Slovensko geotehnično društvo • Slovenian geotechnical society •

25. Šukljetov dan

ZBORNIK VABLJENIH PREDAVANJ

Bohinj, 14. oktober 2026

SIMSG ISSMGE

ISRM

ENG AIGI IAEG GEOL

igs

Slovensko geotehnično društvo • Slovenian geotechnical society •

25.

Šukljetov dan

ZBORNIK VABLJENIH PREDAVANJ

Bohinj, 14. oktober 2026

ŠUKLJETOV DAN (25; 2026; Bohinj)
Zbornik vabljenih predavanj / 25. Šukljetov dan, Bohinj, 14. oktober 2026

Izdaja: Slovensko geotehniško društvo
Zanj: Suzana Svetličič, Sebastjan Kuder
Uredila: Suzana Svetličič, Sebastjan Kuder – Slovensko Geotehniško društvo SloGeD, 2025

Oblikovanje ovitka in zasnova: Sonja Eržen
Oblikovalska realizacija: Leon Beton
Tisk: Demat d.o.o.
Naklada 200 izvodov
Ljubljana, oktober 2026

Organizacijski odbor 25. Šukljetovega dne:

Predsednica SloGeD: ga. Suzana Svetličič
Podpredsednik: doc. dr. Borut Macuh
Tajnik SloGeD: mag. Sebastjan Kuder
Član: prof. dr. Janko Logar
Član: izr. prof. dr. Vojkan Jovičić
Član: prof. dr. Timotej Verbovšek
Član: doc. dr. Stanislav Lenart
ga. Vanja Selan
g. Marko Bebar

Soorganizator: Inženirska zbornica Slovenije (IZS)

KAZALO

IZ FOTOGRAFSKEGA ARHIVA – 24. ŠUKLJETOV DAN.....6

VABLJENI PREDAVANJI

Blaž JANC[1], Primož MRVAR[1] in Vojkan JOVIČIĆ[2]
(1) *Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta*
(2) *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,*
Interakcija med vzorci kamnin in miniaturnimi kotalnimi diski pri laboratorijskem preizkušanju 23
Interaction between rock samples and miniature disc cutters in laboratory testing.....24

Andrej LOČNIŠKAR
Geotehnika pri velikih infrastrukturnih projektih v RS.....47
Geotechnical Engineering in Major Infrastructure Projects in Slovenia ...48

IZ FOTOGRAFSKEGA ARHIVA – 24. ŠUKLJETOV DAN
Rogaška Slatina, 2. oktober 2025












8.
VETOVANJE SLOVENSK
GEOTEHNIKOV




24.
8.
POSVETOVANJE
SLOVENSKIH
EPFL
Revolutionizing Four
Advances in Therr
Piling En
DFI 2025 JOHN MITCHELL LECTURE

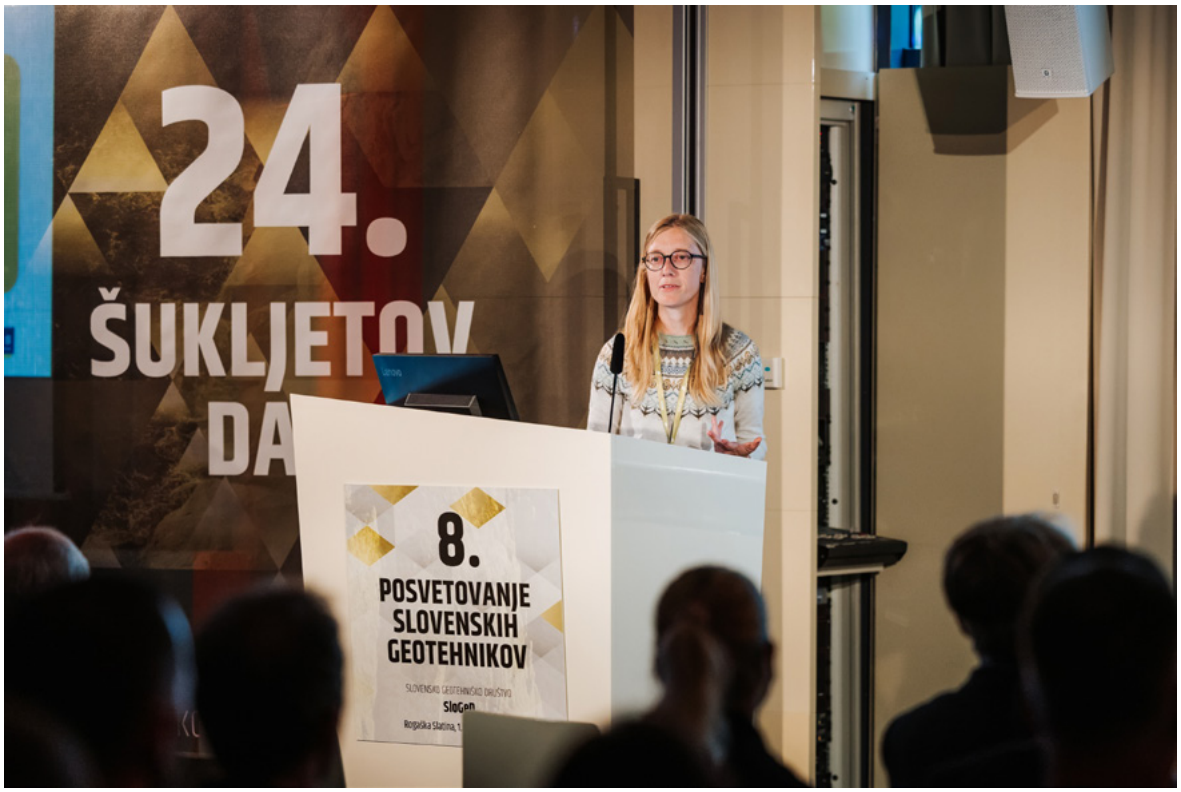

8.
POSVETOVANJE SLOVENSKIH


BRUGG
Geobrugg
STABILIZATION AND
EROSION CONTROL





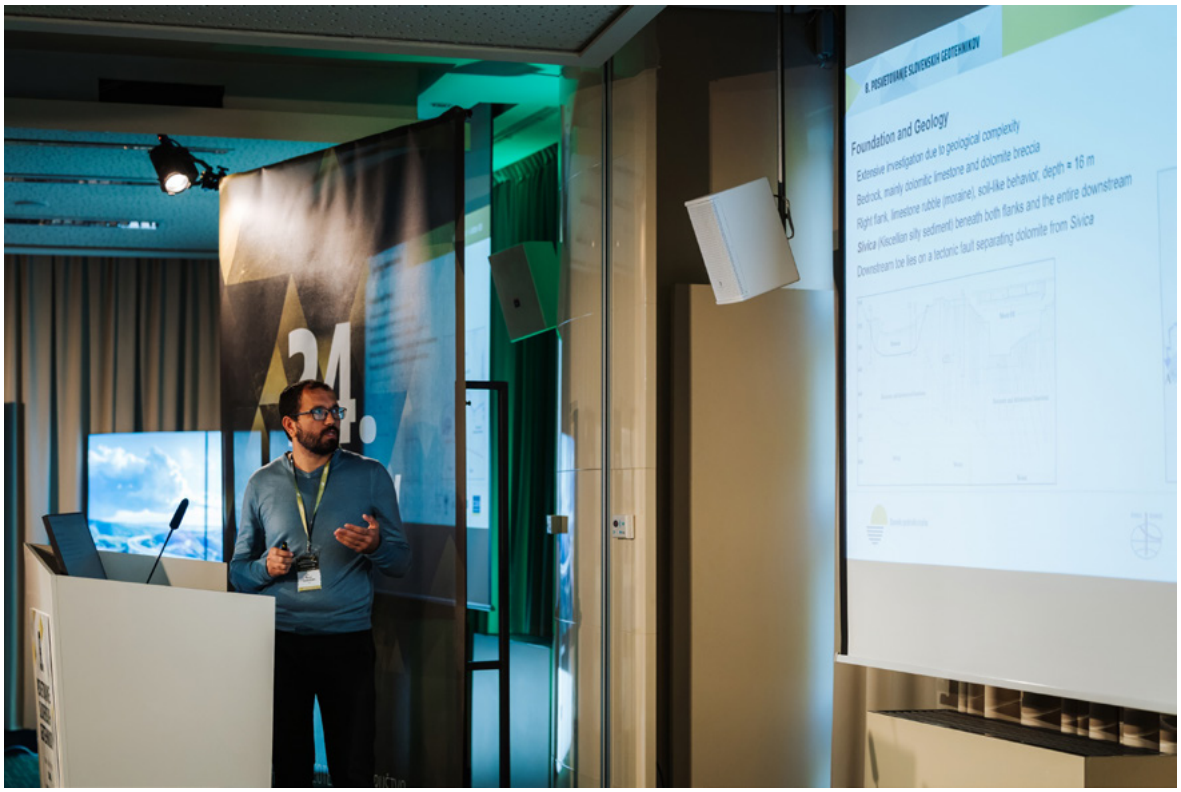

24.
ŠUKLJETOV
DAN
8. POSVETOVANJE SLOVENSKIH GEOTEHNIKOV
1. SKLOP
PREDSEDNIK SEKCIJE: DOC DR. STANISLAV LENART
Vloga geotehnike pri trajnostnem upravljanju z okoljem, sodobne tehnologije in inovacije v geotehniki
8.
POSVETOVANJE


24.
8.
POSVETOVANJE
SLOVENSKIH
GEOTEHNIKOV




8.
POSVETOVANJE
SLOVENSKIH
GEOTEHNIKOV




Foundation and Geology
Extensive investigation due to geological complexity
Bedrock, mainly dolomitic limestone and dolomite breccia
Right flank, limestone rubble (moraine), soil-like behavior, depth ≈ 16 m
Slivica (Kilcellian silty sediment) beneath both flanks and the entire downstream
Downstream toe lies on a tectonic fault separating dolomite from Slivica


24.






24.
8.


8. POSVETOVANJE SLOVENSKIH GEOTEHNIKOV
Rogaška Slatina, 1 – 3. oktober 2025
ČLANSTVO
• Število aktivnih članov društva se je povzpelo iz 204 (2024) → 213 (2025) 10 novih članov/1 upokojitev.
• 10 članov se je v obdobju od 2022-2025 prezaposlilo in članstva niso obnovili.
• Člani ISSMGE: 80
• Člani ISRM: 38
• Člani IAEG: 51
• Člani IGS: 24 (podatki na dan 2.10.2025)
igs
8.


24.


24.
8.
POSVETOVANJE SLOVEN
GEOTEHNIKOV
dr. Stanislav ŠKRA


24.
8.
POSVETOVANJE SLOVE
GEOTEHNIKOV
Dr. Borut PETKOVŠEK


24.
ŠUKLJETOV
DAN
24.
ŠUKLJETOV
DAN
SloGeD


24.
ŠUKLJETOV
DAN


24.
ŠUKLJETOV
DAN









BLAŽ JANC

Asist. dr. Blaž Janc je leta 2025 zaključil doktorski študij na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani, kjer je zagovarjal doktorsko disertacijo s področja obrabe kotalnih diskov predorskih vrtalnih strojev pri izkopih v trdih kamninah. Na isti fakulteti je leta 2013 diplomiral, leta 2015 pa magistriral. Danes je zaposlen na Oddelku za geotehnologijo, rudarstvo in okolje ter sodeluje pri pedagoškem, strokovnem in raziskovalnem delu.

Njegovo raziskovalno delo je usmerjeno predvsem v mehanizirano gradnjo predorov ter proučevanje obrabe rezalnih orodij predorskih vrtalnih strojev (TBM). Posebno pozornost namenja razumevanju interakcije med kotalnim diskom in kamnino ter mehanizmom obrabe, ki pomembno vplivajo na učinkovitost izkopa, življenjsko dobo orodij ter čas in stroške gradnje predorov.

V okviru doktorskega raziskovanja je razvil namensko laboratorijsko napravo za preizkušanje obrabe miniaturnih kotalnih diskov na vzorcih kamnin, ki omogoča primerjavo laboratorijsko ugotovljenih obrabnih mehanizmov z obrabo diskov v dejanskih pogojih izkopa s TBM. Zaradi izrazito interdisciplinarne narave raziskav sodeluje s strokovnjaki s področij geotehnologije, geologije, materialov, metalurgije in gradnje predorov.

Blaž JANC[1], Primož MRVAR[1] in Vojkan JOVIČIĆ[2]
[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, Ljubljana
[2] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana

INTERAKCIJA MED VZORCI KAMNIN IN MINIATURNIMI KOTALNIMI DISKI PRI LABORATORIJSKEM PREIZKUŠANJU

Povzetek

Učinkovitost rušenja kamnine in obraba kotalnih diskov pomembno vplivata na izkop predora z uporabo predorskih vrtalnih strojev. Na oba dejavnika vplivajo lastnosti kamninske mase, material orodja in obratovalni parametri stroja. V zadnjem času poteka raziskovanje procesa rušenja kamnin in obrabe kotalnih diskov tudi na laboratorijski ravni z uporabo namensko razvitih naprav, ki omogočajo dinamični kontakt med vzorcem kamnine in modelom kotalnega diska.

Prispevek obravnava analizo rušenja vzorcev sedimentnih kamnin z uporabo miniaturnih kotalnih diskov ter njihovo obrabo pri laboratorijskem preizkušanju na namensko razvitem aparatu. Pri preizkušanju se valjasti vzorec kamnine in miniaturni kotalni disk, ki sta v dinamičnem kontaktu, sočasno kotalita pod vplivom obtežbe. Preizkušanje je potekalo na vzorcih peščenjaka, apnenca, meljevca in konglomerata, na katerih so bile predhodno opravljene petrografske preiskave ter preiskave za določitev mineraloške sestave, abrazivnosti in trdnosti. Jekleni miniaturni kotalni diski so imeli primerljive materialne lastnosti kot dejanski kotalni diski. Na podlagi meritev izgube mase vzorca kamnine in miniaturnega kotalnega diska glede na kotalno razdaljo je bila izvedena analiza vplivnih dejavnikov na proces rušenja vzorcev kamnin in obrabo miniaturnih kotalnih diskov.

Ključne besede:
laboratorijsko preizkušanje, rušenje kamnin, lastnosti kamnin, miniaturni kotalni disk, obraba

INTERACTION BETWEEN ROCK SAMPLES AND MINIATURE DISC CUTTERS IN LABORATORY TESTING

Abstract

Rock cutting efficiency and disc cutter wear significantly influence tunnel excavation using tunnel boring machines. Both factors depend on the properties of the rock mass, the cutting tool material, and the machine's operating parameters. Recently, research into the rock cutting process and disc cutter wear has also been carried out in the laboratory using purpose-built devices that enable dynamic contact between the rock sample and a disc cutter model.

This article presents an analysis of the cutting process of sedimentary rock samples using miniature disc cutters, and of the wear of these cutters when tested in the laboratory with specially designed apparatus. During testing, both the cylindrical rock sample and the miniature disc cutter, which are in dynamic contact, roll under the influence of thrust force. Testing was carried out on sandstone, limestone, siltstone, and conglomerate rock samples, which had previously undergone petrographic analysis and analyses to determine mineralogical composition, abrasivity, and strength. Steel miniature disc cutters had material properties comparable to those of actual disc cutters. Based on measurements of the mass loss of the rock sample and the miniature disc cutter as a function of rolling distance, an analysis was conducted of the factors that influence the rock sample cutting process and the wear of miniature disc cutters.

Key words:
laboratory testing, rock cutting, rock properties, miniature disc cutter, wear

1 UVOD

Gradnja predorov je skladno z nenehnim tehnološkim razvojem vedno bolj mehanizirana in avtomatizirana. Predorski vrtalni stroj (angl. tunnel boring machine – TBM) predstavlja najsodobnejšo tehnologijo, ki omogoča kontinuirano izkopavanje hkrati z vgradnjo podpornih elementov. Tehnologija TBM se uporablja tako pri gradnji dolgih cestnih in železniških predorov skozi gorske masive kot tudi pri gradnji predorov pod urbanimi območji, kjer je nadkritje majhno in je potrebna posebna pazljivost zaradi vplivov na obstoječo nadzemno in podzemno infrastrukturo. Tehnologija TBM omogoča gradnjo predorov za različne namene: od cestnega in železniškega prometa, hidroelektrarn, kanalizacije, vodovoda in podzemnih skladišč do rudarstva. Pri gradnji dolgih predorov v ugodnih geoloških pogojih TBM v primerjavi z drugimi metodami izkopavanja izkazuje nekatere prednosti, kot so visoka stopnja napredovanja, avtomatizacije, kakovosti in varnosti. V neugodnih geoloških pogojih pa se učinkovitost gradnje predorov s tehnologijo TBM zmanjša, saj je metoda manj prilagodljiva, pri čemer lahko pride do poslabšanja varnostnih razmer, višjih stroškov in težavnejšega sledenja terminskemu planu [1–9].

Pri gradnji predorov s stroji TBM v kamninah se kot orodje za rušenje uporabljajo kotalni diski, katerih obroči so najpogosteje izdelani iz orodnega jekla za delo v vročem. Nameščeni so na sprednjem delu vrtalne glave stroja TBM in se zaradi njene rotacije kotalijo po koncentričnih krožnicah po izkopnem čelu predora. Na kontaktu med kamnino in kotalnim diskom nastajajo visoki kontaktni tlaki, ki so posledica potisne sile na vrtalno glavo ter relativno majhne kontaktne površine. Ko kontaktni tlaki lokalno presežejo trdnost kamnine, v njej začnejo nastajati mikrorazpoke, kar vodi v odkruške in penetracijo kotalnega diska v kamnino [10].

Na voljo je več kot deset modelov za napovedovanje učinkovitosti izkopa in obrabe kotalnih diskov, kar je koristna informacija pri načrtovanju gradnje predora s tehnologijo TBM z vidika ocene stroškov in trajanja gradnje. Poleg delovnih parametrov stroja TBM in lastnosti kamninske mase se kot vhodni parametri za te modele pogosto uporabljajo rezultati laboratorijskih preiskav vzorcev kamnin, kot so:

- indeks abrazivnosti Cerchar (angl. Cerchar abrasivity index – CAI),
- enoosna tlačna trdnost (angl. uniaxial compressive strength – UCS),
- natezna trdnost,
- ekvivalentni delež kremena,
- modul elastičnosti in drugi [11–15].

Najbolj uveljavljeni splošni modeli za napovedovanje porabe kotalnih diskov so Gehringov model [16], model CSM (Colorado School of Mines) [17,18] in model NTNU (Norwegian University of Science and Technology) [19].

Za proučevanje učinkovitosti rušenja kamnin in obrabe orodja pri gradnji predorov s stroji TBM je bilo razvitih več namenskih laboratorijskih naprav, ki omogočajo preizkušanje v naravnem ali pomanjšanem merilu. Preizkušanje v naravnem merilu, ki ga na primer omogoča naprava LCM (Linear Cutting Machine), poteka z uporabo dejanskih kotalnih diskov na velikih kamninskih blokih [20,21]. V zadnjem času številne raziskave temeljijo na uporabi laboratorijskih naprav, ki omogočajo preizkušanje in proučevanje procesov rušenja kamnin ter obrabe kotalnih diskov v pomanjšanem merilu. Pri tem se uporabljajo manjši vzorci kamnin in modeli kotalnih diskov, izdelani iz enakega materiala kot dejanski kotalni diski [22–26].

Ker rezultati laboratorijskih preiskav vzorcev kamnin znatno vplivajo na izhodne rezultate modelov za napovedovanje učinkovitosti izkopa in obrabe kotalnih diskov pri gradnji predorov z uporabo TBM, je smiselno preveriti njihov dejanski vpliv. Prispevek se osredotoča na to, kako različne abrazijske,

mehanske, kemijske in mikrostrukturne lastnosti kamnin vplivajo na proces njihovega rušenja ter na obrabo miniaturnih kotalnih diskov. V ta namen je bil uporabljen laboratorijski aparat, ki omogoča preizkušanje miniaturnih kotalnih diskov na valjastih vzorcih kamnin. Pomanjšani jekleni kotalni diski, izdelani na podlagi dejanskega kotalnega diska, uporabljenega pri gradnji mikropredora Solingen v Nemčiji, so bili posamezno preizkušeni na vzorcih različnih sedimentnih kamnin pri enakih začetnih obtežbah. Rezultati raziskave prispevajo k boljšemu razumevanju, kako različne lastnosti kamnin vplivajo na proces njihovega rušenja in obrabo miniaturnih kotalnih diskov pri laboratorijskem preizkušanju. Izsledki raziskave hkrati potrjujejo njihovo praktično uporabnost pri gradnji predorov z uporabo tehnologije TBM.

2 MATERIALI IN METODE

V tem poglavju so predstavljeni materiali in metode, uporabljeni v raziskavi. Najprej je opisana priprava vzorcev, nato izvedba laboratorijskih preiskav kamnin. Sledi predstavitev principa delovanja laboratorijskega aparata za preizkušanje, izdelave miniaturnih kotalnih diskov ter postopka laserskega skeniranja vzorcev kamnin.

2.1 Vzorci kamnin

Odziv vzorcev kamnin in miniaturnih kotalnih diskov pri preizkušanju z laboratorijskim aparatom smo proučevali na štirih različnih sedimentnih kamninah. Vzorci peščenjaka, apnenca in meljevca so predstavljali homogene sedimentne kamnine, vzorec konglomerata pa nehomogeno sedimentno kamnino. Vzorci kamnin dolžine 60 mm za laboratorijsko preizkušanje so bili z vodno hlajeno diamantno žago odrezani iz kamninskih jeder s premerom 84 mm (slika 1), ki so bila izvrtana na območju trase 3. razvojne osi med Velenjem in Slovenj Gradcem. Iz istih kamninskih jeder so bili pripravljeni tudi vzorci za petrografsko analizo ter določitev mineraloške sestave, CAI, UCS in natezne trdnosti po brazilskem preizkusu (angl. Brazilian tensile strength – BTS).



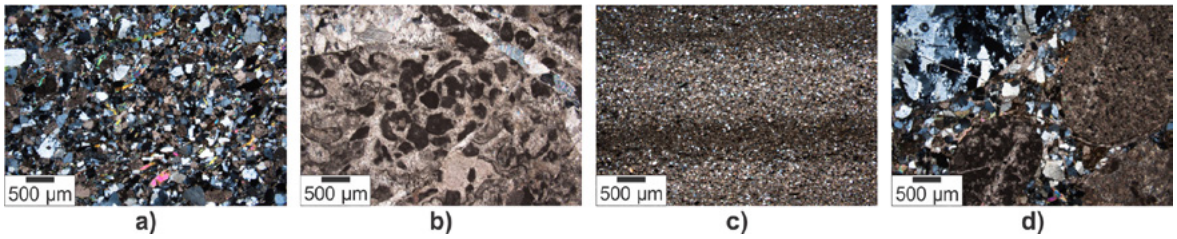
Slika 1: Jedra, iz katerih so bili pripravljeni vzorci kamnin: a) peščenjak, b) apnenec, c) meljevec, d) konglomerat.

2.1.1 Petrografska analiza vzorcev kamnin

Za petrografsko analizo vzorcev kamnin so bile odrezane ploščice dimenzij 40 mm × 25 mm × 15 mm za pripravo zbruskov. Petrografska analiza zbruskov je bila izvedena z uporabo svetlobnega mikroskopa Nikon Eclipse E600, opremljenega z digitalno kamero Nikon DS-Fi3.

Mikroposnetek na sliki 2a prikazuje karbonatno litični kremenov peščenjak. Kremenova zrna so velika do približno 0,5 mm in so večinoma oglate oblike. Na mikroposnetku so jasno razvidni tudi litoklasti in zrna sljude. Na sliki 2b je prikazan mikroposnetek apnenca tipa grainstone. Poleg

karbonatnih klastov in bioklastov je vidno vezivo iz kalcitnega cementa ter posamezne kalcitne žile. Velikost zrn je večinoma manjša od 1 mm. Slika 2c prikazuje laminiran peščen meljevec, v katerem je vidno izmenjevanje lamin drobnega peska in melja. V peščenih laminah je veliko kremenovih zrn, večjih od 100 µm, pojavljajo pa se tudi posamezna zrna sljude. Zbrusek vzorca konglomerata s peščenim kremenovim vezivom je prikazan na sliki 2d. Prodniki so večinoma karbonatni in kremenovi, povezuje pa jih peščeno vezivo iz kremena, sljud in litoklastov. Karbonatni prodnik je viden na desni, kremenov pa na levi strani posnetka.



Slika 2: Mikroposnetki zbruskov kamnin: a) peščenjak, b) apnenec, c) meljevec, d) konglomerat.

2.1.2 Mineraloška analiza vzorcev kamnin

Priprava vzorcev za mineraloško analizo je obsegala drobljenje in mletje materiala na velikost delcev pod 63 µm. Za preiskave mineraloške sestave je bil uporabljen difraktometer PW 1820 proizvajalca Philips z generatorjem rentgenskih žarkov PW3830 proizvajalca Malvern PANalytical.

Mineraloška analiza je potrdila, da je kremen prevladujoči mineral v vzorcu peščenjaka in konglomerata (preglednica 1), medtem ko je dolomit prisoten v primerljivih deležih v vzorcih peščenjaka, meljevca in konglomerata. Kalcit je prisoten v vseh vzorcih kamnin, pri čemer v apnencu predstavlja 100-odstotni delež. Vzorec meljevca vsebuje večje deleže muskovita, klinoklora in albita kot vzorca peščenjaka in konglomerata.

Preglednica 1: Mineraloška sestava vzorcev kamnin v %.

Vzorec	*Kremen*	*Dolomit*	*Kalcit*	*Muskovit*	*Klinoklor*	*Albit*	*ostali*
Peščenjak	55,1	24,9	2,8	3,2	3,1	10,9	-
Apnenec	-	-	100	-	-	-	-
Meljevec	21,8	26,5	7,5	21,1	10,2	12,6	0,3
Konglomerat	59,6	22,5	8,7	1,1	1,7	5,2	1,1

2.1.3 Določitev abrazivnosti vzorcev kamnin

Preiskave abrazivnosti vzorcev kamnin po metodi Cerchar so bile izvedene z napravo West proizvajalca Wille Geotechnik. Na vzorcih homogenih kamnin (peščenjak, apnenec, meljevec) je bilo opravljenih pet razov, na vzorcu nehomogene kamnine (konglomerat) pa deset razov. Ker so imeli vsi vzorci gladko površino zaradi razreza z diamantno žago, smo pri izračunu indeksa abrazivnosti CAI upoštevali korekcijski faktor v skladu s priporočili ISRM [27]. Rezultati preiskav abrazivnosti skupaj s klasifikacijo po ISRM so prikazani v preglednici 2. Vzorci kamnin so izkazovali razmeroma širok razpon vrednosti CAI, od 0,7 do 2,6, kar ustreza zelo nizki do srednji abrazivnosti.

Preglednica 2: Abrazivnost vzorcev kamnin glede na preiskavo Cerchar.

Vzorec	*d [mm]*	*Std. odklon*	CAI_S	*CAI*	*Klasifikacija (ISRM)*
Peščenjak	0,22	0,045	2,2	2,5	srednja abrazivnost
Apnenec	0,13	0,023	1,3	1,5	nizka abrazivnost
Meljevec	0,06	0,026	0,6	0,7	zelo nizka abrazivnost
Konglomerat	0,23	0,63	2,3	2,6	srednja abrazivnost

2.1.4 Določitev enoosne tlačne trdnosti in natezne trdnosti vzorcev kamnin

Preiskave UCS na vzorcih kamnin so bile izvedene po preizkušanju z uporabo laboratorijskega aparata. Vzorci kamnin za preiskave so bili valjaste oblike, višine 60 mm in premera 30 mm. Povrtani so bili iz večjih vzorcev višine 60 mm in premera 84 mm, pri čemer je bilo doseženo razmerje med višino in premerom 2 : 1. Preiskave UCS so bile izvedene z uporabo hidravlične stiskalnice SBEL CT-250 B, opremljene z merilno celico HBM Hottinger. Iz preglednice 3 je razvidno, da je bila največja UCS določena na vzorcu apnenca, najmanjša pa na vzorcu meljevca. Vzorca peščenjaka in konglomerata sta izkazovala UCS v vmesnem območju.

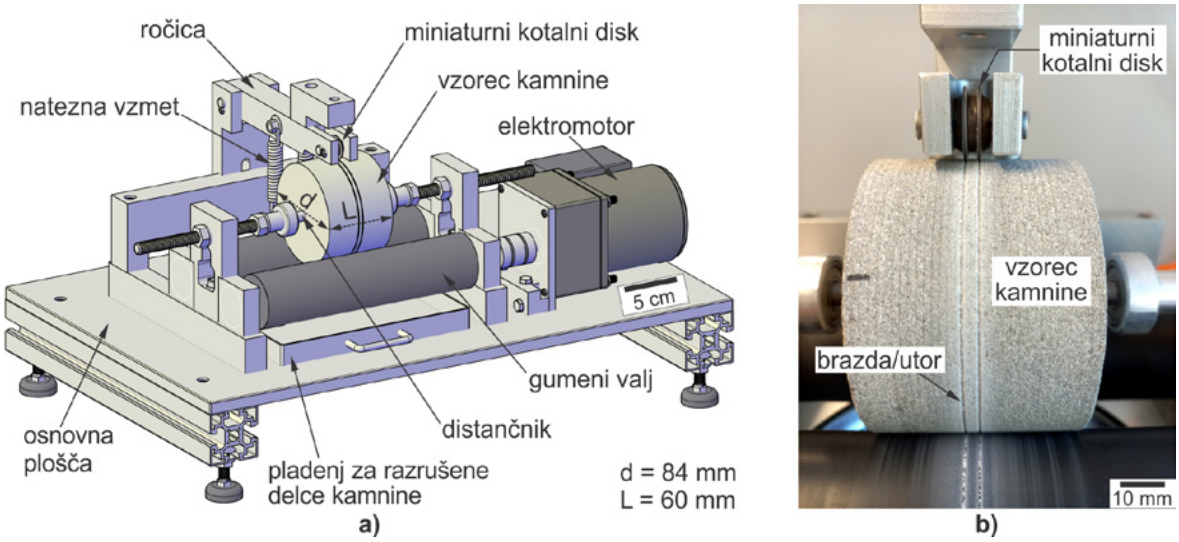
Preiskave BTS na vzorcih kamnin so bile izvedene na dveh vzorcih vsake posamezne kamnine. Vzorci kamnin v obliki diska so imeli premer 84 mm in debelino 22–27 mm. Preiskave BTS so bile izvedene z uporabo iste hidravlične stiskalnice kot pri preiskavah UCS. Največja BTS je bila določena na vzorcu apnenca in konglomerata, najmanjša pa na vzorcu peščenjaka, kot prikazuje preglednica 3.

Preglednica 3: Gostota ter enoosna tlačna in natezna trdnost vzorcev kamnin.

Vzorec	*Gostota*	*UCS*	*BTS*
	[g/cm^3]	[MPa]	[MPa]
Peščenjak	2,42	42,60	3,78
Apnenec	2,67	52,98	4,36
Meljevec	2,67	32,12	4,05
Konglomerat	2,66	49,01	4,36

2.2 Laboratorijski aparat in princip preizkušanja

Za preizkušanje procesa rušenja vzorcev kamnin in obrabe miniaturnih kotalnih diskov smo razvili in izdelali poseben laboratorijski aparat, ki omogoča sočasno kotaljenje valjastega vzorca kamnine in miniaturnega kotalnega diska v medsebojnem kontaktu. Kot prikazuje slika 3a, laboratorijski aparat v osnovi sestavljata enota za kotaljenje vzorca kamnine in enota za ustvarjanje obtežbe na disk. Enoto za kotaljenje vzorca kamnine, s tem pa tudi diska, sestavljata dva gumena valja, od katerih je eden pogonski in povezan z elektromotorjem. Enoto za ustvarjanje obtežbe na disk sestavljajo ročica in dve natezni vzmeti, katerih napetost je mogoče regulirati glede na želeni kontaktni tlak. Med preizkušanjem disk postopoma ruši vzorec kamnine, pri čemer v njem nastaja brazda oziroma utor, kot prikazuje slika 3b. Pri tem se masa vzorca kamnine in masa diska postopoma zmanjšujeta. Merjenje izgube mase obeh omogoča določitev učinkovitosti rušenja kamnine in obrabe diska.



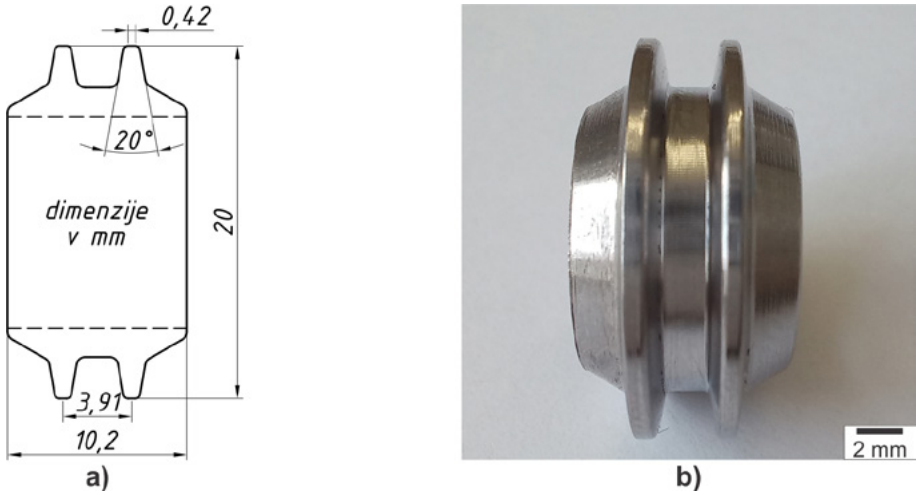
Slika 3: a) Tridimenzionalni model laboratorijskega aparata z osnovnimi sestavnimi deli; b) kontakt miniaturnega kotalnega diska z vzorcem kamnine.

Pri preizkušanju je hitrost vrtenja gumenega pogonskega valja, in s tem tudi hitrost kotaljenja miniaturnega kotalnega diska po plašču vzorca kamnine, znašala 16,5 m/min. Začetna obtežba diska je bila 120 N, kar pomeni 60 N na vsak kotalni obroč. Pred začetkom preizkušanja smo s tehtanjem določili začetno maso vzorca kamnine in diska. Uporabili smo precizno tehtnico G&G JJ1523BF in analitsko tehtnico Sartorius CP224 S.

Po vsaki uri preizkušanja, ko sta disk in vzorec kamnine opravila pot dolžine 990 m, smo na laboratorijskem aparatu zaustavili vrtenje pogonskega valja, iz aparata odstranili vzorec kamnine in disk, ju očistili finih delcev ter za vsakega posebej s tehtanjem določili izgubo mase. Nato smo vzorec kamnine in disk ponovno namestili na laboratorijski aparat ter postopek ponavljali, pri čemer smo za vsako uro beležili njuno izgubo mase. Vsak vzorec kamnine smo preizkušali z novim diskom.

2.3 Miniaturni kotalni diski

Za preizkušanje so bili iz jekla H13 izdelani štirje miniaturni kotalni diski (D1–D4) s premerom 20 mm in širino 10 mm. Diski so imeli dvojni obroč, kar omogoča simuliranje gibanja dveh enojnih kotalnih diskov na določeni medsebojni razdalji. Geometrija in izdelan disk sta prikazana na sliki 4. Po izdelavi so bili diski toplotno obdelani s postopkom kaljenja in popuščanja, s čimer je bila dosežena njihova trdota med 54 in 55 po Rockwellu (HRC), kar je primerljivo s trdotami dejanskih kotalnih diskov TBM. Pred začetkom preizkušanja je bil v odprtino vsakega diska vstavljen iglični ležaj, ki omogoča nemoteno vrtenje na osi ročice laboratorijskega aparata.



Slika 4: a) Načrt miniaturnega kotalnega diska; b) miniaturni kotalni disk po izdelavi.

2.4 Lasersko skeniranje vzorcev kamnin

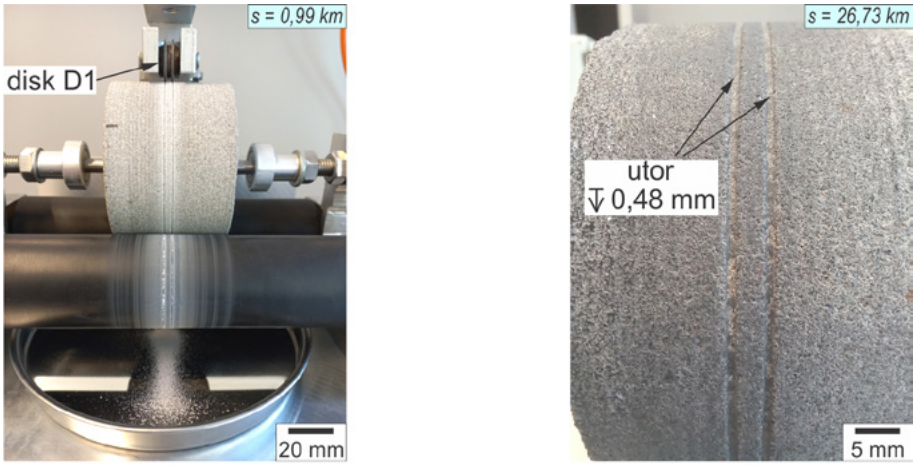
Po preizkušanju smo globino utorov na posameznem vzorcu kamnine izmerili iz oblaka točk površine, ustvarjenega z laserskim skeniranjem. Pri tem smo uporabili ročni laserski skener EinScan XH proizvajalca Shining 3D z natančnostjo 0,1 mm in pripadajočo programsko opremo. Na oblaku točk vsakega vzorca kamnine smo s programsko opremo Rhinoceros 7 izdelali štiri osne prereze, pri čemer je kot med posameznimi prerezi znašal 45° glede na os vrtenja vzorca. Za vsak vzorec kamnine smo globino utorov izmerili na osmih mestih in določili njihovo povprečno vrednost.

3 REZULTATI

V tem poglavju so predstavljeni rezultati laboratorijskega preizkušanja procesa rušenja vzorcev kamnin z uporabo miniaturnih kotalnih diskov ter preizkušanja njihove obrabe. Najprej so v ločenih podpoglavjih prikazani rezultati preizkušanja za vsak vzorec kamnine, na koncu pa še primerjava vseh rezultatov.

3.1 Preizkušanje na vzorcu peščenjaka

Pri preizkušanju na vzorcu peščenjaka (skupno 27 ur), sta vzorec kamnine in miniaturni kotalni disk D1 opravila kotalno razdaljo 26,73 km. Začetna stopnja preizkušanja je prikazana na sliki 5a. Vzorec peščenjaka po koncu preizkušanja z dvema utoroma, nastalima kot posledica delovanja diska D1, prikazuje slika 5b. Robovi utorov s povprečno globino 0,48 mm so bili razmeroma ostri in ravni, brez večjih odkruškov.



Slika 5: a) Stanje vzorca peščenjaka po 1 uri preizkušanja oziroma kotalni razdalji 0,99 km. b) Utori na vzorcu peščenjaka, nastali kot posledica delovanja miniaturnega kotalnega diska D1.

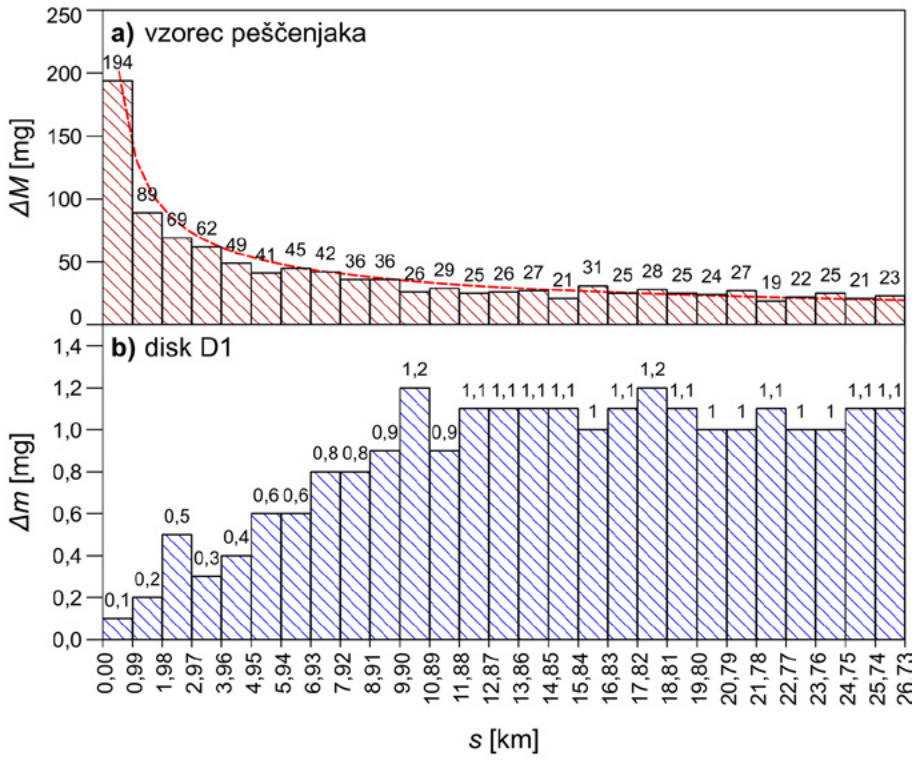
Izguba mase vzorca peščenjaka (ΔM) in diska D1 (Δm) glede na kotalno razdaljo (s) je prikazana na slikah 6a in 6b v obliki stolpčnega diagrama. Z rdečo prekinjeno črto je prikazana tudi funkcijska odvisnost med izgubo mase vzorca peščenjaka in kotalno razdaljo.

Skupna izguba mase vzorca peščenjaka je po opravljeni kotalni razdalji 26,73 km znašala 1087 mg. Izguba mase je bila največja na začetku preizkušanja, ko je znašala 194 mg/km, nato je postopoma upadala. Po približno 10,89 km kotalne razdalje se je ustalila in do konca preizkušanja znašala med 19 mg/km in 31 mg/km (slika 6a). Izguba mase vzorca peščenjaka v odvisnosti od kotalne razdalje je sledila upadajoči potenčni funkciji z enačbo:

$$\Delta M = 139{,}9 \cdot s^{-0{,}597} \tag{1}$$

kjer je ΔM izguba mase vzorca kamnine v mg, s pa kotalna razdalja v km.

Skupna izguba mase diska D1 je po 26,73 km kotalne razdalje znašala 23,4 mg. Izguba mase je bila najmanjša na začetku preizkušanja. Po 0,99 km kotalne razdalje je znašala 0,1 mg/km, nato je razmeroma linearno naraščala do 10,89 km, ko je dosegla 1,2 mg/km. Do konca preizkušanja je bila izguba mase razmeroma konstantna, v območju med 0,9 mg/km in 1,2 mg/km (slika 6b).

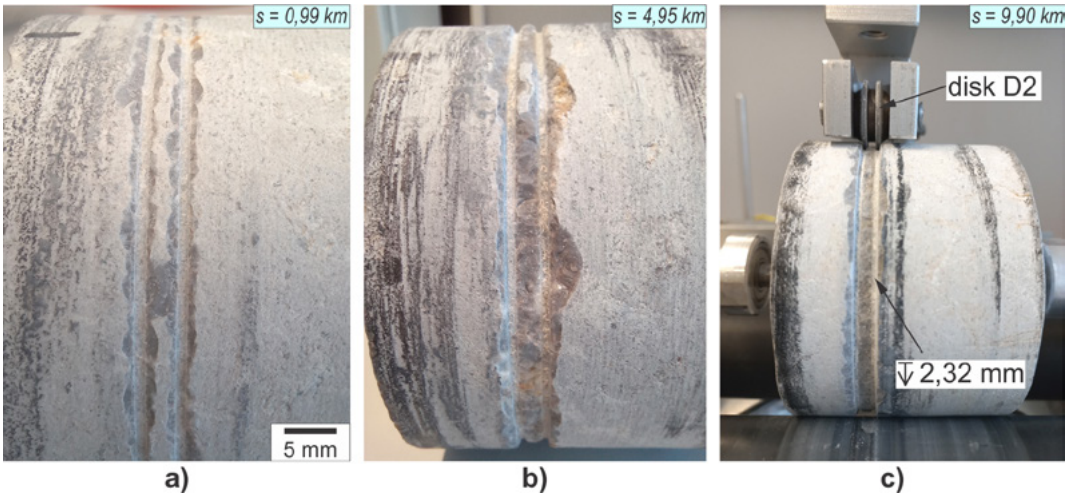


Slika 6: a) Izguba mase vzorca peščenjaka (*ΔM*) in b) izguba mase miniaturnega kotalnega diska D1 (*ΔM*) v odvisnosti od kotalne razdalje (s).

3.2 Preizkušanje na vzorcu apnenca

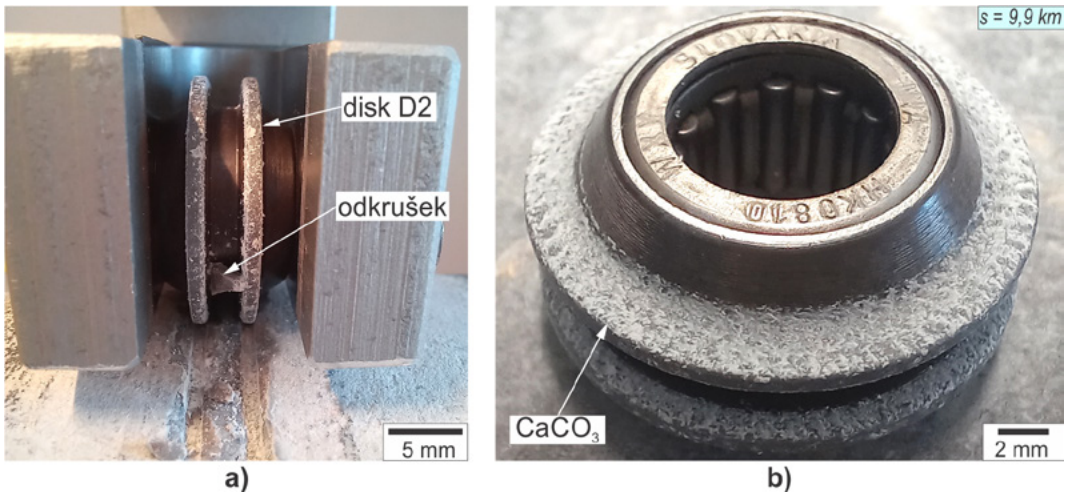
Preizkušanje na vzorcu apnenca z miniaturnim kotalnim diskom D2 smo izvedli na dveh ločenih mestih, v dveh stopnjah. V prvi stopnji je bila globina utorov po 9,9 km kotalne razdalje že tako velika, da preizkušanja z diskom D2 nismo mogli nadaljevati na istem mestu. Prosti konec ročice laboratorijskega aparata, na katerega je vpet disk, se je namreč zelo približal vzorcu kamnine (slika 7c). Vzorec kamnine smo zato zamaknili in preizkušanje nadaljevali na drugem mestu (druga stopnja), kjer je disk D2 znova opravil 9,9 km kotalne razdalje. V obeh stopnjah je bilo krušenje vzorca apnenca zelo intenzivno, zato je disk D2 hitro napredoval v kamnino. Velikost razrušenih delcev kamnine je med preizkušanjem znašala do približno 4 mm.

Posnetki vzorca apnenca po 0,99 km, 4,95 km in 9,9 km kotalne razdalje v prvi stopnji preizkušanja so prikazani na sliki 7. Oba utora, nastala po 0,99 km kotalne razdalje, sta bila razmeroma globoka, vmesni del kamnine pa še neporušen (slika 7a). Po kotalni razdalji 4,95 km se je vmesni del kamnine med obema utoroma že delno porušil, pojavili so se tudi večji odkruški kamnine (slika 7b). Ob koncu prve stopnje preizkušanja (pri 9,9 km kotalne razdalje), ko je disk D2 dosegel največjo globino, je bil celoten vmesni del kamnine med obema utoroma porušen. Povprečna globina utorov v prvi stopnji je znašala 2,32 mm, v drugi stopnji pa 2,36 mm.



Slika 7: Vzorec apnenca po kotalni razdalji a) 0,99 km, b) 4,95 km in c) 9,90 km pri preizkušanju v prvi stopnji.

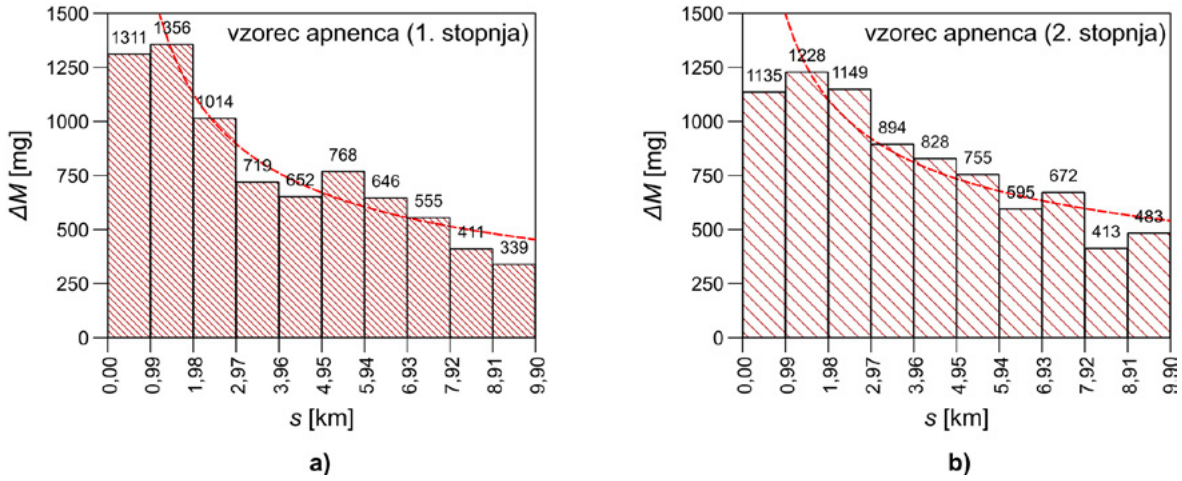
Med preizkušanjem na vzorcu apnenca je občasno prišlo do zagozditve odkrušenih delcev kamnine med konicama miniaturnega kotalnega diska, kot prikazuje slika 8a. Ves čas je prihajalo do adhezije finih delcev razrušene kamnine na jekleno površino diska D2 ter do njihove aglomeracije. Količina finih delcev je naraščala s kotalno razdaljo. Ker finih delcev nismo mogli povsem odstraniti s površine diska D2, med preizkušanjem nismo mogli določiti izgub njegove mase. S tehtanjem smo ocenili, da se je na disku D2 nabralo približno 2 mg finih delcev na vsak kilometer kotalne razdalje. Disk D2 po 9,9 km kotalne razdalje je prikazan na sliki 8b, kjer je količina finih delcev jasno razvidna.



Slika 8: a) Zagozditev odkrušenega delca kamnine med konicama miniaturnega kotalnega diska D2. b) Miniaturni kotalni disk D2 po opravljeni kotalni razdalji 9,9 km.

Ker izgube mase miniaturnega kotalnega diska D2 med preizkušanjem nismo mogli določiti, sta na slikah 9a in 9b prikazana rezultata izgube mase vzorca apnenca v prvi in drugi stopnji preizkušanja. Skupna izguba mase vzorca apnenca po kotalni razdalji 9,9 km je znašala 7771 mg v prvi in 8152 mg v drugi stopnji preizkušanja. V obeh stopnjah je bila največja izguba mase vzorca apnenca na začetku

preizkušanja (0,99–1,98 km kotalne razdalje), in sicer 1356 mg v prvi in 1228 mg v drugi stopnji. Nato je izguba mase začela upadati in je pri kotalni razdalji 9,9 km znašala 339 mg v prvi in 483 mg v drugi stopnji preizkušanja.



Slika 9: Izguba mase vzorca apnenca (*ΔM*) v odvisnosti od kotalne razdalje (s) v a) prvi in b) drugi stopnji.

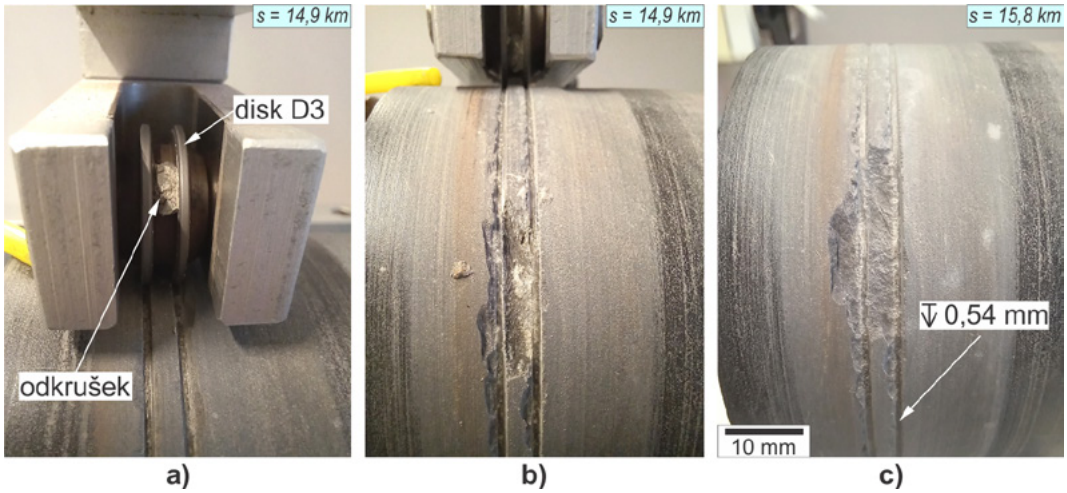
Ob upoštevanju podobne funkcijske zveze kot pri vzorcu peščenjaka (enačba 1) sta bili na podlagi meritev določeni enačbi za izgubo mase apnenca v odvisnosti od kotalne razdalje za prvo (enačba 2) in drugo stopnjo preizkušanja (enačba 3).

$$\Delta M = 1656{,}6 \cdot s^{-0{,}565} \tag{2}$$

$$\Delta M = 1490{,}1 \cdot s^{-0{,}442} \tag{3}$$

3.3 Preizkušanje na vzorcu meljevca

Preizkušanje na vzorcu meljevca z miniaturnim kotalnim diskom D3 smo izvedli v dveh stopnjah. V prvi stopnji sta vzorec kamnine in disk opravila kotalno razdaljo 15,84 km. Med 13,86 km in 14,85 km kotalne razdalje se je z vzorca meljevca odkrušil razmeroma velik delček kamnine, ki je ostal zagozden med konicama diska D3, kot prikazuje slika 10a. Mesto odkruška na vzorcu kamnine je prikazano na sliki 10b. Na istem mestu je nato med nadaljevanjem preizkušanja med 14,85 km in 15,84 km kotalne razdalje prišlo do ponovnega odkruška večjega delca kamnine (slika 10c). Nadaljnje krušenje kamnine je onemogočilo nadaljevanje preizkušanja v prvi stopnji. Vzorec kamnine smo zato zamaknili in preizkušanje nadaljevali na drugem mestu (druga stopnja), kjer sta vzorec kamnine in disk opravila dodatnih 7,92 km kotalne razdalje. Izgubo mase diska D3 smo merili le pri preizkušanju v prvi stopnji. V drugi stopnji preizkušanja zaradi vse izrazitejše adhezije finih delcev razrušene kamnine na disk D3 merjenje izgube njegove mase ni bilo več mogoče.

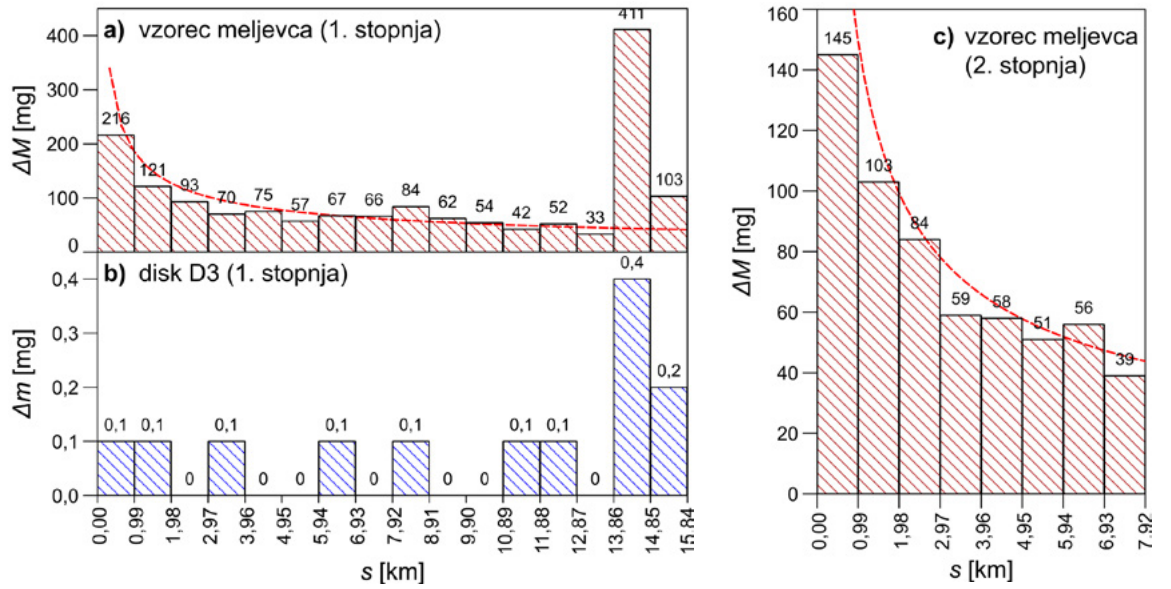


Slika 10: Preizkušanje na vzorcu meljevca. a) Odkrušek kamnine, zagozden med obe konici miniaturnega kotalnega diska D3. b) Položaj odkruška na vzorcu meljevca. c) Dodatno krušenje kamnine.

Izguba mase vzorca meljevca in diska D3 glede na kotalno razdaljo pri preizkušanju v prvi stopnji je prikazana na slikah 11a in 11b. Skupna izguba mase vzorca meljevca po opravljeni kotalni razdalji 15,84 km je znašala 1606 mg. Do kotalne razdalje 13,86 km je bila izguba mase največja na začetku preizkušanja, ko je po prvem kilometru znašala 216 mg/km. Izguba mase je nato postopno upadala in se po približno 3,96 km kotalne razdalje ustalila (slika 11a). Med 13,86 km in 15,84 km smo zaradi večjih odkrušenih delcev kamnine izmerili večja odstopanja v izgubi mase (411 mg/km in 103 mg/km). Povprečna globina utorov je znašala 0,54 mm. Funkcijska zveza med izgubo mase vzorca meljevca in kotalno razdaljo je podana z enačbo 4:

$$\Delta M = 184{,}0 \cdot s^{-0{,}542} \tag{4}$$

Skupna izguba mase diska D3 je po 15,84 km kotalne razdalje znašala 1,3 mg. Izguba mase je bila na splošno zelo majhna in je večinoma znašala med 0 mg/km in 0,1 mg/km. Večje odstopanje v izgubi mase smo izmerili med 13,86 km in 15,84 km kotalne razdalje, ko je prišlo do dveh večjih odkruškov iz vzorca kamnine. Takrat se je način gibanja diska D3 za krajši čas spremenil iz kotaljenja v drsenje, kar je privedlo do relativno velike izgube mase (0,4 mg/km in 0,2 mg/km) v primerjavi z ostalimi meritvami (slika 11b).



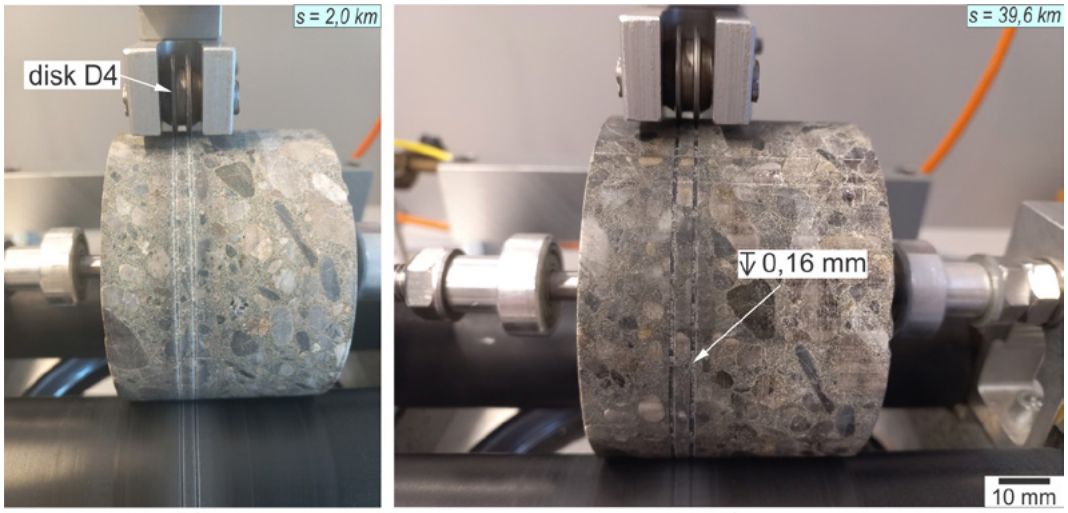
Slika 11: a) Izguba mase vzorca meljevca (*Δm*) in b) izguba mase miniaturnega kotalnega diska D3 (*Δm*) v odvisnosti od kotalne razdalje (s) v prvi stopnji. c) Izguba mase vzorca meljevca v drugi stopnji.

Ker izgube mase miniaturnega kotalnega diska D3 v drugi stopnji preizkušanja nismo mogli določiti, so na sliki 11c prikazani samo rezultati meritev izgube mase vzorca meljevca. Skupna izguba mase vzorca meljevca je v drugi stopnji preizkušanja po opravljeni kotalni razdalji 7,92 km znašala 595 mg, povprečna globina utorov pa 0,30 mm. Izguba mase je bila največja na začetku preizkušanja, ko je znašala 145 mg/km. Nato je postopoma upadala in se po približno 3,96 km kotalne razdalje ustalila. Do konca preizkušanja je znašala med 39 mg/km in 58 mg/km ter sledila enačbi 5:

$$\Delta M = 148{,}5 \cdot s^{-0{,}590} \tag{5}$$

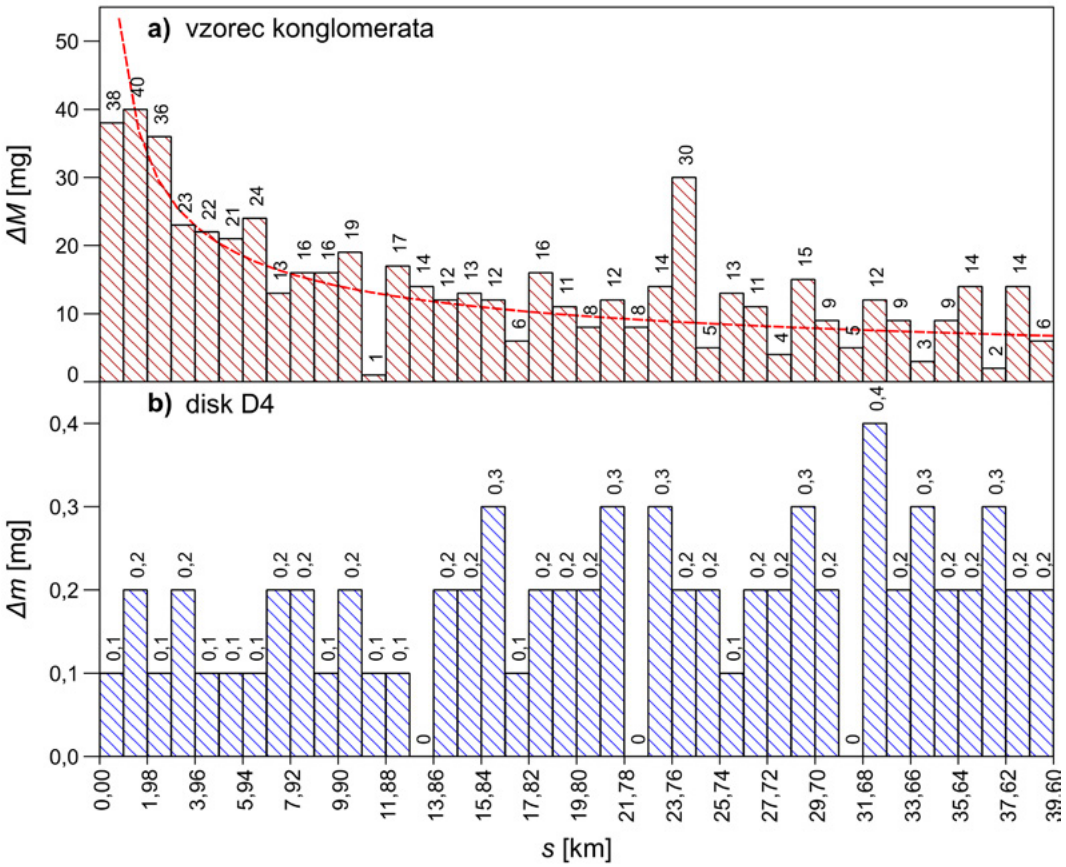
3.4 Preizkušanje na vzorcu konglomerata

Pri preizkušanju na vzorcu konglomerata (skupno 40 ur) sta vzorec kamnine in miniaturni kotalni disk D4 opravila kotalno razdaljo 39,60 km. Vzorec konglomerata na začetku preizkušanja (1,98 km) in na koncu (39,60 km) je prikazan na sliki 12. Iz slike 12b je razvidno, da sta utora na vzorcu kamnine razmeroma plitva v primerjavi z drugimi vzorci, prikazanimi na slikah 5, 7 in 10. Povprečna globina utorov je znašala 0,16 mm. Med preizkušanjem smo opazili, da se je peščeno vezivo med posameznimi prodniki konglomerata obrabljalo precej bolj kot prodniki sami.



Slika 12: Vzorec konglomerata po a) 1,98 km in b) 39,6 km kotalne razdalje.

Izguba mase vzorca konglomerata in diska D4 glede na kotalno razdaljo je prikazana na slikah 13a in 13b. Skupna izguba mase vzorca konglomerata po opravljeni kotalni razdalji 39,60 km je znašala 573 mg. Izguba mase je bila največja na začetku preizkušanja, ko je do kotalne razdalje 2,97 km znašala med 36 mg/km in 40 mg/km. Nato je postopoma upadala in je od kotalne razdalje 12,87 km dalje nihala v razmeroma širokem območju med 2 mg/km in 16 mg/km. Večje odstopanje smo opazili med 10,89 km in 11,88 km kotalne razdalje, ko je izguba mase znašala 1 mg/km, ter med 23,76 km in 24,75 km, ko je znašala 30 mg/km. Razlog za večjo izgubo mase v tem primeru je bil izpad zrna kamnine iz veziva.



Slika 13: a) Izguba mase vzorca konglomerata (ΔM) in b) izguba mase miniaturnega kotalnega diska D4 (Δm) v odvisnosti od kotalne razdalje (s).

Izguba mase vzorca konglomerata v odvisnosti od kotalne razdalje je sledila upadajoči potenčni funkciji z enačbo:

$$\Delta M = 47{,}5 \cdot s^{-0{,}531} \tag{6}$$

Skupna izguba mase diska D4 je po 39,60 km kotalne razdalje znašala 7,2 mg. Od začetka preizkušanja do vključno 12,67 km kotalne razdalje je bila izguba mase diska D4 med 0,1 in 0,2 mg/km. V intervalih 12,87–13,86 km, 21,78–22,77 km in 30,69–31,68 km izgube mase nismo izmerili. Od 13,86 km kotalne razdalje naprej je bila izguba mase nekoliko večja kot prej in je do konca preizkušanja večinoma znašala med 0,2 in 0,3 mg/km. Največja izguba mase je bila v območju 31,68–32,67 km, ko je dosegla 0,4 mg/km (slika 13b).

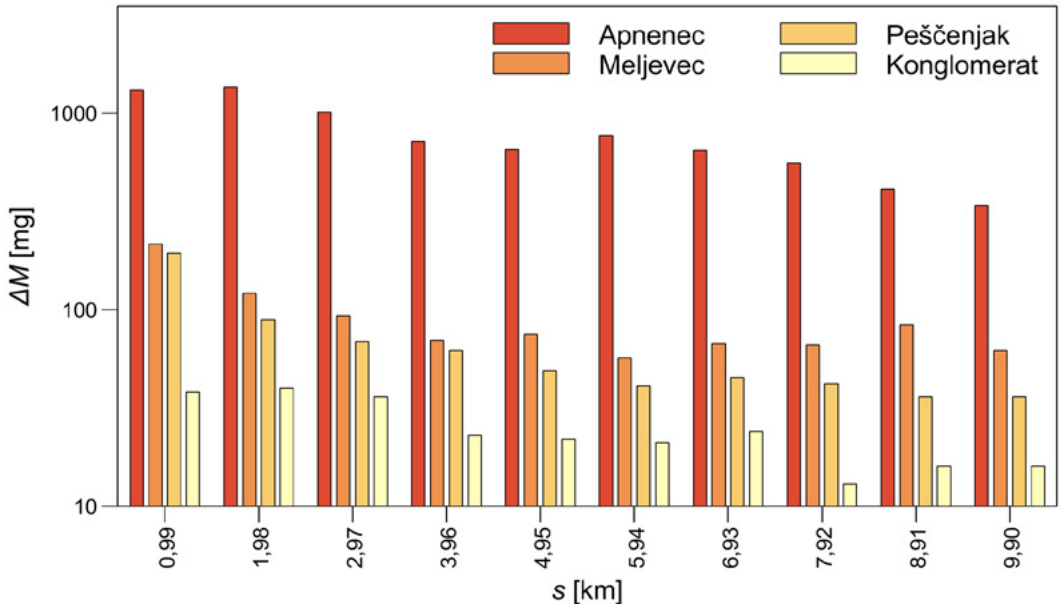
3.5 Primerjava rezultatov izgube mase vzorcev kamnin in miniaturnih kotalnih diskov

Skupne izgube mase vzorcev kamnin in povprečne izgube mase na kilometer kotalne razdalje so prikazane v preglednici 4, poleg tega so predstavljene tudi skupne globine utorov. Največjo povprečno izgubo mase na kilometer kotalne razdalje smo izmerili pri vzorcu apnenca, najmanjšo pa pri vzorcu konglomerata. Skladno s tem smo pri omenjenih vzorcih kamnin izmerili tudi največjo oziroma najmanjšo globino utorov.

Preglednica 4: Izgube mase vzorcev kamnin in globine utorov.

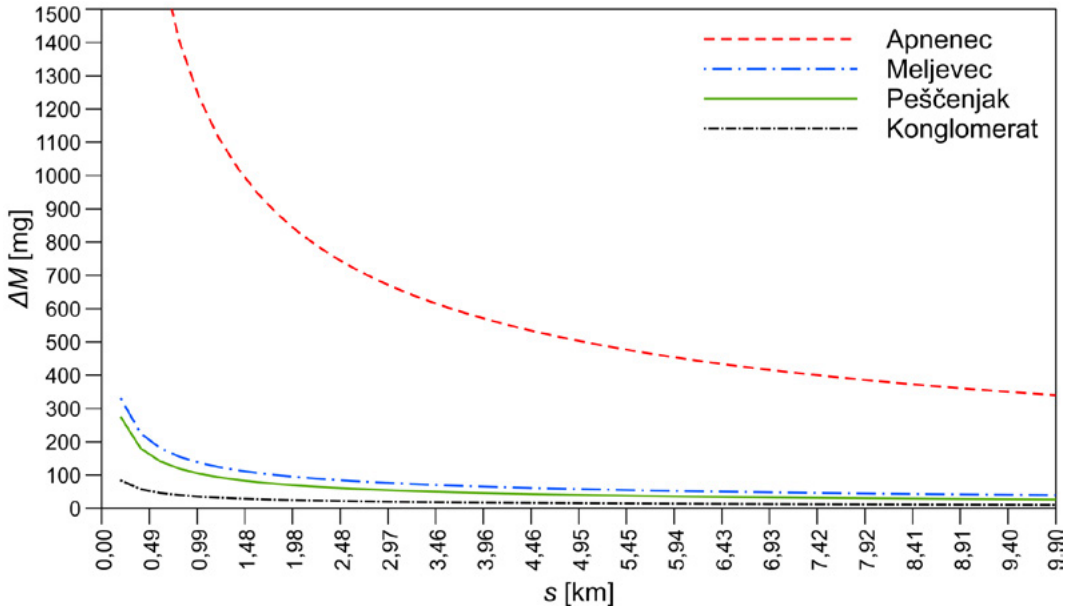
Vzorec kamnine	*Disk*	*Kotalna razdalja*	*Izguba mase*	*Izguba mase/km*	*Globina utorov*
		[km]	[mg]	[mg/km]	[mm]
Peščenjak	D1	26,73	1087	40,67	0,48
Apnenec	D2	19,80	15923	804,19	2,34
Meljevec	D3	23,76	2201	92,63	0,54
Konglomerat	D4	39,60	573	14,47	0,16

Izgube mase vzorcev kamnin po 9,9 km kotalne razdalje so primerjalno prikazane na sliki 14. Podatki za vzorca apnenca in meljevca se nanašajo na preizkušanje v prvi stopnji. Ker je bila izguba mase vzorca apnenca med preizkušanjem relativno velika v primerjavi z ostalimi vzorci kamnin, je navpična os prikazana v logaritemski lestvici. Izguba mase vzorcev kamnin je z naraščanjem kotalne razdalje v vseh primerih od začetne maksimalne vrednosti upadala. Nato se je izguba mase ustalila ali pa je še naprej upadala ter se gibala v določenem intervalu vrednosti brez večjih odstopanj.



Slika 14: Izguba mase vzorcev apnenca, meljevca, peščenjaka in konglomerata (*ΔM*) v odvisnosti od kotalne razdalje (s).

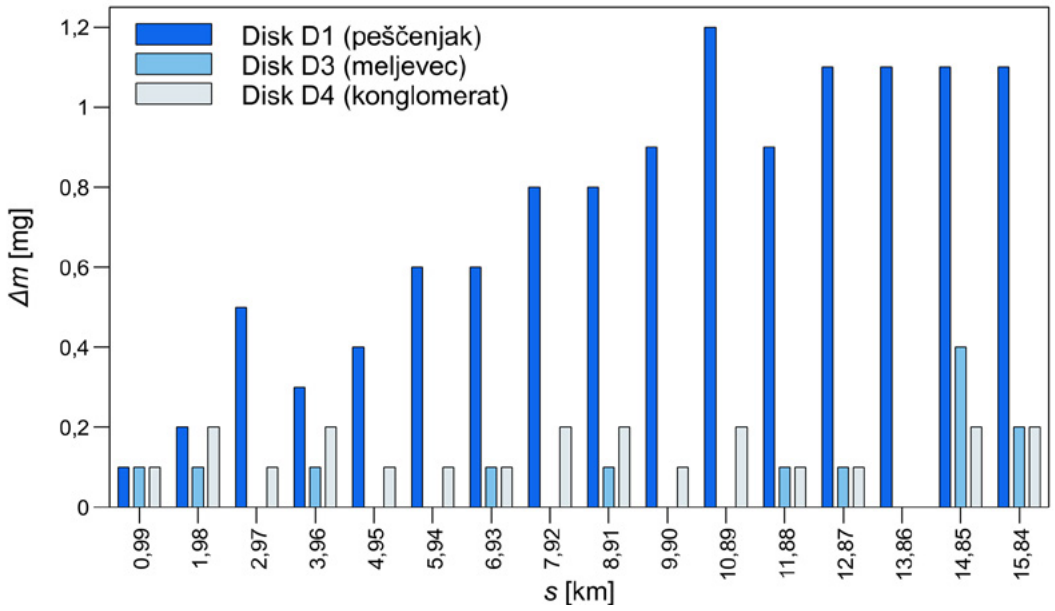
Funkcijska odvisnost, ki prikazuje potenčno upadanje izgube mase posameznih vzorcev kamnin z naraščajočo kotalno razdaljo, je prikazana na sliki 15. Krivulje so izrisane na podlagi enačb 1–6, predstavljenih predhodno pri rezultatih posameznih preizkušanj. Krivulji za vzorca apnenca in meljevca se nanašata na preizkušanje v prvi stopnji.



Slika 15: Krivulje potenčnih funkcij, ki prikazujejo izgubo mase vzorcev kamnin (*ΔM*) v odvisnosti od kotalne razdalje (s).

Povprečna izguba mase miniaturnega kotalnega diska D1 (peščenjak) je znašala 0,88 mg/km, diska D3 (meljevec) 0,08 mg/km in diska D4 (konglomerat) 0,18 mg/km. Povprečne izgube mase na kilometer kotalne razdalje za disk D2 zaradi adhezije finih razrušenih delcev iz vzorca apnenca nismo mogli natančno določiti.

Izgube mase miniaturnih kotalnih diskov D1, D3 in D4 po 15,84 km kotalne razdalje so primerjalno prikazane na sliki 16. V prvih dveh kilometrih kotalne razdalje so bile izgube mase vseh treh diskov razmeroma primerljive. V nadaljevanju preizkušanja pa so bile izgube mase diskov D3 in D4, preizkušanih na vzorcu meljevca oziroma konglomerata, znatno manjše kot pri disku D1, preizkušanem na vzorcu peščenjaka.



Slika 16: Izguba mase miniaturnih kotalnih diskov D1, D3 in D4 (Δm) v odvisnosti od kotalne razdalje (s).

4 DISKUSIJA

Rezultati laboratorijskega preizkušanja procesa rušenja vzorcev kamnin so pokazali, da je bila izguba mase v vseh primerih največja na začetku, nato pa je s povečevanjem kotalne razdalje postopoma upadala in sledila upadajoči potenčni funkciji (slika 15). Začetni maksimum izgube mase je povezan z visokim kontaktnim tlakom med miniaturnim kotalnim diskom in vzorcem kamnine. Ta je bil največji na začetku preizkušanja, ko je bila kontaktna površina najmanjša, kar se je odražalo v najučinkovitejšem rušenju vzorca. S povečevanjem kotalne razdalje se je povečevala tudi globina penetracije diska v vzorec, zaradi česar se je povečala kontaktna površina med diskom in kamnino, kar je posledično privedlo do zmanjšanja kontaktnega tlaka. Rušenje vzorca kamnine je tako s povečevanjem kotalne razdalje postopoma postajalo manj učinkovito kot na začetku preizkušanja, kar se je odražalo v manjši izgubi mase.

Pri preizkušanju procesa rušenja vzorca apnenca se je pokazalo, da je apnenec zelo krušljiv, kar se je odrazilo v najučinkovitejšem rušenju med vsemi preizkušenimi vzorci kamnin. Preizkus je pokazal, da je mogoče tudi v laboratoriju simulirati proces rušenja kamnine, ki ga povzroča delovanje več kotalnih diskov hkrati. Vmesni del kamnine med obema utoroma se je po prvem kilometru kotalne razdalje začel rušiti, po 9,9 km kotalne razdalje pa je bil že popolnoma porušen (slika 7c). V dejanskih razmerah izkopa s strojem TBM do tega pride zaradi delovanja dveh sosednjih kotalnih diskov, ki napredujeta v kamnino do določene globine, nato pa se vmesni del kamnine poruši. Pri laboratorijskem preizkušanju je tak proces mogoče doseči tudi z delovanjem miniaturnega kotalnega diska z dvojnim obročem, kot je bil uporabljen v tej raziskavi. Velika krušljivost apnenca je povezana z njegovo mineraloško sestavo in mikrostrukturo. Vzorec apnenca je bil v celoti zgrajen iz minerala kalcita, ki je relativno mehak.

Raziskava je pokazala, da krušljivost oziroma krhkost vzorca apnenca, ki je bil izpostavljen delovanju miniaturnega kotalnega diska, ni bila neposredno povezana z njegovo enoosno tlačno trdnostjo. Vzorec apnenca je pri rušenju z diskom namreč izkazoval največjo krušljivost (krhkost), čeprav je imel največjo tlačno in natezno trdnost med vsemi vzorci kamnin (preglednica 3). To lahko pomeni, da UCS in BTS pri napovedovanju učinkovitosti izkopavanja s tehnologijo TBM nista zadostna, temveč je treba upoštevati tudi krhkost kamnine, ki pa za zdaj v znanstveni in strokovni literaturi še ni enoznačno opredeljena.

Pri preizkušanju na vzorcu peščenjaka se je izkazalo, da je bila izguba mase miniaturnega kotalnega diska D1 na začetku najmanjša, nato je nekaj časa naraščala, zatem pa je do konca preizkušanja ostala razmeroma konstantna (slika 6b). Tak vzorec obrabe diska smo opazili le pri preizkušanju na vzorcu peščenjaka. Večja globina penetracije diska D1 v vzorec peščenjaka in s tem večja kontaktna površina sta se odrazili v večji izgubi mase diska D1. Podobno je veljalo za disk D4, ki je bil preizkušan na vzorcu konglomerata. Pri preizkušanju na vzorcih apnenca in meljevca, ki sta bila znatno manj abrazivna od vzorcev peščenjaka in konglomerata (preglednica 2), tako izrazite povezave med globino penetracije diska, posledično kontaktno površino in izgubo mase diska nismo zaznali. Rezultati kažejo, da večja globina penetracije diska v vzorec kamnine praviloma ne pomeni večje obrabe diska, temveč je ta izrazitejša predvsem pri abrazivnih kamninah z velikim deležem kremena; v tej raziskavi sta bila to vzorca peščenjaka in konglomerata.

Rezultati nakazujejo, da je z vidika rušenja kamnine in obrabe kotalnega diska pri izkopavanju s tehnologijo TBM v abrazivnih kamninah, kot je na primer peščenjak, optimalno, da je globina penetracije diska v kamnino čim manjša. Kontaktni tlaki so tedaj najvišji zaradi majhne kontaktne površine. To se odraža v učinkovitem rušenju kamnine in majhni abrazivni obrabi, saj je le majhna površina obroča kotalnega diska izpostavljena abrazivnim delcem kamnine z večjo trdoto od jekla. Po drugi strani pa večja penetracija kotalnega diska v kamnino lahko pomeni večje odkruške in s tem večjo učinkovitost rušenja, pri čemer je abrazivna obraba diskov običajno večja. Rezultati meritev izgube mase miniaturnih kotalnih diskov kažejo, da je abrazivnost vzorca kamnine imela večji vpliv na obrabo diskov kot njene trdnostne lastnosti, kot sta UCS in BTS. Pri preizkušanju diska D3 na vzorcu meljevca se je prav tako pokazalo, da drsna oblika gibanja diska povzroča znatno večjo obrabo kot kotaljenje.

Izpostaviti je mogoče, da lastnosti kamnine, kot so enoosna tlačna in natezna trdnost, abrazivnost, mineraloška sestava, velikost zrn ter lastnosti veziva med zrni, skupaj vplivajo na učinkovitost rušenja vzorca kamnine in na obrabo miniaturnih kotalnih diskov pri laboratorijskem preizkušanju. Na podlagi rezultatov te raziskave zato predvidevamo, da je treba pri napovedovanju učinkovitosti izkopavanja s tehnologijo TBM in obrabe kotalnih diskov v dejanskih pogojih hkrati upoštevati čim več lastnosti kamnine.

5 ZAKLJUČEK

Na podlagi laboratorijskega preizkušanja procesa rušenja vzorcev kamnin z uporabo miniaturnih kotalnih diskov ter preizkušanja njihove obrabe izpostavljamo naslednje ključne ugotovitve:

1. Izguba mase vzorca kamnine in s tem učinkovitost rušenja sta bili največji na začetku preizkušanja z laboratorijskim aparatom, nato pa sta z naraščajočo kotalno razdaljo postopno upadali. To je povezano s kontaktnim tlakom med miniaturnim kotalnim diskom in vzorcem kamnine, ki je najvišji na začetku preizkušanja, ko je kontaktna površina najmanjša.
2. V primerjavi z vzorcem apnenca je bila izguba mase vzorca meljevca po kotalni razdalji 9,9 km 8,1-krat, vzorca peščenjaka 11,7-krat in vzorca konglomerata 32,2-krat manjša. Rušenje vzorca apnenca z miniaturnim kotalnim diskom je potekalo najučinkoviteje, čeprav je vzorec izkazoval največjo enoosno tlačno in natezno trdnost v primerjavi z drugimi vzorci kamnin. To nakazuje, da je učinkovitost rušenja kamnine s kotalnim diskom povezana z mikrostrukturo in mineraloško sestavo kamnine ter da sami trdnostni parametri niso zadostni za napovedovanje učinkovitosti izkopa.
3. Večja globina penetracije miniaturnega kotalnega diska v vzorec kamnine in s tem večja kontaktna površina sta se pri kamninah z večjim indeksom abrazivnosti odrazili v večji izgubi mase diska in posledično večji obrabi. Te odvisnosti pri vzorcih kamnin z majhnim indeksom abrazivnosti niso bile zaznane. Neposredne povezave med enoosno tlačno in natezno trdnostjo kamnin ter obrabo diskov ni bilo mogoče ugotoviti.

LITERATURA IN REFERENCE

[1] G. Hu, H. Zhao, J. Fu, J. Xue, Y. Xia, Impact fracture failure analysis and mechanism study of a TBM disc cutter ring, Engineering Failure Analysis 163 (2024) 108508. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108508.

[2] A. Sharafat, K. Latif, J. Seo, Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions, Tunnelling and Underground Space Technology 111 (2021) 103860. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103860.

[3] Y.J. Shin, K. Kwon, A. Bae, H. Choi, D. Kim, Machine learning-based prediction model for disc cutter life in TBM excavation through hard rock formations, Tunnelling and Underground Space Technology 150 (2024) 105826. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105826.

[4] Z. Sun, H. Zhao, K. Hong, K. Chen, J. Zhou, F. Li, B. Zhang, F. Song, Y. Yang, R. He, A practical TBM cutter wear prediction model for disc cutter life and rock wear ability, Tunnelling and Underground Space Technology 85 (2019) 92–99. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.12.010.

[5] H. Wang, M. Zhang, R. Sun, S. Cui, J. Mo, Performance improvement strategy of the TBM disc cutter ring material and evaluation of impact-sliding friction and wear performance, Wear 526–527 (2023) 204943. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204943.

[6] T. Wang, C. Yan, H. Zheng, W. Ke, S. Ali, Optimum spacing and rock breaking efficiency of TBM double disc cutters penetrating in water-soaked mudstone with FDEM, Tunnelling and Underground Space Technology 138 (2023) 105174. https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105174.

[7] Y.L. Zheng, Q.B. Zhang, J. Zhao, Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining, Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016) 287–299. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.023.

[8] Q. Liu, X. Huang, Q. Gong, L. Du, Y. Pan, J. Liu, Application and development of hard rock TBM and its prospect in China, Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016) 33–46. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.034.

[9] W. Li, J. Wang, X. Guo, H. Li, S. Li, X. Li, A new transient electromagnetic prospecting method in TBM tunnel environment, Journal of Applied Geophysics 196 (2022) 104492. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104492.
[10] B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht, Hardrock Tunnel Boring Machines, 1st ed., Wiley, 2008. https://doi.org/10.1002/9783433600122.
[11] M. Entacher, J. Rostami, TBM performance prediction model with a linear base function and adjustment factors obtained from rock cutting and indentation tests, Tunnelling and Underground Space Technology 93 (2019) 103085. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103085.
[12] G. Barzegari, J. Khodayari, J. Rostami, Evaluation of TBM Cutter Wear in Naghadeh Water Conveyance Tunnel and Developing a New Prediction Model, Rock Mech Rock Eng 54 (2021) 6281–6297. https://doi.org/10.1007/s00603-021-02640-7.
[13] X. Shen, X. Chen, Y. Fu, C. Cao, D. Yuan, X. Li, Y. Xiao, Prediction and analysis of slurry shield TBM disc cutter wear and its application in cutter change time, Wear 498–499 (2022) 204314. https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204314.
[14] Q. Liu, J. Liu, Y. Pan, X. Zhang, X. Peng, Q. Gong, L. Du, A Wear Rule and Cutter Life Prediction Model of a 20-in. TBM Cutter for Granite: A Case Study of a Water Conveyance Tunnel in China, Rock Mech Rock Eng 50 (2017) 1303–1320. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1176-4.
[15] L. She, S. Zhang, C. Wang, Y. Li, M. Du, A new method for wear estimation of TBM disc cutter based on energy analysis, Tunnelling and Underground Space Technology 131 (2023) 104840. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104840.
[16] K. Gehring, Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau, Felsbau 13 (1995) 439–448.
[17] L. Ozdemir, Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability, Thesis, Colorado School of Mines, 1977.
[18] J. Rostami, Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure, Thesis, Colorado School of Mines, 1997.
[19] A. Bruland, Hard Rock Tunnel Boring, Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 1998.
[20] R. Gertsch, L. Gertsch, J. Rostami, Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44 (2007) 238–246. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.007.
[21] M.V. Thyagarajan, J. Rostami, Study of cutting forces acting on a disc cutter and impact of variable penetration measured by full scale linear cutting tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 175 (2024) 105675. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105675.
[22] F.J. Macias, F. Dahl, A. Bruland, New Rock Abrasivity Test Method for Tool Life Assessments on Hard Rock Tunnel Boring: The Rolling Indentation Abrasion Test (RIAT), Rock Mech Rock Eng 49 (2016) 1679–1693. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0854-3.
[23] L. Lin, Y. Xia, Q. Mao, X. Zhang, Experimental study on wear behaviors of TBM disc cutter ring in hard rock conditions, Tribology Transactions 61 (2018) 920–929. https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1442895.
[24] X. Zhang, L. Lin, Y. Xia, Q. Tan, Z. Zhu, Q. Mao, M. Zhou, Experimental study on wear of TBM disc cutter rings with different kinds of hardness, Tunnelling and Underground Space Technology 82 (2018) 346–357. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.050.
[25] Z. Zhang, K. Zhang, W. Dong, Experimental investigation on the influence factors on TBM cutter wear based on composite abrasion test, Rock Mech Rock Eng 54 (2021) 6533–6547. https://doi.org/10.1007/s00603-021-02621-w.

[26] H. Chakeri, M. Darbor, H. Shakeri, H. Mousapour, V. Mohajeri, Experimental and numerical investigation of the TBM disc cutter wear using a new tunnel boring machine laboratory simulator, Heliyon 10 (2024) e37148. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37148.

[27] M. Alber, O. Yaralı, F. Dahl, A. Bruland, H. Käsling, T.N. Michalakopoulos, M. Cardu, P. Hagan, H. Aydın, A. Özarslan, ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test, Rock Mech Rock Eng 47 (2014) 261–266. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0518-0.



ANDREJ LOČNIŠKAR

Andrej Ločniškar, univ. dipl. inž. geologije, je svojo več kot štiridesetletno poklicno pot posvetil inženirski geologiji, geotehniki pri gradnji zahtevnih infrastrukturnih projektov. Po začetnem delu na Geološkem zavodu na področju hidrogeologije in geotermije je leta 1985 sodeloval pri geološki in hidrogeološki spremljavi gradnje zahodne cevi predora Karavanke, nato pa svojo strokovno pot nadaljeval v Cestnem inženiringu, poznejšem DDC in današnjem DRI upravljanje investicij.

Kot vodja področja geotehnike in zemeljskih del je pomembno sodeloval pri Nacionalnem programu izgradnje avtocest ter pri pripravi, gradnji in spremljanju številnih cestnih, železniških in komunalnih infrastrukturnih projektih. Med njegove pomembnejše reference sodijo obe cevi predora Karavanke, drugi tir Divača–Koper ter drugi železniški projekti, tretja razvojna os, projekti RCERO, ARAO ter sanacije velikih plazov.

Celoten del njegovega strokovnega delovanja je bil namenjen razvoju in povezovanju geotehnične stroke. Vodil je Komisijo za zemeljska dela in Komisijo za odvodnjo, bil član in sekretar Geološko-geotehničnega konzilija ter več kot dve desetletji član Geotehničnega sveta za predore. Sodeloval je pri revizijah projektne dokumentacije, pripravi tehničnih specifikacij ter pri vzpostavljanju sistematičnega strokovnega dialoga med raziskovalci, projektanti, nadzorom in izvajalci.

Dolgoletno je dejaven tudi v strokovnih organizacijah. V obdobju 2004–2008 je bil predsednik Sekcije za inženirsko geologijo SloGeD, ter v obdobju 2022–2026 član nadzornega sveta SloGeD. leta 2022 pa mu je Skupščina društva podelila naziv častnega člana SloGeD. Dejaven je bil tudi v okviru Inženirske zbornice Slovenije ter je avtor številnih strokovnih člankov in prispevkov.

Njegova strokovna pot na poseben način odraža razvoj in »rast« slovenske geotehnike ob velikih infrastrukturnih projektih. Prav te izkušnje in zgodbe iz več desetletij dela bo predstavil tudi na jubilejnem, 25. Šukljetovem dnevu.

Andrej LOČNIŠKAR

GEOTEHNIKA PRI VELIKIH INFRASTRUKTURNIH PROJEKTIH V RS

Povzetek

Prispevek obravnava razvoj slovenske geotehnike v obdobju velikih nacionalnih infrastrukturnih projektov med letoma 1991 in 2024. Na podlagi izbranih primerov iz avtocestnega (NPIAC), komunalnega in železniškega gradbeništva so analizirani vzroki za odstopanja med predvidenimi in dejanskimi geotehničnimi razmerami ter njihove tehnične, časovne in finančne posledice. Analiza kaže, da so pravočasne in strokovno ustrezne geološko-geotehnične, hidrogeološke in krasoslovne raziskave odločilne za zanesljivost projektnih rešitev, njihova pomanjkljivost ali neupoštevanje v projektni dokumentaciji pa je pogost vzrok za tako imenovana »geotehnična presenečenja«, podaljšanje rokov in podražitve. Predstavljeni so tudi organizacijski ukrepi, ki so prispevali k dvigu kakovosti: recenzijske in revizijske komisije, geološko-geomehanski konzilij, geotehnični svet za predore in sistem kontrole kakovosti gradnje. Sklepne ugotovitve poudarjajo, da so spremembe v gradbeništvu pravilo in ne izjema, da zahtevne razmere terjajo ustrezen čas in sredstva za raziskave ter enakopravno sodelovanje vseh vključenih strok.

Ključne besede:
geotehnika, geološko-geotehnične raziskave, geološko-geotehnično presenečanje, nacionalni program izgradnje avtocest (NPIAC), železniška infrastruktura, predorogradnja, plazenje, hidrogeologija, kras.

GEOTECHNICAL ENGINEERING IN MAJOR INFRASTRUCTURE PROJECTS IN SLOVENIA

Abstract

This paper examines the development of Slovenian geotechnics during the era of major national infrastructure projects between 1991 and 2024. Drawing on selected cases from motorway (NPIAC), municipal and railway construction, it analyses the causes of discrepancies between anticipated and actual geotechnical conditions, together with their technical, schedule-related and financial consequences. The analysis shows that timely and professionally sound geological-geotechnical, hydrogeological and karstological investigations are decisive for the reliability of design solutions, whereas their inadequacy or their disregard in the design documentation is a frequent cause of so-called "geotechnical surprises", schedule extensions and cost overruns. The paper also presents the organisational measures that contributed to raising quality: review and audit committees, the geological-geomechanical council, the geotechnical council for tunnels, and the construction quality-control system. The concluding findings emphasise that changes are the rule rather than the exception in construction, and that demanding conditions require adequate time and resources for investigation as well as the equal collaboration of all disciplines involved.

Keywords:
geotechnics, geological-geotechnical investigations, geological-geotechnical surprise, national motorway construction programme (NPIAC), railway infrastructure, tunnelling, land sliding, hydrogeology, karst.

1 UVOD

Presenečen in hkrati počaščen sem bil, da so me organizatorji Šukljetovih dni kot upokojenega geologa povabili, da na posvetu z udeleženci delim nekatere izkušnje pri razvoju slovenske geotehnike, ki sem ji bil priča v obdobju velikih nacionalnih projektov.

Imel sem izjemen privilegij, da sem v obdobju službovanja na DRI (1991–2024) sodeloval pri številnih velikih infrastrukturnih projektih. Največji in časovno najdaljši je bil Nacionalni program izgradnje avtocest (NPIAC), ki se je začel leta 1994 in se s krajšimi prekinitvami izvaja še dandanes. Projekt je pomembno vplival na razvoj geotehnike v Sloveniji, zato bo temu obdobju namenjen največji del prispevka. Leta 2010 je gradbeništvo zašlo v daljšo krizo, zato smo morali na DRI poiskati nove izzive, ki so se pokazali v gradnji in nadgradnji komunalne infrastrukture, financirane večinoma z denarjem Evropske unije. Poleg številnih lokalnih čistilnih naprav in izkopov za komunalne cevovode je bil večji projekt Regijski center za ravnanje z odpadki (RCERO). Ker regionalni center stoji na Barju, je bila vloga geotehnikov pri načrtovanju in gradnji zelo pomembna. Leta 2011 je DRI kot organizator prevzel glavno vlogo pri nadgradnji in novogradnji železniške infrastrukture v Sloveniji. Nadgradnja železniške proge Pragersko–Hodoš je bila prvi večji projekt, pri katerem smo geotehnične izkušnje s cest prenesli na področje železnic. Prav gotovo je najpomembnejši železniški projekt izgradnja drugega tira med Koprom in Divačo. Priprava projektne dokumentacije je skupaj z umeščanjem v prostor

zaradi nasprotovanja dela politike trajala osem let. Tako smo imeli dovolj časa za izvedbo osnovnih, glavnih in dopolnilnih raziskav, ki so trajale vse do leta 2020. Poleg geotehničnih pogojev za gradnjo številnih predorov in viaduktov so hidrogeološke raziskave podale izhodišča, ki jih na začetku projekta nismo pričakovali. Pomembno vlogo pri projektu so zaradi izrazito kraškega terena imeli strokovnjaki s področja krasoslovja. Poleg številnih napovedanih kraških pojavov so se pri gradnji pojavila tudi presenečenja v obliki manjših kraških jam. Nekaj znanja slovenskih geotehnikov je bilo treba prenesti tudi na projekte večjih objektov, kot so športni center Stožice, garažna hiša pod Kongresnim trgom, dograditev bolnišnice v Celju in številni drugi.

V nadaljevanju bom opisal nekatere pomembne dogodke, ki so vplivali na razumevanje pomena pravočasnih in strokovno ustreznih geotehničnih raziskav. V nekaterih primerih bom predstavil pomanjkljivosti, napake in tudi dobre prakse, ki so se pri omenjenih nacionalnih projektih zgodile. Posamezen primer bom zaključil z ugotovitvijo, ki predstavlja mnenje avtorja o vzrokih za nastalo stanje in je seveda subjektivna.

Prispevek sem pisal po spominu, brez vpogleda v elaborate in posamezne podrobne podatke. Ocene razmer in stanja, ki sem jih zapisal, predstavljajo moje osebno mnenje, ki pa pogosto ni daleč od resnice. V okviru izraza geotehnika pojmujem številne geoznanosti, kot so splošna, inženirska in hidrogeologija, geomehanika in geostatika, uporabna geodezija, geomorfologija, geofizika in še nekatere druge. Na svoji dolgi službeni poti kot Inženir oziroma nadzornik sem imel priložnost spoznati izjemno veliko strokovno vrhunskih in dobrih ljudi, ki so pomembno vplivali na moje delo. Vsekakor je prof. dr. Bojan Majes — zadnji doktorand akademika prof. dr. Šukljeta in njegov dolgoletni asistent ter izjemen skrbnik tudi v jeseni Šukljetovega življenja — tisti, ki ga bom največkrat omenil. Na Oddelku za geotehniko DRI nam je bilo z Igorjem Ajdičem in Suzano Svetličič mnogo lažje obvladovati zadolžitve, saj smo imeli na Katedri za mehaniko tal (FGG) stalno in nesebično pomoč. Zahvala gre poleg prof. dr. Majesa tudi prof. dr. Logarju, prof. dr. Pulku ter prof. dr. Ani Petkovšek. Številne geotehnične izzive so pri večjih nacionalnih projektih reševali tudi strokovnjaki mariborske fakultete za gradbeništvo, med katerimi naj omenim prof. dr. Škrabla in doc. dr. Macuha.

V prispevku pri posameznih večjih projektih podajam nekaj splošnih informacij in primere, ki sem jih ocenil kot geotehnično najbolj povedne. Primerom sem dodal svoje mnenje oz. ugotovitve o napakah, ki smo jih pri posameznem primeru storili.

2 NPIAC – NACIONALNI PROGRAM IZGRADNJE AVTOCEST V REPUBLIKI SLOVENIJI

Če začnemo z rojstvom naše države Slovenije, ne moremo mimo Nacionalnega programa izgradnje avtocest oziroma skrajšano NPIAC. To je bilo obdobje, ko smo morali sebi in svetu dokazati, da smo sposobni modernizirati svojo deželo. Ker so gradbeni posegi najhitreje opazni, je bil omenjeni projekt pravi pokazatelj naše nove državnosti. Za vodenje tega projekta je vlada RS ustanovila DARS, ki je takrat štel nekaj deset ljudi, vodil pa ga je g. Jože Brodnik, nekdanji vodja projektov SCT v tujini. Za organiziranje priprave projektne dokumentacije in nadzor pri gradnji je bila imenovana takratna Družba za državne ceste (DDC), pri kateri sem bil zaposlen tudi jaz. Ker je bil na ravni vlade sprejet načrt, da se v petih letih zgradi 342 km avtocest v prednostni smeri vzhod–zahod, je bilo temu primerno tudi načrtovanje.

Na krilih predhodno pripravljene projektne dokumentacije in izjemne javne podpore projektu (s programom NPIAC se je strinjalo oz. zelo strinjalo več kot 80 % vprašanih) je bilo prvo leto zgrajenih oz. v gradnji 130 km avtocest. Poleg težav pri umeščanju avtocest v prostor in posledičnih zastojev

pri projektiranju je postajal vse bolj očiten odnos Slovencev do lastnine: »Smo za, samo ne na mojem dvorišču.« Pojavljati so se začele tudi težave pri gradnji zaradi nepopolne projektne dokumentacije in nezadostnih geološko-geotehničnih raziskav.

Kmalu se je pokazalo, da tako ambicioznega projekta ne bo mogoče izvesti v predvidenih rokih in z izjemno nizko ocenjeno finančno vrednostjo, zato so bili potrebni rebalansi načrtov in finančni aneksi, ki so dobili vsaj začasno legitimiteto v tako imenovanih »geoloških presenečenjih«. Za obvladovanje razmer in izboljšanje kakovosti projektne dokumentacije je DARS ustanovil »recenzijsko in kasneje tudi revizijsko komisijo«, ki naj bi ob skrbnem pregledu izločila projektne napake in pomanjkljivosti. Geološki in geotehnični del projektne dokumentacije je recenzirala skupina geotehničnih strokovnjakov ljubljanske in mariborske fakultete za gradbeništvo.

Za reševanje težav na terenu je DARS ustanovil »Geološko-geomehanski konzilij«, ki ga je vodil prof. dr. Majes. Članstvo v konziliju (prof. Škrabl, prof. Likar, prof. Logar, prof. Pržulj, prof. A. Petkovšek, prof. Ribičič, prof. Brenčič, g. Špacapan, g. Kočevar …) kaže na strokovno obvladovanje širokega področja geoznanosti. Konzilij je aktivno sodeloval pri reševanju največjih geotehničnih izzivov, kot so HC preko Rebrnic, AC preko Trojan, AC na območju Dragučove pri Mariboru, območje predora Golovec in številni drugi.

Za reševanje najtežjih izzivov v predorogradnji je podobno nalogo opravljal »Geotehnični svet za predore«, ki ga je vodil prof. dr. Janez Žmavc, sodelovali pa so tudi nekateri tuji strokovnjaki s področja predorogradnje (dr. Langof, dr. Lokin, prof. dr. W. Schubert …). Ustanovljen je bil že leta 1986 za potrebe strokovnega svetovanja pri gradnji zahodne cevi predora Karavanke, kasneje pa pri gradnji predorov Trojane, Šentvid in Markovec pri Kopru.

Za tehnično ustreznost gradnje je DARS vzpostavil tako imenovano »zunanjo (investitorjevo) kontrolo kakovosti gradnje«. Izvajalci so morali primernost uporabljenih materialov in kakovost izvedbe dokazati s svojo tako imenovano »notranjo kontrolo kakovosti«. Tako je bil vzpostavljen sistem dvojne kontrole, ki je omogočal, da se neustrezne materiale pravočasno izloči in prepreči slabo izvedbo gradbenih del. Kontrola je posegala na zemeljska, betonska, hidroizolacijska, asfalterska in številna druga gradbena dela.

Za pripravo in dopolnitev tehnične regulative ter za uveljavitev evropske gradbene zakonodaje, ki smo jo nenadzorovano sprejemali po metodi »prevoda platnice«, je DARS prek DRI ustanovil številne »tehnične komisije za pripravo tehnične regulative«. Tako so leta 1996 začele delovati »komisije za zemeljska dela«, za betone in za asfalte. Člani posameznih komisij so bili iz vrst Zavoda za gradbeništvo, predstavniki posameznih izvajalcev in predstavniki Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Komisije so vodili zaposleni na DRI. Številni člani so kasneje delovali tudi v tehničnih odborih za pripravo tehničnih specifikacij za prometno infrastrukturo (TSPI).

Neprecenljiva je bila vloga DARS na razvojno-raziskovalnem področju, saj je v finančno ugodnem obdobju razpisal številne raziskovalne naloge na področjih, ki so jih geotehniki in strokovnjaki z drugih področij ocenili kot tehnično pomanjkljiva. Z razvojno-raziskovalno dejavnostjo smo v slovenski gradbeni praksi dosegli zavidljiv razvoj na nekaterih področjih, kot so: trajna prednapeta in pasivna geotehnična sidra; asfaltni materiali in njihova vgradnja; optimalna priprava cementnih stabilizacij; pestrost materialov za nevezane nosilne plasti v R Sloveniji; zaščitni sistemi za varovanje pred kamnitimi podori in snežnimi plazovi ter številna druga področja.

V nadaljevanju so opisani primeri, ki so bili poimenovani kot »geotehnično presenečenje«, čeprav to običajno niso bili in so pogosto služili kot opravičilo za podaljšanje roka in pridobitev dodatnih finančnih sredstev.

2.1 Primer – AC odsek Šentilj-Pesnica

Avtocestni odsek Šentilj–Pesnica (1994) poteka po precej zamočvirjeni dolini, zapolnjeni s slabo nosilnimi usedlinami Dobrenjskega potoka, ki je desni pritok reke Pesnice. Geološko-geotehnično je bil sicer ustrezno obdelan, vendar rezultati v projektni dokumentaciji niso bili dovolj dobro upoštevani. Projektanti so namreč v obdobju pred NPIAC od geotehnikov pogosto zahtevali le podatke o globini temeljnih tal, njihovi nosilnosti ter geometriji (naklonih) vkopnih in nasipnih brežin. Geološko-geotehnično poročilo je bilo zgolj priloga projekta.

Neposredno po začetku gradnje so zaradi številnih geotehničnih težav gradnjo ustavili, projektanti pa so ob obilni pomoči že omenjenega prof. dr. Majesa in prof. dr. Škrabla pomembno spremenili nekatere projektne rešitve. Avtocesta je bila zgrajena ob spremembi nivelete, izboljšanju temeljnih tal, zamenjavi nasipa z viaduktom in z inovativno rešitvijo prof. dr. Majesa, ki je stabilnost več kot 10 m visokega nasipa reševal z globinskim vzdolžnim in prečnim dreniranjem.

Ugotovitev: Projektne skupine, ki so za posamezen avtocestni odsek sestavljene iz strokovnjakov številnih strokovnih področij, morajo biti usklajene in predvsem enakopravne. Odnos med odgovornim projektantom in posameznimi projektanti, med katere so sodili tudi geologi in geotehniki, se je počasi spreminjal in v nadaljevanju NPIAC postal neposreden in celo partnerski.

2.2 Primer – HC Razdrto – Vipava

Odsek HC preko Rebrnic je bil več kot 10 let umeščan v morfološko in geotehnično zahteven prostor. Poleg omenjenih izzivov so bili ostri pogoji postavljeni tudi zaradi ohranitve dveh pomembnih vodnih zajetij (Sušet in Šumljak), ki sta zaradi svoje ugodne lege (gravitacijski zajetji) izjemno pomembni za celotno Vipavsko dolino. Od leta 1989 pa vse do leta 2002, ko se je gradnja začela, je bilo na ravni idejnega projekta preverjenih več kot pet različic (PNZ, inž. Potočnik). Kolega Igor Špacapan je v prvih letih vodil geološko-geotehnične raziskave za vse variante idejnega projekta. Začetki raziskav so temeljili predvsem na terenskem kartiranju in plitvih vrtinah ter nekaj sondažnih izkopih. S širjenjem in poglabljanjem raziskav smo ugotovili, da so geotehnični pogoji za gradnjo odseka HC še bolj zahtevni, kot je bilo pri predhodnih različicah pričakovano. Da je sodelovanje širše geološke stroke dobrodošlo, je potrdila ugotovitev sedimentologov, da je območje Rebrnic velika strukturna anomalija v obliki flišne gube. Ta presenetljiva ugotovitev je razmeroma lahko razložljiva, saj je hrib Nanos, ki je v geološki zgodovini »pripotoval« iz severne smeri, pred seboj deformiral mehkejšo flišno podlago v ugotovljeno obliko gube. Te ugotovitve so bile znak, da raziskave do globine 15 m ne zadoščajo. Kasneje izvedene globlje vrtine, opremljene z inklinometri, so pokazale, da imamo na območju Rebrnic dva nivoja plazenja. V zgornjem nivoju, ki je na globini okoli 10 m, so letni premiki centimetrskih vrednosti, v spodnjem nivoju na globini okoli 40 m pa so premiki bistveno manjši (1–2 mm/leto). Pred gradnjo se je vsa slovenska geotehnična stroka (GGK) skupaj z naročnikom in projektanti odločila, da zgornji nivo plazenja aktivno stabilizira, spodnjega nivoja pa tehnično nismo sposobni obvladati, zato se mu bo treba prilagoditi. Izjemne in delno tudi inovativne geotehnične rešitve so plod sodelovanja strokovnjakov slovenske geotehnike pod vodstvom ljubljanske (prof. dr. Logar) in mariborske (prof. dr. Škrabl) fakultete za gradbeništvo. Ta primer je trden dokaz, da je treba zahtevne geotehnične pogoje najprej prepoznati, nato pa jim nameniti dovolj časa in denarja, da jih ob sodelovanju strokovnjakov različnih področij geotehnike natančno opredelimo. Da je območje Rebrnic geotehnično zelo zahtevno, se je pokazalo tudi med gradnjo, saj smo kljub dobremu poznavanju razmer z manjšim posegom v okviru zemeljskih del povzročili plaz precejšnjih dimenzij (plaz »stranski odvzem«), ki ga je bilo treba pred dokončno umestitvijo HC sanirati z obsežnimi podpornimi ukrepi. Na 10 km dolgem odseku je šest viaduktov, dva pokrita vkopa in dva predora. Večina vkopnih brežin je ojačana s številnimi opornimi zidovi, AB piloti in AB vodnjaki. V okviru spremljanja stanja avtocest in hitrih cest je območju Rebrnic namenjena največja pozornost.

Ugotovitev: Navkljub sistematičnim in večletnim geološko geotehničnim raziskavam v izjemno zahtevnih geotehničnih pogojih, projektne rešitve in gradbeni posegi ne zagotavljajo trajnih rešitev. Ob rednem vzdrževanju in stalnem geotehničnem opazovanju smo primorani izvajati obnovitvena dela, ki jih je treba vključiti v investicijski plan. Takim območjem se je preprosto treba izogniti, saj obnove predstavljajo visoke stroške in druge neželene posledice. V letih 2025 in 2026 so prva obnovitvena dela na tem odseku povzročila prometni kolaps.

2.3 Primer – Oporna konstrukcija OZ5

Projekt AC Slivnica–Pesnica oz. Drava–Pesnica je podjetje BPI iz Maribora pripravljalo v letih 2001–2003. To je obdobje, ko sta bila projektant in geotehnik v neposredni povezavi in so bile posamezne rešitve medsebojno usklajene. Še več, projektant je geotehnikom predal niveleto trase, geotehniki pa so na podlagi geološko-geotehničnih in hidrogeoloških raziskav, ki so podale lastnosti hribine in zemljin ter nivoje podzemne vode, predlagali najprimernejše rešitve glede geometrije vkopov in nasipov ter potrebnih podpornih in opornih konstrukcij. Predlog posameznih geotehničnih objektov so predhodno potrdili recenzenti (prof. dr. B. Majes, prof. dr. Logar, prof. dr. Škrabl, prof. dr. A, Petkovšek …). Za obravnavani odsek na območju razcepa Dragučova je bil na podlagi predloga recenzenta prof. dr. Majesa predlagan potek trase s predorom oziroma galerijo Dragučova. Strokovnjaki s področja prometne varnosti so predlagano rešitev zavrnili z utemeljitvijo: »Voznik se v predoru ne more odločati, ali bo šel v Kijev (proti Murski Soboti) ali v Barcelono (proti Šentilju).« Zaradi banalnosti razloga mi je ta ostal v spominu. Geotehniki so morali slediti zahtevam prometnikov in namesto predora izdelati načrt globokega vkopa s petimi bermami, ki so s površinskim in globinskim odvodnjavanjem preprečevale zamakanje. Kot oporni elementi so služili sidrani prefabricirani AB slopi. Zapolnitev med slopi tvorijo težki AB plohi, ki kot korita omogočajo ozelenitev konstrukcije. Geološko vkopno brežino predstavlja trd siv miocenski peščeni lapor z manjšimi polami vodonosnega peska. Lapor je bil v sušnem vremenu zelo trd in ga je bilo treba kopati z najtežjo gradbeno mehanizacijo. Ko se je začelo deževno obdobje, se je lapor spremenil v lahko gnetno peščeno glino, ki je onemogočala kakršen koli transport po tako spremenjeni podlagi. Na objektu, ki smo ga poimenovali OZ5, so bile zaradi težav že med gradnjo dodatno vgrajene AB vzdolžne grede, sidrane s trajnimi prednapetimi geotehničnimi (TPG) sidri. Ob zaključku gradnje je bilo v AB slope in AB grede vgrajeno več kot 800 sider TPG, dolgih od 18 do 25 m. Vzpostavljen je bil geotehnični monitoring z meritvami sidrnih sil na nekaterih merskih sidrih ter meritvami v inklinometrih in piezometrih. Objekt je bil tudi natančno geodetsko posnet.

Kmalu po otvoritvi avtocestnega odseka leta 2009 so se na cestišču na območju vkopa Dragučova pojavile neravnine v obliki grbin, ki so sledile usmerjenosti plastovitosti laporne podlage. Redno geotehnično opazovanje je v tem obdobju zaznalo precejšnje pomike, ki so bili evidentirani tako v inklinometrih in geodetskih izmerah kot tudi v povečanju sidrnih sil na posameznih sidrih. Ker se pomiki in sidrne sile niso umirili, obenem pa se je sanirana površina vozišča ponovno nagubala, je leta 2018 izvajalec (SCT v stečaju) v okviru garancije za dobro izvedbo del izvedel sanacijo vseh sidrnih pokrovov, odvodnega sistema in voziščne konstrukcije ter vgradil tudi nekaj novih, 40 m dolgih geotehničnih sider na mestih, ki so bila za to predvidena že v projektu.

Omenjeno seveda ni ustavilo degradacije hribine v zaledju, zato je bilo ob rednem geotehničnem opazovanju zaznati, da se kljub sanaciji geotehnične razmere hribine spreminjajo, objekt pa prehaja v območje mejnega stanja nosilnosti in uporabnosti. Skrb vzbujajoča je bila popolna odpoved nekaterih sider ter povečanje sidrne sile v dodatnih, 40 m dolgih sidrih, vgrajenih v spodnji del konstrukcije. Za razumevanje stanja zaledne hribine ter za nadomestitev prestriženih inklinometrov so bile leta 2022 izvedene dodatne geotehnične raziskave, ki so omogočile dodatne geostatične in numerične analize. Odgovorni projektant je skupaj s številnimi strokovnjaki geotehnične stroke ocenil, da je trenutno

stanje objekta stabilnostno problematično, in svetoval investitorju DARS, naj naroči projekt popolne sanacije objekta in sanacijo v najkrajšem možnem času tudi izvede. Druga sanacija, ki je vsebovala vgradnjo dodatnih 350 sider TPG dolžine 45 m, je bila izvedena leta 2024.

Ugotovitev: Vkop v razcepu Dragučova je v zadnjih 20 letih predstavljal enega najtežje obvladljivih geotehničnih objektov in kaže na pravilnost osnovnega predloga geotehnikov z dr. Majesom na čelu, da se na tem mestu zgradi galerija. Morda se bo to v prihodnje tudi zgodilo.

2.4 Primer – Predor Šentvid

Za enega večjih izzivov v okviru NPIAC sem ocenil gradnjo tripasovnega predora Šentvid s priključnima predoroma na Celovško cesto oziroma z nje v glavni predor. Gre za predor, geološko zgrajen v permo-karbonskih klastitih, s katerimi smo se srečali že pri predorih Karavanke, Golovec in Trojane. Ker izkušnje pri omenjenih predorih niso bile najboljše — v skrilavi permokarbonski hribini smo imeli izjemno velike deformacije in tudi porušitve do površine — je bil del geotehnične stroke zadržan do predloga projektanta (ELEA iC), da priključitev Celovške ceste izvedemo kar v predoru. Ker bi bil od točke priključka naprej predor tripasoven, bi izkopi v nekaterih profilih priključevanja znašali več kot 400 m² (kaverne). To so prostornine, ki v močno deformabilnih hribinah predstavljajo zelo velik geotehnološki izziv.

Pomembno dejstvo je, da je bil del dvopasovnega predora oz. pokritega vkopa Šentvid iz smeri Gorenjske proti Ljubljani (območje pod šolo in železnico do Celovške ceste) delno že zgrajen davnega leta 1985, ko se je gradila gorenjska avtocesta Naklo–Ljubljana. Geološko-geotehnične raziskave (ZAG), ki so od leta 2000 potekale v več fazah, so v hribu Šentvid zaznale narivno luskasto zgradbo močno pregnetenih permokarbonskih klastitov. Nekatera območja gradijo bolj kompaktni meljevci in peščenjaki, večino pa litološko zastopajo glinovci in muljevci. Izjemno dobra ideja — da se pred odločitvijo o omenjenem priključku na predlaganih lokacijah izvedeta dva raziskovalna rova preseka okoli 15 m² ter se v njiju natančno opredelijo geološka sestava in na podlagi meritev, geotehnične pogoje gradnje — je natančno določila lokacije z ugodnejšimi geološko-geotehničnimi pogoji in potrdila predlog projektanta za izvedbo priključnih kavern. Ob sodelovanju Geotehničnega sveta za predore, geologov in geotehnikov (FGG in IRGO) je bil tripasovni predor Šentvid s priključki Celovške ceste uspešno izveden leta 2008 (SCT). Nezaslužen madež sta predoru pustila razmeroma nepomemben okrušek protipožarne obloge ter dolgotrajno sojenje o upravičenosti sicer številnih in finančno visokih aneksov, ki jih je družba DARS potrdila izvajalcu SCT.

Ugotovitev: Drzne projektne rešitve zahtevajo zelo natančno poznavanje geotehničnih razmer, zato sta potrebna čas in seveda ustrezna finančna podpora. Pri predoru Šentvid se je sodelovanje številnih, tudi avstrijskih strokovnjakov s področja predorogradnje izkazalo za ključno.

2.5 Primer – oporne konstrukcije na AC pri Blagovici

Avtocestni odsek od Lukovice do Blagovice poteka po južnih obronkih razmeroma ozke doline Črnega grabna. Naravne brežine, ki so večinoma blage, strmejše pa pogozdene, kažejo na precej neugodno geološko sestavo in geotehnične lastnosti permokarbonske hribine. Geološko-geotehnične raziskave so potekale v letih 1996–1999 in so skupaj s projektanti opredelile pogoje gradnje, ki so za vkopne brežine predvideli izvedbo težnostnih zidov. Kljub pripombam recenzenta prof. dr. Logarja, da so vhodni podatki za ustrezne geotehnične analize preoptimistični in prečni profili pri stabilnostni presoji prekratki, je odgovorni projektant z geologi ocenil osnovne rešitve kot primerne.

Gradnja avtocestnega odseka se je, kot običajno, začela v jesensko-zimskem obdobju, in sicer z zemeljskimi deli frontalnega izkopa. Zelo kmalu po odstranitvi materiala je prišlo na območju vkopov do obsežne splazitve z globino plazu prek 10 m. Za zaustavitev plazu je bilo treba pripeljati večje količine kamnitega materiala in seveda spremeniti projektne rešitve, ki so namesto težnostnih zidov predvidele dolge sidrane pilotne stene s piloti premera 150 cm. Poleg omenjenih opornih konstrukcij je bilo treba v zaledju izvesti večje število drenažnih reber na območjih, ki z osnovnimi rešitvami niso bila predvidena za odkup.

Spremenjene rešitve so povzročile precejšnje časovne zamude pri gradnji odseka ter pomembno vplivale na strošek gradnje avtoceste. Naročnik DARS je zaradi neodvisnosti naročil mednarodno revizijo postopkov in rešitev. Splošna ocena tujih revidentov je bila, da so spremenjene razmere posledica preveč optimističnih predvidevanj in da so sprejete dopolnjene rešitve ustrezne. Si pa tuji revidenti niso znali pojasniti, zakaj se je za začasno obremenitev pete plazu uporabljal drag kamniti material za nevezane nosilne plasti, ki se je kasneje zavrgel.

Ugotovitev: V navedenem primeru bi morali zahtevati odgovornost povzročiteljev nastalih razmer, kar pa je seveda neprijetno. Naša družba je bolj nagnjena k solidarni odgovornosti, ki ima ime »geološko geotehnično presenečenje«. Verjetno je to tudi vzrok za počasnejši razvoj, kot si ga v SLO želimo. Kljub jasni oceni mednarodne revizije je v domačih krogih črn madež neupravičeno padel na celotno slovensko geotehniko.

3 KOMUNALNA INFRASTRUKTURA

Leta 2009 je nastopila svetovna finančna kriza, ki je ohladila nepremičninski trg in posledično tudi gradbeni sektor. Banke so zaostrile kreditiranje; močno zadolžena podjetja, med katerimi so bila tudi velika slovenska gradbena podjetja, kot so SCT, Primorje, Vegrad in CPM, so žal propadla. Plačilna nedisciplina velikih je vplivala tudi na manjša gradbena podjetja. Zaradi zaustavitve velikih gradbenih projektov, med katerimi je bil tudi NPIAC, se je DRI znašel v zahtevnem položaju. Takratno vodstvo je ravnalo preudarno, saj je pomembno zmanjšalo število zaposlenih, predvsem na račun upokojevanja. Nastop na nekaterih, sicer finančno skromnih projektih je omogočil, da smo večletno krizo kot Inženir preživeli. Oddelek za geotehniko na DRI je bil pri nastopih na projektih, kot so izgradnja komunalne infrastrukture, gradnja regionalnega centra za ravnanje z odpadki (RCERO), odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO), geotehnične raziskave za 3. in 4. razvojno os ter geotehnični nadzor pri gradnji garažne hiše pod Kongresnim trgom, zelo prilagodljiv. Tudi izvajalci geotehničnih raziskav, ki so se v obdobju NPIAC precej razširili, so svoje dejavnosti usmerili v omenjene projekte. Znanje in izkušnje ter obnovljena merska in vrtalna oprema, ki so jo kolegi iz podjetij Geoinženiring, GI ZRMK, IRGO, SLP in nekaterih drugih pridobili v obdobju NPIAC, so omogočili tehnično in operativno celovit nastop.

Izvedba RCERO (2012), ki je vsebovala gradnjo številnih večjih in manjših objektov, je bila zaradi lokacije na Ljubljanskem barju poseben geotehnični izziv. Želja naročnika in izvajalca po čimprejšnji gradnji posameznih objektov je bila v nasprotju z zahtevanim časom konsolidacije temeljnih tal in tudi z uporabo omejene količine peščeno-prodnega materiala za predobremenilne nasipe. Pomembno vlogo pri usklajevanju želja naročnika in potrebnega časa za konsolidacijo tal sta na tem projektu imela g. Strniša in g. Mešić. Dobro in usklajeno delo med projektantom in geotehnikom je omogočilo, da je bil center zgrajen v predvidenem času, pri tem pa so bili posedki temeljnih plošč na predhodno zgoščenih temeljnih tleh znotraj dopustnih vrednosti.

Izbira lokacije Vrbina pri Krškem in tip odlagališča za NSRAO sta plod dolgotrajnega in usklajenega postopka, ki ga je izvedla Agencija za radioaktivne odpadke (ARAO) s prof. dr. Veseličem na čelu. Sodelovanje DRI pri tem projektu sega v leto 2013, ko smo koordinirali in nadzirali »glavne raziskave geosfere in hidrosfere« na izbranem območju odlagališča. Projekt odlagališča sem izbral zaradi njegove odlične razpisne dokumentacije za izvedbo terenskih in laboratorijskih raziskav. Izvajalcu raziskav je bilo pred oddajo ponudbe popolnoma jasno, kaj bo od njega naročnik pričakoval. Pred začetkom del je moral izvajalec pripraviti natančen tehnološki elaborat, iz katerega je bilo razvidno, kdo in kako bo raziskave izvajal, s katero strojno opremo bo izvajal vrtanje ter vzorčenje hribine, zemljine in podzemne vode; vseboval je tudi natančen opis opreme za geotehnične in geofizikalne terenske ter laboratorijske preiskave, morebitno faznost del in natančno vsebino končnega poročila. Zaradi jasnih izhodišč med izvedbo raziskav ni bilo nesoglasij, prav tako ni bilo treba sklepati nobenih dodatkov k pogodbi. Na podlagi informacij, ki smo jih dobili na lanskem kongresu o predorih in podzemnih objektih, je izgradnja silosa za shranjevanje NSRAO v zaključni fazi; z aktivnim skladiščenjem naj bi se začelo leta 2030.

V obdobje manjše aktivnosti pri NPIAC spada tudi gradnja garažne hiše pod Kongresnim trgom (2009). DRI je prevzel nadzor nad izvedbo gradnje, ki jo je izvajal Gradis, d. d., s podizvajalcem Swietelsky iz Budimpešte. Omenjeno podjetje je bilo angažirano zaradi izkušenj pri gradnji podzemnih objektov na območju podzemne vode. Z izkopom pet-etažne in okoli 18 m globoke garažne hiše na območju Kongresnega trga sežemo v dve podzemni vodi: plitvi horizont na okoli 2 m je vezan na nivo reke Ljubljanice, globlji horizont na okoli 15 m pa je bogata podtalnica v več deset metrov debelem in dobro prepustnem prodno peščenem okolju. Podzemni vodi sta ločeni z debelejšim slojem neprepustne gline. Neposredno ob izkopu so večnadstropni stanovanjski objekti precejšnje starosti, v neposredni bližini na drugi strani slovenske ceste pa uršulinska cerkev Svete Trojice. Varstveni pogoji so zahtevali, da se z gradnjo garažne hiše ne sme poslabšati stanje omenjenih objektov. Ta pogoj je mogoče doseči z načinom gradnje, ki ne bo spremenil ravni predvsem plitve podzemne vode, saj je omenjeni sakralni objekt temeljen na lesenih kolih, ki bi morali ostati v vodnem mediju. Prav zaradi tega je bila uporabljena tehnologija zaščite podzemnega prostora z izvedbo 65 cm debele AB diafragme globine okoli 22 m. Izkop je potekal segmentno, s prečnim in vzdolžnim razpiranjem z jeklenimi cevmi, in sicer od zgornje do spodnje etaže. Armiranobetonska plošča posamezne etaže je prevzela nalogo razpiranja. Ker sem bil zadolžen za koordinacijo geološke spremljave ter geotehničnih in geodetskih meritev, ki jih je odlično povezoval in komentiral kolega dr. Matej Kušar, sem imel dober pregled nad vplivi izkopa na bližnje objekte. Zaradi pogostih protestov stanovalcev bližnjih objektov smo jih na našo pobudo povabili na redne mesečne sestanke in jih obveščali o rezultatih meritev in stanju na gradbišču. Ta pristop se je izkazal za uspešnega, saj je večino zadovoljilo priznanje, da so del projekta. To uspešno izkušnjo sem kasneje še večkrat uporabil pri nekaterih drugih projektih.

Naj zaključim z ugotovitvijo, da so vsi prizadeti zaradi gradnje garažne hiše dobili ustrezno nadomestilo ali pa so bile poškodbe na račun izvajalca odpravljene. Nekaj zadrege je sicer bilo pri priznanju odškodnin iz naslova zavarovalne police izvajalca Gradis, saj je bilo v drobnem tisku navedeno, da »pričakovanih« deformacij zavarovalnica ne krije.

4 ŽELEZNIŠKA INFRASTRUKTURA

Leta 2011 je DRI na podlagi pogodbe, sklenjene z Ministrstvom za promet, dobil formalno vlogo državnega investicijskega inženirja za javno železniško infrastrukturo. Že leta 2002 pa se je začelo vključevanje nekaterih manjših železniških projektov v takrat večinsko cestno usmerjeno inženirsko podjetje, predhodnika DRI – DDC svetovanje inženiring. Ne glede na to, da sta si infrastrukturi na nekaterih področjih podobni, smo zaposleni na DRI opravili številna usposabljanja in preverjanja znanja za varno delo na železnici, ki jih izvajajo Slovenske železnice. Geotehnika je eno od področij, ki ne loči posameznih infrastruktur, tako da smo bili slovenski geotehniki za delo takoj na voljo. Pomembnejše razlike med cesto in železnico, ki smo se jih kmalu zavedeli, so širina obravnavanega območja ter smer in niveleta, ki ju pri železnicah skoraj ni mogoče popraviti. V dveh desetletjih se je nabralo veliko železniških odsekov, pri katerih smo sodelovali tako v fazah umeščanja v prostor in projektiranja za vse ravni projektne dokumentacije kot tudi organizacije in nadzora pri gradnji novih ter nadgradnji obstoječih železniških prog. Za podrobnejši opis sem izbral tri odseke, ki so s področja geotehnike zelo zanimivi.

4.1 Primer – Nadgradnja in elektrifikacija železniške proge Pragersko–Hodoš

Gre za okoli 40 km dolg odsek, ki se začne na območju Dravskega polja, preide v geotehnično zahtevne Slovenske gorice ter se spusti na prekmursko ravnico. Nadgradnja proge obsega ukinitev nezavarovanih cestnih prehodov čez železnico, izboljšanje temeljnih tal na območjih, kjer so bile prisotne deformacije proge, zamenjavo tirov in tirnih naprav ter obnovo električnega omrežja. Za ukinitev nezavarovanih prehodov in za čim bolj tekoč promet z zmanjšanjem števila prehodov z zapornicami je projekt nadgradnje predvidel izgradnjo številnih podvozov in nekaj nadvozov. Razumljivo je, da so podvozi zaradi manjšega posega v prostor primernejši, zato so v primerjavi z nadvozi prevladovali. Glavna težava, ki se je pokazala kmalu po začetku gradnje, je bila gladina podzemne vode Ptujskega polja. Ta je bila zaradi premajhnega števila merskih točk (piezometrov) in prekratkega obdobja opazovanja določena preoptimistično. Lahko trdim, da so jo projektanti od odgovornega hidrogeologa izsilili. Kljub opozorilom naših služb, da podatki o gladinah temeljijo na premajhnem vzorcu merskih točk in prekratkem obdobju opazovanja, je rok za začetek gradnje ostal nespremenjen. Razumeti je treba, da so bile pri gradnji predvidene tudi popolne zapore, ki so bile predhodno dogovorjene in so vplivale na mednarodni železniški promet, česar se ni dalo preprosto spremeniti. Že pri gradnji prvih podvozov (Stražgonjca, Strnišče, Dornava) smo se zaradi nekaj centimetrov višje gladine vode od pričakovane soočali s težavami, ki smo jih reševali z umetnim znižanjem začasne gladine s črpanjem vode iz dobro prepustnega vodonosnika. Prav tako je bilo treba spremeniti projekte in tehnične rešitve podvozov. Povečana dolžina neprepustne betonske konstrukcije preprečuje, da bi podzemna voda zatekala v podvoz. Seveda so spremenjene okoliščine vplivale na vrednost izvedbe nadgradnje železnice na tem območju.

Ugotovitev: Zavedati se moramo, da je pri procesu projektiranja skupaj s preiskavami tal poleg optimizacije stroškov in časa gradnje treba optimizirati tveganja, ki pri tem lahko nastanejo. Če so tveganja podcenjena, se lahko podreta časovni in finančni plan. V primerih, ko je bilo treba konstrukcije spremeniti med gradnjo, je prof. dr. Majes običajno povzel, da bi bilo objekt v vsakem primeru treba zgraditi takega, kot ga imamo, samo malo kasneje smo se tega zavedali.

4.2 Primer – Nadgradnja železniške proge na postaji v Celju

Primer zanimive geotehnične izkušnje predstavlja tudi nadgradnja železniške proge na postaji v Celju. Glede na projektno nalogo je izvedba nadgradnje vsebovala izboljšanje nosilnosti temeljnih tal, zamenjavo pragov, tirov in tirnih naprav, obnovo električne napajalne mreže, obnovo podhoda z novim dvigalom ter posodobitev peronov in postajnega objekta. Za naše področje je najbolj zanimivo izboljšanje temeljnih tal, ki je poleg tirne grede predvidelo izkop zemljine do globine 1 m in zamenjavo le-te s kamnitim materialom (kamnita posteljica in nevezana nosilna plast). Kmalu po začetku izkopnih del se je pokazalo, da večina izkopanega materiala predstavlja zemljino, onesnaženo s težkimi kovinami zaradi nekdanje dejavnosti Cinkarne. Ker se je tak material dobro vgrajeval, je bil v šestdesetih letih zelo iskan tudi za zasebne potrebe pri gradnji dvorišč in uvozov ter celo na območjih igrišč v šolah in vrtcih. Danes ta material uvrščamo med nevarne odpadke, onesnažene s težkimi kovinami, kot so kadmij, svinec, cink in arzen. Takojšnje ukrepanje komisije za zemeljska dela, pri kateri sta bila najbolj aktivna prof. dr. A. Petkovšek in g. Marko Bebar, je z laboratorijskimi preiskavami in terenskimi poskusi potrdilo, da bi bila zahtevana nosilnost dosežena s stabilizacijo z apnom in cementom. Tako izkopa nevarnih odpadkov ne bi bilo treba izvesti, saj bi omenjeno stabilizacijo lahko izvedli z mešanjem na kraju samem (mix in place). Naročnik je ocenil, da bi dela z vmešavanjem cementa in apna trajala predolgo, zato se je odločil, da bomo onesnaženi material izkopali in ga deponirali na natančno določeni lokaciji, ki so jo potrdile okoljske nadzorne službe.

Kasneje je bilo z metodo stabilizacije in solidifikacije okoli 30.000 m^3 nevarne izkopne zemljine predelano v tako imenovani kompozit. Material, zmešan z žlindro in pepelom ter potrjen kot nenevaren, je bil kasneje vgrajen na območju tovorne postaje med posamezne tire.

Morda bi bila tu ustrezna ugotovitev, kako pomembna je predhodna raziskava izkopnih materialov, saj bi se s pravočasno zaznavo, da gre za nevarne odpadke, lahko izognili izkopom, transportu, deponiranju ter dragi stabilizaciji in solidifikaciji.

4.3 Primer – Drugi tir železniške proge med Koprom in Divačo (2TDK)

Načrtovanje drugega tira železniške proge med Koprom in Divačo (2TDK) se je začelo tik pred začetkom novega tisočletja. Prve različice so projektanti Projektivnega podjetja Slovenskih železnic z g. Edmondom Škerbcem na čelu predstavili leta 2000. Izbrano varianto I/3 je vlada RS potrdila leta 2003, leta 2005 pa je bila sprejeta uredba o državnem lokacijskem načrtu. Kot dobro vemo, gre za 27 km dolgo traso na območju kraškega roba, ki v 75 % poteka v osmih predorih in v 7 % po treh viaduktih.

Preostali del trase 2TDK poteka v vkopih in nasipih. Trasa je projektirana za hitrost vlakov do 160 km/h, kar bo pomembno vplivalo na večji pretok tovora iz Luke Koper v zaledje. Geološko poteka trasa po geotehnično nezahtevni hribini, in sicer v spodnjem delu po flišni podlagi, v zgornjem delu pa s predoroma T1 in T2 v alveolinsko-numulitnih apnencih. Ker trasa 2TDK poteka po vodovarstvenem območju vodnega zajetja Rižanskega vodovoda, je Ministrstvo za okolje in prostor leta 2011 od investitorja zahtevalo, naj pripravi strokovne podlage, ki bodo zagotavljale, da gradnja v nobenem primeru ne bo posegala v količinsko in kakovostno stanje vode v Rižanskem vodovodu; zato sta pri 2TDK bolj zanimiva hidrogeološki in krasoslovni vidik. Eden pomembnejših dokumentov je analiza tveganja za vodni vir Rižane, ki so jo pripravili na Geološkem zavodu Slovenije. Geološko-geotehnične, hidrogeološke in krasoslovne raziskave so za 2TDK potekale v več fazah. Za raven glavnega projekta je bilo izvedenih več strukturnih vrtin, ki so bile kasneje zacevljene in so služile kot piezometri, na območjih manj stabilnih pobočij pa kot inklinometri. Ker je med zaključkom raziskav in začetkom gradnje poteklo več let, smo to obdobje namenili opazovanju v piezometrih

in inklinometrih ter geodetskemu snemanju nekaterih točk na površini. Presenetljivo dolgotrajno visoko gladino podzemne vode v enem od piezometrov so nekateri recenzenti pripisali slabi izvedbi piezometra. Mag. Prestor, ki je vodil hidrogeološke raziskave, je vztrajal, da je gladina realna in nakazuje normalno pretakanje vode v kraškem podzemlju (prednost horizontalnega odtoka podzemne vode pred vertikalnim). Ta pojav je pomembno vplival na projektne rešitve, predvsem v predorih T1 in T2, saj je moral biti del predorov grajen kot nedreniran, notranja betonska obloga pa je morala prevzeti tudi pritisk podzemne vode.

Gradnja 2TDK se je z vsemi navedenimi pogoji in stalno geološko, geotehnično, krasoslovno in hidrogeološko spremljavo začela leta 2020 in bila pred kratkim tudi uspešno zaključena. Napovedanih je bilo veliko kraških pojavov v obliki manjših razpok do velikih jam, pa vendar jih je bilo ob zaključku evidentiranih precej več, kot je predvidevala napoved. Območja dreniranih in nedreniranih delov predorov T1 in T2 sovpadajo z napovedjo.

5 ZAKLJUČEK

To obsežno pripoved želim zaključiti z ugotovitvijo in nasvetom, predvsem mlajšim kolegom, naj pri svojem delu ostanejo predani strokovnim odločitvam in naj ne podležejo pritiskom naročnikov in izvajalcev. Občasno pritiskajo tudi nadrejeni, tako da bodo pogosto stisnjeni v kot. Pametno je o odločitvah, ki nimajo strokovne podlage, pripraviti zapis in pridobiti podpis. Čeprav nekateri zaradi uklonjene hrbtenice bolje napredujejo, pogosto niso najbolj srečni ljudje.

25.
Šukljetov dan

SOORGANIZATOR

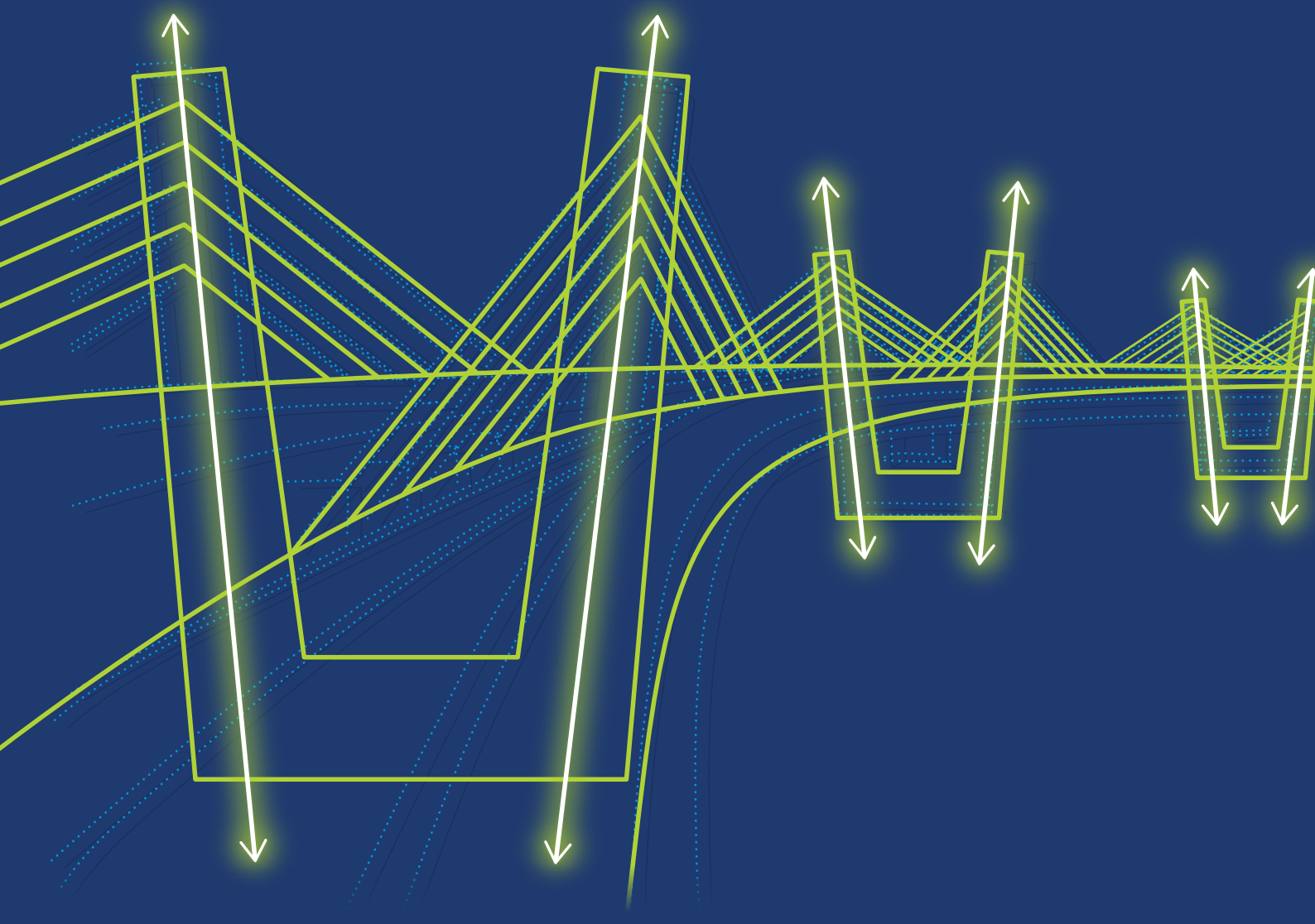
INŽENIRSKA ZBORNICA SLOVENIJE

Bohinj, 14. oktober 2026

INŽENIRSKA ZBORNICA SLOVENIJE
JARŠKA CESTA 10B
1000 LJUBLJANA
SLOVENIJA

USTVARJAMO TRAJNOSTNO PRIHODNOST

ZELENO. VARNO. DIGITALNO.



Slovensko geotehnično društvo • Slovenian geotechnical society •

25.
Šukljetov dan

SPONZORJI

Bohinj, 14. oktober 2026

GLAVNI SPONZOR

GEOINVEST
geotehnične rešitve

ZLATI SPONZORJI

KASKADER
ZAHTEVNA TERENSKA DELA d.o.o.

MONTERRA
PRVI KORAK STABILNOSTI

GEODRILL

iC ELEA

SREBRNI SPONZORJI

KELLER

IRGO

SIP d.o.o. Ljubljana

BRUGG
Geobrugg
Safety is our nature

BRONASTI SPONZORJI

Geoportal

DRI

LESPATEX

GEOKOP

DRUGI SPONZORJI

EHO PROJEKT

GEOFORMA

LAM BIRO

corus inženirji

igmat d.d.
inštitut za gradbene materiale

STABI

POMGRAD

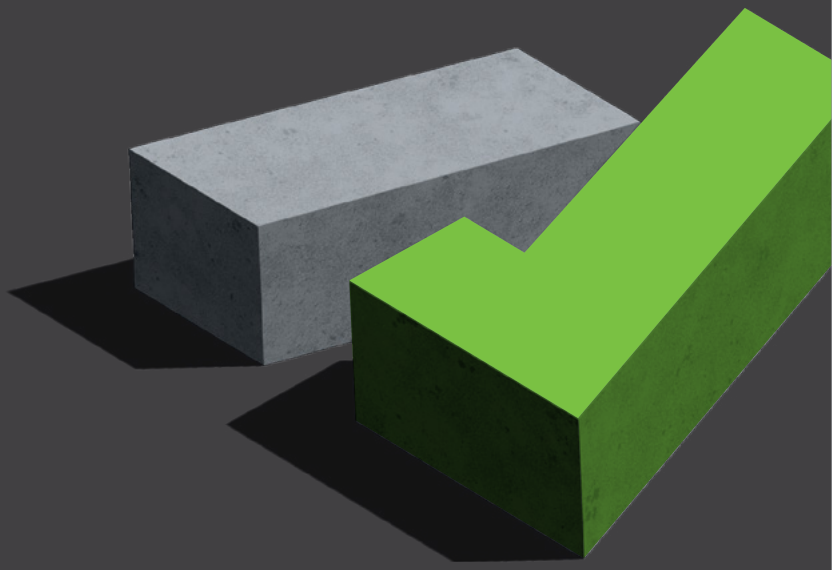
Feniks
VARNOST NA VAŠIH POTEH

ZRMK

RAFAEL

POMGRAD GEOTEHNIKA IN NIZKE GRADNJE d.o.o.

Zanesljive rešitve na področju geotehnike in nizkih gradenj



Podjetje, specializirano za izvedbo geotehničnih del, ima svoje začetke že v letu **1954**, ko je delovalo v okviru **Geološkega zavoda Ljubljana**. Leta **1990** se je enota geotehničnih del preoblikovala v samostojno podjetje **GZL Geoprojekt d.d.**, od **2006** pa uspešno poslujemo kot del **skupine POMGRAD**. Danes nadaljujemo tradicijo in gradimo prihodnost kot **Pomgrad geotehnika in nizke gradnje d.o.o.**



NAČRTUJEMO / PROIZVAJAMO / GRADIMO

Naše ključne dejavnosti:

- Sanacija plazov in erozijskih območij
- Varovanje gradbenih jam in brežin
- Globoko temeljenje objektov
- Izvedba brizganega betona
- Gradnja in izvedba vodnjakov

Zakaj zaupati nam:

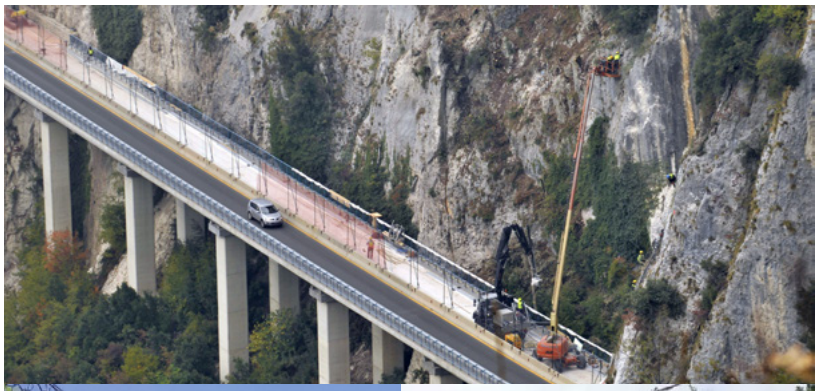
- Več kot **60 let tradicije in strokovnih izkušenj**
- **Celovite rešitve** – od projektiranja, svetovanja do izvedbe
- **Zanesljiva in usposobljena ekipa** z modernim pristopom

POMGRAD –GNG d.o.o., Industrijska ulica 9, 2310 Slovenska Bistrica, T +386 (0)2 53 41 811, E gng@pomgrad.si

pomgrad.si

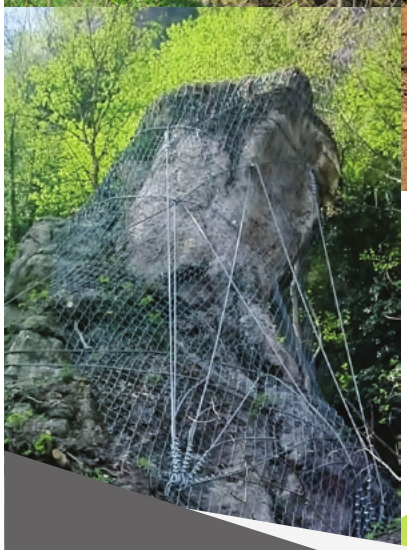
Skrb za okolje po elementarnih nesrečah.

EHO PROJEKT









Izzive s katerimi se spopadamo predstavljajo skalni podori, poplave ter zemeljski in snežni plazovi.

Pri podjetju EHO Projekt d.o.o. skrbno načrtujemo, razvijamo in izvajamo učinkovito zaščito pred takimi pogostimi katastrofami. Prav tako raziskujemo okolje, da bi se izognili nesrečam, preden se zgodijo.

Imamo številne uspešne reference privatnih investitorjev ter državnih inštitucij. Ponosni smo na kar nekaj uspešnih nujnih intervencij v katerih smo dokazali možnost hitrih in uspešnih odločitev v inženirskem in izvedbenem smislu.

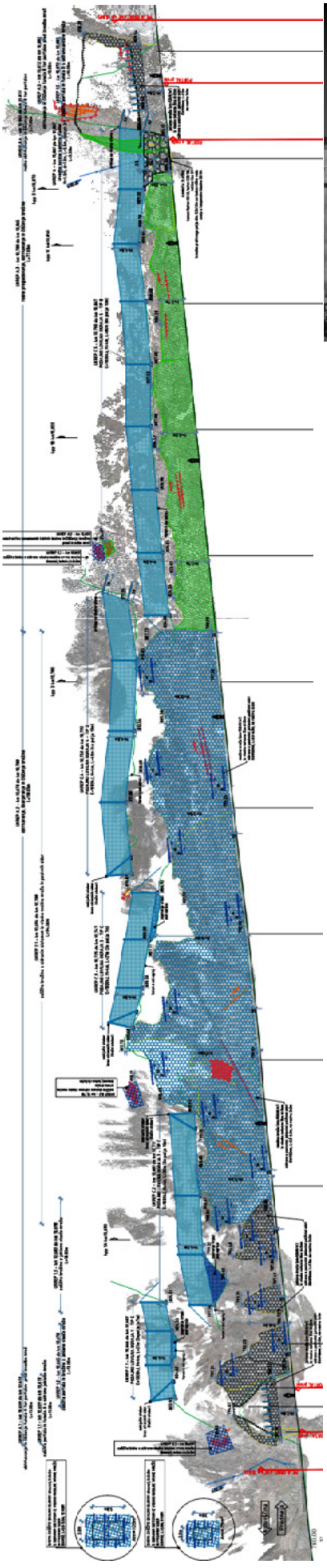
Imamo širok nabor izkušenj na področju načrtovanja in izvedbe podajno lovilnih ograj kakor tudi prekrivnih mrež nizkih in visokih nateznih trdnosti. Izvajali in načrtovali smo sanacije zemeljskih plazov ter zaščite za varovanje pred snežnimi plazovi. Hkrati pa smo intenzivno vključeni tudi v načrtovanje in izvedbo projektov protipoplavne zaščite ter vodnogospodarskih ureditev.

Stabilizacije brežin
Skalni podori
Zemeljski plazovi
Snežni plazovi
Protipoplavna zaščita

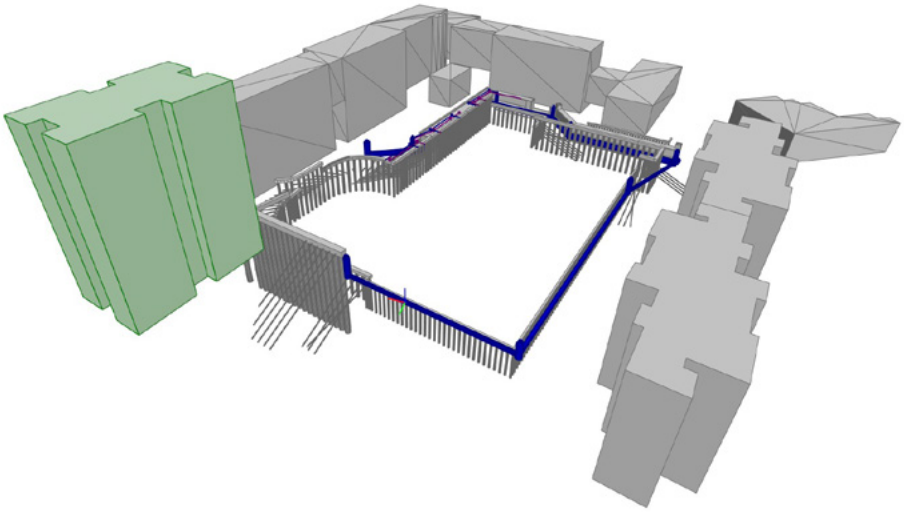


www.ehoprojekt.si

EHO PROJEKT d.o.o.
Dunajska cesta 51
1000 Ljubljana, Slovenia
tel.: +386 (0)64 296 750
e-mail:info@ehoprojekt.si







geomehanske raziskave
stabilnostne analize
varovanje gradbenih jam
sanacije plazov in usadov
zaščita pred padajočim kamenjem
zahtevno temeljenje objektov
kontrolirano zniževanje talne vode v gradbenih jamah

corus inženirji

www.c-i.si | info@c-i.si | +386(0)5 3002020

G E O F O R M A

Sonaravni stabilizacijski ukrepi za vašo varnost

GEOFORMA



Projektiranje
Svetovanje
Raziskovanje
Inženiring



Poslanstvo

- združujemo strokovna znanja in storitve,
- izpolnjujemo pričakovanja naročnikov in poslovnih partnerjev,
- ohranjamo skrb za naše okolja.



Rešitve, ki jih omogočamo

- Hidrogeološke študije → omogočajo varno upravljanje z vodnimi viri in zmanjšujejo tveganje za pomanjkanje vode.
- Geološki in geomehanski elaborati → omogočajo stabilno gradnjo in preprečujejo drse terena.
- Geotehnične rešitve → omogočajo zanesljivo temeljenje objektov in prihranijo stroške sanacij.
- Hidrologija in monitoring → omogočajo dolgoročno varnost in pravočasno opozarjanje na spremembe v naravi



041 369 640 geoforma.si bojana.janezic@geoforma.si


POD POVRŠJEM. PRED ČASOM.
iC
ELEA



Kaskader

Že od 1992

Izvajamo zahtevna terenska dela, ki so nepogrešljiva za varnost in dobrobit ljudi.

Nismo klasični gradbinci, zato je naš pristop zelo premišljen in včasih neobičajen.

Specializirani smo predvsem za nedostopne terene in logistično zahtevne projekte:

- **Sanacija plazov** in miniranje skalnih previsov
- **Vrtalna dela in zaščita brežin** s podajno lovilnimi sistemi
- **Zaščita hudournikov** s fleksibilnimi vodnimi pregradami
- **Vzdrževanje in montaža** jeklenih konstrukcij
- **Gradnja mostov** in visečih konstrukcij
- Organizacija **helikopterskih transportov**
- **Zahtevna sečnja**
- **Intervencije** ob naravnih in drugih nesrečah







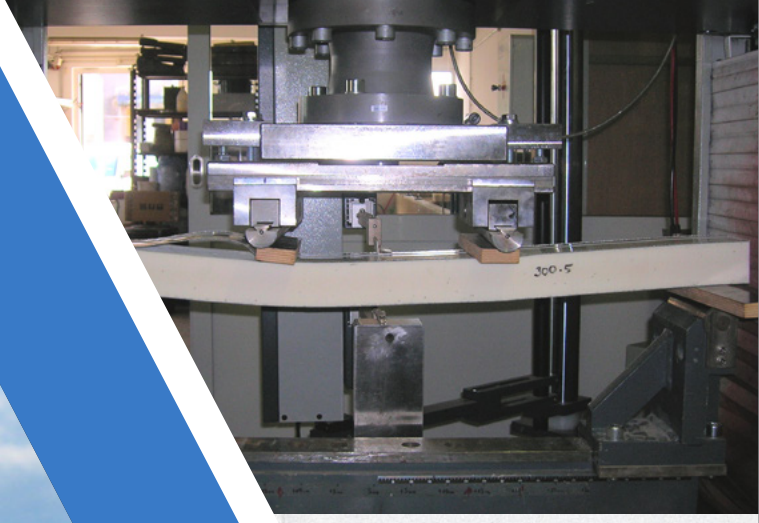


E info@kaskader.si
T +386 (0)5 37 28 270
W www.kaskader.si

KASKADER
ZAHTEVNA TERENSKA DELA

Kjer se drugi ustavijo, mi začnemo.





Terenske in laboratorijske preiskave gradbenih materialov, proizvodov in konstrukcij

Detajlni pregledi materialno-tehničnega stanja inženirskih objektov in vozišč

Monitoringi objektov v vplivnem območju delovišč

Raziskovalno delo ter razvoj novih preiskav gradbenih materialov

Certificiranje

Akreditacija s področja preskušanja in certificiranja





igmat d.d.

inštitut za gradbene materiale

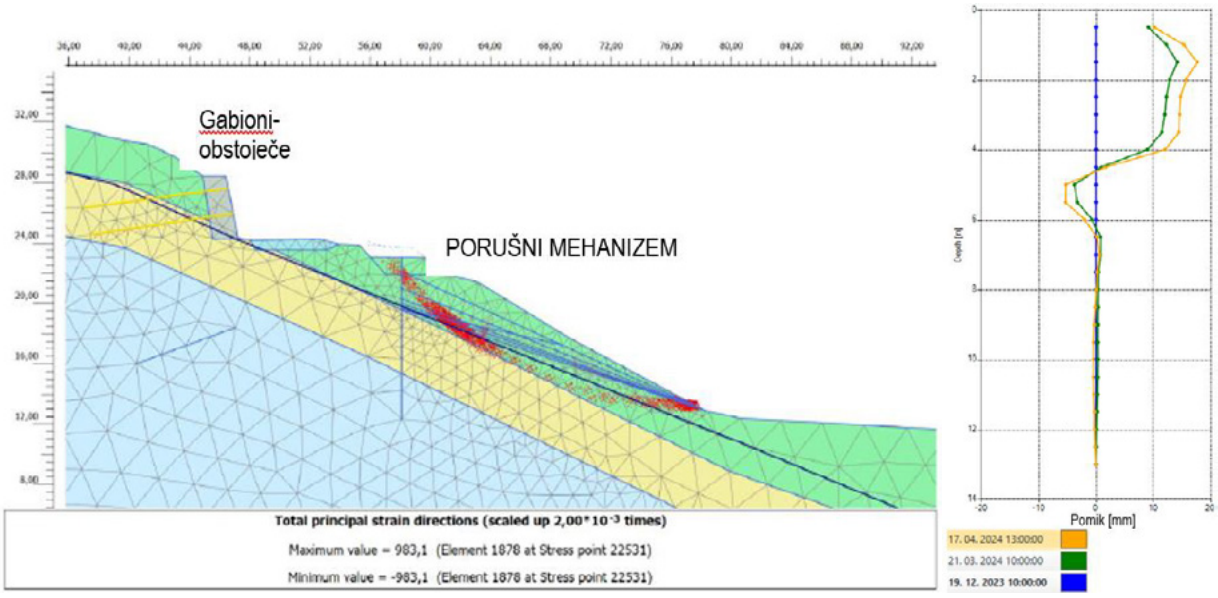
Stabi geotehnika, projektiranje in svetovanje, d.o.o.
Cimermanova 11E, 1260 Ljubljana-Polje
Poslovni prostori: Leskoškova 9E, 1000 Ljubljana
e: info@stabi.si w: www.stabi.si

INŽENIRSKA GEOLOGIJA · GEOTEHNIKA · HIDROGEOLOGIJA · GEOTEHNIČNO PROJEKTIRANJE · NADZOR

Sanacija plazu na državni cesti R3-656/3650 (Dragarji) Zgornji Čačič – Osilnica s sidrano pilotno steno
- geološko geomehanske raziskave, projektiranje in nadzor -









Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.

Dimičeva ulica 12
1000 Ljubljana
T: 01/280 81 81
www.gi.zrmk.si

CENTER ZA GEOTEHNIKO IN GEOLOGIJO

Geomehanika; inženirska geologija; projektiranje inženirskih objektov; raziskave in sanacije plazov; geološko-geotehnične analize in elaborati, kontrola kakovosti in geotehnični monitoring; terenske meritve karakteristik tal, geofizikalne meritve - georadar, geoelektrika.




CENTER ZA PROMETNICE IN INFRASTRUKTURO

Zunanja (ZKK) in notranja (NKK) kontrola izvedbe del pri gradnji prometnic in javne infrastrukture; izdelava izvedbenih načrtov za obnove vozišč, dimenzioniranje voziščnih konstrukcij; preiskave zemljin, kamenih agregatov, asfaltov, betonov in talnih označb.




CENTER ZA MATERIALE IN KONSTRUKCIJE

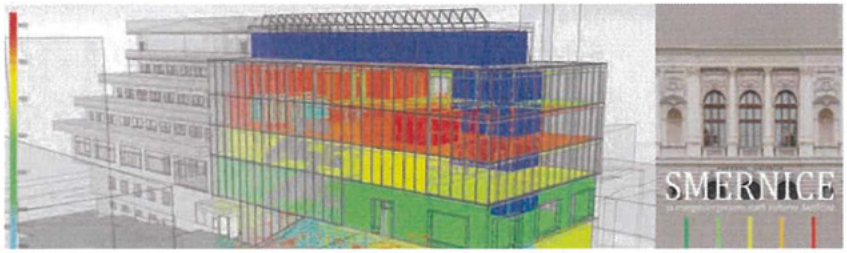
Ugotavljanje konstrukcijskih in materialnih lastnosti objektov; izvajanje statičnih in seizmičnih analiz objektov s predlogi ojačitev; računske ocene dejanske potresne odpornosti objektov; reševanje zahtevnih konstrukcijskih detajlov; recenzije in revizije projektne dokumentacije; pregledi in opazovanje objektov.





CENTER ZA BIVALNO OKOLJE, GRADBENO FIZIKO IN ENERGIJO

Sodelovanje pri pripravi strateških dokumentov in predpisov s področja gradbene fizike, učinkovite rabe energije v stavbah; razvoj na področju trajnostne gradnje, predinvesticijsko svetovanje za skoraj nič-energetske stavbe in celovito energetsko prenovo; strokovna mnenja in meritve mikroklime – temperatura, vlaga, CO_2 ter zrakotesnosti in termografija; energetski pregledi stavb in energetske izkaznice stavb.









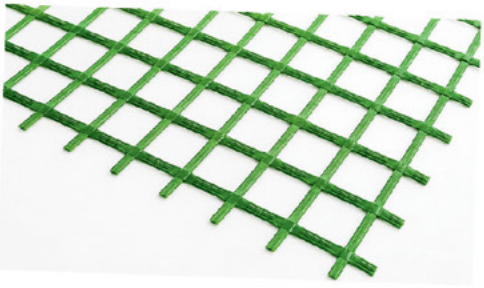
Vsi materiali za zelene brežine na enem mestu.



Protierozijske žimnice

Armaturni geosintetiki





Protierozijske mreže

Armaturni opaži od 60° do 80° naklona



SOLMAX

Polyfelt

TeMa

Vrhunski materiali.
Strokovne rešitve.

Lespatex d.o.o., Pot k sejmišču 30, Ljubljana Črnuče
T. 01 2565 168 | E: info@lespatex.si | www.lespatex.si

LESPATEX



Feniks

VARNOST NA VAŠIH POTEH







FENIKS + d.o.o.
Koroška c. 90
4290 Tržič
Tel.: 041 300 501

www.feniks.biz

projektiranje
podpornih/opornih
konstrukcij
projekti sanacij plazov

dimenzioniranje vozišč in konstrukcij
hidrološko – hidravlične analize
analize tveganja onesnaženja podzemne vode
elaborati podnebnih sprememb

načrti temeljenja
načrti zaščite gradbenih jam
načrti zaščite in stablizacije brežin
geomehanski nadzori
VIJAČNI TEMELJI

LAM BIRO

inklinometerske meritve
PET test - test zveznosti AB pilotov
meritve nosilnosti tamponskega nasutja
geološko – geomehanska poročila

GRADBENO – GEOTEHNIČNE STORITVE

težki dinamični penetrometer (DPSH-B)
krožna plošča z lahko padajočo utežjo
dinamični penetrometer (DPM)
geotehnične vrtine
dinamično jedrovanje

|**LAM BIRO d.o.o.** | Gradbeno projektiranje in nadzor | **Šmartno ob Paki 134**, 3327 Šmartno ob Paki |
|Pokličite nas: **031-776-280** | Pišite nam: **info@lambiro.si** |Sledite nam: **www.lambiro.si** | profil|



SPECIALIZIRANI STROKOVNJAK
ZA IZVAJANJE GRADBENIH STORITEV.

- SANACIJE PLAZOV
- ŽELEZNIŠKE IN CESTNE GRADNJE
- HIDROGRADNJE
- IZGRADNJA PROTIHRUPNIH OGRAJ
- PROIZVODNJA GEOTEHNIČNIH SIDER

RAFAEL

WWW.RAFAEL.SI



25.
ŠUKLJETOV DAN