

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Prometna smer

Kandidat:
Miha Šlibar

Analiza merjenih pomikov v predoru Golovec

Diplomska naloga št.: 2856

Mentor:
izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:
asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 20. 12. 2005

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.131:624.19 (043.2)
Avtor: Miha Šlibar
Mentor: Doc. Dr. Janko Logar
Somentor: Jure Klopčič
Naslov: Analiza merjenih pomikov v predoru Golovec
Obseg in oprema: 59 str., 10 pregl., 53 sl.
Ključne besede: predor, portal, merjenje pomikov, kalota, talni obok, cevni ščit, karbonski skrilačci

Izvelek:

V moderni predorogradnji poteka vsakodnevno merjenje pomikov primarne predorske obloge s pomočjo modernih optičnih 3-D merilnikov. Na voljo je tako ogromna količina podatkov, ki pa jih je potrebno pravilno in v realnem času analizirati, kajti le v tem primeru so nam v pomoč pri gradnji predora. Dobljeni podatki omogočajo napoved pomikov za razdaljo do dveh premerov predorske cevi pred čelom kalote, kar pomaga gradbenikom pri sprotne prilagajanju podporja glede na pričakovano obnašanje hribinske mase. Na ta način se poveča varnost in ekonomičnost gradnje.

Moje diplomsko delo je osredotočeno na analizo pomikov v tripasovnem predoru Golovec in primerjavo le-teh z geološko zgradbo in tektonskimi značilnostmi ter iskanju korelacij med pomiki in geologijo. Relativno velik prečni prerez predora, ki je bil grajen v mehkih karbonskih skrilačcih, je vplival na velike premike, zaradi česar je projekt zelo zanimiv za tovrstno analizo.

Opisal sem tudi tehnologijo gradnje predora Golovec, kajti merjenje pomikov obloge predorske cevi je integralni del »Nove avstrijske metode gradnje predorov (NATM)«, ki je bila izbrana kot glavna metoda pri gradnji podzemnih objektov na slovenskem avtocestnem križu, katerega del je tudi predor Golovec.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.131:624.19 (043.2)
Author: Miha Šlibar
Supervisor: Assist. Prof. Janko Logar
CoSupervisor: Jure Klopčič
Title: Analysis of monitored displacements in Golovec tunnel
Notes: 59 p., 10 tab., 53 fig.
Key words: tunnel, portal, displacement measurements, top heading, invert, pipe roof, Carboniferous clastic rock

Abstract:

Modern tunnel construction includes everyday monitoring of 3-D displacements of primary lining using sophisticated geodetic instruments. Therefore, a large number of data is collected, which has to be interpreted correctly. Only in such a way the monitoring results can be useful during tunnel excavation. Correctly analysed displacements enable the prediction of tunnel behaviour up to two tunnel diameters ahead of current face position. Designers use this information to adjust the support system in time, which makes the construction safer and more economic.

The thesis is focused on the analysis of measured displacements during the excavation of the 3-lane Golovec tunnel. Measured displacements are then compared with the geological structure and tectonic features. Some of the characteristic displacement patterns were then linked to certain geological characteristics. The relatively large tunnel cross section within a soft Carboniferous rock formation led to very large displacements making the project interesting for such analysis.

Also the description of technology of the Golovec tunnel construction is presented. Displacement monitoring of the tunnel lining is an integral part of the “New Austrian Tunneling Method”. This method was used for the construction of all tunnels on the Slovenian motorways and also of the Golovec tunnel, which forms a part of Slovenian motorway network.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se lepo zahvaljujem mentorju doc.dr. Janku Logarju, iskrena zahvala pa gre somentorju Juretu Klopčiču, ki mi je nudil pomoč v vsakem trenutku, mi odgovoril na vsako vprašanje in me kljub svojemu natrpanemu urniku »prenašal« ves ta čas.

Zahvalil bi se svojim staršem, ki so mi omogočili pot do diplome.

Še posebej pa bi se zahvalil svoji mladi družinici, puncu Alenki, ter hčerama Anji in Nini, ki so me, hote ali nehote, spodbujali pri mojem delu!

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	GRADNJA PREDORA GOLOVEC	7
2.1	GEOLOŠKE-GEOTEHNIŠKE RAZMERE	9
2.2	Tehnologija izkopa predora Golovec	13
2.2.1	Oprema za izkop	13
2.2.1.1	Izkop kalote in stopnice.....	14
2.2.1.2	Nakladanje in transport izkopnega materiala	14
2.2.2	Oprema za vgradnjo podpornih elementov	15
2.2.2.1	Vgradnja jeklenih podpornih lokov in armaturne mreže	15
2.2.2.2	Vgradnja brizganega betona	15
2.2.2.3	Vgradnja hribinskih sider in jeklenega cevnega ščita.....	16
2.2.3	Opis tehnoloških faz gradnje	17
2.2.3.1	Cevni ščit	17
2.2.3.2	Izkop kalote in vgrajeni podporni ukrepi	18
2.2.3.3	Izkop stopnice in talnega oboka.....	20
2.2.3.4	Časovni potek napredovanja.....	21
2.2.3.5	Opis zamikov tehnoloških faz gradnje glede na pogoje izvajanja del	22
3	OPIS NOVE AVSTRIJSKE METODE (NATM)	23
4	MERJENJE PROSTORSKIH POMIKOV	26
5	GRAFIČNA PREDSTAVITEV MERITEV	29
5.1	Graf časovnega poteka pomikov.....	29
5.2	Graf prirastkov pomikov	32
5.3	Graf vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu	33
5.3	Graf vplivnic	34
5.4	Trendna črta, konstruirana iz vplivnic	35
5.6	Trendna črta orientacije vektorja pomikov.....	36
5.7	Trendna črta razmerja med dvema točkama.....	38
6	ANALIZA MERJENIH POMIKOV V PREDORU GOLOVEC.....	39

6.1	Velik vpliv stopnice na velikost pomikov.....	46
6.2	Velik pomik desnega boka predora.....	47
6.3	Vzdolžni pomiki.....	49
6.4	Pomik temenske točke.....	52
7	ZAKLJUČEK.....	57

KAZALO SLIK

Slika 1: Predori na slovenskih avtocestah.....	1
Slika 2: Vzdolžni prerez cestišča.....	2
Slika 3: Lokacija predora Golovec na območju ljubljanske obvoznice.....	2
Slika 4: Prečni prerez predorske cevi.....	3
Slika 5: Prečni prerez predorske cevi z vsemi konstrukcijskimi elementi.....	4
Slika 6: Situacija predora Golovec.....	5
Slika 7: Zrušek v predoru Golovec.....	7
Slika 8: Sanacijska dela primarne obloge.....	8
Slika 9: Priprava predora za vgradnjo primarne obloge.....	9
Slika 10: Vzdolžni geološki prerez - zahodna cev D.....	10
Slika 11: Vzdolžni geološki prerez - vzhodna cev C.....	11
Slika 12: Liebherr bager - prilagojen za delo v predoru.....	14
Slika 13: Shematski prikaz podpornih elementov v predoru Golovec.....	15
Slika 14: Vgradnja mikroarmiranega brizganega betona.....	16
Slika 15: Vgradnja IBO sider.....	16
Slika 16: Vgradnja cevnega ščita.....	17
Slika 17: Izkop in podpiranje predora Golovec.....	18
Slika 18: Razširjena peta kalote.....	20
Slika 19 :Potek napetosti okoli predora.....	23
Slika 20: Razdelitev prečnega profila predora na faze gradnje.....	24
Slika 21: Stranske galerije.....	25
Slika 22: Fazni izkop.....	25
Slika 23: Merska točka (prizma) vgrajena v predorsko oblogo.....	26
Slika 24: Merjenje pomikov v predoru.....	27
Slika 25: Razporeditev merskih točk po obodu predorske cevi.....	27
Slika 26: Časovni potek pomikov razdeljen na tri intervale.....	29
Slika 27: Normalni časovni potek pomikov v višinski smeri.....	30
Slika 28: Značilni graf časovnega poteka pomikov.....	31
Slika 29: Značilni graf prirastkov pomikov.....	32
Slika 30: Značilna slika vektorjev pomikov v homogeni hribini.....	33

Slika 31: Značilna slika vektorjev pomikov, ki naznanja tektonsko prelomnico.....	33
Slika 32: Prikaz vpliva izboljšanja oz. poslabšanja geotehničnih pogojev.....	34
Slika 33: Prikaz konstrukcije vplivnic.....	35
Slika 34: Prikaz konstruiranja trendne črte.....	36
Slika 35: Orientacija vektorja pomikov.....	36
Slika 36: Značilno obnašanje trendne črte orientacije vektorja pomikov v tršem.....	37
Slika 37: Značilno obnašanje trendne črte orientacije vektorja pomikov v mehkem.....	37
Slika 38: Značilno obnašanje trendne črte količnika istosmernih pomikov.....	38
Slika 39: Graf vplivnic za zahodno cev (D) – južno delovišče.....	43
Slika 40: Graf vplivnic za vzhodno cev (C) - južno delovišče.....	43
Slika 41: Graf vplivnic za zahodno cev (D) – severno delovišče.....	44
Slika 42: Graf vplivnic za vzhodno cev (C) – severno delovišče.....	44
Slika 43: Graf posedkov površja in višina nadkritja nad zahodno cevjo (D).....	45
Slika 44: Graf posedkov površja in višina nadkritja nad vzhodno cevjo (C).....	45
Slika 45: Časovni potek pomikov – velik vpliv stopnice na velikost pomikov.....	46
Slika 46: Veliki pomiki desnega boka predorske obloge.....	48
Slika 47: Prikaz poteka pomikov desnega boka predora v vzhodni cevi (C).....	49
Slika 48: Vzdolžni potek pomikov in kontura pomikov za vzhodno cev (cev C).....	50
Slika 49: Potek glavnih normalnih in strižnih napetosti nagnjenega pobočja.....	52
Slika 50: Pomik temenske točke kot posledica delovanja dveh mehanizmov.....	53
Slika 51: Pomik temenske točke pravokotno na skrivalost.....	54
Slika 52: Pomik temenske točke vzhodne cevi(C) vzdolž predorske osi.....	54
Slika 53: Pomik temenske točke zahodne cevi(D) vzdolž predorske osi.....	55

KAZALO TABEL

Tabela 1: Dolžine predorskega in portalnega dela predora Golovec za obe cevi	3
Tabela 2: Konturo prečnega profila sestavlja petih radijev.....	4
Tabela 3: Geometrijski elementi osi trase na območju predora Golovec.....	4
Tabela 4: Merski profili v zahodni cevi (D) – sever.....	40
Tabela 5: Merski profili v zahodni cevi (D) – jug.....	40
Tabela 6: Merski profili v zahodni cevi (C) – sever.....	41
Tabela 7: Merski profili v zahodni cevi (C) – jug.....	41
Tabela 8: Maksimalni pomiki merskih točk.....	42
Tabela 9: Obravnavani detajlni primeri.....	42
Tabela 10: Delež pomikov zaradi vpliva izkopa kalote in stopnice (D jug).....	47

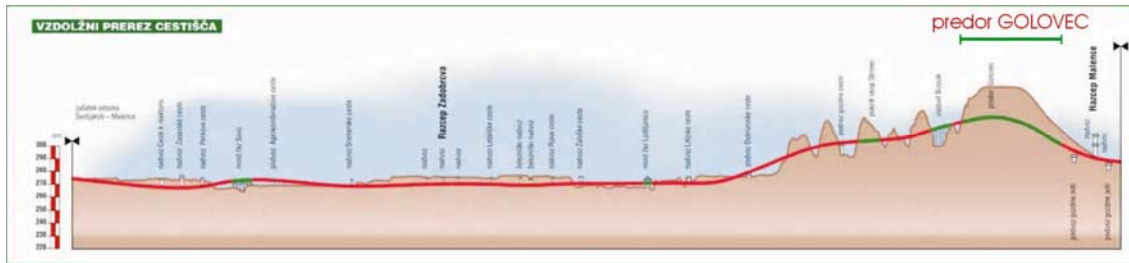
1 UVOD

Leta 1994 je bil v Sloveniji sprejet Nacionalni program o izgradnji avtocest (NPIA). Do danes je bilo v okviru tega programa zgrajenih in prometu predanih 257,9 km avtocest in hitrih cest, od katerih je 20 dvocevni predorov v skupni dolžini 33,8 km (slika 1). Gradnja le-teh je potekala v različnih pogojih, večina je bila zgrajenih v zelo deformabilnih hribinah. Nekateri predori potekajo pod visokim nadkritjem (Karavanke - 1000 m), zahtevnejša pa je gradnja predorov z nizkim nadkritjem (Trojane – do 10 m).



Slika 1: Predori na slovenskih avtocestah (Vir: DARS d.d.)

Vsi predori na slovenskem avtocestnem križu (izjema je predor Karavanke) so dvocevni. Razen predora Golovec so dvopasovni (dva vozna pasova v vsaki smeri), le predor Golovec je tripasoven (velik prečni profil) z malo nadkritja (do 80 m). Predor Golovec je kot del avtocestnega križa v Sloveniji pomembna povezava v smeri vzhod – sever.



Slika 2: Vzdolžni prerez cestišča (Vir: DARS d.d.)

Trasa vzhodne avtoceste (slika 3), ki je del krožne povezave okrog mesta Ljubljane, se na območju razcepa Malence zarije v hrib Golovec. Na drugi, t.j. severni strani predora Golovec, je trasa speljana po bizoviški dolini vzhodno od naselja Bizovik, in nato proti severu, kjer se spoji z avtocestnim odsekom Celje – Ljubljana.



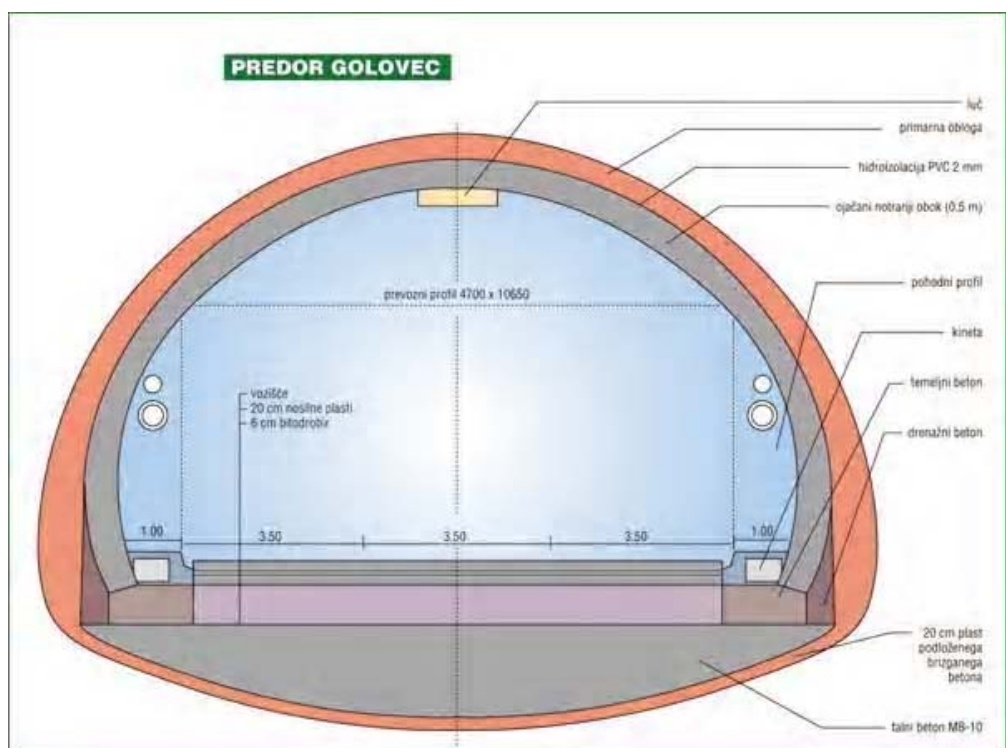
Slika 3: Lokacija predora Golovec na območju ljubljanske obvoznice (Vir: DARS d.d.)

Pričakovanja, ocene in strokovne analize o naraščanju prometa v naslednjih desetletjih so narekovale odločitev, da je bil predor Golovec načrtovan in zgrajen kot prvi dvocevni tripasovni predor. Velikost izkopnega profila je merila $145,7 \text{ m}^2$, svetla višina je bila $11,6 \text{ m}$, svetla širina pa $14,6 \text{ m}$. Obseg izkopnega profila je meril $40,34 \text{ m}$, obseg z loki podprtega profila (primarna obloga) $26,91 \text{ m}$, debelina primarne obloge je bila projektirana na 50 cm , prav tako tudi debelina sekundarne obloge, nadprofil pa so načrtovali do 40 cm (slika5).

Tabela 1: Dolžine predorskega in portalnega dela predora Golovec za obe cevi

PREDOR GOLOVEC	Dolžina predora - zahodna cev (cev D)	Dolžina predora - zahodna cev (cev C)
predorski del:	520,00 m	494,50 m
portalni del:	74,67 m	70,25 m
skupaj:	594,67 m	564,75 m

Prevozni profil je sestavljen iz treh voznih pasov širine $3,50 \text{ m}$ in višine $4,70 \text{ m}$, na vsaki strani vozišča je pohodni profil širine $1,00 \text{ m}$ (slika 4).

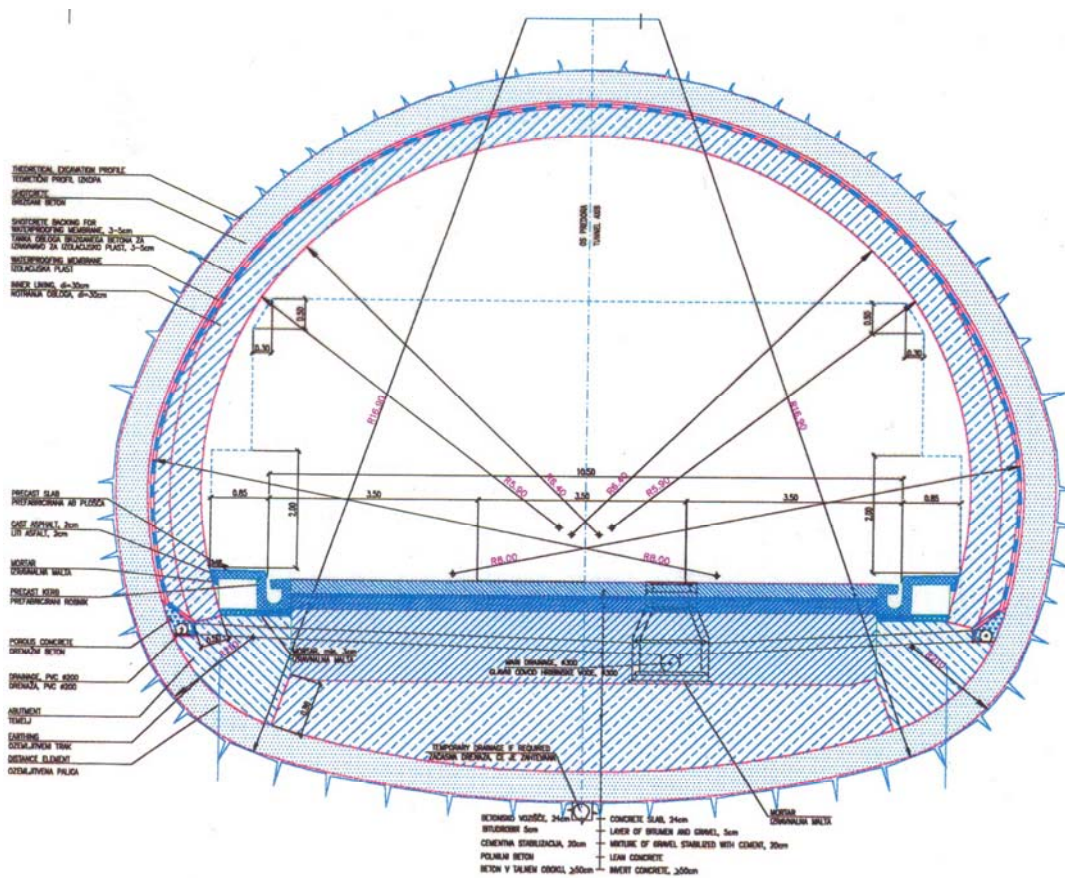


Slika 4: Prečni prerez predorske cevi (Vir: DARS d.d)

Kontura prečnega prereza predorske cevi je sestavljena iz petih krožnih lokov kot je to prikazano v tabeli 2 in na sliki 5.

Tabela 2: Geometrijski elementi konture predorske cevi

Radij krožnega loka	R ₁ (m)	R ₂ (m)	R ₃ (m)	R ₄ (m)	R ₅ (m)
	2,10	5,90	6,40	8,00	16,90



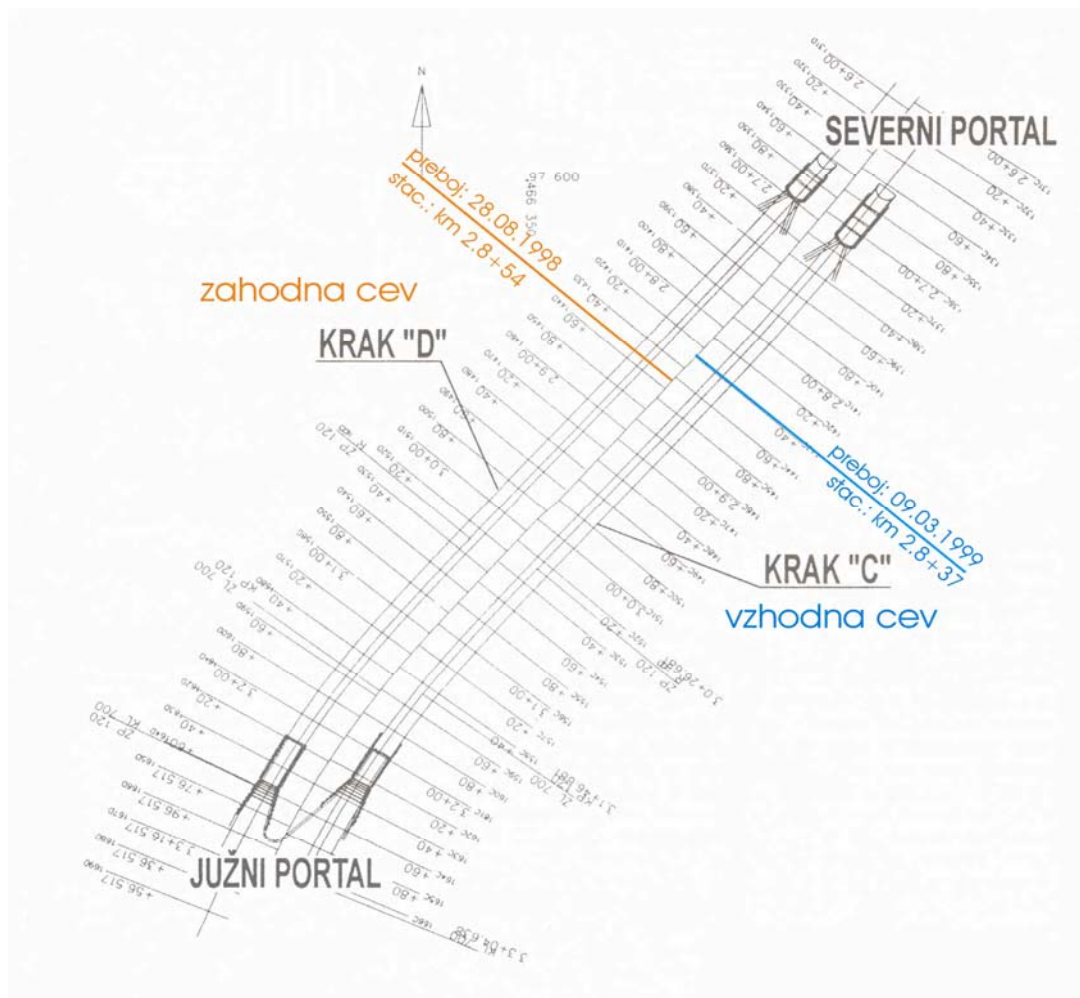
Slika 5: Karakteristični prečni prerez predorske cevi z vsemi konstrukcijskimi elementi (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

Geometrijski elementi trase na območju predora Golovec so bili projektirani glede na zahteve Pravilnika o projektiranju predorov v Sloveniji. Os trase predora Golovec vsebuje vse tri geometrijske elemente osi (prema, krožni lok, prehodnica) – tabela 3.

Tabela 3: Geometrijski elementi osi trase na območju predora Golovec

geometrijski elementi	prema	prehodnica	krožni lok
	$R=\infty$	$A=120\text{ m}$	$R=700\text{ m}$
zahodna cev (D) -stacionaža	km 2.6+77 – km 3.0+26	km 3.0+26 – km 3.1+46	km 3.1+46 – km 3.2+55
vzhodna cev (C) - stacionaža	km 2.6+79 – km 3.0+26	km 3.0+26 – km 3.1+46	km 3.1+46 – km 3.2+24

Zahodno cev so prebili 28. avgusta 1998 na globalni stacionaži km 2,8+54 iz smeri južnega delovišča, pri čemer so bila dela ustavljena na mestu predvidenega preboja (23. avgusta 1998) s severnega delovišča. Vzhodno cev so prebili 9. marca 1999 (pol leta po preboju zahodne cevi) na globalni stacionaži km 2,8+37 iz smeri južnega delovišča. Tudi pri slednji cevi so bila dela ustavljena s severnega delovišča nekaj dni pred prebojem (5. marec 1999).



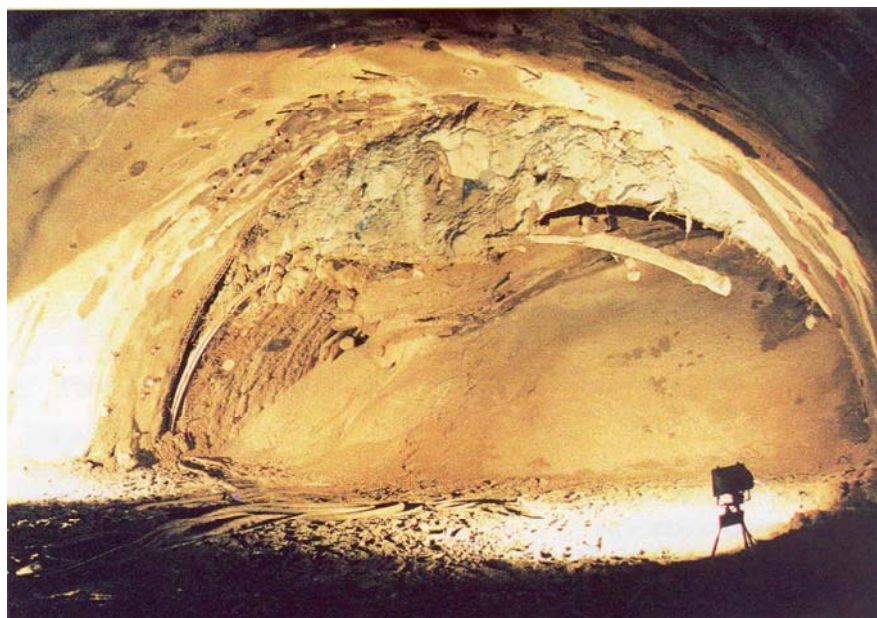
Slika 6: Situacija predora Golovec (Vir: Gradbeni vestnik: Marec 2001)

Odsek vzhodne ljubljanske obvoznice (Zadobrova – Malence) na katerem je predor Golovec, je bil predan prometu avgusta 1999.

V nadaljevanju diplomskega dela je opisana geološka sestava hriba Golovec, potek gradnje in uporabljena metoda gradnje predora. Nekaj besed je namenjenih tehnologiji izkopa, merjenju pomikov in grafični predstavitvi pomikov. Cilj pri izdelavi diplomske naloge pa je obdelava merjenih pomikov v predoru Golovec z računalniškim programom *Predor*, interpretacija grafičnih izrisov in primerjava izmerjenega odziva z geološko zgradbo prostora in s tem izboljšava geološkega modela.

2 GRADNJA PREDORA GOLOVEC

Po izvedbi portalnih konstrukcij na južnem portalu se je 17. junija 1997 s prebitjem čelnih pilotov slovesno začel izkop desne predorske cevi, v začetku avgusta pa je bila za izkop pripravljena tudi leva cev. Glede na predviden zaključek del ter pričakovane dnevne napredke pri izkopu je bila v osnovi predvidena gradnja predora samo iz južne smeri.



Slika 7: Zrušek v predoru Golovec (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

Dejanske geološke razmere, ki so bile dodatno poslabšane še zaradi plazenja južnih brežin Golovca, pa so povzročale izredne težave pri napredovanju izkopnih del. Glavnino težav je predstavljala nestabilnost čela in stropa kalote, kar je povzročalo manjše in večje zruške krovnine še pred vgradnjo podpornih ukrepov. Dela pri izkopu desne cevi so bila prvič ustavljena v avgustu 1997, ko so zaradi zruška in vdora gramoznega nasipa (slika 7) izvedli injektiranje celotnega gramoznega nasipa, da bi tako povečali trdnost krovnih plasti. Po teh delih so se izkopna dela nadaljevala do začetka novembra 1997, ko je ob zrušku prišlo do porušitve primarne obloge predora v smernem rovu in delu že izdelane kalote. Izkopna dela so bila ustavljena, pričela se je sanacija poškodovane obloge predora.



Slika 8: Sanacijska dela primarne obloge (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

Med izvajanjem sanacijskih del (slika 8) je bil pripravljen nov projekt nadaljnjega izkopa predorskih cevi, ki je predvidel močnejše varovalne ukrepe v stropnem delu kalote ter praktično podvojil podporne elemente primarne podgradnje predora. Obdobje priprave projekta so izvajalci del izkoristili za nabavo potrebne opreme za izvedbo cevnega ščita in sanacijo vstopnega dela leve predorske cevi, kjer je ob pripravi talne plošče portala prišlo do porušitve čelnih pilotov in vdora hribine v portalno konstrukcijo.

Do januarja 1998 so bile tako na obeh ceveh zagotovljene razmere za ponoven izkop predora po novoizdelanem projektu. Obenem je bila takrat sprejeta odločitev, da se za izkop pripravi tudi severna portala predora, saj bi bilo pravočasno dokončanje del vsaj na desni predorski cevi možno samo ob sočasnem izkopu z obeh strani. Aprila je bil za pričetek izkopnih del pripravljen severni portal desne cevi. Izkop predora je v nadaljevanju potekal z obeh strani vse do preboja konec avgusta 1998.

Izkop leve predorske cevi je zaradi zelo slabih geoloških razmer in pospešenega dela pri preboju desne cevi potekal bistveno počasneje. Povečani dotoki vode so približno 120 m od južnega portala praktično ustavili izkopna dela, ki so jih po preboju desne cevi pričeli izvajati z večjo intenziteto tako iz smeri južnega kot severnega portala. Levo cev so prebili v začetku

marca 1999, izkopnim delom pa je takoj sledila vgradnja notranje obloge predora, katere vgradnja v desne cevi je potekala sočasno z izkopom leve cevi.



Slika 9: Priprava predora za vgradnjo notranje obloge (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

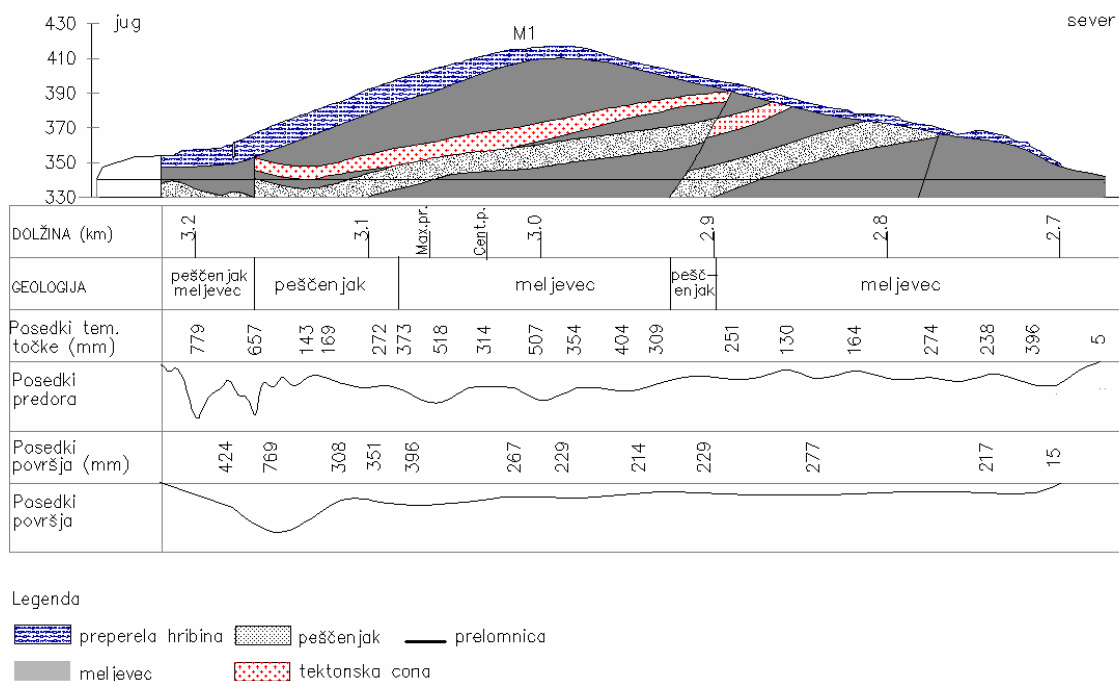
Vgradnji notranje obloge predora, ki je bila končana v začetku junija 1999, so sledila dela pri dokončni ureditvi predora. Dela, ki so zajemala pripravo vozišča, montažo elektrostrojne opreme predora in pogonske centrale ter ureditev okolice predora z odvodnjavanjem, so bila končana v avgustu 1999 oziroma z otvoritvijo izvedene trase vzhodne obvoznice 27. avgusta 1999.

2.1 GEOLOŠKE-GEOTEHNIŠKE RAZMERE

Greben med Golovcem in Orlami pripada skrajno zahodnemu delu tako imenovanega Žirovskega nariva. Geološko je to hribina, ki jo uvrščamo v obdobje zgornjega karbona, torej starosti okoli 300 milijonov let. Zaradi razmeroma velike starosti je bila hribina izpostavljena pogostim tektonskim dogajanjem v obliki narivanja, gubanja in prelamljanja.

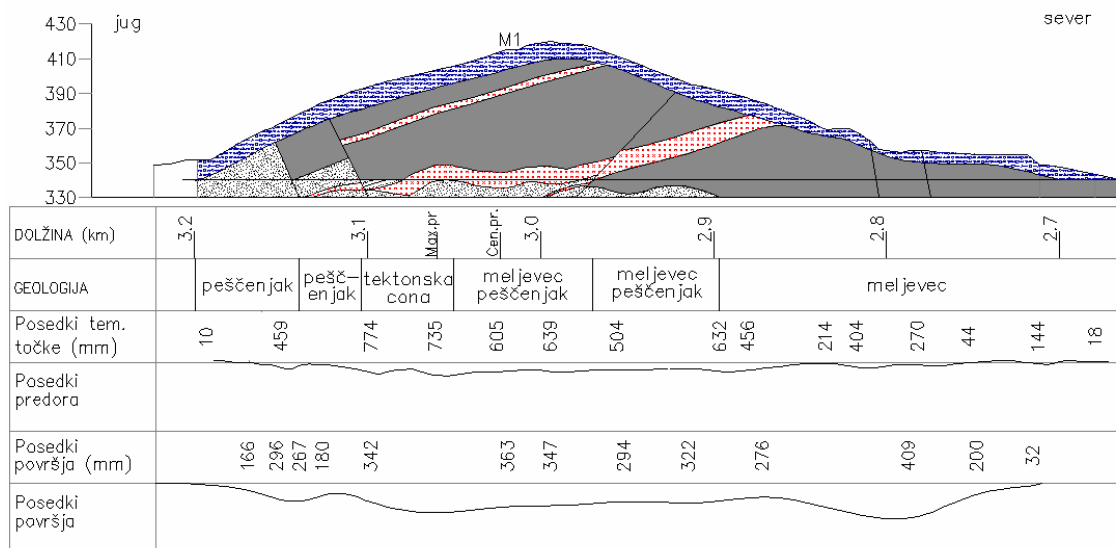
Območje predora, ki leži med Malencami in Bizoviško dolino, je bilo geološko-geotehnično raziskano že v letu 1994. Raziskave so bile namenjene izdelavi idejnega projekta za predor

Golovec. Obseg raziskav je bil glede na dolžino (cca 500 m) in višino maksimalnega nadkritja (80 m) in v primerjavi z raziskavami predorov ustrezen. Izvrtanih je bilo pet geomehanskih vrtin z vsemi običajnimi geotehničnimi in geofizikalnimi meritvami. Ugotovljena je bila izjemno heterogena sestava hribine s prevladovanjem skrilavega meljevca in glinovca ter zdrobljenega in močno prepustnega kremenčevega peščenjaka. Ugotovljeni so bili štirje različni hribinski sklopi, ki so predstavljali štiri hribinske kategorije (slika 10).



Slika 10: Vzdolžni geološki prerez - zahodna cev D

Geološka zgradba na območju Golovca, ugotovljena pri izkopu predora, se v osnovi ujema z geološko sliko širšega območja. Litološki členi, ki se pojavljajo v obliki srednje zrnatega kremenovega, nizko metamorforiziranega peščenjaka in črnega meljevca, ki je na določenih mestih močno pretrt, praktično predstavlja celotno zgradbo območja. Diskontinuitete vpadajo proti jugovzhodu, delno proti vzhodu, ob tem pa so najbolj pretrta območja razmočena, kar je zahtevalo predvsem na vhodih v predor posebne podporne elemente.



Legenda

preperela hribina
 peščenjak
 prelomnica
 meljevec
 tektonska cona

Slika 11: Vzдолžni geološki prerez – vzhodna cev C

Bistveni element, ki je vplival na stabilnostne razmere med gradnjo predora, je bil izjemno neugoden vpad plasti, saj je bila intenzivnost deformacij povečana povsod, kjer so ugotovili navedeno plastovitost. Celotno južno obrobje hriba Golovec je bilo že v primarnem kot tudi v sekundarnem napetostnem stanju posledično povezano z globljimi premiki, povzročenimi z globokim plazenjem, izrazito usmerjenim proti jugu, kar je še dodatno vplivalo na način izvajanja izkopa in gradnjo primarnih podpornih elementov.

Relativno strma pobočja golovškega grebena, ki so bila pred gradnjo verjetno v mejnem stabilnem stanju, so dajala vtis, da izvedba vhodnih delov predora ne bo zelo zahtevna. Izkušnje pri gradnji bližnjega predora Debeli hrib v podobno geoloških pogojih so vplivale na optimistično zastavljen idejni projekt predora Golovec.

V letu 1995, ko je izvajalec del izkopal večino globokega predvropa, posekal drevje na območju južnih portalov predora in izvedel celovito odvodnjo površinskih in podpovršinskih voda, pa so se stabilnostne razmere presenetljivo poslabšale. Vzroki za to so bili kasneje ugotovljeni in sicer:

- prekomerna relaksacija hribine, ki je nastala zaradi razbremenitve hribine v globokem predvzkopu
- spremenjene hidrogeološke razmere zaradi povečanega in hitrejšega odvodnjavanja kot je bilo to v naravnem stanju
- nefunkcioniranje vegetacijskega pokrova

Posledica omenjenih sprememb je bil globok hribinski plaz, ki je navkljub uspešno izvedenim podpornim ukrepom (dve sidrani pilotni steni) povzročil destrukcijo hribine do take mere, da je bil možen pričetek izkopnih del v predoru šele po izvedbi posebnih portalnih konstrukcij in ponovni obremenitvi razbremenjenega dela hribine v območju portala predora.

Razmere, ki so nastale na območju južnih portalov v letu 1996, so zahtevale izvedbo obsežnih dopolnilnih geološko-geotehničnih raziskav z globokimi strukturnimi vrtnami, opremljenimi za stalno spremljavo pomikov v globini. V okviru teh raziskav je bilo izvrtanih preko trideset vrtnin, predvsem za ugotovitev globine plazenja, ki je v tem primeru presegel 100 m. Vse vrtnine so služile tudi za izdelavo popolnejšega geološkega modela. Geomehanske lastnosti nastopajočih litoloških členov se niso bistveno razlikovale od prej ugotovljenih.

Po stabilizaciji območja vhodov v predor so izvajalci pristopili k izkopnemu delu predora. Stalna geološka spremljava in izvajanje geotehničnih meritev ter pogoste velike deformacije primarne obloge predorske cevi so podale ugotovitev, da sicer geološko-geomehansko pravilno napovedana hribina pri izbrani tehnologiji gradnje predora (zaradi tektonske poškodovanosti in velikega profila izkopa – tripasovni predor) spremeni svoje prvotne geomehanske lastnosti hribine pogosto v zemljine. To dejstvo je bilo vzrok za ponovni statični izračun primarnih podpornih ukrepov. Posledično je bil izdelan dopolnjen projekt, ki je ob bistveno povečani količini posameznih elementov primarnega podporja uspešno kljuboval neposrednim pritiskom celotne obremenitve nadkritja predora.

Na podlagi obširnih dodatnih geološko-geomehanskih raziskav in stalne geološko-geomehanske spremljave je bilo ugotovljeno, da večina ugotovljenih permokarbonskih

klastitov zaradi tektonske zdobljenosti, prisotnosti vode in neugodne lege plasti pripada kategoriji slabih in zelo slabih hribin, ki so kritične v velikih prerezih izkopa.

Izkop obeh predorskih cevi v južnem obrobju Golovca je dodatno otežilo globoko plazenje hribinskih mas, kar je povzročilo zelo počasno umirjanje deformacij v predoru.

Enostavna primerjava med tektonsko poškodovanimi in relativno trdnjšimi hribinskimi zlogi z zaglinjeno hribino, ki jo predstavljata meljevec in posamezne plasti peščenjaka, je pokazala, da je bilo v slednjem materialu bistveno lažje izvajanje tehnoloških postopkov izkopa in podpiranja.

Delež zmanjšanja kohezije in ne nazadnje strižnega odpora pripisujemo vplivu hribinske vode, ki je predvsem prisotna v območju vzhodne cevi (C). Največji dotoki so znašali do 4 l/s, ki so se v obdobjih intenzivnejšega deževja povečali, potem pa zopet upadli na začetno vrednost. Navedene razmere so zahtevale kakovostno in dotokom primerno dimenzionirano odvodnjo.

2.2 Tehnologija izkopa predora Golovec

2.2.1 Oprema za izkop

Geotehnični pogoji gradnje so narekovali ustrezno strojno opremo, ki je bila prilagojena tehnološkemu ciklusom v optimalnem obsegu, da je bilo zaporedje faz čimbolj usklajeno z zahtevami po zveznem napredovanju. Na ta način so se dogajanja v obliki sprememb napetostno-deformacijskih stanj v nizkonosilnih hribinah, ki v pretežni meri gradijo širše območje, in podpornih elementih odvijala zvezno, kar praktično pomeni, da so se prirastki obtežb na podporje časovno razporedili na daljše obdobje.

2.2.1.1 Izkop kalote in stopnice

Za izkop kalote sta bila uporabljena bagra (predorska izvedba) LIEBHERR-912 (slika) in L-932. Pri tem je bil bager L-932 uporabljen izključno za izkop kalote predorske cevi, na enem od dveh bagrov L-912 pa je bilo montirano hidravlično kladivo Montabert BRP900, s katerim je potekal izkop v conah tršega peščenjaka. Izkop stopnice in talnega oboka je potekal z bagrom CAT-225D, v odsekih s tršim peščenjakom pa je bil uporabljen bager L-912 z montiranim hidravličnim kladivom.



Slika 12: Liebherr bager - prilagojen za delo v predoru (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

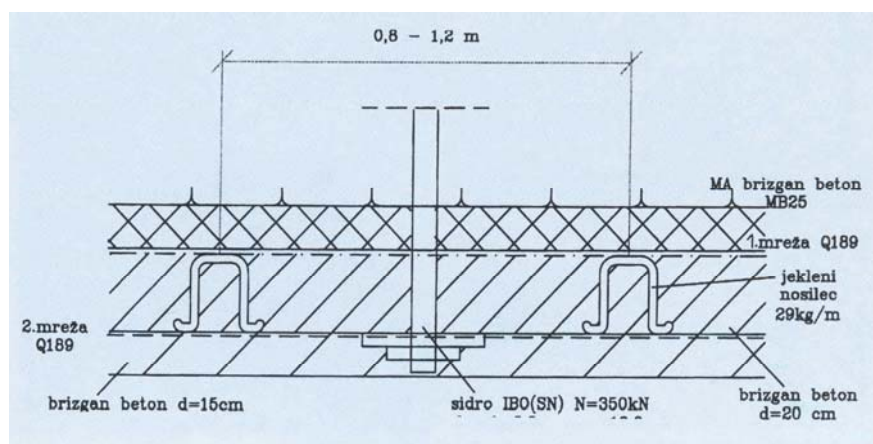
2.2.1.2 Nakladanje in transport izkopnega materiala

Nakladanje izkopane hribine pri izkopu kalote je potekalo z nakladalcem Catterpillar 950E. Izkopana hribina, ki se je nakladala z nakladalcem na dumperje tipa Catterpillar D25C nosilnosti 25 ton, je bila v pretežni meri odpeljana na deponijo, oddaljeno približno 2.0 km od predora. Pri izkopu stopnice in talnega oboka se je s prej navedenim bagrom CAT-225D izkopana hribina nakladala na dumperje. Ker so mehanske lastnosti izkopane hribine v pretežni meri neprimerne za vgradnjo v nasipe, se je izkopani material sproti odvažal na stalno deponijo.

2.2.2 Oprema za vgradnjo podpornih elementov

2.2.2.1 Vgradnja jeklenih podpornih lokov in armaturne mreže

Za vgradnjo jeklenih podpornih lokov in armaturne mreže (slika 13) sta bila uporabljena bagra L-932 in L-912, s katerima je potekala vgradnja oz. dviganje na tleh sestavljenih predorskih lokov na prave pozicije v profilih in nakladalec CAT 950E kot dvižna platforma pri nameščanju armaturnih mrež.



Slika 13: Shematski prikaz podpornih elementov v predoru Golovec (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

2.2.2.2 Vgradnja brizganega betona

Pri vgradnji brizganega betona je bil v predoru Golovec prvič v Sloveniji uporabljen mokri postopek brizganega betona (slika 14). Za brizganje oz. nanašanje brizganega betona je bil uporabljen stroj za brizganje betona MEYCO Spraymobil z vgrajeno črpalko za beton, hidravlično lafeto za strojno nanašanje betona in procesno vodenim sistemom za kontrolo pretoka betona in doziranje pospešila za hitro vezavo betona.



Slika 14: Vgradnja mikroarmiranega brizganega betona (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

2.2.2.3 Vgradnja hribinskih sider in jeklenega cevnega ščita

Za vgradnjo hribinskih sider (slika) in jeklenih perforiranih cevi premera 115 mm cevnega ščita (ang. pipe roof), ki je bil uporabljen prvič v Sloveniji (slika 15), sta bili uporabljeni vrtalni garnituri Atlas Copco BOOMER H352. Vrtalna oprema je bila sprva namenjena izključno vrtanju minskih vrtin oz. vgradnji sidrskih sistemov. Vgradnja cevnega ščita je bila izvedena z modificiranimi lafetami vrtalne garniture, opremljene z novimi vrtalnimi kladivi COP 1238ME, ki je s tem dodatkom omogočila večnamensko uporabo vrtalne opreme.



Slika 15: Vgradnja IBO sider (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

Za injektiranje sider in jeklenih perforiranih cevi cevnega ščita sta bili uporabljeni injektirni črpalki MAI-400 za injektiranje sider sistema IBO oz. injektirna postaja UNIGROUT 400-12E za injektiranje cevnega ščita. Ta je omogočala hitro vgrajevanje velikih količin injektirne mase, ki je potrebna za zapolnitev jeklenih cevi in praznih prostorov v okoliški hribini. Na ta način je bil utrjen svod v stropnem delu kalote in s tem olajšano izvajanje izkopa.

2.2.3 Opis tehnoloških faz gradnje

2.2.3.1 Cevni ščit

Izrazita nestabilnost stropa je kljub vgradnji predvidenih sulic v prvi fazi izkopa kalote zahtevala spremembo tehnologije varovanja kalote. Odločitev, ki je narekovala uporabo dodatnih podpornih elementov kot sta jekleni cevni ščit in začasni talni obok, je zahtevala uvedbo tehnoloških postopkov vgradnje teh sistemov v relativno pretrih hribinah. Predvsem vgradnja cevnega ščita iz jeklenih perforiranih cevi premera 115 mm (slika 16) , ki so bile po končani vgradnji zainjektirane, je relativno zapletena operacija, ki je zahtevala izkušnje rudarjev, ki so opravljali ta dela.

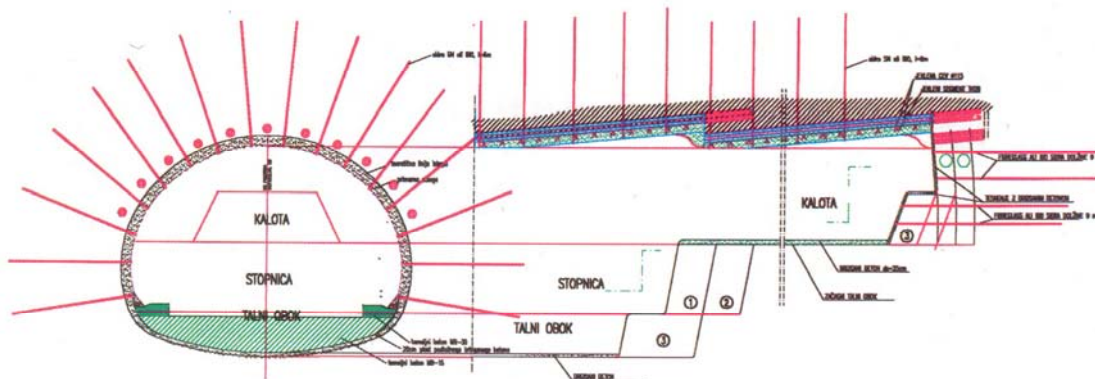


Slik 16: Vgradnja cevnega ščita (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

Cevni ščit ščit je bil vedno vgrajen v zgornji del stropne kalote ob upoštevanju prekrivanja 4 m do 6 m, kar je omogočilo varno napredovanje izkopa in vgradnjo podpornih elementov. Za ta namen je bila uporabljena vrtalna garnitura A.C. Boomer H352, pri čemer je moral izvajalec zaradi izkopa predorskih cevi z južne kot tudi severne strani za izvedbo cevnega ščita opremiti dve vrtalni garnituri. Večino vrtin za vgradnjo cevi je bilo izvedenih z vrtalno trehniko sistema BOODEX, ki je z vidika obrabe vrtalnega pribora in storilnosti relativno dobro ustrezal kriterijem pri vgradnji v mehkejših conah, medtem ko je bila v conah z menjavanjem mehkejših in trših hribin z vidika storilnosti boljša vrtalna tehnika ALWAG. Problemi, povezani s tem tehnološkim postopkom, so se zrcalili predvsem v neustrezni kakovosti vrtalnega pribora, kar je močno vplivalo na hitrost vgradnje.

2.2.3.2 Izkop kalote in vgrajeni podporni ukrepi

Vgradnji in injektiranju cevnega ščita je sledil izkop kalote predora. Vsa izkopna dela so bila izvedena z bagerji, redkejši odseki trše hribine pa so bili izkopani s hidravličnim kladivom, nameščenim na ustrezen bager.



Slika 17: Izkop in podpiranje predora Golovec (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

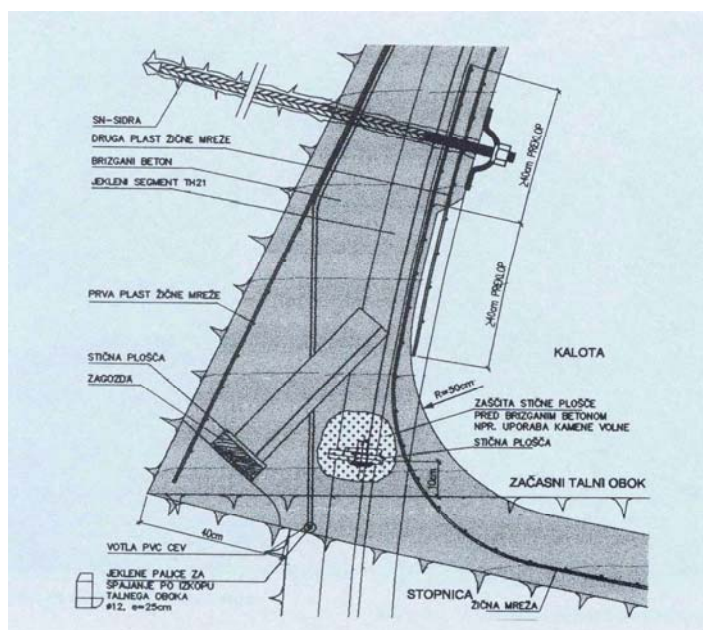
Bagerski izkop je zajemal pri koraku napredovanja 0.8 – 1.2 m najprej izkop 2.3 m širokega pasu hribine po obodu predora. Glede na lokalne geotehnične pogoje je izkop, ki mu je sledilo nakladanje in odvoz hribine na deponijo, potekal v več fazah ob takojšnjem nanašanju varovalne plasti mikroarmiranega betona debeline 15 cm.

Čelo kalote je bilo pri izkopu oblikovano skupaj z varovalnim jedrom, katerega velikost in oblika sta bila prilagojena trenutnim razmeram. Stabilnost varovalnega jedra je bila glede na hribinske pogoje največkrat zagotovljena z varovalnim obrizgom iz brizganega betona oziroma s sidri, armaturnimi mrežami in brizganim betonom debeline do 20 cm v conah s slabšimi hribinskimi karakteristikami.

Po končanem izkopu predpisanega koraka je sledila vgradnja armaturne mreže Q189, jeklenega predorskega loka z maso 29kg/m (TH 29) in druge nosilne plasti brizganega betona $d=20$ cm, tako da je debelina brizganega betona (mikroarmiranega in navadnega) pred izkopom naslednjega koraka znašala najmanj 35 cm.

Vgradnja sidrnega sistema je potekala po končanem krajšanju varovalnega jedra. Sidrni sistemi so v pretežni meri sestavljala IBO sidra dolžin 6 – 16 m. Tehnološki postopek vgradnje IBO sider je bil izbran zato, ker v tako neugodnih hribinskih razmerah ni bilo možno zagotoviti obstojnosti relativno dolgih sidrnih vrtin v času od zaključka vrtanja do vgradnje injektirne mase in nosilnega jeklenega sidrnega droga. Obenem je z vgradnjo sider potekala vgradnja druge plasti armaturne mreže Q189, po končanem injektiranju vgrajenih sider pa je sledila še vgradnja zadnje plasti brizganega betona debeline $d=15$ cm, s čimer je bila dosežena zahtevana debelina primarne obloge $d=50$ cm.

Poleg glavnih podpornih elementov je bil glede na sproti ugotovljene hribinske razmere v veliki dolžini kalote predora vgrajen začasni talni obok, s čimer je bila dosežena sklenitev primarne obloge predora že v kaloti, kar je skupaj z vgradnjo razširjene pete kalote (ang. elephant foot – slika 18) preprečevalo posedanje celotne kalote. Na nekaterih odsekih je zaradi prevelikih diferenčnih posedkov stropa in bokov kalote, ki so bili posledica ekstremno visokih hribinskih obtežb na primarno podporje, prihajalo do pojavljanja vzdolžnih razpok v stropu predorskih cevi. To je zahtevalo sanacijska dela v obliki dodatnega sidranja in ponovni spojitvi obloge iz brizganega betona v nosilni obroč okrog predorske cevi.



Slika18: Razširjena peta kalote (ang. elephant foot) (Vir: Teh. Informator SCT: December 1999)

2.2.3.3 Izkop stopnice in talnega oboka

Izkop stopnice in talnega oboka je potekal v polovični širini predorske cevi, saj je bila druga polovica namenjena dostopu in odvozu izkopane hribine pri izkopu kalote. Izkopna dela na stopnici so se izvajala z bagerjem in direktnim nakladanjem hribine na dumperje.

Sukcesivno se je izvajalo podaljšanje vseh podpornih elementov iz kalote v stopnico tako, da je skupna debelina brizganega betona tudi v stopnici znašala 50 cm. Dolžina vgrajenih sider v stopnici je znašala od 12 m do 16 m, odvisno od hribinskih razmer.

Izkop talnega oboka je potekal od globine -1.2 m pod niveleto cestišča ob bokih predora do globine -3.2 m v sredini predora. Dolžina posameznega odseka talnega oboka je v enem izkopnem koraku znašala največ 8.0 m. V izkopano in delno opaženo gradbeno jamo talnega oboka je bil v vsakem odseku vgrajen beton MB30. Da je bil nosilni obroč primarne obloge predorske cevi sklenjen, je moral biti talni obok v bokih predora v celotni dolžini izdelan pod oblogo iz brizganega betona. Sklenjen nosilni obok okrog predorske cevi ni dopuščal dodatnega posedanja, kar se je odrazilo na zelo hitrem umirjanju posedkov. Ta dogajanja so

posredno vplivala na izvajanje drugih del v predoru. Doseganje deformacijskega kriterija, ki je v danem primeru znašal 8 ± 2 mm/mesec, je omogočilo vgradnjo notranje obloge predora že v časovnem presledku dveh do treh tednov za dokončanim talnim obokom.

2.2.3.4 Časovni potek napredovanja

V projektu gradnje predora Golovec je bil načrtovan izkop v smeri južni portal (Malence) – severni portal (Bizovik), čemur se je prilagodil izvajalec SCT d.d. tako, da je postavil gradbišča na južnem portalu predora. Z izkopom predorske cevi D je izvajalec pričel v sredini junija 1997, medtem ko naj bi sledil izkop cevi C v časovnem zamiku 30 – 40 dni.

Izredno zahtevna hribinska zgradba na začetku zahodne cevi (D), ki so jo še dodatno poslabšali globok plaz na južnem pobočju Golovca in velike težave pri prehodu iz portala v rudarski del predora vzhodne cevi (C), so bile vzrok za zastoj, tako da je po spremembi tehnologije izkopa z uporabo cevnega ščita možno govoriti o pravem začetku izkopa predora šele v januarju 1998.

Zahtevani rok dokončanja gradnje, predvsem pa končana gradnja vsaj ene predorske cevi (zahodna cev - D) do predvidenega roka, je pogojeval pričetek izkopa tudi s severne strani, kjer pa zaradi nedokončanega osnovnega nasipa med viaduktom Bizovik in portali z izkopom predora ni bilo možno pričeti pred aprilom 1998.

Ves čas gradnje je izvajalec SCT – upošteval hribinske razmere ter velikost predorskih cevi – predvideval v kaloti izkop dveh korakov dolžine po 1.0 m na dan, čemur je z ustrezno dinamiko sledil tudi izkop stopnice in talnega oboka. Zaradi vgradnje cevnega ščita, ki je vsakič pomenila trenutno prekinitev izkopnih del v kaloti, je bilo potrebno zmanjšati povprečni načrtovani dnevni napredek na 1.5 m za vsako delovišče, kjer je potekalo napredovanje.

Ker je kljub vgradnji cevnega ščita in načrtovanih podpornih elementov še vedno na določenih odsekih prišlo do povečanih deformacij primarne obloge, so bila dela pri napredovanju v teh primerih ustavljena, dokler niso bila izvedena dodatna dela pri podpiranju

ali sanaciji že preveč deformirane obloge predora. Zato so napredki pri gradnji tega zahtevnega objekta resničen odsev zapletenih in zahtevnih geološko geotehničnih pogojev, ki so prisotni na širšem obravnavanem območju.

2.2.3.5 Opis zamikov tehnoloških faz gradnje glede na pogoje izvajanja del

Glede na ugotovljene geotehnične pogoje gradnje je bila v spremenjenem projektu izkopa predora Golovec podana zahteva, da mora biti talni obok v celotni širini predorske cevi zaključen v največji oddaljenosti 70 m od čela kalote.

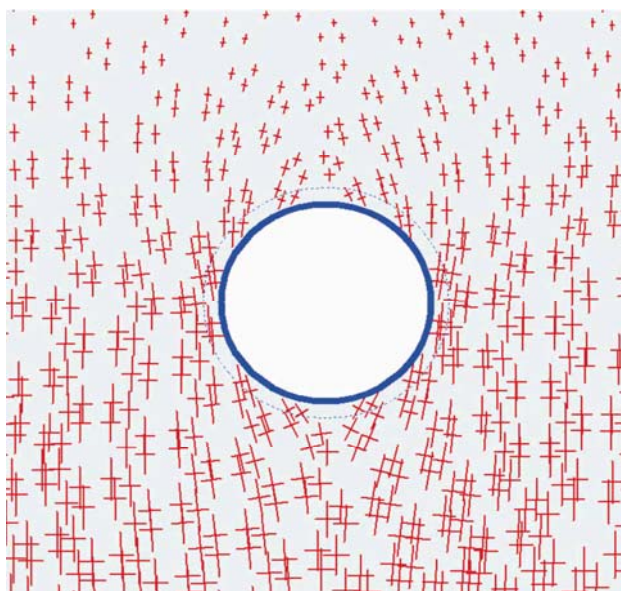
Navedena zahteva je predstavljala izvajalcu ob uporabi visoko zmogljive mehanizacije s pripadajočimi gabariti in upoštevanju tehnoloških zahtev, od katerih je bila izjemno pomembna tista, ki se je nanašala na takojšen nanos brizganega betona, ter zahtevani dinamiki izkopa, velike probleme predvsem pri zmanjševanju razdalje med kaloto in stopnico. V nasprotju s tem je vgradnja talnega oboka v razdalji 20-30 m za stopnico potekala brez težav.

Največji problemi pri krajšanju razdalje med kaloto in stopnico so nastopili v odsekih z nadpovprečno velikimi konvergencami, kjer so morale aktivnosti pri izkopu kalote zvezno slediti s takojšnjim nanosom varovalno-nosilne plasti mikroarmiranega brizganega betona.

3 OPIS NOVE AVSTRIJSKE METODE (NATM)

Nova avstrijska metoda gradnje predora (NATM – New Austrian Tunneling Method) je metoda, kjer je hribina ali zemljina v okolici predorske cevi vključena v obročni nosilni sistem podporja.

Z izkopom predora se spremeni primarno napetostno stanje hribine v neugodno sekundarno napetostno stanje. Kot »hribinski obroč« razumemo območje, kjer se prenašajo vertikalne napetosti okoli predora in s tem tvorijo obokani nosilni sistem – slika 19. Po aktiviranju hribinskega obroča je potrebno obdržati ali celo izboljšati nosilnost hribine, zato da to nosilnost izkoristimo in da vplivamo na ugoden razvoj sekundarnega napetostnega stanja. Cilj je obdržati triosne napetostno stanje za vse konstrukcijske faze ter zmanjšati situacije enoosnih in dvoosnih napetostnih stanj v hribini.



Slika 19: Potek napetosti okoli predorske cevi – razvije se t.i. »hribinski obroč«

Glavni principi NATM:

- obdržati nosilnost hribine; zmanjšati vpliv prevelike relaksacije hribine s faznim izkopom (slika 20) in takojšnjo vgradnjo podporja. Uporaba brizganega betona in sider blizu čela predora pomaga obdržati hribino nepoškodovano.



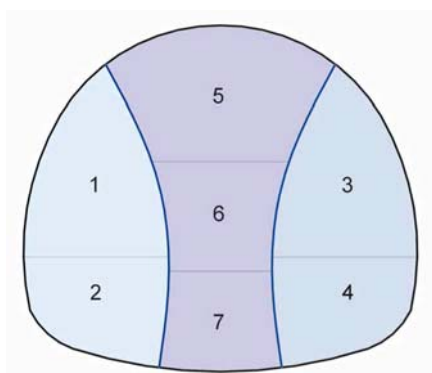
Slika 20: Razdelitev prečnega profila predora na faze gradnje

- čimbolj krožna oblika predora; odpraviti je potrebno koncentracije napetosti v vogalih, ki lahko povzročijo poškodbe primarne podgradnje.
- podajna obloga; lupina primarnega podporja mora biti podajna, da se zmanjšajo upogibni momenti
- merjenje pomikov predorske cevi; opazovanje obnašanja predora je integralni del NATM-ja. Z »monitoringom« in interpretacijo deformacij, napetosti in pritiskov je možno optimizirati tehnologijo in potrebne podporne ukrepe v naslednjem izkopnem koraku.

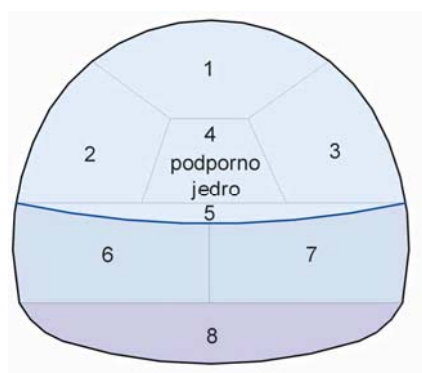
Značilnost te metode je sprotno prilagajanje načina podpiranja trenutnim razmeram v predoru glede na kategorijo hribine, v kateri se nahaja izkopno čelo. Osnovni princip NATM namreč temelji na enakomerni porazdelitvi pritiska hribine okoli predorske cevi med hribino in podporjem.

Če je podporje zelo togo, prevzame nase večji del pritiska, ki se ustvari z izkopom predorske cevi, zato se zaradi majhnih deformacij ne aktivira nosilnost hribine. Če je podporje podajno, se ob večjih deformacijah večina dodatnih napetosti prerazporedi po hribini, le manjši del

prevzame podporje. V primeru, da so deformacije tako velike, da jim podporje ne sledi brez poškodb, je potrebna sanacija porušenega dela predorske cevi (reprofilacija). V primeru, da predor gradimo pod urbanim območjem, moramo vgraditi zelo togo podporje, da zmanjšamo posedke površja. Posebno togo podporje je potrebno pri predorih, ki so grajeni pod urbanimi območji z nizkim nadkritjem. V tem primeru se spremeni tehnologija izkopa. Zaradi zmanjšanja vpliva izkopa na površje se zmanjša površina izkopa in poveča število izkopnih faz. Pri večjih prerezih se izvede stranske galerije (slika 21), pri manjših pa fazne izkope (slika 22).



Slika 21: Stranske galerije



Slika 22: Fazni izkop

4 MERJENJE PROSTORSKIH POMIKOV

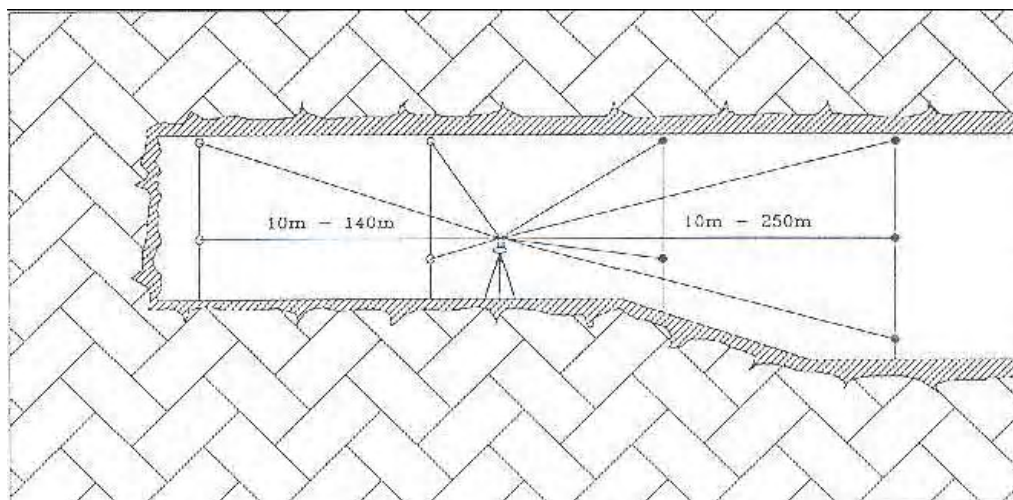
Merjenje prostorskih pomikov je sestavni del NATM. Običajne metode so osnovane na merjenju konvergenz med merskimi točkami z merskimi trakovi ali na merjenju pomikov hribinske mase z večtočkovnimi ekstenziometri. Te metode dajejo samo relativne rezultate, s katerimi se ne more zaznati vseh deformacij. Slabost merjenja konvergenz z merskimi trakovi je, da ne poznamo absolutnih položajev točk v prostoru, kajti rezultat meritve je le razdalja med dvema merjenima točkama.

Uporaba sodobnih optičnih 3-D merilnikov omogoča merjenje pomikov v absolutnih koordinatah. Običajno se za 3-D »monitoring« uporabljajo elektronske tahimetre, s katerimi merimo posebne merske točke, ki imajo tarčo z zelo natančno določenim središčem (slika 23).



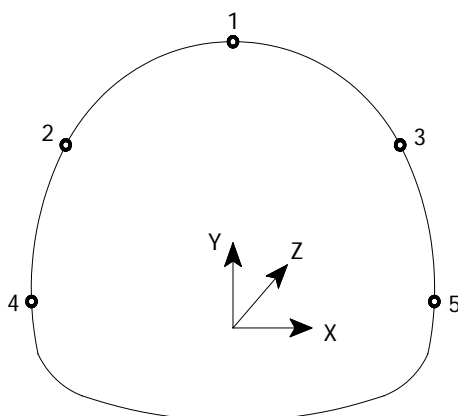
Slika 23: Merska točka vgrajena v predorsko oblogo

Merske točke se nahajajo v merskih profilih, ki naj bi si sledili na razdalji enega premera predorske cevi (slika 24). Pomembno je poudariti, da se meri pomike predorske obloge in ne pomike hribine!



Slika 24: Merjenje pomikov v predoru

Merski profil običajno sestavlja pet merskih točk, ki so vgrajene v primarni oblogi (slika 25). Prve tri se nahajajo v kaloti, zadnji dve pa v stopnici oziroma talnem oboku predora. Če je merski profil večji in če pričakujemo nesimetrično obnašanje predorske obloge, se lahko vgradijo dodatne merske točke. S pomočjo meritev merskih točk lahko sklepamo o delovanju nosilnega sistema primarnega podporja predora kot posledici delovanja okoliške hribine na podporje.



Slika 25: Razporeditev merskih točk po obodu predorske cevi

V predoru Golovec so se pomiki merili na dva različna načina:

- v primarni oblogi in v galerijah pri vhodu v predor, kjer se je uporabljala merska metoda 3-D merjenja z natančnostjo 2 mm (povprečna velikost pomika je bila 30 cm)

- v sekundarni oblogi, ki je bolj toga in zato se je uporabilo bolj natančno merjenje z merskimi trakovi z natančnostjo 0.3 mm

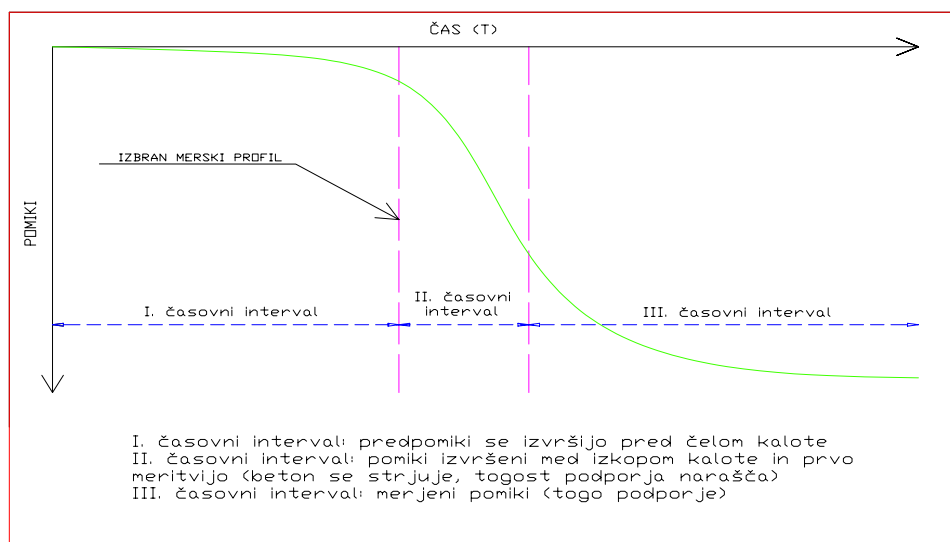
Če se katera od točk poškoduje med samo gradnjo, jo je takoj potrebno nadomestiti z novo točko in zabeležiti nove koordinate.

Merjenje pomikov se izvaja vsakodnevno v vseh merskih profilih, kjer pomiki še naraščajo. Ostalih profilov ni potrebno meriti vsak dan, ampak se izvajajo le še kontrolne meritve, ki povedo, kdaj se lahko prične z izvedbo sekundarne obloge predora.

5 GRAFIČNA PREDSTAVITEV MERITEV

5.1 Graf časovnega poteka pomikov

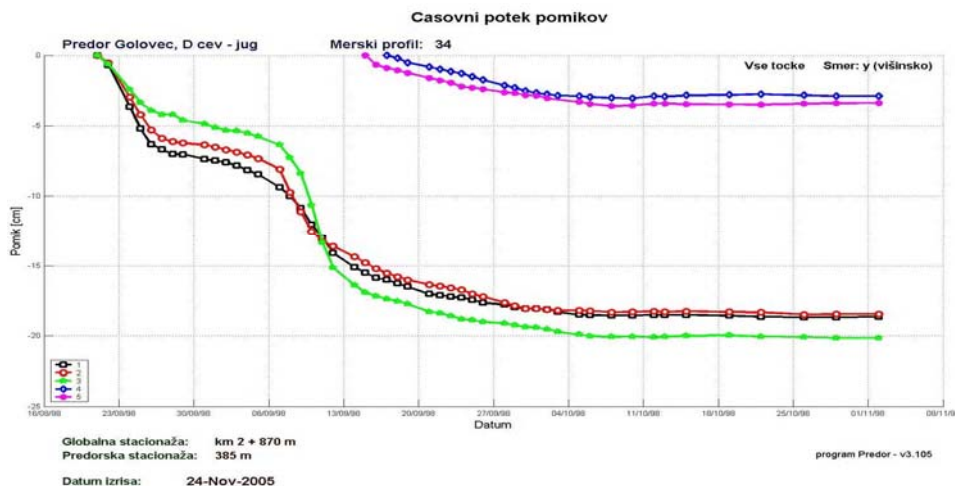
Ko kopljemo predor, porušimo napetostno ravnovesje lokalnega dela hribine. V območje svetlega profila predora vnesemo napetostno stanje »0« in če hočemo, da se predor ne poruši, moramo vgraditi podporje. Del napetosti, ki so se prenašale preko izkopane hribine, se prenese na okoliško hribino, pri čemer se ustvari »hribinski obroč«. Drugi del napetosti pa se prenese na podporje, ki mora biti dovolj togo, da prenese te napetosti in dovolj podajno, da se aktivira nosilnost hribine.



Slika 26: Časovni potek pomikov razdeljen na tri intervale

Pomike predorske obloge delimo v tri časovne intervale. Prvi del pomikov se izvrši pred čelom kalote, ker sega vplivno območje predora vsaj dva do tri premere prečnega predorskega profila naprej. Drugi del pomikov prispeva največji delež h končnim pomikom, izvršijo pa se v relativno kratkem času. Ti pomiki nastanejo v času med izkopom kalote in prvo meritvijo merskega profila. V tem času se še ni dokončno vzpostavil mehanizem hribinskega obroča, podporje pa je še relativno podajno, ker je trdnost vgrajenega brizganega betona sprva

majhna. V tretji časovni interval sodijo merjeni pomiki. V tem časovnem intervalu so se napetosti, nastale zaradi izkopa, v večji meri že prerazporedile na hribino in na podporje.



Slika 27: Normalni časovni potek pomikov v višinski smeri

Normalni časovni potek pomikov je prikazan na zgornji sliki (MP34). Prva meritev je bila izvedena dan po izkopu kalote. Očiten je velik naklon krivulje točk 1,2 in 3 v prvih petih dneh, nato se prirastki pomikov zmanjšajo. Ko se začne bližati stopnica merskemu profilu 34, se prirastki pomikov začno večati. Po vgradnji talnega oboka oziroma sklenitvi predorskega obroča je prirastek pomikov zelo majhen. Časovni pomiki se »umirijo« in začno limitirati proti 0.

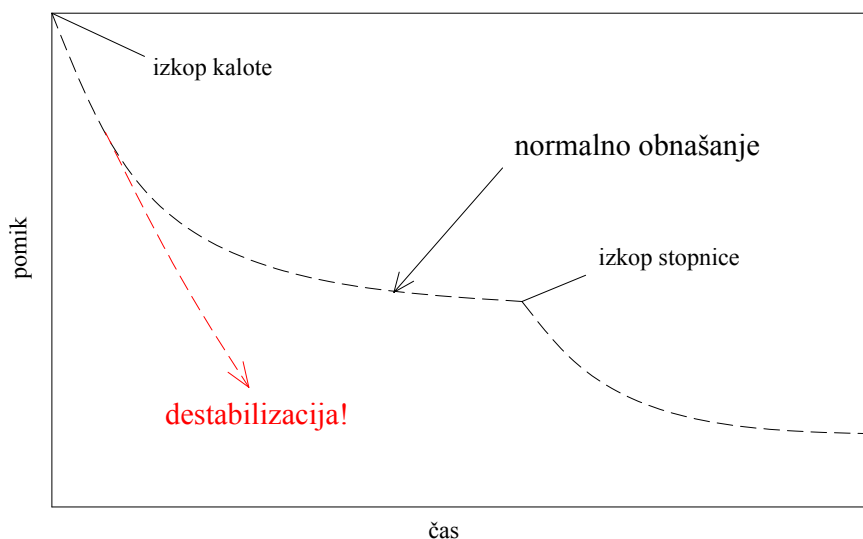
Pri merjenju pomikov primarne predorske obloge je pomembno, da se merske točke vgradi čim hitreje, ko čelo kalote preči stacionažo merskega profila in sicer zaradi relevantnosti meritev, interpretacije pomikov, ... (da »ujamemo« čimvečji del pomikov). V sodobnem času je zahteva, da se merske točke vgradijo in prva meritev izvede še isti dan (v zadnjem izkopnem koraku) po izkopu kalote in vgradnji podporja, nato se pomiki spremljajo vsak dan, dokler se le-ti ne »umirijo«.

Graf časovnega poteka pomikov je najbolj osnovni izris, ki služi predvsem za spremljanje obnašanja pomikov. Ob predpostavki enakomernega izkopa kalote se mora prirastek pomikov s časom zmanjševati. Kakršnokoli povečanje prirastka pomikov pomeni destabilizacijo (slika

28), razen če v bližini opazovanega prečnega prereza ne potekajo kakršnekoli gradbene aktivnosti (izkop stopnice ali talnega oboka). Običajno se po sklenitvi obroča opazovani prerez stabilizira in prirastek pomikov pade na ničelno raven.

Značilnosti grafa časovnega poteka pomikov:

- ločeno so prikazane posamezne komponente vektorja pomikov (navpični, prečni, vzdolžni pomiki) v odvisnosti od časa
- možnost prikaza več točk na istem grafu
- običajno prikažemo vse aktivnosti gradnje (izkop kalote, stopnice, talni obok) na istem grafu
- graf časovnega poteka pomikov je najbolj osnovni izris, ki nam pomaga oceniti proces stabilizacije določenega merskega profila
- padanje velikostnega reda pomikov naznanja boljše geološko-geotehnične pogoje, naraščanje pa slabše

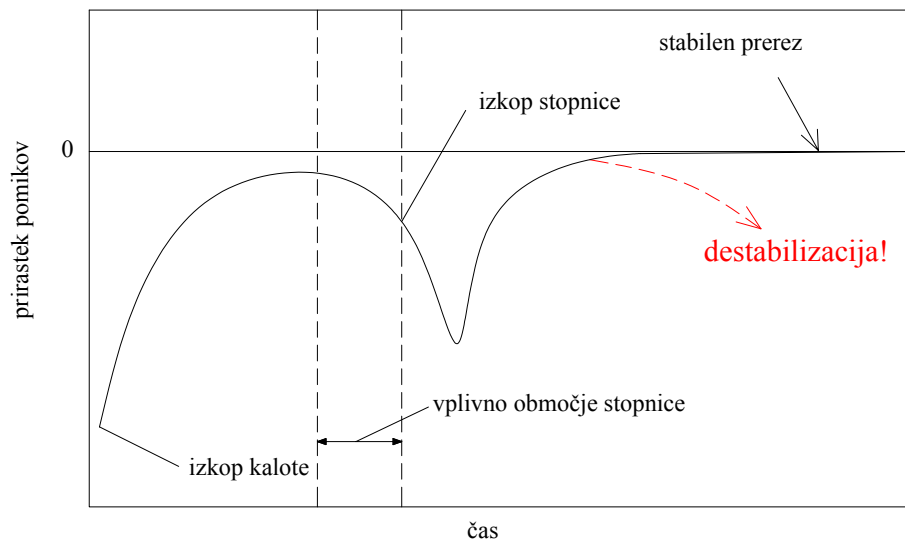


Slika 28: Značilni graf časovnega poteka pomikov, ki prikazuje pričakovano obnašanje opazovanega prereza ter znamenje destabilizacije (Klopčič, 2004)

5.2 Graf prirastkov pomikov

Osnovni namen grafa prirastkov pomikov je spremljanje procesa stabilizacije ter zgodnje odkrivanje možnih nestabilnosti predorske cevi:

- ločeno so prikazani prirastki posameznih komponent vektorja pomikov (navpični, prečni, vzdolžni pomiki) v odvisnosti od časa
- možnost istočasnega prikaza več merskih točk
- običajno prikažemo vse aktivnosti gradnje (izkop kalote, stopnice, talni obok) na istem grafu
- osnovni namen te vrste izrisa je spremljanje procesa stabilizacije ter zgodnje odkrivanje možnih nestabilnosti predorske cevi
- naše poznavanje o sklepanju razmer pred čelom je še vedno preskromno



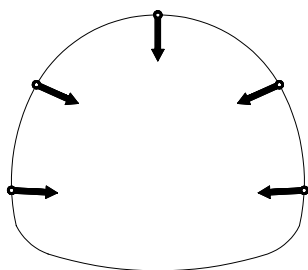
Slika 29: Značilni graf prirastkov pomikov, ki prikazuje pričakovano obnašanje opazovanega prereza ter znamenje destabilizacije (Klopčič, 2004)

5.3 Graf vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu

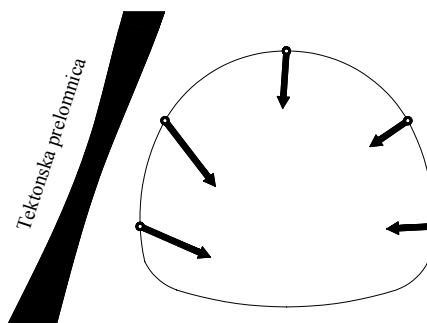
Merjenje absolutnih pomikov nam omogoča, da si ustvarimo prostorsko sliko pomikov predorske cevi. Graf vektorjev pomikov v določenem prečnem in vzdolžnem prerezu predstavlja naklon vektorja pomikov v prostoru ter njegov razvoj skozi čas.

Graf vektorjev pomikov v prečnem prerezu nam omogoča, da določimo tektonizirana območja ter območja slabše hribine izven področja izkopa (levo in desno od predorske osi – sliki 30 in 31) ter zagotavlja dodatne informacije o strukturi hribine ter deformacijskih fenomenih subparalelno s predorsko osjo. Glavne značilnosti grafa vektorjev v prečnem in vzdolžnem prerezu:

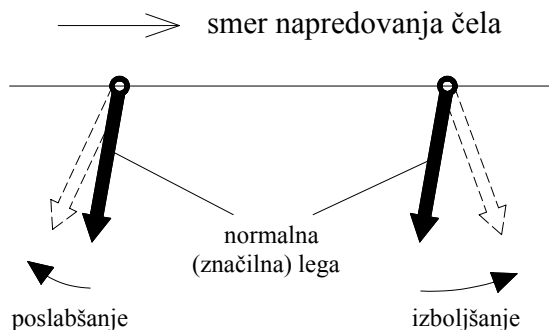
- omogoča nam, da določimo tektonizirana območja ter območja slabše hribine izven področja izkopa (levo in desno od predorske osi)
- zagotavlja nam dodatne informacije o strukturi hribine ter deformacijskih fenomenih subparalelno s predorsko osjo
- omogoča nam, da lahko na podlagi orientacije vektorja določimo, ali se pred čelom nahaja hribina z boljšimi ali slabšimi lastnostmi kot hribina, v kateri se čelo trenutno nahaja – slika 32
- opozori tudi na anomalije v vzdolžnih pomikih za točke na nasprotnih bokih predorske cevi



Slika 30: Značilna slika vektorjev pomikov v prečnem prerezu pri gradnji predora v homogeni hribini (Steindorfer, 1998)



Slika 31: Značilna slika vektorjev pomikov v prečnem prerezu, ki naznanja skorajda navpično tektonsko prelomnico tik zraven leve stene predorske cevi (Steindorfer, 1998)



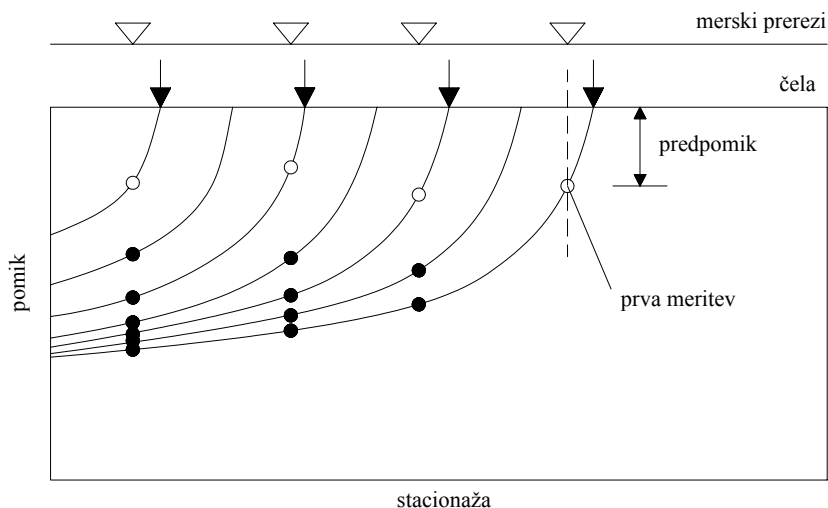
Slika 32: Prikaz vpliva izboljšanja oz. poslabšanja geološko-geotehničnih pogojev na odklon vektorja pomikov od normalne (značilne) lege (Klopčič, 2004)

5.3 Graf vplivnic

Zaradi tehnologije in organizacije dela prva meritve posameznih merskih točk v različnih opazovanih prerezih ne more biti vedno opravljena na enaki razdalji za čelom predora. Razliko v razdaljah med prvo meritvijo in ter čelom v različnih prečnih prerezih odpravimo tako, da na čelu privzamemo velikost pomika 0, merjenim podatkom pa dodamo izračunane oz. ocenjene predpomike (pomike, ki so se zgodili med izkopom kalote ter prvo meritvijo položaja merskih točk opazovanega prečnega profila) – slika 33.

- konstruiramo jih tako, da povežemo vzdolž predorske osi istočasno izmerjene pomike merskih točk, na istem grafu pa prikažemo niz vplivnic, ločeno po posameznih komponentah vektorja pomikov ter ločeno za posamezne merske točke
- na istem grafu prikažemo različne faze gradnje predora (izkop kalote, stopnice in talnega oboka), kar omogoča opazovanje odvisnosti med aktivnostmi gradnje in izmerjenimi pomiki
- graf vplivnic omogoča:
 - dobro primerjavo pomikov vzdolž predorske osi
 - pridobitev informacije o obnašanju predora v vzdolžni smeri
 - možnost ugotavljanja trendov naraščanja in padanja togosti hribine
 - pogojno ekstrapolacijo pomikov pred čelo predora

- s pomočjo vplivnic lahko ocenimo karakteristike hribine za en ali dva izkopna koraka vnaprej, izjemoma pa do polovice premera predorske cevi pred čelo predora



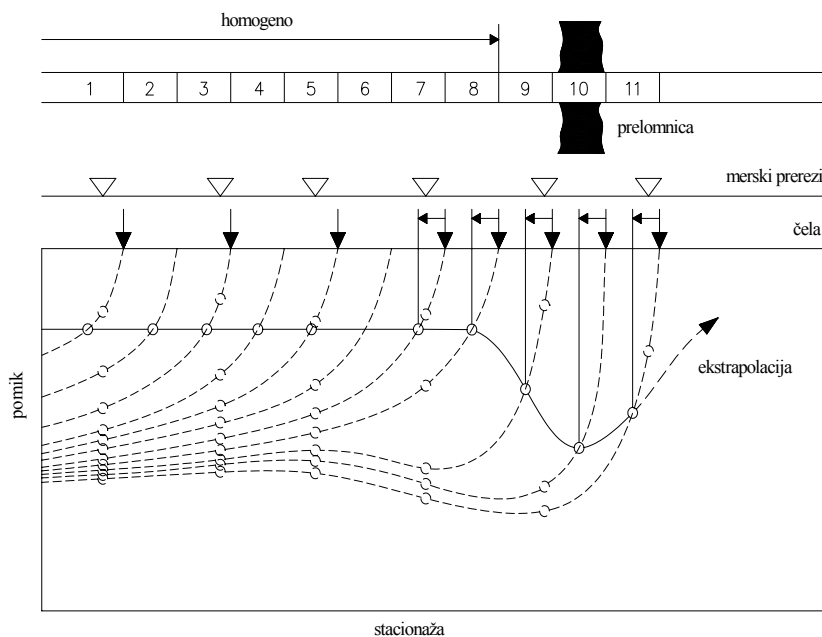
Slika 33: Prikaz konstrukcije vplivnic (Steindorfer, 1998)

5.4 Trendna črta, konstruirana iz vplivnic

Konstruiramo jo tako, da povežemo na vplivnicah vzdolž predorske osi točke, ki se nahajajo na konstantni razdalji za napredujočim čelom predora – slika 34.

Lastnosti:

- omogoča nam dober pregled razvoja pomikov vzdolž predorske cevi in ekstrapolacijo pomikov pred čelo predora
- služi za določitev potrebnega podporja na podlagi primerjav vzorca deformacij prereza v gradnji z že zgrajenimi odseki
- črta, ki je izrisana bližje čelu, bolj izrazito kaže spremembe trendov pomikov, je pa tudi bolj občutljiva na napake ter moteče dejavnike, kot sta neenakomerno napredovanje čela kalote in oddaljenost prve meritve od izkopnega čela
- trendna črta omogoča napoved obnašanja hribine do enega premera predorske cevi pred čelom predora

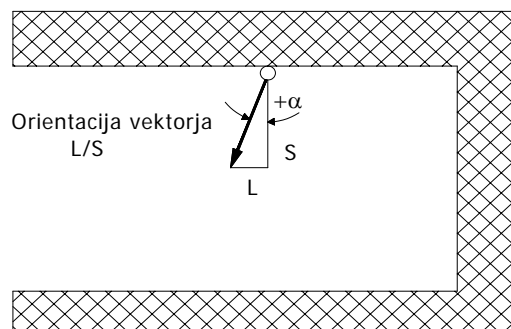


Slika 34: Prikaz konstruiranja trendne črte; shematični prikaz trendne črte pri gradnji predora v homogeni hribinski masi ter pri prečanju tektonske prelomnice (Steindorfer, 1998)

5.6 Trendna črta orientacije vektorja pomikov

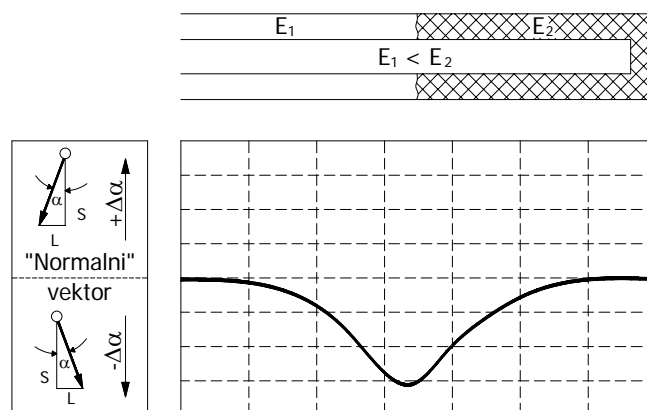
Ko se izkopno čelo približuje območju oslabiljene hribinske mase, je relativni prirastek vzdolžnih pomikov večji kot relativni prirastek radialnih (višinskih in prečnih) pomikov, smer vzdolžnih pomikov v tem primeru kaže v nasprotno smer napredovanja čela izkopa:

- izražena je kot razmerje med višinskimi in vzdolžnimi pomiki; predstavlja torej naklon vektorja pomikov v vzdolžni navpični ravnini – slika 35

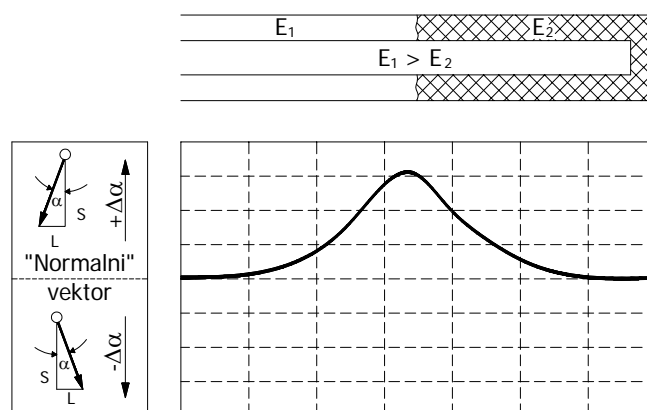


Slika 35: Orientacija vektorja pomikov (Steindorfer, 1998)

- orientacija vektorja pomikov je odvisna od kakovosti in homogenosti hribine, ki se nahaja pred izkopnim čelom – sliki 36 in 37



Slika 36: Značilno obnašanje trendne črte orientacije vektorja pomikov, ko se izkopno čelo približuje in vstopi v območje trše hribine (Steindorfer, 1998)



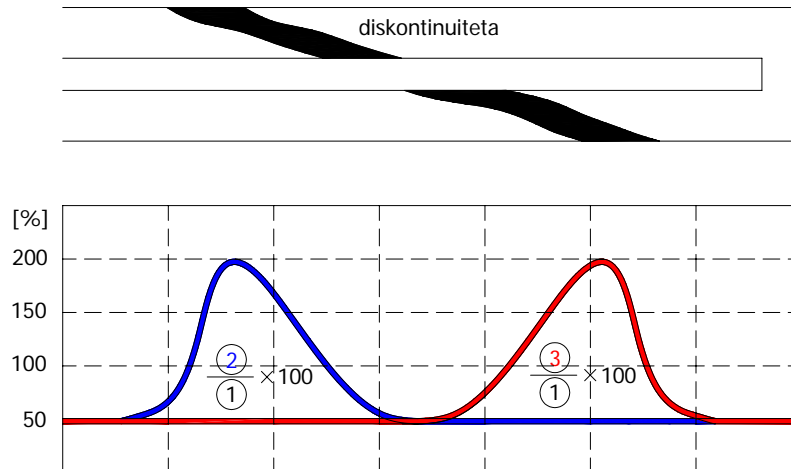
Slika 37: Značilno obnašanje trendne črte orientacije vektorja pomikov, ko se izkopno čelo približuje in vstopi v območje mehkejše hribine (Steindorfer, 1998)

- s sistematičnim opazovanjem in analizo trendov orientacije vektorja lahko sklepamo o lastnostih hribinske mase do 2 premera predorske cevi pred izkopno čelo
- orientacija vektorja je zelo nezanesljiva v prvih dneh meritev posameznega merskega prereza, kajti pomiki v vzdolžni smeri so še zelo majhni

5.7 Trendna črta razmerja med dvema točkama

Za predore z nizkim nadkritjem nam izris trendne črte razmerij razlik pomikov temenske in bočne točke nudi informacije o obremenjenosti podporja zaradi izkopa kalote, iz izrisa trendne črte razmerja razlik pomikov temenske in površinske točke pa lahko razberemo morebitno porušitev hribinske mase v bližini izkopnega čela kalote:

- s tem načinom predstavitve meritev prikazujemo trendno črto razlike ali pa količnika med istosmernimi pomiki dveh točk
- zadnje analize (Sellner, 2004) kažejo, da se v večini primerov bolje obnesejo izrisi trendnih črt količnikov pomikov kot pa razlik pomikov, kajti slednji izris je zelo občutljiv na hitre spremembe togosti hribinske mase
- trendna črta količnika pomikov lahko nekaj izkopnih korakov oz. nekje do 1.5 premera predorske cevi vnaprej pokaže spremembo togosti hribine, ki seka predorsko os pod ostrim kotom.



Slika 38: Značilno obnašanje trendne črte količnika istosmernih pomikov dveh merskih točk, ko se izkopno čelo približuje ter preči diskontinuiteto, ki seka predorsko os pod ostrim kotom (Klopčič, 2004)

6 ANALIZA MERJENIH POMIKOV V PREDORU GOLOVEC

Podatke za analizo merjenih pomikov v predoru Golovec sem dobil na Zavodu za gradbeništvo Republike Slovenije (ZAG).

Predor Golovec je bil prvi predor v Sloveniji, v katerem so se v sklopu geološko-geotehniške spremljave gradnje merili 3D pomiki merskih točk. Od izgradnje predora do danes je minilo že sedem let, zato so bili podatki nekoliko pomanjkljivi, merske napake so bile relativno velike, prve meritve so se v določenih merskih profilih zaradi nedoslednosti izvajalca izvajale prepozno, marsikateri merski profil pa je bil med sanacijami poškodovane predorske obloge poškodovan ali uničen. Zaradi omenjenih nepopolnosti je bilo veliko dela z urejanjem in dopolnjevanjem vhodnih podatkov, ki sem jih kasneje vnesel v računalniški program *Predor*.

Omenjeni program je bil izdelan na UL FGG (Katedra za mehaniko tal z laboratorijem) leta 2004. Prednost *Predora* je v enostavnem vnosu podatkov, številnih grafičnih prikazih (izrisi so predstavljeni v 5. poglavju), ima sposobnost »napovedi« zgradbe hribine za nekaj izkopnih korakov naprej ter določitvi nivoja končnih pomikov v opazovanem prečnem profilu na podlagi nekaj meritev pomikov merskih točk.

Predor uporablja predorsko stacionažo v smeri izkopa (za vsa štiri delovišča ločeno), merski profili, ki sem jih dobil na ZAG-u, pa so merjeni v globalnih stacionažah vzhodne ljubljanske obvoznice Šentjakob – Malence. V naslednjih tabelah (tabele 4-7 za vsako delovišče posebej) so navedeni merski profili v predorski stacionaži v prvem stolpcu, v ostalih treh stolpcih pa je število dni od izkopa kalote do izvedbe prve geodetske meritve na obravnavanem merskem profilu za vsako točko kalote.

Tabela 4: Merski profili v zahodni cevi (D) – sever in število dni od izkopa kalote do izvedbe prve meritve

zahodna cev (D) - sever			
predorska stacionaža (m)	temenska točka (dni)	točka v levem boku kalote (dni)	točka v desnem boku kalote (dni)
25	4	8	4
31	18		
39	4	3	3
50	3	3	3
64	4	4	4
81	2	2	2
97	1	4	1
119	1	4	1
141	3	3	3
169	2	2	2

Tabela 5: Merski profili v zahodni cevi (D) – jug in število dni od izkopa kalote do izvedbe prve meritve

zahodna cev (D) - jug			
predorska stacionaža (m)	temenska točka (dni)	točka v levem boku kalote (dni)	točka v desnem boku kalote (dni)
39	19		
43	30	9	9
58	26	5	26
64	72	31	76
69	66	151	151
74	69	69	69
80	60	55	55
86	25	25	25
90	9	9	12
95	14	1	9
100	74	74	84
105	115	81	96
110	8	2	2
120	8	10	12
133	3	5	5
151	79	4	6
156	78	3	3
162	77	6	6
177	5	75	2
198	1	1	1
211	1	1	1
223	2	2	2
242	2	3	2
253	4	4	4
275	9	9	9
302	1	1	1
322	3	3	35
344	4	4	4
366	7	3	3
385	2	2	2
398	5	5	5

Tabela 6: Merski profili v vzhodni cevi (C) – sever in število dni od izkopa kalote do izvedbe prve meritve

vzhodna cev (C) - sever			
predorska stacionaža (m)	temenska točka (dni)	točka v levem boku kalote (dni)	točkav desnem boku kalote (dni)
33	3	3	3
49	6	6	6
74	7	7	7
86	53	6	6
103	2	8	2
119	3	3	3
138	5	4	4

Tabela 7: Merski profili v vzhodni cevi (C) – jug in število dni od izkopa kalote do izvedbe prve meritve

vzhodna cev (C) - jug			
predorska stacionaža (m)	temenska točka (dni)	točka v levem boku kalote (dni)	točka v desnem boku kalote (dni)
29	86	86	86
35	28	18	18
40	24	39	13
45	6	5	108
49	16	16	93
55	3	3	3
62	5	5	5
73	1	1	1
81	5	8	8
100	8	8	8
111	6	6	6
114	79	79	79
119	22	22	22
122	63	63	63
126	10	10	10
135	234	234	234
144	210	210	210
149	1	1	1
162	2	2	2
180	5	5	5
198	5	4	5
216	4	4	4
229	5	5	5
246	1	4	4
268	1	7	7
291	3	1	1
310	6	6	6
327	2	2	2
343	1	1	1
364	1	1	2

Potemnjeni so tisti merski profili, pri katerih je bila prva meritev vsaj dveh točk merskega profila kalote izvedena deset ali več dni za izkopsnim čelom kalote. Te profile sem izločil iz svoje analize, ker se je prevelik del pomikov že izvršil, preden se je zabeležila prva meritev. Večino merskih profilov sem navedel v prilogi diplomske naloge v obliki poročil, kjer je poleg časovnega poteka vseh treh komponent pomikov, vektorja pomikov v prečnem in

vzdolžnem prerezu ter faz izgradnje, prisoten tudi geološki popis čel, katerega je moral opisati in narisati dežurni geolog na terenu za vsak izkopni korak posebej.

Kljub nedoslednosti izvajanja meritev so bili v predoru Golovec izmerjeni veliki pomiki (tabela 8) glede na relativno nizko višino nadkritja. Razlog je v neugodni geološki sestavi prostora, velikem prečnem profilu (tripasovni predor), tehnologiji gradnje predora...

Tabela 8: Maksimalni pomiki merskih točk

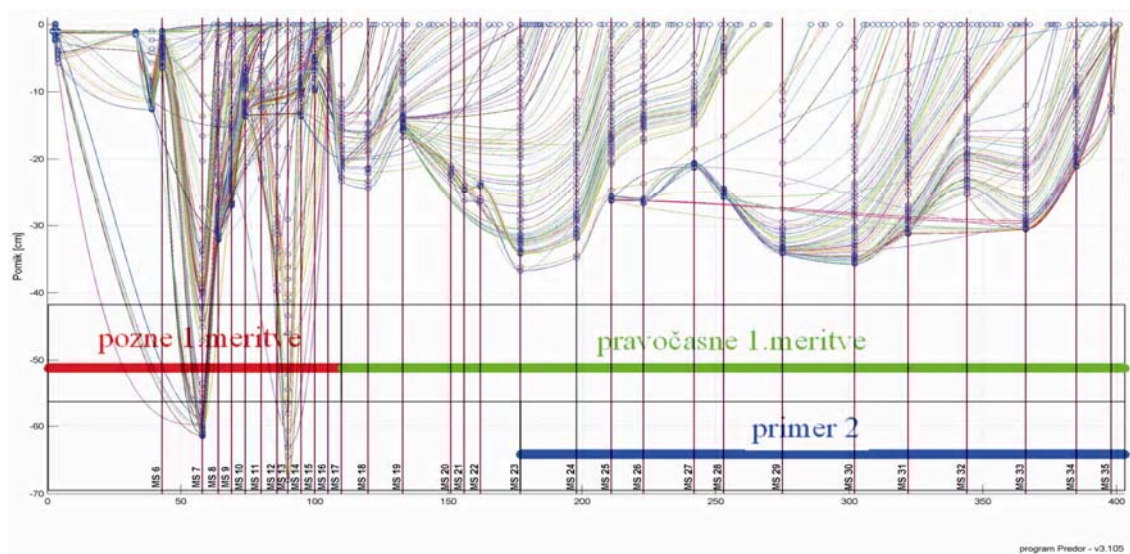
Maksimalni pomiki (cm)	vzhodna cev (C) - jug	vzhodna cev (C) - sever	zahodna cev (D) – jug	zahodna cev (D) - sever
vzdolžni - naprej	14	6	10	8
vzdolžni - nazaj	12	7	7	15
prečni	35	7	19	8
višinski	68	36	58	40

V zgornjo tabelo sem vnesel maksimalne pomike merskih točk za vsako delovišče ločeno. Kot je pričakovano, so največji pomiki v višinski smeri, relativno veliki pa so prečni smeri. Normalno je, da je vektor pomikov usmerjen v izkopani prostor, a kot vidimo iz tabele, so vzdolžni pomiki, ki so usmerjeni naprej, zelo veliki. V nadaljevanju analize sem obravnaval območja, ki sem jih navedel v spodnji tabeli.

Tabela 9: Obravnavani detajlni primeri

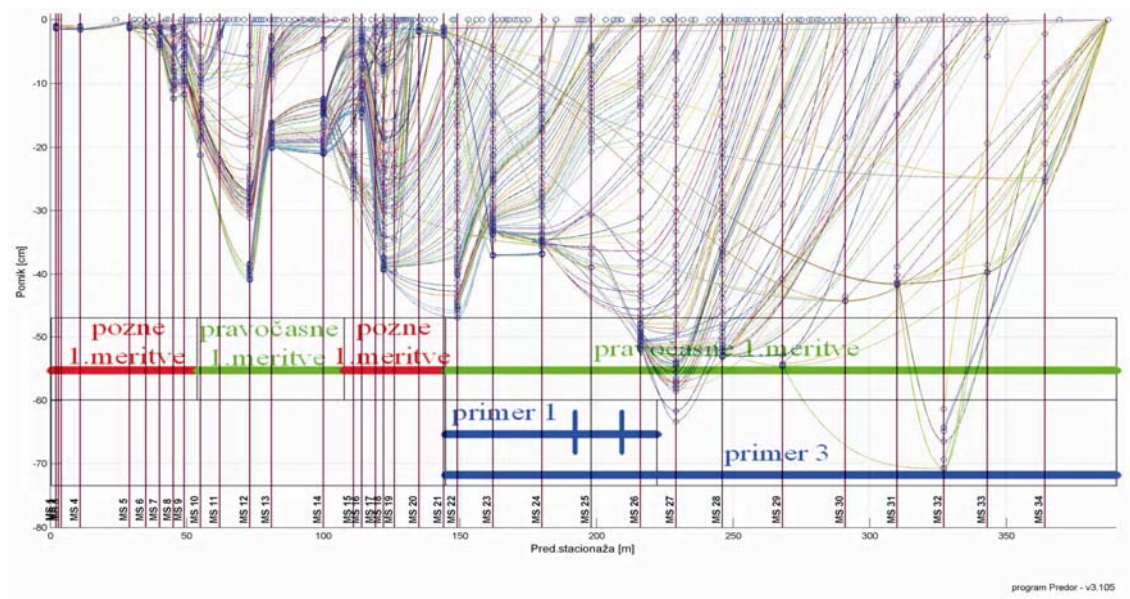
	Primer	merski profil	globalna stacionaža	predorska stacionaža
Primer 1:	velik pomik desnega boka v vzhodni cevi (C)	MP17 – MP22	km 3.0+75 – km 2.9+95	149 m – 229 m
Primer 2:	vzdolžni pomiki v zahodni cevi (D)	MP17 – MP29	km 3.0+78 – km 2.8+57	177 m – 398 m
Primer 3:	pomik temenske točke v vzhodni cevi (C)	MP17 – MP28A	km 3.0+75 – km 2.8+60	149 m – 364 m

Spodnja slika (slika 39) prikazuje graf vplivnic v zahodni cevi (cevi D) na južnem delovišču za točko 1 v vertikalni smeri. Označena so polja, kjer so se vršile pozne oz. pravočasne prve meritve. Označen je tudi *Primer 2*, kjer sem opisal potek vzdolžnih pomikov.



Slika 39: Graf vplivnic za zahodno cev (D) – južno delovišče

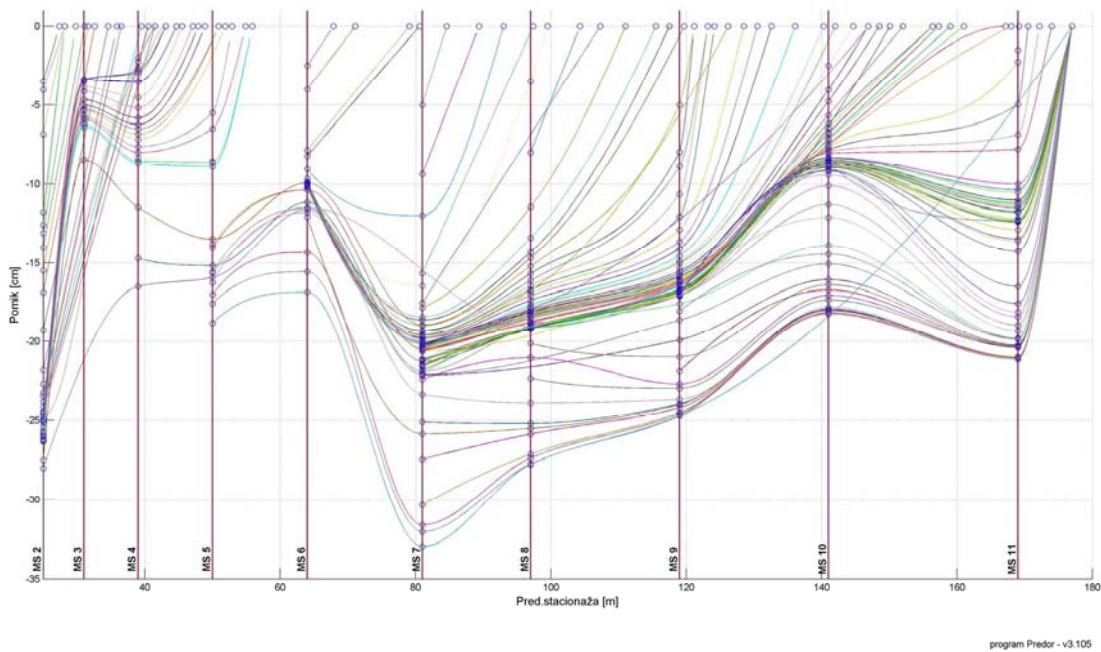
Na spodnji sliki vplivnic (vzhodna cev jug) lahko vidimo potek pomikov temenske točke vzdolž predorske osi. Vidni so maksimalni izmerjeni pomiki v vertikalni smeri, ki dosežejo velikostni razred do 75 cm. Na omenjenem odseku sem opisal *Primer 1* (velik pomik desnega boka predora) in *Primer 3* (pomik temenske točke).



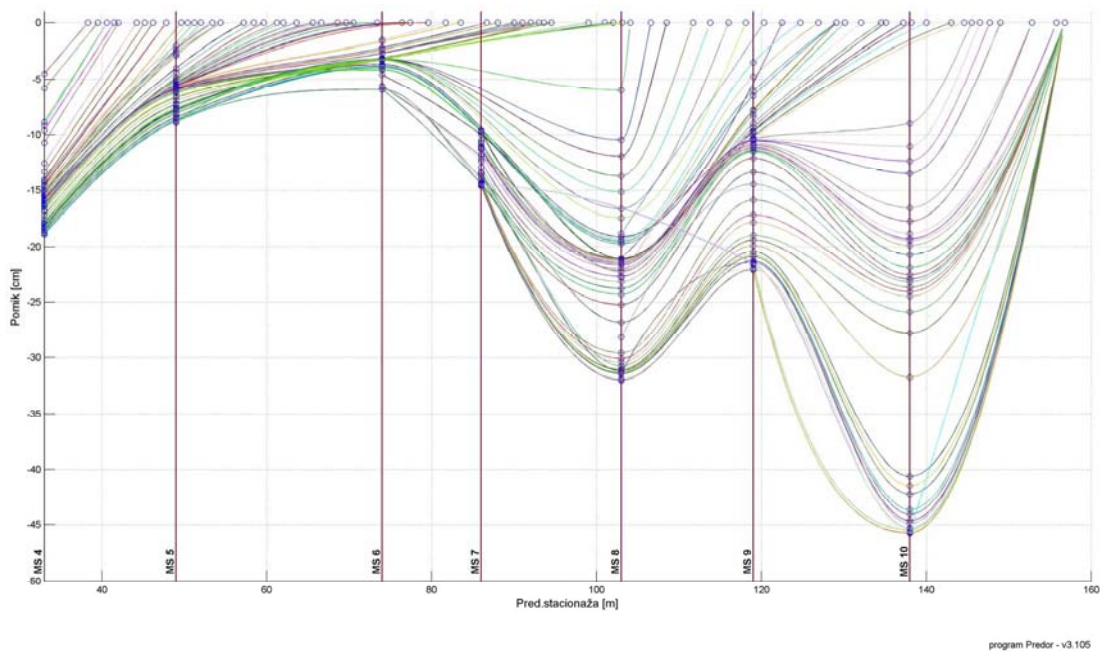
Slika 40: Graf vplivnic za vzhodno cev (C) - južno delovišče

Na naslednjih dveh slikah so podobno kot za obe južni delovišči prikazani pomiki obeh severnih delovišč. Iz tabel 4 in 6 je razvidno, da so bile na obeh omenjenih odsekih 1. meritve

izvedene dovolj kmalu za napredujočim čelom za potrebe analize. A zaradi kratkih odsekov (dolžina okoli 170 m) ter toge podgradnje v območju obeh portalov nisem na severnih deloviščih našel posebnosti v izmerjenem odzivu predora.

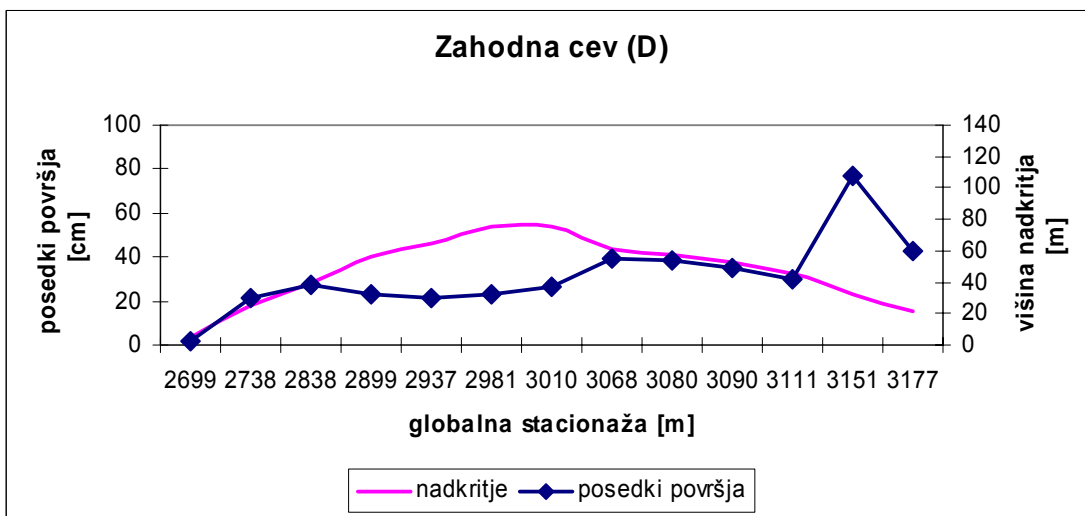


Slika 41: Graf vplivnic za zahodno cev (D) – severno delovišče

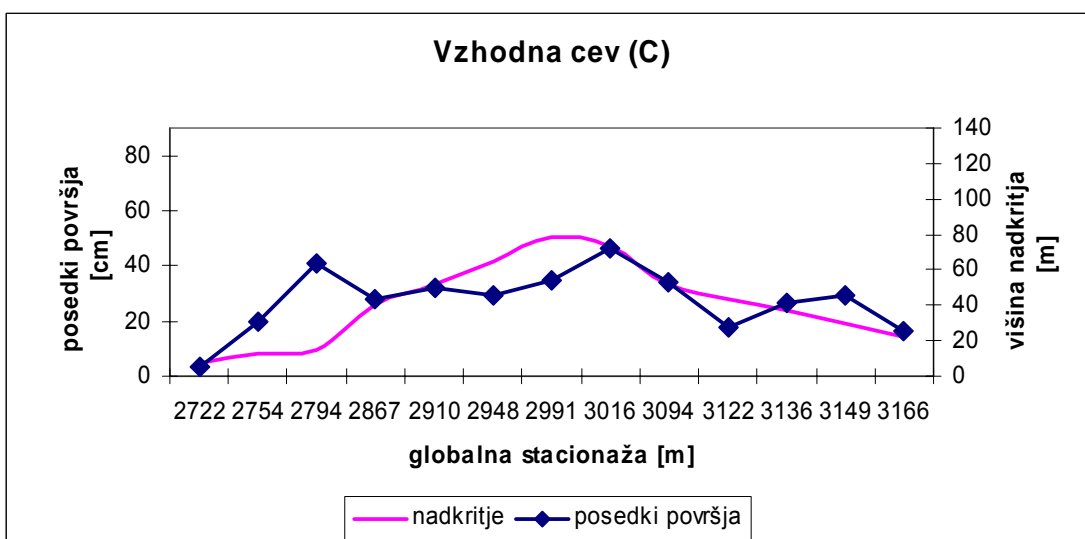


Slika 42: Graf vplivnic za vzhodno cev (C) – severno delovišče

V predoru Golovec je bilo vgrajenih 97 merskih profilov, ki si v povprečju sledijo vsakih 11 m. Na dveh merskih profilih je bilo vgrajenih in merjenih sedem merskih točk. Poleg omenjenih meritev se je merilo tudi posedanje površja na območju celotnega predora, pri čemer je bil na enem merskem mestu izmerjen pomik velikostnega reda skoraj 80 cm – slika 43. K sreči območje nad predorom ni poseljeno, sicer bi bila gradnja še dodatno otežena, ker graditelji ne bi smeli dopuščati velikih deformacij na površju in bi morali uporabiti povsem tega podporje in drugo tehnologijo izgradnje predora.



Slika 43: Graf posedkov površja in višina nadkritja nad zahodno cevjo (D)

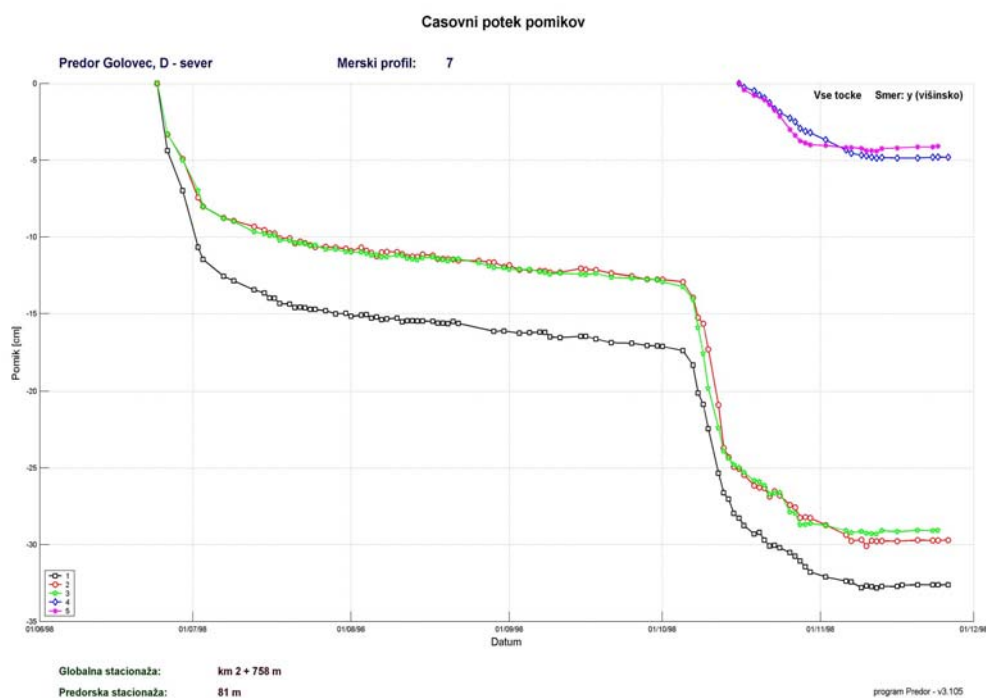


Slika 44: Graf posedkov površja in višina nadkritja nad vzhodno cevjo (C)

6.1 Velik vpliv stopnice na velikost pomikov

Na območju celotnega predora je bil v celotnih pomikih opažen velik delež pomikov zaradi izkopa stopnice. Kot smo omenili, so glavni razlogi za tako obnašanje neugodna geološka sestava, velik prečni profil predora in tehnologija izgradnje predora.

Ugotovljena je bila izjemno heterogena sestava hribine s prevladovanjem skrilavega meljevca in glinovca ter zdrobljenega in močno prepustnega kremenčevega peščenjaka. Taka geološka zgradba prostora dovoljuje velike deformacije, ki se tudi prenašajo na primarno predorsko oblogo.



Slika 45: Časovni potek pomikov – velik vpliv stopnice na velikost pomikov

Razdalja med čelom kalote in stopnice mora biti večja od vplivnega območja stopnice. Ko se torej prirastek pomikov na določenem merskem profilu zaradi izkopa kalote začne zmanjševati, se prične z napredovanjem izkopnega čela stopnice. V predoru Golovec je bil del izmerjenih pomikov zaradi izkopa kalote približno enako velik kot del pomikov zaradi izkopa stopnice. Razlog za takšno razmerje pomikov je velik prečni profil (predor Golovec je

tripasovni predor) in izgradnja predora v slabo nosilni hribinski masi. Na sliki 45 prikazanem merskem profilu, kjer so bile prve meritve izvršene dva dni po izkopu kalote, vidimo 60% delež pomikov zaradi izkopa stopnice. Ne pozabimo, da so to le izmerjeni pomiki in da je delež pomikov zaradi izkopa kalote lahko veliko večji.

V spodnji tabeli vidimo delež pomikov zaradi izkopa kalote in delež pomikov zaradi izkopa stopnice. Opazimo, da je sta si deleža približno enaka. Povprečje deleža izmerjenih pomikov zaradi izkopa kalote je 54%, povprečje deleža pomikov zaradi vpliva stopnice pa 46%.

Tabela 10: Delež velikosti pomikov zaradi vpliva izkopa kalote in stopnice (zahodna cev – D jug)

Kalota:

Merski profil v predorski stac.	temenska točka	točka na levem boku kalote	točka na desnem boku kalote
198	61%	61%	57%
211	61%	72%	52%
223	46%	51%	47%
242	48%	44%	43%
302	76%	76%	74%
385	41%	36%	26%
povprečje:	56%	57%	60%

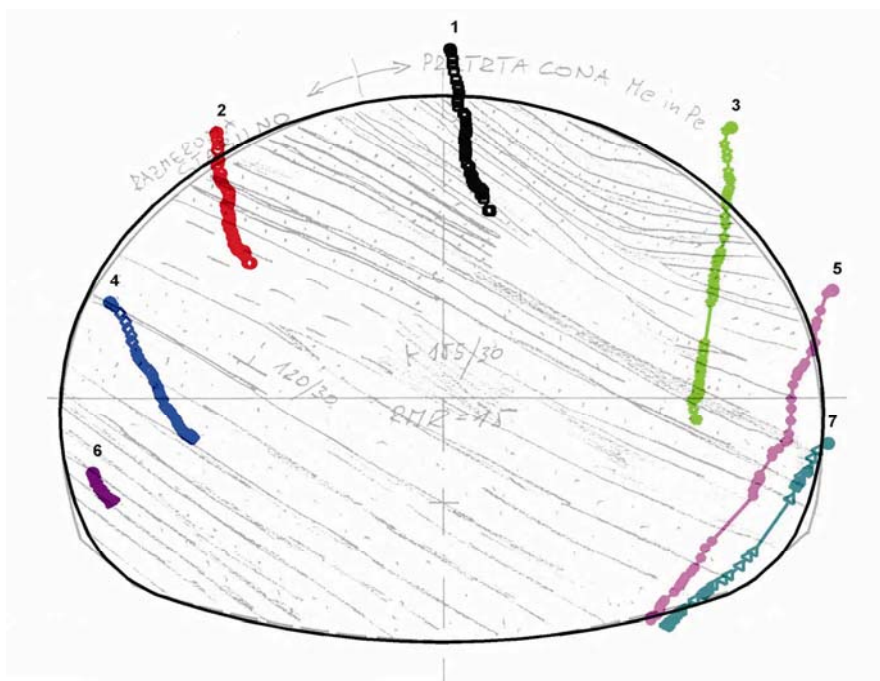
Stopnica:

Merski profil v predorski stac.	temenska točka	točka na levem boku kalote	točka na desnem boku kalote
198	39%	39%	43%
211	39%	28%	48%
223	54%	49%	53%
242	52%	56%	57%
302	24%	24%	26%
385	59%	64%	74%
povprečje	59%	64%	74%

6.2 Velik pomik desnega boka predora

V cevi C je na predorski stacionaži od 149 m do 229 m opažen velik pomik desnega boka predora v primerjavi z levim bokom. Na tem odseku je hribina na desnem boku mehkejša. Opazen je večji delež meljevca na desni strani ter peščenjaka na levi strani predora. K razvoju pomikov primore tudi subhorizontalni potek skrivalost, ki ima vpad plasti proti desni z naklonom 25° in 35°. Na sliki 46 je v zgornjem desnem delu razvidna tektonska cona, ki

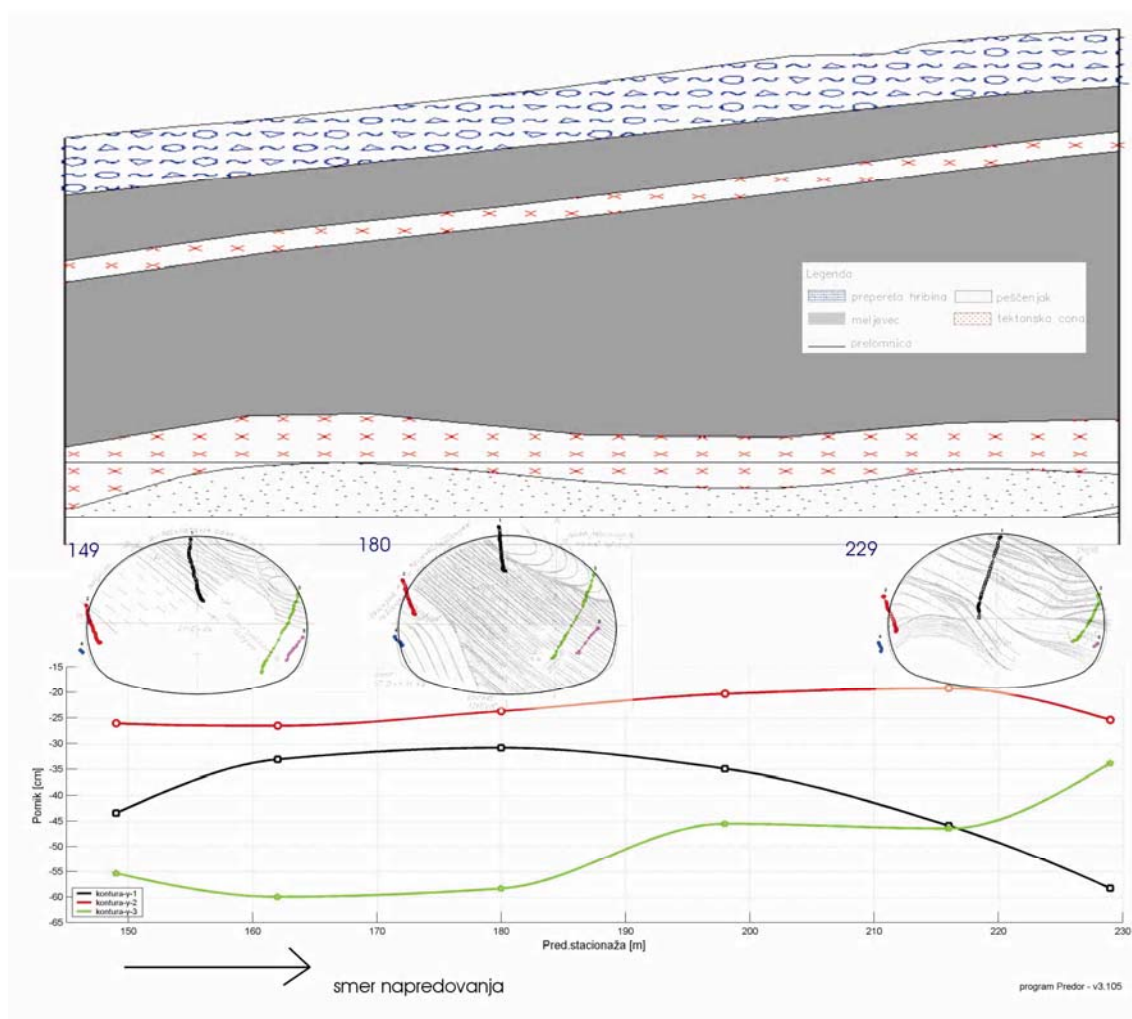
predstavlja oslabitev hribine. To tektonsko cono vidimo na podolžnem geološkem profilu na sliki 47.



Slika 46: Veliki pomiki desnega boka predorske obloge

V na zgornji sliki prikazanem merskem profilu je bilo izjemoma vgrajenih sedem merskih točk zato, da so v času gradnje dobili bolj natančne podatke o medsebojnem obnašanju sistema: *primarna podgradnja – hribina*. Pomiki na desni strani slike potekajo pravokotno na skrivalost, pri čemer pride do upogiba plasti (ang. buckling). Na levi strani slike pa potekajo pomiki v smeri skrivalosti, ki je posledica zdrsa hribine v smeri skrivalosti (ang. sliding).

Na zgornjem delu slike 47 je izrisan podolžni geološki profil, na katerem je vidna tektonska cona na območju predora, ki predstavlja oslabitev nosilnosti hribine. Pod njim so trije izrisi vektorjev pomikov v prečni smeri, položeni na geološko slika čela predora. V vseh treh primerih vidimo podoben potek skrivalosti in večji delež meljevca (manj nosilna hribina - zemljina) na desni strani predora. Na dnu zgornje slike je izrisan še graf pomikov vseh treh merjenih točk kalote. Vidimo večje pomike desnega boka kalote vzdolž celega izrisanega dela predora v primerjavi z levim delom kalote in temenske točke.

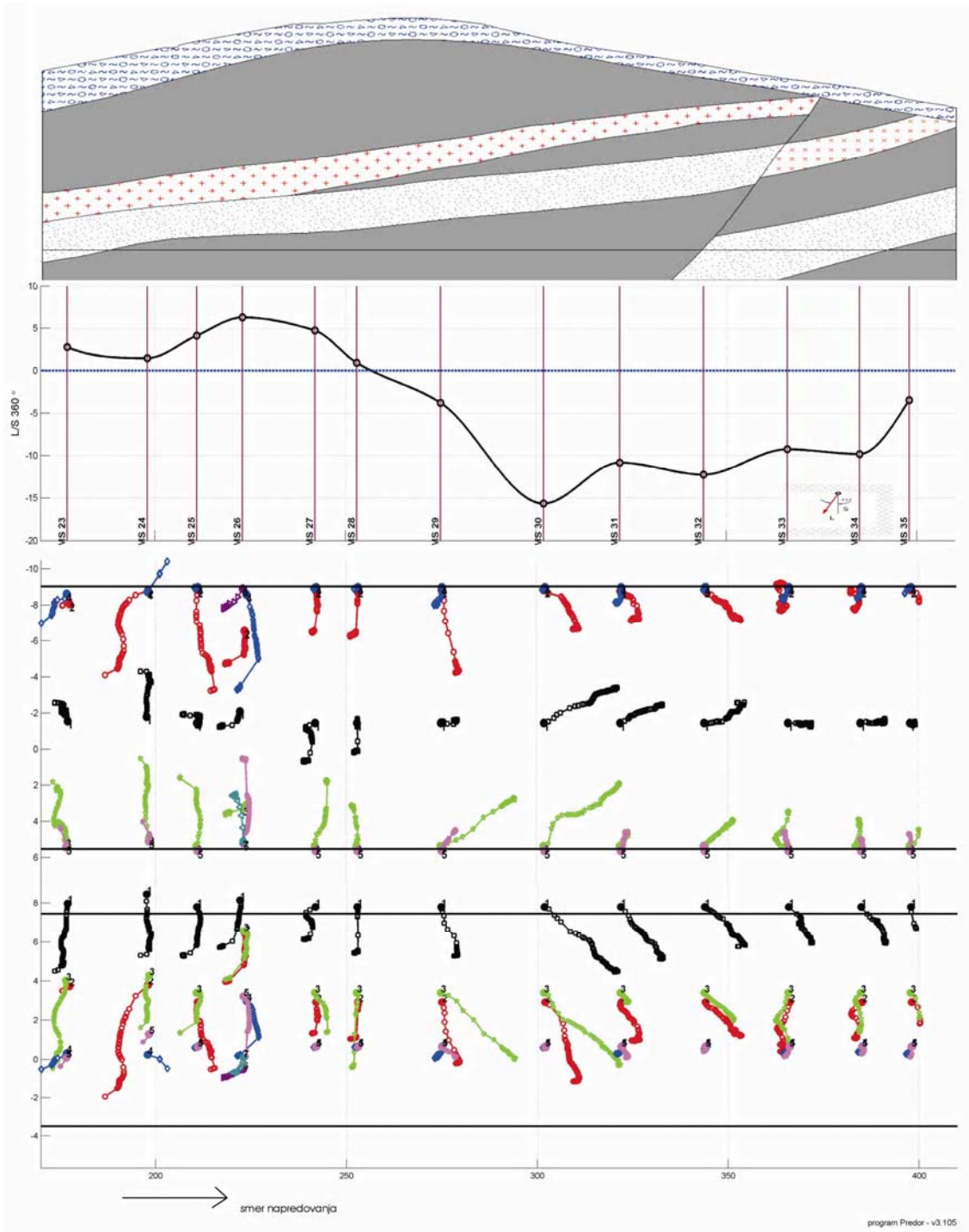


Slika 47: Prikaz poteka pomikov desnega boka predora v vzhodni cevi (C)

6.3 Vzdolžni pomiki

Pri analizi merjenih pomikov je zanimivo obnašanje vzdolžnih pomikov. Normalna smer vzdolžnih pomikov kaže v negativno smer (nazaj), v izkopani prostor. Do predorske stacionaže 253 m v zahodni cevi D so vzdolžni pomiki izkazujejo normalno obnašanje - usmerjeni so v negativno smer (nazaj), nato se preusmerijo in začno kazati v pozitivno smer (naprej) ter do konca izkopa južnega delovišča obdržijo isto smer. Sprememba orientacije vektorja vzdolžnih pomikov iz pozitivne v negativno smer sovпада s preходом iz povečanja v zmanjševanje nadkritja.

Na sliki 48 je na vrhu izrisan vzdolžni geološki profil, pod njim je izris orientacije vektorja pomikov, ki nakazuje padajoči generalni trend v smeri izkopavanja predora.



Slika 48: Vzdolžni potek pomikov in kontura pomikov za vzhodno cev (cev C) - jug

Pričakovana vrednost naklona vektorja orientacije pomikov je med $+5^\circ$ do $+10^\circ$ (v izkopani prostor), v obravnavanem primeru pa doseže orientacija vektorja vrednost -16° , kar pomeni usmerjenost vektorja pomikov v pozitivno smer (naprej).

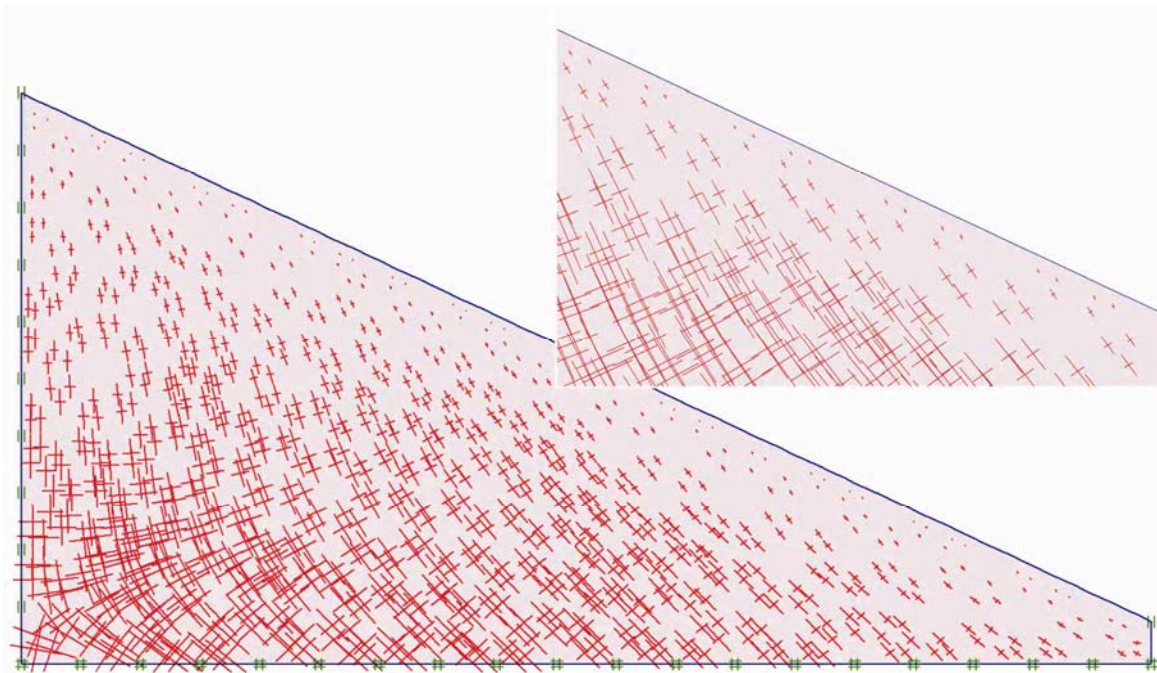
Pod njim je izris pomikov v tlorisu (LH), ki nakazujejo povečanje velikosti pomikov v vzdolžni smeri od predorske stacionaže 253 m dalje. Faktor velikosti pomikov je glede na širino predora; v prečni smeri 30, v vzdolžni pa 200. Pod grafom LH je graf pomikov v vzdolžnem profilu (LS), iz katerega je razvidno povečevanje vektorja pomikov v vzdolžni smeri vzdolž predorske osi od stacionaže 253 m.

Enako dogajanje je opaziti na predorski stacionaži 229 m v vzhodni cevi C. Tudi v tem primeru sprememba orientacije vektorja vzdolžnih pomikov sovpada s prehodom iz povečanja v zmanjševanje nadkritja.

Zanimivo je obnašanje vzdolžnih pomikov glede na globalno geološko strukturo, ki je usmerjena proti jugu, torej v nasprotni smeri napredovanja izkopa. Omenjeni pomiki kažejo proti severu, generalni vpad plasti pa je proti jugu.

Enako dogajanje je bilo opaziti tudi na območju predora Trojane v zahodnem delovišču južne cevi na globalni stacionaži km 81.680 do km 81.800 [Schubert et al, 2005]. Na omenjenem odseku se nadkritje zmanjšuje v smeri proti dolini, kamor kažejo tudi vzdolžni pomiki - izrazito v pozitivno smer (naprej).

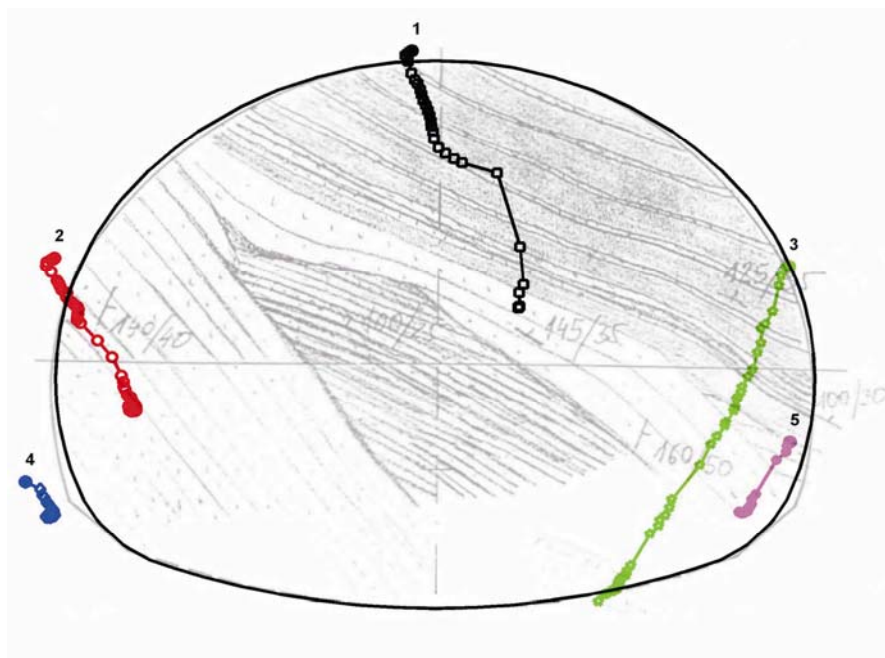
Domneva: Hribina na območju predora Golovec je slabo nosilna (stabilnost brežin je blizu mejnemu stanju). Vrhni del hriba s svojo težo pritiska proti vznožju. Pri izkopavanju predora hribu »spodnesemo« del podporja in celotna hribinska masa nad predorom se mora razporediti na hribino okoli predora. Smer glavnih normalnih napetosti na površju je vzporedna s površino, z naraščanjem globine pa se preusmeri proti vertikalni smeri (slika 49). Pri predorih z nizkim nadkritjem so smeri glavnih napetosti vzporedne padnici pobočja. Horizontalna komponenta napetosti ni zanemarljiva. Hribina potiska predorsko oblogo v vzdolžni smeri proti območju z nižjim nadkritjem.



Slika 49: Potek glavnih normalnih in strižnih napetosti nagnjenega pobočja, izračunanih s programom PLAXIS

6.4 Pomiki temenske točke

Pomik temenske točke bi v višinski smeri potekal navpično navzdol, če bi predor gradili v homogeni hribini pod konstantnim nadkritjem. Vendar v naravi ni idealnih pogojev. Na sliki 50 vidimo subhorizontalno skrivilavost, ki pada proti desnemu boku, kjer je slabše nosilna hribina (meljevec), v primerjavi z levim bocom, kjer je delež peščenjaka večji. Zato so pomiki na desnem boku večji od pomikov na levem.

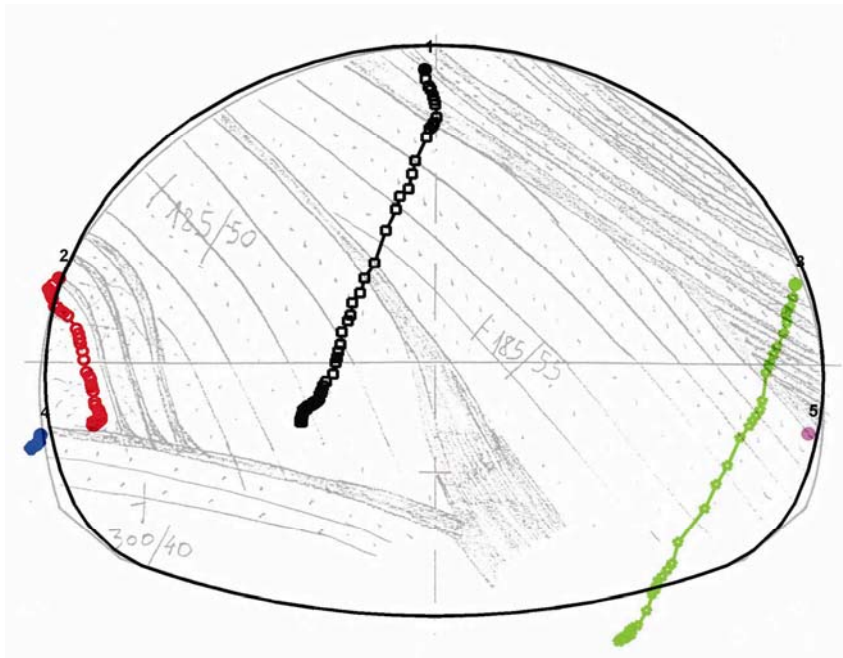


Slika 50: Pomik temenske točke kot posledica delovanja dveh različnih mehanizmov okoliške hribine (zdrs in upogib)

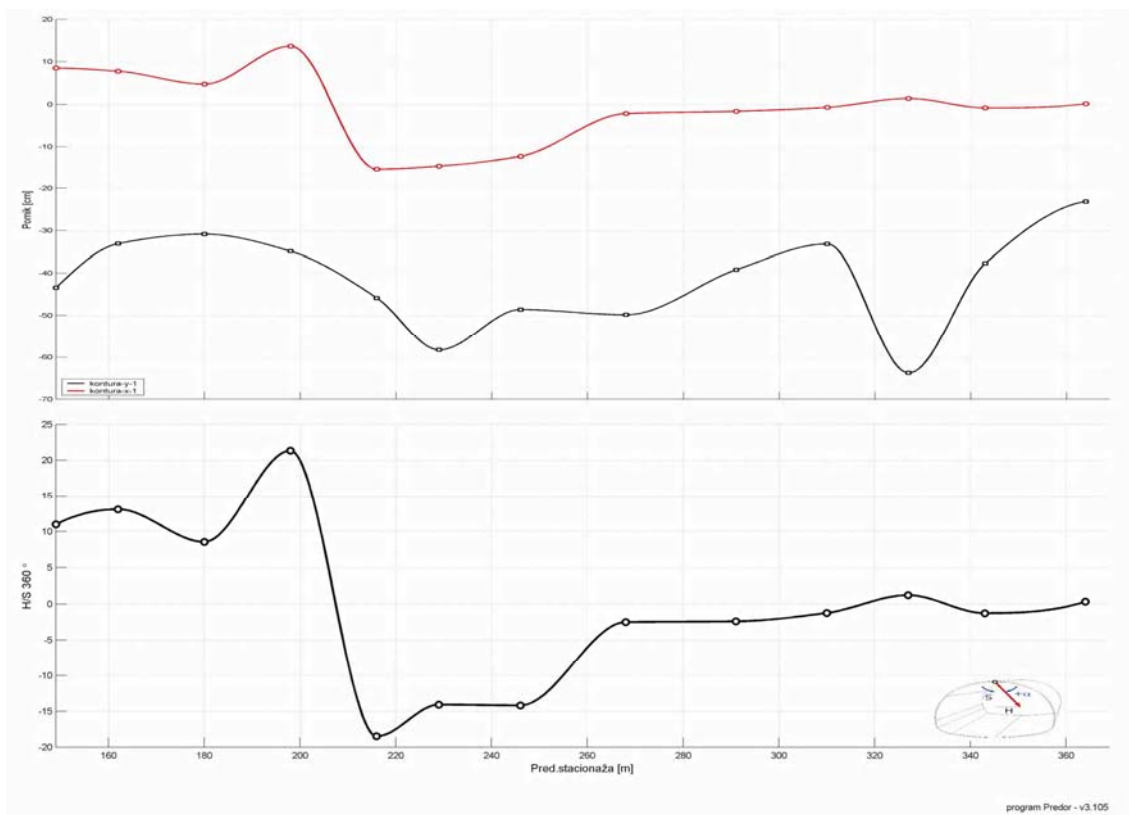
Temenska točka predora se sprva premika subvertikalno. Aktivira se kombinacija mehanizmov upogiba (ang. buckling) pravokotno na skrtilavost in mehanizem zdrs (ang. sliding) v smeri skrtilavosti. Nato vektor pomikov spremeni smer in začne kazati v smeri skrtilavost – temenska točka zdrsne. Nazadnje se ponovno vzpostavi kombiniran mehanizem upogiba in zdrs.

Precej drugačen potek pomikov opazimo v naslednjem merskem profilu istega delovišča. Geološka zgradba prostora je podobna kot v prejšnjem profilu. Skrtilavost poteka sicer bolj subvertikalno, vektor pomikov temenske točke se sprva sicer usmeri v smer skrtilavosti (zdrs), nato pa močno prevlada mehanizem upogiba. Vektor pomikov temenske točke se usmeri pravokotno na skrtilavost in do konca meritev ohrani to smer.

Očitno je podobno obnašanje pomikov temenske točke in točke na desnem boku. Vektor pomikov je pri obeh točkah enako velik in isto usmerjen. Oba se premakneta pravokotno na skrtilavost in dosežeta 46 cm vertikalnih in do 21 cm horizontalnih merjenih pomikov.



Slika 51: Pomik temenske točke pravokotno na skrivalost

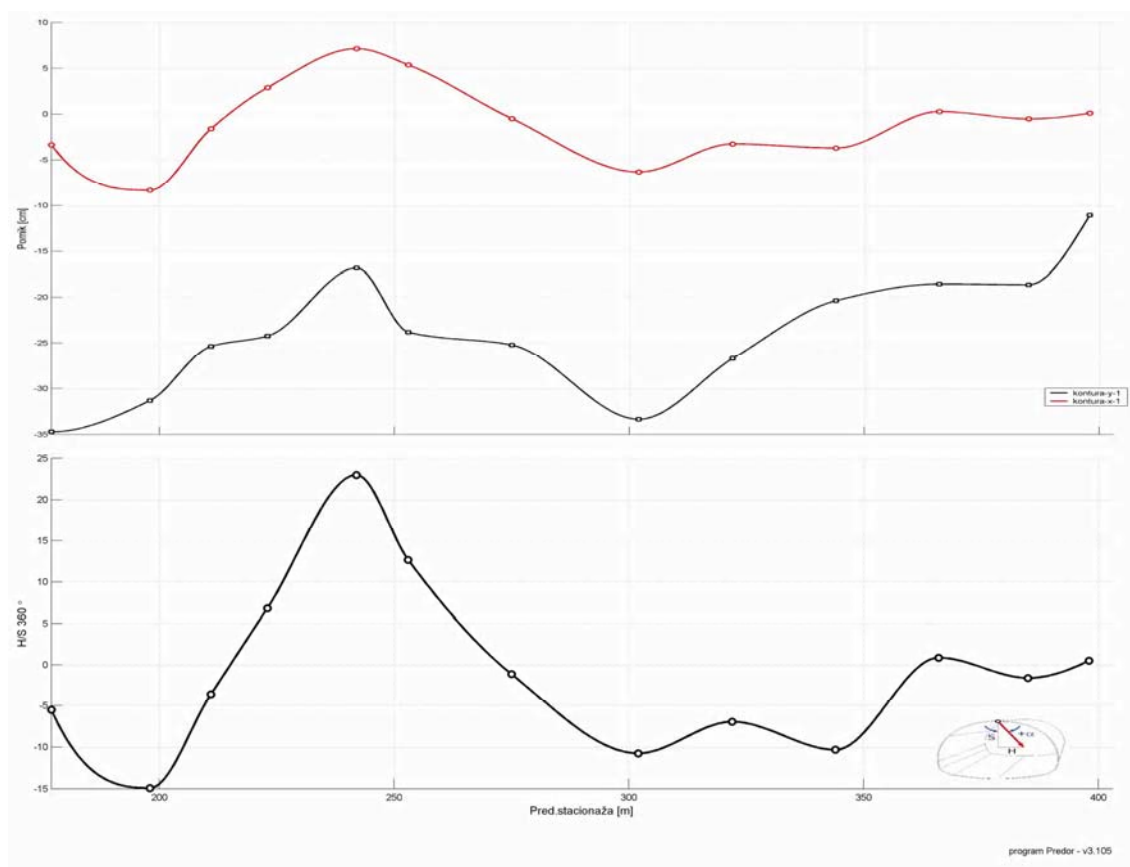


Slika 52: Pomik temenske točke vzhodne cevi(C) vzdolž predorske osi

Na zadnjih dveh slikah prikazano obnašanje temenske točke je na sliki 52 izrisano še z grafom orientacije vektorja pomikov v prečni smeri (SH).

Vrhnji graf prikazuje pomike temenske točke v vertikalni smeri (krivulja črne barve) in pomike temenske točke v prečni smeri (krivulja rdeče barve) za vzhodno cev (C). Pod njim je graf naklona vektorja temenske točke v prečni smeri (SH).

Opazimo lahko drastično spremembo orientacije vektorja pomikov v prečni smeri med obema merskima profiloma (na stacionaži od 180 m do 200 m) – razlika med obema vrednostima znaša 40° (iz naklona $+21^\circ$ v smeri desnega boka v naklon -19° v smeri levega boka).



Slika 53: Pomik temenske točke zahodne cevi(D) vzdolž predorske osi

Spremembo orientacije vektorja pomikov v prečni smeri smo opazili tudi v zahodni cevi, le da za razliko od vzhodne cevi tu sprememba orientacije ni drastična. Še več, sprememba poteka

na daljšem odseku – slika 53. Od profila MP24 na stacionaži 198 (naklon -15° v smeri proti levemu boku) se orientacija na razdalji 45 m spremeni v naklon $+25^\circ$ v smeri proti desnemu boku in nato na razdalji 70 m nazaj v naklon -11° . Vmes sta vedno še dva merska profila, ki sledita trendu spreminjanja orientacije.

Žal nismo imeli geološkega tlorisa z vrisanimi vpadi plasti, da bi lahko ugotovili, zakaj takšno obnašanje predora.

7 ZAKLJUČEK

Kljub nepopolnosti podatkov mi je uspelo izrisati večino osnovnih grafičnih prikazov, ki jih nudi računalniški program *Predor*, ker ima enostavno orodje za odpravljanje napak meritev in urejanje podatkov. Pri analizi podatkov sem našel določene povezave med merjenimi pomiki predorske obloge in geološko zgradbo prostora. Vzdolžni geološki profil in tloris geologije sta vsebovala le glavne geološke in litološke značilnosti, ne pa tudi lokalnih značilnosti, ki sicer lahko bistveno vplivajo na obnašanje predora. Zato sem si z omenjenimi izrisi pomagal le v globalnem pogledu na predor Golovec. Natančnejšo sliko o lokalni geološki sestavi sem dobil iz prečnih popisov čel kalote. Lepo so vidni mehanizmi zdrsa in upogiba v posameznih prečnih profilih. Na daljšem odseku je v obeh ceveh nazorno prikazan vzdolžni potek pomikov, ki je usmerjen naprej, kar ni običajno. Izrazit je velik vpliv stopnice na velikost merjenih pomikov na območju celotnega predora, ki je posledica velikega prečnega profila in manj nosilne hribine. Opazili smo velik pomik desnega boka predora na 80 m dolgem odseku v vzhodni cevi. Ti merjeni pomiki presegajo velikostni razred 60 cm (levi bok do 25 cm na istem odseku) zaradi poteka skrilačnosti in manj nosilne hribine na desnem boku (meljevec) v primerjavi z levim (peščenjak).

Predor Golovec je bil prvi predor v Sloveniji, v katerem se je merilo in interpretiralo 3D pomike, zato so bili le-ti nekoliko neurejeni in pomanjkljivi. Od tedaj naprej se spremljanje 3D pomikov izvaja ob gradnji vseh predorov. V merskih profilih je večje število merskih točk, merski profili pa si sledijo na premer predorske osi. Meritve so bolj natančne in popolne, izvajalci meritev pa bolj dosledni, zato so grafični izrisi nazornejši in natančnejši. Z natančno interpretacijo teh izrisov si lahko veliko pomagamo in pripomoremo k varnejši, hitrejši in bolj ekonomični gradnji.

Predor je kompliciran gradbeni objekt, ki je za razliko od ostalih gradbenih objektov po celotni površini obdan z hribino. Zaradi heterogenosti hribinske mase in tektonskih premikov v geološki zgodovini si le stežka ustvarimo zanesljiv geološki model območja bodočega predora in to kljub velikim finančnim vložkom v preiskave v fazi projektiranja predora. Ker v primeru permkarbonskih skrilačev ne poznamo obnašanja hribinske mase (zaradi že

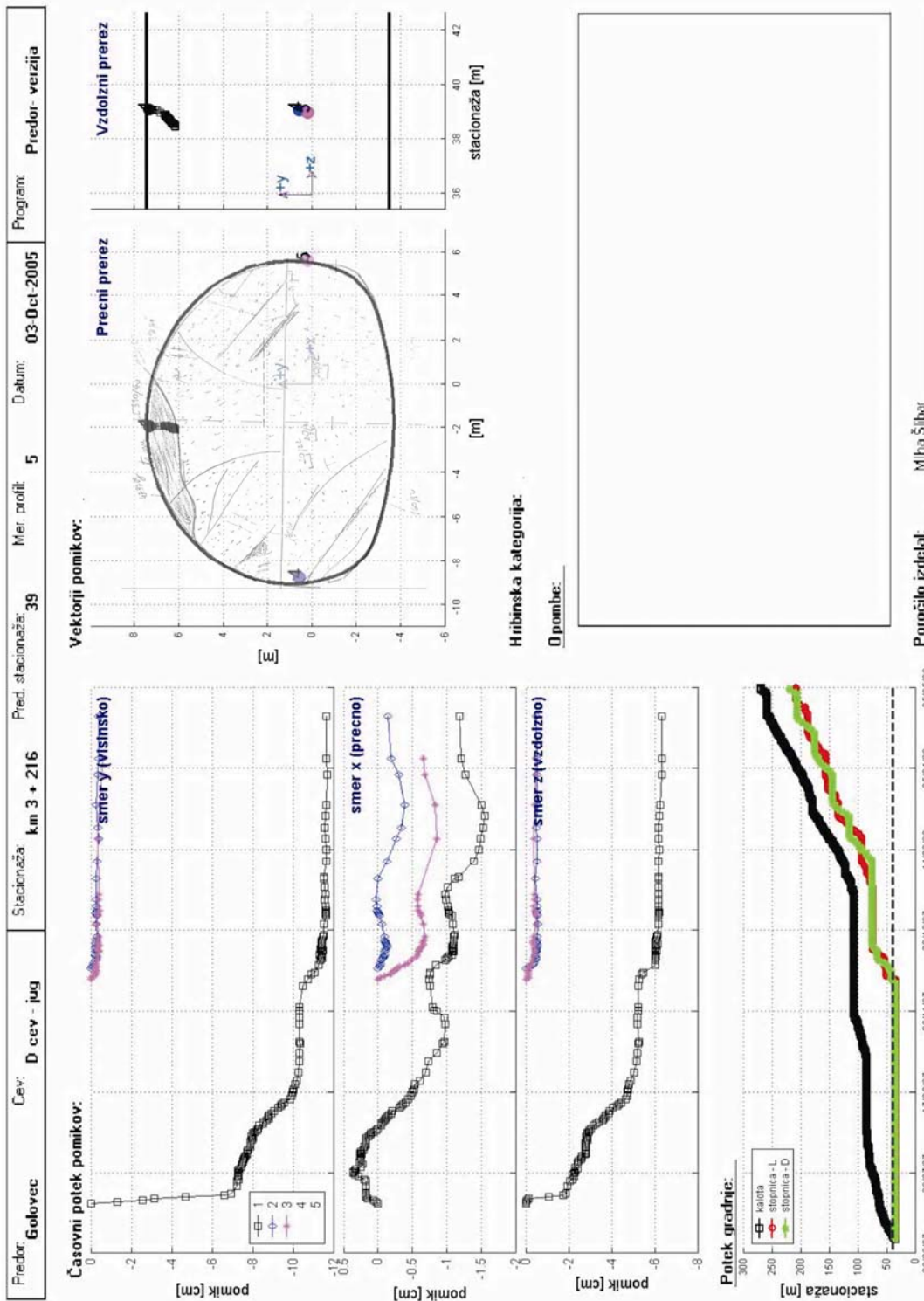
omenjene heterogenosti in anizotropije), nam numerične metode žal ne morejo učinkovito pomagati pri gradnji predorov. Izkušnje namreč kažejo, da se z uporabo metode končnih elementov in z uporabo obstoječih konstitutivnih materialnih modelov ne moremo zadovoljivo približati realnemu stanju – izračunani oz. napovedani pomiki se precej razlikujejo od kasneje izmerjenih.

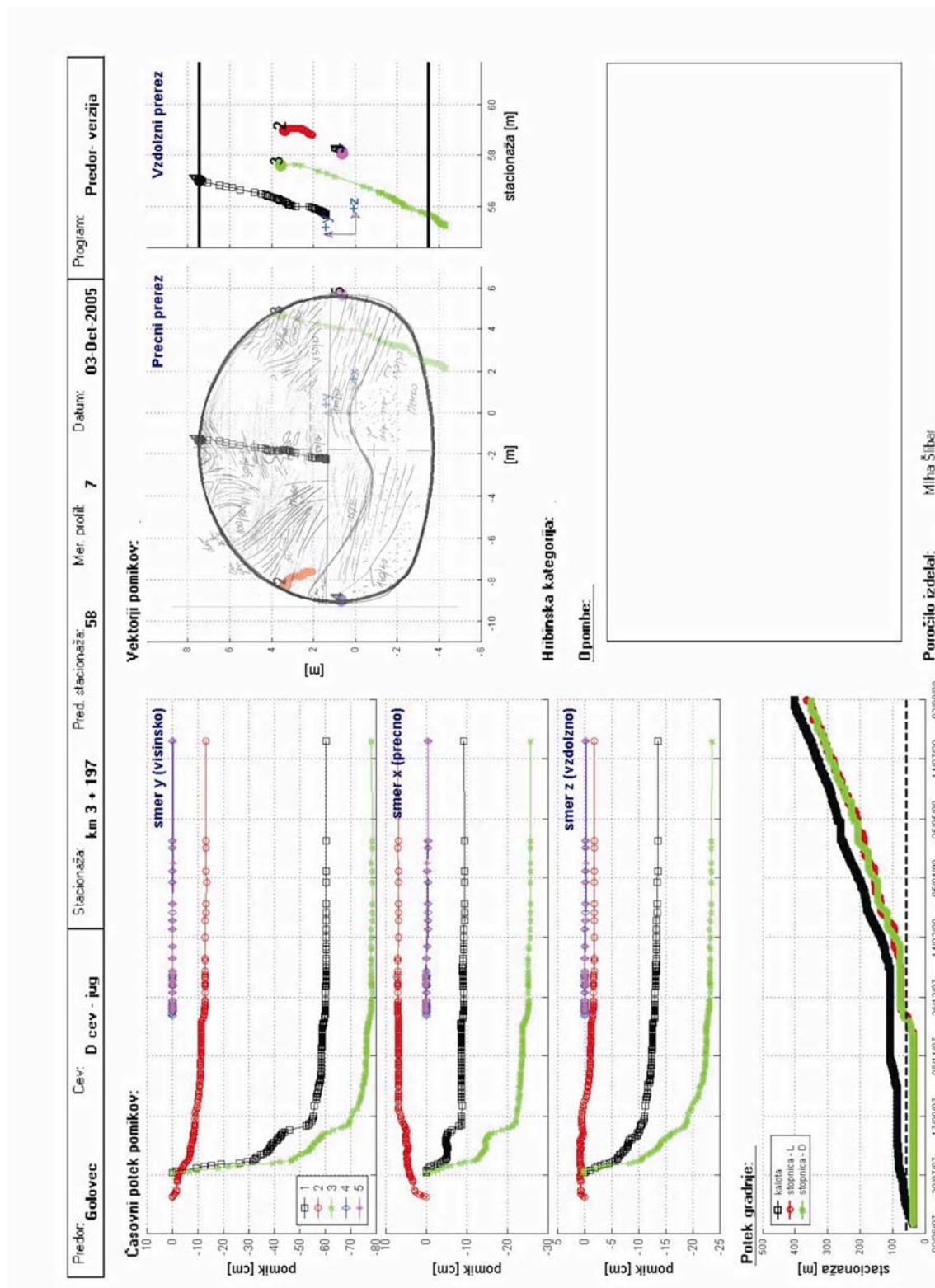
Lahko pa se učimo iz izkušenj že zgrajenih predorov, zato gradnjo vseh sodobnih predorov v Sloveniji spremljamo z meritvami. Baza podatkov, ki bi vsebovala podatke o izvedenih meritvah predorov, grajenih v čim bolj različnih pogojih (različna višina nadkritja, geotehniški pogoji gradnje, velikosti prečnih prerezov, različna dolžina predora...), bi lahko služila kot podlaga za izdelavo treniranega ekspertnega sistema. Le-ta bi lahko na podlagi znanih deformacijskih vzorcev učinkovito napovedoval zgradbo hribinske mase pred čelom predora in okoli njega.

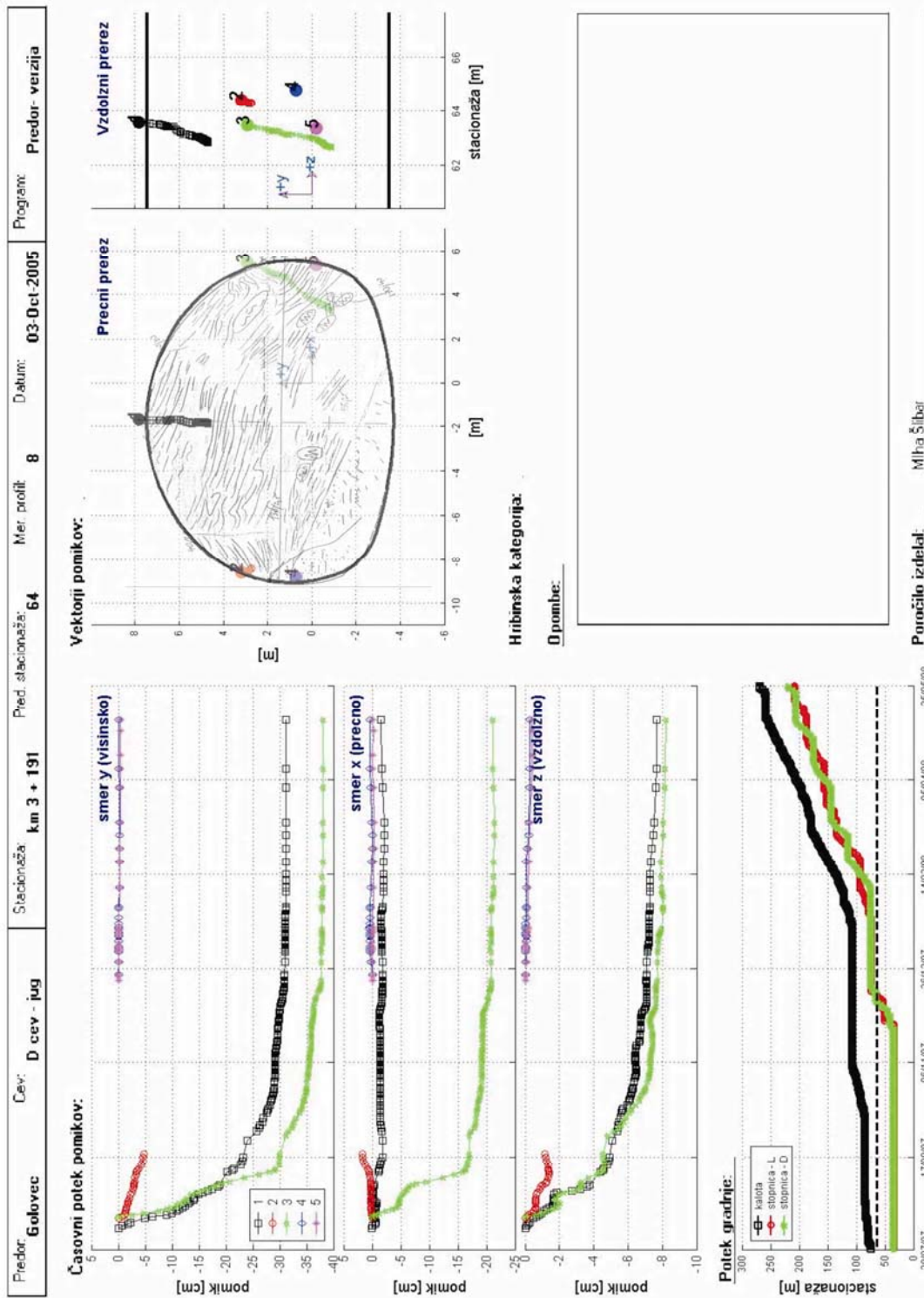
Skupne dolžine cestnih in železniških predorov se bodo v prihodnosti vztrajno podaljševale, ker je zemljišče za odprto traso vedno dražje in dragocenejše ter pot od projekta do izvedbe vse daljša. Optimizirana gradnja predorov, k čemer veliko pripomore prav napredna interpretacija meritev, bo v prihodnje pocenila in izboljšala varnost gradnje predorov. Le tako bodo predori postali bolj konkurenčni odprti trasi in posledično bolj intenzivno grajeni.

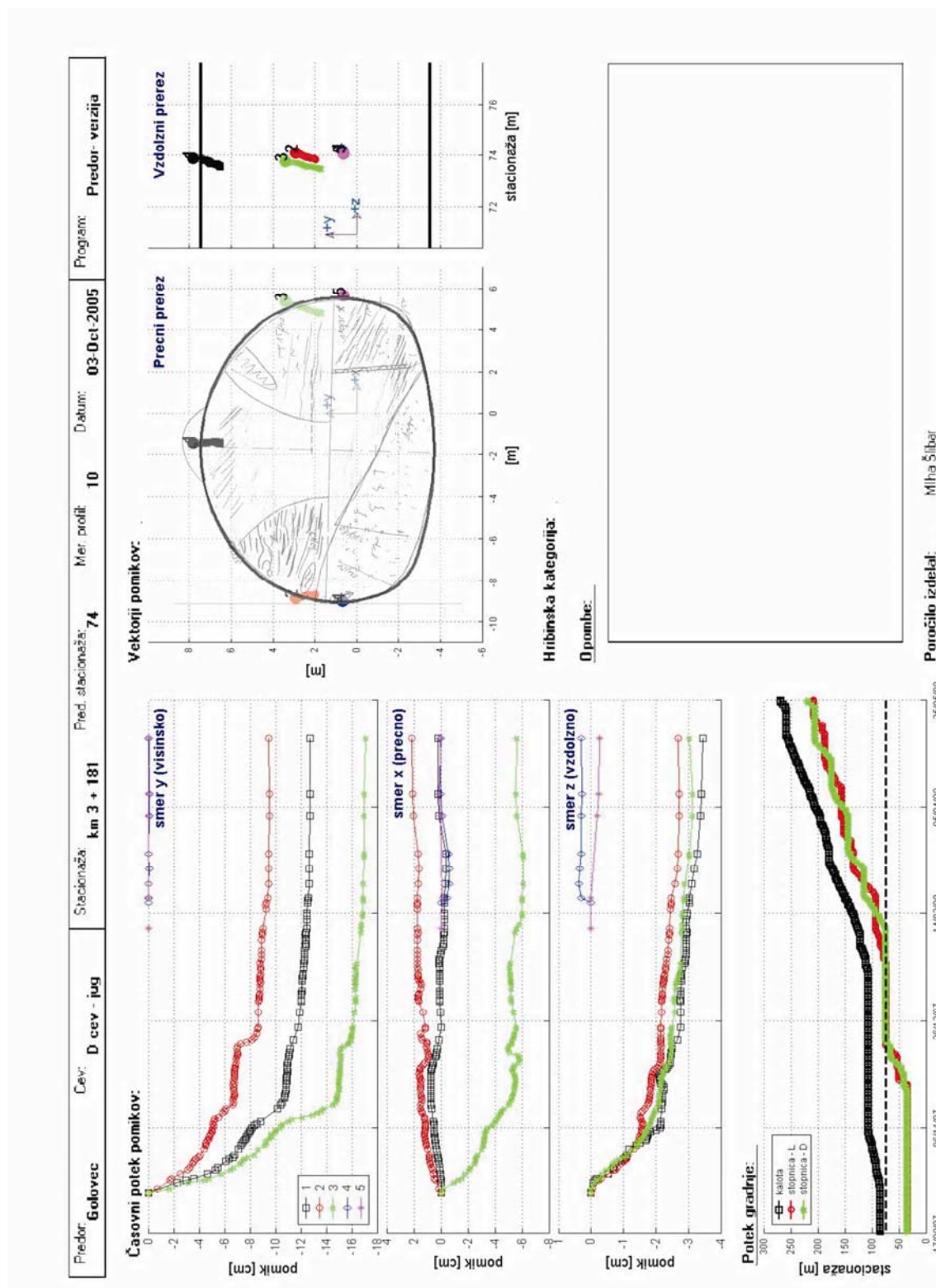
8 VIRI

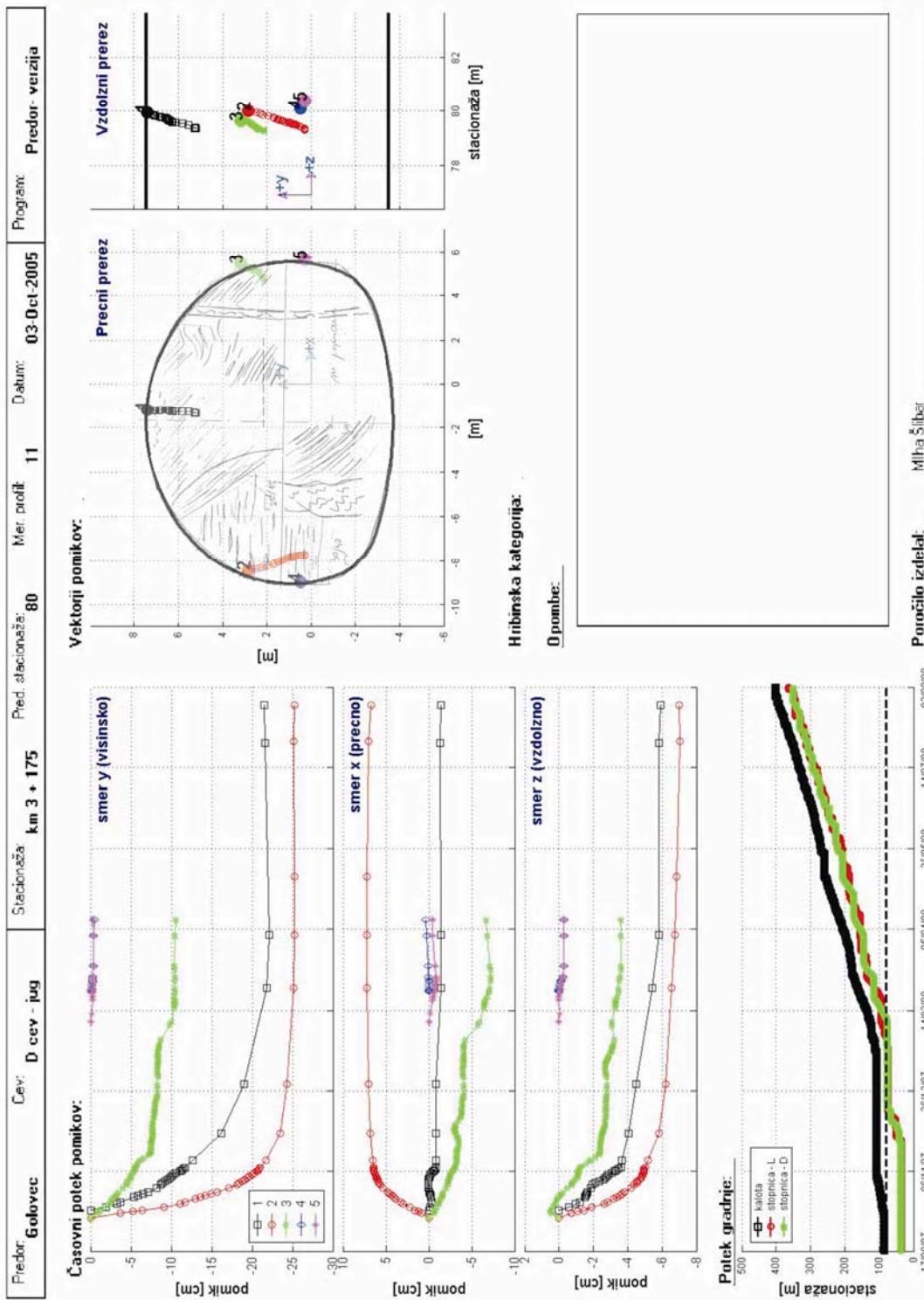
1. Ločniškar, A. 1998. Geološko geotehniške razmere pri gradnji predora Golovec. Gradbenik September 1998: 36-38
2. Likar, J. 2001. Geotehniške in tehnološke posebnosti gradnje predora Golovec. Gradb. Vest. 50: 57-68
3. Franc, D. 1999. Gradnja predora Golovec. Teh. Informator SCT 45: 20-28
4. Fifer, K., Petkovšek, B., 2004. Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec. Engineering Geology: 1-18
5. Klopčič, J., 2004. Grafični prikaz in analiza merjenih pomikov v predorogradnji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.
6. Poisel, R., 1995. New Austrian tunnelling method. Concepts of NATM. IACES. Bureau of Vienna
7. Schubert, P., Klopčič, J., Štimulak, A., Ajdič, I., Logar, J., 2005. Analysis of Characteristic Deformation Patterns at the Trojane Tunnel in Slovenia. Felsbau 5/2005: 25-30

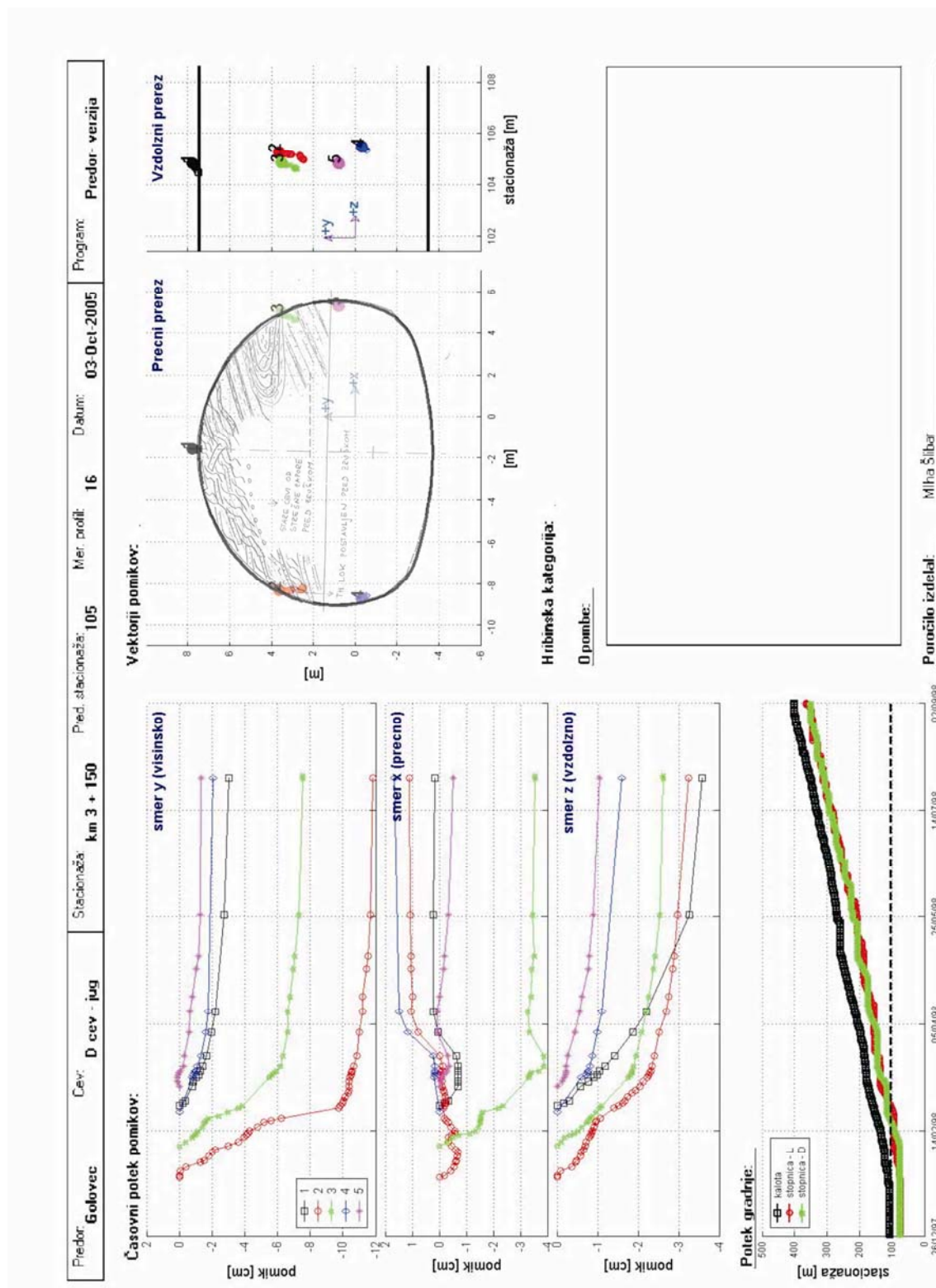


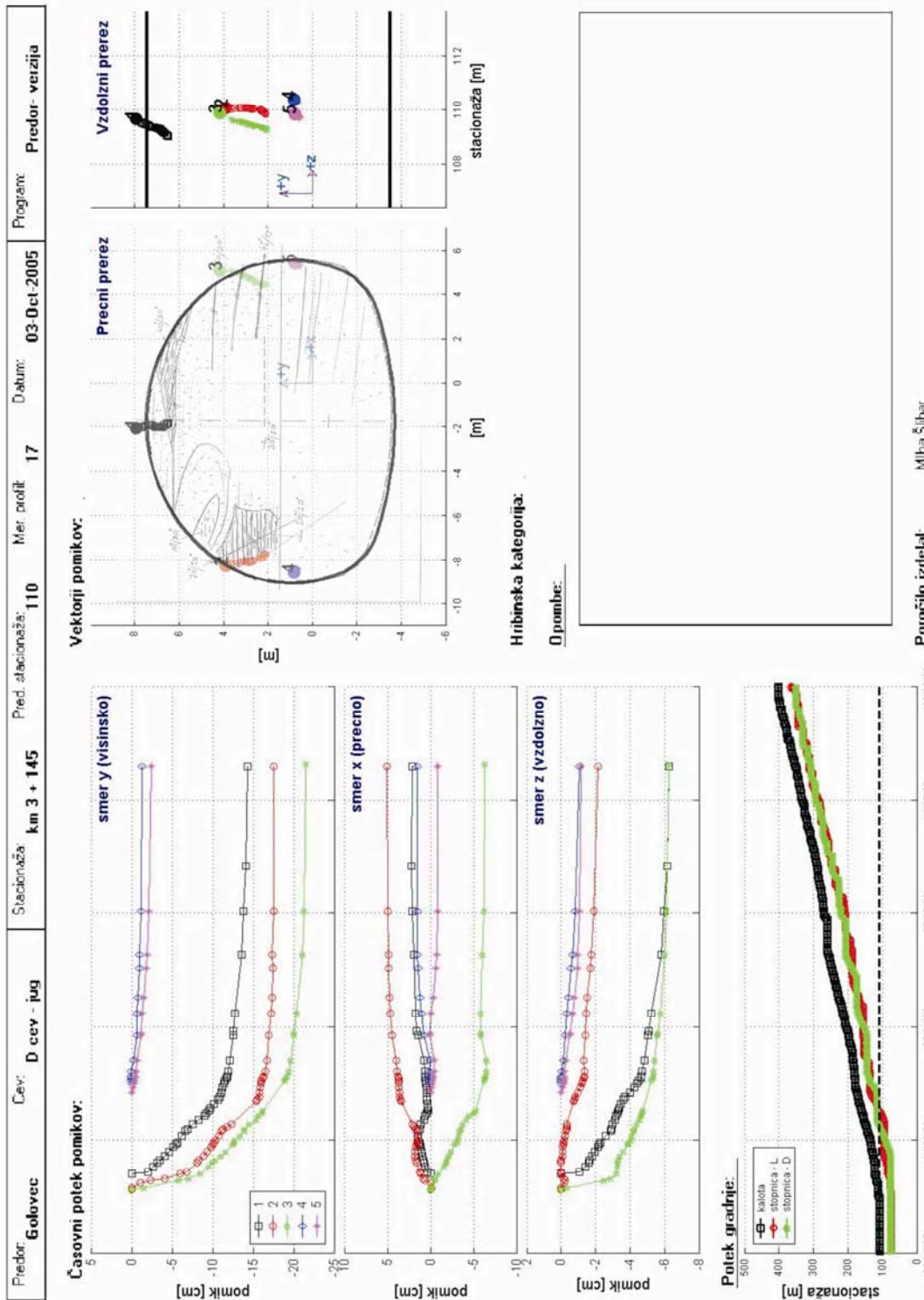


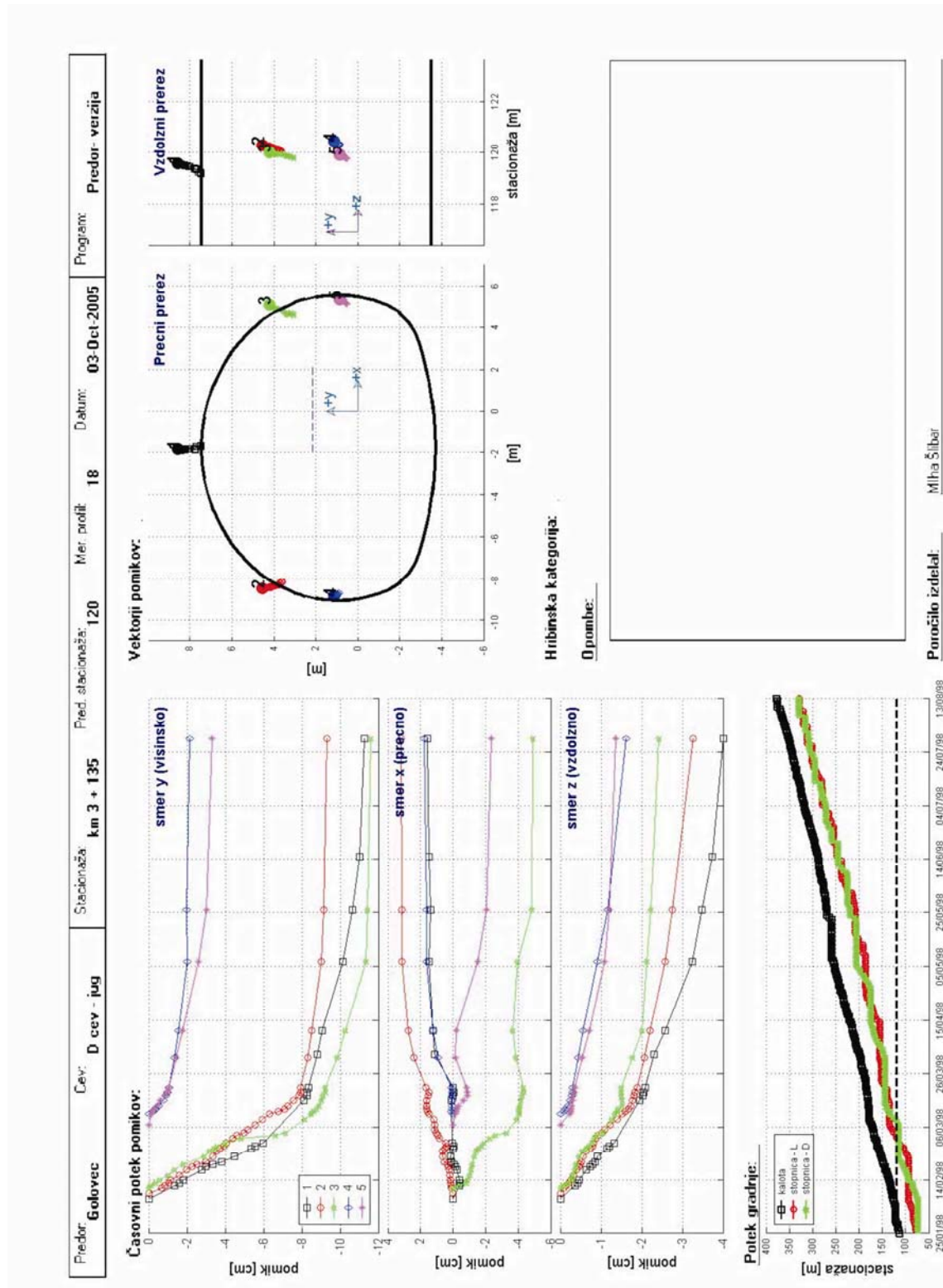




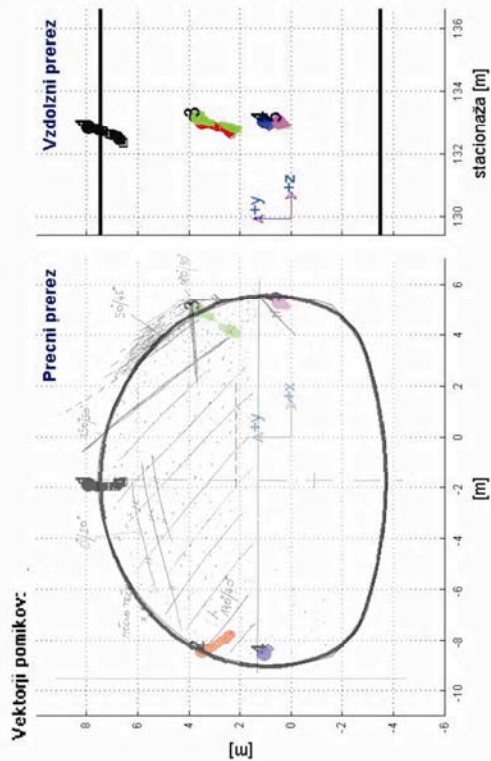
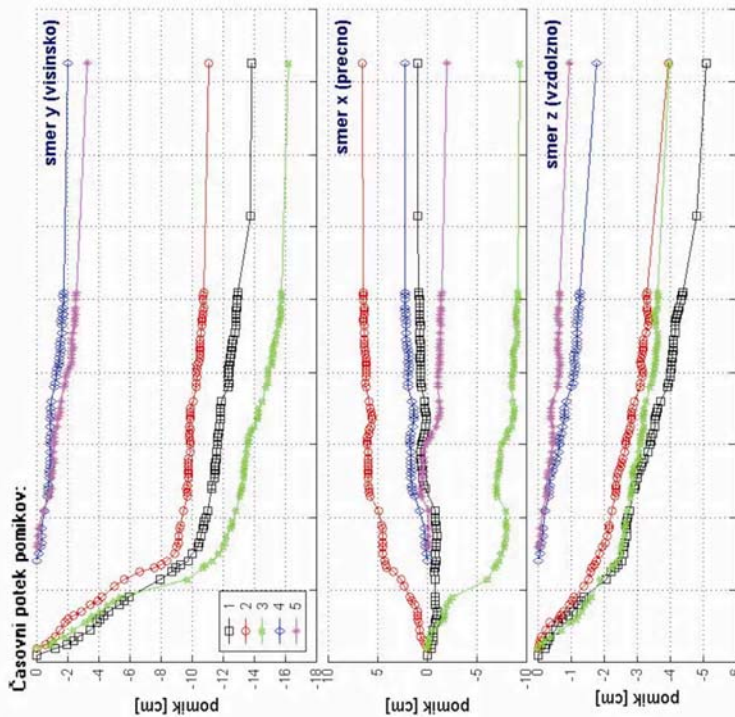




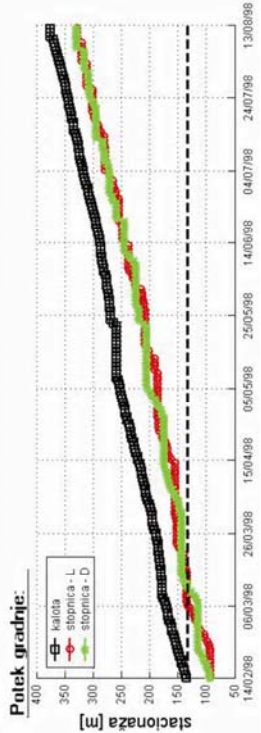




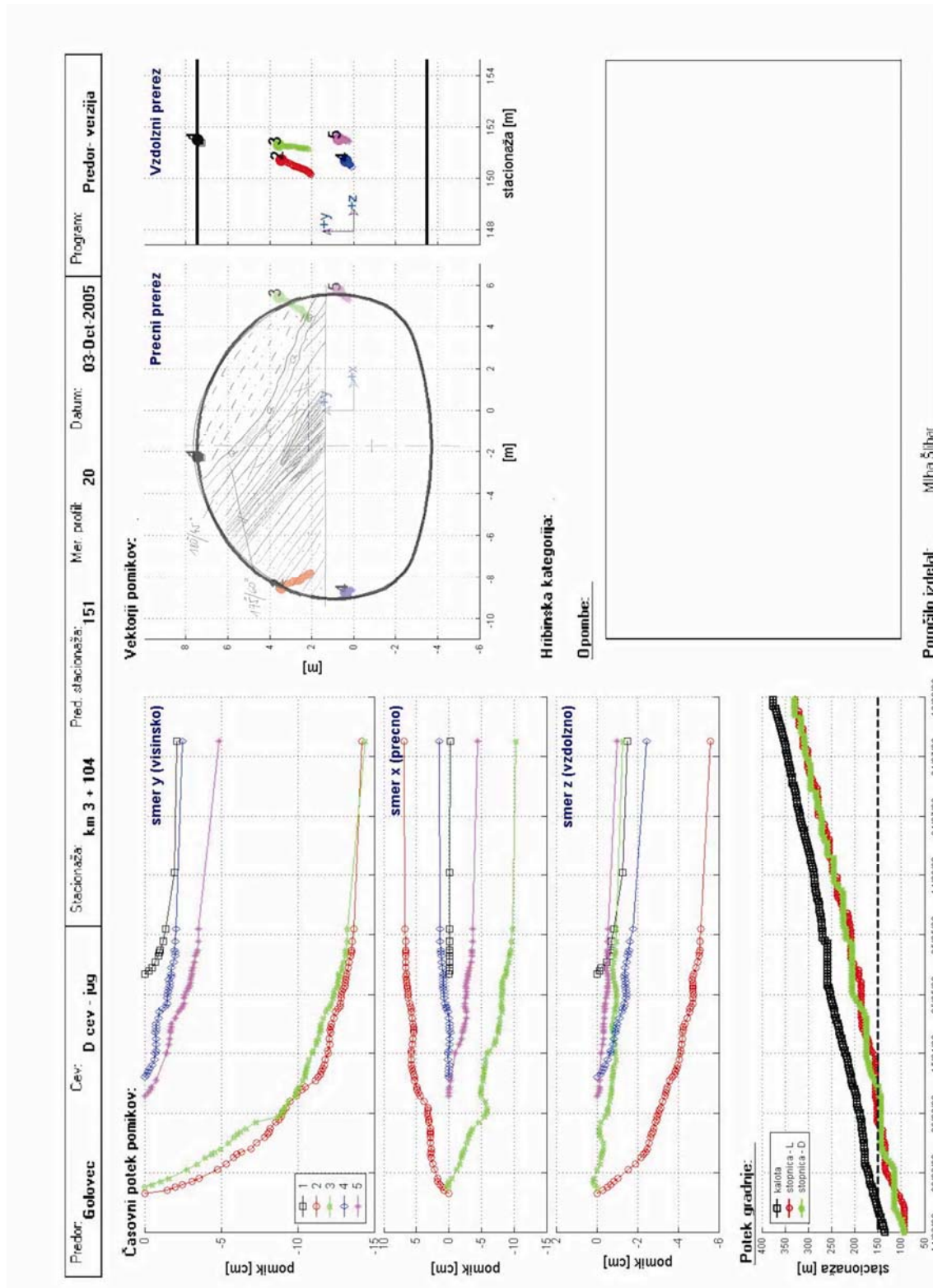
Predor: Golovec	Cev: D cev - jug	Stacionaža: km 3 + 122	Pred. stacionaža: 133	Mer. profil: 19	Datum: 03.0ct.2005	Program: Predor- verzija
------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------



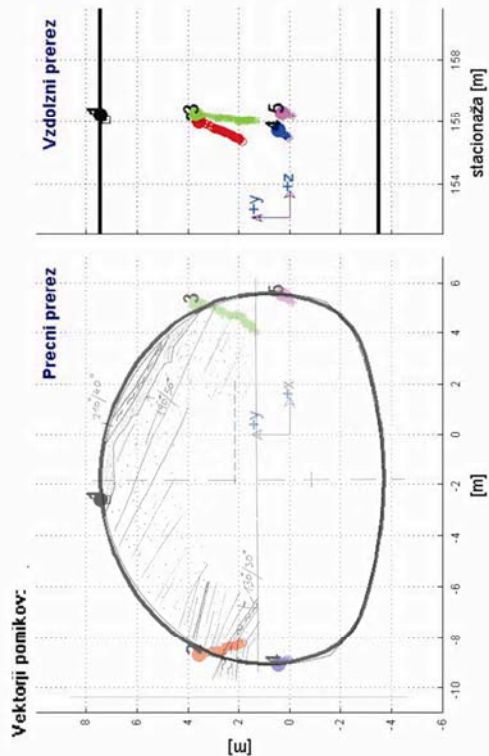
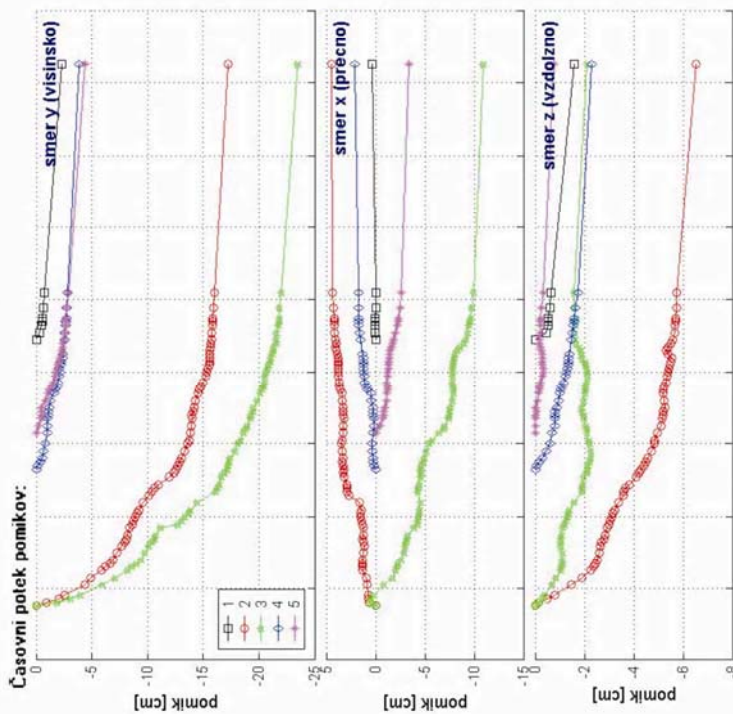
Hibinska kategorija:
 Opombe:



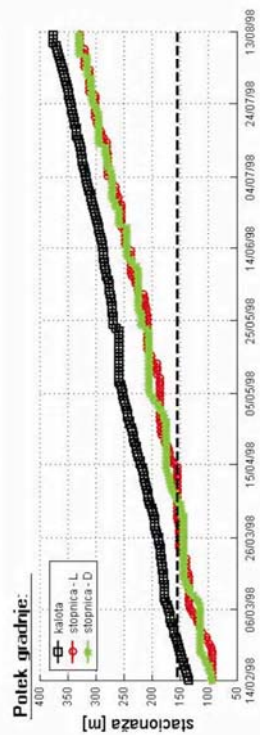
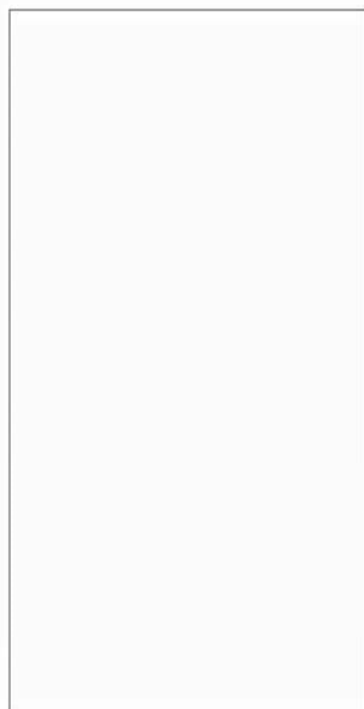
Poročilo izdelal: Miha Šlibar



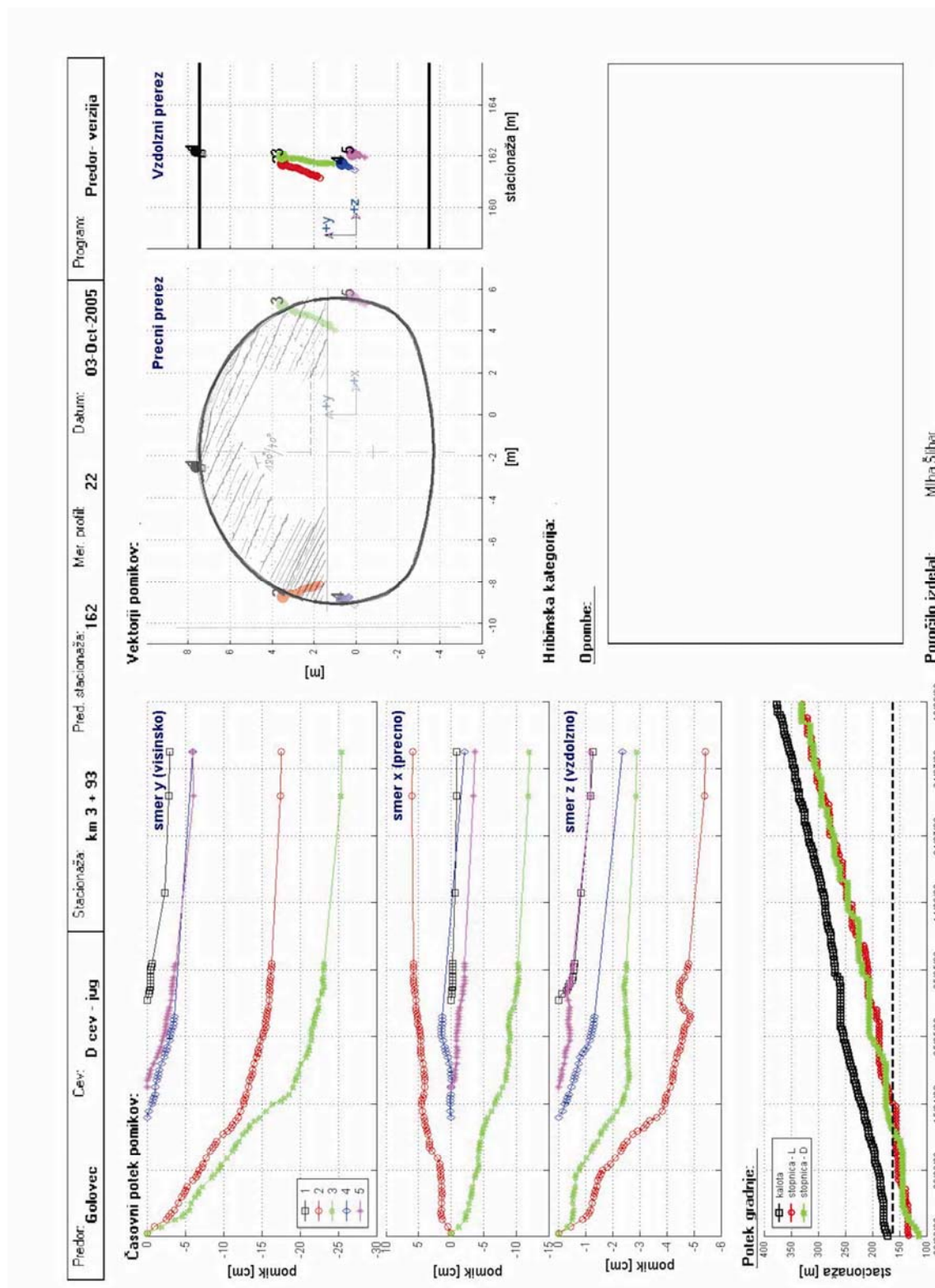
Predor: Golovec	Cev: D cev - jug	Stacionaža: km 3 + 99	Pred. stacionaža: 156	Mir. profil: 21	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor. verzija
------------------------	-------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------

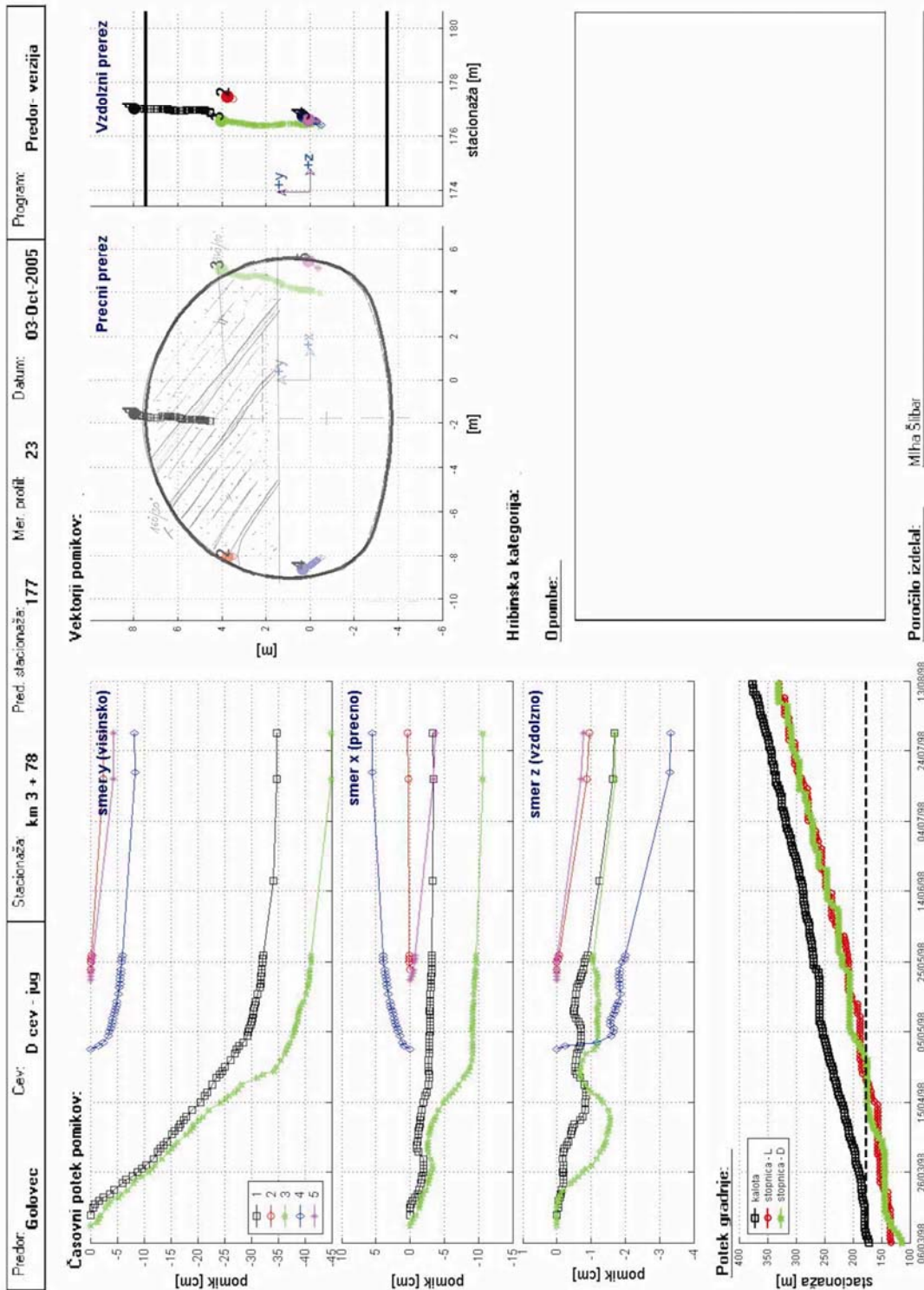


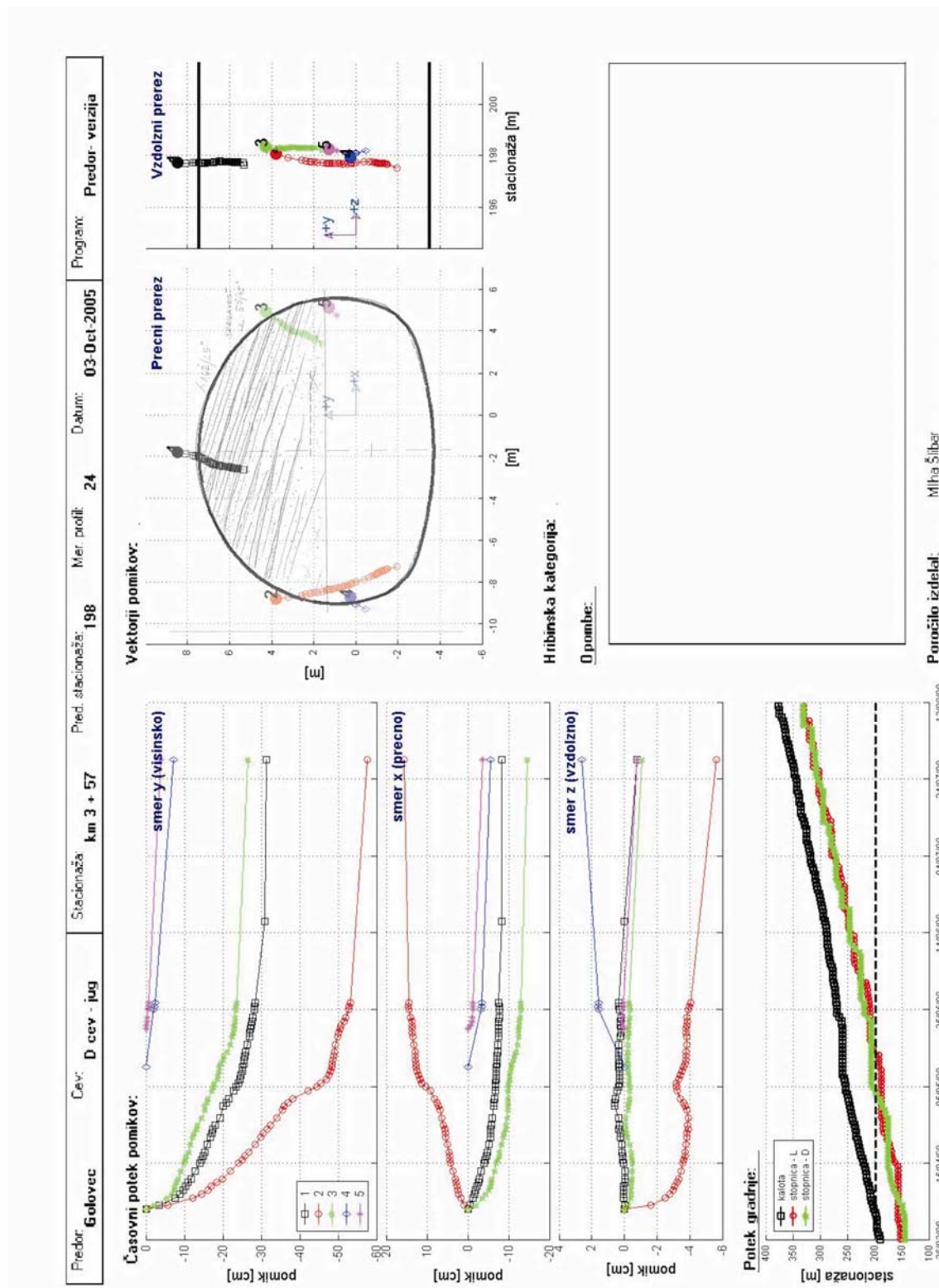
Hribinska kategorija: _____
 0 pombe: _____

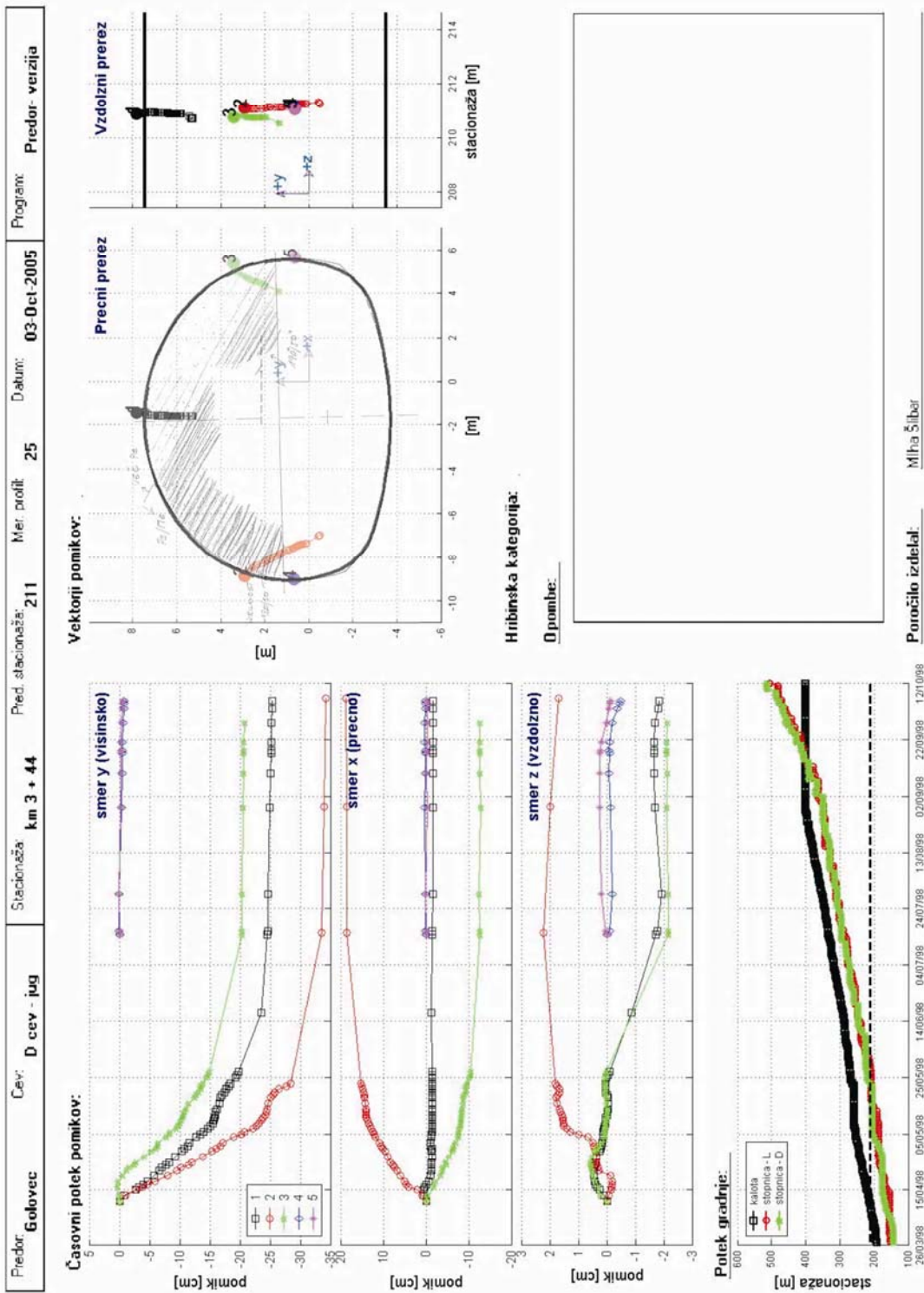


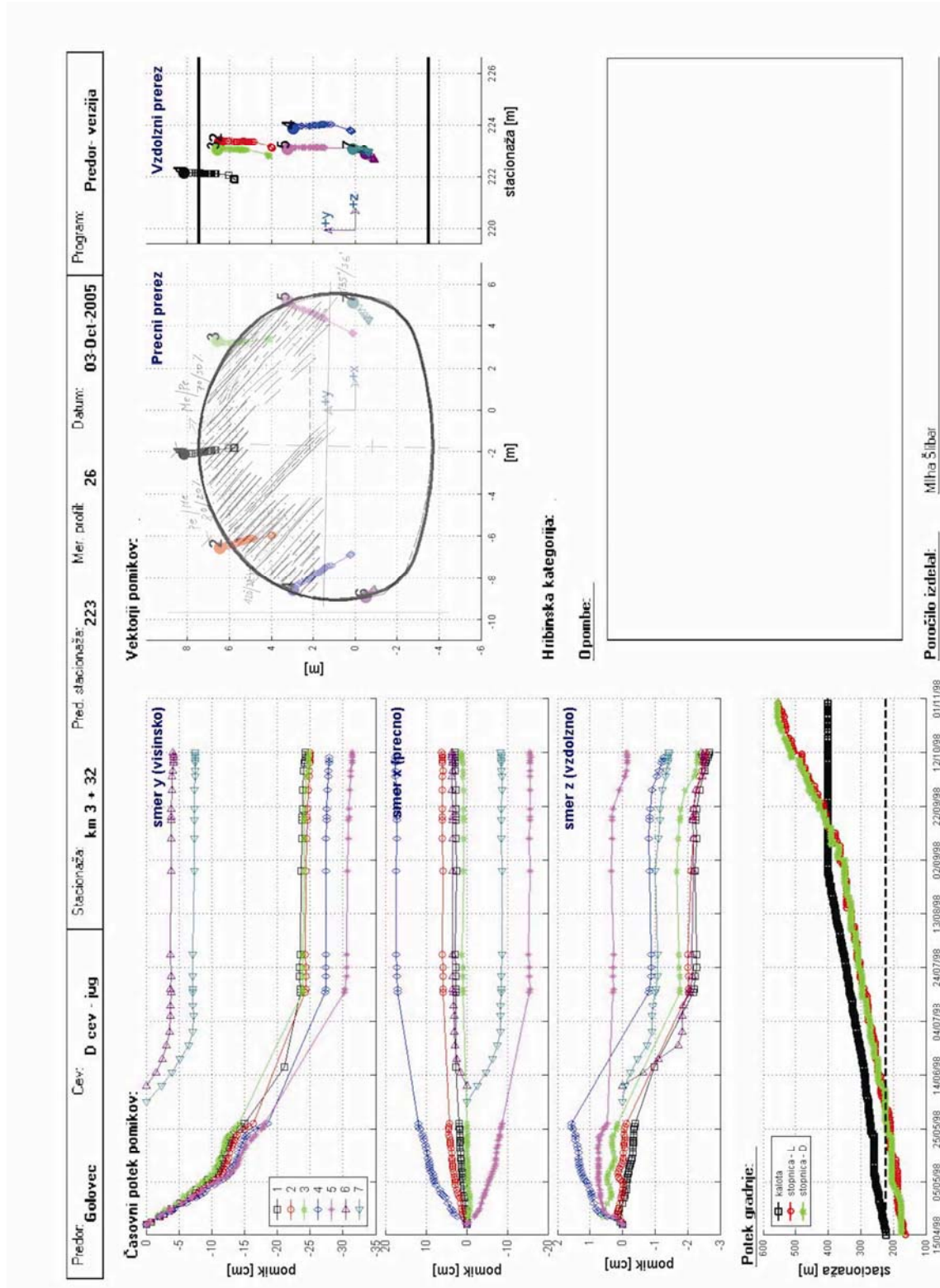
Poročilo izdelal: Milha Šlibar



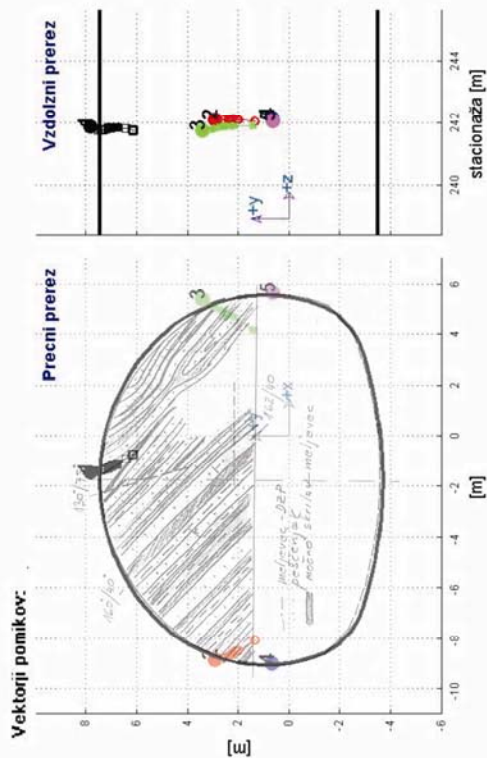
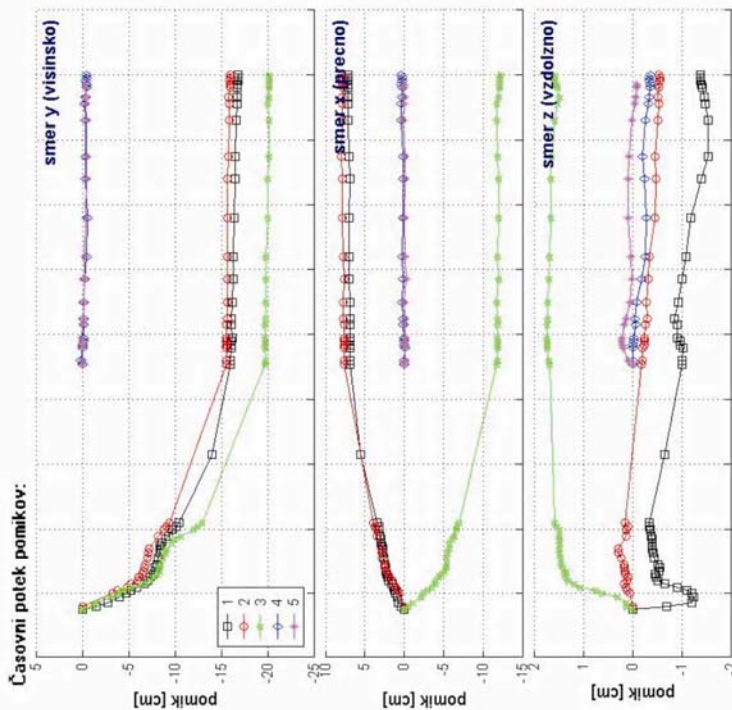






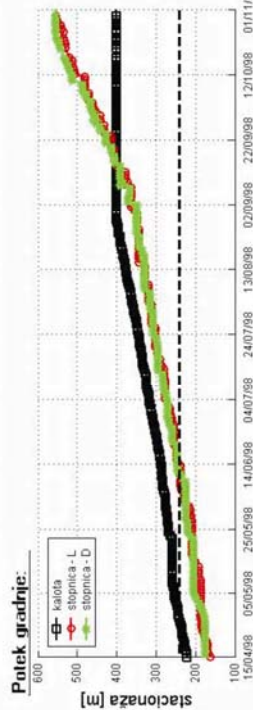
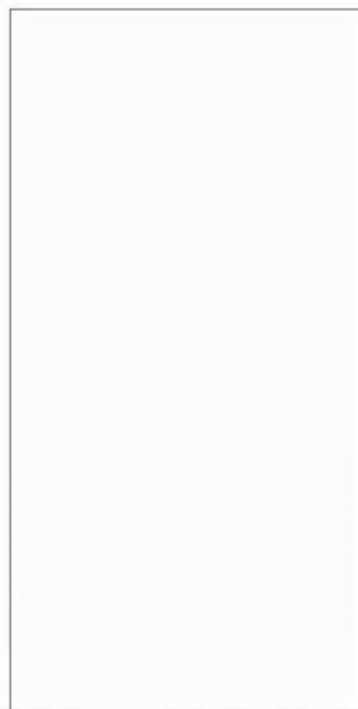


Predor: Golovec	Cev: D cev - jug	Stacionaža: km 3 + 13	Pred. stacionaža: 242	Mir. profil: 27	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor- verzija
------------------------	-------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------



Hribinska kategorija:

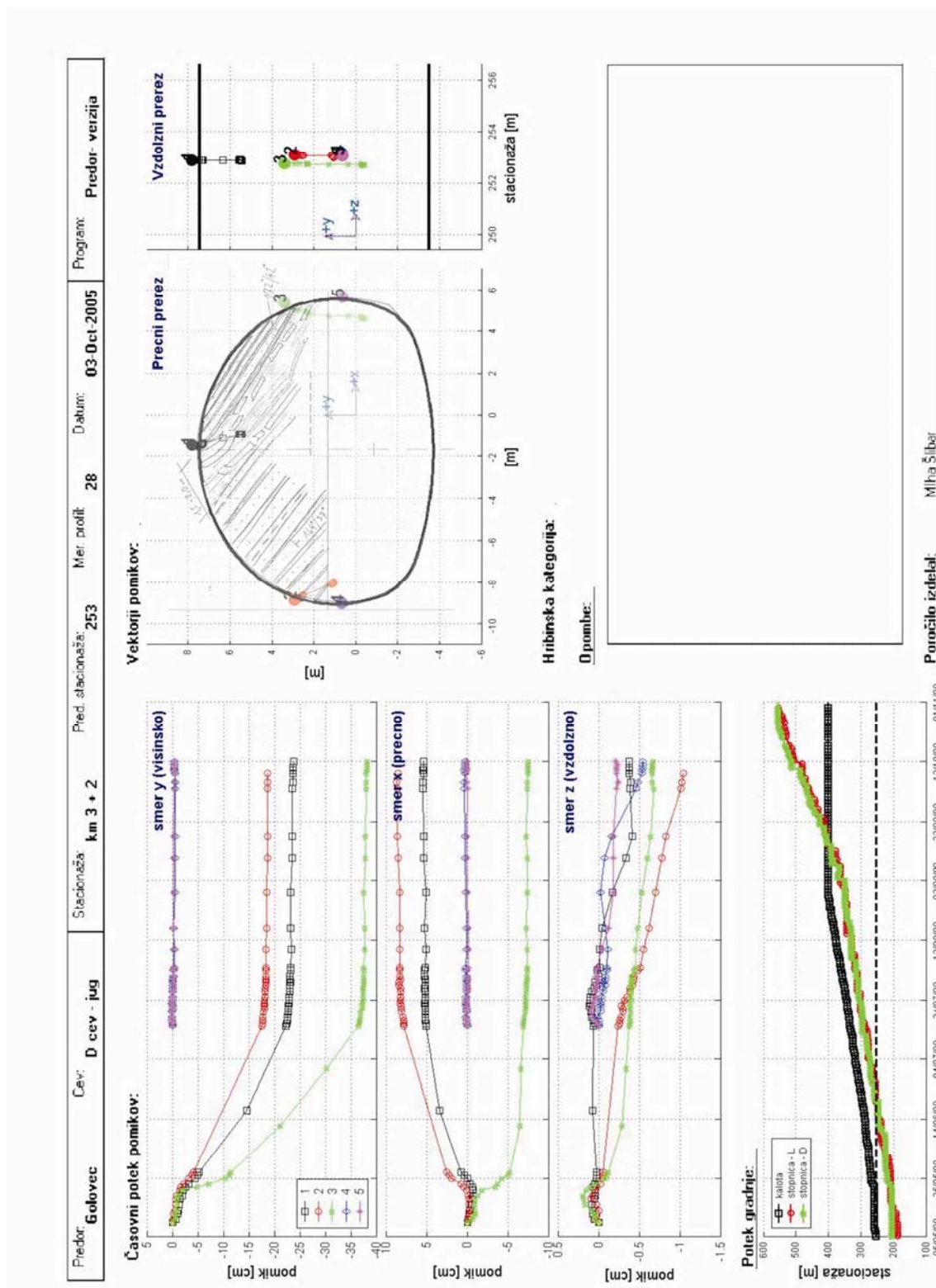
0 pomibe:

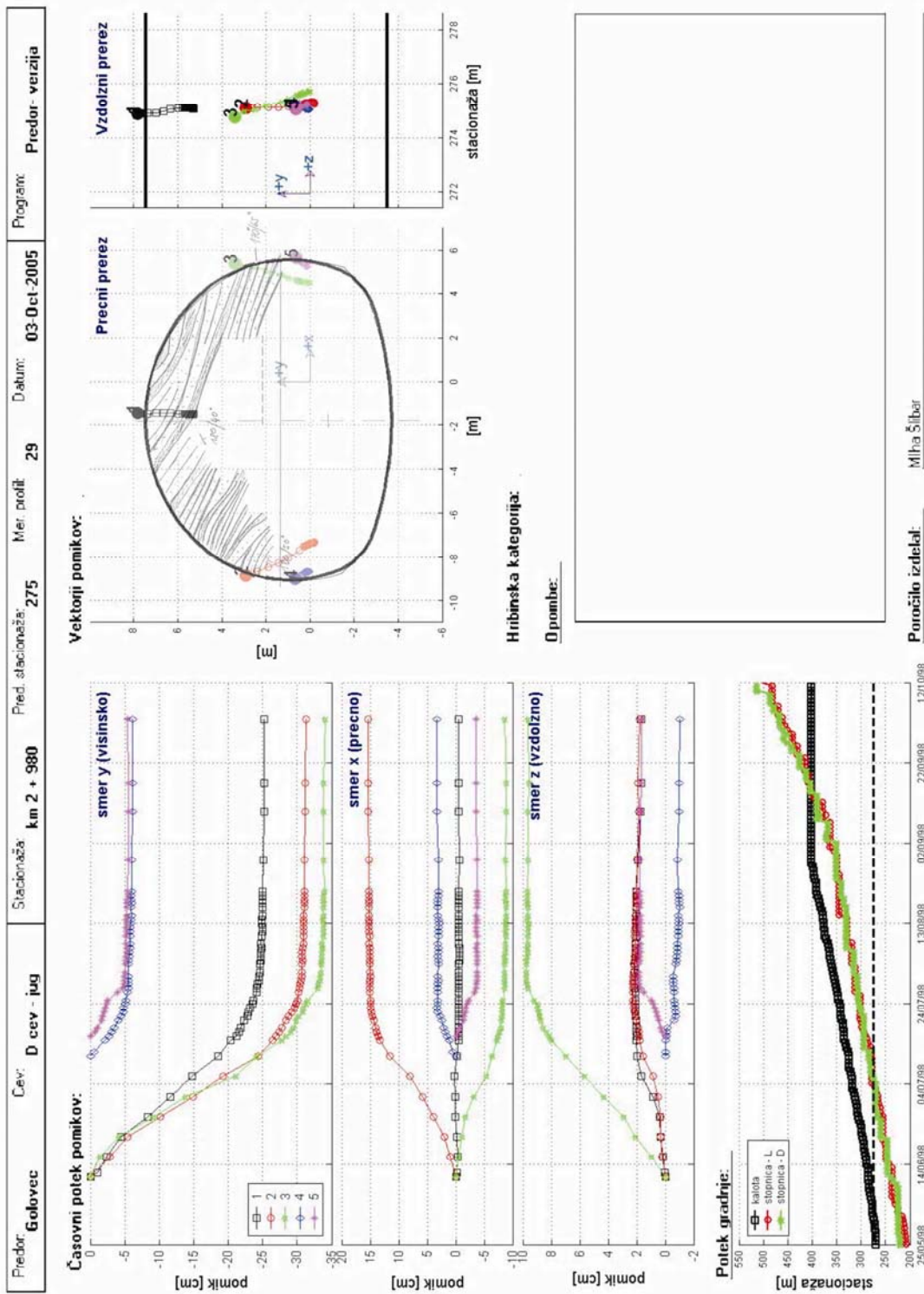


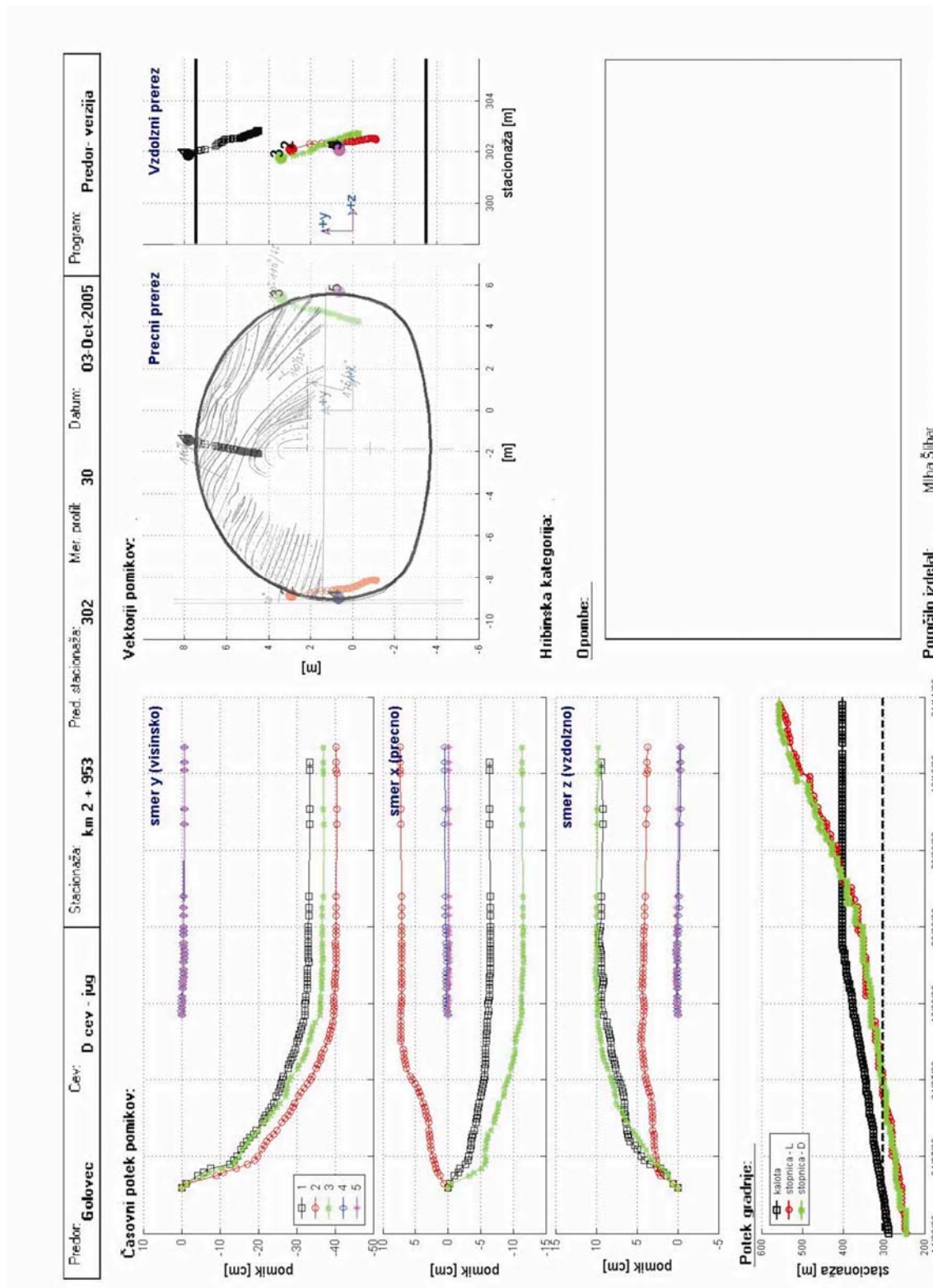
Pomočilo izdelal:

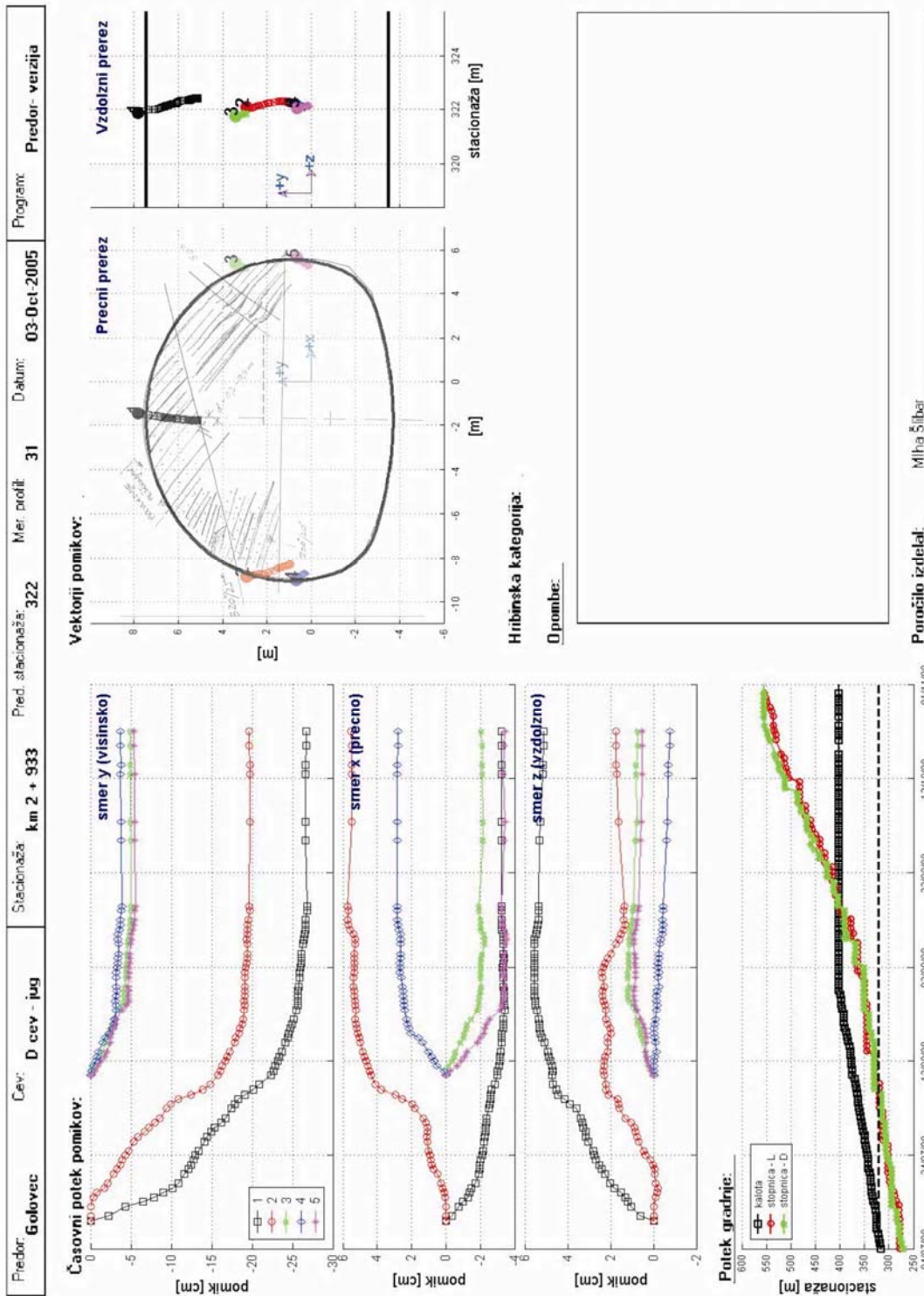
Milha Šlibar

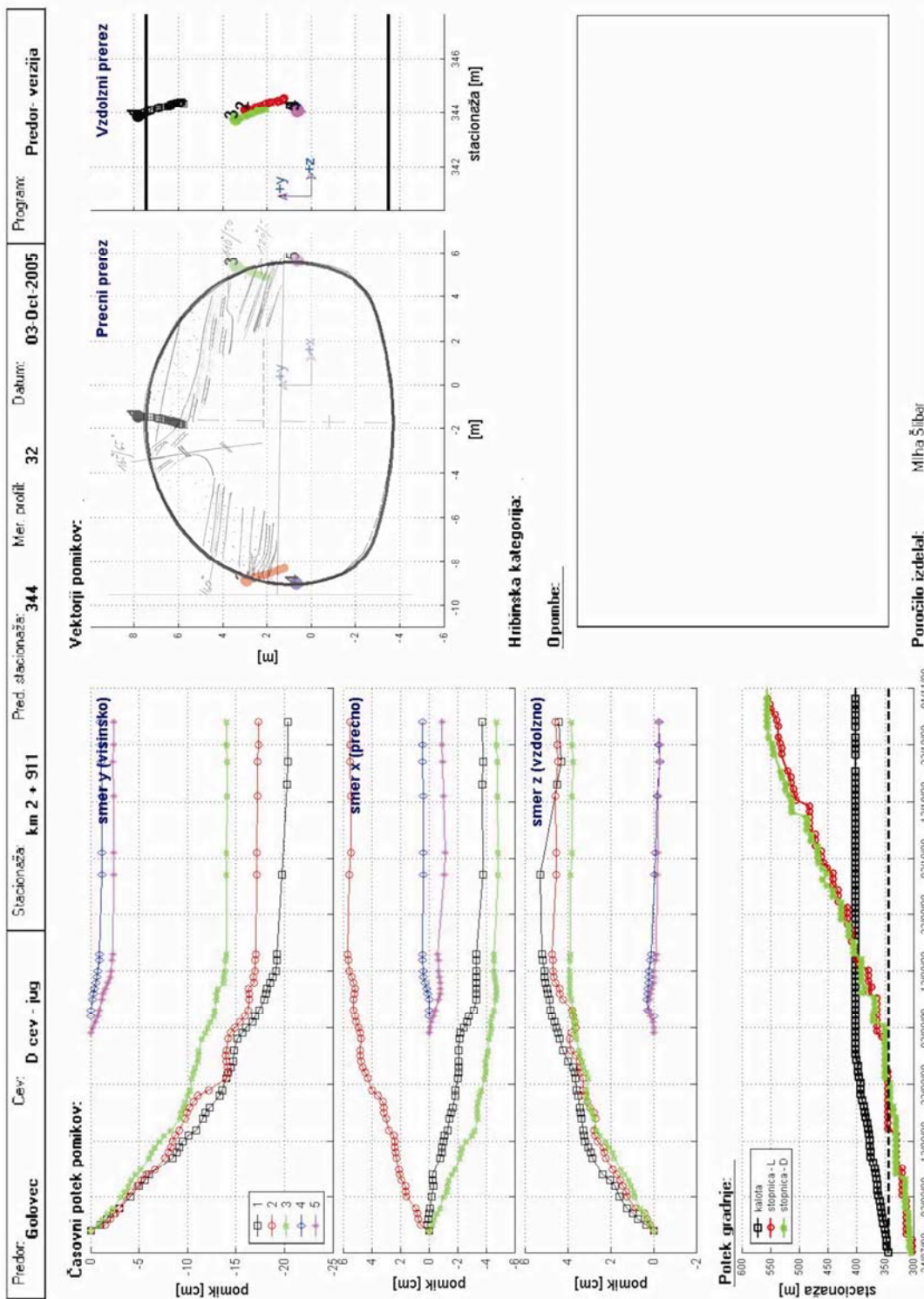
150498 050598 140698 040798 240798 130898 020998 220998 121098 011198



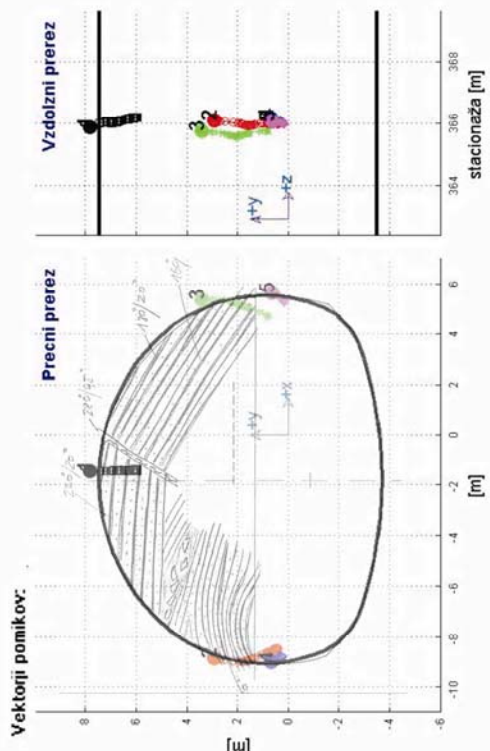
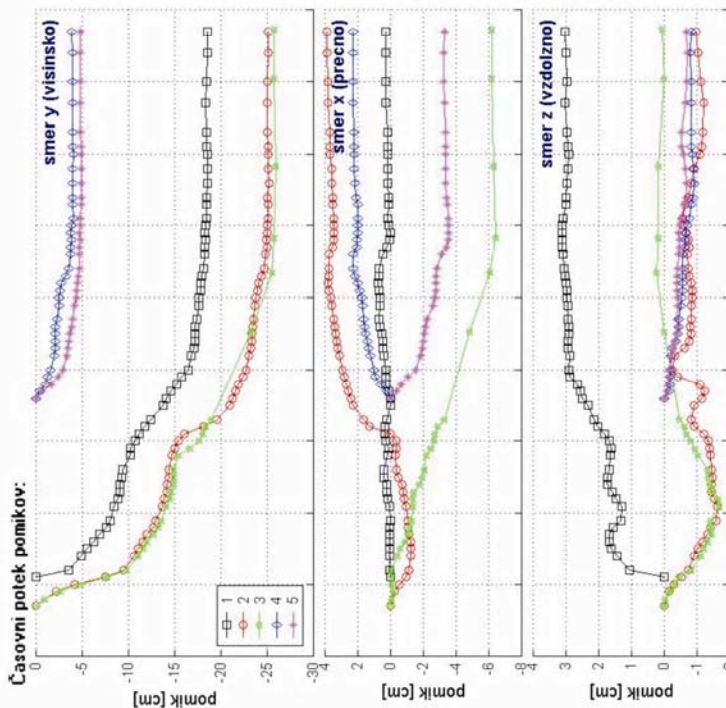




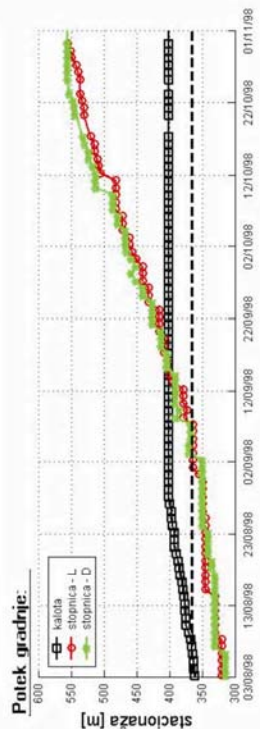
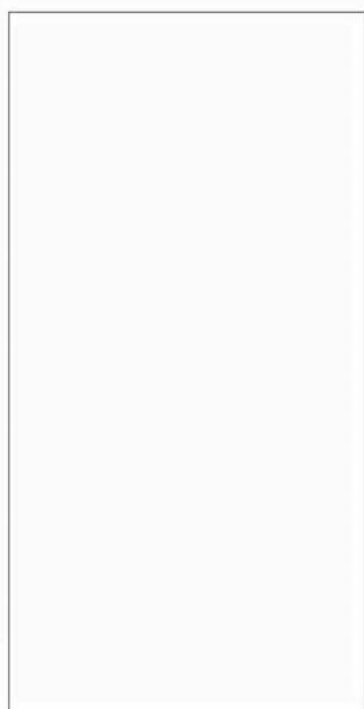




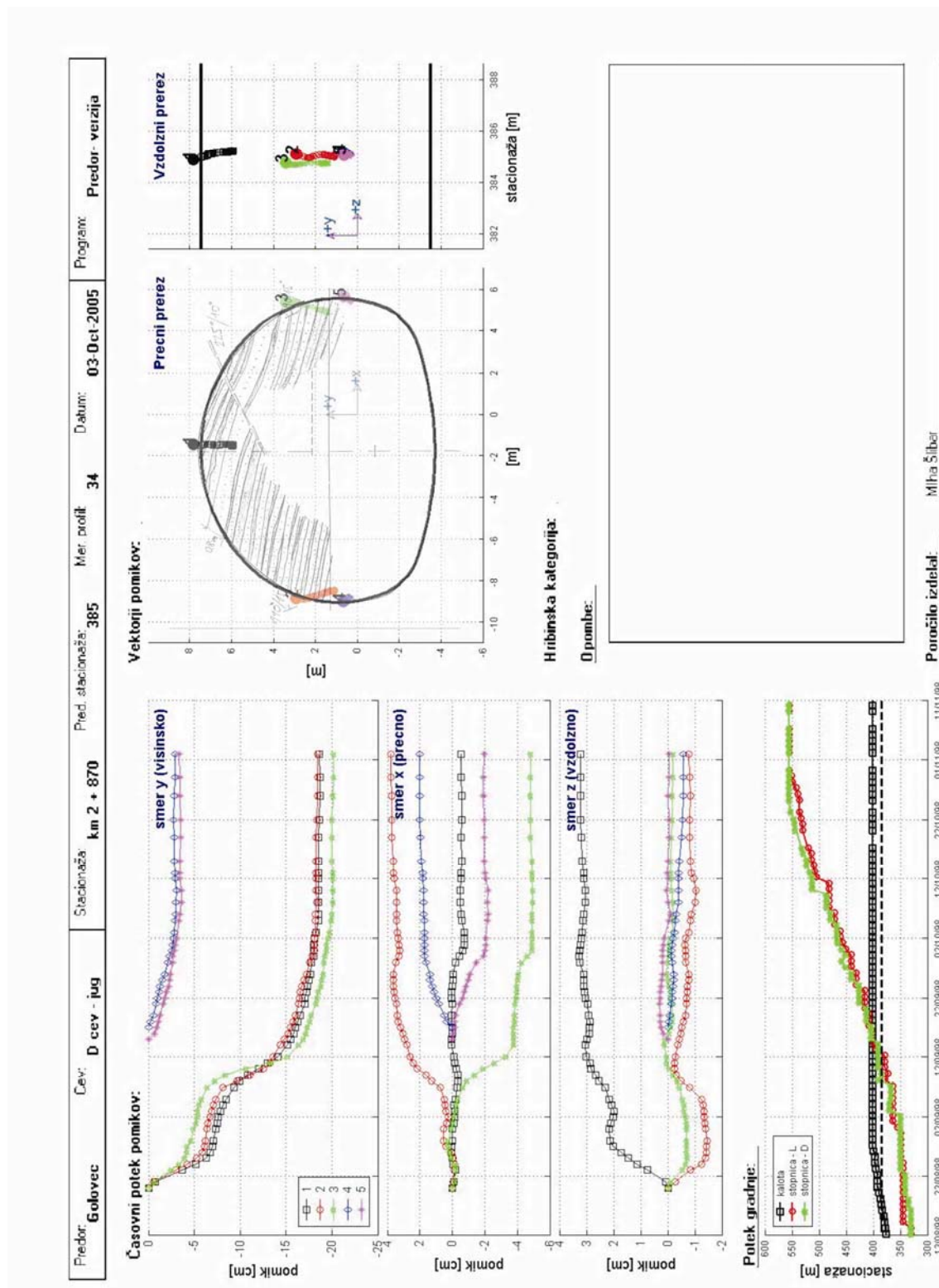
Predor: Golovec	Cev: D cev - jug	Stacionaža: km 2 + 889	Pred. stacionaža: 366	Mer. profil: 33	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor- verzija
------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------



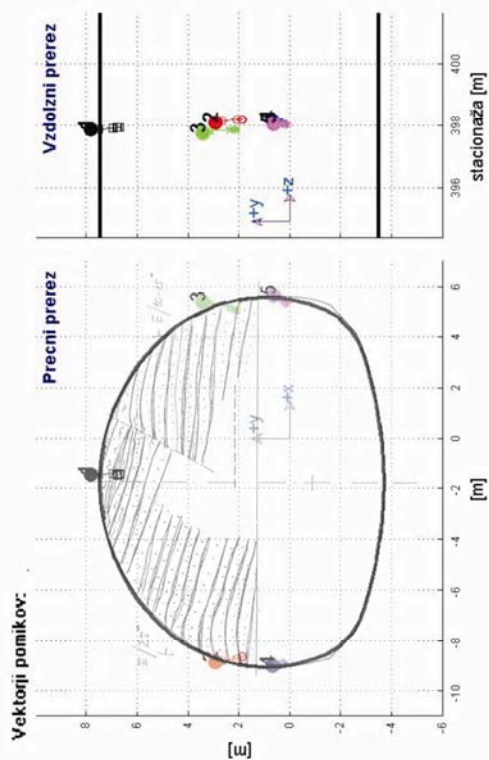
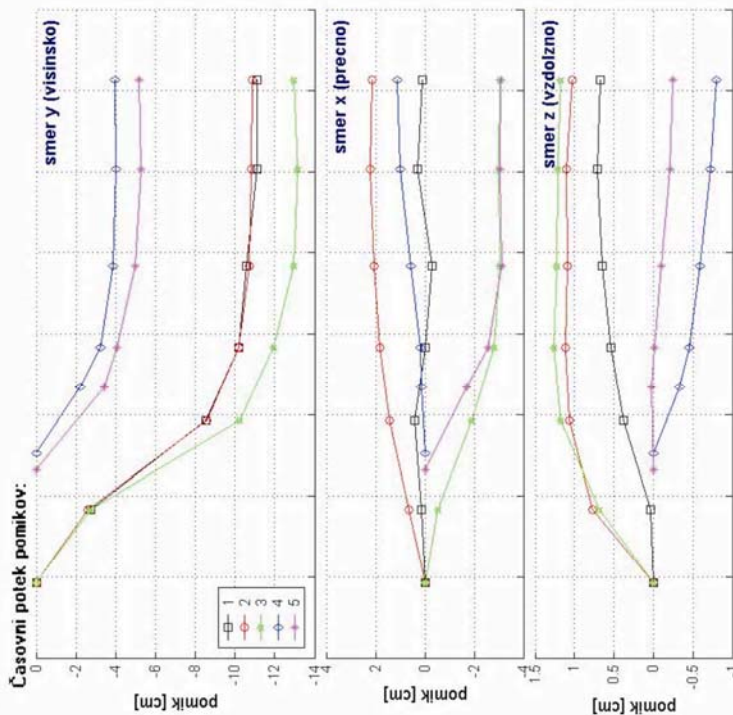
Hribinska kategorija: _____
 O pombe: _____



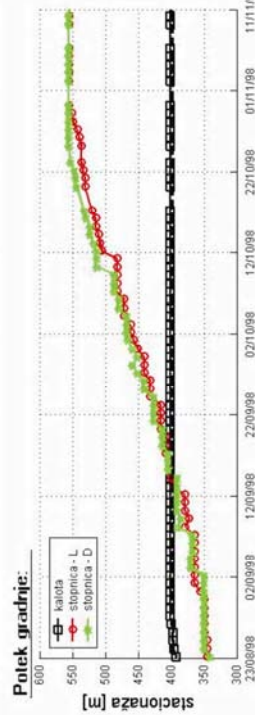
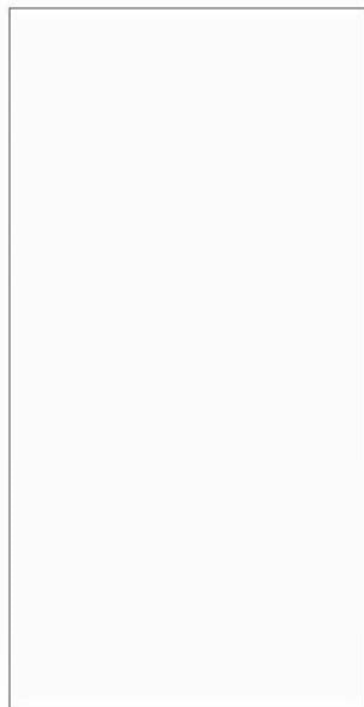
Poročilo izdelal: Milna Šlibar



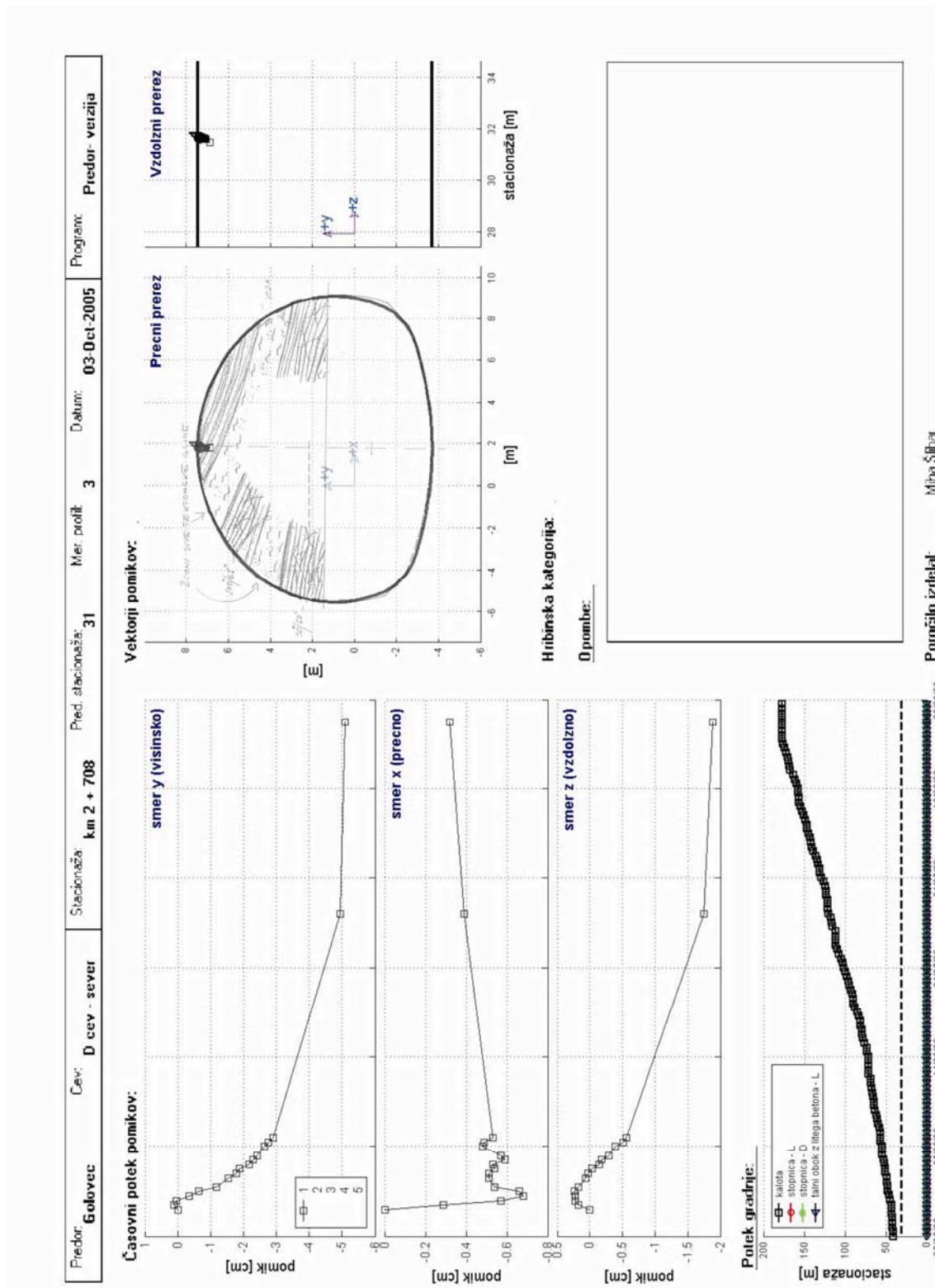
Predor: Golovec	Cev: D cev - jug	Stacionaža: km 2 + 857	Pred. stacionaža: 398	Mir. profil: 35	Datum: 03.0ct.2005	Program: Predor- verzija
------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------

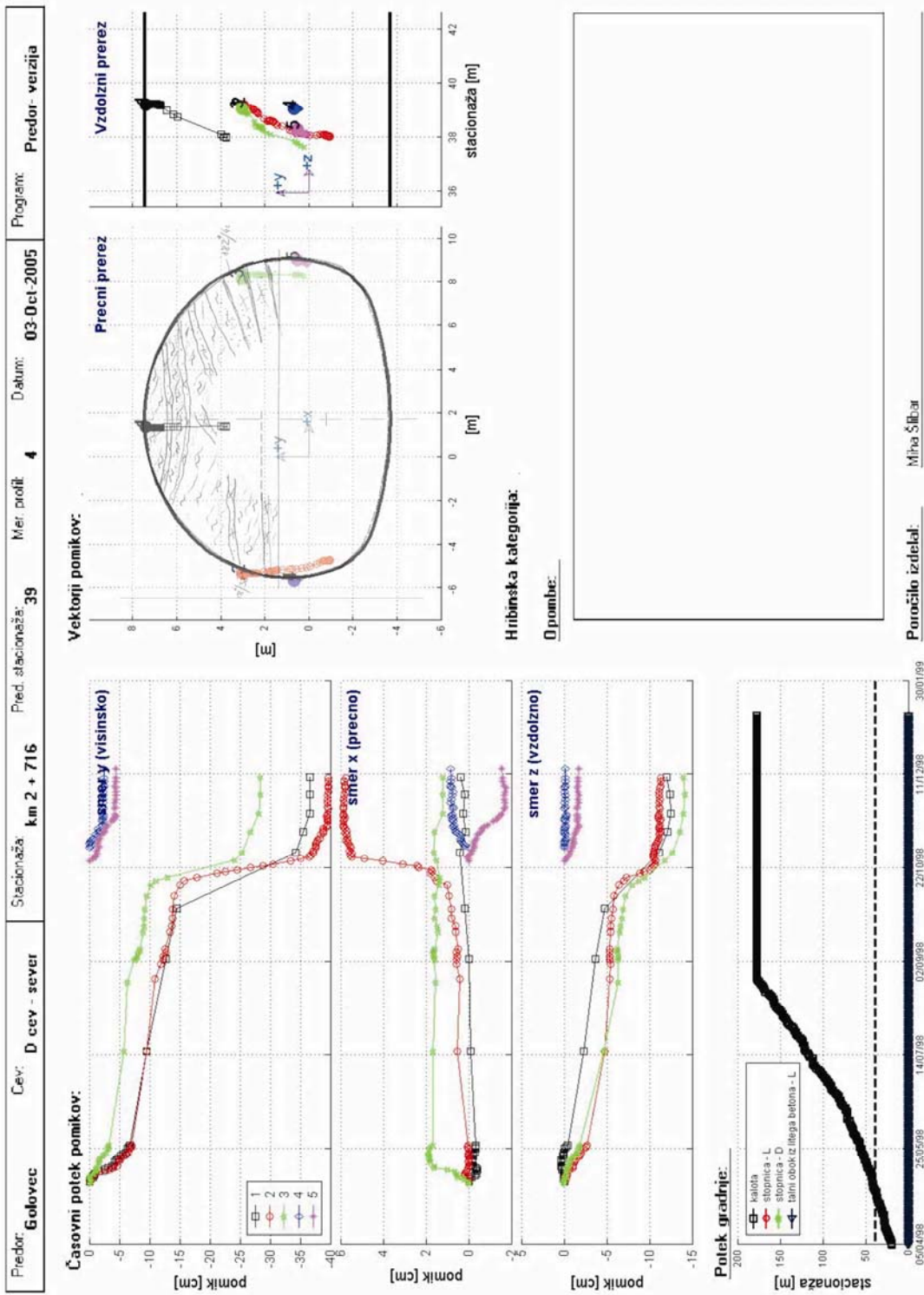


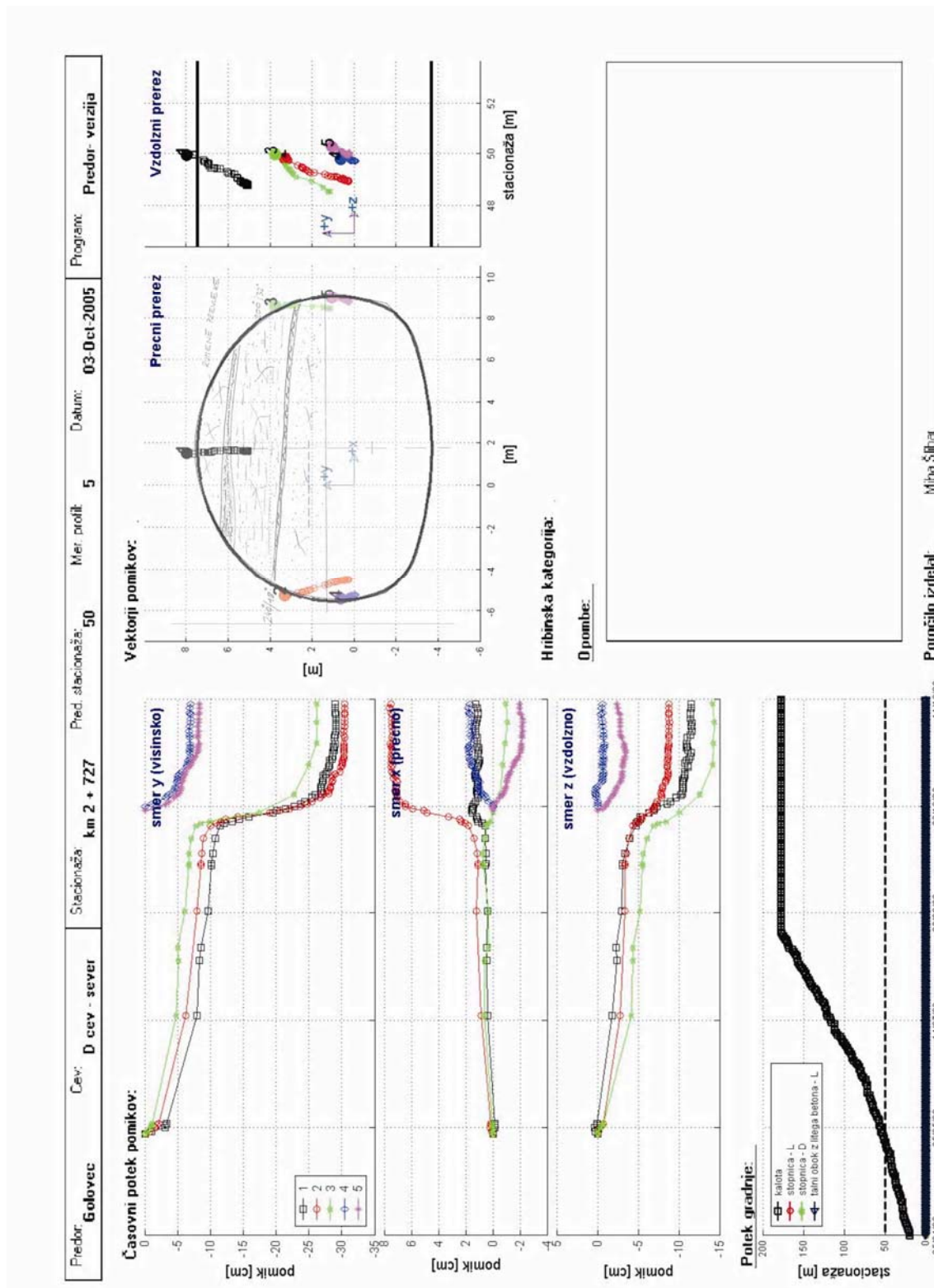
Hrbinska kategorija: _____
 0 pombes: _____

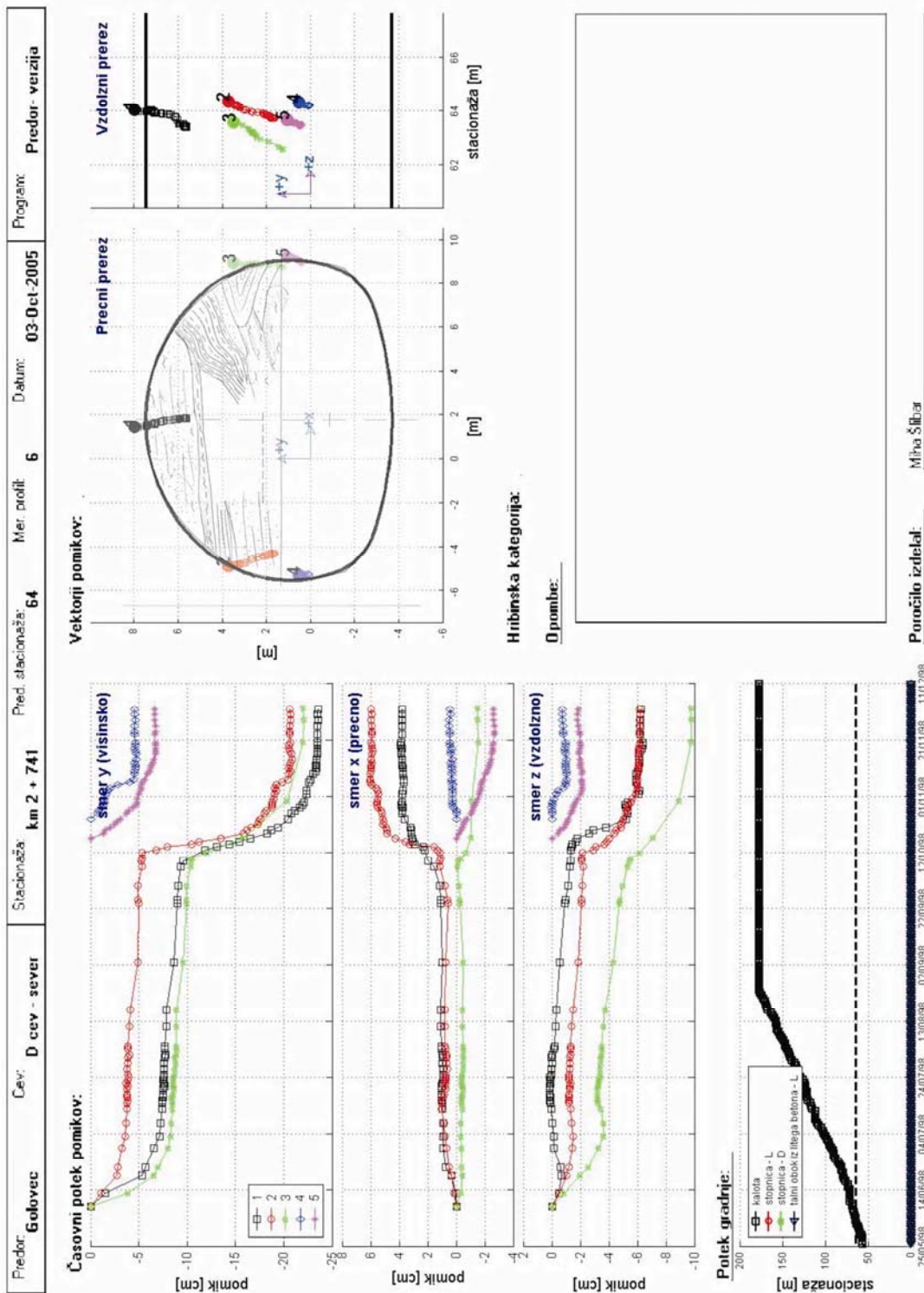


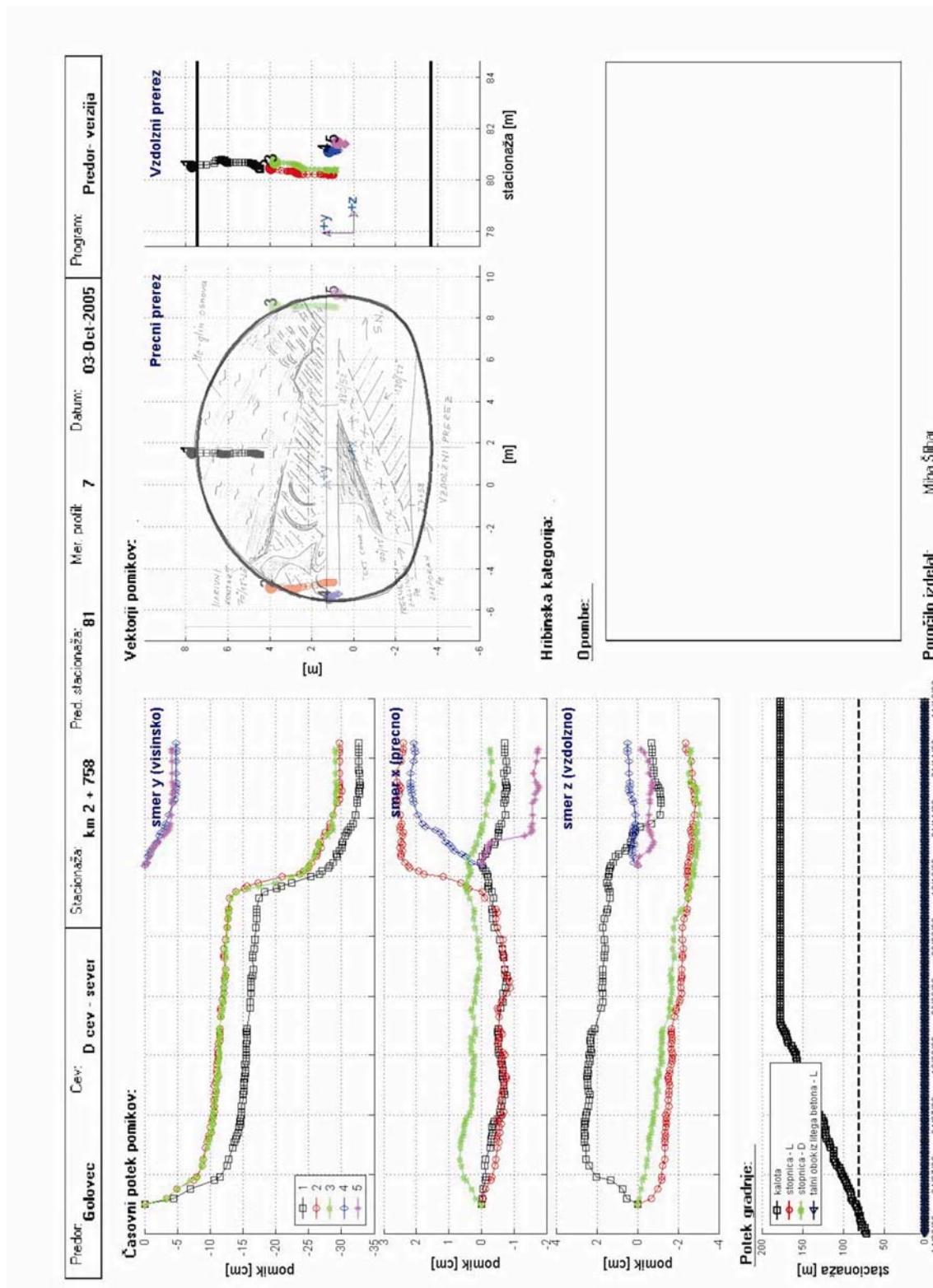
Poročilo izdelal: Milha Šlibar

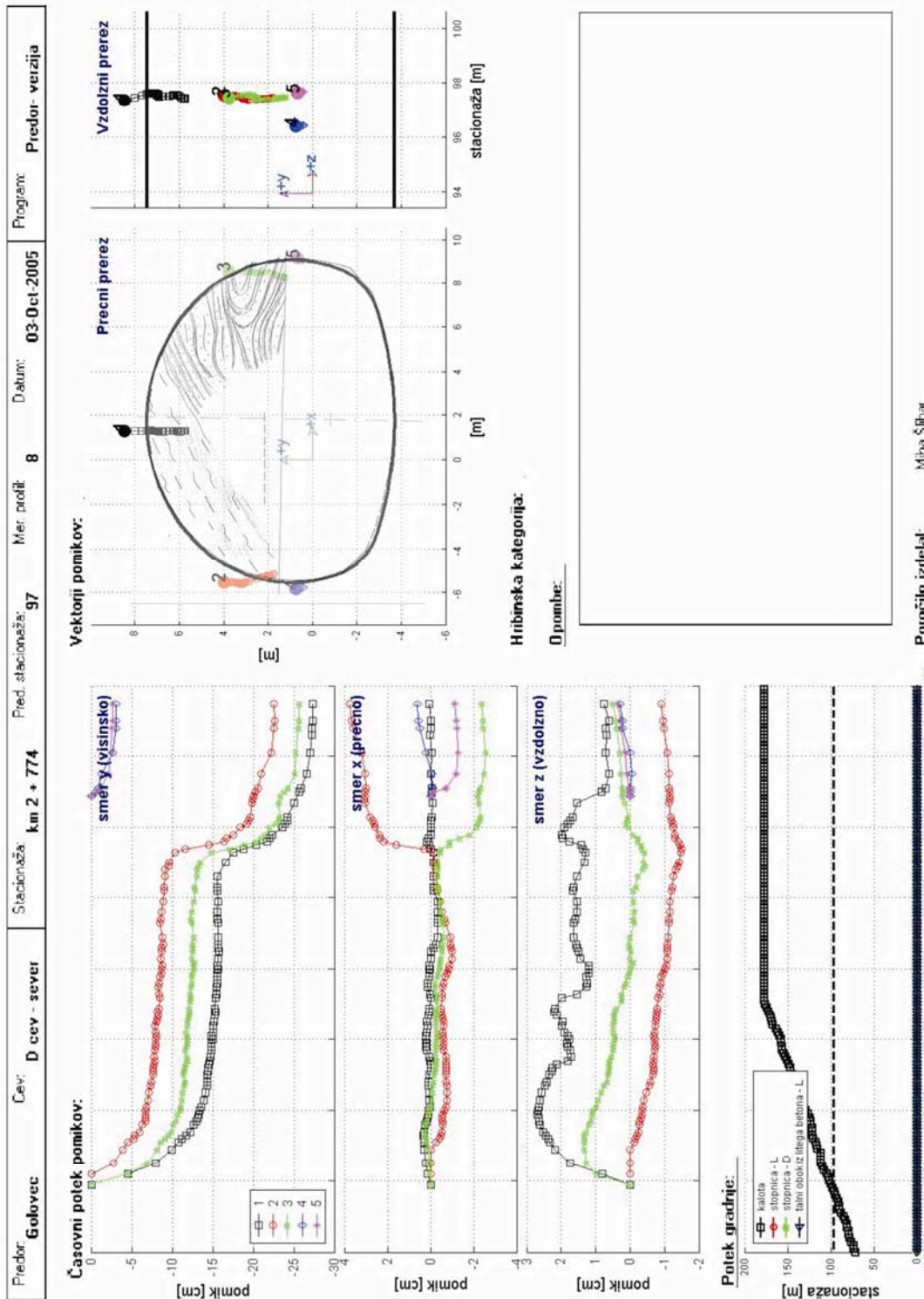


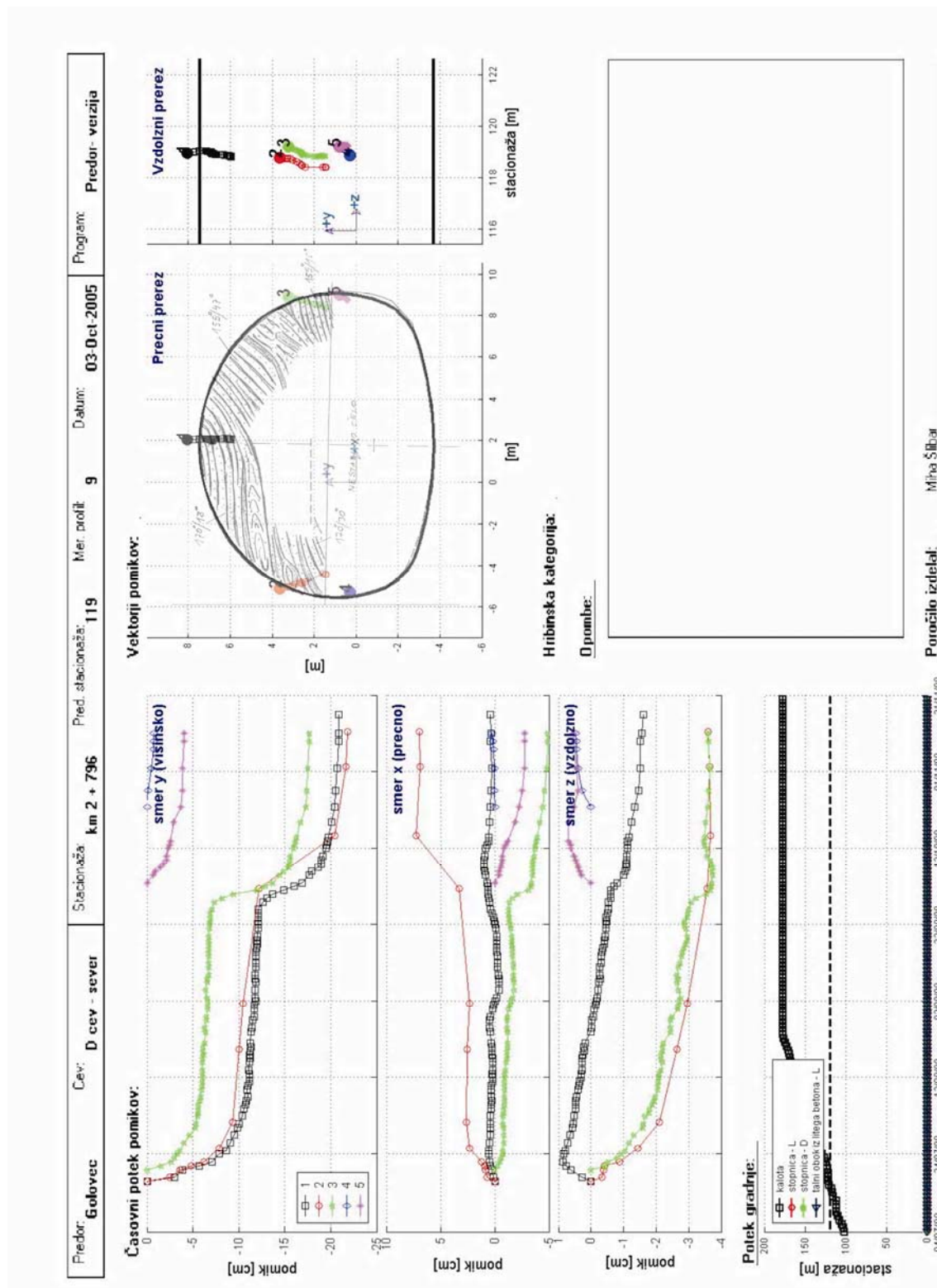


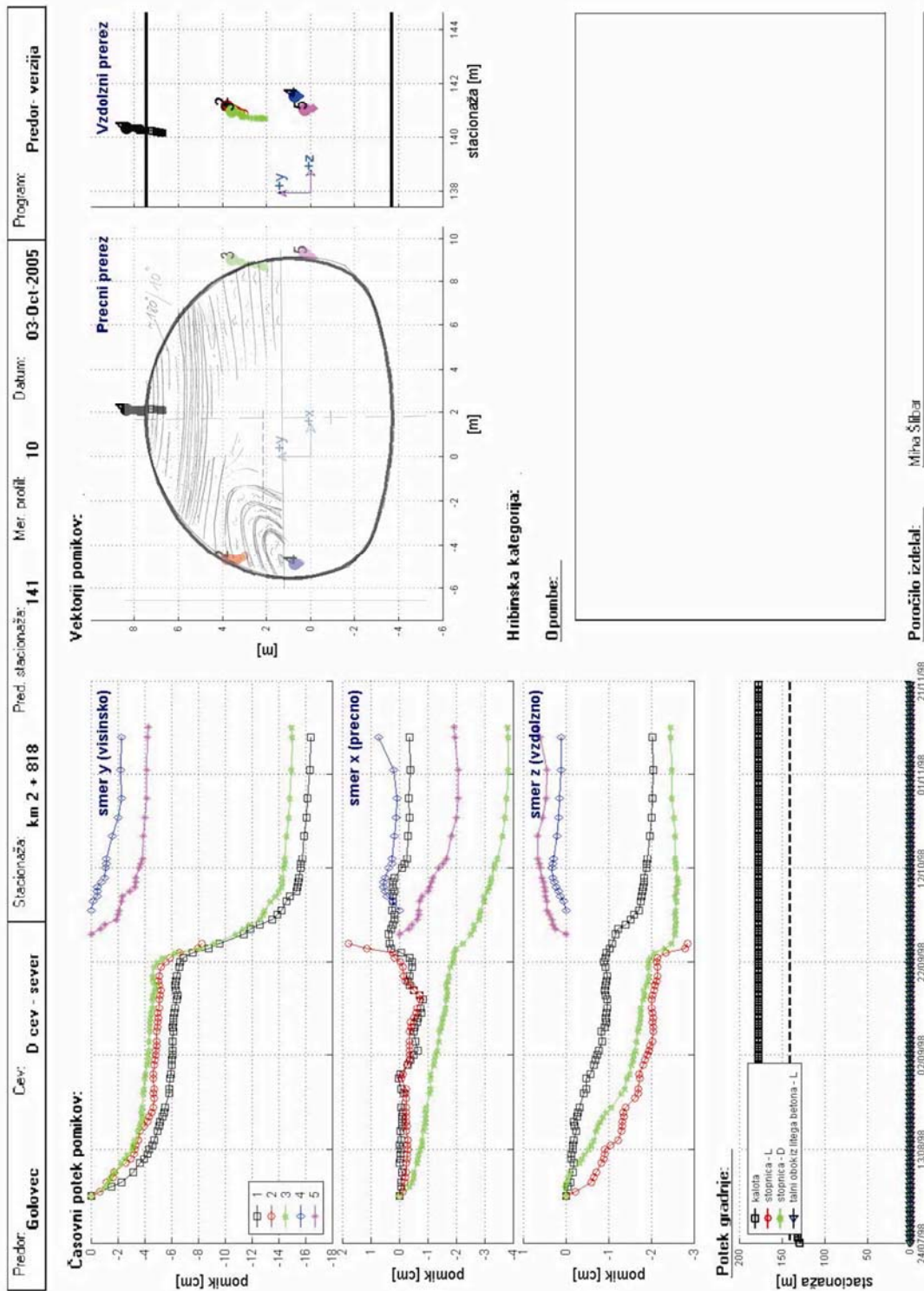


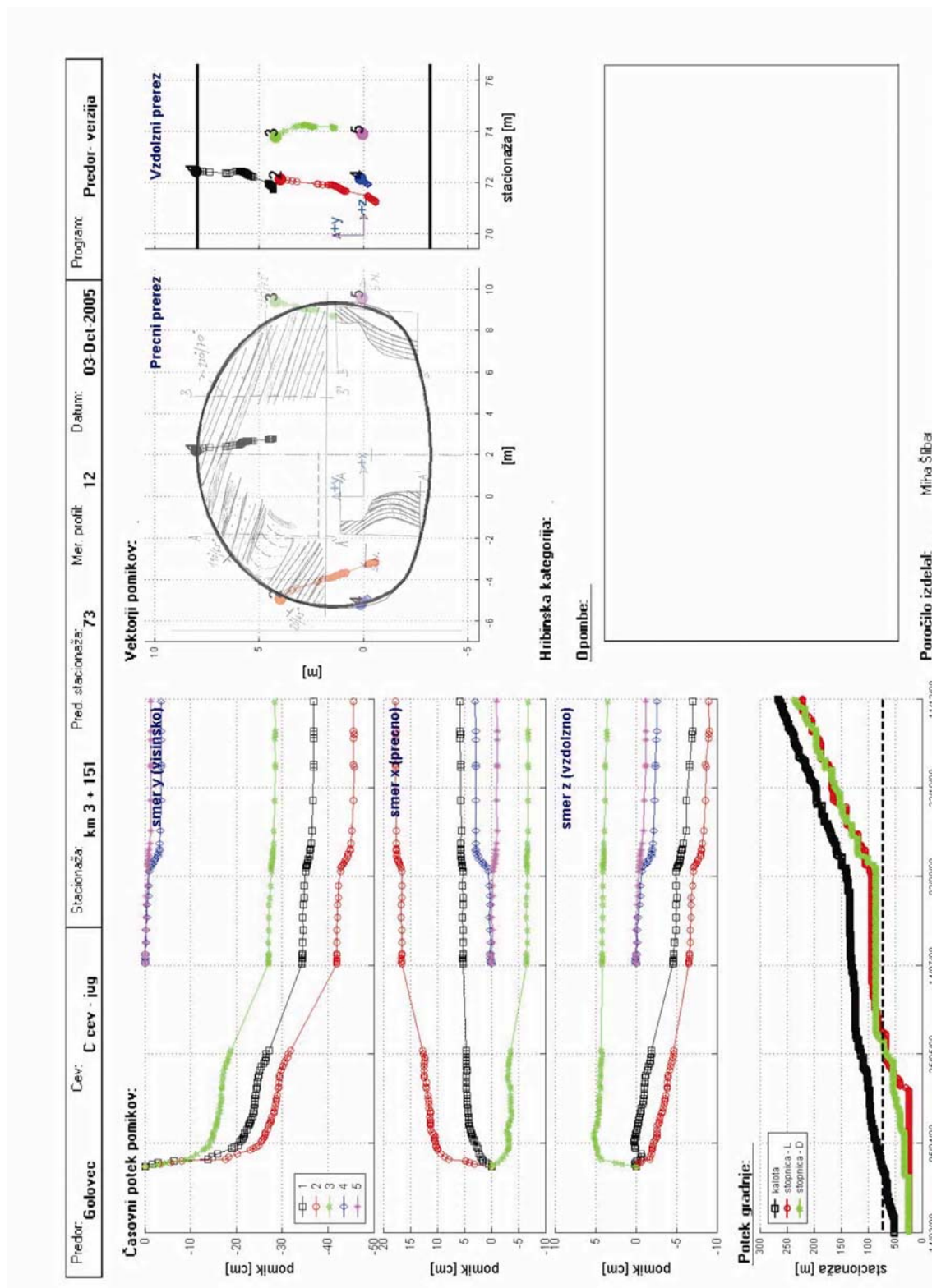




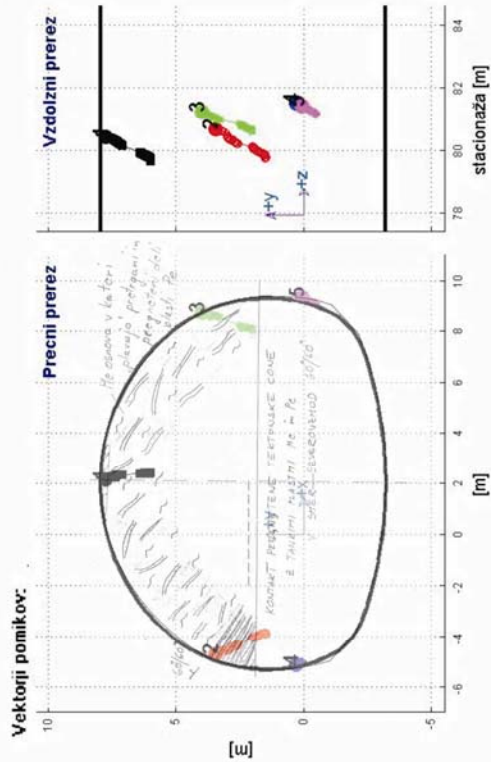
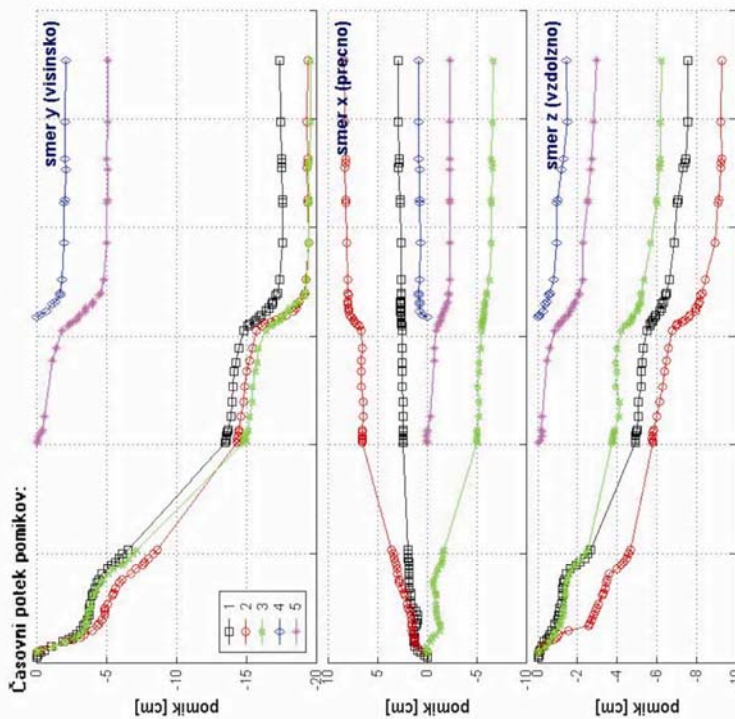




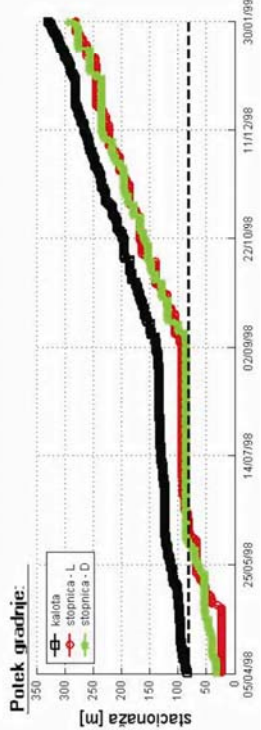




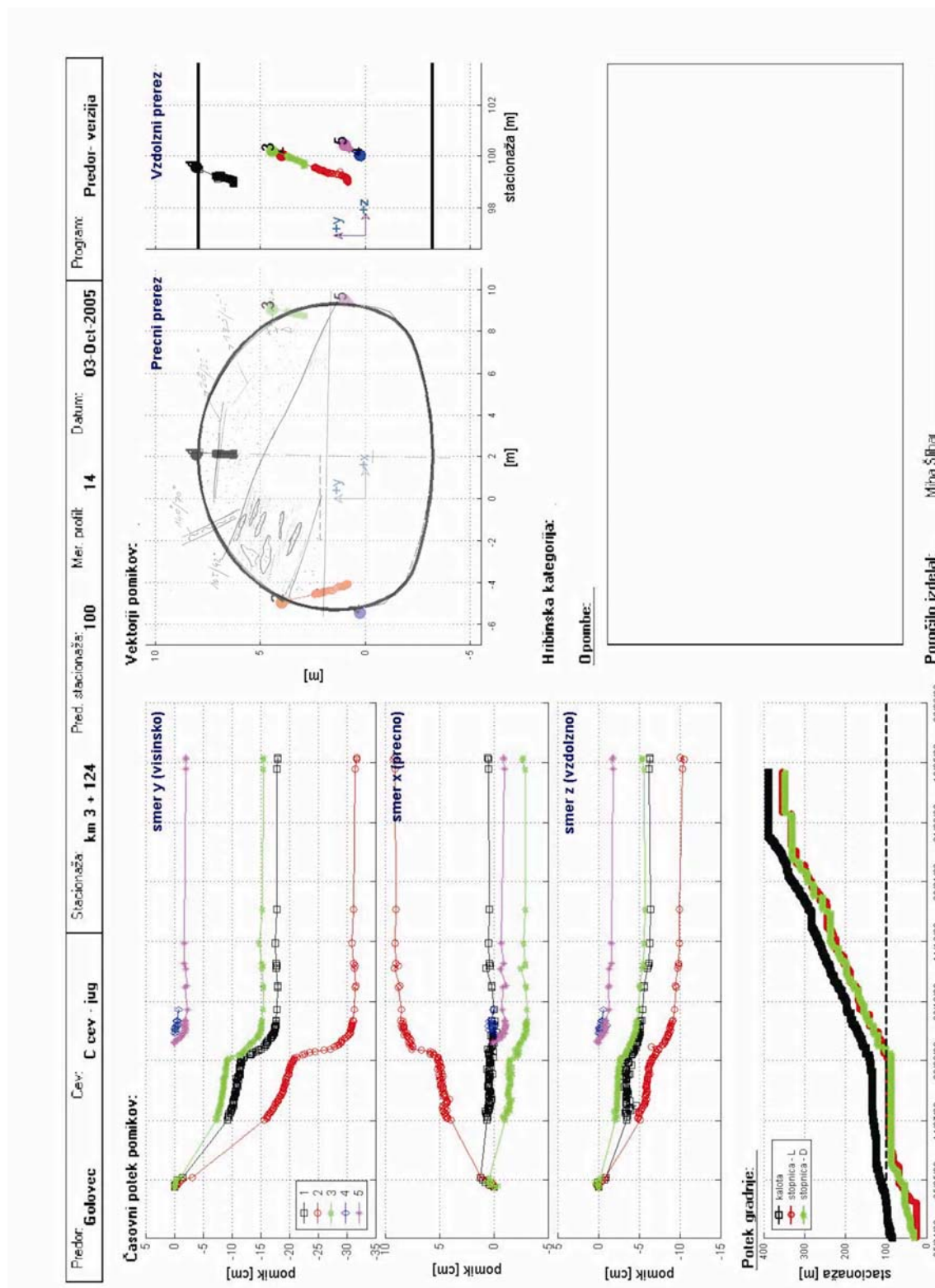
Fredor: Golovec	Cev: C cev - jug	Stacionaža: km 3 + 143	Pred. stacionaža: 81	Mer. profil: 13	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor - verzija
------------------------	-------------------------	-------------------------------	-----------------------------	------------------------	---------------------------	----------------------------------

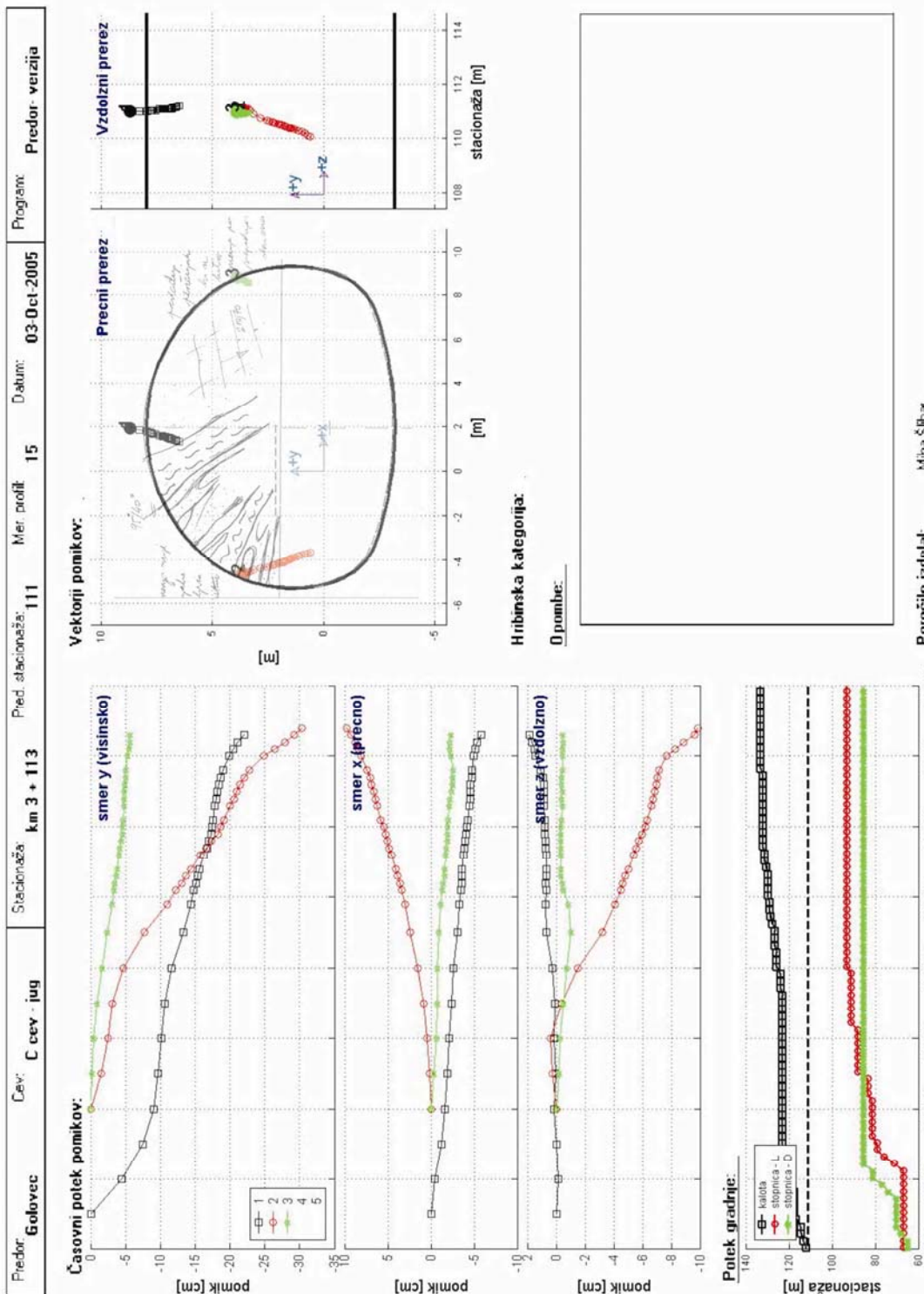


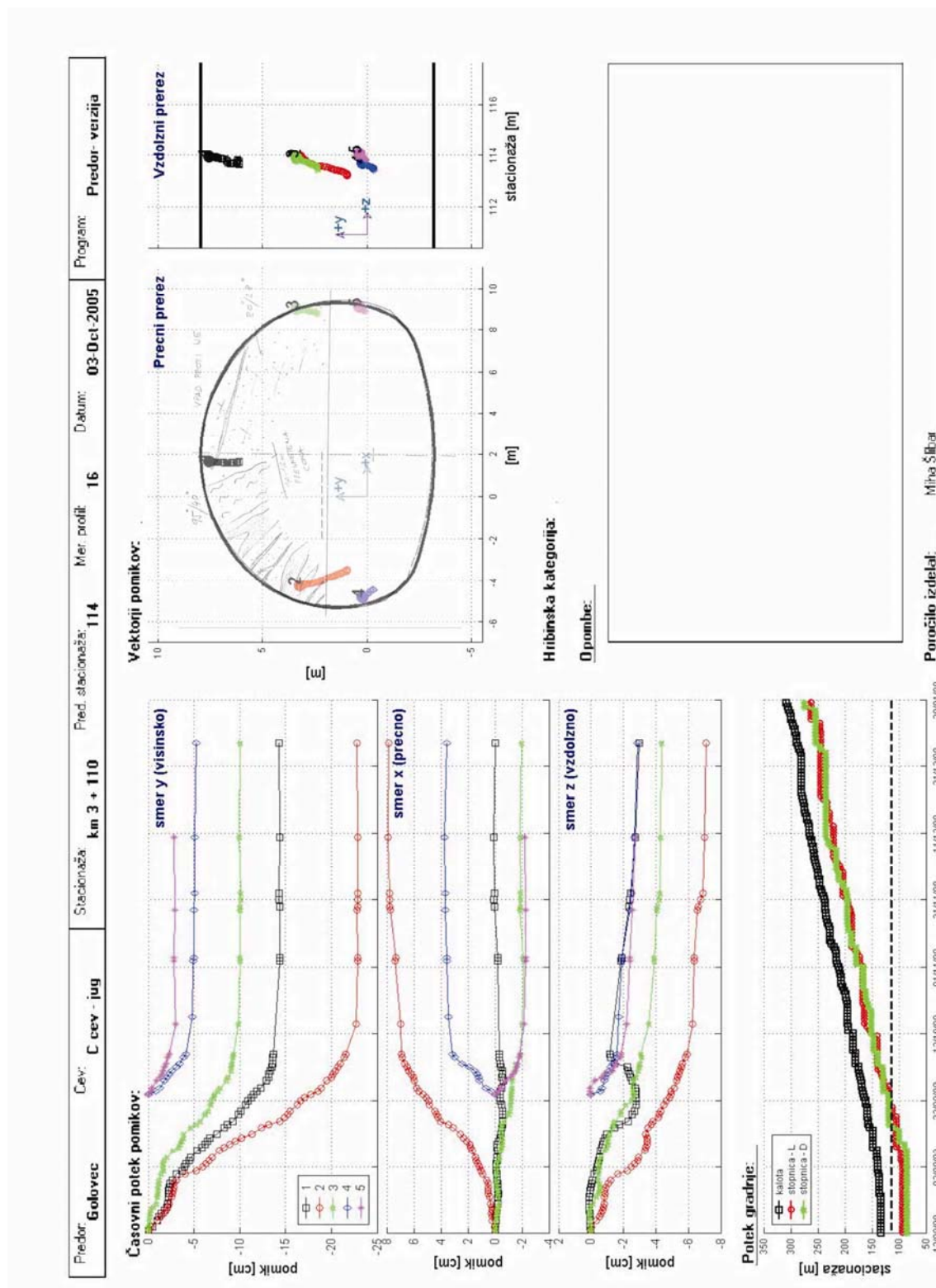
Hribinska kategorija:
 0 pombe:

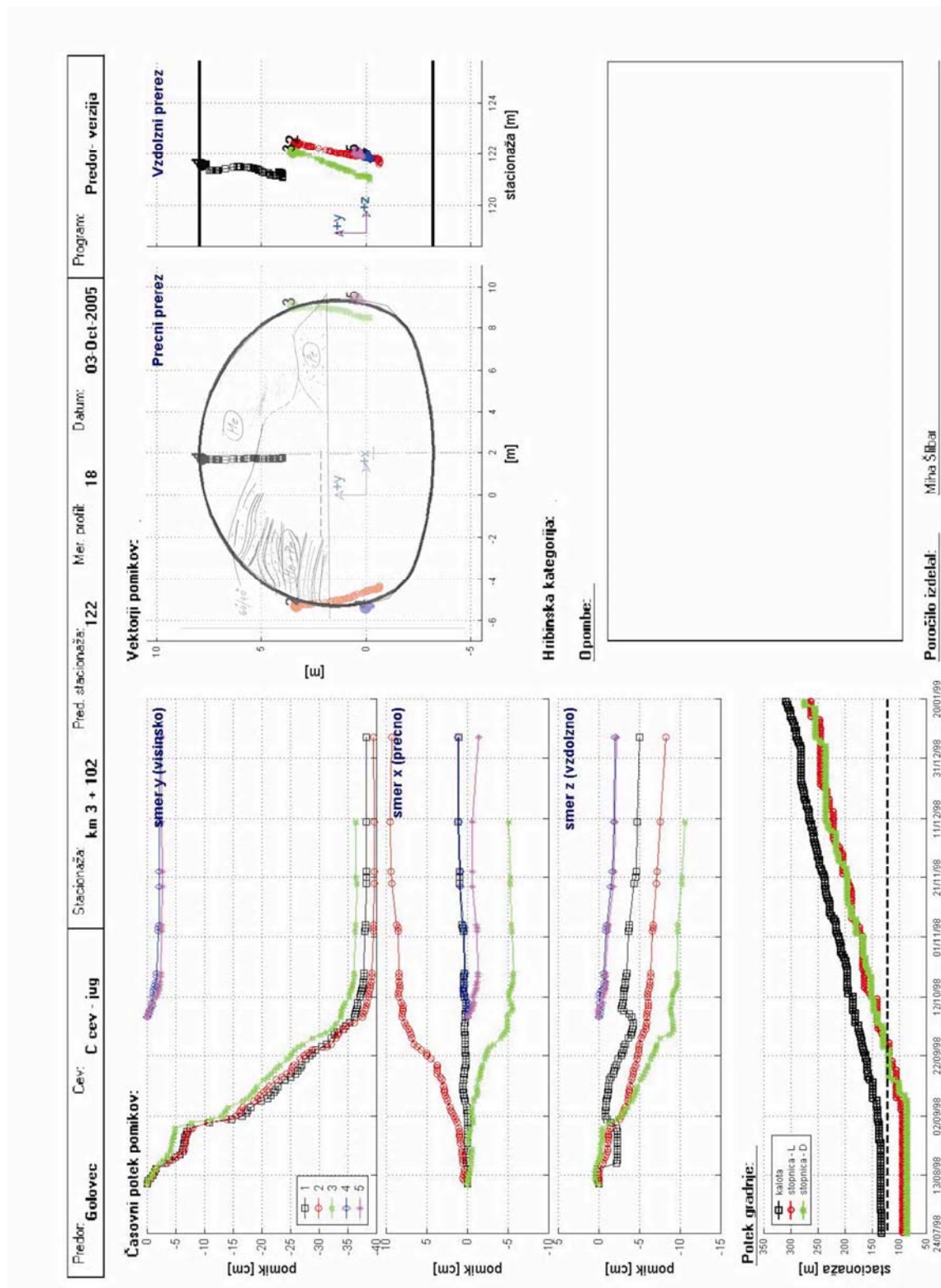


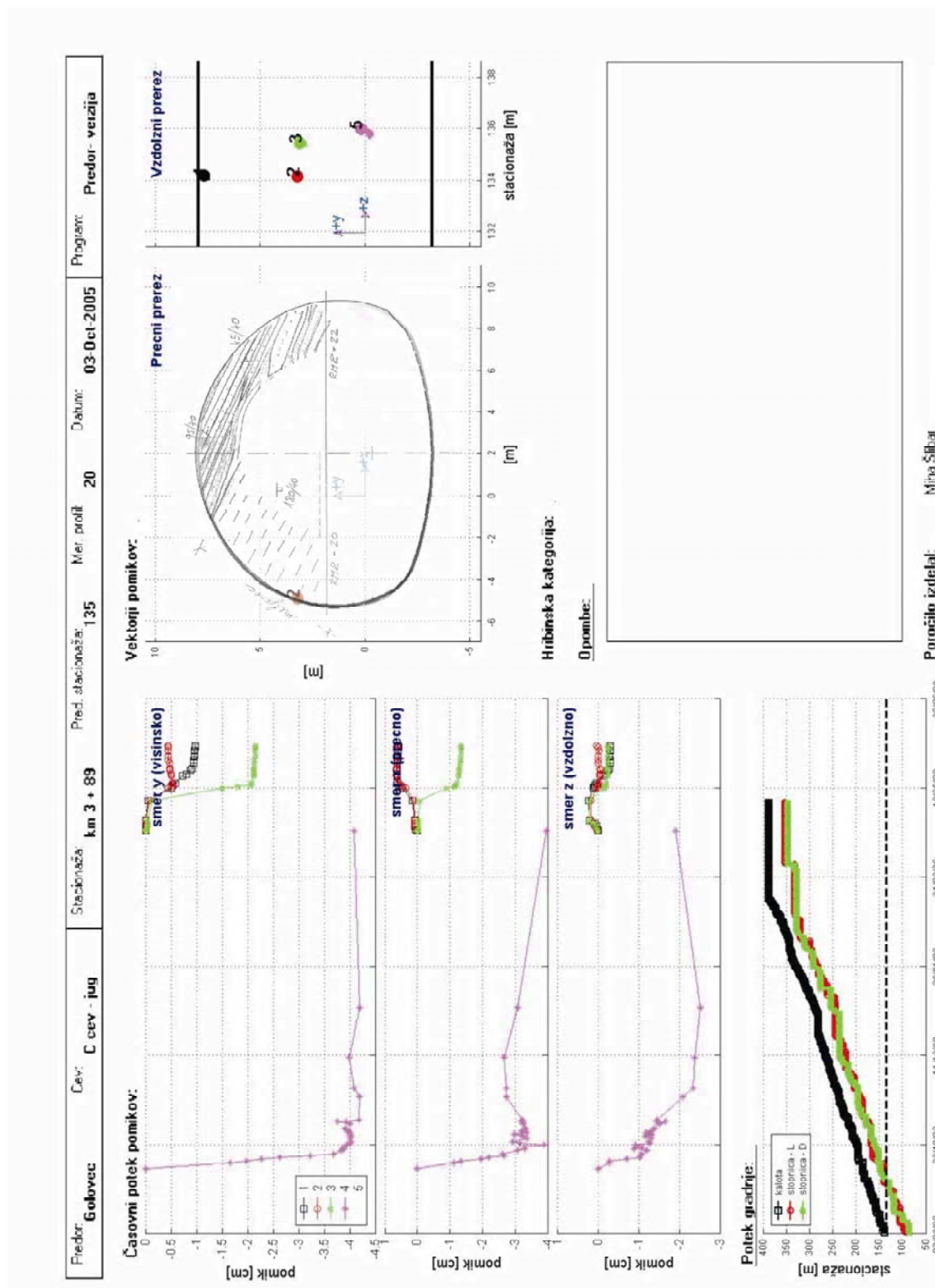
Poročilo izdelal: Milna Šlibar

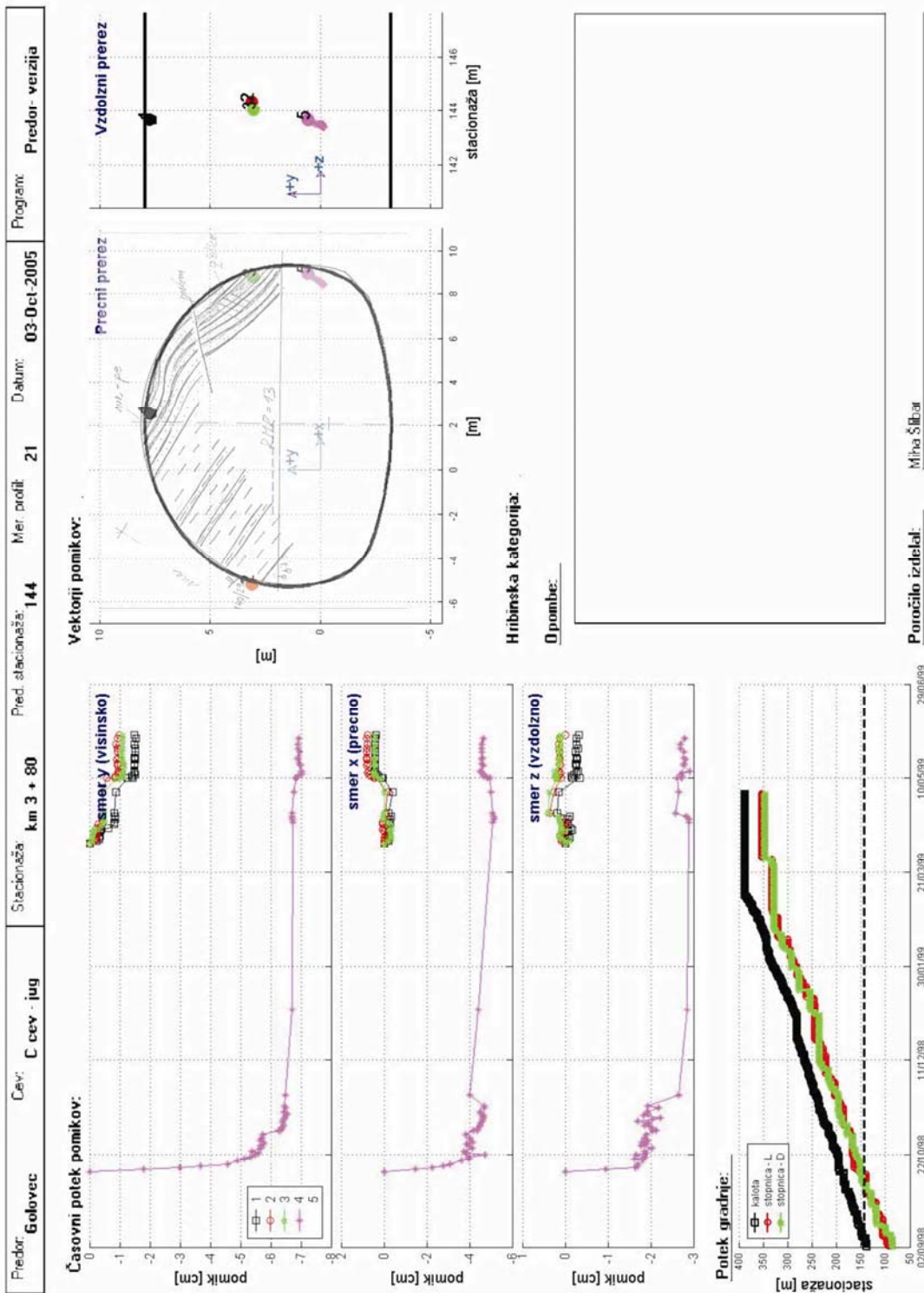


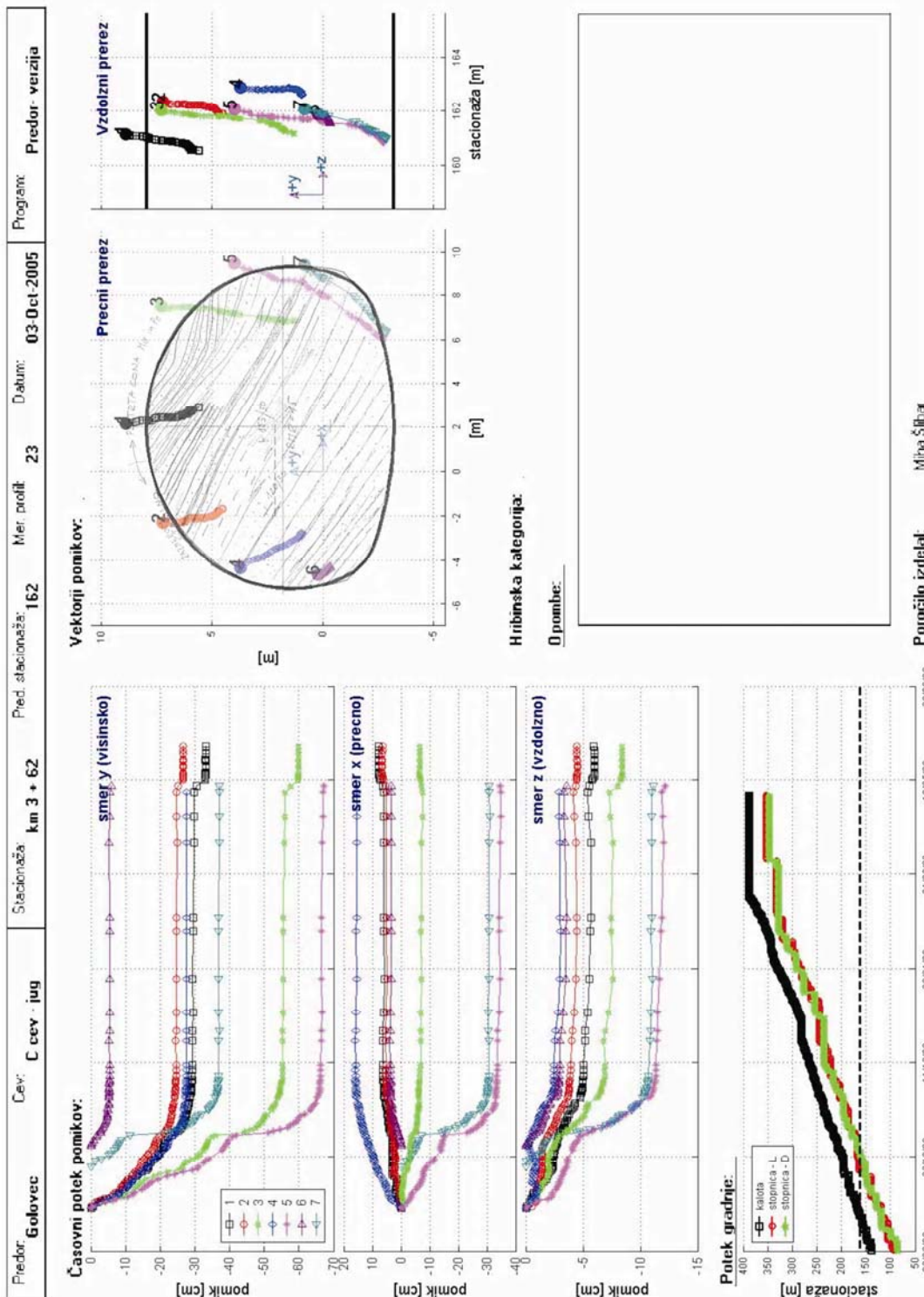


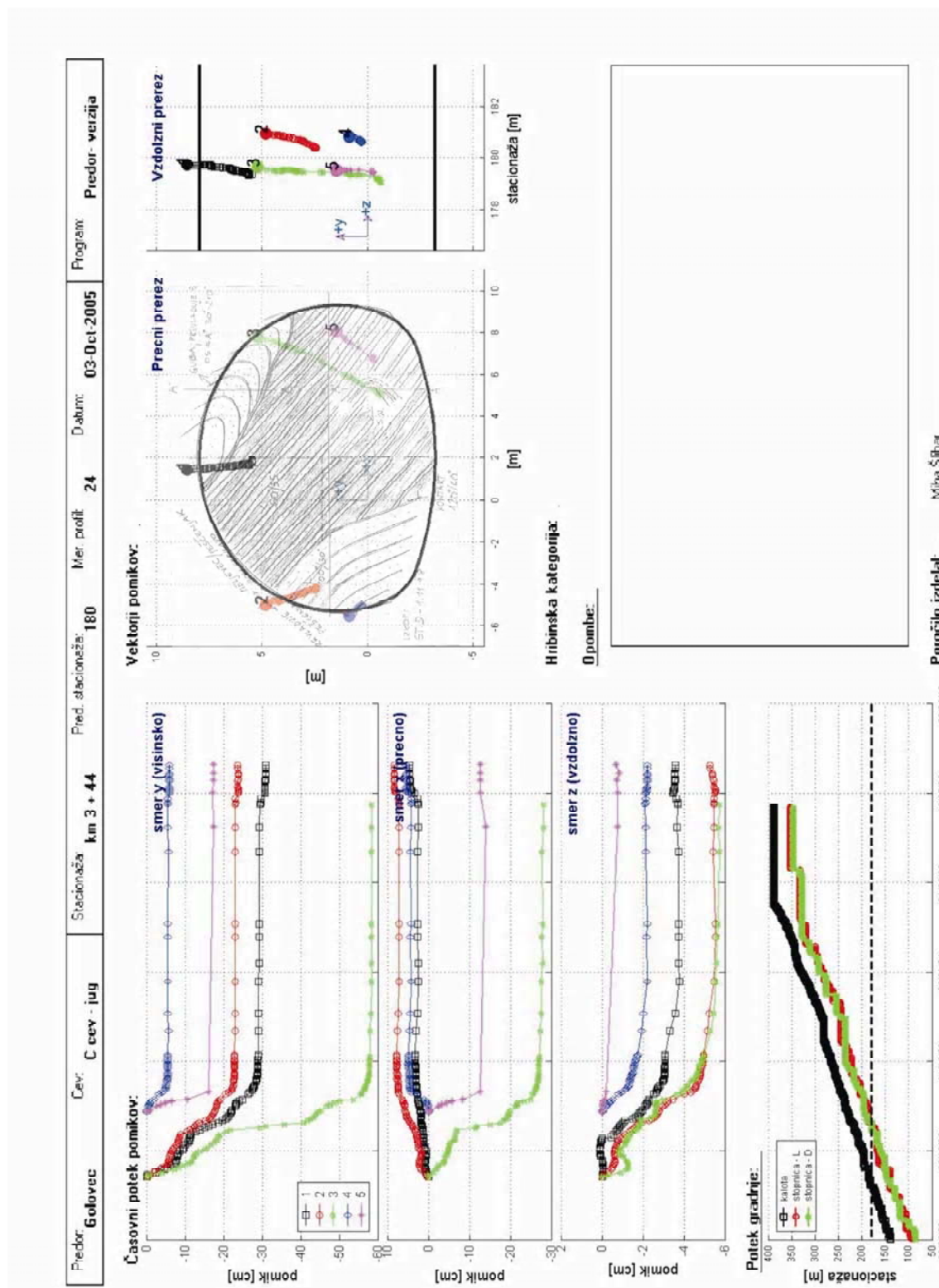


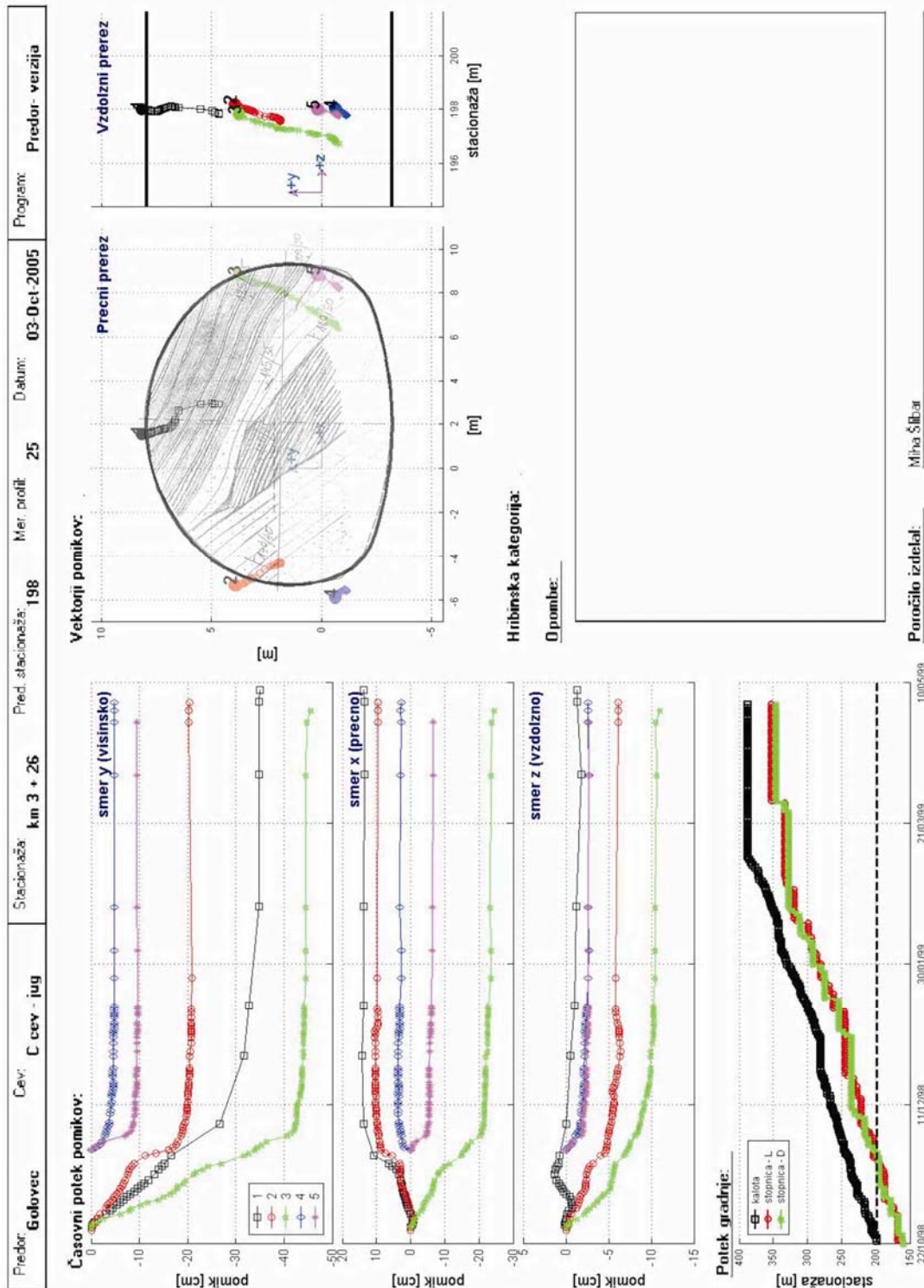


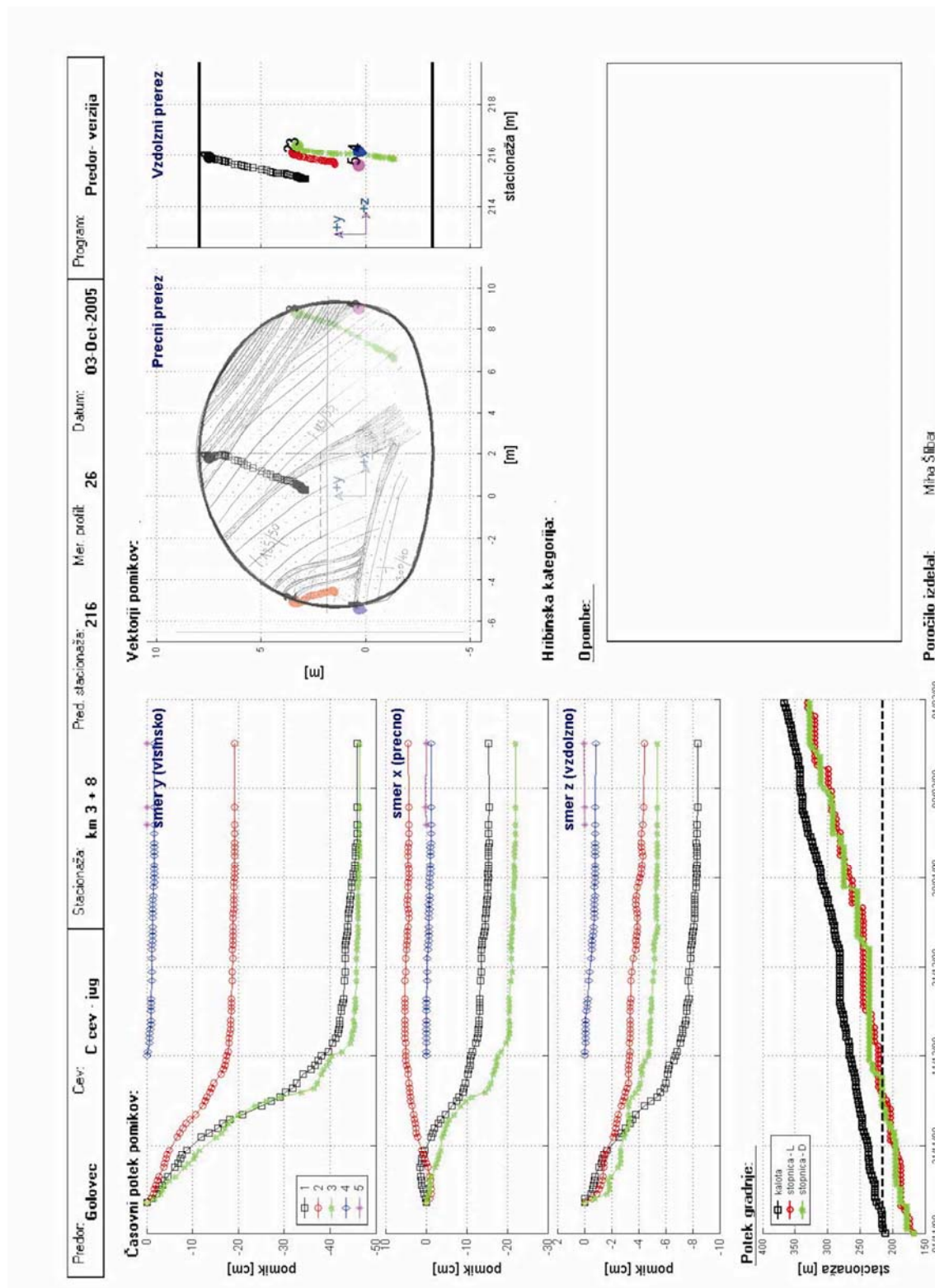


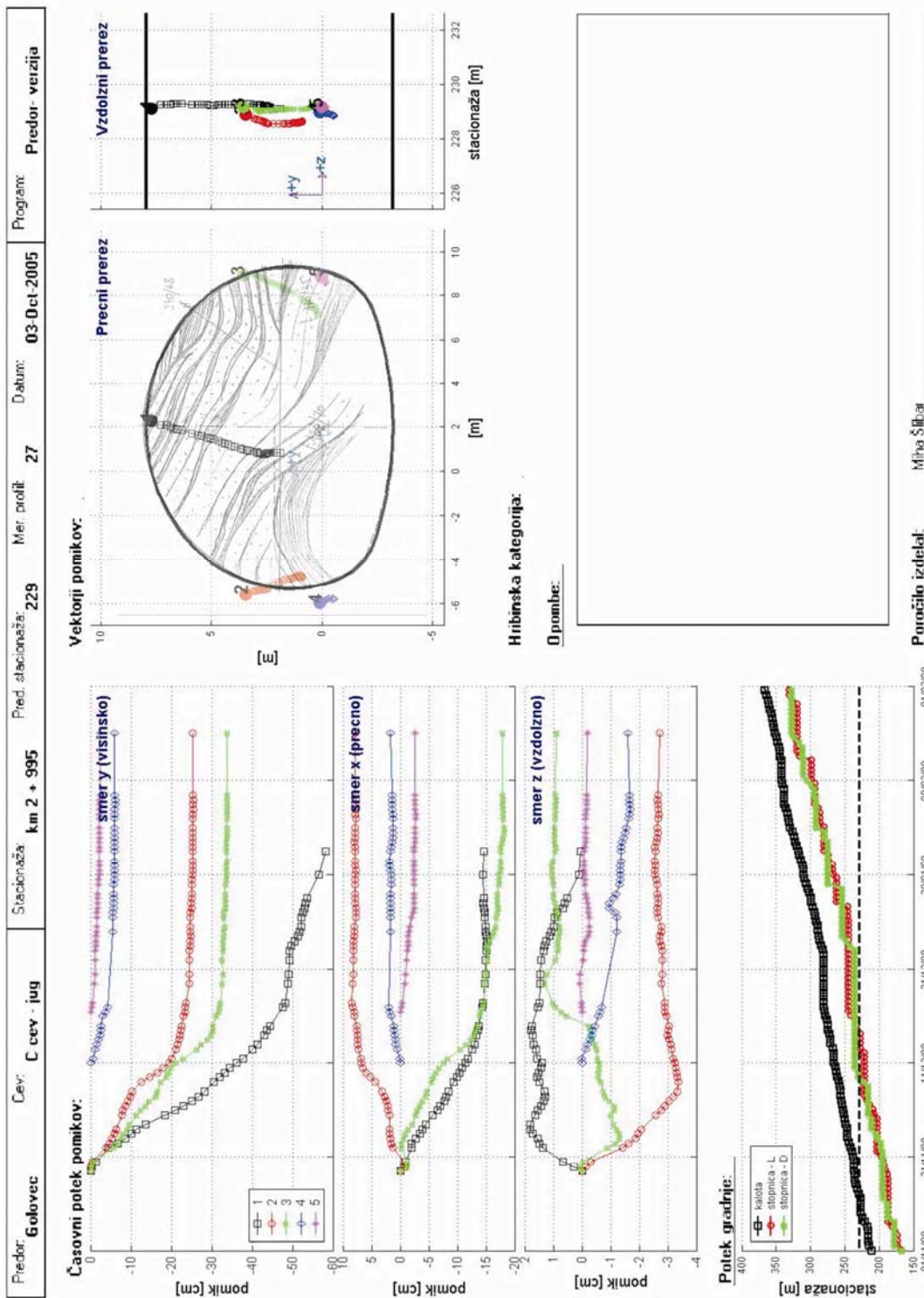


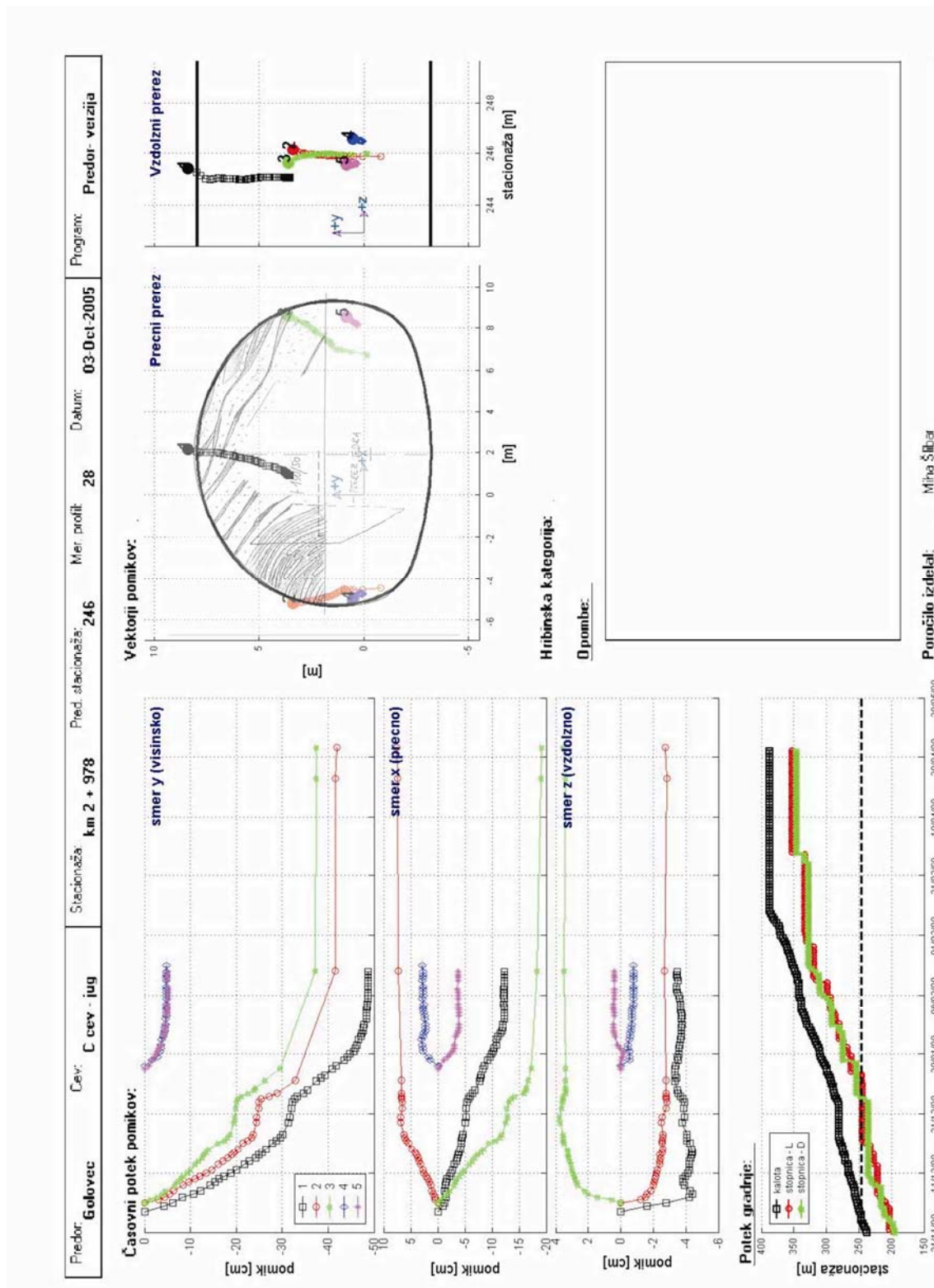




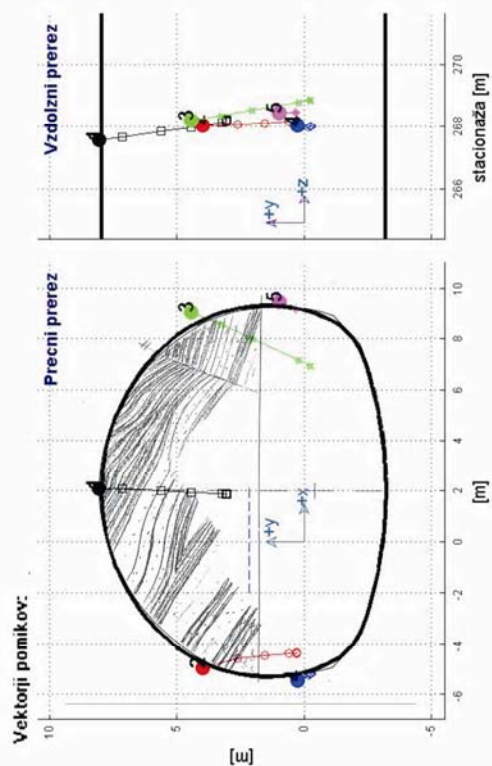
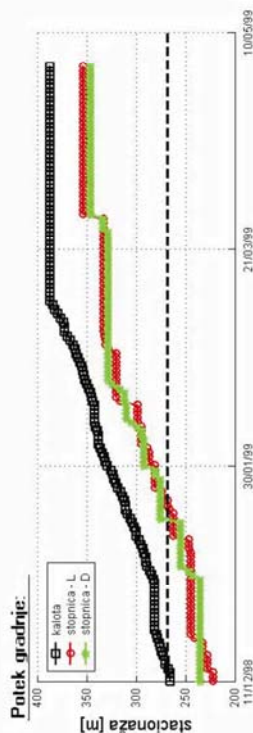
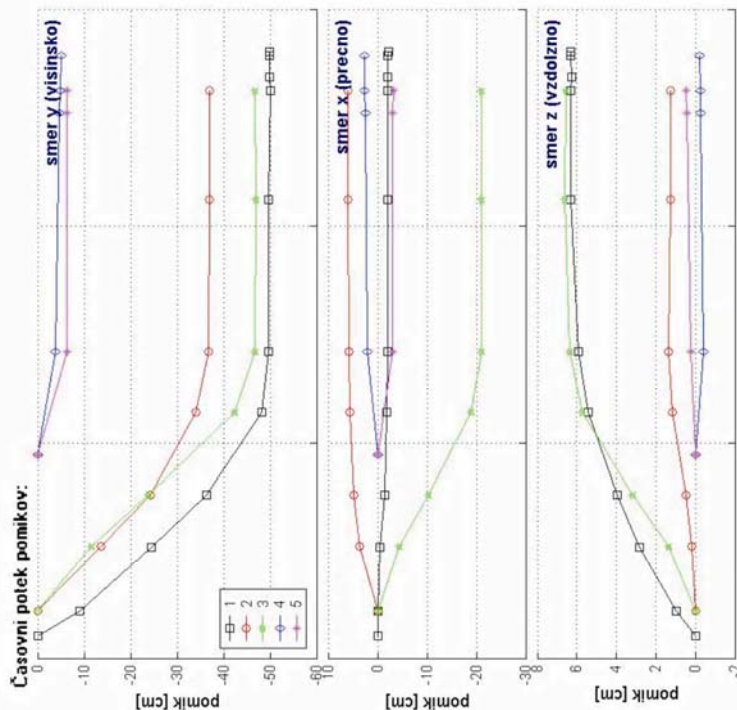






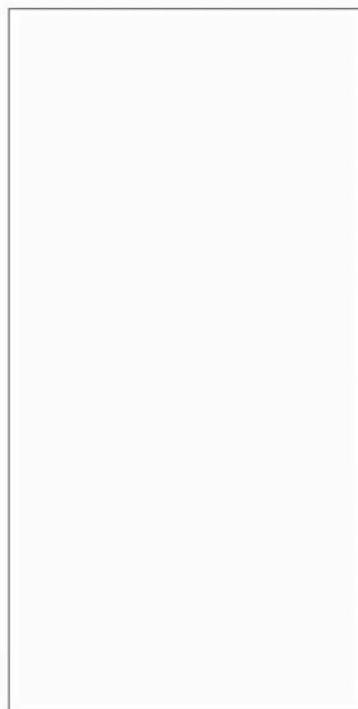


Predor: Golovec	Čev: C cev - jug	Stacionaža: km 2 + 956	Pred. stacionaža: 268	Mer. profil: 29	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor. verzija
------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	---------------------------------



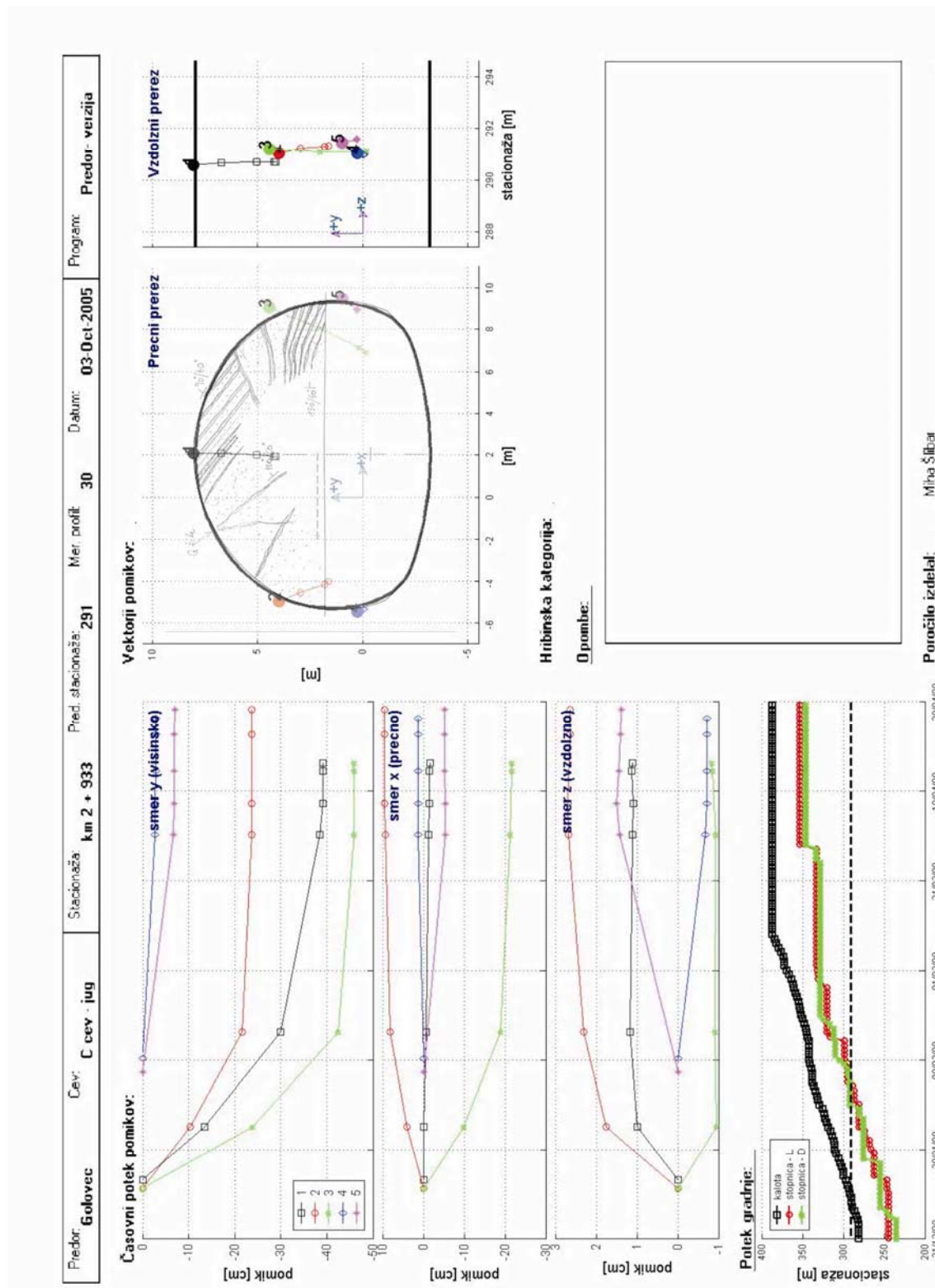
Hribinska kategorija:

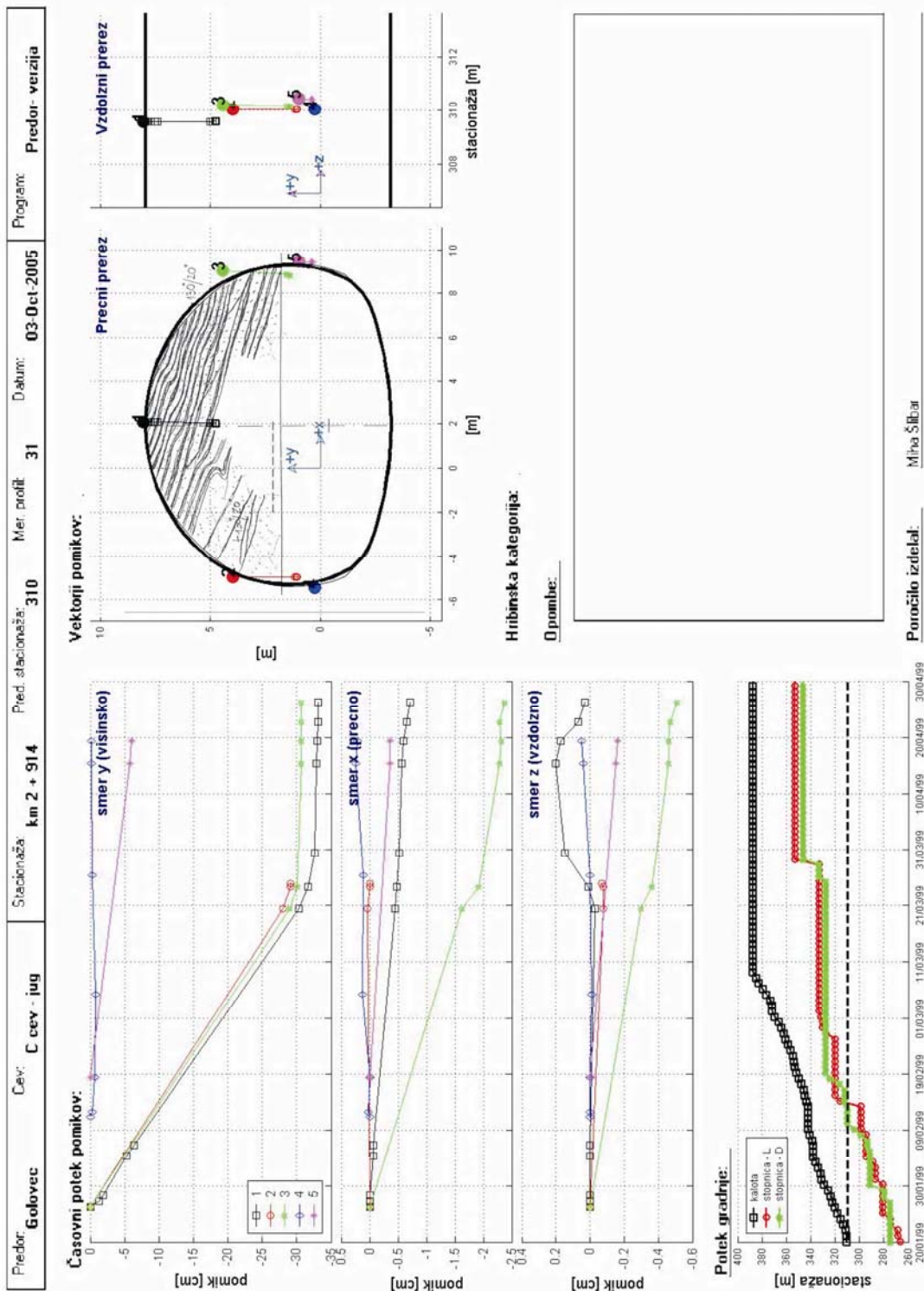
0 pomibe:

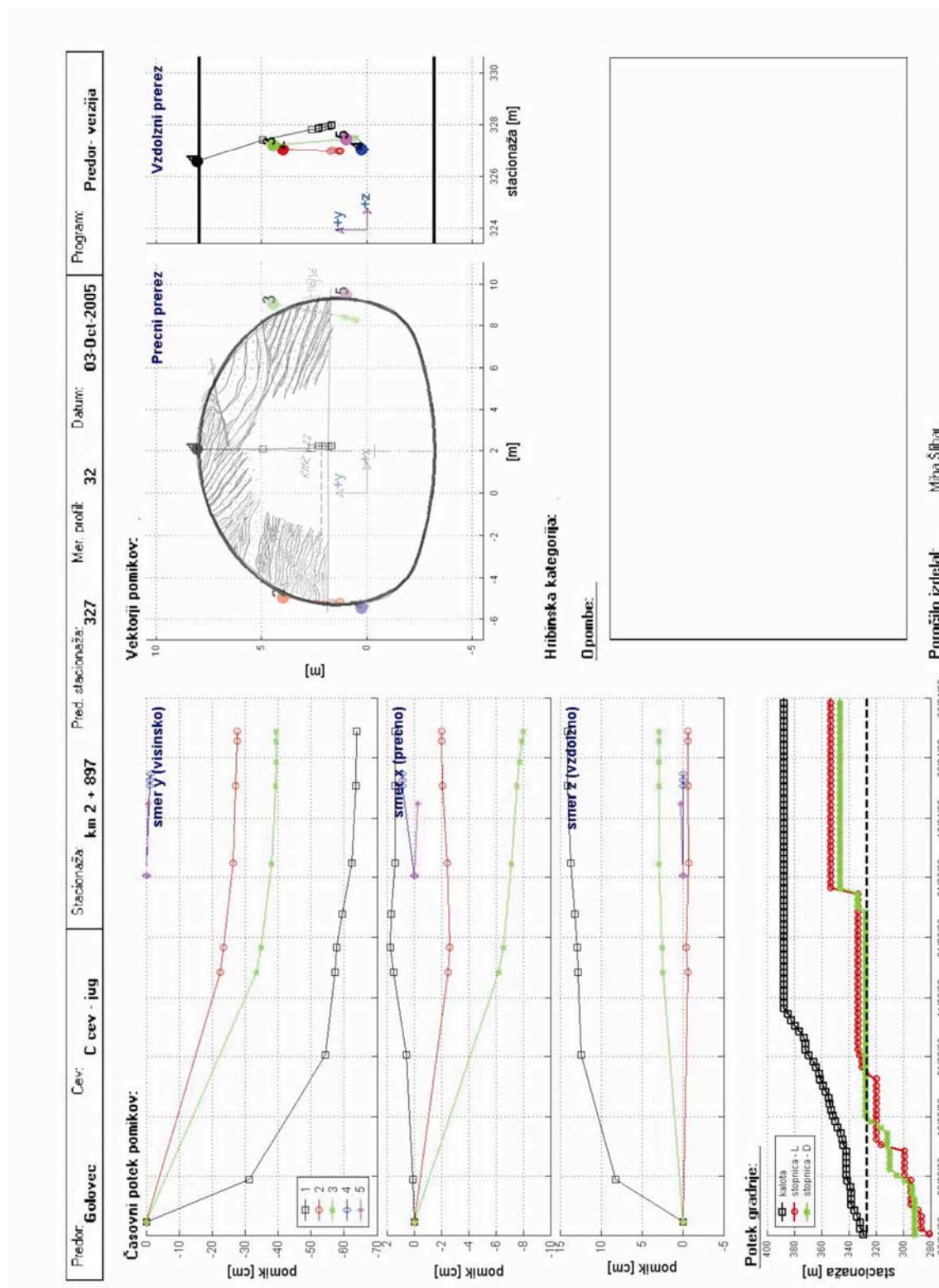


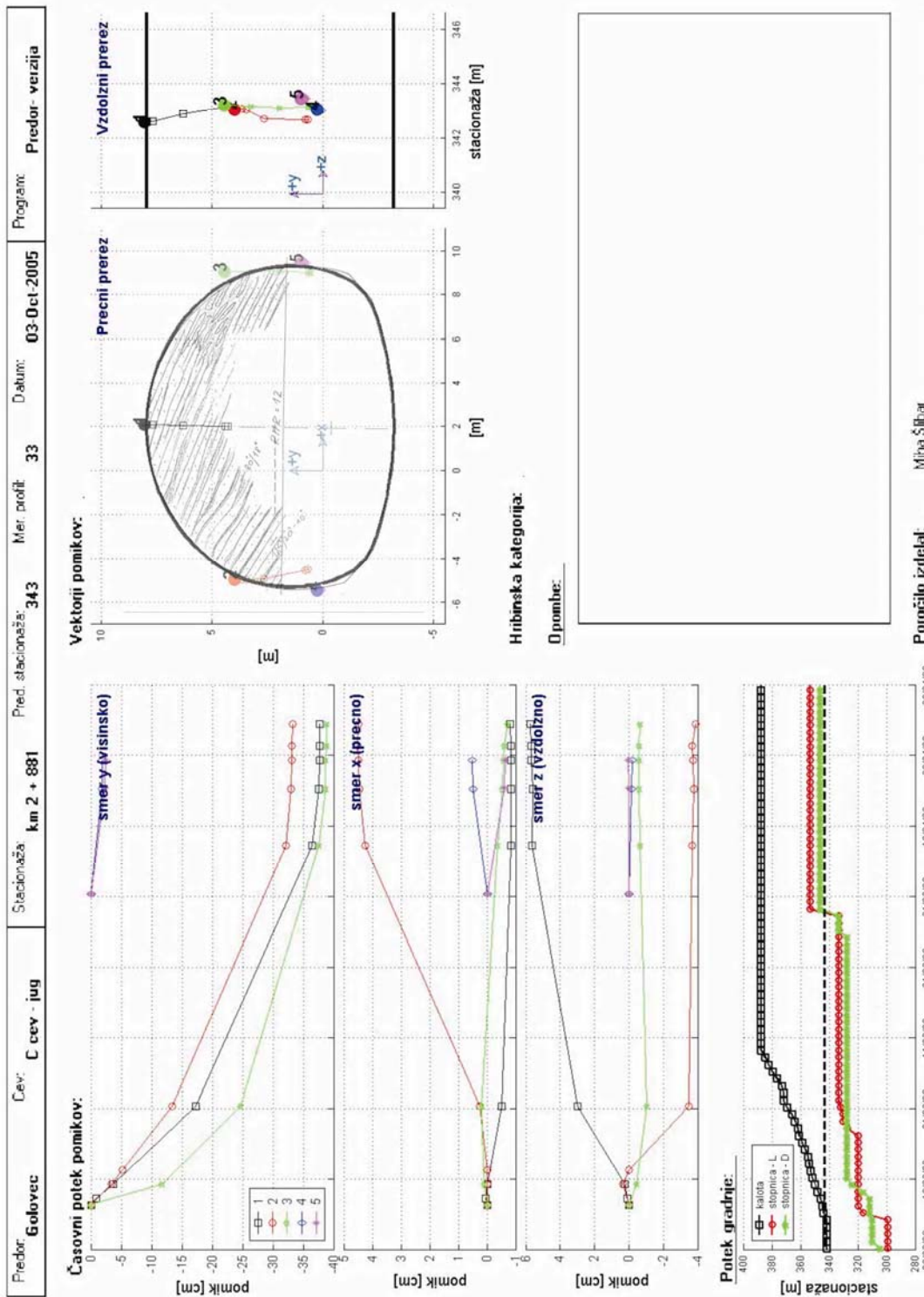
Poročilo izdelal:

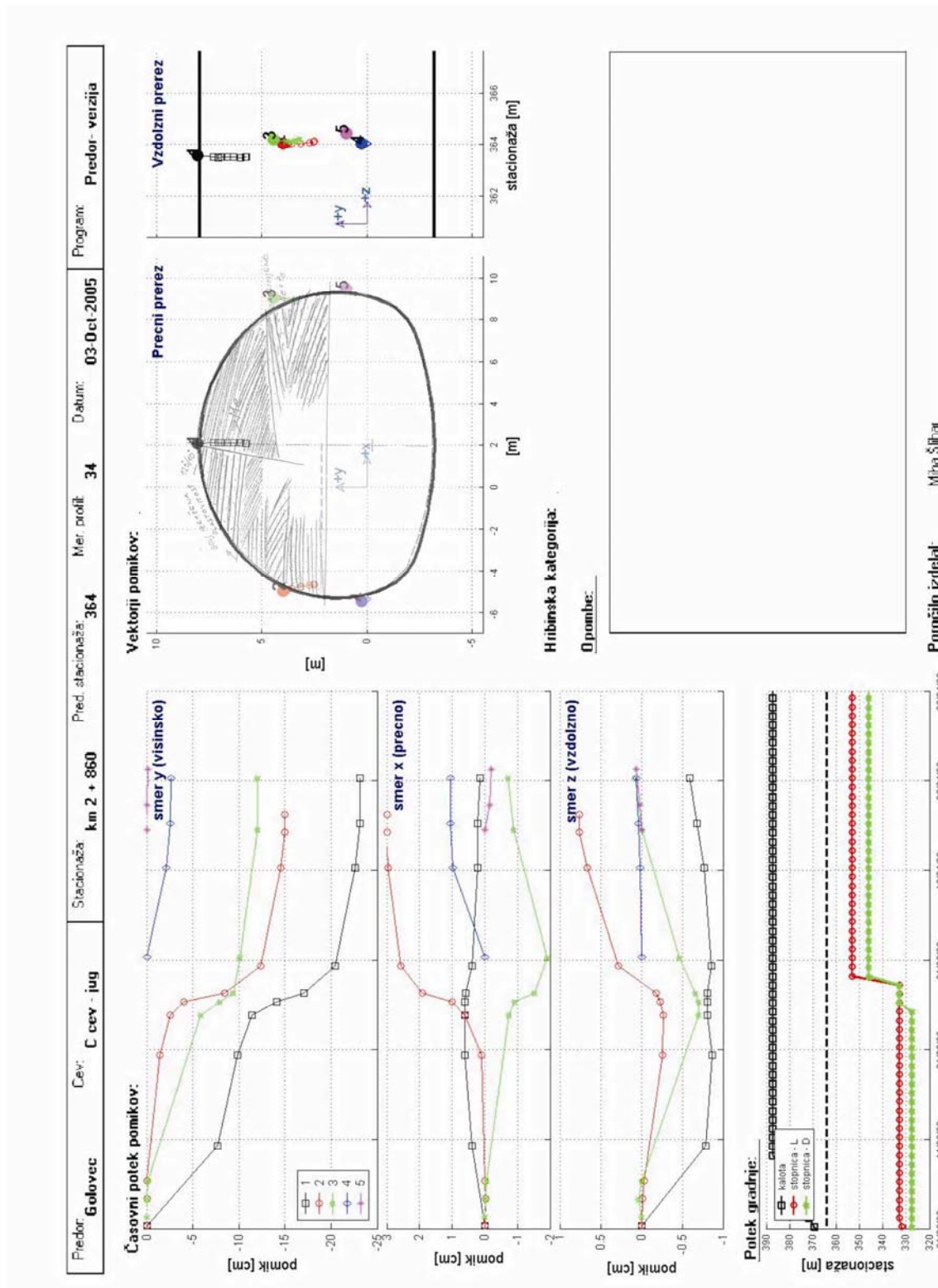
Milna Šlibar

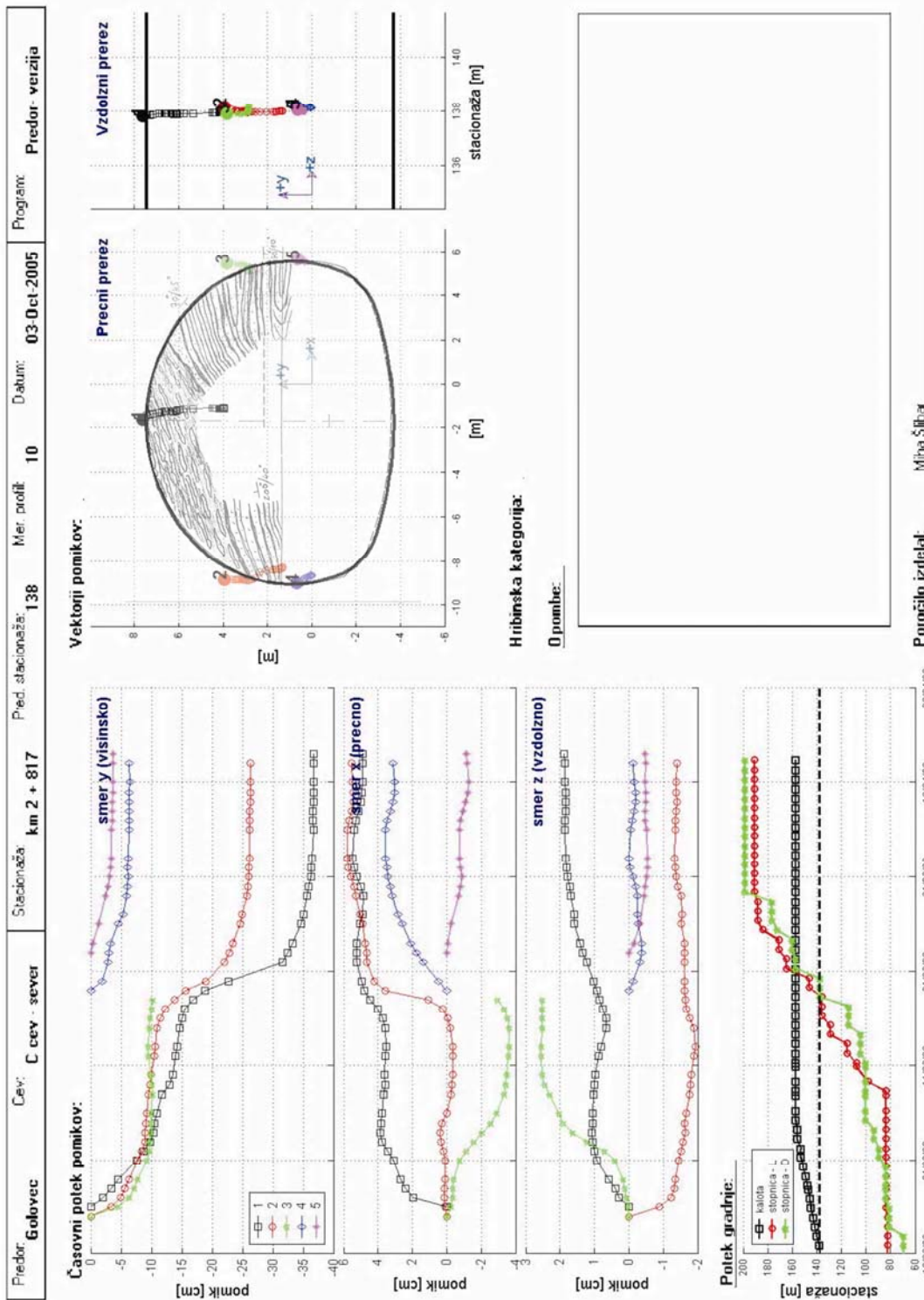


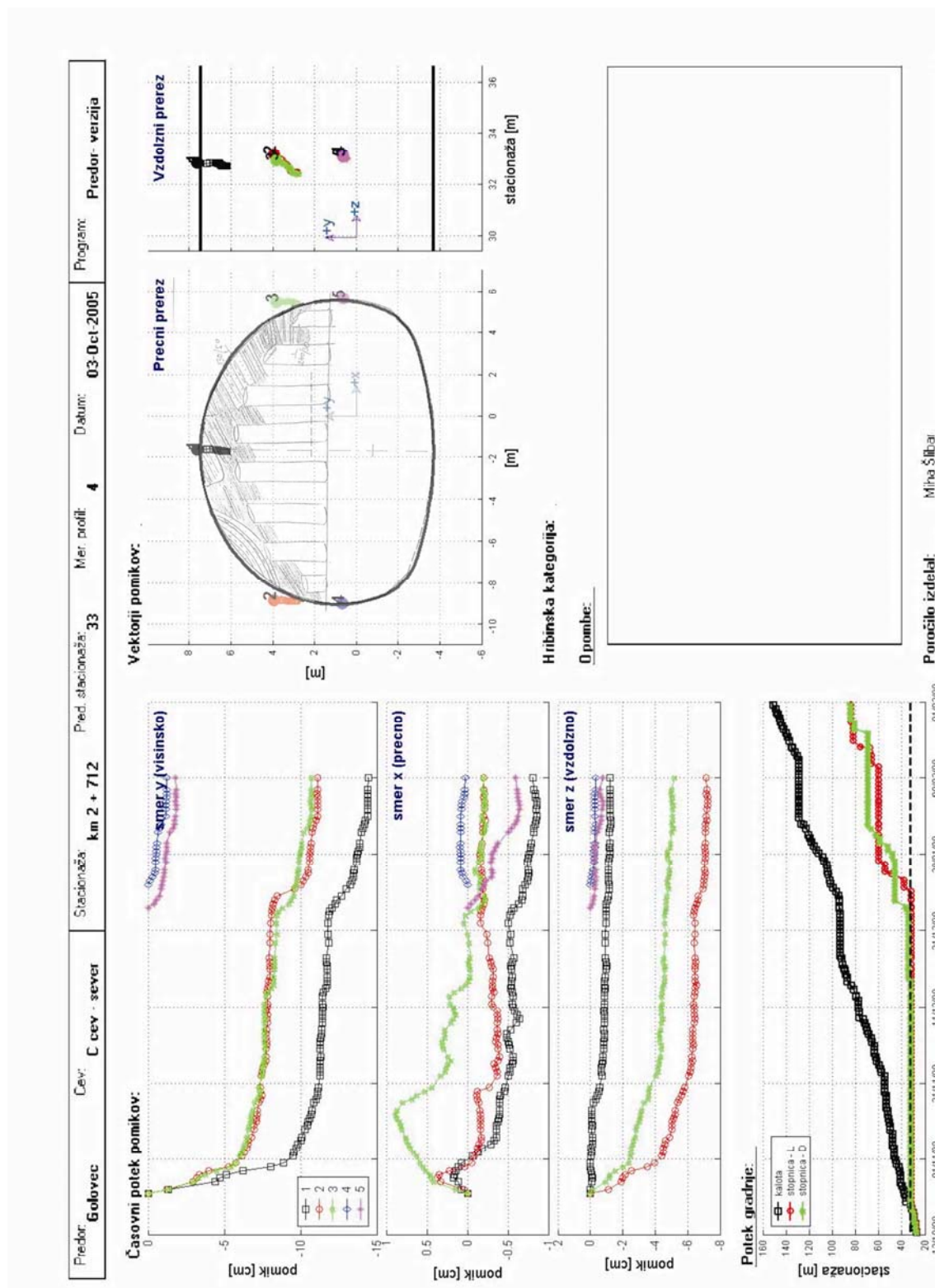


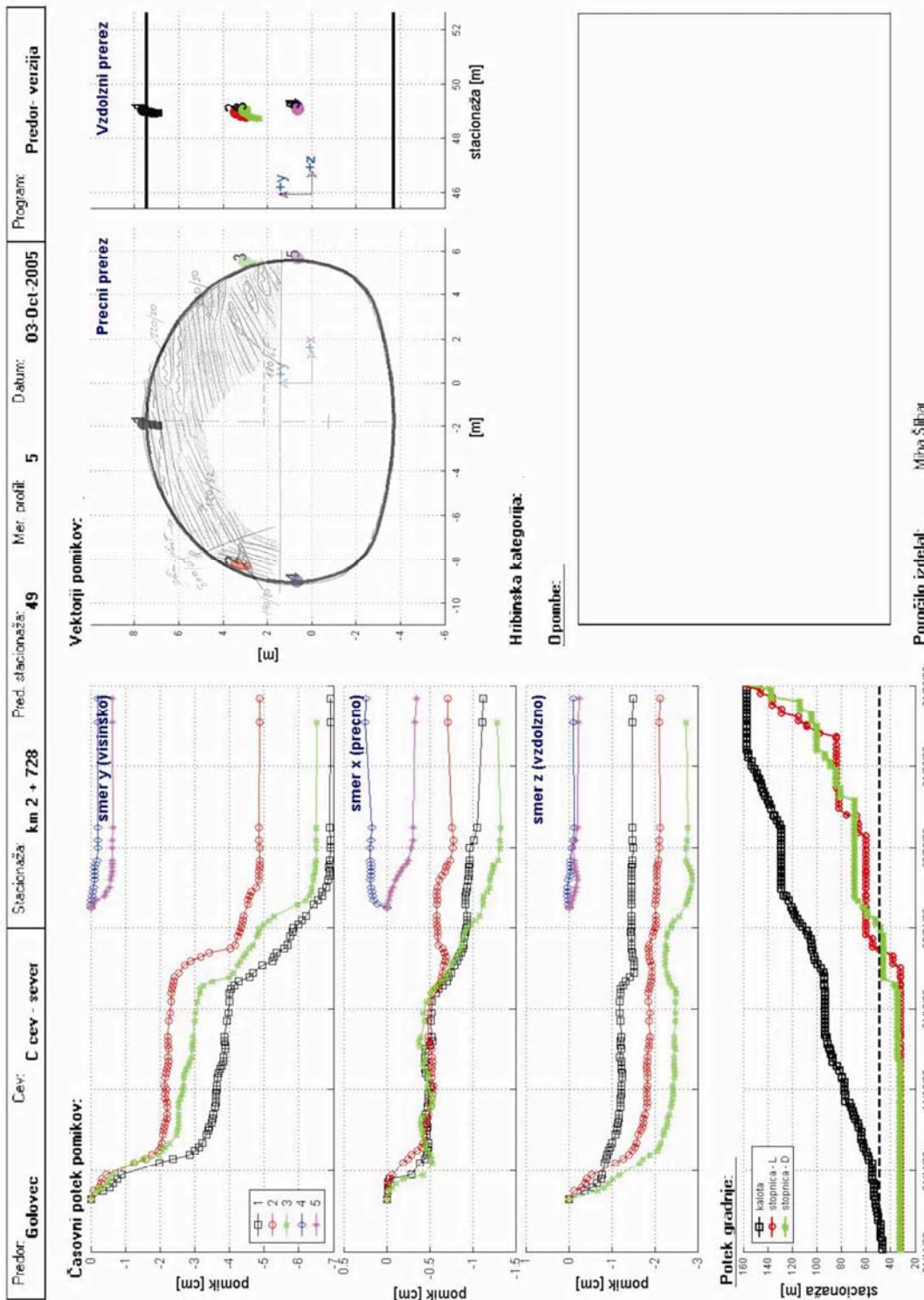


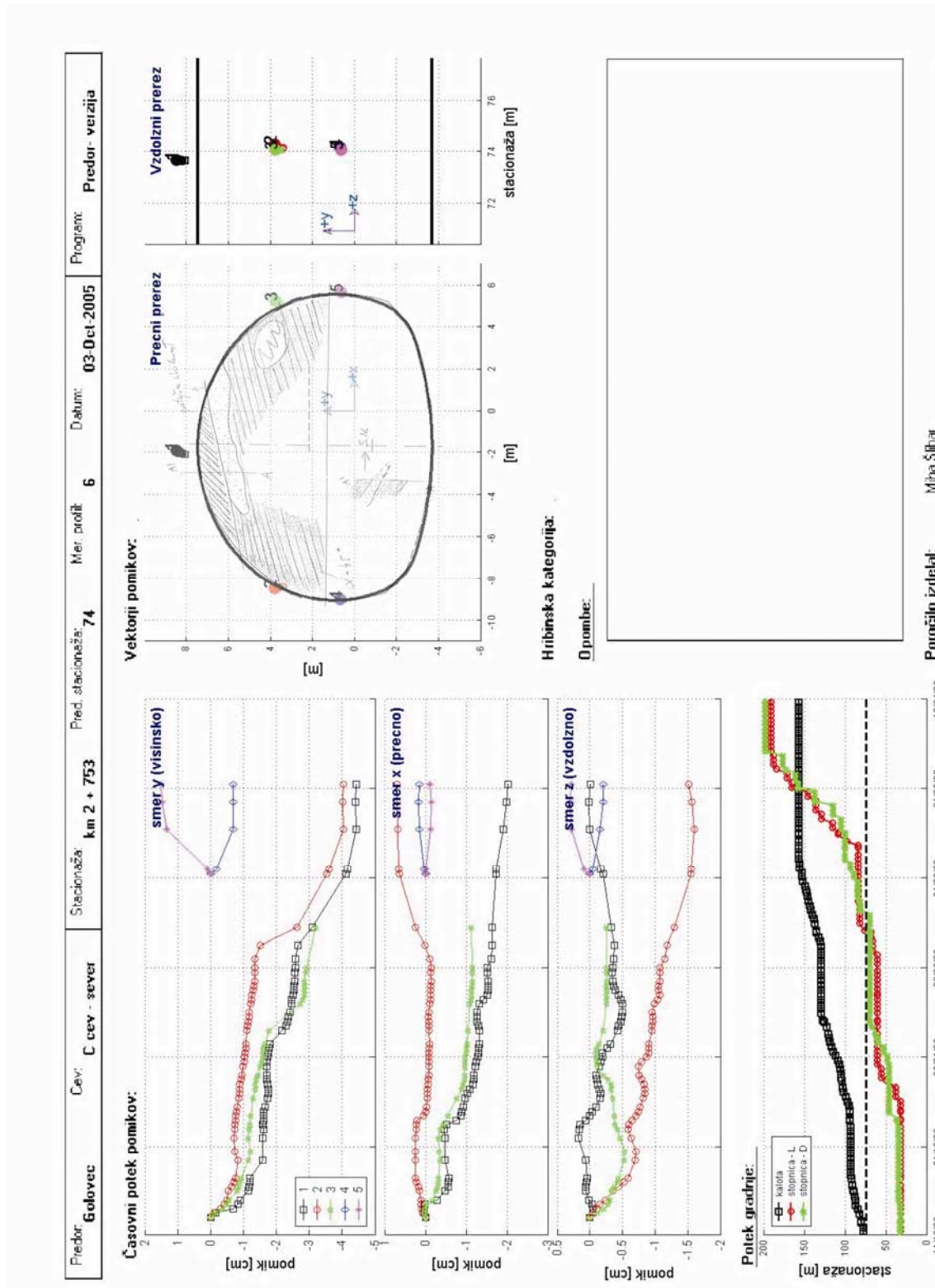




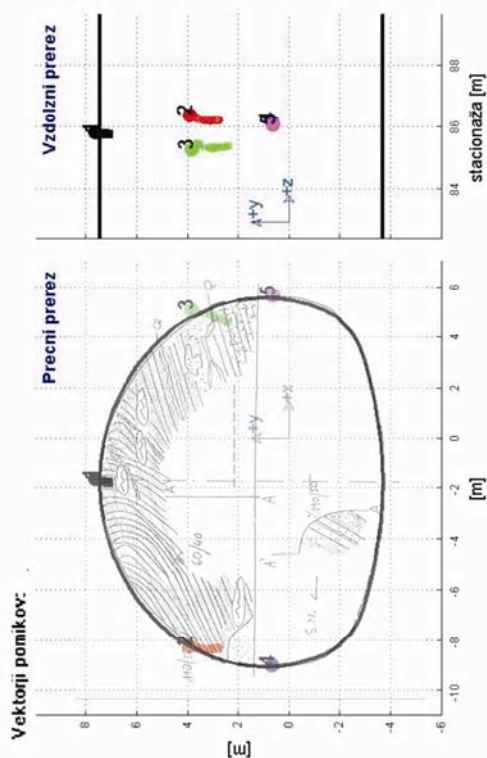
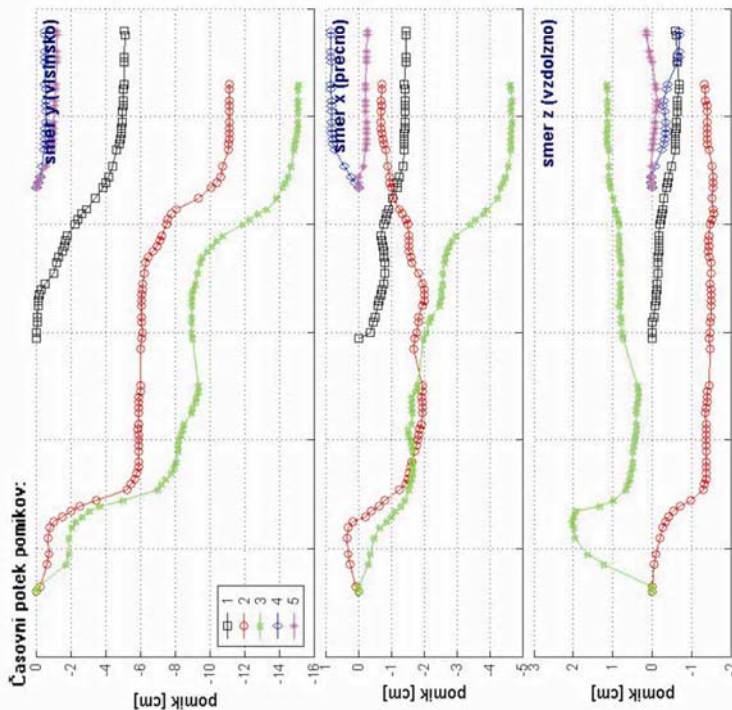




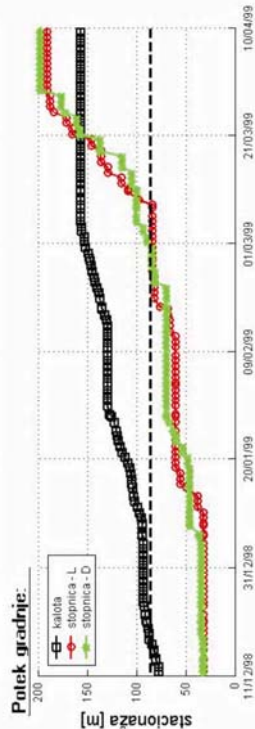
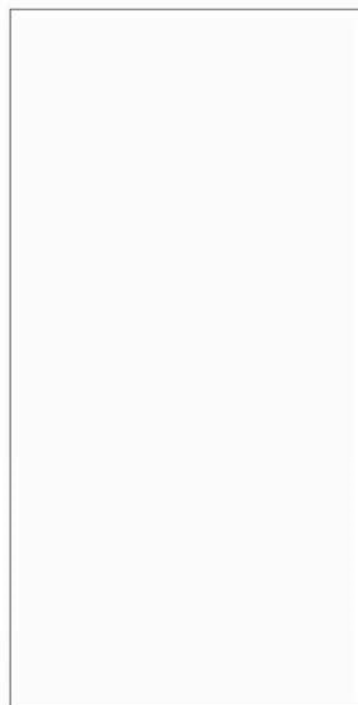




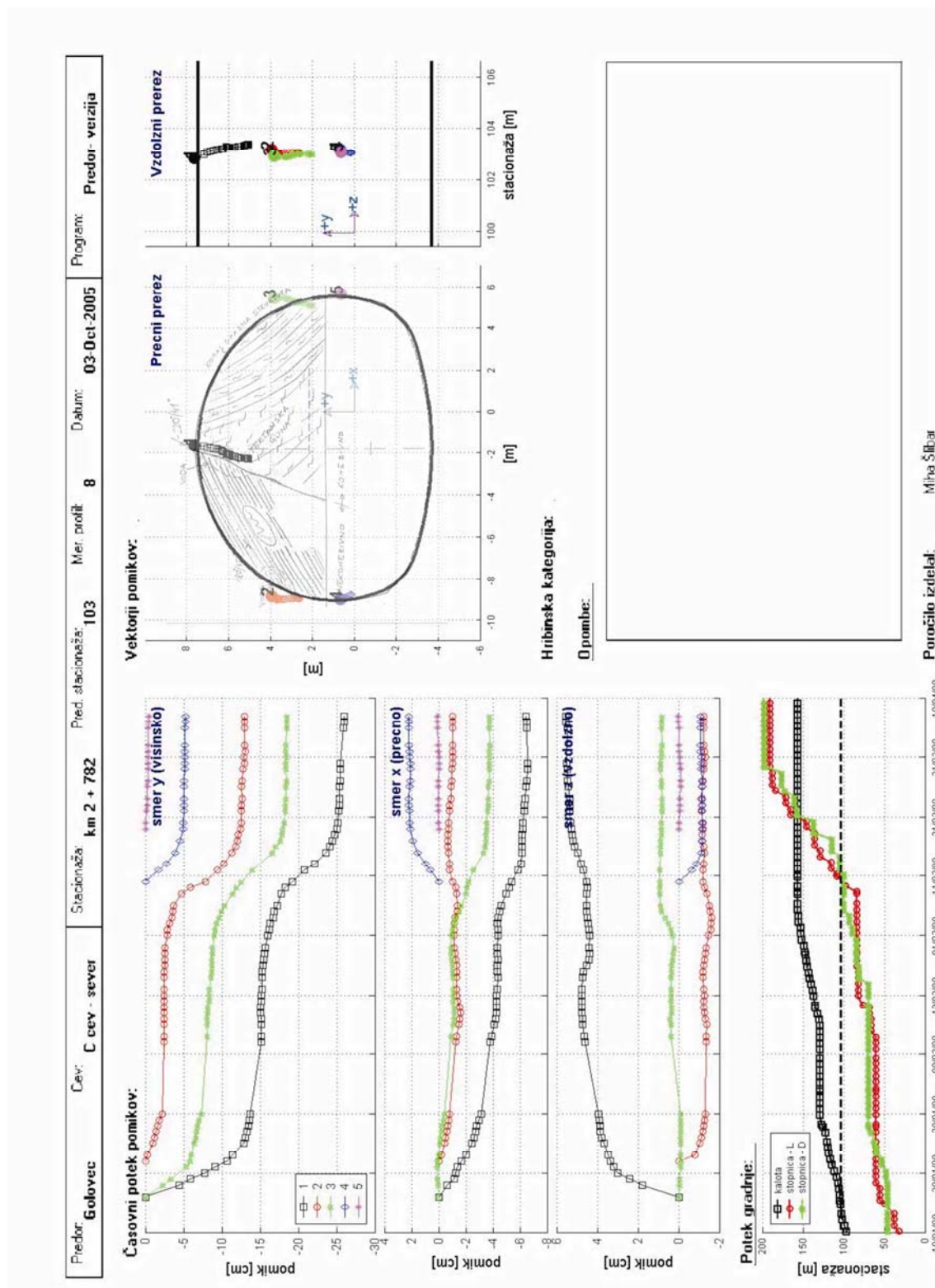
Predor: Golovec	Cev: C cev - sever	Stacionaža: km 2 + 765	Pred. stacionaža: 86	Mir. profil: 7	Datum: 03-Oct-2005	Program: Predor - verzija
------------------------	---------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-----------------------	---------------------------	----------------------------------



Hribinska kategorija:
 0 pomibe:



Pomočilo izdelal: Milva Šlibar



Miha Šlibar

Poročilo izdelal:

