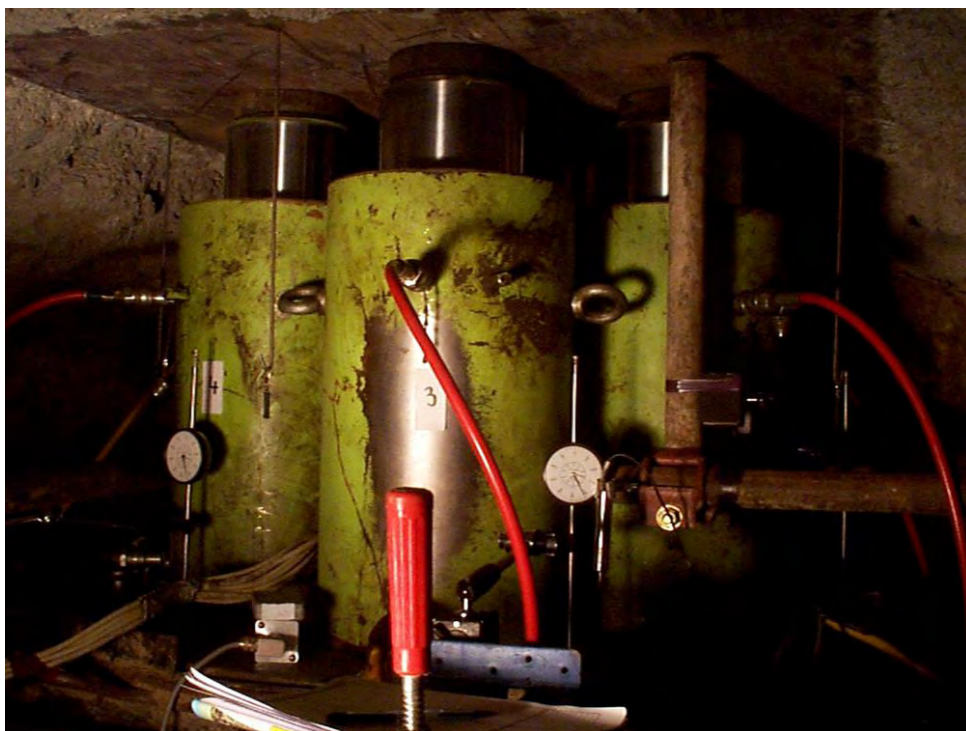
V skladu z uveljavljeno prakso je mejno nosilnost ali projektno nosilnost pilotov potrebno izkazati na dva neodvisna načina. Pri zabitih pilotih lahko uporabimo postopke na osnovi zabijalnih obrazcev ali računke relacije z upoštevanjem podatkov meritev dinamičnega in statičnega penetracijskega sondiranja. Pri uvrtonih, stoječih pilotih, pri katerih velik delež skupne nosilnosti odpade na nogo pilota, prej navedeni postopki niso uporabni. Za temeljenje objektov na uvrtonih pilotih večinoma koristimo in uporabimo:

- **izkušnje**, pridobljene pri temeljenju podobnih objektov v bližnji okolici ali v podobnih geološko geotehničnih razmerah. Na ta način ne poznamo porušne nosilnosti tal pod piloti. Neznano ostane tudi razmerje med računsko mejno nosilnostjo in upoštevano projektno nosilnostjo pilotov. Dejansko stanje je lahko bistveno ugodnejše, kar pomeni, da je varnost večja od upoštevane, temeljna konstrukcija pa predimenzionirana. Postopek je med geomehaniki in projektanti največkrat uporabljen.
- **Dinamični obremenilni preizkus**, katerega se izvede na enem konstrukcijskem pilotu podpore, ki je tudi sestavni del končne temeljne konstrukcije. S preizkusom se potrdi projektna nosilnost pilota, njegova porušna nosilnost in dejanski faktor varnosti, pa ostaneta še vedno neznana. Ker je objekt običajno že v gradnji in projekti izdelani, racionalizacija sistema temeljenja na osnovi meritev običajno tudi ni možna. Preizkusi so v preteklosti bili izvedeni le na podporah večjih premostitvenih objektov.



Slika 3: Dinamični obremenilni preizkus. (Ksenija Štern)

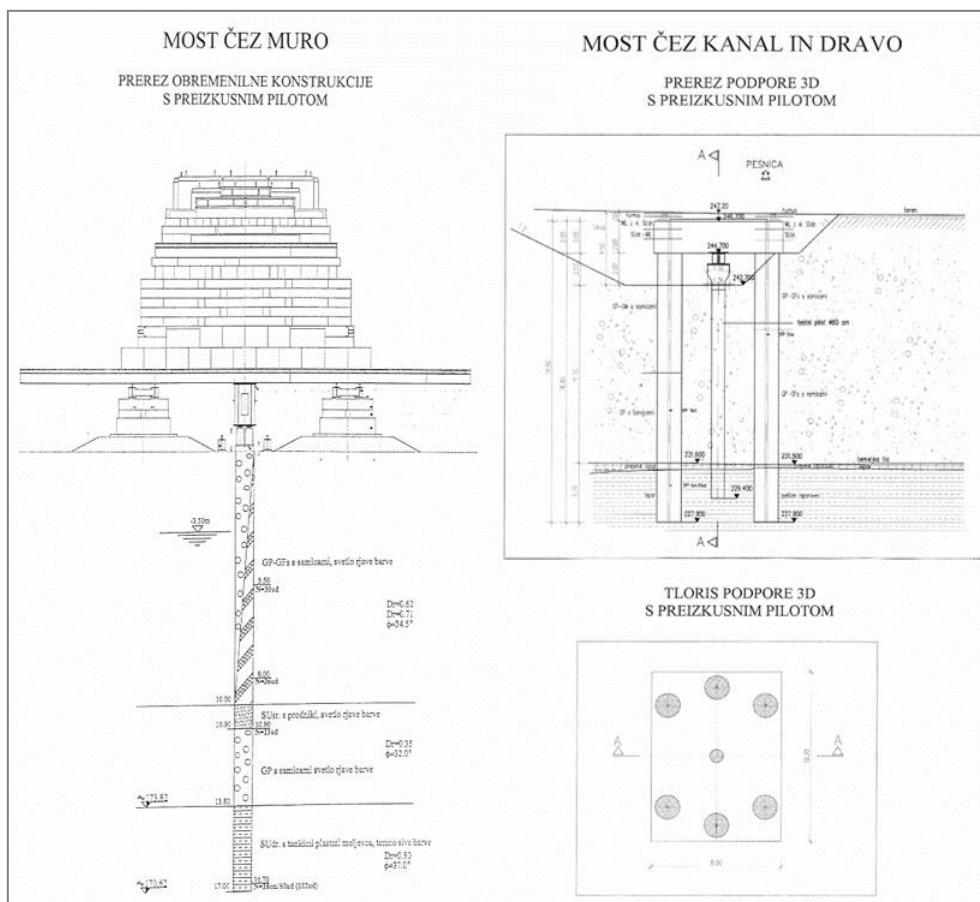
- **Statični obremenilni preizkus**, katerega se lahko izvede na konstrukcijskem pilotu podpore ali na samostojnem testnem pilotu. V prvem primeru lahko pilot obremenimo samo v območju izračunane projektne nosilnosti in le to tudi potrdimo. V drugem primeru pilot obremenimo toliko, da je dosežena porušitev tal pod pilotom in s tem določene relacije med mejno porušno, mejno računsko in projektno nosilnostjo pilota. Za varno in racionalno projektiranje je to pravi postopek za določitev nosilnosti pilotov.



Slika 4: Hidravlične preše za vnos vertikalne sile (Ksenija Štern)

Namen obremenilnih preizkusov pa ni samo v potrditvi in kontroli napovedane nosilnosti pilotov, temveč tudi v povratni kontroli pravilno izbranih računskih metod, vhodnih podatkov in privzetih faktorjev varnosti. Preizkusi so pokazali, da so se dejanskemu stanju najbolj približa izračun nosilnosti pilotov po polempiričnem postopku na osnovi podatkov presiometričnih meritev.

V letu 2000 sta v sklopu AC programa bila izvedena dva obremenilna testa poskusnih pilotov za direktno določitev nosilnosti uvrtnih pilotov in potrditev izračunanih nosilnosti na osnovi podatkov laboratorijskih in terenskih preiskav zemljin. V februarju je bil opravljen test pilota za most čez Muro (820 m) v Bakovcih v Prekmurju, decembra pa je bil test za določitev nosilnosti pilotov mostu čez Kanal in Dravo (760 m) v Zrkvocih pri Mariboru. V obeh primerih je bil izveden statični in dinamični obremenilni preizkus na pilotu premera 80 cm in dolžine 17,0 m in 14,0 m. Oba pilota sta po geometriji podobna, vpeta v nosilno podlago 1,60 m. Za porušitev obeh je bila predvidena aktivna balastna obtežba 12000 KN. V Prekmurju je bil test izveden z izvedbo posebne konstrukcije in nalaganjem balasta (Slika 6). Porušitev pilota ni bila dosežena. V Mariboru se je namesto balasta uporabila končna podpora mostu, ki je potrebno količino obtežbe zagotavljala z lastno težo pilotne blazine in pilotov, ter odporom nosilnih pilotov na izvlek (Slika 7). Pri obremenitvi 8000 KN je pilot bil porušen, aktivirana pa je bila vsa potrebna sila brez zaznanih deformacij na dvigu same podpore. Testni pilot je bil še dodatno opremljen z mernim kanalom znotraj pilota, kjer se je lahko preko specifičnih deformacij spremljalo delež obremenitve in njeno časovno razporeditev na plašč in nogo pilota (Slika 10).



Slika 5: Sestav tal s preizkusnim pilotom in obremenilno konstrukcijo.



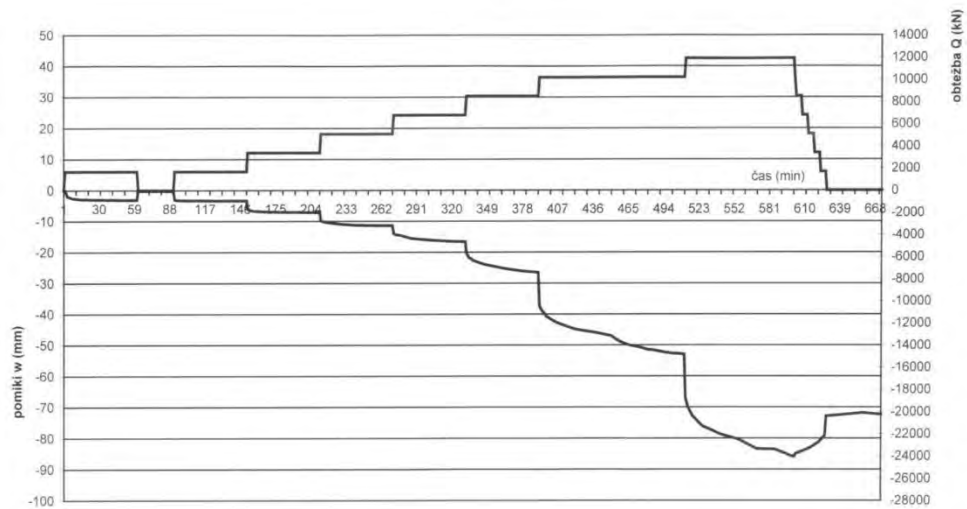
*Slika 6: Obremenitev pilota z balastno obtežbo, most č Muro (Ksenija Štern).*



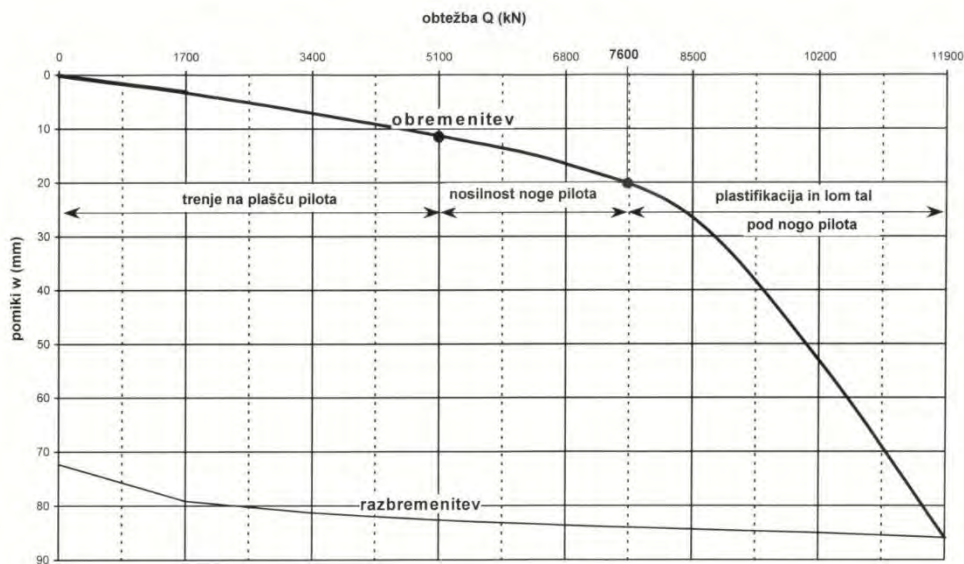
*Slika 7: Obremenitev pilota s pilotno blazino v podpori 3D, most čez Dravo (Ksenija Štern).*

Izvedba preizkusa je bila prilagojena postopku s konstantnim prirastkom sile v stopnjah po 60 minut, katerega je priporočil Stoll (Nonveiller, *Mehanika tla in temeljenje gradjevina*, 1979) in sicer tako, da se pilot obremeni z osmimi enakimi stopnjami do maksimalne računске obremenitve. Pri vsaki stopnji je potrebno opazovati premike glave pilota v predpisanem časovnem zaporedju: 1, 3, 7, 15, 30, 45 in 60 min. V primeru, da po končani osmi stopnji še ne pride do porušitve pilota, se predlaga nadaljevanje z vsaj še eno enako stopnjo po enakem

postopku (Slika 8). Rezultati obremenilnega preizkusa so za nadaljno obdelavo prikazani v diagramih po različnih soodvisnostih.



Slika 8: Prikaz nanosa obtežbe in pomikov po obremenilnih stopnjah.



Slika 9: Določitev nosilnosti pilota na osnovi razmerja med obtežbo in pomikom.

Postopek posameznega testa in rezultati za obe lokaciji so razvidni iz preglednic v nadaljevanju.

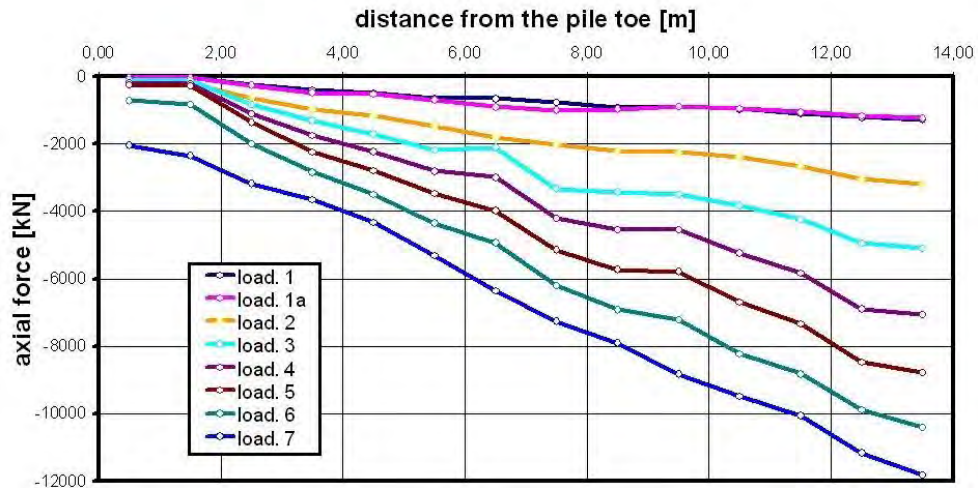
Tabela 1: Podatki obremenilnih preizkušenj testnega pilota mosta na Muri

	<b>Statični preizkus</b>		<b>Dinamični preizkus</b>
<b>Kraj</b>	Bakovci pri Muski Soboti		
<b>Datum</b>	3. 2. 2000	17. 2. 2000	9. 3. 2000
<b>Čas izvedbe testa</b>	10 <sup>30</sup> - 20 <sup>00</sup>	10 <sup>00</sup> - 20 <sup>00</sup>	12 <sup>30</sup> - 13 <sup>00</sup>
<b>Pilot</b>	2r = 80 cm, L = 17,00 m		
<b>Računska nosilnost pilota na osnovi preiskav v vrtinah - prvi preizkus</b>	8 200 KN		
<b>Računska nosilnost pilota na osnovi spremljave izvedbe pilota</b>	9 940 KN		
<b>Maksimalna obremenitev pilota</b>	8 200 KN	11 900 KN	12 859 KN
<b>Velikost obremenilne stopnje</b>	1 250 KN	1 275 KN	
<b>Število obremenilnih stopenj</b>	8	8+1	4
<b>Porušitev tal pod pilotom</b>	ni dosežena	ni dosežena - območje nosilnosti noge pilota	12 859 KN
<b>Maksimalni pomik pilota</b>	15,95 mm	17,42 mm	2,5 mm
<b>Trajna deformacija</b>	8,43 mm	7,28 mm	2,5 mm

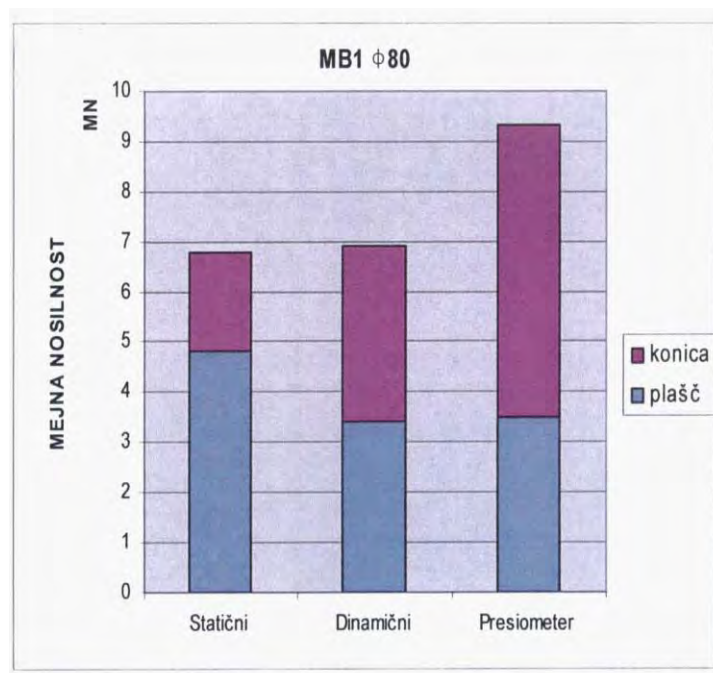
Tabela 2: Podatki obremenilnih preizkušenj testnega pilota mosta čez kanal in Dravo

	<b>Statični preizkus</b>	<b>Dinamični preizkus</b>
<b>Kraj</b>	Zrkovci pri Mariboru	
<b>Datum</b>	6. 12. 2000	14. 12. 2000
<b>Čas izvedbe testa</b>	9 <sup>30</sup> - 20 <sup>00</sup>	11 <sup>30</sup> - 13 <sup>00</sup>
<b>Pilot</b>	2r=80 cm, L=14,70 m	2r=80 cm, L=15,3 m
<b>Računska mejna nosilnost, določena na osnovi preiskav enosne tlačne trdnosti laporja</b>	6250 KN $q_{u, 4,0-5,0 m} = 1 168 \text{ KN/m}^2$	
<b>Velikost obremenilne stopnje</b>	1700 KN	
<b>Obremenilne stopnje</b>	1+7	7
<b>Maksimalna obremenitev pilota</b>	11 900 KN	6 990 KN
<b>Porušitev</b>	pri sedmi obremenilni stopnji	
<b>Maksimalni pomik pilota</b>	85,88 mm	13 mm
<b>Trajna deformacija</b>	72,31 mm	5 mm
<b>Dvig pilotne blazine v sredini</b>	1,1 mm	-
<b>Dvig pilotne blazine nad piloti <math>\phi</math> 150 cm</b>	-0,1 do 0,4 mm	-

Primerjava nosilnosti uvrčanega pilota premera 80 cm v podpori 3D AC mostu, določena z obremenilnimi preizkušnjami in na osnovi podatkov presiometričnih meritev (Slika 11) kaže na veliko nosilnost plašča pilota, medtem ko nosilnost noge ni v celoti aktivirana. Za dosego le te so potrebni večji premiki. S primerjavo rezultatov obremenilnih preizkušenj in računskih analiz obnašanja pilotov je ugotovljeno, da omogočajo presiometriške meritve zanesljivo napoved obnašanja pilotov.



Slika 10: Rezultati meritev osne sile vzdolž pilota. (A. Štrukelj).



Slika 11: Primerjava nosilnosti pilota določene z uporabo različnih postopkov.

### Gradnja visokih nasipov na slabo nosilnih tleh

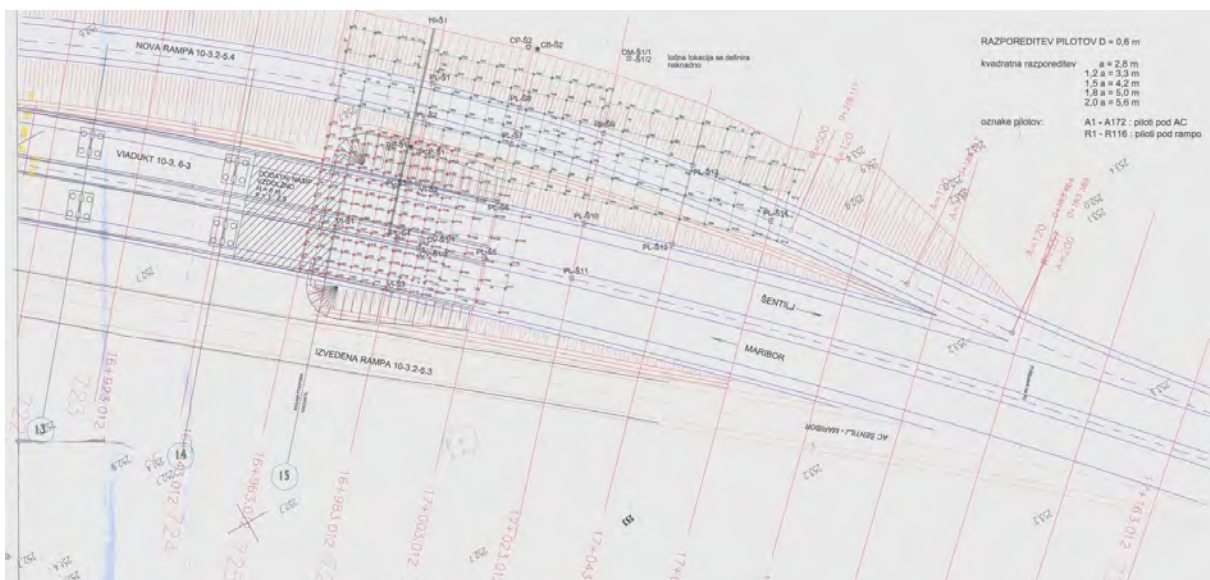
Gradnja prometnic na slabo nosilnih in podajnih temeljnih tleh ni samo tehnično vprašanje neposredne izvedbe temveč so izbrane rešitve močno časovno pogojene. Robni pogoji razpoložljivega časa gradnje so v veliki meri narekovali ukrepe povečanja nosilnosti tal in pospešitve konsolidacije pri prečkanju Pesniške doline na mestu priključnih nasipov na viadukt in uvozno izvozni ramp rondoja Pesnica. Predvideni posedki so reda velikost nekaj decimetrov (P

726, 48 cm), odvisno seveda od končne višine samega nasipa. Brez izboljšave tal se je, z enkratnim nanosom obtežbe, lahko izvedlo nasip do višine 6,0 m.

Glede na različne časovne omejitve se ukrepi prilagajajo glede na premer, število in raster gruščnatih slopov, dinamiko nanašanje obtežbe z gradnjo cestnega nasipa, morebitno preobremenitev z začasnim nadvišanjem nasipov... Iz geotehničnega vidika je bolj neugodna šentiljska stran. Na podlagi analiz z robnim časovnim pogojem je bilo določeno za:

- čas konsolidacije 2 leti: Šentiljska stran, območje 155 m, slopi D = 0,40 m, 751 komadov,
- čas konsolidacije 3 leta: Šentiljska stran, območje 155 m, slopi D = 0,40 m, 702 komadov,
- čas konsolidacije 5 let: Šentiljska stran, AC in rampa 5.4, slopi D = 0,60 m, 172 + 116 komadov.

Med projektiranjem in spremembo prioritiet gradnje je bil podaljšan razpoložljiv čas gradnje na 5 let, kar je omogočilo optimizacijo ukrepov in sicer tako da na mariborski strani gruščnatih slopi niso bili več predvideni. Cestni nasip se je zgradil do predpisane vmesne kote in v nadaljevanju, glede na podatke spremljave usedkov, dogradil in dodatno preobremenil v višini 5,0 m.



Slika 12: Prikaz ukrepov zagotavljanja nosilnosti in pospešitve konsolidacije tal - Šentiljska stran.

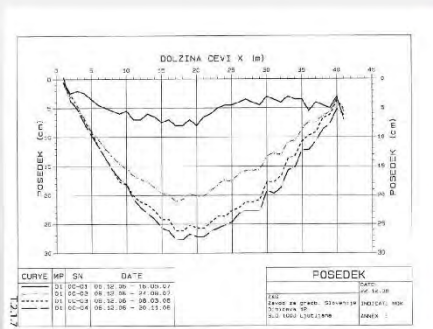
Pri gradnji nasipov na mehkih tleh je geotehnično opazovanje vitalnega pomena za uspešno vodenje gradnje in argumentirano odločanje o nadaljevanju del v vsakem trenutku. V konkretnem primeru je bila, zlasti pri varianti brez gruščnatih kolov, problematična varnost v obeh primerih pa čas konsolidacije in velikost posedkov. Predvsem se je bilo potrebno odločiti kdaj in koliko preobtežbe uporabiti ter koliko časa naj odleži, da bi bili diferenčni posedki med viaduktom in nasipoma minimalni.

V času gradnje so bile opravljene določene enkratne meritve in vzpostavljen sistem mernih mest z vgradno 27 posedalnih plošč, 12 dodatnih reperjev na že izvedeni rampi, 2 horizontalna – hidrostatska inklinometra, 4 cevni piezometri za meritve vodostaja, 4 piezometri z vgradnjo merilcev tlaka in meritvami pornih tlakov, 2 preiskavi z dilatometersko sondo, 2 preiskavi s statičnim penetrometrom, 4 preiskave s presiometrom v gruščnatem kolu.

# GEOTEHNIČNI MONITORING

## NASIPI

## Horizontalni inklinometer



Slika 13: Vgradnja horizontalnega inklinometra in prikaz rezultatov meritev. K. Štern)

### Podporni ukrepi na vkopih

Trasa AC Koper – Lendava, na odseku od Drave do Pesnice, v dolžini 3,850 km, poteka preko 6 viaduktov, 1 pokritega vkopu, 1 predoru in 5 globokih vkopih, trajno varovanih z opornimi konstrukcijami OZ-01 do OZ-07.

Razmeroma kratek avtocestni odsek je speljan po morfološko zelo zahtevnem in razgibanem terenu, kjer so splošne geološke, hidrogeološke in geotehnične razmere podobne. Izbrani podporni ukrepi so pogojeni z niveleto ceste. Praviloma se izvajajo od vrha terena navzdol, v točno predpisanem vrstnem redu. V generalno podobnih geološko geotehničnih pogojih so odzivi posameznih podpornih konstrukcij različni.

Osnovno hribino področja Meljskega hriba in zaledja Vodolske doline tvorijo miocenski sedimenti 1M12 (helvetij), prepereli od 3,0 do 10,0 m (Mpr). Sedimenti, kateri prevladujejo so peščeni laporji, peščenjaki in meljevci. Medsebojno se izmenjavajo, prevladujejo pa plasti laporja. Po mineraloško petrografskih raziskavah (1996) so to karbonatni glinasti meljevci in kalcitno muskovitni kremenov meljasti glinavec. Pri mikroskopskem opazovanju vzorcev je ugotovljeno, da so listasti minerali glinavcev in meljevcev prednostno orientirani vzdolž plastovitosti, kar pogojuje močno higroskopičnost kamnine vzdolž plastovitosti. Lapor in meljevec sta svetlo sive do sive barve, ponekod rahlo olivno siva, na površini pa rjavo preperela in razpokana. Med plastmi laporja in peščenjaka so zastopani različno debeli sloji svetlo sivega drobnozrnatega sljudnatega kremenovega peščenjaka ter sivega peščenega meljevca.

Debelino in sestavo pokrovnega deluvialnega, tudi preperinskega sloja, pogojuje litološka sestava osnovne hribine, njena razpokanost, preperelost in nagubanost zaradi tektonskega delovanja in erozije. Sestavljajo ga meljno peščene gline, mestoma mastne do puste gline, peščeni melji in redko zameljen pesek. Med glinami, melji in peski dobimo drobni grušč preperelega laporja in peščenjaka.

**Oporna zidova OZ-01 in OZ-02** sta ločeni oporni konstrukciji, ki sta medsebojno prekinjeni s pobočno grapo, z enako zasnovo konstrukcije in istim zalednim pobočjem. Globoki levi vkop, skupne dolžine 450 m, je varovan s konstrukcijo vertikalnih sidranih slopov, prečno povezanih z armirano betonskimi gredami. Največja globina vkopa na OZ-01 je ca. 38 m, na OZ-02 pa 20 m. V prečni smeri je vkopana samo leva stran, medtem ko je desni rob ceste na robu pobočja, mestoma tudi v nasipu. V nižji desni vkop preide trasa v območju OZ-02 na kratkem iztočnem delu vkopa.

Sistemi sidranih podpornih konstrukcij so predvideni na celotnem vkopnem delu v zemljini, preperini in kompaktni hribini laporja, meljevca in peščenjaka. Podporne konstrukcije so razporejene po brežinah, medsebojno ločenih z bermami širine 3,00 in 5,00 m. Naklon konstrukcij je izbran glede na globino vkopa in vrsto zemljine. V zgornjem, zemljinem in preperinskem delu, je naklon brežine  $n = 1 : 1$ , z največjo možno višino etaže  $h = 10$  m in z največ 2 etažama (4. in 3. brežina). Sidrani slopi na medsebojnem razmiku 5,00 m so prečno povezani s horizontalnimi vezmi v približno kvadratnem rastru. Vertikalni slopi so sidrani s trajnimi geotehničnimi sidri dolžine 18,00 – 22,00 m na razmaku 4,00 m, skupaj 2 sidri na slop. Pred erozijo in preperevanjem je zemljina zaščitena s kamnito oblogo po celotni vmesni površini. Brežine izvedene v kompaktni hribini so strmejše, v naklonu  $n = 2 : 1$ , z višino spodnje, najnižje etaže  $h = 10$  m, zgornje pa 7,50 m (1. in 2. brežina). Sidrani slopi so na medsebojnem razmaku 4,00 m in 5,00 m in so sidrani s trajnimi geotehničnimi sidri dolžine 20,00 m – 24,00 m na razmaku 2,00 m, skupaj 4 sidra na slop. Med slopi je spodnja brežina do 1/4 zapolnjena s kamnom, dalje pa se, glede na razpokanost in obstojnost hribine, izvaja proti erozijska zaščita z vgradnjo betonskih plohov pravokotno na sople. Armirano betonski slopi srednje dimenzije  $B / H = 80 / 100$  so montažni, lahko pa bi bili izvedeni tudi na licu mesta.

Pri gradnji OZ-01 in OZ-02 dodatni ukrepi niso bili potrebni v nobeni od izvedbenih faz. V obravnavanem primeru imamo opravek s pobočnim vkopom, kjer so razbremenitve terena zelo male. Vznožje konstrukcije je od roba površja prvotnega pobočja oddaljeno največ 20 m, od tega je zgornja 1/3 preperela zemljine.



Slika 14: Gradnja slopov na OZ-01. (K. Štern)

**Oporna zida OZ-03 in OZ-04** sta sidrani pilotni steni pred in za viaduktom Vodole III. Prva je dolga 105 m, druga pa 195 m, svetle višine do ca. 8 m pri višini vkopa 12 in 14 m. Obe konstrukciji sta pomaknjeni v pobočje in imata urejeno prosto brežino pred objektom. Ena vrsta sider vezne grede sega za sloj preperine v kompaktni lapor. Velik del izmerjenih pomikov, predvsem v zgornjem delu inklinacijske cevi, ima smer odklona v pobočje, v spodnjem delu, pod niveleto, pa proti izkopu. Največji zabeležen pomik znaša 31 mm in je povezan z izkopi na mestih krajnih podpor viadukta, pred sidranjem objekta. Po vzpostavitvi končnega stanja na pilotni steni in podporah viadukta so se umirili tudi pomiki.

Pri gradnji OZ-03 in OZ-04 dodatni ukrepi, vezani na geološko geotehnične razmere, niso bili potrebni. Glede na morfologijo terena se je sicer izkazalo, da sta neustrezni tako višina kot dolžina opornega zidu OZ-04, kar je pogojevalo podaljšanje objekta in dodatne podporne ukrepe na brežini.



Slika 15: Dodatni ukrepi na brežini v zaledju OZ-04. (K. Štern)

**Proste brežine in kamnita zložba KZ-02** so izvedene na 240 m globokem vkopu na desni strani ceste, med viaduktoma Vodole IV in Vodole V.

Vkop je tudi edini globoki vkop s prostimi brežinami na najvišjem delu globok 30 m, višina pa se znižuje v obe smeri v obliko elipse. Izkop v laporju je izveden v naklonu brežin  $n = 1 : 1$  z dvema vmesnima bermama. Zgornja brežina je izvedena v naklonu  $n = 1 : 3$ . Na kontaktu zgornjega preperinskega sloja in laporja je locirana kamnita zložba skupne dolžine 92 m. Pred erozijo so lapornate brežine zaščitene z biotorkretom.

**Oporni zidovi OZ-05, OZ-06 in OZ-07** se nahajajo na območju 30 m globokega vkopa Dragučova, dolžine 520 m. Gre za na tej trasi največkrat omenjen vkop na stičišču prometnih poti iz smeri Avstrije in Madžarske proti Hrvaški in Italiji, kjer je avtocestni razcep načrtovan neposredno za globokim vkopom. Oporni zid OZ-05 se razprostira pod dolgim, vzhodno orientiranim pobočjem, na levi strani ceste, po celotni dolžini. Nasproti ležeča oporna zidova OZ-06 in OZ-07 sta krajša, med seboj kratko prekinjena, predvsem pa se z vrhom brežine izklini oziroma obrne tudi zaledje.



*Slika 16: Pogled na oporni zid OZ-06. (K. Štern)*

Podporni ukrepi so zasnovani z enotnim sistemom sidranih montažnih konstrukcij, razvrščenih po brežinah z vmesnimi bermami. Varovanje brežin je predvideno na vseh delih vkopa, kjer višina vkopa doseže višino ene etaže, spodnje 9,00 m, srednje 8,00 m in zgornje 7,00 m. Slopi so v naklonu  $n = 2,5 : 1$ , širina berme je 4,00 m, zaledna prosta brežina pa je urejena v naklonu  $n = 1 : 2$ . Slope, sidra, vezne grede in polnila med slopi se vgrajuje sproti, skladno z izkopom, katerega smer in višina sovpadata z delovnimi in končnimi višinami posamezne etaže. Iz časovnega in logističnega vidika je takšna gradnja počasna gradnja.

Gradnja vkopa in objektov se je pričela v septembru 2006. Obravnavanemu odseku pripadajo tri samostojne oporne konstrukcije in vkop, ki so jih gradila različna gradbena podjetja, katera so svojim tehnološkim postopkom in razpoložljivim kapacitetam prilagodila potek gradnje. Tako se je, zraven že omenjenega intenzivnega izkopavanja v območju osi ceste, objekte gradilo iz več napadnih mest. Prevoznost gradbiščne ceste, dober meter nad niveleto avtoceste, je bila vzpostavljena zelo hitro po pričetku izkopavanja, kar je bila tudi potreba, glede na to da je gradnja opornih zidov OZ-06 in OZ-07 napredovala hitreje od gradnje opornega zidu OZ-05. Slednji ima na isti etaži bistveno več slopov in sider kot ostala dva skupaj. Tudi če se je napredovanje del po posameznem objektu odvijalo skladno s projektom, pa to za skupno napredovanje del po etažah ne velja.

Obvezna geotehnična spremljava med gradnjo je opredeljena v zaključkih tekstualnih delov celotne projektne dokumentacije, medtem ko projekt ali elaborat tehničnega opazovanja za celoten vkop kot enoten objekt, ni bil izdelan. S projekti posameznih zidov so bile predpisane meritve, ki izhajajo iz veljavnih standardov spremljave sil v merilnih sidrih in predpisana vgradnja geodetskih točk na gredah. Vgradnja štirih vertikalnih inklinometrov se pojavi zgolj v popisu del. Ne glede na to, je vzpostavljen sistem tehničnega opazovanja na opornem zidu OZ-05, svojo namembnost izkazal kmalu po začetku gradnje, ko so zaznani povečani horizontalni pomiki v vertikalnih inklinometrih in konstantno naraščanje sidrskih sil v merilnih sidrih opozorili na intenziviranje pomikov v zaledju 520 m dolge oporne konstrukcije, tako po velikosti, kot hitrosti naraščanja. Oporna zidova OZ-06 in OZ-07 sta se zaradi pomanjkanja podatkov obravnavala kot

stabilni del vkopa. Na takšno stanje se sklepa na osnovi meritev sidrnih sil, katerih rezultati so ustrezni in skladni s projektnimi napovedmi.

Pomen geotehnične spremljave med gradnjo se je prvič odrazil po manjši lokalni porušitvi v laporju, v P587 na srednji bermi, oktobra 2006. V tem območju je izkop pred konstrukcijo prehiteval predpisane faze gradnje objekta, s poglobljanjem izkopa v osi trase. Masa hribine pred objektom ni zagotavljala zadostnega odpora, niti ni bila stabilna v lokalno izvedenem izkopu. Neposredno za tem dogodkom so zabeleženi tudi večji premiki v zalednih inklinometrih. V posameznem inklinometru se večji translatorski pomiki pojavijo na več višinah v velikosti do 40 mm. Dogodki so intenzivirali tudi aktivnosti na spremljavi drugih, do takrat vgrajenih merilnih mestih. Meritve pomikov redkih geodetskih točk na gredi in slopih so premike potrdile, medtem ko so sidrne sile vztrajno naraščale.



*Slika 17: Podor laporja na srednji bermi v P587 in OZ-07 v ozadju. (K. Štern)*

Na osnovi vseh navedenih zaznav je bilo potrebno hitro ukrepanje za preprečitev nadaljnjih deformacij. Prvi ukrepi so se nanašali na prekinitev izkopnih del, navoz balastnega materiala na območje pred porušeno brežino, zahtevo po takojšnjem sidranju vseh izvedenih slopov in podanimi podrobnimi navodili za napredovanje del. Stabilnostne razmere na vkopu pa so zahtevale dodatne podporne ukrepe. Potrjena je bila prva dopolnilna projektna rešitev z izvedbo dodatne horizontalne grede na zgornji brežini levega dela zidu, povečanjem števila in dolžine sider in podrobno opredeljenim načinom napredovanja del po kampadah. Vzporedno so tekle dopolnilne geotehnične raziskave in analize za vzpostavitev trajnega stabilnega stanja tudi na osnovi podatkov dodatno vzpostavljenih merilnih mest in povečane predpisane pogostosti meritev.

Zadnji slopi in sidra na objektu OZ-05 so bili izvedeni novembra 2009.



*Slika 18: Pogled na oporni zid OZ-05, proti koncu gradnje. (K. Štern)*

Če je oporna konstrukcija objekt, s katerim je zagotovljena trajna stabilnost vkopa, je sam vkop lahko tudi dragocen vir zemeljskega materiala za nadaljnjo uporabo. Iz laporja, pridobljenega na tem vkopu, so zgrajeni visoki nasipi v nadaljevanju te trase in trase avtoceste proti Lenartu, vključno z razcepom Dragučova. Količina nasipov, tehnologija gradnje, deformabilna tla in pogoj odležanja nasipov so zahtevali ravno nasprotno, hiter izkop za čim hitrejšo gradnjo nasipov.

### **Vgradljivost laporjev**

Lapor z vmesnimi sloji peščenjaka je na prvi pogled odličen nasipni material. Glede na težavnost izkopa ga uvrščamo med mehke kamnine z razmeroma neproblematičnim izkopom. Naravna vlažnost je rahlo pod optimalno in ga je praviloma mogoče vgraditi z minimalnim vlaženjem. Material se z uporabo težkih komprimacijskih sredstev dobro zgošča, pri vlagah okrog optimalne ali nižjih se dosegajo visoki deformacijski moduli. Zaradi navedenih, ugodnih, skoraj idealnih lastnosti, so bile pred dobrimi desetimi leti, na prvem AC odseku Pesnica – Šentilj, v razmeroma kratkem času vgrajene velike količine podobnega materiala. Kljub temu, da so bili izpolnjeni vsi predpisani kriteriji vgrajevanja, odlične togosti nasipnih plasti in ustrezne zgoščenosti, so na vozišču nastale deformacije. Po danes znanih podatkih sklepamo, da so le te posledica neenakomernega sesedanja nasipov in nabrekanja nasipnega materiala. Rezultati preiskav so potrdili domnevo, da je lapor iz tega območja volumsko neobstoje in v vodi nabrekne in razpade v vezljivo zemljino. Dodaten problem nabrekanja je tudi ta, da to ni enkraten proces. Proces nabrekanja, sesedanja in krčenja se ciklično ponavlja, predvsem če smo priča ponavljanju daljših sušnih in deževnih obdobj, vse dotlej, ko lapor sam poišče neko trajno ravnovesje. Večja zrna razpadejo v vezljivo zemljino in zapolnijo praznine, prepustnost se zmanjša, vlažnost pa se ustali. Pri tem nastanejo poškodbe ki jih ni mogoče enostavno sanirati z izravnavo ali preplastitvijo vozišča.

»Miocenski laporji« vgrajeni v nasipe se ne glede na funkcijo in vrsto lapornatega nasipa vedno izvedejo na prodno peščeno gramozno blazino, katera je iz geotehničnega vidika v vlogi drenažno filternega sloja. Pospešuje proces konsolidacije z dreniranjem proti površju in hkrati preprečuje razmakanje pete nasipa in s tem poslabšanje trdnostnih parametrov nasipnega materiala. Iz vidika tehnologije je povozni plato, ki se ga pripravi pred gradnjo nasipa kot prvi nasipni sloj na katerega se gradi AC nasip z vgradnjo:

- Predrobljenega laporja v mehansko utrjenih slojih.
- Predhodno predrobljeni laporji se dobro mehansko vgrajujejo v suhem vremenu. Togost in trdnost plasti iz laporjev je odlična na suhi strani Proctorjeve krivulje, vendar pa je v tem primeru volumenska stabilnost zaradi časovnih vplivov sukcije slaba. Zato pri mehanskem vgrajevanju laporjev velja naslednje temeljno pravilo:
- Laporje vgrajujemo vselej pri vlagah, ki so enake ali višje od optimalne vlage ( $w_0 = w_{opt}$  do  $w_{opt} + 2\%$ ) oziroma pri stopnji  $S_r$  najmanj 80 - 85%.

Rezultati preiskav kažejo, da je pri vgrajevanju »miocenskih laporjev« potrebno posebno skrb posvečati vzdrževanju ustrezne vlage oziroma ustrezne stopnje zasičenja izkopanih zrn ter vgrajenih plasti. Pomembno je, da so v primerih, ko se v izkopu kopljejo plasti iz visoko plastičnih glin ( $I_p > 30\%$ ), stopnje zasičenja višje od 90 %, sicer pa morajo biti enake ali nekoliko višje od 85 %, kar praviloma predstavlja enako ali višjo vlago od optimalne. Ker je vzdrževanje ustrezne stopnje zasičenja velikih zrn praktično nemogoče, je pomembno, da se tehnologijo izkopa in priprave izkopanega materiala pred vgrajevanjem vodi tako, da se velika zrna, nad 100 mm predrobi in navlaži še preden se material odpelje v nasip. V nasipu, po vgradnji ne sme biti praznin, nasipi morajo biti čim bolj homogeni in čim bolj zgoščeni, za kar je potrebno uporabiti zmogljiva komprimacijska sredstva.

Kontrola kvalitete izvedenih nasipnih plasti vključuje tudi preglede s sondažnimi izkopi v katerih se preverja debelina plasti ter homogenost tako v smislu vlažnosti, kot zgoščenosti in zrnivosti. Vlago in zgoščenost se kontrolira z meritvami, medtem ko visoki deformacijski moduli kažejo bolj na to, da je bil material pri vgradnji presuh. Dograjene nasipe je priporočljivo opremiti z merilniki za kontinuirano ali periodično spremljanje vlage.

Kljub skrbni vgradnji, skladno z zgoraj navedenimi pogoji je potrebno, da visoki nasipi odležijo vsaj 6 mesecev, priporočljivo pa je odležanje čez zimo.

»Miocenski laporji« v temeljnih tleh globokih vkopov so enako, kot vse zemljine, ki se nahajajo v temeljnih tleh v vkopanih delih trase in v trasi, ki sledi planumu raščeni tal, močno občutljive na vodo in zmrzal, se hitro razmočijo in hitro ter globoko zmrzujejo.

Bolj od globine prodiranja mraza so problematične vode, ki pronicajo skozi nevezane plasti voziščne konstrukcije in mehčajo planum lapornatih (glinastih) temeljnih tal, zaradi česar prihaja do slabšanja razmer in posledično do neravnin in razpok na vozišču, zato smo zaradi občutljivosti zemljin v temeljnih tleh v tehnološkem elaboratu predvideli nadomestitev lapornatih (glinastih) temeljnih tal s kamnitim materialom, katerega kvaliteta je ekvivalentna kamniti posteljici ali s sanacijo tal s kemično stabilizacijo zemljin, če se v tleh pojavijo visoko plastične gline.

## Viri in literatura

1. Korpar, L., 2004. Načrt gradbenih konstrukcij, oporni zid OZ-05 (AB slopi), projekt št. 3682. Gradis Biro za projektiranje, Maribor.
2. Petkovšek, A., 2006. Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah in določitvi optimalnih pogojev vgrajevanja miocenskih poltrdnih in trdnih meljev in glin iz globokega vkopa Dragučova v avtocestne nasipe. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
3. Štern, K., 2008. AC Koper – Lendava, Odsek Slivnica – Pesnica, Zrkovska cesta – priključek Pesnica od km 13+520 do km 16+300, vkop OZ-05 km 14+080 do km 14+600, podatki tehničnega opazovanja (10. periodično poročilo), GMM-6368-10. Geoinženiring, Maribor.
4. Štern, K., 2007. Poročilo o preiskavah tal, Dopolnilne raziskave za potrebe ocene stabilnosti globokega vkopa OZ-05, GMM-6442/07. Geoinženiring, Maribor.
5. Štern, K., 2006. Geološko geotehnični pogoji in tehnologija gradnje trase AC, AC Koper – Lendava s priključnimi kraki, Ptujška – Zrkovska, trasa AC km 6+700 do km 10+847, GMM-6271/06. Geoinženiring, Maribor.
6. Štern, K., 2006. Tehnološki elaborat izvajanja zemeljskih del, PZI, AC Koper – Lendava, Odsek Slivnica – Pesnica, Zrkovska cesta – priključek Pesnica od km 13+520 do km 16+300, GMM-6260/06. Geoinženiring, Maribor.
7. Štern, K., 2004. Tehno ekonomski elaborat vzpostavitve tehničnega opazovanja priključnih AC nasipov in ramp na območju rondoja Pesnica, GMM 6152/04, Geoinženiring Maribor.
8. Štern, K., 2003. Elaborat prilagoditve ukrepov izboljšanja temeljnih tal daljšemu času konsolidacije, s programom opazovanja nasipov in temeljnih tal-usklajeno z revizijo-, GMM 6096/04, Geoinženiring Maribor.
9. Štern K., 2000. Poročilo o rezultatih obremenilnih preizkusov testnega pilota na AC Vučja vas Beltinci, lokacija Bakovci, Geoinženiring 50-13/2000.
10. Štern, K. Štrukelj A., 2001. Poročilo o rezultatih obremenilnih preizkusov testnih pilotov v podpori 3 D mostu čez kanal in Dravo (760 m) na AC Slivnica Pesnica v Zrkovcih pri Mariboru, Geoinženiring 50-8/2001.
11. Štern K., 1988 Geološko geotehnično poročilo, most čez Dravo, AC Slivnica-Pesnica, km 10+842 – 1+6151, PGD, Geoinženiring 50-53 a/99.