

Jure KLOPČIČ

univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Andrej ŠTIMULAK

univ.dipl.inž.rud., DDC svetovanje inženiring, Ljubljana

Igor AJDIČ

mag., univ.dipl.inž.geol., DDC svetovanje inženiring, Ljubljana

Janko LOGAR

doc.dr., univ.dipl.inž.grad., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

PROGRAMSKO ORODJE ZA GRAFIČNI PRIKAZ IN ANALIZO MERITEV POMIKOV V PREDORU

POVZETEK:

Sistematično merjenje pomikov kot osnova za določanje tipa in togosti podporja ter nadzor stabilnosti predora je pomemben del Nove avstrijske metode gradnje pedorov (NATM).

Grafi časovnih potekov pomikov, prirastkov pomikov, vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu, linij vpliva s trendnimi linijami, orientacije vektorjev pomikov in stereografske projekcije vektorja pomikov omogočajo, da lahko bolje razumemo geomehanske procese, ki se odvijajo med gradnjo predora. Z njihovo pomočjo lahko sklepamo na zgradbo hribine okrog izkopanega območja ter predvsem pred samim čelom predora. Primerjava merjenega odziva z analitičnimi izrazi za pomikovne funkcije (Barlow, 1986) pa pove tudi ali sistem podporja in hribine varno prevzemajo dodatne obremenite ali pa morebiti prihaja do odpovedi podpornega sistema.

Za grafični prikaz ter analizo meritev pomikov v predoru smo razvili računalniško aplikacijo *Predor*.

SOFTWARE APPLICATION FOR VISUALISATION AND ANALYSIS OF DISPLACEMENT MONITORING DATA DURING TUNNELLING

SUMMARY:

Systematic measurement of tunnel displacements is an important part of New Austrian Tunelling Method. The observed displacements together with geological survey form a basis for the determination of support type.

Graphs of displacements vs. time, displacement increments vs. time, displacement vectors in cross section and longitudinal section, displacement influence lines along the tunnel axis with trendlines, displacement vector orientation shown along the tunnel axis and/or in stereographic projection, all this plots give very usefull insight in mechanical processes that develop during tunnel excavation. A carefull analysis of this graphs gives the information on geological ground composition in front the tunnel face and along the sidewalls. The comparison of measured response with analytical displacement functions (Barlow, 1986) can serve for the verification whether the installed support system together with the surrounding rock mass safely distribute the additional stresses or the system is approaching failure.

For the graphical presentation of tunnel displacement measurement and relevant analyses a computer application »Predor« has been developed.

UVOD

Danes je ustaljena praksa, da v predoru vsakodnevno v izbranih merskih profilih, ki si sledijo na približno vsakih 10 m merimo 3D premike petih točk v prečnem profilu. Tako pridobljeni podatki so izjemno bogata in uporabna baza podatkov, a le če jih lahko ustrezno prikažemo in analiziramo. Program Predor, ki smo ga razvili na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo je enostavna, pregledna in uporabniku prijazna računalniška aplikacija, ki to omogoča. Koda programa je napisana v programskem okolju MATLAB[®]. Program Predor je sestavljen iz treh osnovnih delov: modula za vnos podatkov in dveh modulov za analizo ter predstavitev meritev.

Rezultate meritev pomikov merskih točk vnašamo v program z GEO datotekami (obstoječi tip podatkov), materialne in geometrijske karakteristike hribine ter podporja pa podajamo preko pogovornih oken.

Modul za predstavitev meritev omogoča naslednje izris:

- graf časovnega poteka pomikov ter prirastkov pomikov,
- graf vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu,
- graf linij vpliva z možnostjo izrisa trendne črte na različnih razdaljah za čelom predora,
- graf orientacije vektorja pomikov z možnostjo izrisa trendne črte na različnih razdaljah za čelom predora,
- stereografsko projekcijo vektorja pomikov,
- izris posameznih faz gradnje,
- izris poročila za posamezni merski profil.

Modul za analizo meritev temelji na uporabi metode EPM (Extrapolation Prediction Method). Osnova te metode je prilagajanje analitične pomikovne funkcije (Barlow, 1986) grafu časovnega poteka pomikov v vertikalni in horizontalni smeri. Tako lahko na osnovi nekaj meritev napovemo, kolikšen bo končni pomik posamezne merske točke v opazovanem prečnem prerezu. S številom izvedenih meritev se izboljšuje tudi ocena poteka meritev.

Program Predor je namenjen analizi izmerjenih pomikov v realnem času za potrebe čim bolj racionalne in varne gradnje predora. Da bi se posameznik izuril v prepoznavanju geoloških in mehanskih značilnosti okolice čela predora na osnovi merjenih pomikov, je potrebnega precej znanja, raznovrstnih analiz (Steindorfer, 1998) in izkušenj. A šele ustrezno programsko orodje za predstavitev meritev omogoča pridobivanje tovrstnih izkušenj.

PREDSTAVITEV GLAVNIH MOŽNOSTI PROGRAMA

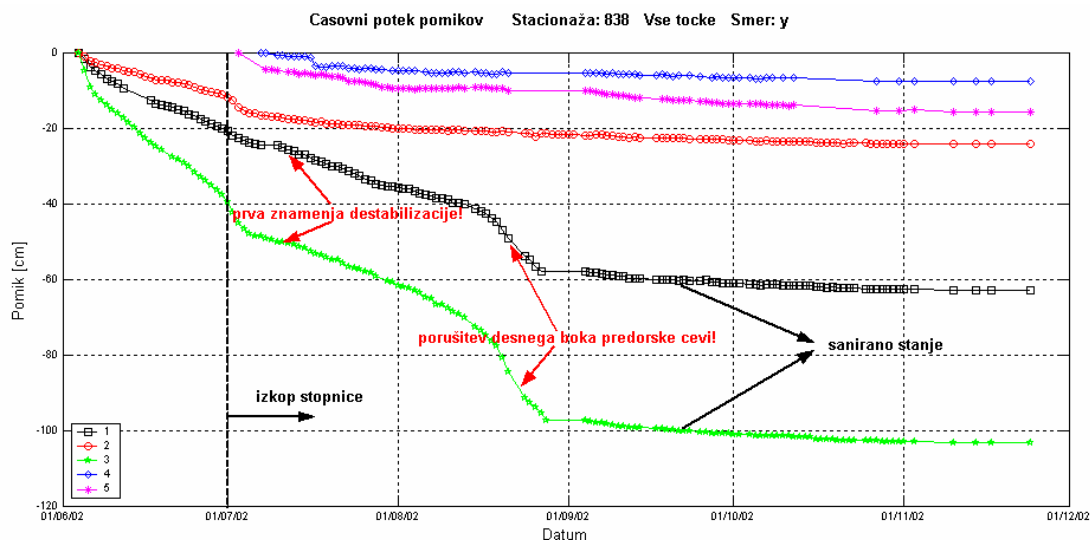
Predstavitev meritev je izvedena na delu predora Trojane na AC Ljubljana – Celje, kjer je prišlo do velikih pomikov in posledično do porušitve desnega boka predorske cevi. Pokazali bomo, da bi se dalo z uporabo programa Predor tako dogajanje vnaprej predvideti in izbrati ustrezen nadprofil, da zamudne reprofilacije ne bi bile potrebne.

Graf časovnega poteka pomikov in prirastkov pomikov

Na grafu časovnega poteka pomikov so ločeno prikazane posamezne komponente vektorja pomikov (vertikalni, horizontalni ter vzdolžni pomiki) v odvisnosti od časa. Na njem lahko istočasno prikažemo več merskih točk. Običajno prikažemo vse aktivnosti gradnje (izkop kalote, stopnice in talnega oboka) na enem grafu, kar omogoča ugotavljanje korelacije med gradbenimi aktivnostmi ter razvojem pomikov. Prikaz časovnega poteka pomikov za isto smer in mersko točko, a za različne merske profile na enem grafu, omogoča do neke mere sklepati na lastnosti hribine pred izkopnim čelom kalote.

Časovni graf poteka pomikov v prvi fazi služi za spremljanje obnašanja pomikov - tako lahko ocenimo, kako daleč je proces stabilizacije določenega prečnega prereza. Ob predpostavki enakomernega napredovanja izkopa kalote se mora prirastek pomikov s časom zmanjševati. Kakršnokoli povečanje prirastka pomikov pomeni destabilizacijo, razen če v bližini opazovanega prečnega prereza ne potekajo druge gradbene aktivnosti (izkop stopnice, talnega oboka). Običajno se po sklenitvi obroča, t.j. izgradnji talnega oboka, opazovani prerez stabilizira in prirastek pomikov pade na ničelno raven.

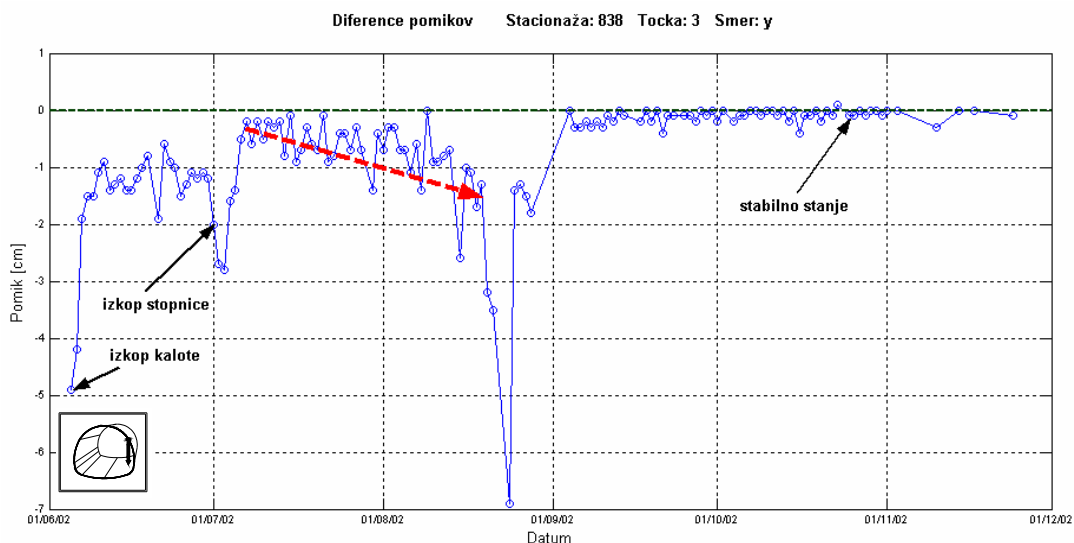
Primer: Prikaz destabilizacije prereza je prikazan na grafu 1. Ko je bila v začetku julija 2002 izkopana stopnica, so se pomiki sprva močno povečali, nato pa začeli zmanjševati. A stabiliziral se je levi bok predorske cevi (točki 2 in 4 – za oštevilčenje točk glej grafa 3 in 4), medtem ko so se pomiki na desnem boku predora po dobrem tednu od izkopa stopnice začeli povečevati. To je bilo prvo opozorilo, da se s predorom nekaj dogaja in s hitrim posegom bi se lahko preprečilo kasnejšo porušitev desnega boka predorske cevi. Toda enakomerni trend naraščanja pomikov se je nadaljeval še ves mesec do sredine avgusta, ko pa so se začeli pomiki drastično povečevati, kar je vodilo v porušitev desnega boka. Sledila je uspešna sanacija, kar se odraža z mnogo manjšimi prirastki pomikov v začetku septembra. Nato se je prerez počasi le dokončno stabiliziral.



Graf 1: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 838 m, časovni potek vertikalnih pomikov

Podobno funkcijo kot graf časovnega poteka pomikov ima tudi graf prirastkov pomikov. Osnovni namen grafa prirastkov pomikov je spremljanje procesa stabilizacije ter zgodnje odkrivanje možnih nestabilnosti predorske cevi.

Situacijo, ki je prikazana na grafu 1, sedaj prikažemo še z grafom prirastkov pomikov – graf 2. Črtna puščica nakazuje dalj časa trajajoči naraščajoči trend prirastkov pomikov. Predvsem za predore z nizkim nadkritjem, ki se gradijo v slabih geološko – geotehničnih pogojih, je treba naraščajoče trende pomikov vzeti kot resno opozorilo!



Graf 2: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 838 m, prirastki vertikalnih pomikov, točka 3

Graf vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu

Merjenje absolutnih pomikov omogoča, da si ustvarimo prostorsko sliko pomikov predorske cevi. Grafa vektorjev pomikov v opazovanem prečnem prerezu (pomiki v smeri y – višinsko ter v smeri x – prečno) in v vzdolžnem prerezu (pomiki v smeri y in smeri z – vzdolžno) dasta predstavbo o orientaciji vektorja pomikov v prostoru ter njegov razvoj skozi čas.

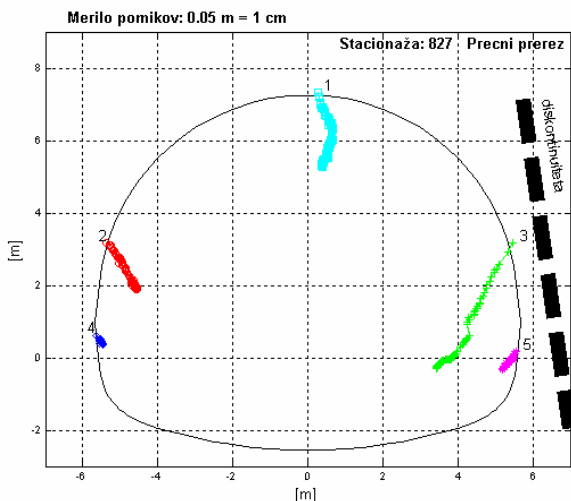
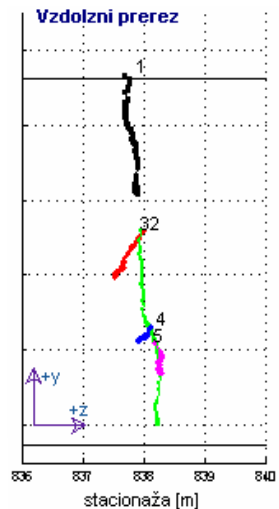
Graf vektorjev pomikov v prečnem prerezu omogoča, da sklepamo na območja geotehnično slabše hribine izven področja izkopa (levo in desno od predorske cevi) ter zagotavlja dodatne informacije o strukturi hribine ter deformacijskih fenomenih subparalelno s predorsko osjo.

Graf vektorjev pomikov v vzdolžnem prerezu pa posreduje informacijo o relativni togosti hribine pred izkopnim čelom kalote. Če vektorji pomikov kažejo v smer nadaljnjega izkopa, je pred čelom bolj toga hribina kot ta, v kateri se trenutno nahajamo, in obratno.

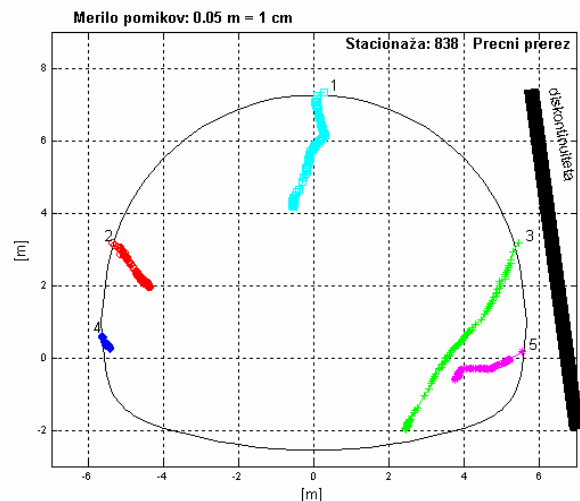
Primer: Na grafu 4 je predstavljen merski profil – stacionaža 827, ki se nahaja neposredno pred merskim profilom na kritični stacionaži 838. V primerjavi z levim bokom se na desnem precej povečajo pomiki, kar naznanja možno preobremenitev hribine in podpora desnega boka predorske cevi. Tak deformacijski vzorec pomeni opozorilo za nadaljnji izkop – potrebno je močno ojačati podporje desnega boka predora.

Graf vektorjev pomikov v prečnem prerezu merskega profila na kritični stacionaži 838 pa je prikazan na grafu 5. Ob desnem boku predora se najverjetneje nahaja subvertikalno območje oslabiljene hribine, zaradi katere je hribina ob desnem boku preobremenjena (precej večji nivo pomikov kot na levem boku). Graf vektorjev pomikov v vzdolžni smeri za ta merski profil je izrisan na grafu 3.

Graf 3: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 838 m, vektorji pomikov v vzdolžnem prerezu



Graf 4: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 827 m, vektorji pomikov v prečnem prerezu



Graf 5: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 838 m, vektorji pomikov v prečnem prerezu

Graf linij vpliva z možnostjo izrisa trendne črte na različnih razdaljah za čelom predora

Linije vpliva konstruiramo tako, da vzdolž predorske osi povežemo istočasno izmerjene pomike merskih točk. Na istem grafu prikažemo več takšnih črt (za vsako dnevno izmero po eno), a le za eno

komponento pomika in eno mersko točko. Na ločenih grafih prikažemo linije vpliva za različne komponente vektorja pomikov in različne merske točke.

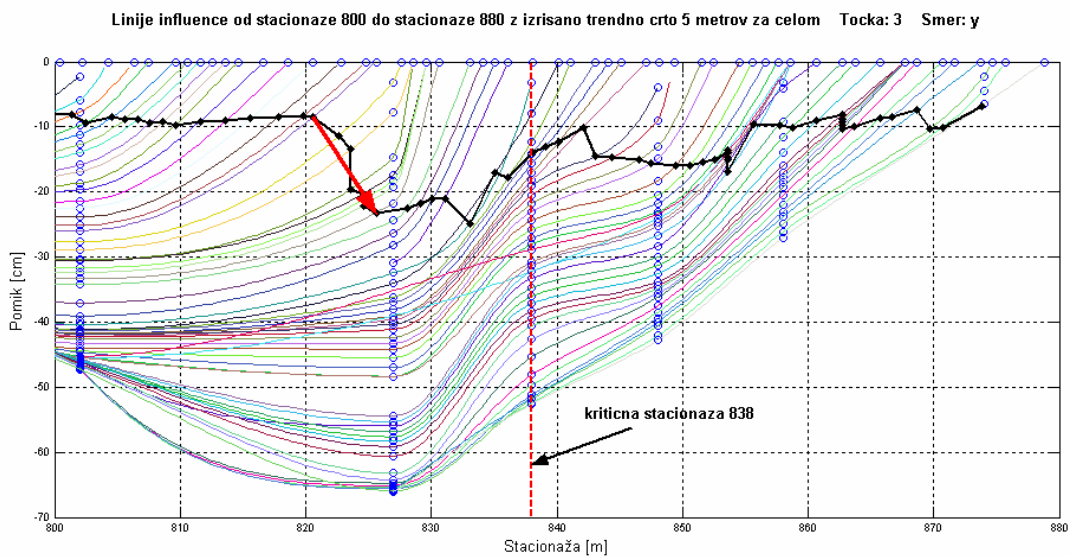
Zaradi tehnologije in organizacije dela prva meritev posameznih merskih točk v različnih opazovanih prerezih ne more biti vedno opravljena na enaki razdalji za čelom predora. Razliko v razdaljah med prvo meritvijo ter čelom v različnih prečnih prerezih odpravimo s tem, da na čelu privzamemo velikost pomika 0, merjenim podatkom pa dodamo izračunane oz. ocenjene predpomike (pomike, ki so se zgodili med izkopom prereza ter prvo meritvijo merskih točk opazovanega prečnega prereza). Na ta način lahko dobimo primerljive podatke za različne prečne prereze.

Niz linij vpliva na enem samem grafu omogoča:

- dobro primerjavo pomikov vzdolž predorske osi,
- pridobitev informacije o obnašanju predora v vzdolžni smeri,
- možnost ugotavljanja poteka sprememb togosti hribine,
- pogojno ekstrapolacijo pomikov pred čelo predora.

S pomočjo linij vpliva lahko ocenimo karakteristike hribine le za en ali dva izkopna koraka vnaprej. Bolj učinkovito orodje je izris trendne črte, ki jo konstruiramo tako, da povežemo točke na linijah vpliva, ki se nahajajo na konstantni razdalji za čelom. Z ekstrapolacijo trendne črte pred čelo lahko tako predvidimo obnašanje hribine do enega premera predorske cevi pred čelom predora.

Primeri: Podobno kot graf vektorjev pomikov v prečnem prerezu tudi linije vpliva en merski profil pred kritičnim prerezom nakažejo možno nestabilnost predorske cevi, ki jo odraža krepko naraščajoči trend pomikov (puščica na grafu 6). Trendna črta tako že tri dni po izkopu stacionaže 827 oz. nekaj dni pred izkopom stacionaže 838 nakazuje, da se pred čelom nahaja odsek poslabšanih razmer.



Graf 6: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaže 800 - 880 m, linije vpliva z izrisano trendno črto 5 m za čelom predora, merska točka 3, pomiki v vertikalni smeri

Graf orientacije vektorja premika v vzdolžni smeri z možnostjo izrisa trendne črte na različnih razdaljah za čelom predora

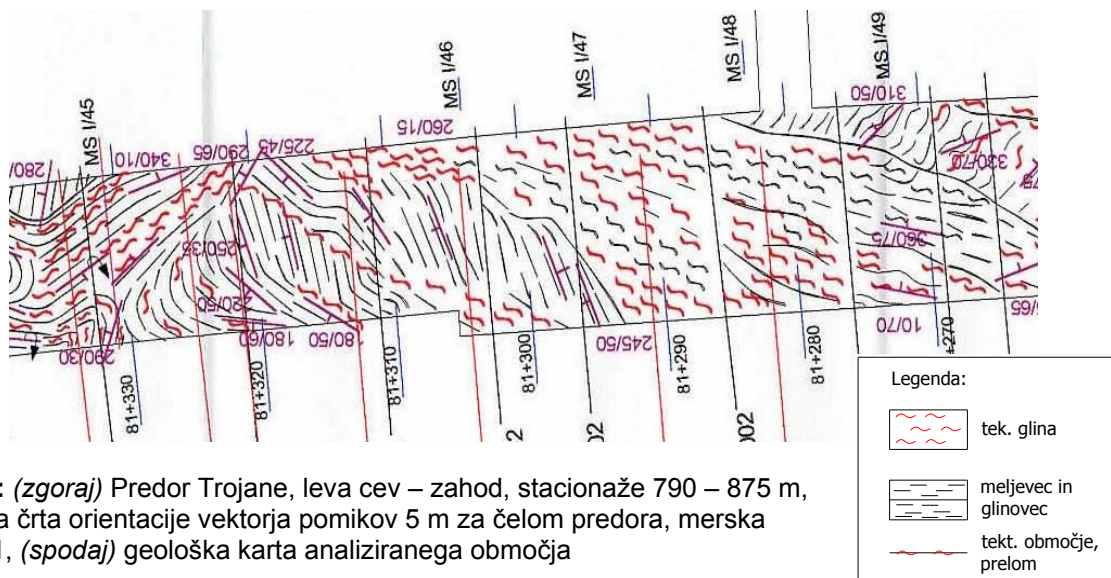
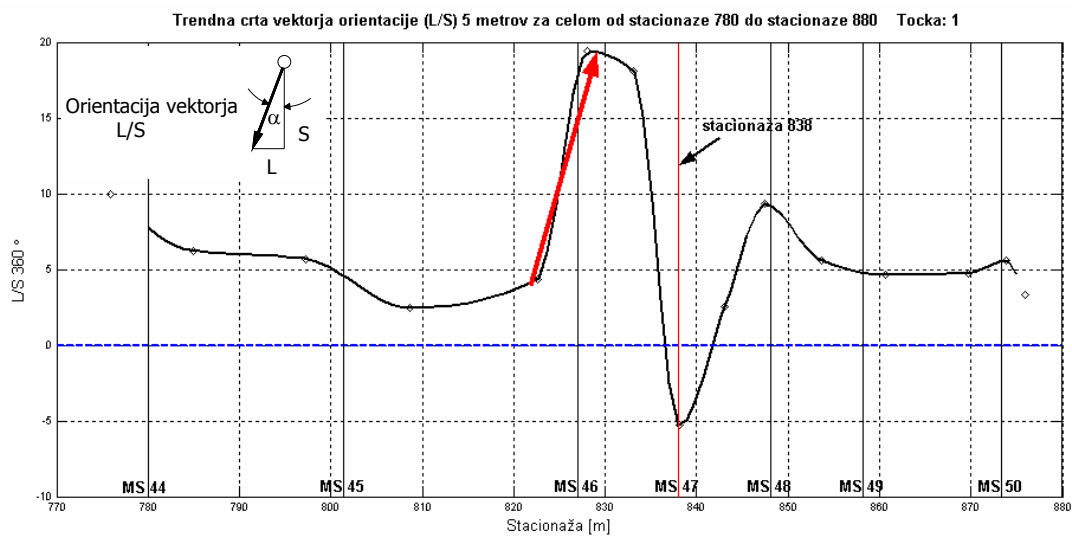
Orientacija vektorja je določena kot razmerje med višinskimi in vzdolžnimi pomiki; predstavlja torej naklon vektorja pomikov v vzdolžni vertikalni ravnini (glej sliko na grafu 7 zgoraj).

V homogeni in izotropni hribini kaže vektor pomikov stropne točke v izkopani prostor, običajno z nagibom med 5 in 10°. Ko se čelo približuje območju oslabiljene hribine, se napetosti ne morejo prenašati na to cono enako kot prej, posledica pa je zasuk vektorja pomikov še bolj v izkopani prostor.

Nasprotno bolj toga hribina pred čelom omogoča večji prenos napetosti naprej, posledica pa je zasuk vektorja pomikov proti čelu predora.

Orientacija vektorja je torej odvisna od kvalitete in homogenosti hribine, ki se nahaja pred čelom. Zato je graf orientacije vektorja pomikov pomembno orodje za analizo razmer v okolici čela predora, ki omogoča pravočasno prilagajanje podpornih ukrepov.

Primer: Primerjava geološke karte ter grafa orientacije vektorja pomika kaže dobro korelacijo med geološko zgradbo hribine ter trendno črto orientacije vektorja pomika; trendna črta stropne točke izkazuje precejšnje poslabšanje geološko – geotehničnih razmer pred merskim profilom 46 na stacionaži 827 (čelo se bliža območju tektonizirane gline). Med merskima profiloma 46 ter 47 se trendna črta obrne in začne nazadovati nekoliko boljše razmere pred čelom, kar se uresniči nekje okrog stacionaže 81km+270. Ko izkopno čelo preči merski profil 49 na stacionaži 858, trendna črta nakazuje normalizacijo razmer. Spodnja slika prikazuje značilen graf trendne črte orientacije vektorja pomikov, ko se čelo približuje in preči območje slabše hribine.

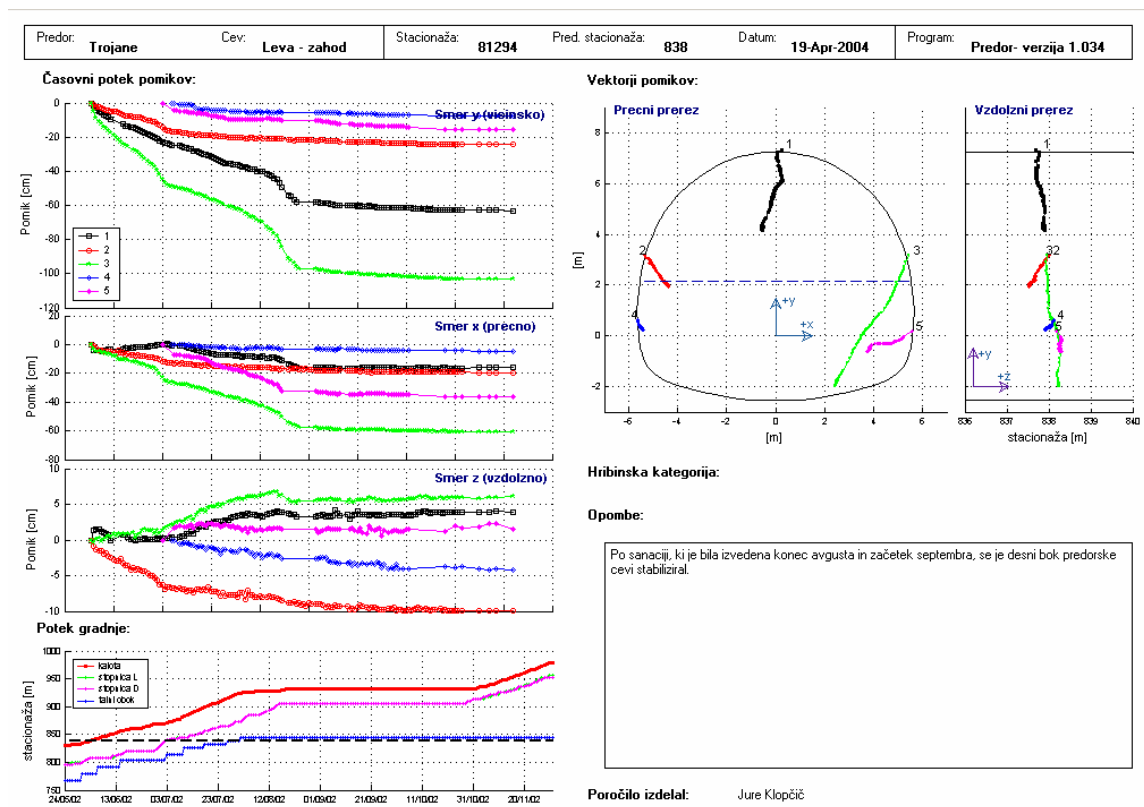


Graf 7: (zgoraj) Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaže 790 – 875 m, trendna črta orientacije vektorja pomikov 5 m za čelom predora, merska točka 1, (spodaj) geološka karta analiziranega območja

Na podlagi te analize lahko zaključimo, da s sistematično analizo trenda orientacije vektorja pomikov lahko sklepamo na lastnosti hribinske mase do 2 premera predorske cevi pred izkopnim čelom.

Izris poročila za merski profil

Za vsakodnevno spremljanje obnašanja predora ter komunikacijo med nadzorom, izvajalcem in projektantom smo razvili poseben izris, na katerem so na levi strani lista prikazani grafi časovnega poteka pomikov v vertikalni, horizontalni in longitudinalni smeri, pod njimi pa faze gradnje, kar daje možnost opazovanja korelacije med gradbenimi aktivnostmi ter razvojem pomikov. Na desni strani lista se nahajata grafa vektorjev pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu. Izris je opremljen tudi z drugimi pomembnimi podatki o opazovanem merskem profilu.



Graf 8: Predor Trojane, leva cev – zahod, izris poročila za merski profil na stacionaži 838 m

ANALIZA MERITEV – PRIMERJAVA Z ANALITIČNIMI FUNKCIJAMI

Za predore z nizkim nadkritjem, ki se gradijo v slabih geološko – geotehničnih pogojih, je velikostni razred pomikov glavni kriterij pri projektiranju in izgradnji predora. Pomemben vidik pri izbiri podpornih ukrepov kot tudi hitrosti napredovanja gradnje je omejitev teh pomikov tako v predoru kot tudi na površini, še posebej, če je območje poseljeno.

Kakršnokoli napovedovanje velikostnega razreda pomikov posameznega merskega profila pa je zaradi prostorskega časovno odvisnega sistema, s katerim opišemo gradnjo predora, težavna naloga.

Barlow (1986) in kasneje Sellner (2000) sta na podlagi številnih numeričnih analiz zapisala pomikovno funkcijo, s katero je zajeta interakcija faznosti gradnje, lastnosti hribine ter podporja v tridimenzionalni časovno odvisni sistem. Pomikovna funkcija je sestavljena iz treh osnovnih delov:

- za čas pred izkopom čela kalote
- za čas, ki poteče med izkopom kalote ter vgradnjo podporja
- za čas od vgradnje podporja do stabilizacije opazovanega prečnega prereza

Znotraj posameznega dela pomikovne funkcije pa se izračunani pomiki delijo še na dva dela, in sicer na pomike, ki so posledica vpliva napredovanja izkopnega čela kalote, ter na časovno odvisne pomike, ki so posledica lezenja hribine in betona.

Funkcija ima štiri proste parametre X, T, C in A (X in C sta časovno neodvisna parametra, T in A časovno odvisna) s katerimi prilagajamo pomikovno funkcijo izmerjenemu časovnemu poteku pomikov v vertikalni ali horizontalni smeri opazovanega prečnega prereza. Lastnosti hribine določimo na podlagi podatkov že izkopanih merskih profilov ter s pomočjo analize prej opisanih izrisov. Tako lahko s prilagoditvijo pomikovne funkcije na prvih nekaj meritev določimo končni nivo pomikov opazovanega prečnega prereza, s številom meritev pa se točnost izračuna in s tem napovedi še povečuje.

Če je obnašanje merskega profila »normalno«, pomiki sledijo pomikovni funkciji. V kolikor pride do večjih razlik med izračunanimi in izmerjenimi pomiki, je to opozorilo, da se s prerezom nekaj dogaja.

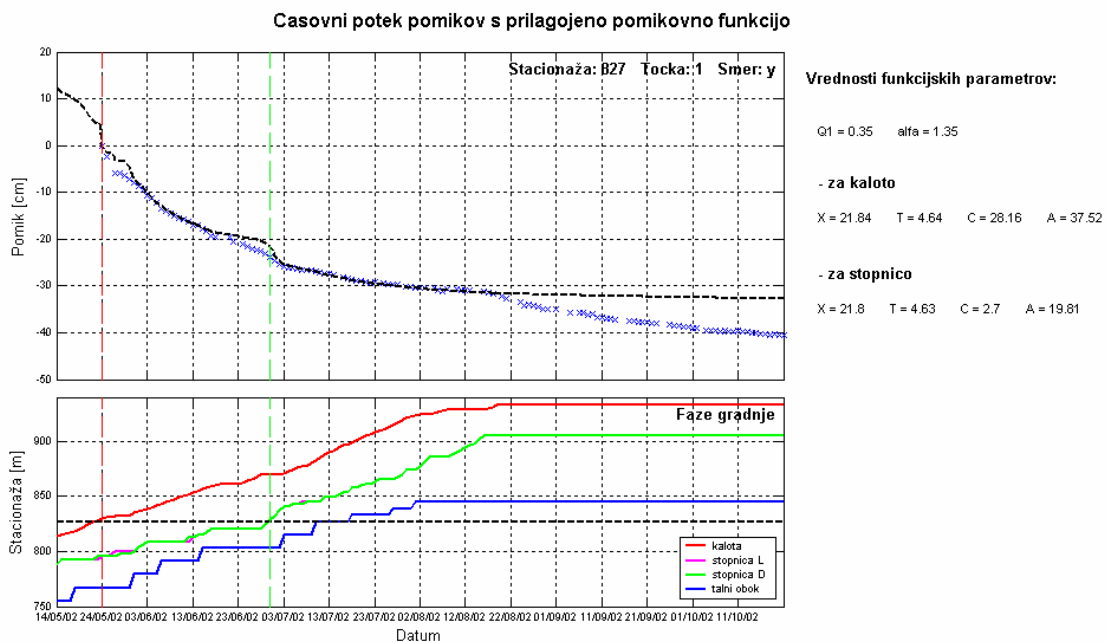
Vrednosti funkcijskih parametrov X, T, C in A so odvisne od kvalitete hribine pred čelom. Nizke vrednosti časovno odvisnih parametrov naznanjajo kvalitetno hribino, visoke vrednosti pa slabe geotehnične razmere. Če poteka gradnja predora v relativno homogeni hribinski masi, se vrednosti X, T in A skorajda ne spreminjajo, končni nivo pomika določimo le s spreminjanjem parametra C.

Tehnika prilagajanja pomikovne funkcije na merjene pomike v opazovanem prečnem prerezu je sledeča:

- v prvem koraku uporabimo parametre prejšnjega prereza
 - če analize prejšnjih merskih prerezov in analize izrisov meritev kažejo na izboljšanje hribinske mase, v drugem koraku zmanjšamo vrednost parametrov X, T in A, in obratno
 - v tretjem koraku nato prilagajamo pomikovno funkcijo le še s spreminjanjem vrednosti parametra C
- Ta metoda napovedovanja obnašanja predora ter ocena končnega nivoja pomikov se imenuje EPM (Extrapolation Prediction Method).

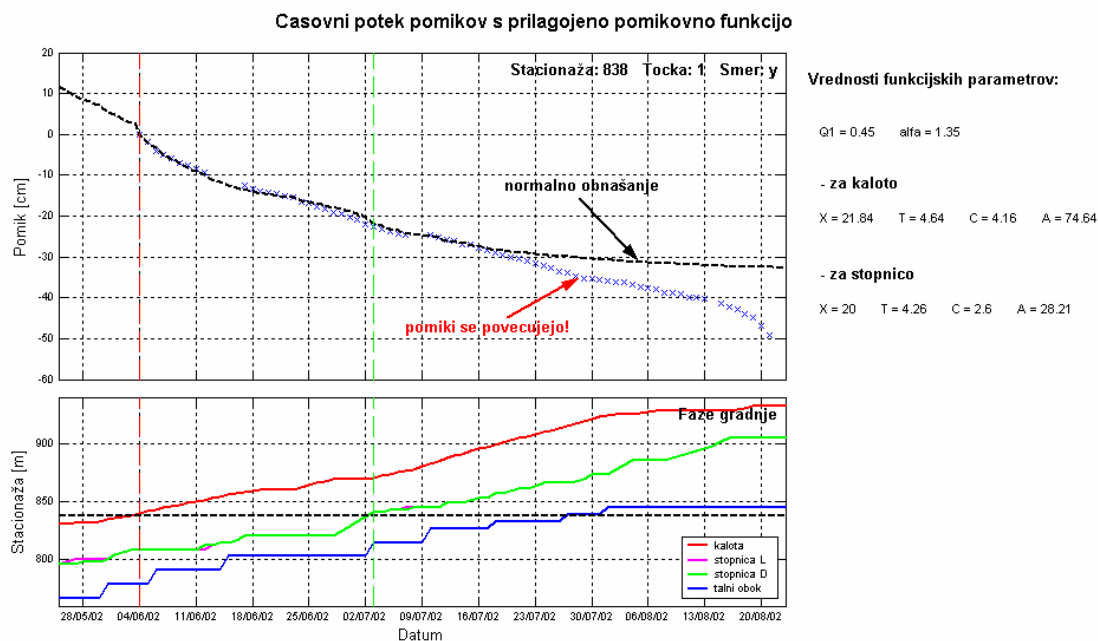
Primeri: Na grafu 9 je prikazana prilagoditev pomikovne funkcije na merjene podatke merskega profila na stacionaži 827, ki se nahaja že v odseku predora, kjer so bile poslabšane geološko - geotehnične razmere. Trend naraščanja vrednosti parametrov T in A nakazuje slabšanje razmer, kar se je odrazilo v porušitvi desnega boka na območju naslednjega merskega profila.

Na grafu lahko opazimo tudi neujemanje merjenih in izračunanih pomikov, trend naraščanja pomikov pa se je nadaljeval kljub temu, da so se ustavile vse gradbene aktivnosti v bližini opazovanega prečnega prereza. Prerez se torej še ni stabiliziral, čeprav lahko vidimo znamenja stabilizacije vse do sredine avgusta, ko se je sprožil porušitveni mehanizem v desnem boku predorske cevi.



Graf 9: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 827 m, analiza meritev z EPM, točka 1, smer y

Za razliko od stacionaže 827 pa merski profil na stacionaži 838 ni niti izkazoval znamenj stabilizacije (graf 10), saj bi se morali po izkopu stopnice prirastki pomikov zmanjšati, a so bili vseskozi konstantni. Posledica takšnega obnašanja so ekstremno visoke vrednosti parametra A.



Graf 10: Predor Trojane, leva cev – zahod, stacionaža 838 m, analiza meritev z EPM, točka 1, smer y

S pomočjo analize meritev z EPM lahko tako sklepamo na lastnosti hribine nekaj premerov predorske cevi vnaprej. Omogoča oceno končnega nivoja pomikov v primerih »normalnega« obnašanja, opozori pa tudi na nenormalno obnašanje oz. destabilizacijo predora.

NADALJNI RAZVOJ PROGRAMA PREDOR

Prednostna naloga pri nadaljnjem razvoju računalniške aplikacije Predor bo razvoj strojno učenega ekspertnega sistema, ki bo sposoben na podlagi baze podatkov (rezultatov ekstrapolacijske metode) že dograjenih predorov, sposoben določiti končno raven pomikov ter s tem velikost nadprofila za profile, ki šele bodo izkopani.

Naslednja naloga bo izračun pritiskov na podporje s pomočjo izmerjenih pomikov ter dimenzioniranje podporja na podlagi rezultatov strojno učenega ekspertnega sistema.

Trenutno je posamezne grafe mogoče izrisati le za merske točke v predoru; potrebno bo razviti še modul za izris grafov za merske točke na površini.

ZAKLJUČEK

Pri izgradnji avtocestnega križa v Sloveniji smo v zadnjih letih naredili kar nekaj kilometrov predorov v slabih geološko – geotehničnih pogojih – v t.i. »squeezing rock conditions«.

Kljub znanju in izkušnjam, ki so bile pridobljene pri teh projektih, neprijetna presenečenja niso izključena. Zgodnje prepoznavanje poslabšanih geotehniških razmer gradnje je predpogoj za pravočasno in ustrezno ukrepanje. Meritve pomikov v predoru se že rutinsko izvajajo. Potreben je na videz le še droben korak, da iz merjenih diagramov razberemo, kar nam predor »pripoveduje«. Naš prispevek v obliki programskega orodja *Predor* je zastavljen prav v to smer. Razvojna skupina je sestavljena interdisciplinarno, v razvoj in načrtovanje programa se vključujejo tudi končni uporabniki, ki tako programsko orodje potrebujejo.

Program Predor je nastal in se razvija kot odziv na poročanje o uspešnih analizah geološko – geotehničnih razmer pri gradnji predorov v t.i. »squeezing rock conditions« v tujih strokovnih krogih. Brez podrobne analize, ki je mogoča le z ustreznim programskim orodjem, so sicer drage geotehnične meritve slabo izkoriščene. Zgodi se lahko, da pravilna interpretacija meritev pride prepozno. Geotehnične meritve so integralni del NATM in danes ni projekta, kjer se ne bi izvajale. Menimo pa, da tudi ne bi smelo biti več projekta predora, kjer izvedene meritve ne bi bile podrobno in ažurno analizirane.

LITERATURA

- (1) Barlow, John Peter. 1986. Interpretation of Tunnel Convergence Measurements. Magistrska naloga, Department of Civil Engineering, The University of Alberta, Edmonton, Alberta
- (2) Steindorfer, Albert. 1998. Short Term Prediction of Rock Mass Behaviour in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data. Doktorska disertacija, Technische Universität Graz, Graz, Austria
- (3) Sellner, Peter J. 2000. Prediction of Displacements in Tunnelling. Doktorska disertacija, Technische Universität Graz, Graz, Austria
- (4) Klopčič, J. 2004. Grafični prikaz in analiza merjenih pomikov v predorogradnji. Diplomaska naloga. UL, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo, Ljubljana