

VPLIV ANIZOTROPIJE HRIBINSKE MASE NA VELIKOST IN SMER POMIKOV ZARADI IZKOPA PREDORA

INFLUENCE OF ANISOTROPY OF ROCK MASS ON MAGNITUDE AND DIRECTION OF DISPLACEMENTS DUE TO TUNNELLING

dr. Jure Klopčič, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Katedra za mehaniko tal, Jamova 2, 1000 Ljubljana,
jure.klopacic@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK 624.121:624.19(497.4)

izr. prof. dr. Janko Logar, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Katedra za mehaniko tal, Jamova 2, 1000 Ljubljana,
janko.logar@fgg.uni-lj.si

Povzetek | Pri analizi meritev pomikov predorov v mehkih, anizotropnih hribinskih masah in meritev površine nad takšnimi predori smo opazili nekatere karakteristične deformacijske vzorce, ki so bili nedvomno posledica anizotropije zaledne hribinske mase. Da bi opažene izkušnje kvantificirali in jih tako naredili uporabne za morebitne bodoče projekte v anizotropnih hribinah, smo na podlagi velike množice 3D-numeričnih analiz z variacijami togosti in trdnosti ter relativne orientacije diskontinuitet glede na os predora določili velikost pomika pred čelom in pričakovano usmerjenost vektorja pomikov stropne točke. Uporabnost rezultatov smo prikazali na primerih izmerjenih odzivov predorske cevi in površine v predorih Trojane in Jasovnik.

Ključne besede: predori, anizotropne hribine, pomiki

Summary | During the analyses of measured displacements in tunnels in soft anisotropic rock mass conditions and surface monitoring data above these tunnels some characteristic deformation patterns were observed. These patterns were clearly governed by the anisotropy of the surrounding rock mass. To quantify the obtained experiences for the future projects in similar ground conditions, a large number of 3D numerical calculations was performed. The magnitude of the displacement ahead of the tunnel face and the normal orientation of the displacement vector of the crown point were determined for different relative orientations of the discontinuities to the tunnel axis and different combinations of stiffness and strength parameters. The applicability of the results was checked on the case histories of the Trojane and Jasovnik tunnels with regard to measured displacements of the tunnel contour and surface displacements.

Key words: tunnels, anisotropic rock, displacements

1 • UVOD

Nova znanja in tehnologije omogočajo varno in cenovno učinkovito izrabo podzemnega prostora tudi v primeru močno deformabilne in slabo nosilne hribine. Gradnja je v takšnih razmerah običajno povezana s precejšnjimi tveganji. Opazovalna metoda ((Rabcewicz, 1965), (Peck, 1969)) se je izkazala kot najprimernejša za obvladovanje tveganj pri gradnji podzemnih objektov s klasično metodo (pri nas bolj znano pod imenom NATM). Analiza in ustrezna interpretacija izmerjenih in opaženih podatkov omogočata oceno ustreznosti vhodnih projektnih parametrov ter optimizacijo podporja in delovnih procesov glede na izmerjeni in pričakovani odziv podzemnega objekta (Schubert s sodelavci, 2003).

Integralni del opazovalne metode pri gradnji podzemnih prostorov so geodetske metode, ki služijo za določitev pomikov merskih točk predorske obloge in ugrezkov površine. Na podlagi teh pomikov opazujemo proces stabilizacije prečnega prereza in določimo potreben nadprofil izkopa za bodoče profile. Optimalna pot za določitev nadprofila je analiza rezultatov opazovanja gradnje ter določitev velikosti nadprofila na podlagi pričakovanih pomikov in geoloških struktur. V ta namen je Guenot s sodelavci (1985) razvil enostavno, a učinkovito metodo, ki jo je nadgradil Barlow

(1986) in nadalje prilagodil za uporabo v mehkih hribinah Sellner (2000). Polempirična analitična funkcija (v nadaljevanju pomikovna funkcija) hiperbolične oblike opisuje radialne pomike ostenja predora kot funkcijo napredovanja izkopnega čela in časovno odvisnega odziva hribine (Barlow, 1986). Pomikovno funkcijo prilagajamo merjenim radialnim pomikom s spreminjanjem prostih parametrov, ki opisujejo odziv sistema hribina – podporje ob upoštevanju faznosti gradnje. Glavna prednost pomikovne funkcije je enostavnost, saj omogoča hitro in zanesljivo oceno procesa stabilizacije prečnega prereza z upoštevanjem 3D-vplivov gradnje in tudi časovne komponente gradnje. Za določitev »normalnega« obnašanja in končne velikosti pomika tako ne potrebujemo materialnih parametrov, ki bi jih bilo treba določiti z dragimi in zamudnimi laboratorijskimi preiskavami. Zaradi teh prednosti je metoda primerna za vsakodnevno uporabo pri spremljanju gradnje predora (Sellner, 2000).

Uporaba vzdolžnih pomikov je bila v geotehnični praksi dolgo časa spregledana in šele s spoznanji Schuberta in sodelavcev so vzdolžni pomiki začeli pridobivati pravo veljavo. Omogočajo namreč prepoznavanje sprememb v togosti hribinske mase precej

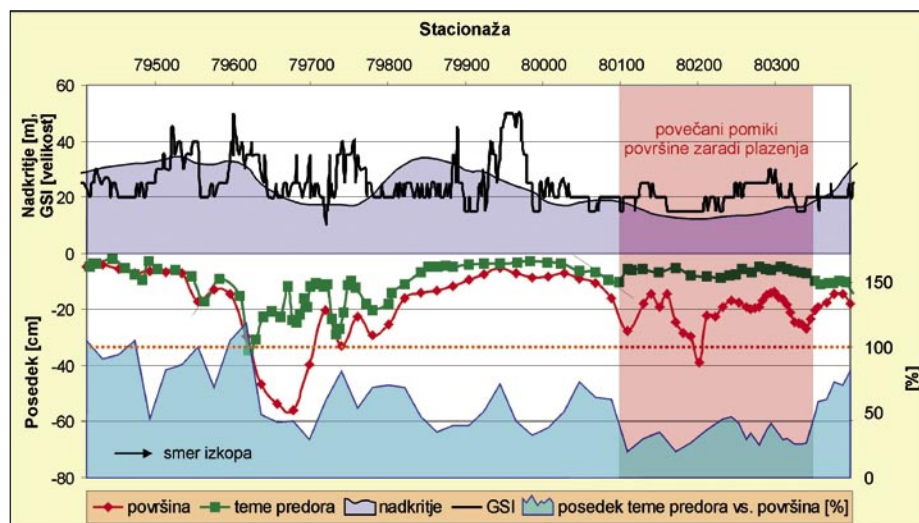
pred čelom predora ((Schubert, 1993), (Schubert, 1995)). V primeru bolj toge hribine pred čelom predora se vektor pomikov (vzdolžni in vertikalni pomik) odkloni od normalnega položaja v smeri nadaljnjega izkopa, medtem ko se v primeru slabše hribine pred čelom odkloni od normalnega položaja v izkopani prostor. Za izotropne materiale je bil ta kot določen v razponu 8 do 15°. Steindorfer (1998) je na podlagi nekaj meritev v predorih v anizotropnih hribinah nakazal normalno orientacijo vektorja pomikov v odvisnosti od relativne usmeritve ravnin anizotropije glede na os predora (anizotropija pomeni različne lastnosti hribine v različnih smereh, ki izdatno vplivajo na njeno obnašanje; običajno se nanaša na oslabljene ploskve v hribinski strukturi, kot so na primer skrnavost, plastovitost, prelomi, razpoke). Odziv izkopanega prostora oziroma velikost in smer pomikov po konturi predora sta tako močno odvisni od trdnostnih parametrov in relativne usmerjenosti diskontinuitet glede na izkopani prostor ((Wittke, 1990), (Solak, 2009)).

Na podlagi obsežne baze meritev 3D-pomikov primarne obloge predorov, grajenih v anizotropni hribinski masi (predori Trojane, Golovec, Šentvid, Jasovnik, Ločica, Podmilj), smo sistematično primerjali izmerjeni odziv predorske obloge z geološko zgradbo prostora, da bi ugotovili morebitne karakteristične deformacijske vzorce pomikov predorov v anizotropnih hribinah.

2 • ANALIZA MERJENIH POMIKOV

Zaradi zelo obsežnega izvedenega programa monitoringa je za analizo meritev najbolj interesanten predor Trojane. V predoru so bile opravljene geodetske meritve petih merskih točk v 389 merskih profilih, horizontalni inklinometer in vertikalni ekstenzometer, na površini nad predorom pa geodetske meritve merskih točk na odseku 1200 m vzdolž obeh osi na vzhodni strani predora (merske točke na 20 m), geodetske meritve 4 do 13 točk v 43 prečnih prerezi in niveliranje večjega števila stavb.

Na sliki 1 je prikazana primerjava merjenih pomikov temenske točke v predoru (zeleni črta) in površine (rdeča črta) na vzhodnem delu predora, ki poteka z nizkim nadkritjem od 15 do 35 m pod vasjo Trojane (prikazan z vijolično površino na zgornjem delu slike 1). Od stacionaže km 79 + 600 naprej so pomiki

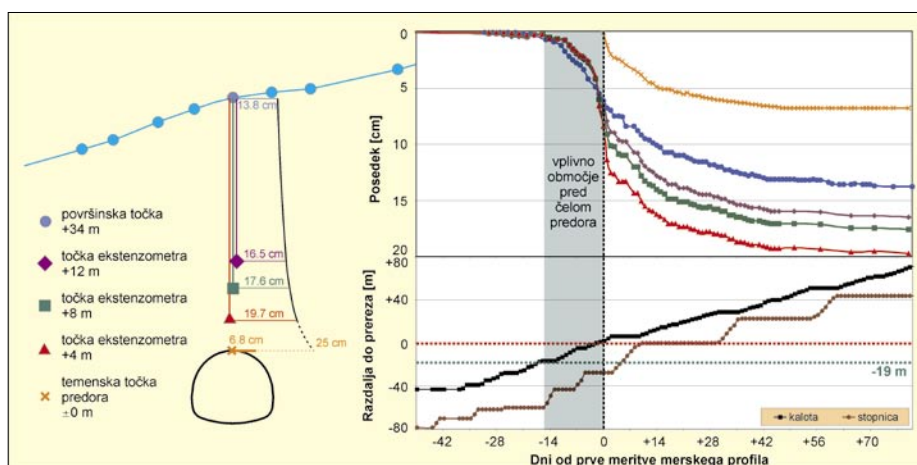


Slika 1 • Primerjava pomikov površine in temenske točke leve (južne) cevi predora Trojane na vzhodnem delu predora pod vasjo Trojane

površine precej večji kot pa izmerjeni pomiki ostjenja predora. Z modro površino je predstavljen odstotek pomika predora glede na pomik površine, ki variira med 35 in 80 odstotki. Nižji odstotki so povezani z manjšim nadkritjem nad predorom. Kljub vgrajenemu togemu podporju, uporabi cevnega ščita, podpiranju izkopnega čela z velikim številom sider in podpornim jedrom ter hitremu zapiranju podpornega obroča se je večina pomikov zgodila pred čelom predora in se v veliki meri prenesla na površino.

Običajno se le del pomika, ki ga izmerimo v predoru, prenese na površino. Razpored pomikov z globino je prikazan z rezultati vertikalnega ekstenzometra, ki je bil vgrajen nad osjo južne cevi v bližini Garni hotela v vasi Trojane na stacionaži km 79 + 842 (slika 2). Na površini je bil merjen merski profil sedmih točk z dodatno točko na ustju vertikalnega ekstenzometra 34 m nad temenom predora. Merske točke tritočkovnega vertikalnega ekstenzometra so bile 4, 8 in 12 m nad temenom predora in se jih je opazovalo že precej pred vplivnim območjem prihajajočega izkopnega čela predora. Ko je čelo kalote prečilo vertikalni ekstenzometer, se je v temenu predora vgradila merska točka. Vse navedene točke so bile opazovane dovolj dolgo, da se je hribinska masa na območju popolnoma umirila.

Točka ekstenzometra 4 m nad temenom predora (rdeča barva) se je posedla za 19,7 cm, točka na površini (modra barva) 13,8 cm in temenska točka (oranžna barva) 6,8 cm. Če ekstrapoliramo trend posedkov ekstenzometrijskih točk do temena predora, bi ob predpostavki zmanjševanja deformacij stran od izkopnega prostora celotni posedek temenske točke znašal 25 cm. Izmerjeni del pomika znaša tako zgolj 27 odstotkov celotnega pomika. Podoben rezultat dobimo tudi iz analize horizontalnega inklinometra, ki je bil v dolžini 80 m vgrajen v cevi cevnega ščita nad temenom južne cevi v območju pod objektom GP Trojane (Klopčič, 2009). Primerjava ekstrapoliranega pomika do temena predora in pomika površinske točke pokaže, da se je na območju vertikalnega ekstenzometra (nadkritje 34 m) le polovica pomika na temenu predora prenesla do površine. Kjer je nadkritje nad predorom nižje, se na površino prenese večji delež pomika. Če zdaj pogledamo sliko 1 v luči rezultatov slike 2, lahko ocenimo, da se je na vzhodnem delu predora Trojane pred čelom predora izvršilo od 60 do 80 odstotkov vseh deformacij zaradi izkopa predora. Ti rezultati kažejo, da togo podporje in vsi drugi ukrepi za zagotavljanje stabilnosti



Slika 2 • Prikaz zmanjševanja pomikov v hribinski masi vstran od izkopnega prostora s primerjavo pomikov površinske točke, točk vertikalnega ekstenzometra in temenske točke v predoru – južna cev predora Trojane

čela ter zmanjšanje pomikov pred čelom predora v določenih pogojih sicer vplivajo na zmanjšanje merjenih pomikov merskih točk v predoru, nimajo pa želenega vpliva na pomike pred čelom in na pomike površine.

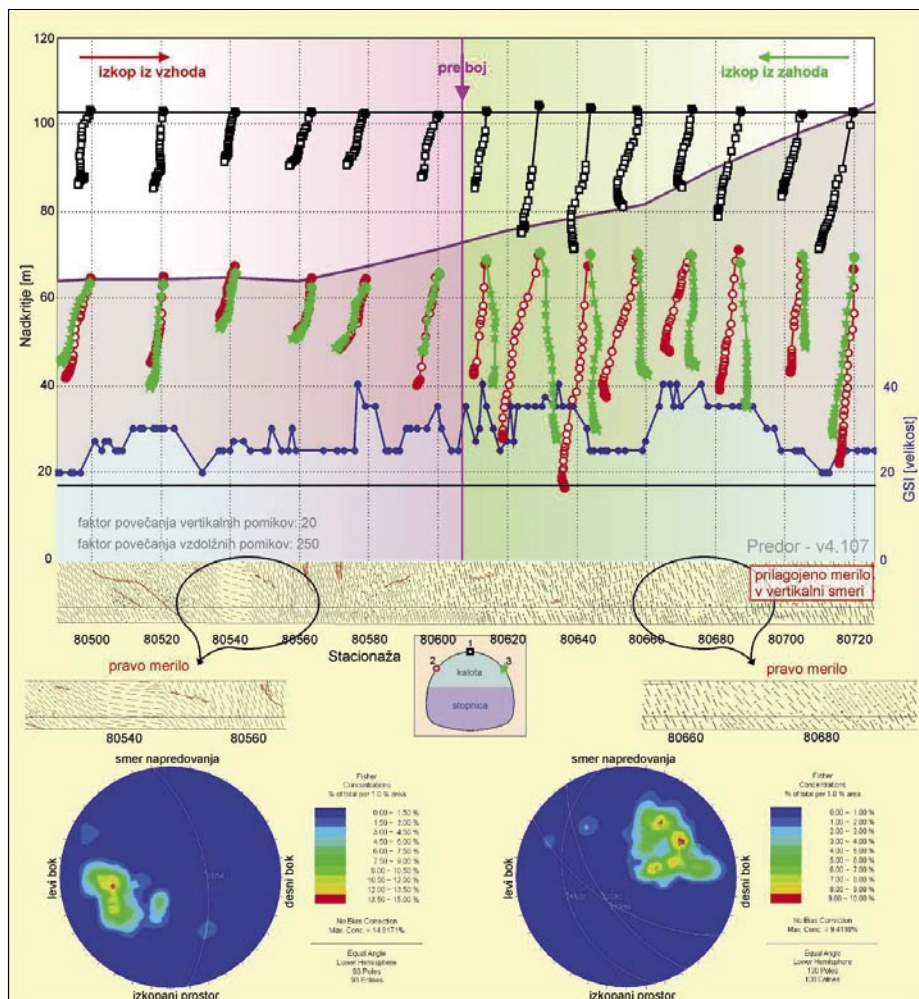
Razlog za velike deformacije pred čelom predora je torej treba najti v sami hribini, v njeni strukturi. Tonon (2003) je na podlagi 3D-numeričnih analiz ugotovil, da na delež pomikov, ki se zgodijo pred čelom predora in za njim, vpliva tudi relativna orientacija diskontinuitet. V primeru izkopa z vpadom diskontinuitet v čelo (v nadaljevanju izkop z vpadom – slika 3) se večina celotnega pomika zgodi pred čelom, ker je hribina bolj deformabilna pravokotno na diskontinuitete kot vzdolž diskontinuitet in se torej deformacije lahko začnejo precej daleč od čela. Nasprotno pa se pri vpadu diskontinuitet v izkopani prostor (v nadaljevanju izkop proti vpadu) večina pomikov zgodi šele za čelom v že izkopanem prostoru, kajti hribina se lahko le malo deformira v smeri nadaljnega izkopa. Dokaz za zgornjo trditev lahko najdemo na območju prebojev predorov v anizotropnih hribinah, če so ti izvedeni v vsaj približno enakomerno skrilavi ali plastoviti hribinski masi. Takšen primer smo našli na območju preboja desne (severne) cevi predora Trojane (slika 4).

Geološka zgradba je prikazana z vzdolžnim prerezom preučevanega območja in s Schmidtovim diagramom polov diskontinuitet relativno na os predora in smer napredovanja izkopa. Hribinska masa na zahodni strani sestoji iz menjajočih se sekvenc skrilavega peščenjaka in meljevca z mejnimi vrednostmi GSI med 25 in 40 ter povprečnimi med 30 in 35. Izkop z zahodne smeri se je vršil proti vpadu plasti; relativni vpad plasti glede na os predora in smer izkopa je v smeri proti levemu boku in nazaj. Na vzhodni strani se peščenjak večinoma menjuje s plastmi glinovca in v manjši meri meljevca. Vrednost GSI je nižja kot na zahodu – povprečje znaša okoli 25. Izkop z vzhodne strani se je vršil z vpadom plasti; relativni vpad plasti je proti desnemu boku in naprej. Nadkritje nad predorom se zmanjšuje od zahoda proti vzhodu.

Izmerjeni pomiki približno 120 m dolgih odsekov z zahoda in vzhoda so na sliki 4 predstavljeni z vzdolžnim prerezom vektorjev pomikov (vertikalni in vzdolžni pomiki) treh merskih točk: temenske in obeh bočnih. Opaziti je, da so na območju izkopa z zahoda pomiki kljub boljšemu materialu, ki je izkazan z višjimi vrednostmi GSI, pomembno večji kot pomiki na območju izkopa z vzhoda. Del razlike v velikosti pomikov se lahko pripiše tudi večjemu



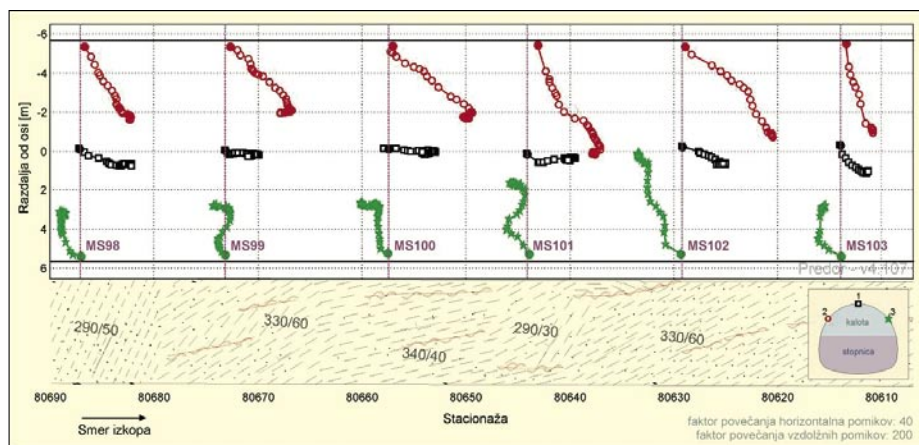
Slika 3 • Razlaga izrazov izkopa z vpadom in izkopa proti vpadu



Slika 4 • Območje preboja desne cevi predora Trojanje; prikaz vzdolžnega prereza vektorjev pomikov in pripadajoča geološka zgradba

nadkritju nad območjem izkopa z zahoda. Na sliki 4 je opaziti tudi podoben naklon vektorjev pomikov stropnih točk vzdolž obeh odsekov; pri izkopu z vzhoda so bili vektorji usmerjeni

v izkopani prostor, pri izkopu z zahoda pa v smer nadaljnega izkopa. Na odseku, ki je bil izkopen z zahoda, je razvidna razlika med orientacijami vektorjev pomikov obeh bočnih



Slika 5 • Tloris vektorjev pomikov in pripadajoča geološka zgradba na območju preboja desne cevi predora Trojanje; izkop z zahoda

točk: vektor pomikov leve bočne točke (rdeče barve) kaže v smer nadaljnega izkopa, vektor desne točke pa v izkopani prostor.

Za boljšo predstavbo je ta odsek prikazan s tlorisom vektorjev pomikov in pripadajočo geološko zgradbo na sliki 5. Plasti vpadajo proti levemu boku in v izkopani prostor; vektorji pomikov bočnih točk so torej na te plasti pravokotni. Predvsem na merskih profilih MS 99 in MS 101 se na desnih bočnih točkah (zeleno barvo) opazi vpliv lokalnih geoloških struktur in tudi padajočega nadkritja na smer vektorja pomikov. Takoj po izkopu kalote so bili vektorji namreč usmerjeni pravokotno na vpad plasti v izkopani prostor, ko pa se je vpliv napredujočega čela kalote dovolj odmaknil, se je smer vektorjev pomikov spremenila v smer padajočega nadkritja. Po dokončanem podpornem obroču se je usmeritev vektorjev spremenila še enkrat, tokrat v primarno smer, tj. normalno na vpad plasti.

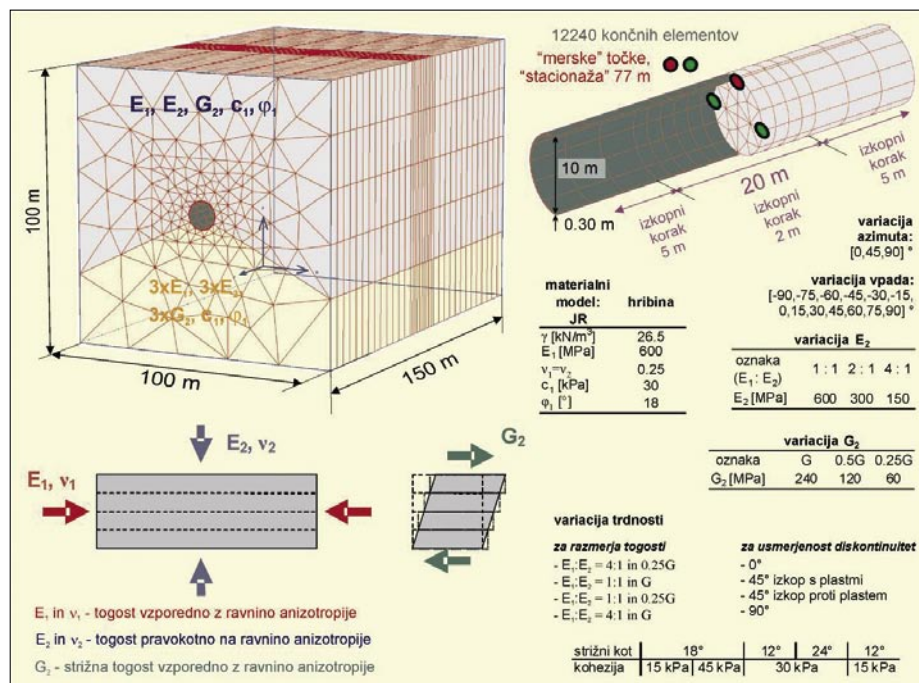
Opozoriti velja še na spremembo smeri orientacije vektorjev pomikov levih bočnih točk (rdeča barva) po dokončanem podpornem obroču, ki se je spremenila iz smeri normalno na vpad plasti v smer vzporedno s plastmi, torej iz deformacij normalno na plasti (smer, v kateri je hribina bolj deformabilna) v strižne deformacije vzdolž plasti (smer, v kateri je hribina manj deformabilna). Glede na opaženo lahko sklepamo, da v hribini pri velikih spremembah napetostnega stanja prevladujejo deformacije pravokotno na ravnine anizotropije, ko pa se napetostno stanje približa novemu končnemu stanju, postanejo dominantne strižne deformacije med ploskvami.

Neposredno odvisnost deformacijskega odziva predorske konture od relativne orientacije ravnin anizotropije glede na os predora je sicer pokazalo že precej avtorjev. Steindorfer (1998) je na podlagi meritev nakazal, da orientacija diskontinuitet vpliva na orientacijo vektorja pomikov, Tonon (2003) je na podlagi numeričnih izračunov ugotovil, da izkop glede na različne usmerjenosti diskontinuitet vodi do različnega deleža pomikov pred čelom in pomikov izkopenega prostora, kar smo tudi opazili na primeru predora Trojanje. Da bi opažene fenomene kvantificirali in jih nato primerjali z merjenimi vrednostmi, smo izvedli veliko število numeričnih analiz. Glede na zgoraj prikazane velike deleže pomikov pred čelom predora nas je zanimal vpliv stopnje anizotropije hribinske mase in relativne usmerjenosti diskontinuitet na delež pomikov pred čelom predora in orientacijo vektorja pomikov.

3 • NUMERIČNI IZRAČUNI

Izračune smo opravljali s programskim paketom Plaxis 3D Tunnel in uporabo vgrajenega anizotropnega materialnega modela Jointed rock. Uporabljeni numerični model je prikazan na sliki 6. Modelirali smo krožni predor premera 10 m (približni ekvivalentni premer dvopasovnega predora). Podporje smo modelirali z volumnskimi elementi s togostjo 8 GPa, s čimer smo zajeli vpliv mladega in starega betona ter vpliv razpok na togost. Izkop predora smo opravili po celotnem prerezu naenkrat v izkopnih korakih po 5 m na začetku in koncu modela, v sredini, kjer so bile »merske« točke, pa v korakih po 2 m. Pri izračunih smo variirali azimut vpada plasti (vzporedno z osjo – azimut 0° , pod kotom 45° glede na os in pravokotno na os – azimut 90°) in vpadni kot plasti (od $+90^\circ$ do -90° s korakom 15°). Nadalje smo variirali razmerje med elastičnima moduloma E_1 in E_2 ter vrednost strižnega modula G_2 (pomeni posameznih modulov so definirani na sliki 6 levo spodaj, izhodiščna vrednost $G = E_1 / (2(1 + \nu_1))$ je strižni modul za izotropni material). Niz računov smo ponovili še za različne trdnostne parametre.

Da bi se zaradi enakega modula v obremenitvi in razbremenitvi (značilnost Jointed rock modela) izognili prevelikim dvizkom zaradi izkopa predora, smo v spodnjem delu modela uporabili material s trikrat večjo togostjo (območje rumene barve na modelu na sliki 6).



Slika 6 • Numerični model za izračun vpliva anizotropije na odziv predora z uporabo anizotropnega konstitutivnega modela Jointed rock

Za primerjavo smo izračun opravili tudi z dvema izotropnima konstitutivnima modeloma, vgrajenima v Plaxis: z elastičnim modelom ($E = E_1$, $\nu = \nu_1$) in modelom Hardening soil z napetostno odvisnimi togostnimi parametri

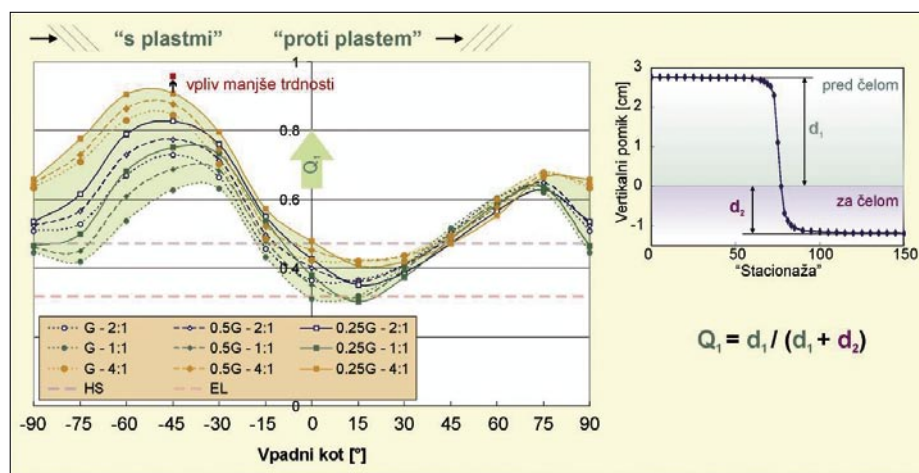
($E_{50}^{ref} = E_{p0}^{ref} = E_1$, $E_{ur}^{ref} = 3E_1$, $c = c_1$, $\phi = \phi_1$, $m = 0.5$, $K_0^{NC} = 0.691$, $\nu_{ur} = 0.2$, $p_{ref} = 1050$ kPa). Skupaj je bilo opravljenih skoraj 600 3D-numeričnih analiz.

4 • ANALIZA NUMERIČNIH IZRAČUNOV

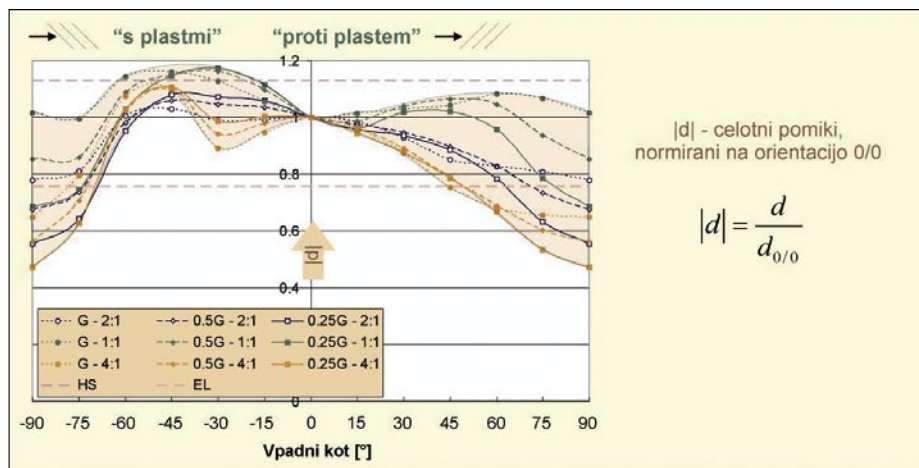
V prvem delu bo prikazan vpliv anizotropije na delež pomikov pred čelom predora glede na vertikalni pomik stropne točke na »stacionaži« 77 m (na sredini modela), v drugem pa vpliv anizotropije na orientacijo vektorja pomikov za stropno in obe bočni točki.

4.1 Vpliv orientacije anizotropije na delež pomikov

V prvem delu smo se tako osredinili na parameter pomikovne funkcije Q_1 , ki predstavlja delež pomikov zaradi gradnje predora, ki se zgodi pred čelom predora. Barlow trdi, da velikost pomikov pred čelom odraža velikost spremembe napetostnega stanja pred čelom predora. Rezultati so prikazani za usmerjenost diskontinuitet vzporedno z osjo predora oziro-



Slika 7 • Izračunani parameter Q_1 za kombinacije treh razmerij $E_1 : E_2$, treh azimutov diskontinuitet, štirih različnih vrednosti strižnega modula in dvanajstih različnih vpadov diskontinuitet

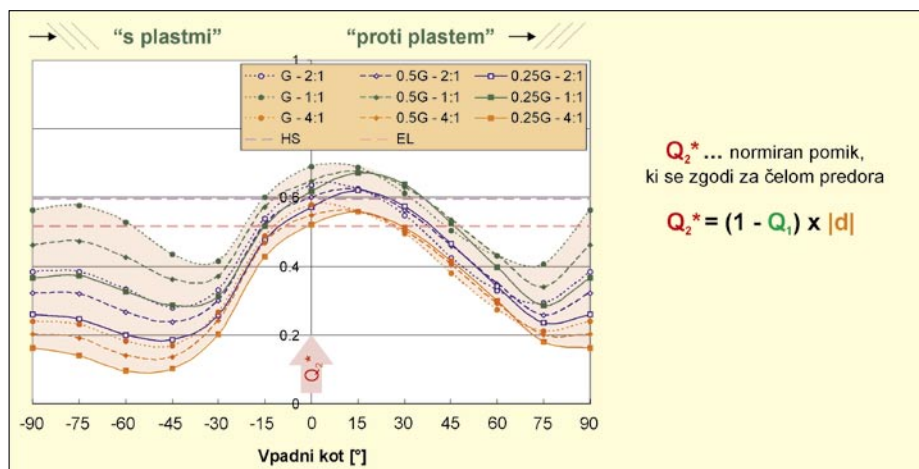


Slika 8 • Normirani celotni pomiki glede na celotni pomik pri 0°/0° za različna razmerja $E_1 : E_2$, različne vrednosti strižnega modula in azimutov diskontinuitet

ma azimut 0° pri spreminjanju vpadnega kota; s krivuljo so povezane vrednosti, ki pripadajo enemu naboru materialnih karakteristik. Rezultati za preostali obravnavani usmerjenosti diskontinuitet so podani v (Klopčič, 2009). Območje, ki ga omejujejo omenjene krivulje, je obarvano.

Parameter Q_1 izračunamo kot razmerje med pomikom opazovane točke, ki se zgodi pred čelom predora, in celotnim pomikom te točke. Kot je razvidno s slike 7, so krivulje Q_1 za usmerjenost diskontinuitet 0° (vzporedno z osjo) sinusoidne oblike z dvema maksimumoma (pri 45° do 60° vpadu plasti v smer nadaljnjega izkopa in pri 75° vpadu plasti v izkopani prostor) in dvema minimumoma (pri 0° do 15° pri vpadu plasti v izkopani prostor in pri vertikalnih ploskvah anizotropije, tj. 90°). Pri izkopu s plastmi je opazen velik vpliv stopnje anizotropije hribinske mase, pri čemer je območje omejeno navzgor s krivuljo, dob-

ljeno z najslabšimi parametri ($E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $0,25 G$), in navzdol omejeno s krivuljo, dobljeno z najboljšimi uporabljenimi parametri ($E_1 : E_2 = 1 : 1$ in G). Pričakovano večja stopnja anizotropije povzroči večji pomik pred čelom. Vrednosti so tako na intervalu med 0,36 pri subhorizontalnem vpadu plasti v izkopani prostor (to je tudi vrednost Q_1 , ki jo dobimo pri izračunu z elastičnim materialnim modelom) ter 0,91 pri vpadnem kotu 45° v smer nadaljnjega napredovanja. Razlike v togosti hribinske mase na drugi strani pri izkopu proti plastem skorajda ne vplivajo na vrednost Q_1 . Spreminjanje trdnostnih parametrov nima znatnega vpliva na velikost parametra Q_1 . Največja vrednost parametra Q_1 je pri vpadnem kotu 45° pri izkopu s plastmi za največjo stopnjo anizotropije in najslabše trdnostne parametre in znaša 0,95 (slika 7), kar pomeni, da bi se v slabih hribinskih pogojih kar 95 odstotkov pomika izvršilo pred čelom predora!



Slika 9 • Normirane vrednosti pomika (Q_2^*), ki se zgodi za čelom predora

Nadalje smo pri analizah računskih podatkov opazili, da se pri variacijah togosti hribine in vpada plasti spreminja tudi absolutna velikost pomikov. Da bi lahko pomike primerjali med sabo, smo dobljene vrednosti normalizirali na krivuljo, dobljeno pri orientaciji diskontinuitet 0°/0°. Ta je namreč skupna vsem usmerjenostim diskontinuitet. Tako normirane krivulje celotnih pomikov (označimo jih z $|d|$) so prikazane na sliki 8.

Velikost normiranih pomikov za različne kombinacije togosti in vpadne kote znaša med 50 in 120 odstotki pomika pri orientaciji 0°/0°. Raztros velikosti pomikov se z naraščanjem vpadnega kota od 0° proti 90° pri izkopu proti plastem povečuje, pomiki se generalno zmanjšujejo. Pri izkopu s plastmi so pomiki primerjalno največji, ne glede na stopnjo anizotropije so za vpadni kot 45° vsi večji od pomika pri orientaciji diskontinuitet 0°/0°, pri vpadnih kotih 15°, 30° in 60° so od tega pomika manjši le pri razmerju elastičnih modulov $E_1 : E_2 = 4 : 1$.

Glede na dobljene rezultate (največji pomiki pri izkopu s plastmi s hkratnim največjim deležem pomikov pred čelom) smo zato, da bi dobili boljšo predstav o vplivu izkopa proti plastem ali s plastmi, smo definirali nov parameter $Q_2^* = (1 - Q_1) \cdot |d|$. Q_2^* predstavlja normirani pomik, ki se zgodi za čelom predora v izkopanem prostoru. Pri visoki stopnji anizotropije ($E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $G_2 = 0,25 G$) in vpadnem kotu diskontinuitet 45° v smer nadaljnjega izkopa se za čelom izvrši le okoli 10 odstotkov celotnega pomika, preostalo se izvrši pred čelom. Pri izkopu v istem materialu, a z nasprotnim vpadom plasti (45° v izkopani prostor) se za čelom izvrši 42 odstotkov celotnega pomika. Območja (obarvana v rdeči barvi) so za majhne vpadne kote pri izkopu s plastmi in vse kote pri izkopu proti plastem približno enake debeline, razširijo se le pri bolj strmih vpadnih kotih v primeru izkopa s plastmi. Iz spodnjih grafov vidimo, da na to najbolj vpliva razmerje elastičnih modulov $E_1 : E_2$, manj pa vrednost strižnega modula G_2 . Izračun v izotropnih pogojih z modelom Hardening soil da vrednost $Q_2^* = 0,6$, kar je v območju višjih vrednosti normiranega pomika izkopanega prostora.

Videti je, da se velikost pomikov izkopanega območja pri izkopu v istem materialu in enakem vpadnem kotu, le iz različne smeri (izkop s plastmi ali proti plastem), lahko drastično razlikuje. Če za vsak vpadni kot izračunamo razmerje med deležem normiranih pomikov izkopanega predora pri izkopu proti plastem in deležem normiranih pomikov

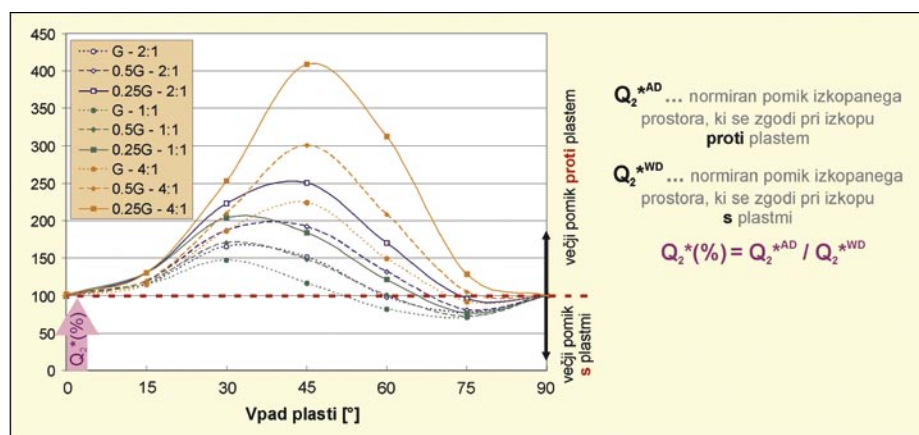
pri izkopu s plastmi (označimo s Q_2^* (%)), dobimo krivulje na sliki 10.

V primeru največje obravnavane stopnje anizotropije ($E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $G_2 = 0,25 G$) znaša razmerje Q_2^* (%) pri vpadnem kotu 45° več kot 400 odstotkov, kar pomeni, da bi bil izmerjeni pomik izkopenega prostora v primeru izkopa proti plastem več kot štirikrat večji kot pomik izkopenega prostora pri izkopu v nasprotni smeri v istem materialu! Spodnjo mejo predstavlja krivulja, izračunana z najmanjšo stopnjo anizotropije ($E_1 : E_2 = 1 : 1$ in izotropno vrednostjo G_2), pri čemer je maksimum pri vpadnem kotu 30° in znaša 150 odstotkov. Izraziti vpliv na velikost Q_2^* (%) ima strižni modul – pri razmerju modulov elastičnosti $E_1 : E_2 = 4 : 1$ je pri izotropni vrednosti strižnega modula G_2 velikost Q_2^* (%) le še 170 odstotkov v primerjavi s 410 odstotki pri četrtinki vrednosti izotropnega strižnega modula. Nižja razmerja elastičnih modulov $E_1 : E_2$ pomaknejo maksimume krivulj v smeri manjših vpadnih kotov; zmanjša se tudi razmerje. Pri strmih vpadnih kotih so lahko pomiki pri izkopu proti plastem v primeru manjših stopenj anizotropije celo manjši kot pri izkopu s plastmi.

4.1.1 Primerjava merjenih in računskih odzivov

Z dobljenimi rezultati zdaj lahko razložimo fenomene, opažene v predoru Trojane (veliki pomiki površine pri razmeroma majhnih izmerjenih pomikih temenske točke v predoru). Pri izkopu leve cevi predora Trojane z vzhodne strani je izkop potekal s prevladujočim vpadom plasti v smer nadaljnjega izkopa z majhnim vpadnim kotom približno 20° (slika 11). Za takšno orientacijo diskontinuitet lahko s slike 7 odčitamo delež pomikov pred čelom predora v velikosti 65 odstotkov za največjo obravnavano stopnjo anizotropije, kar je nekaj manj, kot kažejo analize rezultatov horizontalnega inklinometra in vertikalnega ekstenzometra. Pri tem je treba poudariti velik raztros orientacije diskontinuitet. Velik delež izmerjenih orientacij ima večji vpadni kot kot prevladujoča orientacija. Večji vpadni kot pri izkopu s plastmi pomeni večji delež pomikov pred čelom predora (slika 7). Za vpadni kot 30° tako znaša delež predpomika 80 odstotkov celotnega pomika, kar je znotraj opaženega velikostnega reda deleža predpomikov na obravnavanem delu predora Trojane.

Prava vrednost dobljenih rezultatov se pokaže na krajšem opazovanem odseku ali celo pri analizi pomikov posameznih merskih profilov z v uvodu omenjeno semianalitično pomikovno

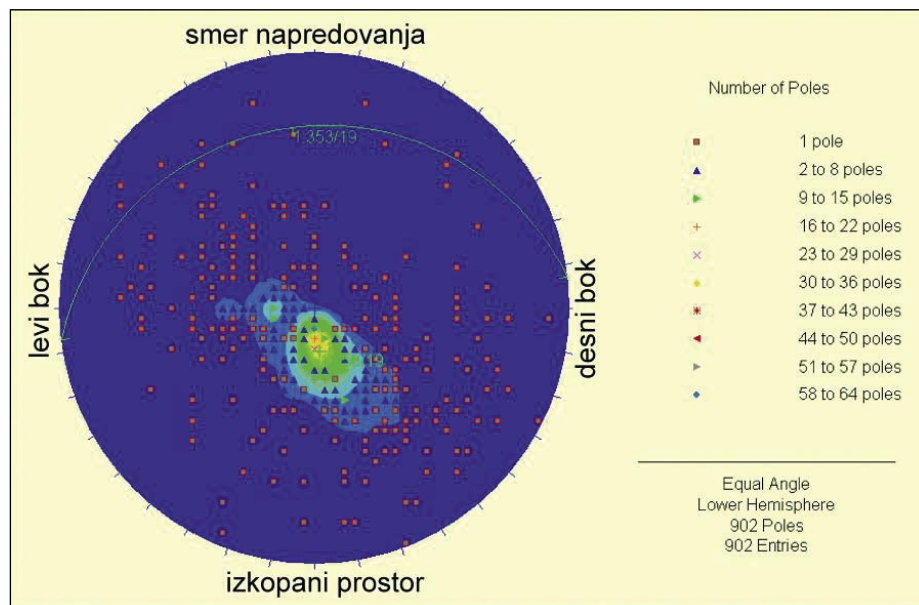


Slika 10 • Razmerje pomikov pri izkopu predora proti vpadu plasti in z vpadom plasti, ki se zgodijo za čelom predora (Q_2^* (%))

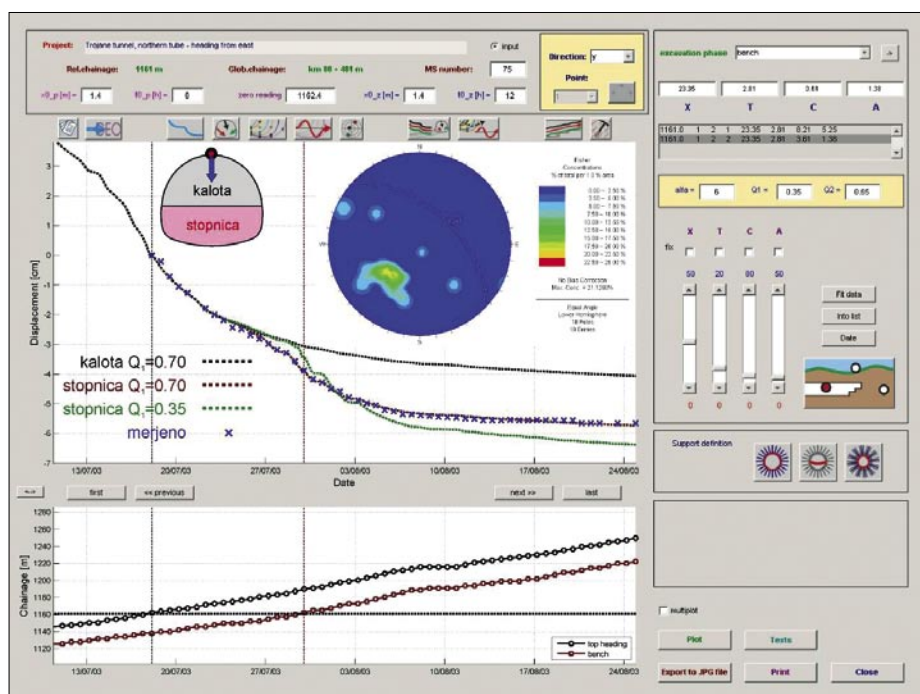
funkcijo. Pomikovna funkcija je sestavljena iz treh delov: prvi del predstavlja pomike pred čelom; drugi del predstavlja pomike med izkopom izkopenega koraka z merskim profilom in prvo meritvijo točk; tretji pa izmerjene pomike za izkopnim čelom. Le zadnji del pomikovne funkcije lahko merimo in zanj je mogoče natančno določiti proste parametre s prilagajanjem funkcije merjenim pomikom, medtem ko sta prva dva dela določena na podlagi numeričnih simulacij in sta močno odvisna od Q_1 (predstavlja tisti delež celotnega pomika zaradi gradnje predora, ki se zgodi pred čelom predora) in x_f (predstavlja velikost vplivnega območja pred čelom predora). Barlow trdi, da velikost pomikov pred čelom odraža velikost spremembe napetostnega stanja pred čelom predora.

Za posamezne merske profile iz območja preboja desne (severne) cevi predora Trojane smo prilagajali pomikovno funkcijo za posamezne izkopske faze merjenim vertikalnim pomikom stropne točke (modri križci) z uporabo izračunanih vrednosti parametra Q_1 , glede na prevladujočo orientacijo diskontinuitet – v literaturi so avtorji uporabljali vrednost $Q_1 = 0,35$. Glede na rezultate primerjave deleža pomikov pred čelom za merjene in računske vrednosti na območju predora Trojane smo privzeli vrednost Q_1 za kombinacijo $E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $0,25 G$.

V območju merskega profila MS75 (izkop z vzhoda) prevladuje orientacija diskontinuitet $42^\circ/48^\circ$ (relativno na os predora) oziroma diskontinuitete vpadajo v smer nadaljnjega izkopa, kar na podlagi oprav-



Slika 11 • Orientacija diskontinuitet v levi cevi predora Trojane pri izkopu z vzhodnega portala; orientacija diskontinuitet je podana relativno glede na os predora



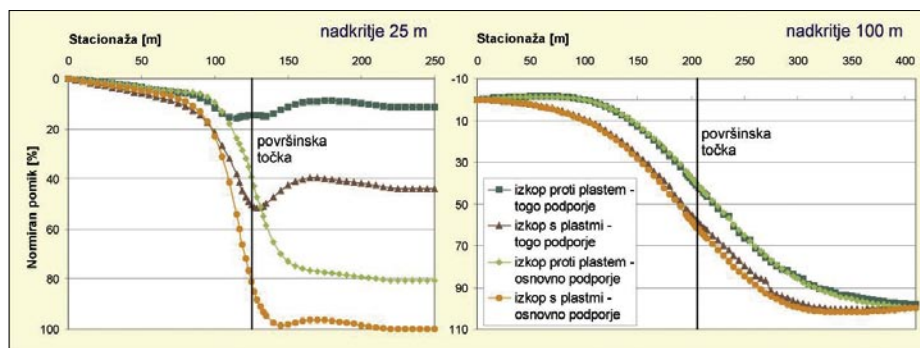
Slika 12 • Računsko prilagojeni in merjeni vertikalni pomiki stropne točke v merskem profilu MS75 na stacionaži km 80 + 481 v severni cevi predora Trojane (izkop z vzhoda)

Ijenih numeričnih analiz vodi k vrednosti parametra $Q_1 = 0,70$. Na sliki 12 je s črno črtkano črto izrisana pomikovna funkcija za izkop kalote, z rdečo črtkano črto pomikovna funkcija za izkop stopnice, z zeleno črtkano črto pa pomikovna funkcija stopnice za vrednost parametra $Q_1 = 0,35$, ki je nismo mogli na noben način bolje prilagoditi merjenim pomikom.

Opravljeni izračuni parametra Q_1 torej omogočajo boljše prilagajanje pomikovne funkcije merjenim pomikom ter tako pridobitev boljših karakterističnih vrednosti prostih parametrov pomikovne funkcije za različne tipe hribine in s tem boljše napovedi pomikov za prečne profile, ki še bodo izkopani.

Na podlagi prikazanega se nam ponujata naslednji dve hipotezi:

– Predpostavimo, da se predvideva gradnja predora z nizkim nadkritjem pod naseljenim območjem v mehki, skrilavi kamnini in z azimutom diskontinuitet, ki je vzporeden poteku osi predora, ter vpadom diskontinuitet s kotom 45° . V omenjenem primeru bi bilo z vidika čim manjšega vpliva gradnje na površino bolj ugodno izkop vršiti z vpadom plasti v izkopani prostor, saj se pri takšni smeri izkopa glede na diskontinuitete večina deformacij zgodi za čelom predora in jih lahko nadzorujemo s togim podporjem. Če bi potekal izkop iz druge smeri, bi se večina deformacij zgodila pred čelom predora, kjer jih ne moremo učinkovito nadzorovati, in bi gradnja predora tako neizogibno močno vplivala na objekte v vplivnem območju nad predorom.



Slika 13 • Vpliv togosti podporja in višine nadkritja na pomik točke na površini v primeru anizotropne hribinske mase (usmerjenost diskontinuitet 0° , vpadni kot 45° , $E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $0,25 G$)

– Če bi gradnja predora v zgoraj opisanih hribinskih razmerah potekala pod visokim nadkritjem in/ali neposeljenim območjem, bi bilo z vidika racionalnosti gradnje bolj ugodno graditi predor z vpadom plasti v čelo predora, saj se v tem primeru večina deformacij izvrši pred čelom predora. Potrebna velikost nadprofila bi bila tako manjša, manjša bi bila tudi obremenitev primarnega podporja, kar bi se odrazilo v ekonomičnosti gradnje.

Da bi ti dve hipotezi preverili, smo opravili serijo numeričnih izračunov, pri katerih smo za usmerjenost diskontinuitet 0° ter vpadni kot 45° pri izkopu s plastmi in proti plastem variirali višino nadkritja (25 m, 50 m in 100 m) ter togost podporja (osnovna togost volumskih elementov, s katerimi smo modelirali podporje predora, je znašala 8 GPa, povečana togost pa je bila desetkratna – 80 GPa). Opazovali smo točko na zgornji površini in sredini modela (da smo zajeli vse vplive, so bili modeli pri različnih nadkritjih različnih dolžin).

Rezultati na sliki 13 so prikazani za najvišjo obravnavano stopnjo anizotropije ($E_1 : E_2 = 4 : 1$ in $0,25 G$). Pri nizkem, 25 m nadkritju nad predorom se pri osnovni togosti podporja pomika površine pri izkopu s plastmi (oranžna krivulja) oziroma proti plastem (svetlo zelena krivulja) ne razlikujeta drastično, razlika znaša 20 odstotkov. Pri povečani (desetkratni) togosti podporja pa je razlika med pomikoma drastična: pomik površine v primeru izkopa s plastmi je 2,5-krat večji kot pomik površine pri izkopu proti plastem v istem materialu!

Povsem drugačna je zgodba pri visokem, 100 m nadkritju. Končni pomik površine je enak za obe obravnavani togosti podporja in neodvisen od smeri izkopa glede na vpad diskontinuitet. Razlikuje se le potek krivulj, ki je neodvisen od togosti podporja (napetosti na nivoju predora se že precejšnje in podporje v takem primeru ne služi omejitvi pomikov). Pri izkopu s plastmi se večina deformacij zgodi pred čelom predora, zato se to tudi hitreje odrazi na površini, medtem ko se pri izkopu proti plastem večina deformacij izvrši po izkopu predora, se pa te deformacije prav tako v celoti prenesejo na površino.

4.2 Vpliv orientacije anizotropije na pričakovano oziroma normalno orientacijo vektorja pomikov

V drugem delu raziskave smo ugotavljali pričakovano oziroma normalno orientacijo vektorja pomikov zaradi različnih usmerjenosti diskontinuitet glede na os predora. Obravna-

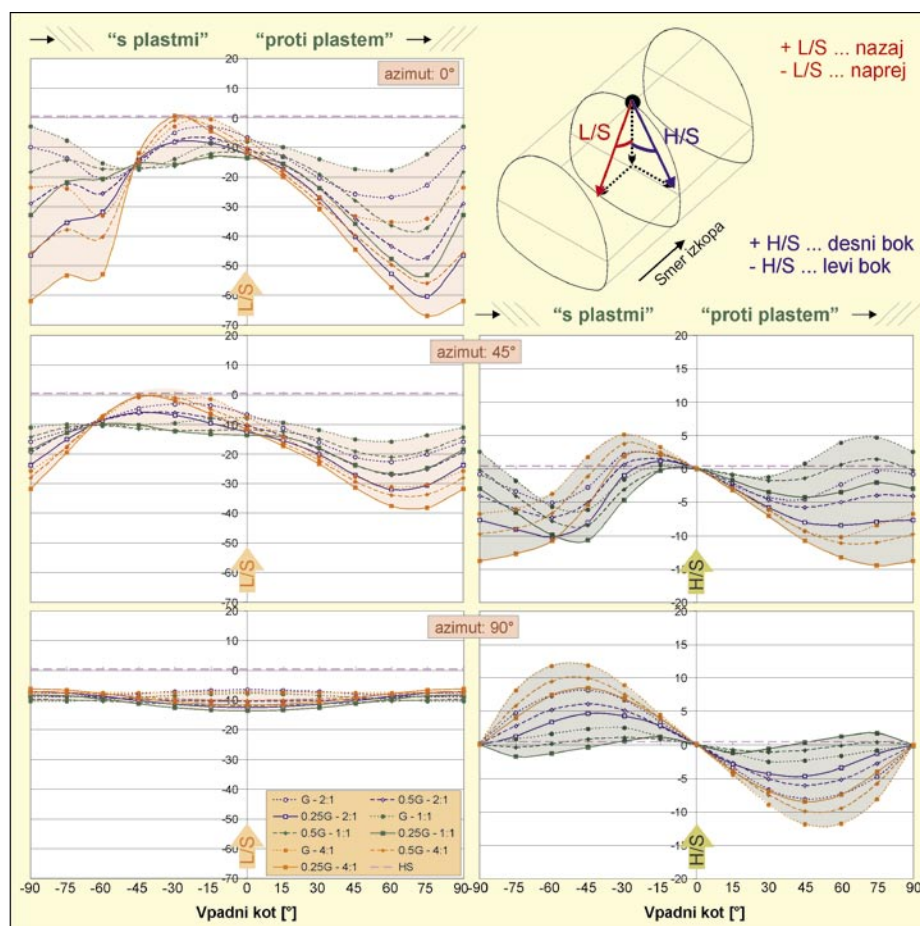
vali smo tri točke, kot je to prikazano na sliki 6: temensko točko ter levo in desno bočno točko, ki sta bili na osi modeliranega krožnega predora. Za določitev normalne orientacije vektorja pomikov in lažji prikaz rezultatov smo vektor pomikov opisali z dvema kotoma:

- L/S je kot med longitudinalno in vertikalno komponento vektorja pomikov posamezne točke (pozitiven kot je v smeri izkopanega prostora oziroma »nazaj«),
- H/S je kot med horizontalno in vertikalno komponento vektorja pomikov posamezne točke (pozitiven kot je v smeri desnega boka kot je prikazano tudi na sliki 14).

Na levi strani slike 14 je prikazan kot L/S vektorja pomikov stropne točke za vse tri usmerjenosti 0°, na desni strani pa kot H/S vektorja pomikov za usmerjenosti 45° in 90° (za 0° je kot H/S enak 0° za vse vpadne kote in variacije togosti). Krivulje povezujejo kote pri enaki kombinaciji togosti za različne vpadne kote, in sicer za pomike izkopanega prostora (pomiki pred čelom niso upoštevani). Pri usmerjenosti 0° lahko kot L/S vektorja pomikov pri največji stopnji anizotropije znaša skoraj 70° v smer nadaljnjega izkopa za strme vpadne kote pri izkopu s plastmi in proti plastem, kar se da razložiti z večjo deformabilnostjo hribine pravokotno na smer diskontinuitet; tudi raztros rezultatov glede na stopnjo anizotropije je v primeru strmih vpadnih kotov velik. Za referenco služi izračun z izotropnim modelom Hardening soil, pri katerem kot L/S znaša 13° in je orientiran v izkopani prostor.

Presenetljivo je, da je pri izkopu s plastmi (razen pri blagih naklonskih kotih ter razmerju $E_1 : E_2 = 4 : 1$) vektor pomikov izkopanega prostora orientiran v smer nadaljnjega izkopa, glede na to, da je pričakovana orientacija vektorja pomikov vsaj približno pravokotno na smer vpada diskontinuitet. Če izrišemo potek vzdolžnih pomikov stropne točke v odvisnosti od stacionaže za primer izkopa s plastmi in proti plastem za usmerjenost 0° in vpadni kot 45° (slika 15), je smer končnega celotnega vzdolžnega pomika točke (pomik pred čelom + pomik izkopanega prostora) pričakovana: naprej za izkop proti plastem in nazaj za izkop s plastmi oziroma pravokotno na smer diskontinuitet. Če pa gledamo samo vektorja pomika izkopanega prostora, oba kažeta naprej.

V oči zbode enak odziv hribinske mase v enem in drugem primeru. Najprej je vektor pomikov orientiran nazaj, tik pred izkopom merskega profila pa se orientacija v obeh primerih spremeni in vektor pomikov kaže naprej, v smer nadaljnjega izkopa. Obnašanje



Slika 14 • Vpliv anizotropije hribinske mase na normalno orientacijo vektorja pomikov stropne točke; izris kotov L/S in H/S za različne usmerjenosti in vpadne kote diskontinuitet ter kombinacije togosti

lahko razložimo z ugotovitvami, pridobljenimi pri analizi merskih podatkov v predoru Trojan (slika 5), in dejstvom, da je anizotropna hribinska masa bolj deformabilna v smeri pravokotno na ravnine anizotropije.

Pri izkopu s plastmi se večji del pomikov izvrši pred čelom predora, in sicer pravokotno na smer diskontinuitet, kar pomeni, da je vektor pomikov orientiran v izkopani prostor. Po izkopu in podgradnji s podporjem se izvrši le še preostanek deformacij. Tedaj prevladujejo strižne deformacije vzdolž ploskev anizotropije (zmanjšanje normalnih napetosti povzroči padec trenja med ploskvami), zato je vektor pomikov izkopanega prostora usmerjen naprej.

Podobno lahko razložimo obnašanje pri izkopu proti plastem. V tem primeru se večina deformacij zgodi v izkopanem prostoru. Pri približevanju opazovanemu profilu je obremenitev hribinske mase pred čelom relativno majhna in hribina se lahko deformira le preko strižnih deformacij vzdolž ploskev anizotropije, zato je vektor pomikov orientiran nazaj. Ko pa se čelo čisto

približa opazovanemu profilu, se obremenitev na tem območju močno poveča in hribina se začne deformirati pravokotno na ploskve anizotropije, zato vektor pomikov kaže naprej.

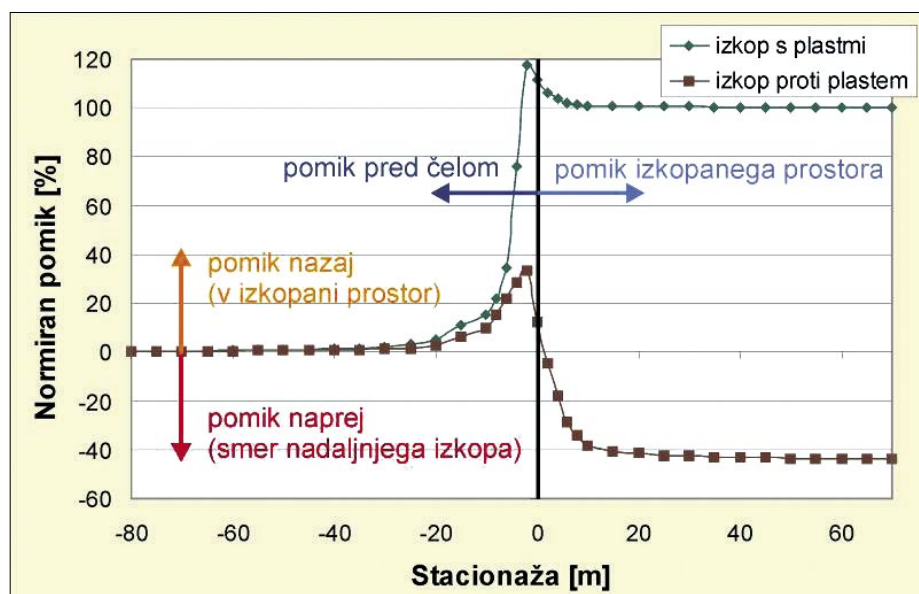
S tem vedenjem lahko sedaj interpretiramo še smer prečnih pomikov stropne točke in pripadajočega kota H/S na sliki 14. Smer pomikov se glede na usmerjenost diskontinuitet spreminja. Pri izkopu s plastmi so razen za strme vpadne kote pri razmerju elastičnih modulov $E_1 : E_2 = 1 : 1$, kjer pride do strižnih deformacij med ploskvami anizotropije, deformacije pravokotne na vpad plasti in vektor pomikov kaže proti levemu boku. Pri izkopu s plastmi z blagimi vpadnimi koti prevladujejo deformacije normalno na vpad diskontinuitet; vektor pomikov je orientiran proti desnemu boku. Pri izkopu s plastmi s strmimi vpadnimi koti se lahko hribina deformira samo strižno vzdolž diskontinuitet, zato vektor pomikov kaže proti levemu boku. Smer deformacij pri vpadnem kotu 30° in izkopu s plastmi je izrazito odvisna od stopnje anizotropije, predvsem razmerja elastičnih modulov E_1 in E_2 . Pri razmerju

$E_1 : E_2 = 1 : 1$ je vektor pomikov stropne točke usmerjen proti levemu boku, pri razmerju $E_1 : E_2 = 4 : 1$ pa proti desnemu boku.

4.2.1 Primerjava merjenih in računskih odzivov

Izračunane orientacije vektorja pomikov za stropno točko in obe bočni točki glede na relativno usmerjenost diskontinuitet na os predora smo nato primerjali z merjenimi vrednostmi. Predor Trojane se je zaradi mestoma kaotične strukture in posledično precej neenakomernim oziroma neenotnim vpadom diskontinuitet izkazal za le omejeno uporabnega za tako primerjavo. Kar se vпада diskontinuitet tiče, je bila precej bolj enotna struktura zaznana na delu predora Jasovnik, kjer je izkop potekal v psevdoziljskih skladih meljevcev in glinovcev. Pri primerjavi merjenih in računskih odzivov smo predvsem za obe bočni točki naleteli na težavo. Stropna točka v predoru je bila nekje v temenu, premaknjena morebiti za kak meter po konturi predora od vertikalne osi prereza. Normala na konturo za realno stropno točko lahko tako za nekaj stopinj odstopa od vertikale, kar je normala na konturo v primeru računске točke (slika 16). Merski bočni točki 2 in 3 sta pomaknjeni po konturi navzgor proti stropu predora in je zato normala na konturo v območju realnega položaja bočnih točk za 15° do 30° zamaknjena glede na horizontalo, kar je normala na konturo v primeru računskih bočnih točk. Rezultati za računsko stropno točko naj bi bili tako primerljivi rezultatom merske točke, medtem ko naj bi računski bočni točki izkazovali nekaj večja kota L/S in H/S za usmerjenost 45° in večji kot H/S pri približno enakem kotu L/S za usmerjenost 0° kot merski bočni točki.

V naslednjem koraku smo nato želeli na podlagi realnega položaja točke določiti normalno orientacijo vektorja pomikov z interpolacijo polja pomikov vseh treh izračunanih točk. Tako bi lahko za znan položaj točke podali pričakovano orientacijo vektorja pomikov, določeno s kotoma L/S in H/S. Glede na to, da je v primeru hidrostatskega napetostnega stanja pomik točke pravokoten na konturo predora, je bila normalizacija smeri vektorja glede na pravokotnico na konturo smiselna predpostavka. Da bi preverili to predpostavko, smo za izbrane smeri in kombinacijo togosti $E_1 : E_2 = 2 : 1$ in $0,5 G$ ponovno opravili izračune za večje število računskih točk po obodu, katerih pravokotnica na krožno konturo se je spreminjala s korakom 15° od horizontale desnega boka do horizontale levega boka. Rezultati za kot L/S so prikazani na sliki 17.



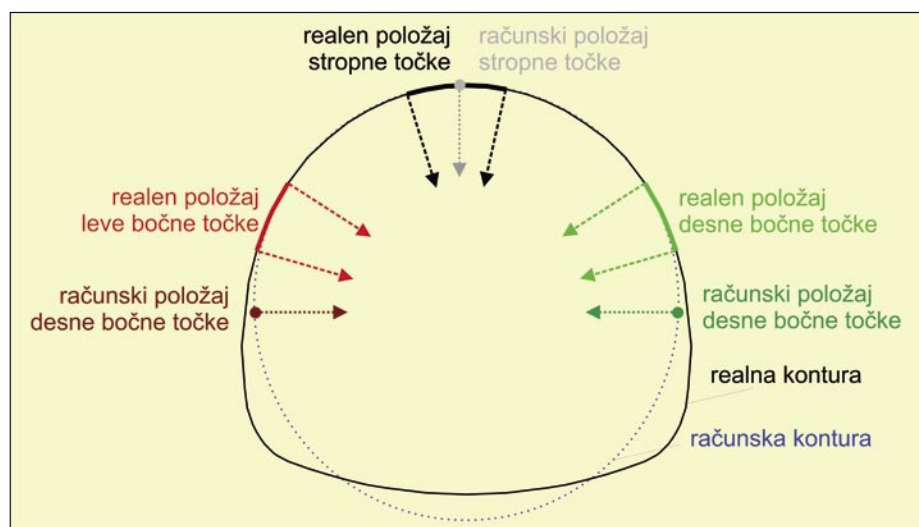
Slika 15 • Vzdolžni pomiki pri izkopu s plastmi in proti plastem v vpadnim kotom 45° in usmerjenostjo diskontinuitet 0° ter kombinacijo togosti $E_1 : E_2 = 2 : 1$ in $0,5 G$

Referenčni vrednosti kota L/S sta bili izračunani z izotropnimi konstitutivnimi modeli Hardening soil (HS) in Mohr-Coulomb (MC). V primeru izračuna z Mohr-Coulombom je rezultat premica, kar pomeni, da se kot L/S linearno spreminja za različne naklone pravokotnic na konturo. Podoben rezultat dobimo tudi s konstitutivnim modelom Hardening soil, le da na bokih odnos ni več linearen. Na drugi strani se velikost kota L/S glede na normalo na konturo spreminja nelinearno s precej velikim raztrosom rezultatov in s tem onemogoča določitev pričakovane smeri vektorja pomikov za poljubno točko.

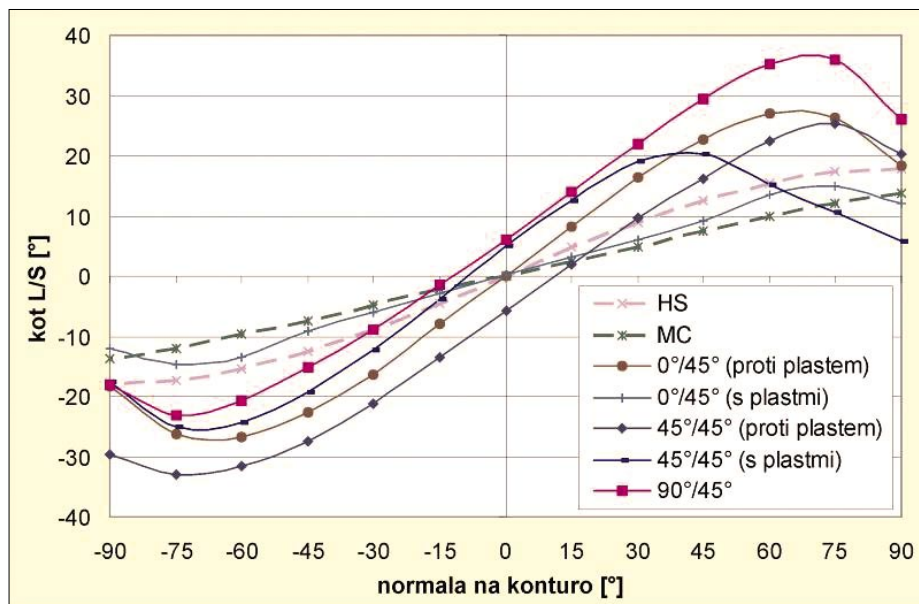
Na srečo se normala stropne točke za realne položaje zaradi majhne ukrivljenosti

konture na stropu predora ne spreminja več kot za nekaj stopinj, tako da vsaj za stropno točko lahko računski rezultat vzamemo kot primeren. Za preostale točke ne moremo podati splošnega obrazca za smer vektorja pomikov. Vseeno pa lahko za realen položaj bočnih točk kalote (nekje med 15° in 30° od horizontale oziroma 60° in 75° na grafu zgoraj) opazimo, da imajo krivulje na tem območju lokalne minimume oziroma maksimume s približno enakimi vrednostmi kota L/S na robovih intervala. Numerične izračune bi torej morali ponoviti za računске točke na teh položajih.

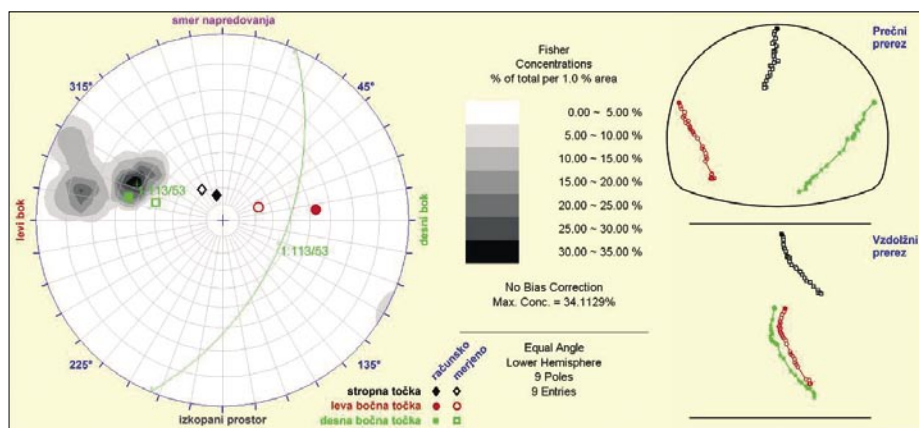
Upoštevaše zgornje ugotovitve, lahko sedaj interpretiramo primerjavo merskih in računskih



Slika 16 • Položaj merskih in računskih točk



Slika 17 • Računska velikost kota L/S glede na smer pravokotnice na konturo predora

Slika 18 • Primerjava računskih (kombinacija togosti $E_1 : E_2 = 1 : 1$ in $0,25 G$) in izmerjenih orientacij vektorja pomikov v stereografski projekciji ter vektorji pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu; merski profil MS31 na stacionaži km 76 + 599 v desni (severni) cevi predora Jasovnik

5 • SKLEP

Pri analizi predorov v mehkih, anizotropnih hribinskih masah smo opazili nekatere karakteristične deformacijske vzorce, ki se jih je dalo razložiti z relativno usmerjenostjo diskontinuitet (ploskev anizotropije) hribinske mase glede na os predora: veliki pomiki pred čelom predora, razlika v smeri deformacij pri različnih nivojih obremenitev in različna velikost pomikov izkopanega prostora v istem materialu, le pri različni smeri izkopa. Skupni imenovalec vsem zgornjim pojavom je večja deformabilnost hribinske mase

v smeri pravokotno na ploskve anizotropije in manjša deformabilnost v smeri ploskev anizotropije. Pri velikih spremembah napetostnega stanja prevladujejo deformacije normalno na ploskve anizotropije, pri majhnih spremembah napetostnih stanj pa se normalne deformacije toliko zmanjšajo, da pridejo do izraza strižne deformacije med ploskvami anizotropije. Do aktivacije strižne deformabilnosti vzdolž ploskev anizotropije pride, ko se obremenitev pravokotno na ploskve anizotropije zmanjša.

orientacij vektorja pomikov za merski profil MS31 iz desne cevi predora Jasovnik – vektorji pomikov so prikazani s stereografsko projekcijo s podloženim izrisom prevladujoče orientacije diskontinuitet na sliki 18. Na desni strani slike so izrisani še vektorji pomikov v prečnem in vzdolžnem prerezu.

Na območju prikazanega merskega profila prevladujejo diskontinuitete z usmerjenostjo 113° (proti desnemu boku in nazaj) in vpadnim kotom 53° – izkop se je torej vršil proti plastem. Na podlagi primerjav izmerjenih in izračunanih smeri vektorjev pomikov treh točk vzdolž daljšega odseka v obeh ceveh smo kot najboljšo kombinacijo togosti za predor Jasovnik določili $E_1 : E_2 = 1 : 1$ in $0,25 G$. Kota L/S in H/S za prevladujočo orientacijo diskontinuitet smo dobili z linearno interpolacijo med ustreznimi vrednostmi s slike 14. Upoštevati moramo tudi, da geološka struktura ni čisto enotna; nekaj podatkov imamo tudi o blažjih vpadnih kotih pri skorajda isti usmeritvi – v tem primeru je kot H/S manjši (slika 14).

Za stropno točko je rezultat pričakovan, odstopanje med izračunanim in izmerjenim vektorjem pomikov je minimalno glede kota L/S in nekaj večje glede kota H/S. Dejstvo je, da je prikazan vpad plasti manj problematičen glede orientacije vektorja pomikov v vzdolžni smeri, saj je blizu usmerjenosti 90° , pri kateri kot L/S s spreminjanjem vpadnega kota le malo variira, zato pa toliko bolj variira kot H/S (slika 14). Prav opažena večja variacija kota H/S glede na vpadni kot in zgoraj opisana razlika med položaji merskih bočnih točk v predoru in računskih bočnih točk vodi k večjim razlikam med merjenimi in računskimi koti H/S za obe bočni točki. Kot L/S je le minimalno odvisen od vpadnega kota, zato je njegova računaska velikost za obe bočni točki primerljiva z merskimi vrednostmi.

Za kvantifikacijo opaženih pojavov smo na podlagi množice 3D-numeričnih analiz z variacijami togosti in orientacije diskontinuitet določili velikost pomika pred čelom in pričakovano usmerjenost vektorja pomikov stropne točke. Ugotovili smo, da je lahko pomik izkopanega prostora pri izkopu predora z vpadom plasti v izkopani prostor za hribino z močno izraženo anizotropijo nekajkrat večji od pomika pri izkopu z vpadom plasti v smer nadaljnjega izkopa. In to v istem materialu, le smer izkopa je nasprotna! Pri izkopu s plastmi se večina deformacij namreč zgodi pred čelom predora, pri izkopu proti plastem pa v izkopenem prostoru.

Zgornja opažanja in dodatne numerične analize glede togosti podporja in višine nadkritja lahko strnemo v naslednji dve ugotovitvi:

1. Če je predviden predor z nizkim nadkritjem pod naseljenim območjem, bi bilo bolj ugodno izkop predora vršiti z vpadom plasti v izkopani prostor. Tako bi se večina deformacij izvršila v izkopanem predoru, na njihovo velikost bi lahko vplivali s togim podporjem. Vpliv na površino bi bil mnogo

manjši, kot če bi izkop vršili v nasprotni smeri.

2. V kateremkoli drugem slučaju (predor z nizkim nadkritjem pod nenaseljenim območjem in stabilnimi brežinami nad predorom ali pri izkopu predora pod visokim nadkritjem) bi bilo bolj ugodno izkop vršiti z vpadom plasti v smer nadaljnega izkopa. Večina deformacij bi se tako izvršila pred čelom predora, volumen nadprofila bi bil

ustrezno manjši, podporje pa bi bilo manj obremenjeno. Pod visokim nadkritjem bi bili pomiki površine enaki, ne glede na smer izkopa ali togost podporja.

Pridobljena in v prispevku prikazana znanja vodijo v bolj ekonomično gradnjo predorov v zahtevnih razmerah anizotropnih mehkih hribin, predvsem pa v zmanjšanje vplivov izkopa predora na površinsko infrastrukturo.

6 • LITERATURA

- Barlow, J. P., *Interpretation of tunnel convergence measurements*, Magistrska naloga, Department of Civil Engineering, The University of Alberta: Edmonton, Alberta, 1986.
- Guenot, A., Panet, M., Sulem, J., A New Aspect in Tunnel Closure Interpretation, In *Proc. 26th US Symposium on Rock Mechanics*, Rapid City, USA, 1985; pp. 445–460, 1985.
- Klopčič, J., Analyses and prediction of displacements for tunnels in foliated rock mass of Perm-Carboniferous age, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 235 p., 2009.
- Peck, R. B., State of the Art Volume: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, In *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Mexico, pp. 225–290, 1969.
- Rabcewicz, L., *The New Austrian Tunneling Method*. Water Power, part 1, 1964, pp. 511–515; Water Power, Part 2, 1965, pp. 19–24, 1964.
- Schubert, W., Erfahrungen bei der Durchörterung einer Großstörung beim Inntaltunnel. Felsbau, 1993, 6, 443–447, 1993.
- Schubert, W., Budil, A., The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation, In *Proceedings of 8th International Congress on Rock Mechanics*, Fujii, T. (ed.), Tokyo, Japan, 1411–1414. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.
- Sellner, P. J., *Prediction of displacements in tunneling*, Doktorska disertacija, Technische Universität Graz, Graz, Austria, 2000.
- Solak, T., Ground behaviour evaluation for tunnels in blocky rock masses, *Tunn. undergr. space technol.*, 24, 323–330, 2009.
- Steindorfer, A., Short Term Prediction of Rock Mass Behaviour in Tunneling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data, Doktorska disertacija, Technische Universität Graz, Graz, Austria, 1998.
- Tonon, F., Amadei, B., Stresses in anisotropic rock masses: an engineering perspective building on geological knowledge, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 1099–1120, 2003.
- Wittke, W., *Rock mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.