

## 7.1 NASLOVNA STRAN NAČRTA / ELABORATA

### OSNOVNI PODATKI O GRADNJI

Naziv gradnje: **Rekonstrukcija Barjanske ceste od Ziherlove ulice do križišča z AC priključkom Center in P+R Barje**

Kratek opis gradnje:

Vrsta gradnje:

<input type="checkbox"/>	novogradnja – novozgrajen objekt
<input type="checkbox"/>	novogradnja – prizidava
<input checked="" type="checkbox"/>	rekonstrukcija
<input type="checkbox"/>	sprememba namembnosti
<input type="checkbox"/>	odstranitev

### DOKUMENTCIJA

Vrsta dokumentacije: **PZI – PREDHODNO**

Številka projekta: **8359**

☐ sprememba dokumentacije

### PODATKI O NAČRTU / ELABORATU

Strokovno področje  
načrta/elaborata: **7 NAČRT S PODROČJA GEOTEHNIKE IN GEOTEHNOLOGIJE–  
GEOLOŠKO GEOTEHNIČNI ELABORAT**

Številka načrta/elaborata: **19-G-2022**

Datum izdelave: **Maj 2022**

### PODATKI O IZDELOVALCU NAČRTA / ELABORATA

Projektant (naziv družbe): **STABI, geotecnika, projektiranje in svetovanje, d.o.o.**

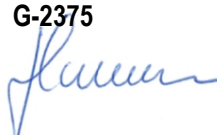
Naslov: **Ulica Koroškega bataljona 22, 1231 Ljubljana – Črnuče**

Ime in priimek

pooblaščenega inženirja: **LARA HUMAR, mag. inž. grad.**

Identifikacijska številka: **G-2375**

Podpis pooblaščenega  
inženirja:



**LARA HUMAR**  
mag.inž.grad.  
IZS PI G-2375

### PODATKI O PROJEKTANTU

Projektant (naziv družbe): **LJUBLJANSKI URBANISTIČNI ZAVOD d.d.**

Naslov: **Verovškova ulica 64, 1000 Ljubljana**

Vodja projekta: **Uroš MARŠIČ, univ. dipl. inž. grad.**

Identifikacijska številka: **G-3272**

Podpis vodje projekta:

Odgovorna oseba projektanta: **Tadej PFAJFAR, univ. dipl. inž. geod.**

Podpis odgovorne  
osebe projektanta:

## **7.2 KAZALO VSEBINE GEOLOŠKO GEOTEHNIČNEGA ELABORATA št. 19-G-2022**

### **7.1 NASLOVNA STRAN ELABORATA**

### **7.2 KAZALO VSEBINE ELABORATA**

### **7.3 TEHNIČNO POROČILO**

1. Splošno
2. Terenske raziskave
3. Laboratorijske preiskave
4. Geološko geotehnični opis terena
5. Analiza posedanja tal in stabilnosti nasipa
6. Geotehnični pogoji za izvedbo ceste
7. Geotehnični pogoji za temeljenje mostu čez Mali graben
8. Zaključek

### **7.4 GEOLOŠKO GEOTEHNIČNE RAZISKAVE IN IZRAČUNI**

- |            |  |
|------------|--|
| P.1.1–1.10 | Geotehnični profili in fotodokumentacija vrtin   |
| P.2        | Poročilo o preiskavi tal s sondo statične konusne penetracije  |
| P.3.1–3.3  | Vrednotenje rezultatov preiskav z ultra lahko dinamično penetracijo »Panda«                          |
| P.4.1–4.12 | Geotehnični popis in fotodokumentacija izkopov na vozišču  |
| P.5.1–5.4  | Geotehnični popis in fotodokumentacija izkopov izven vozišča   |
| P.6.1–6.15 | Laboratorijske preiskave na vzorcih zemljin iz izkopov na obstoječem vozišču                         |
| P.7        | Poročilo o laboratorijskih preiskavah na vzorcih zemljin iz sondažnih vrtin in izkopov izven vozišča |
| P.8.1–8.12 | Analiza posedkov tal in stabilnosti nasipa   |
| P.9.1–9.4  | Izračun nosilnost pilotov  |

### **7.5 RISBE**

- |             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| G.1.1–G.1.2 | Situacija raziskav              | M 1 : 1000 |
| G.2         | Geološko geotehnični prerez B-B | M 1 : 100  |

<b>7.3</b>	<b>TEHNIČNO POROČILO</b>
------------	--------------------------

## 1. SPLOŠNO

Načrtovana je rekonstrukcija Barjanske ceste od križišča z Ziherlovo cesto do križišča z AC priključkom Center in P+R Barje. Barjanska cesta se bo v smeri proti AC širila predvsem na levo stran, kjer bo dograjen vozni pas in pas za vozila LPP, kolesarska steza in hodnik za pešce. Začetni del odseka do križišča s Cesto v Mestni log se ne bo bistveno spreminjal. Razširil se bo most čez vodotok Mali graben. Načrtovana je dograditev cestne povezave na obstoječo Opekarsko ulico iz Barjanske ceste. Na sedanjem priključku AC Center je predvideno krožišče. Skupna dolžina rekonstrukcije Barjanske ceste je cca. 1623 m in cca. 125 m novogradnje – Opekarska ulica.



*Slika 1: Prikaz območja rekonstrukcije Barjanske ceste (vir: Atlas okolja)*

Po naročilu Mestne občine Ljubljana smo na območju predvidene rekonstrukcije in novogradnje na območju novogradnje/širitve mostu čez Mali graben izvedli 2 sondažni vrtini globin 30 in 10 m, 4 sondažne razkope z rovakopacem z meritvami nosilnosti tal in odvzemom vzorcev, 5 sondažnih jaškov v voziščni konstrukciji z meritvami nosilnosti tal in odvzemom vzorcev, 3 ultra lahke

dinamične penetracije Panda 2 in 2 sonde statične penetracije CPTu s štirimi izvedenimi disipacijskimi testi. Okolica in predmetni teren sta bila geološko geotehnično pregledana. Izveden je bil pregled obstoječe ceste. Pri terenskih in laboratorijskih raziskavah so sodelovala podjetja:

- Izvedba sondažnih geomehanskih vrtin – ROVS d.o.o., Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana.
- Izvedba izkopov na obstoječem vozišču in laboratorijske preiskave odvzetih vzorcev zemljin – Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana.
- Izvedba sonde statične penetracije (CPTu) – M-TEST, Marjan Filipič s.p., ulica bratov Mivšek 31, B1353 Borovnica.
- Laboratorijske preiskave na vzorcih zemljin iz sondažnih vrtin in izkopov izven obstoječega vozišča – LABTEST d.o.o., Idrijska cesta 42, 1360 Vrhnika.

Na podlagi rezultatov je izdelano predmetno geološko geotehnično poročilo, ki podaja interpretacijo raziskav, ugotovljeno sestavo tal in karakteristike tal ter pogoje za izvedbo ceste in objektov ter izvedbo voziščne konstrukcije.

Za obravnavano območje je bil izdelan geodetski posnetek, na katerem so prikazane lokacije terenskih raziskav. Sestava tal je prikazana na karakterističnih prečnih prerezihi.

## 2. TERENSKE RAZISKAVE

### 2.1 Sondažno vrtanje

Na območju dograditve/novogradnje mostu čez Mali graben in na območju širitve ceste smo od 18.2. do 1.3.2022 izvedli dve sondažni vrtini V-1 in V-2. Izvajalec vrtalnih del je bilo podjetje ROVS d.o.o.

Vrtina V-1 na lokaciji mostu je bila dolžine 30 m, vrtina V-2 pa dolžine 10 m (skupna globina vrtanja 40 m). Lokacije vrtin so prikazane na situaciji (risba G.1). Vrtanje je potekalo rotacijsko, na suho, s 100%-nim jedrovanjem. Med vrtanjem so se izvajali standardni penetracijski testi (SPT) in meritve z žepnim penetrometrom v glinasto meljnih zemljinah. Jedra so bila geološko geotehnično popisana, klasificirana po AC in fotografirana. Osnovni podatki o vrtinah so zbrani v spodnji preglednici.

*Preglednica 1: Podatki o sondažnih vrtinah*

Oznaka vrtine	Y	X	Z	Globina vrtine
V-1	461338,57	99346,34	290,29	30,0 m
V-2	461320,13	99580,12	291,43	10,0 m

Geotehnični profili vrtin z rezultati spremljajočih raziskav in fotodokumentacija jedra so podani na prilogah P.1.1 do P.1.10.

Podtalnico v vrtini V-1 smo zabeležili na globini 6 m, 17 m na vrhu peščenih meljastih drobnih prodov in na globini 22,0 m v mastni glini, ki leži nad prodi. V vrtini V-2 pa se je podtalnica pojavila na globini 4,0 m v zameljenih peskih.

V vrtini V-1 smo na prvo prodno plast naleteli na globini 17 m, debeline 2,4 m. Druga prodna plast se je pojavila na globini 22,3 m in smo je sledili do konca vrtane globine. Vmes se lahko pojavijo leče zameljenega peska. V vrtini V-2 prodnih plasti do končne globine 10 m nismo dosegli.

### Standardni penetracijski test (SPT)

Za oceno trdnostnih in deformacijskih parametrov so bili v vrtini V-1 izvedeni štiri standardni penetracijski testi (v nadaljevanju SPT), ki so bili izvedeni v prodih. Izmerjeno vrednost  $N$  smo korigirali v skladu s standardom SIST EN 1997-2:2007. Dolžina zunanega drogova je upoštevana  $d = 1,5$  m. Energijski faktor vrtalne garniture je  $ER_r/60 = 1,55$ .

V vseh primerih je bilo število udarcev od 27,2 do 32,5 udarce za penetracijo 30 cm ob upoštevanem energijskem faktorju garniture. Prodi so tako v srednje gostem do gostem gostotnem stanju. Rezultati in interpretacija so zbrani v preglednicah 2 in 3.

*Preglednica 2: Interpretacija SPT preizkusov*

Vrtina	Globina z	Klasifikacija	N	$\sigma_v'$	$L = z + d$	$\lambda$	$c_N$	$N_{60}$	$(N_1)_{60}$
	m		št. ud.	kPa	m			št. ud.	št. ud.
V-1	17,0	GM/GC	37	230	18,5	1	0,57	57,35	32,50
V-1	24,0	GM/GC	34	300	25,5	1	0,60	52,70	31,62
V-1	27,0	GM/GC	31	330	28,5	1	0,57	48,05	27,20
V-1	30,0	GM/GC	33	360	31,5	1	0,54	51,15	27,40

*Preglednica 3: Trdnostni in deformacijski parametri nekoherentnih zemljin*

Vrtina	Globina	Klasifikacija	$(N_1)_{60}$	$\phi$	$M_v$ (Begemann)
	m		št. ud. / 30 cm	°	kPa
V-1	17	GM/GC	32,5	36,8	35798
V-1	24	GM/GC	31,6	36,6	34744
V-1	27	GM/GC	27,2	35,4	29438
V-1	30	GM/GC	27,4	35,4	29682

### Meritve z žepnim penetrometrom

Za oceno nedrenirane strižne trdnosti je bila v glinasto meljnih zemljinah merjena enoosna tlačna trdnost z žepnim penetrometrom ( $q_{už}$ ). Izmerjeni rezultati žepnega penetrometra so podani v popisu vrtin, večinoma pa so zemljine v židkem konsistenčnem stanju, le mestoma v lahko gnetnem in srednje gnetnem konsistenčnem stanju.

## 2.2 Sondiranje s statičnim penetrometrom

Na lokaciji predvidenega novega premostitvenega objekta oz. na območju morebitne širitve obstoječega objekta je bila izvedena sonda CPTu-1. Sonda CPTu-2 pa je bila izvedena na mestu predvidene novogradnje Opekarske ulice. Izvajalec sondiranja je bilo podjetje M-test, Marjan Filipič s.p. iz Borovnice.

S sondama smo pridobili zvezen podatek strižne trdnosti in deformacijskih modulov po globini. Pri obeh sondah je bilo, zaradi površinskega nasipa, potrebno raziskavo kombinirati z dinamičnim sondiranjem tipa DPSH. Za preverbo prepustnosti in konsolidacijskih lastnosti tal so bili izvedeni tudi 4-je disipacijski testi.

Glede na obnašanje pornih tlakov je bila z vodo zasičena zemljina upoštevana na globini 3,0 m za CPTu-1 in na globini 2,75 m za CPTu-2.

V nadaljevanju podajamo samo kratek povzetek ter bistvene ugotovljene rezultate, podrobnosti pa so v prilogi P.2.

Ugotovljena debelina umetnega nasipa na podlagi DPSH je bila 1,6–2,0 m. Nasip je večinoma v srednje gostem gostotnem stanju. Ugotovljena je bila plast melja s peskom (CPTu-1) v težko gnetnem konsistenčnem stanju. V obeh sondah je bila ugotovljena polžarica, ki mestoma vsebuje nekaj tankih bolj peščenih vložkov. Ta sloj je v lahko in srednje gnetnem konsistenčnem stanju, mestoma v težko gnetnem konsistenčnem stanju. Nato je bila opredeljena plast gline, ki se pojavlja pred prihodom v prode, ki je srednje do težko gnetna. Zadnja okarakterizirana plast je plast proda.

Povzetek fizikalnih karakteristik je zbrana v spodnji preglednici.

*Preglednica 4: Fizikalne karakteristike slojev določenih s CPTu, DPSH in disipacijskimi testi*

Sloj	$\gamma$	$\phi$	$M_{oed}$ (Mayne)	$S_u$	$k$	$k_h$
	kN/m <sup>3</sup>	°	MPa	kPa	m/s	m/s
Nasip	21,0	31,3–33,0	18,9–24,8	/	/	/
Melj s peskom	19,2 (±1,1)		6,7	48	$2,8 \cdot 10^{-7}$	
Polžarica	16,4 (±0,8) – 18,1 (±1,1)	/	1,5–1,8	27–34	$4,4 \cdot 10^{-8}$ – $7,0 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$ – $3,8 \cdot 10^{-8}$
Glina	18,4 (±1,1)		1,6–3,1	40–54	$2,6 \cdot 10^{-8}$ – $7,9 \cdot 10^{-9}$	
Prod	21,5 (±0,2)	37,2–39,8	78–100		$4,2 \cdot 10^{-5}$ – $1,6 \cdot 10^{-4}$	

Prodna plast v CPTU-1 je bila določena na globini 16,3 m, v sondi CPTu-2 pa na globini 18,4 m. V obeh primerih je šlo za goste prode. Pred prodi se pojavljajo gline in polžarica v lahko do srednje gnetni konsistenci, mestoma težko gnetni. Plasti so mestoma lahko rahlo peščene, gre za tanke vložke.

V spodnji preglednici podajamo še pregled disipacijskih testov in ugotovljenih karakteristik.



*Preglednica 5: Pregled disipacijskih testov in ugotovljenih karakteristik*

Sonda	Globina	Zemljina	Trajanje	$u_{dis}$	$c_h$	$k_h$	Opombe
	m		min		m <sup>2</sup> /leto	m/s	
CPTu-1	5,04	Glina in/ali melj	15	0,5 (50%)	39	$1,6 \cdot 10^{-7}$	
CPTu-2	2,95	Glina in/ali melj	58	0,7 (30%)	10	$3,8 \cdot 10^{-8}$	Glej poročilo
	5,35	Melj	5	0,0 (100%)	1144	$6 \cdot 10^{-6}$	Drenažni vložek
	7,8	Glina in/ali melj	7	0,39 (71%)	154	$7,2 \cdot 10^{-7}$	

*Oznake:*

$c_h$  povprečen koeficient konsolidacije

$k_h$  povprečen koeficient prepustnosti

$u_{dis}$  dosežena stopnja disipacije

## 2.3 Sondiranje z ultra lahko dinamično penetracijo (PANDA 2)

V marcu 2022 smo na mestu bodoče trase drugega voznega pasu za ugotovitev nosilnosti temeljnih tal izvedli 3 ultra lahke dinamične penetracije »Panda«.

Princip dinamičnega ultralahkega penetrometra:

Test dinamične penetracije (npr. PANDA) sestavljajo palice, ki jih s kladivom oz. z energijo kladiva (E) zabijamo v tla. Namen testa je, da povezuje energije kladiva (E) s penetracijo palic (e), pri dani globini (z).

Pritisk konice oz. upor tal ( $q_d'$ ) je zato:

$$q_d'(z) = \frac{E}{e}$$

Energijo kladiva (E) izračunamo s pomočjo višine, s katere udarjamo (h) in mase kladiva (m):

$$E = m \times g \times h$$

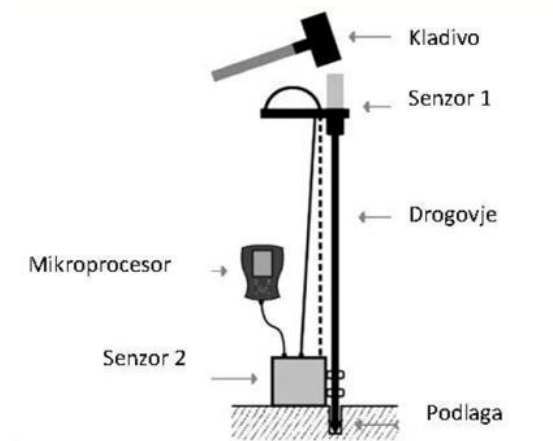
Na koncu palice, ki ima neko »mrtvo težo« (p), je konica s površino (S). Vse nato vodi do tako imenovane »Nizozemske formule«, s katero izračunamo pritisk konice oz. upor tal  $q_d(z)$ :

$$q_d(z) = \frac{1}{S \times e} \times m \times g \times h \times \frac{m}{m + p}$$

Pritisk konice oz. upor tal  $q_d(z)$  je podan v MPa.

PANDA 2 prav tako uporablja zgoraj opisani princip. Njena posebnost je, da s pomočjo senzorja za deformacije vseskozi meri oz. pozna energijo kladiva (relacije  $W_k$  in  $W_p$ ) in je tako uporabna za uporabo pri različnih oz. variabilnih energijah kladiva. Zahvaljujoč tej posebnosti vseskozi poznamo povezavo med vhodno energijo in uporom konice, kar nam zagotavlja točnost meritev.





Slika 2: Shematski prikaz PANDE 2

Pri interpretaciji CBR smo uporabili relacije podane s strani proizvajalca in uporabili program GeoSprint V.1.1.1, SolSolution. Program pri izračunu uporablja korelacije, ugotovljene v mnogih študijah, izvedenih v Franciji (Gourves & Barjot, 1995), in korelacije, ki so bile ugotovljene pri delovanju Pande pri Transport Research Laboratory:

$$\log_{10} CBR = 0,352 + 1,057 \times \log_{10} q_d$$

Sonde so bile izvedene do globine 3,2–3,3 m. Sodeč po sondi Panda-1 se pod cca. 1,5 m rahlega do srednje gostega umetnega nasipa z nosilnostjo  $CBR = 6-8 \%$  nahajajo koherentne zemljine z zelo nizko nosilnostjo  $CBR \leq 2 \%$ . Takšne plasti smo sledili do konca preiskovane globine. Sodeč po sondi Panda-2, ki je bila izvedena pod vznožjem nasipa, je na vrhu cca. 30–50 cm humusa, nato pa sledijo slabo nosilna koherentna tla z nosilnostjo  $CBR \leq 2 \%$ . Sodeč po Pandi-3 pa se zgoraj nahaja cca. 0,6 m umetnega nasipa nosilnosti  $CBR$  cca. 10 %, pod tem pa ponovno sledimo slabo nosilna tla s  $CBR \leq 2\%$ . Približno na globini 1,5 m se pojavijo najverjetneje meljna rahlo peščena tla z nosilnostjo  $CBR = 4-6 \%$ . Na globini cca. 2,7 m nosilnost ponovno pade pod  $CBR 2\%$ .

Voda v Pandi-1 je bila locirana na globini 2,0 m (286,9 m.n.v.), v Pandi-2 na 1,0 m (287,18 m.n.v.) in v Pandi-3 na 1,5 m (288,99 m.n.v.).

Rezultati preiskav so prikazani na prilogah P.3.1–3.3. Lokacije preiskav so prikazane na prilogi G.1.

Preglednica 6: Podatki o preiskavah »Panda« (ETRS)

Oznaka sonde	Y	X	Z	Globina
Panda-1	461223	98742	288,9	3,25 m
Panda-2	461287	99043	288,1	3,2 m
Panda-3	461310	99727	290,4	3,16 m

## 2.4 Sondažni izkopi na vozišču

V marcu 2022 je bilo za ugotovitev sestave in nosilnosti obstoječe voziščne konstrukcije na cestišču izvedenih 5 sondažnih jaškov J-1 do J-5 globin 78–82 cm. Izvedle so se meritve nosilnosti na posameznih globinah, prav tako so bili odvzeti vzorci za laboratorijske preiskave. Raziskave je izvedel Gradbeni inštitut – ZRMK d.o.o. iz Ljubljane.

Asfaltne plasti so se prevrtale s krono premera 35 cm, nato se je vrtina ročno poglobila do globine cca. 78–82 cm. Izkopi so bili geomehansko popisani, na posameznih globinah so bili odvzeti vzorci zemljin. Na posameznih globinah se je izmerila nosilnost tal z dinamično padajočo utežjo. Po izvedenih meritvah je bilo vzpostavljeno prvotno stanje – izkopi so se do kote asfalta zasuli in utrdili na predpisano vrednost, zaključni zgornji del pa je bil zapolnjen z vročim zbitim asfaltom.

Geotehnični popis izkopov in fotodokumentacija je podana na prilogah P.4.1–4.12, v spodnji preglednici pa so povzete meritve nosilnosti tal in ocena deformacijskega modula  $E_{v2}$ . Lokacije raziskav so podane na prilogi G.1.

*Preglednica 7: Meritve nosilnosti tal, izvedenih v voziščni konstrukciji*

Oznaka	Globina	Material	Plast	$E_{vd}$	Ocena $E_{v2}$	Ocena CBR	Ustreznost
	cm			MPa	MPa	%	
J-1	21,0	GP/GM; drobljenec in drobljen prod 0/32	NNP	110,8	> 200	> 40	Da
J-1	32,0	GP; drobljenec 0/32	PO	68,8	137,6	> 40	Da
J-1	54,0	Elektrofiltrski pepel	NMU	41,08	62,7	> 15	
J-2	19,0	GP/GM; drobljenec 0/32	NNP	101,8	> 200	> 40	Da
J-2	29,0	GP/GM; drobljenec 0/125	PO	60,0	120,0	> 35	Da
J-2	44,0	Elektrofiltrski pepel	NMU	45,1	67,6	> 15	
J-3	22,0	GM; drobljenec, 0/32	NNP	110,2	> 200	> 40	Da
J-3	29,0	GM; drobljenec 0/45	PO	64,8	129,6	> 38	Da
J-3	46,0	GP; drobljenec 0/250	NMU	98,2	196,4	> 40	
J-3	60,0	GM; drobljenec 0/32	NMU	73,5	147,0	> 40	
J-4	14,0	GM; drobljenec 0/32	NNP	73,2	146,4	> 40	Da
J-5	21,0	GP/GM; drobljenec 0/32	NNP	72,5	145,0	> 40	Da
J-5	32,0	GM; drobljenec 0/90	PO/NMU	41,6	83,2	> 18	Da

*Oznake:*

NNP nevezana nosilna plast

PO posteljica

NMU mehansko utrjen nasip

Izmerjene nosilnosti na planumu tampona (zahteva  $E_{v2} > 120$  MPa) in kamnite posteljice (zahteva  $E_{v2} > 80$  MPa oziroma  $CBR > 15$  %) so ustrezne. Prav tako so ustrezne tudi nosilnosti mehansko utrjenega cestnega nasipa. Tega v dveh primerih (J-1 in J-2) sestavlja elektrofiltrski pepel, v ostalih

pa kamniti drobljenec. Debeline asfaltov so 18,2–22,0 cm. Debelina asfalta na avtobusnem postajališču, kjer se pojavljajo tudi močne kolesnice, pa je le 14,0 cm. Debelina NNP, ki je zgrajena iz kamnitega drobljenca GP/GM, je na celotnem pregledanem območju premajhna in je 7–11 cm. Pod njim sledi kamnita posteljica, prav tako iz kamnitega drobljenca, in je debeline 10,8–22 cm, je pa res, da v dveh primerih le te ne moremo vidno ločiti od umetnega nasipa (J-4 in J-5). KP nato leži na mehansko utrjenem nasipu (NMU), ki je bodisi iz elektrofiltrskega pepela, dobro utrjenega, ali pa iz enakega kamnitega materiala, ki je v zadnjih dveh primerih neločljiv od nje. NMU je dobro utrjen.

## 2.5 Sondažni izkopi izven obstoječega vozišča

Na območju trase ceste smo v marcu 2022 izvedli 4 sondažne jaške (R-1 do R-4) za ugotovitev sestave tal, z meritvami nosilnosti z dinamično padajočo utežjo in odvzemom vzorcev zemljin. Izvedeni so bili na območju poteka novega prometnega pasu ali priključnih cest.

Delani so bili do globin 2,2–2,6 m. Geotehnični popisi izkopov in fotodokumentacija je podana na prilogah P.5.1 – P.5.4.

*Preglednica 8: Meritve nosilnosti tal*

Oznaka	Globina	Material	Plast	$E_{vd}$	Ocena $E_{v2}$	Ocena CBR
	m			MPa	MPa	%
R-1	0,5	Mešanica grušča in pepela	UN	64,4	128,8	>45
R-1	1,0	GP/GW	UN	25,5	51,0	7
R-2	0,3	Zbit elektrofiltrski pepel	UN	24,2	36,3	10
R-3	0,5	Rahel elektrofiltrski pepel	UN	10,0	15,0	3
R-4	0,2	GP/GW	UN	23,4	46,8	6
R-4	0,5	Rahel elektrofiltrski pepel	UN	11,3	14,69	3
R-3	1,0	Zbit elektrofiltrski pepel	UN	38,5	57,7	>15

Iz raziskav sledi, da je na celotnem območju posega izveden zgoraj nasip. Ta se sestoji generalno iz elektrofiltrskega pepela, pod njim pa se je v vseh primerih pojavila nasipna blazina iz meljastega ter slabo do dobro zrnatega grušča GP/GW. Sklepamo lahko, da je pod to nasipno blazino tudi ločilni geosistetik, kot se je pokazalo v razkopu R-2. Elektrofiltrski pepel bi lahko ločili na dve vrsti, sivega bolj zbitega in zelo dobro utrjenega, kjer so nosilnosti  $E_{v2} = 35,0\text{--}60,0$  MPa in  $CBR \geq 10\%$ , ter slabšega sivega, ki pa se ni tako povezal in so njegove nosilnosti manjše  $E_{v2} = 14\text{--}16$  MPa oz.  $CBR$  cca. 3 %. Med nasipanim elektrofiltrskim pepelom se pojavljajo tudi 0,2–0,5 m debele plasti slabo do dobro granuliranih gruščev z nosilnostjo  $CBR = 6\text{--}7$  %.

V razkopu R-1 se je na globini 2,4 m pojavila talna voda oz. na koti 287,68 m.n.v., v razkopu R-2 se je ta pojavila na globini 1,5 m (288,00 m.n.v.), ostala dva razkopa sta bila do končne globine suha.



*Sliki 3 in 4: Izvedba razkopov R-1 in R3*

### 3. LABORATORIJSKE PREISKAVE

V laboratoriju Gradbenega inštituta ZRMK d.o.o. iz Ljubljane so bili preiskani vzorci, odvzeti iz obstoječe voziščne konstrukcije. V podjetju LABTEST d.o.o. z Vrhnike pa so bili preiskani vzorci, odvzeti iz sondažnih izkopov izven obstoječega vozišča. Vzorci so bili analizirani po standardih:

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| – preiskava zrnivosti                             | SIST EN 933-1; 2012,        |
| – preiskava vlažnosti                             | SIST EN 1097-5:2008,        |
| – metilen modro                                   | SIST EN 933-9:2009+A1:2013, |
| – določitev CBR vrednosti v laboratoriju          | SIST EN 13286-47:2004,      |
| – preiskava naravne vlage in gostote              | SIST 17892-1:2015,          |
| – ugotavljanje meje židkosti in meje plastičnosti | SIST EN ISO 17892-12:2018,  |
| – ugotavljanje strižne trdnosti                   | SIST EN ISO 17892-10:2019,  |
| – edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem | SIST EN ISO 17892-5:2017,   |
| – določitev točkovnega trdnostnega indeksa        | ASTM D5731 - 16,            |
| – ugotavljanje zrnavostne sestave                 | SIST EN ISO 17892-4:2017.   |

Potek in rezultati laboratorijskih preiskav so podani na prilogah P.6 in P.7, bistvene značilnosti materialov iz voziščne konstrukcije in materialov izven ceste na bodoči trasi pa so povzete v spodnji preglednici in besedilu.

*Preglednica 9: Rezultati preiskave zrnivosti na vzorcih iz obstoječe voziščne konstrukcije*

Izkop	Globina [cm]	Plast	Material	Delež zrn do 0,063 mm	Količnik enakomernosti	MB [g/kg]	CBR [%]	Zmrzljinska ustreznost
J-1	21–32	NNP	Drob.+drob. prod GW-GP	5,3	22,1	1,1	/	Da
J-1	32–54	PO	Drobljenec GW-GP	5,9	19	/	/	Da
J-1	54–78	NMU	Elektrofiltrski pepel	/	/	/	0,5	/
J-2	18,2–29	NNP	Drobljenec GW	4,7	25,8	/	/	Da
J-3	22–29	NNP	Drobljenec GW	4,9	22,3	/	/	Da
J-3	29–46	PO	Drobljenec GW-GP	7,1	37,2	/	/	Da
J-3	60–80	NMU	Drobljenec GP	12,2	/	/	/	Ne
J-4	14–78	NNP/N MU	Drobljenec GW-GP	5,1	19,8	/	/	Da

Po pregledu preteklih raziskav, izvedenih v voziščni konstrukciji ugotavljamo, da so vzorci NNP in KP vsi zmrzljinsko ustrezni. Malo do srednje občutljiv na zmrzovanje je NMU iz kamnitega drobljenca v J-3. Vzorci NNP prav tako v popolnosti ustrezajo zrnavostnim krivuljam, določenim za tampon 0/32. V laboratoriju je bil izmerjena nosilnost elektrofiltrskega pepela CBR = 0,5 % in suha prostorninska masa  $W_0 = 1029 \text{ kg/m}^3$ .

*Preglednica 10: Preglednica fizikalnih karakteristik koherentnih zemljin*

Vrtina	Globina	Klas.	$W_0$	$\rho$	$\rho_d$	$w_L$	$W_P$	$I_P$	$I_c$	$q_{už}$	$c$	$\phi$
	m		%	Mg/m <sup>3</sup>	Mg/m <sup>3</sup>	%	%	%		kPa	kPa	°
V-1	14,4-14,7	CL	29,9-28,7	1,95	1,51	32,8	19,8	13	0,37	30-45	/	/
V-1	21,4-21,7	CL	25,9-28,8	1,99	1,58	36,8	21,1	15,6	0,70	80-110	/	/
V-2	9,5-9,8	CL	22,8-28,3	1,97-2,08	1,53-1,69	33,5	18,5	15	0,49	25-45	5,3	30,3
R-1	1,2-2,4	EFP	/	1,53	Točk. Indeks $I_{S_{50}} = 0,96 \text{ MPa}$							

*Preglednica 11: Preglednica modulov stisljivosti koherentnih zemljin*

Vrtina	Globina	Klas.	$E_{oed}$ [kPa]							
	[m]		25-75	75-150	150-300	300-600	4-50	50-100	100-200	200-400
V-1	14,4-14,7	CL	2580	4500	4830	7940				
V-1	21,4-21,7	CL	1560	3780	5990	9760				
V-2	9,5-9,8	CL					810	2380	4060	7460

Pregledan je bil dobro zrnat gramoz (GW) iz R-1 in globine 0,5-0,7 m. Delež delcev pod 0,063 mm je znašal 3,9 %, kar izkazuje njegovo zmrzljinsko ustreznost.

#### 4. GEOLOŠKO GEOTEHNIČNI OPIS TERENA

Na sliki 5 prilagamo izsek iz Osnovne geološke karte, list Ljubljana, z označeno obravnavano mikrolokacijo in povzemamo sestavo širšega področja po pripadajočem tolmaču OGK.

##### *Splošna geologija in geologija okolice*

Obravnavano področje leži na Ljubljanskem barju. Plasti pripadajo kvartarju oz. natančneje jezerskim in barskim usedlinam (j), ki pripadajo pleistocenskim in holocenskim sedimentom. Kvartarne naplavine, ki zapolnjujejo kotlino Ljubljanskega barja, po podatkih vrtanja in kartiranja sestojijo na površini delno iz šote, šotnega blata in jezerskega melja (polžarice), delno pa iz rjave peščene gline in peščenega melja, ki sta se odlagala v času občasnih poplav. Večji del barjanske površine sestavljata šota in polžarica. Poplavni peščeno-glinasti sedimenti prekrivajo zahodni del Barja med Verdom, Vrhniko, Ligojno, Drenovim gričem in Brezovico vse do osamelcev Kostanjevica, Plešivica in Vnanje Gorice ter vzhodno obrobje Barja od Rakovnika do Škofljice. Na severnem in vzhodnem obrobju barjanske kotline, so nastali ob prehodu hudourniških pritokov Ljubljanice s hribovja v ravnino precej obsežni vršaji, sestavljeni iz peščene gline, glinastega melja z gruščem oziroma slabo zaobljenih prodnikov peščenjaka in skrilavega glinovca. Na južnem obrobju Barja so nastali ob prehodu Borovniščiце, Iške in Želimeljščice obsežni vršaji, ki tonejo daleč proti severu pod barjanske plasti.

Iz vseh rezultatov raziskav (Mencej, 1988/89) lahko predvidevamo, da na širšem območju obravnavane lokacije, pod vrhnjimi barjanskimi sedimenti leži savski prod, ki je pomešan s prodom Gradaščiце. Savski prod zapolnjuje globel, ki poteka na vzhodu zahodno od Galjevice do sotočja Ljubljanice in Iščice, na jugu še južno od Curnovca (mimo Rakove Jelše), na zahodu skoraj do Vnanjih Goric ter na severu do ceste Vrhnika-Ljubljana. Vzhodno od Malega grabna je Sava odložila svoj prod med Rožnikom in Podutikom (dolina Glinščice) ter Rožnikom in Gradom. Na tem delu je savski zasip najvišje ohranjen na staro-pleistocenski Viški terasi in Draveljskem brdu. Gradaščica je nanese vršaj na severovzhodnem delu Barja. Meja med vršajem Gradaščice in barjanskimi sedimenti, poteka od Gorjanca vzporedno z avtocesto do Dolgega mostu. Od tod dalje poteka meja mimo »smetišča«, kjer se obrne proti severovzhodu, in mimo igrišča na Viču. Tu se obrne proti severu, prečka progo, kjer se obrne in usmeri južno od Viške terase v dolino Gradaščice. Vzhodno od doline Gradaščice leži prodni zasip Gradaščice na prodnem zasipu Save. Južneje od tod pa nastopa prod Gradaščice v več plasteh; med njimi so poplavno zajezitveni in jezerski sedimenti. Vodnjak TB-3 ob Curnovcu je prevrtal prod Gradaščice na globini 18 do 40 m in prod Gradaščice pomešan s savskim prodom na globini 48 do 76 m. Prodniki peščenjaka v vrtini PB-1 v Črni vasi kažejo na to, da je Gradaščica poplavljala prod na jugu še najmanj do Ljubljanice.

##### *Geologija obravnavanega območja*

Leta 1962 so v vzhodnem delu Barja, pri Črni vasi izvrtali vrtino globine 116,8 m. Geološki popis vrtine ne obstaja, obstajajo pa grafični podatki (Mencej, 1988/89) in iz njih je moč razbrati geološko sestavo vrtine PB-1:

0–20 m	barjanski sedimenti (glina, polžarica)
20–141 m	holocenski in pleistocenski sedimenti (prod, pesek, glina, melj)
141 m–	zgornje triasni dolomit

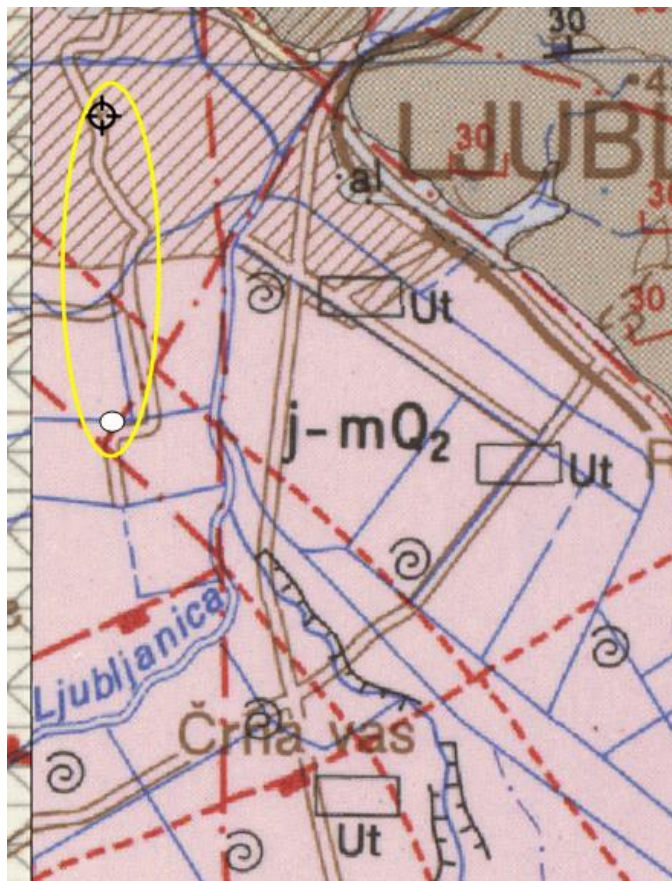
V bližini je bila izvrtana tudi vrtina TB-3/89. Geološki popis je naslednji:

0–20 m	barjanski sedimenti (glina, polžarica)
--------	--



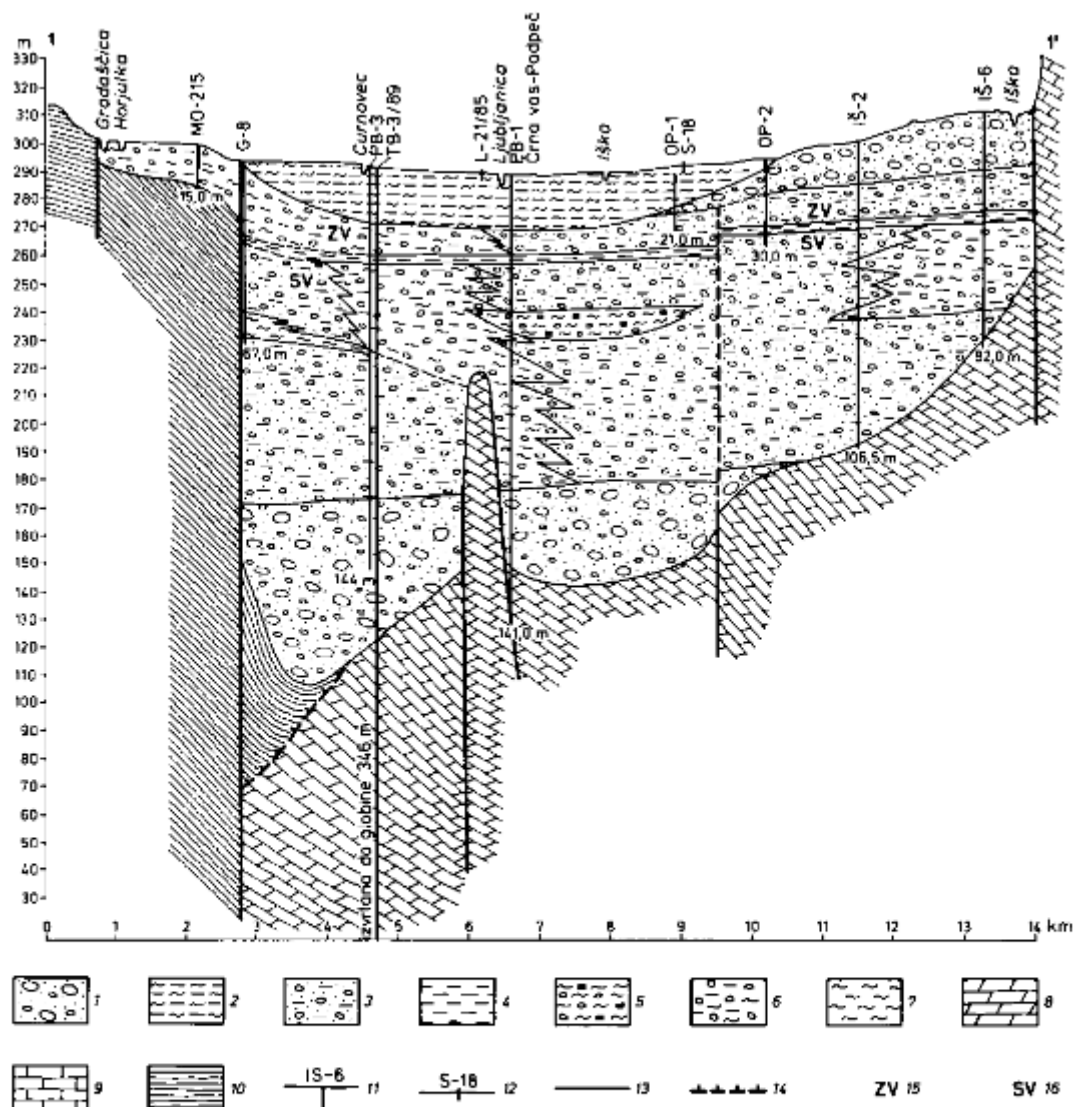
20–149 m holocenski in pleistocenski sedimenti (prod, pesek, glina, melj)  
149 m– zgornje triasni dolomit.

Sodeč po prečnem profilu, ki je bil potegnjjen čez Ljubljansko Barje v smeri sever – jug (slika 6), naše obravnavano območje sestavljajo prvih 17,7 m globine predvsem meljne glin (polžarica), nato pa sledi prva prodna (prodi z meljem in peskom) plast, debeline cca. 10 m. Med prodi z meljem in peskom se lahko pojavljajo tudi prodi s peskom in glino. cca. 107 m globje ležijo prodi s peski in malo melja, zg. triasna podlaga pa je na tem območju cca. 142 m pod površjem.



Slika 5: Izsek OGK z označenim obravnavanim območjem, list Ljubljana (karta ni v merilu)

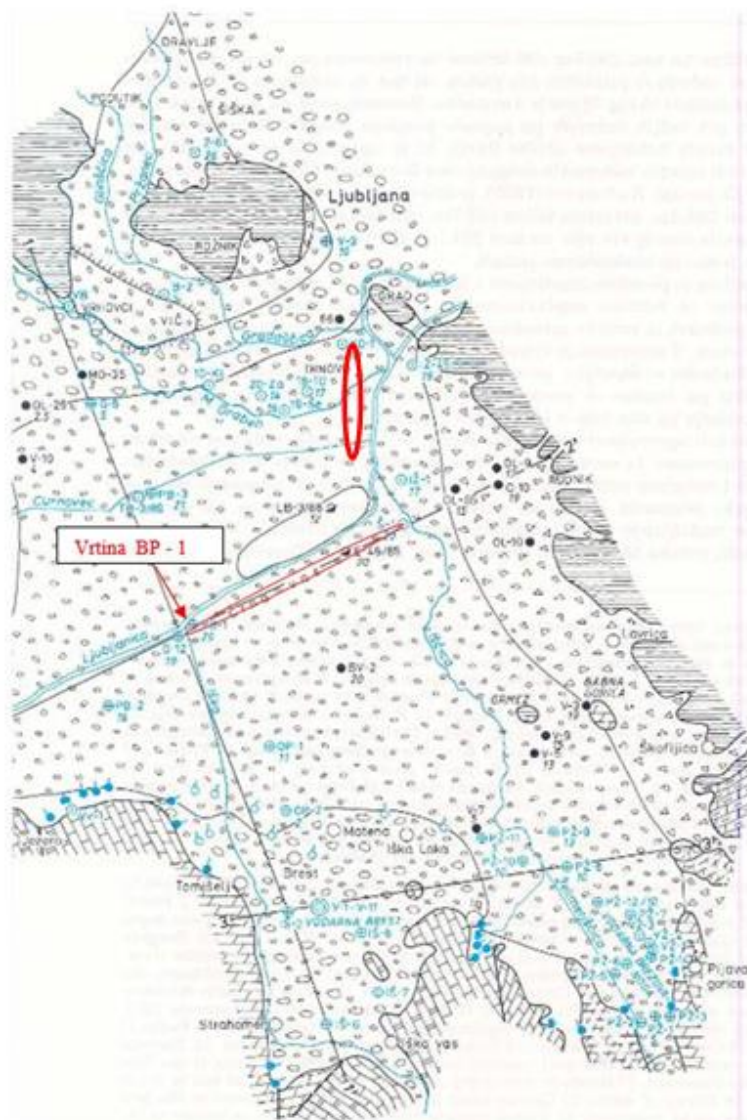




Sl. 4. Prečni profil 1-1' čez vzhodni del Ljubljanskega barja

1 Prod s peskom in malo melja; 2 Meljna glina (polžarica); 3 Prod z meljem in peskom; 4 Rdeči melj in meljna glina (mejna plast); 5 Glina in organska glina s prodniki; 6 Prod z glino in meljem; 7 Glina; 8 Dolomit (zg. triada); 9 Apnenec in dolomit (sp. jura); 10 Peščenjak in glineni skrilavec (permokarbon); 11 Vrtina – piezometer; 12 Goelektrična sonda (seizmična razvrstitev); 13 Prelom; 14 Nariv; 15 Zgornji vodonosnik; 16 Spodnji vodonosnik

Slika 6: Prečni profil 1-1' čez vzhodni del Ljubljanskega barja v smeri sever - jug  
(Mencej, J., 88/89)



*Slika 7: Tloris profila 1–1' čez vzhodni del Ljubljanskega barja (Mencej, J., 88/89) z označeno približno lokacijo obravnavanega območja*

Na začetnem delu od križišča z Zihirlevo in Kopačevo cesto do križišča s Cesto v Mestni log niveleta ceste poteka bolj ali manj v višini okoliškega terena. V nadaljevanju do priključka za AC obstoječa cesta poteka v nizkem nasipu, na obeh straneh pa poteka odvodni jarek. Vmes cesta preči vodotok Mali graben.

Debelina umetnega nasipa je 1,1–2,4 m, odvisno od lokacije. Na območju od križišča s Cesto v Mestni log do Malega grabna ocenjujemo, da je debelina nasipa 1,0–2,0 m, odvisno od višine okoliškega terena. Sodeč po raziskavah je debelina umetnega nasipa na območju dograditve novega voznega pasu na levi strani obstoječe ceste od križišča s Cesto dveh cesarjev do priključka AC 2,2–2,4 m. Na tem odseku je umetni nasip na cesti in ob cesti grajen večinoma iz elektrofilskega pepela, ponekod z vmesnimi kamnitimi plastmi. Na prvem odseku (do Ceste dveh cesarjev) elektrofilskega pepela nismo ugotovili.

Pod umetnim nasipom ležijo koherentne glineno meljne zemljine z nizko nosilnostjo  $CBR \leq 2\%$ , mestoma se lahko pojavi bolj peščena meljna plast z nosilnostjo  $CBR = 4\text{--}6\%$ . Meljno glino ML/CL in polžarico MH/CH sledimo do prve prodne plasti, ki se pojavi na globini 16,3–18,0 m, in je debeline cca. 2,0–2,5 m, gre pa za drobnejši prod. Za tem ponovno sledi meljno glinena zemljina

srednje gnetne konsistence v debelini približno 3,0 m, lahko tudi več ali manj. Nato se ponovno pojavijo gosti peščeni prodi GP na globini 25,4 m, te smo sledili do konca preiskovane globine 30 m. Pod nasipom se lahko mestoma pojavijo tudi plasti šote (PT/OH), ki je bila debeline 0,6 m, po izkušnjah sodeč pa so lahko te plasti debele 0,3–1,1 m.

*Preglednica 12: Model in fizikalne karakteristike zemljin na območju mostu čez Mali graben*

Opis	Globina	$\gamma$	$\tau_u$	$\phi$	c	$M_v$
	(m)	kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	kPa	MPa
Umetni nasip	0 – 1,7±0,1	21,0	/	31,3–33,0	0–1	18,9–24,8
Melj in glina, mestoma peščena, težko gnetne kons.	1,7±0,1 – 2,3±0,2	19,2	48,1	22–25	2–5	6,7
Šota	2,3±0,2 – 2,9±0,2	7,0	/	16–18	0–3	0,1–0,5
Melj in glina, mestoma peščena, težko gnetne kons.	2,9±0,2 – 3,6 ±0,5	19,2	48,1	22–25	2–5	6,7
Polžarica lahko do srednje gnetne kons.	3,6±0,5 – 14,3±0,8	16,4±0,8 – 18,1±1,1	27–34	25–30,3	3–5	1,5–1,8
Glina težko gnetne kons.	14,3±0,8 – 16,6±0,35	18,4±1,1	40–54	19–21	2–5	1,6–3,1
Prod, gost do zelo gost	16,6±0,35 – 18,8±0,8	21,5	/	36,8–39,8	0–1	36–100
Glina srednje gnetne do trdne kons.	18,8±0,8 – 21,8±0,5	18,4–19,5	34–55	25–29	3–5	1,8–10
Prod, gost do zelo gost	> 18,8±0,8 – 21,8±0,5	21,5	/	36,8–39,8	0–1	36–100

*Opomba: Izhodiščna kota je nivo ustja vrtine V-1 oz. CPTu-1*

Podtalna voda se pojavi na nadmorski višini 284,29–286,9 m. V vrtini V-1 pa smo jo registrirali še na globini 273,29 m.n.v in na globini 268,29 m.n.v., v prodnih zemljinah.

*Preglednica 13: Fizikalne karakteristike zemljin na trasi dograditve voznega pasu*

Opis	$\gamma$	$\tau_u$	$\phi$	c	$M_v$	Točk. trdn. indeks
	kN/m <sup>3</sup>	kPa	°	kPa	MPa	MPa
Umetni nasip	21,0	/	31–33	0 – 1	18,9–24,8	/
Umetni nasip-elektrofiltrski pepel	10,3–15,3	/	30–40	/	/	0,96
Polžarica lahko do srednje gnetne kons.	16,4(±0,8) – 18,1(±1,1)	27–34	25–30	3–5	1,5–1,8	/

Voda se je v razkopu R-1 pojavila na koti 287,68 m.n.v., v R-2 pa na koti 288,00 m.n.v. (približno 2 m pod terenom).

Oznake v preglednicah 12 in 13:

$\gamma$  prostorninska teža,

$\tau_u$	nedrenirana strižna trdnost,
$\varphi$	strižni kot,
$c$	kohezija,
$M_v$	modul stisljivosti.

## 5. ANALIZA POSEDANJA IN STABILNOSTI NASIPA

Analiza posedanja tal in stabilnosti nasipa je izdelana s programom Plaxis po metodi končnih elementov. Analiziran je nasip višine 1,5 m na območju dograditve nasipa v km 0,860, kjer je predviden nov priključek Opekarske ceste. Za določitev dodatnih ukrepov za pospešitev konsolidacije je analizirana varianta z nadvišanim nasipom za 0,8 m (višina nasipa 2,3 m).

Sestava tal je upoštevana po izvedeni sondi CPTu-2/2022, ki je bila izvedena na tej lokaciji:

- do globine približno 11,5 m plast polžarice lahko gnetne konsistence,
- 11,5–16,5 m glina srednje gnetne konsistence,
- globlje prodno peščene zemljine.

V spodnji preglednici so podane upoštrevane karakteristike zemljin. Glinasto meljne zemljine so modelirane kot nedrenirane zemljine. V nasipu in prodju se bodo posedki izvršili v času gradnje (dreniran tip zemljine).

*Preglednica 14: Fizikalne karakteristike zemljin*

	$\gamma$	$E_{oed}$	$k_v$	$k_v$	$k_h$	$k_h$	$c_u$	$\varphi$	$c$
Plast	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	m/s	m/dan (*)	m/s	m/dan (*)	kPa	°	kPa
Obstoječi nasip	21,0	19000	drenirano				/	32	0,5
Nov nasip	21,0	30000	drenirano				/	37	0,5
Polžarica lg.-sg.k.	17,0	1500	$4 \cdot 10^{-9}$	$3,46 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3,46 \cdot 10^{-3}$	30	/	/
Glina sg.k.	19,0	2000	$1 \cdot 10^{-9}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$	45	/	/
Prod	21,5	50000	drenirano				/	38	0,5

\* enote v programu Plaxis

V izračunu so izbrane računske točke na kroni nasipa:

- točka A = desni rob obstoječe ceste (stik obstoječega in dograjenega nasipa)
- točka B = os novega nasipa,
- točka C = desni rob novega nasipa.

V analizi stabilnosti je upoštevana prometna obtežba 34 kPa na voznem pasu širine 3 m. Zahtevana varnost v nedreniranih pogojih je  $\gamma_R \geq 1,4$ .

Na prilogah P.8.1 do 8.12 so podani vhodni podatki in rezultati analize.

*Preglednica 15: Velikostni red posedkov tal pod nasipom višine 1,5 m*

	Točka A	Točka B	Točka C
Hipni posedki	0,5 cm	4,0 cm	3,5 cm
Konsolidacijski posedki	3,0 cm	10,0 cm	6,5 cm
Skupni posedki	3,5 cm	14,0 cm	10,0 cm

*Preglednica 16: Velikostni red posedkov tal pod nadvišanim nasipom za 0,8 m (višina nasipa 2,3 m)*

	Točka A	Točka B	Točka C
Hipni posedki	-0,3 cm (dvižek)	7,5 cm	6,0 cm
Konsolidacijski posedki	7,5 cm	15,0 cm	10,0 cm
Skupni posedki	7,0 cm	22,5 cm	16,0 cm

*Preglednica 17: Razvoj posedkov v osi dograjenega nasipa (točka B)*

Čas odležanja nasipa	Stopnja konsolidacije	Nasip višine 1,5 m	Nadvišanje nasipa za 0,8 m – nasip višine 2,3 m
> 20 let (končni konsolidacijski posedki)	1,00	10,0 cm	15,0 cm
6 mesecev	0,33	3,3 cm	5,5 cm
1 leto	0,50	5,0 cm	8,0 cm
2 leti	0,65	6,5 cm	10,5 cm
3 leta	0,80	8,0 cm	12,0 cm

Velikostni red končnih posedkov pod načrtovanim nasipom višine 1,5 m bo v osi dograjenega nasipa do 14 cm. Del posedkov se bo izvršilo takoj po izgradnji nasipa (preoblikovanje terena, posedki v prodih in nasipu), velikostnega reda do 4 cm.

Večji del posedkov bo konsolidacijskih, velikostnega reda približno do 10 cm, ki se bodo realizirali v daljšem časovnem obdobju (cca. 20 let). V šestih mesecih se bo realizirala približno tretjina konsolidacijskih posedkov, po enem letu približno polovica posedkov, po dveh letih 65 % posedkov, po treh letih pa približno 80 % posedkov.

V primeru nadvišanja nasipa za 80 cm velikostni red posedkov povečamo približno za polovico. V tem primeru se npr. po enem letu izvršijo posedki velikostnega reda cca. 8 cm, po odstranitvi nadvišanega dela pa še cca. 2 cm.

Varnost nasipa višine 1,5 m s prometno obtežbo je ustrezna  $\gamma_R = 1,45 > 1,40$  (nedrenirano stanje). Nadvišan nasip za 0,8 m ima z upoštevanjo prometno obtežbo nekoliko nižjo varnost  $\gamma_R = 1,35$ , kar je za začasno stanje sprejemljivo.

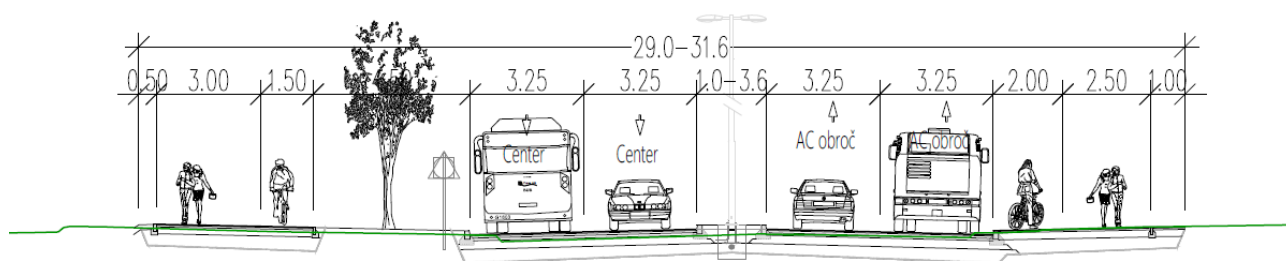
## 6. GEOTEHNIČNI POGOJI ZA IZVEDBO CESTE

### 6.1 Opis obstoječega stanja in načrtovanih posegov

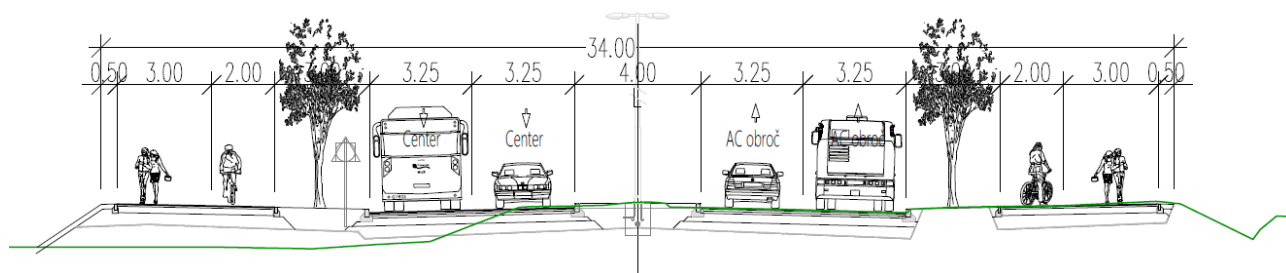
V sedanjem stanju je odsek Barjanske ceste od križišča z Ziharlovo in Riharjevo ulico do navezave na nadvoz čez AC izveden z dvema prometnima pasovima z razširitvami v križiščih za leve zavijalce in mestoma za desne zavijalce oziroma za mestni avtobus. Cesta poteka v nizki niveleti (nizek nasip višine do približno 1,5 m oziroma prilagoditev okoliškemu terenu). Na obravnavanem odseku so štiri večja križišča: na začetku odseka križišče z Riharjevo in Ziharlovo cesto, v km 0,338 križišče s Cesto v Mestni log in Kopačevo cesto, v km 0,966 (tik za mostom čez Mali graben) križišče s Cesto dveh cesarjev in na koncu odseka križišče s priključkom za AC Center in parkirišče P+R. Vsa križišča so v sedanjem stanju klasična 4-kraka. Tik pred križiščem s Cesto dveh cesarjev cesta premošča vodotok Mali graben. Ob desnem (zahodnem) robu ceste so na celotnem odseku površine za pešce in kolesarje, od ceste ločene z zelenico. Na levi (vzhodni) strani ceste je hodnik za pešce do mostu in na mostu izveden tudi na levi strani ceste. Od križišča s Cesto dveh cesarjev naprej je tik ob desnem robu ceste oblikovan odvodni jarek globine 1,0–1,5 m, na končnem delu (ob odcepu za AC) pa je urejeno parkirišče P+R.

Načrtovana rekonstrukcija Barjanske ceste v dolžini 1623 m obsega:

- Širitev ceste za ureditev ločenih vozniških pasov za vozila javnega prometa, obojestranskih površin za pešce in kolesarje ter zelene ločilne pasove. Skupna širina ceste bo 29–34 m. Širitve se bodo glede na sedanje cestne površine izvajale večinoma na levo stran ceste.
- Izvedba novega priključka Opekarske ceste v km 0,800.
- Širitev mostu čez Mali graben.
- Izvedba krožišča na priključku za AC Center.



Slika 8: Karakteristični prerez rekonstrukcije ceste od križišča z Ziharlovo in Riharjevo cesto do križišča s Cesto v Mestni log in Kopačevo cesto



Slika 9: Karakteristični prerez rekonstrukcije ceste od križišča s Cesto v Mestni log in Kopačevo cesto do AC priključka



## 6.2 Pogoji za izvedbo nasipov

Izvedba nizkih nasipov višine do 1,5 m so predvideni na območju širitve Barjanske ceste približno od križišča s Cesto v Mestni log naprej (proti AC). Na predhodnem odseku širina sedanjega nasipa zadošča za izvedbo načrtovanih širitav. Nekoliko višji so priključni nasipi ob krajnih opornikih premostitvenega objekta – do cca. 3 m. Nasipi se izvedejo iz kamnitega drobljenega materiala granulacije 0/125 mm z naklonom brežin 1 : 1,5. Nasip se gradi po plasteh debeline cca. 30 cm s sprotnim komprimiranjem. Brežine se površinsko utrdi, humusira in zatravi.

Pri gradnji nasipov je potrebno doseči minimalne nosilnosti in zgoščenosti:

- na planumu do 0,5 m pod koto planuma posteljice  $E_{v2} = 60$  MPa, zgoščenost 95 % po MPP,
- na planumu kamnite posteljice  $E_{v2} = 80$  MPa, zgoščenost 98 % po MPP.

Dograjevanje nasipov se izvede s stopničenjem v nasipne brežine obstoječe ceste.

Za pospešitev konsolidacije se nasip na območju ceste za dobo enega leta nadviša za 80 cm z materialom s prostorninsko težo cca. 21 kN/m<sup>3</sup>. Razvoj posedkov naj se spremlja s posedalnimi ploščami.

Sestava voziščne konstrukcije je podana v ločenem elaboratu.

## 6.3 Pogoji za izvedbo izkopov

Izkopi za voziščno konstrukcijo se bodo večinoma izvajali v 3. kategoriji zemljin (umetni nasip heterogene sestave, glinasto meljne zemljine težko gnetne in srednje gnetne konsistence). Manjši del izkopov, ocenjeno 10 %, bo potekal v 2. kategoriji zemljin (barjanske gline in melji). Debelina humusa izven utrjenih asfaltnih in makadamskih površin je večinoma 20 cm, mestoma do 40 cm (humus z glino). Na območju obstoječe ceste je debelina asfalta 14–22 cm.

Začasni izkopi v glinah se izvajajo v naklonu do 1 : 1,5, v umetnem nasipu pa do 1 : 1.

## 6.4 Priprava temeljnih tal

Na celotnem območju posega je nad raščenimi barjanskimi tlemi izveden nasip, zgrajen iz elektrofiltrskega pepela na blazini iz meljastega ter slabo do dobro zrnatega grušča GP/GW. Pod nasipno blazino je vgrajen ločilni geosistetik. Elektrofiltrski pepel ločimo na dve vrsti, zelo dobro zgoščenega in utrjenega z nosilnostmi  $E_{v2} = 35,0$ – $60,0$  MPa ( $\text{CBR} \geq 10\%$ ) in slabše vezanega z nižjimi nosilnostmi  $E_{v2} = 14$ – $16$  MPa ( $\text{CBR} \approx 3\%$ ). Med elektrofiltrskim pepelom se pojavljajo tudi 0,2–0,5 m debele plasti slabo do dobro granuliranih gruščev z nosilnostjo  $\text{CBR} = 6$ – $7\%$ . Manj ali nič EF pepela pričakujemo na odseku do križišča s Cesto dveh cesarjev.

Pri načrtovanju voziščne konstrukcije se upošteva nosilnost temeljnih tal (obstoječi nasip)  $\text{CBR} = 6\%$ .

Temeljna tla v zgoraj opisanem nasipu se pripravi na sledeč način:

- Odstranitev površinske plasti humusa debeline večinoma 20 cm, mestoma 40 cm (humus z glino).



- Po potrebi se izkop dodatno poglobi za izvedbo načrtovane voziščne konstrukcije v ustrezni debelini.
- Na koti izkopa se lokalno lahko pojavi slabo nosilen elektrofiltrski pepel, ki se odstrani do ustrezno nosilnih tal in nadomesti s kamnitim materialom.
- Na stik novega kamnitega nasipa in obstoječega nasipa se vgradi ločilni geosintetik.

Na lokalno omejenih območjih z izkopom lahko posežemo tudi v barjanske nenosilne zemljine, se izvede dodatna sanacija tal oziroma dodatna plast med voziščno konstrukcijo in temeljnimi tlemi v debelini vsaj 40 cm. Planum slabo nosilnih glinasto meljnih zemljin se pripravi z bagrom s škarpirno žlico in se ne komprimira, saj lahko pride do dodatnega poslabšanja nosilnosti. Za sanacijo tal se lahko uporabi material iz obstoječega nasipa. Izbere naj se material s kosi do 10 cm, z dobro stopnjevano granulacijo in brez grud gline. Na kontakt raščeni tal in sanacije tal se vgradi ločilni in armaturni geosintetik. Glede na zrnavost materiala za sanacijo tal se po potrebi ločilni geosintetik vgradi tudi na stik saniranih tal in novega nasipa. Ocenjujemo približno do 10 % površin, kjer bo potrebna opisana sanacija tal.

Namesto dveh plasti geosintetika (ločilni in armaturni) se lahko uporabi ustrezen geokompozit, ki zagotavlja lastnosti ločilnega in armaturnega geosintetika. Karakteristike ločilnega geosintetika:

$T_{\min} = 14 \text{ kN/m}$	minimalna natezna trdnost pri minimalnem raztezu $\epsilon_{\min} \geq 30 \%$ ,
$(T \cdot \epsilon)_{\min} = 480$	pogoj za geosintetike z $\epsilon_{\min} < 30 \%$ ,
$O_d < 30 \text{ mm}$	odpornost na preboj,
$0,05 \text{ mm} < O_{90} < 0,2 \text{ mm}$	karakteristična velikost por,
$k_G = 10^{-5} \text{ m/s}$	minimalna prepustnost.

Armaturni geosintetik (geomreža) mora imeti kratkotrajno natezno trdnost v obeh smereh vsaj 30 kN/m.

## **7. GEOTEHNIČNI POGOJI ZA TEMELJENJE MOSTU ČEZ MALI GRABEN**

### **7.1 Zasnova konstrukcije**

Na dolvodni strani obstoječega mostu čez vodotok Mali graben je načrtovana dograditev z novim mostom širine 13,20 m. Dolžina mostu je skupaj s krajnimi oporniki približno 59 m (enako kot obstoječi most). Objekt je zasnovan s štirimi podporami – dve krajni in dve vmesni podpori z osnimi razponi 15,5 m + 24,9 m + 15,5 m. Višina priključnih nasipov na krajna opornika je višine do 3 m na zunanjem (dolvodnem) robu in se do notranjega roba (ob obstoječem objektu) izniči.

### **7.2 Temeljenje premostitvenega objekta**

Pod nasipom se približno do globine 16–18 m glede na niveleto ceste nahaja večinoma lahko gnetna mastna glina in melj, le tik pod nasipom so zemljine v debelini 1,0–2,5 m v težko gnetnem konsistenčnem stanju. Pod visoko deformabilnimi glinami in melji sledi plast gline in melja v srednje gnetni do trdni konsistenci, ki je vmes prekinjena s prodno plastjo debeline cca. 2 m. Nosilna plast peščenega proda v gostem do zelo gostem stanju se pojavi na koti 267,5–269,0 m.n.v., to je približno 24,0–25,0 m pod niveleto ceste. Sestava tal je vrisana na vzdolžnem prerezu objekta.

Zaradi tipično barjanske sestave tal se objekt temelji globoko na uvrtnih AB pilotih ali vtisnjenih pilotih. Obstoječi objekt je po arhivskih podatkih temeljen na vtisnjenih pilotih premera 70 cm, dolžine 20 m na vmesnih podporah in 23 m na krajnih podporah, s čimer so vpeti v nosilno prodno plast. Tudi piloti novega objekta naj segajo vsaj dvakratnik premera pilota v spodnjo prodno plast na koti 267,5–269,0 m.n.v. V primeru uvrtnih pilotov naj se zaradi dolgotrajnega posedanja tal pod priključnimi nasipi vpliv negativnega trenja na pilote krajnih podpor izključi z vgradnjo srajčke iz jeklene pločevine v dolžini vsaj 15 m v zgornjem delu pilotov.

Projektne nosilnosti so v nadaljevanju podane za primer vtisnjenih betonskih pilotov premera 60–80 cm in uvrtnih AB pilotov premera 100–150 cm. Za pilote na krajnih podporah je upoštevana samo nosilnost pod nogo pilotov, pri vtisnjenih pilotih tudi vpliv negativnega trenja v mehkih zemljinah. Za pilote na vmesnih podporah je upoštevano tako trenje po plašču kot nosilnost pod nogo pilotov.

Uporabljene enačbe za izračun karakteristične nosilnosti pod nogo pilota:

$q_{b,k} = N_q \cdot \sigma'_v$	karakteristična specifična nosilnost pod nogo,
$N_q = f(\varphi, L/d)$	faktor nosilnosti po Berezantzevu v odvisnosti od strižnega kota zemljine pod nogo in razmerja dolžine in premera pilota,
$R_{b,k} = q_{b,k} \cdot A_b$	karakteristična nosilnost pod nogo,
$A_b$	površina noge.

Uporabljene enačbe za izračun karakteristične nosilnosti po plašču:

$q_{s,k} = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan(\delta_i)$	karakteristična specifična nosilnost po plašču,
$K$	faktor nosilnosti v odvisnosti od tehnologije vgradnje in tipa zemljine
$\rightarrow K = 0,7$	uvrtani piloti v produ,
$K = 1,0$	vtisnjeni in uvrtni piloti v zelo mehki glini, vtisnjeni piloti v produ,
$K = 1,5$	vtisnjeni piloti v glini,
$\delta$	trenjski kot med zemljino in pilotom v odvisnosti od tipa zemljine, vrste pilota in tehnologije vgradnje
$\rightarrow \delta \approx 0,75\varphi$	vtisnjeni piloti v produ,
$\delta \approx \varphi$	vtisnjeni in uvrtni piloti v glini, uvrtni piloti v produ,
$R_{s,k} = q_{s,k} \cdot A_s$	karakteristična nosilnost po plašču,
$A_s$	površina plašča.

Efektivna napetost  $\sigma'_v$  je v izračunih omejena z globino 20 d (d = premer pilota).

Upoštewane karakteristike zemljin, ki so uporabljene v izračunih, so prikazane na izpisih izračunov na prilogah 9.1–9.4.

Za izračun projektnih nosilnosti, ki so podane v spodnjih preglednicah, so upoštevani delni faktorji po EC7, projektni pristop 2:

$\gamma_M = 1,3$	modelni faktor,
$\gamma_{R,c} = 1,1$	delni faktor za tlačno obremenjene pilote,
$\gamma_G = 1,35$	delni faktor za vpliv negativnega trenja.

*Preglednica 18: Projektna nosilnost vtisnjenih pilotov na krajnih podporah, dolžina pilotov 22 m*

Premier kola	Karakteristična nosilnost pod nogo $R_{b,k}$	Negativno trenje $R_{neg,k}$	Projektna nosilnost $R_d$
m	kN / pilot	kN / pilot	kN / pilot
0,60	1615,9	678,6	<b>213,9</b>
0,70	2511,1	791,7	<b>687,3</b>
0,80	3687,0	904,8	<b>1356,9</b>

*Preglednica 19: Projektna nosilnost uvrtnih pilotov na krajnih podporah, dolžina pilotov 22 m, izvedba jeklene srajčke (izključitev negativnega trenja)*

Premier kola	Karakteristična nosilnost pod nogo $R_{b,k}$	Projektna nosilnost $R_d$
m	kN / pilot	kN / pilot
1,00	2813,3	<b>1967,3</b>
1,20	4417,6	<b>3089,2</b>
1,50	6902,5	<b>4826,9</b>

*Preglednica 20: Projektna nosilnost vtisnjenih pilotov na vmesnih podporah, dolžina pilotov 19 m*

Premier kola	Karakteristična nosilnost pod nogo $R_{b,k}$	Karakteristična nosilnost po plašču $R_{s,k}$	Projektna nosilnost $R_d$
m	kN / pilot	kN / pilot	kN / pilot
0,60	1603,2	885,2	<b>1740,1</b>
0,70	2493,8	1127,0	<b>2532,0</b>
0,80	3664,4	1335,1	<b>3496,1</b>

*Preglednica 21: Projektna nosilnost uvrtnih pilotov na vmesnih podporah, dolžina pilotov 19 m*

Premier kola	Karakteristična nosilnost pod nogo $R_{b,k}$	Karakteristična nosilnost po plašču $R_{s,k}$	Projektna nosilnost $R_d$
m	kN / pilot	kN / pilot	kN / pilot
1,00	2671,9	1428,3	<b>2867,3</b>
1,20	3847,6	1714,0	<b>3889,2</b>
1,50	6011,8	2142,5	<b>5702,3</b>

Podana projektna nosilnost pilota  $R_d$  mora biti večja od projektne obremenitve  $V_d$  kritične kombinacije obtežb z upoštevanjem ustreznih delnih faktorjev za posamezne obtežbe. Pri tem se upošteva tudi lastna teža pilota.

V kolikor bo osni razmik med posameznimi koli manjši od  $3d$  ( $d$  = premer kola), se upošteva redukcija nosilnosti zaradi skupine kolov. Nosilnost se zniža za  $1/16$  za vsak sosednji kol (redukcija po Feldu). V preglednicah so podane zmanjšane nosilnosti kolov za primer dveh sosednjih kolov ( $R_{d,skupina}$ ).

Pri trenutni zasnovi objekta (po 4-je piloti na krajnih podporah in po 8 pilotov na vmesnih podporah) je projektna obremenitev pilotov (MSN) na krajnih podporah  $V_d = 2700\text{--}4200\text{ kN}$ , na vmesnih podporah pa  $V_d = 3300\text{--}3800\text{ kN}$ . Glede na projektne obremenitve je na krajnih podporah primerna izbira uvrtenih AB pilotov premera 1,50 m ali povečanje števila pilotov manjšega premera (1,20 m), na vmesnih podporah pa so primerni uvrteni AB piloti premera 1,20 m.

Pričakovani posedki pri obremenitvi pilotov v MSU cca.  $V_k = 2000\text{--}3000\text{ kN}$  (krajne podpore) oziroma  $V_k = 2400\text{--}2800\text{ kN}$  (vmesne podpore) bodo velikostnega reda 2–4 cm.

Moduli horizontalne podajnosti za pilote premera 1,2 m in 1,5 m so za posamezne zemljine podane v spodnji preglednici (sestava tal je razvidna na vzdolžnem prerezu objekta).

*Preglednica 22: Moduli horizontalne podajnosti za pilote premera 1,2 m in 1,5 m*

Zemljina	Modul horizontalne podajnosti $k_h$ [kN / m <sup>3</sup> ]	
	Piloti premera 1,2 m	Piloti premera 1,5 m
MH/CH lahko gnetne do srednje gnetne konsistence	800–1700	600–1400
CH težko gnetne konsistence (*)	1700–5000	1400–4000
GP/GM, gost do zelo gost	30000–80000	25000–65000

\* velja tudi za glino srednje do trdne konsistence

Vertikalni modul podajnosti pod nogo pilota v prodih se upošteva  $k_v = 40000\text{--}100000\text{ kN / m}^3$  za pilote premera 1,2 m in  $k_v = 35000\text{--}85000\text{ kN / m}^3$  za pilote premera 1,5 m.

### 7.3 Pogoji za izvedbo priključnih nasipov

Višina priključnih nasipov na krajna opornika je do 3 m na zunanem (dolvodnem) robu in se do notranjega roba (ob obstoječem objektu) izniči. Za priključne nasipe veljajo enaki pogoji gradnje kot za nasipe na trasi Barjanske ceste, ki so že podani v točki 6.2.

Za pospešitev konsolidacije se oba priključna nasipa nadvišata za polovico višine osnovnega nasipa (do 1,5 m na dolvodnem robu) za dobo enega leta z materialom s prostorninsko težo cca.  $21\text{ kN/m}^3$ . Razvoj posedkov naj se spremlja s posedalnimi ploščami.

## 8. ZAKLJUČEK

Načrtovana je rekonstrukcija Barjanske ceste od križišča z Ziherlovo cesto do križišča z AC priključkom Center in P+R Barje. Barjanska cesta se bo v smeri proti AC širila predvsem na levo stran, kjer bo dograjen vozni pas in pas za vozila LPP, kolesarska steza in hodnik za pešce. Razširil se bo most čez vodotok Mali graben. Načrtovana je dograditev cestne povezave na obstoječo Opekarsko ulico iz Barjanske ceste. Na sedanjem priključku AC Center je predvideno krožišče. Skupna dolžina rekonstrukcije Barjanske ceste je cca. 1623 m in cca. 125 m novogradnje – Opekarska ulica.

Na območju predvidene rekonstrukcije in novogradnje na območju novogradnje/širitve mostu čez Mali graben smo v sklopu geotehničnih raziskav izvedli 2 sondažni vrtini globin 30 in 10 m, 4

sondažne razkope z rovokopačem z meritvami nosilnosti tal in odvzemom vzorcev, 5 sondažnih jaškov v voziščni konstrukciji z meritvami nosilnosti tal in odvzemom vzorcev, 3 ultra lahke dinamične penetracije Panda 2 in 2 sonde statične penetracije CPTu z disipacijskimi testi. Okolica in predmetni teren sta bila geološko geotehnično pregledana. Izveden je bil pregled obstoječe ceste.

Obravnavano področje leži na Ljubljanskem barju. Plasti pripadajo kvartarju, natančneje jezerskim in barskim usedlinam (j), ki pripadajo pleistocenskim in holocenskim sedimentom. Kvartarne naplavine, ki zapolnjujejo kotlino Ljubljanskega barja, po podatkih vrtanja in kartiranja sestojijo na površini delno iz šote, šotnega blata in jezerskega melja (polžarice), delno pa iz rjave peščene glin in peščenega melja, ki sta se odlagala v času občasnih poplav. Večji del barjanske površine sestavljata šota in polžarica.

Po geološko geotehničnih raziskavah je debelina umetnega nasipa 1,1–2,4 m, odvisno od lokacije. Na območju od križišča s Cesto v Mestni log do Malega grabna ocenjujemo, da je debelina nasipa 1,0–2,0 m, odvisno od višine okoliškega terena. Sodeč po raziskavah je debelina umetnega nasipa na območju dograditve novega voznega pasu na levi strani obstoječe ceste od križišča s Cesto dveh cesarjev do priključka AC 2,2–2,4 m. Na tem odseku je umetni nasip na cesti in ob cesti grajen večinoma iz elektrofiltrskega pepela, ponekod z vmesnimi kamnitimi plastmi. Na odseku do Ceste dveh cesarjev elektrofiltrskega pepela z raziskavami nismo ugotovili. Pod umetnim nasipom ležijo koherentne glineno meljne zemljine z nizko nosilnostjo  $\text{CBR} \leq 2\%$ , mestoma se lahko pojavi bolj peščena meljna plast z nosilnostjo  $\text{CBR} = 4\text{--}6\%$ . Meljno glino ML/CL in polžarico MH/CH sledimo do prve prodne plasti, ki se pojavi na globini 16,3–18,0 m, in je debeline cca. 2,0–2,5 m. Za tem ponovno sledi meljno glinena zemljina srednje gnetne konsistence v debelini približno 3,0 m. Približno na globini 25 m se ponovno pojavijo gosti peščeni prodi GP.

V elaboratu so podani pogoji izvedbe za cesto (dograditev nasipov) in most čez Mali graben na podlagi projektnih podlog za fazo idejne zasnove. Projektne rešitve se bodo dokončno uskladile v višjih fazah projektiranja v sodelovanju s projektanti ceste in premostitvenega objekta.

Med izvedbo priporočamo geomehanski nadzor.

Obdelali:

Lara Humar, mag. inž. grad.

dr. Mojca Bratun, univ. dipl. inž. geol.

Julijan Bratun, univ. dipl. inž. geol.

Datum: Maj 2022

#### Literatura:

Z. Mencej, Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja, Geologija 31, 32, pp. 517–553, 1988/89, Ljubljana.