

Vojkan JOVIČIĆ

doc.dr. univ.dipl.inž.grad., IRGO Inštitut za Rudarstvo, Geotehnologijo in Okolje

Jakob LIKAR

prof.dr. univ.dipl.inž.rud., Naravoslovnotehniška Fakulteta, Univerza v Ljubljani

Jakob ŠUŠTERŠIČ

dr. univ.dipl.inž.grad, IRMA – Inštitut za raziskovanje materialov in aplikacijo

POSPEŠENA GRADNJA PREDORA DEKANI

POVZETEK: Odsek avtoceste Klanec – Sermin poteka po hribovitem območju, ki ga v pretežni meri sestavljajo trdni in delno tektonsko poškodovani apnenci, dolomiti in fliši. Predor Dekani, je dvocevni cestni predor dolg 2150m, ki poteka v celoti v tektonsko poškodovanih flišnih kamninah. Te sestavljajo plasti laporjev in peščenjakov, debeline od nekaj centimetrov do več metrov, ki so na določenih mestih močnejše prelomljene in zdrobljene, tako da so samonosilne sposobnosti v precejšnji meri zmanjšane. Gradnja predora je potekala intenzivno po principih NATM v štirih napadalnih točkah iz vzhoda in zahoda tako, da je bil izkopni profil deljen na kaloto, stopnico in talni obok. V času izvajanja del je bilo narejeno 60m dolgo raziskovalno polje z namenom, da se ugotovi do katere spodnje meje mehanskih lastnosti kamnine je mogoče uporabiti mikroarmirani brizgani beton kot osnovni material za lupino primarne podgradnje. Na ta način se lahko izognemo uporabi jeklenih segmentov in armaturnih mrež. Uporaba mikroarmiranega betona se je pokazala kot ustrezna za tovrstne kamnine in naslednjih 400m predora je bilo izdelano s pospešeno dinamiko, z znatnim zmanjšanjem stroškov zaradi porabe časa in materiala. Izvajalec je dosegel napredke v izkopu in primarnem podpiranju tudi do 7m na dan in je končal izkop leve cevi 4 mesece pred rokom. Rezultati jasno kažejo, da je načrtovanje, ki se prilagaja dejanskim geomehanskim pogojem pri izkopu predora učinkovito, ob tem da je izvajalec del dosegal vseskozi predpisano kakovost del.

RAPID CONSTRUCTION OF DEKANI TUNNEL

SUMMARY: The section of the motorway Klanec –Sermin runs through the hills, which are predominantly made of limestone, dolomite and flish. In its full 2150m length, the twin tunnel Dekani runs through the tectonically reworked flish, which is made of the intermittent layers of sandstone and clay stone. The flish is frequently exposed as turbidite, with layers only few centimetres thick but also appears in layers up to several meters thick. As a rule, the whole geological sequence is tectonically reworked featuring faults and discontinuities, which lower the self-bearing of the strata. The construction of the tunnel was carried out using the principles of the NATM method, on four attacking points, with the excavation profile divided into the top, the bench and the invert. The 60m long research section of the tunnel was initiated during the construction. The aim was to investigate the lower boundary of the mechanical characteristics of the rock, for which the micro fibre concrete can be used as the only material for the primary lining thus avoiding use of steel arches and reinforcement meshes. The micro fibre concrete was proved to be efficient solution and the further 400m of the tunnel was constructed more rapidly bringing remarkable savings in the use of time and material. The contractor was making a progress in the excavation and primary support in average 7m/day and managed to finish the left tube of the tunnel 4 months in advance. This shows that active design that takes into account the current geotechnical conditions encountered during the construction of the tunnel can be efficient while not compromising the specified quality of the works.

UVOD

Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport financira aplikativno raziskovalno nalogo z naslovom: Izboljšanje primarne podgradnje predorov v slabo nosilnih kamninah z uporabo mikroarmiranega brizganega betona. Nalogo sofinancira SCT, d.d. Nosilec raziskovalne naloge je IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje, Ljubljane, sodeluje pa IRMA – Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije d.o.o., Ljubljana.

Cilj raziskovalne naloge je bil odgovoriti na vprašanje, ali obstaja realna možnost široke uporabe mikroarmiranega brizganega betona, v nadaljevanju MABB, v zahtevnih geotehničnih pogojih. Do zdaj je bil MABB uporabljen v hribinskih kategorijah A2 in delno v B1 (klasifikacija ONORM B 2203). Cilj naloge je, da se do sedaj dosežena meja uporabnosti zniža na hribinsko kategorijo B2. Za namen raziskovanja je izbran dvocevni predor Dekani, ki se nahaja na AC Klanec-Srmin, dolžine 2150m. Predor Dekani je prvi predor večjega premera v Sloveniji, ki je v celoti narejen v flišni geološki zgradbi. Zahodni usek predora Dekani v flišno skalo je prikazan na sliki 1.



Slika 1. Začasni portal na zahodni strani predora Dekani

V okviru raziskovalne naloge je bilo narejeno 60m dolgo raziskovalno polje z namenom, da se ugotovi do katere spodnje meje mehanskih lastnosti kamnine je mogoče uporabiti mikroarmirani brizgani beton kot osnovni material za lupino primarne podgradnje. Cilj je bil poenostaviti tehnologijo primarne podgradnje predora in na ta način pospešiti izkop predora ob istočasni pocenitvi gradnje.

GEOLOŠKI POGOJI

Za geološko zgradbo fliša v območju predora Dekani so značilne tektonske enote, ki potekajo v smeri severozahod-jugovzhod. Fliš je ime, ki ga uporabljamo za več kamnin, ki nastopajo skupaj in so nastale pod posebnimi pogoji v določenem okolju. Fliš je dobil ime po nemškem glagolu *fliessen*, kar

pomeni teči, zato ga lahko imenujemo "tekoča" kamnina. Dekanski fliš je iz časa paleogena, starosti okoli 35 do 60 milijon let. Specifično strukturo fliša pripišemo posebnemu načinu nastanka tovrstnih kamnin. Fliš je nastal z odlaganjem usedlin v globlje morje s celinske police. Pri tem so nastali podvodni plazovi in kalni tokovi, iz katerih so se na celinskem pobočju odložile flišu podobne kamnine. To je podalo flišu posebno strukturo, ki je bila nato podvržena še tektonskim vplivom. Gubanje flišnih plasti na območju predora Dekani je posledica intenzivne tektonike oz. narivanja paleogenih apnencev na eocenske flišne plasti.

Fliš sestavljajo konglomerati ali breče, peščenjaki in laporji. Plasti so se usedale po določenem zaporedju, ki je posledica zmanjšanja energije v podvodnem kalnem toku. V preseku fliša opazimo tipično turbiditno zaporedje: na dnu je konglomerat ali breča, sledi peščenjak in nad njim lapor.



Slika 2. Menjavanje plasti peščenjaka in laporja v karakteristični strukturi dekanskega fliša

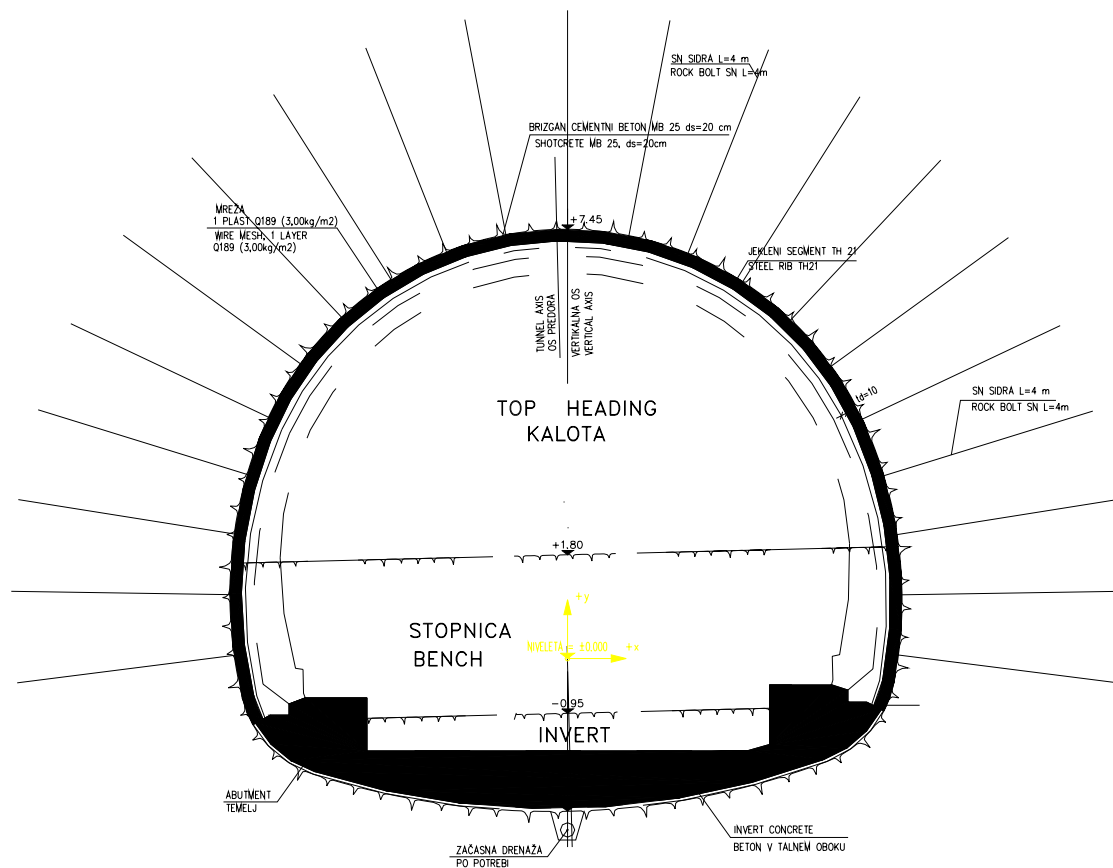
V dekanskem flišu dominirajo plasti sivega laporja in peščenjaka. V petrografskem smislu je lapor meljevec z 20 do 40% kalcita. Kremen je v kamninski masi zastopan s 18 - 23%. Preostanek predstavljajo glineni minerali zmesne strukture illit/montmorilonit, in klorit. Lapor nastopa v plasteh debeline nekaj mm do 10 ali 20 cm. Značilnost laporja je da pod vplivom spremembe vlažnosti hitro razpade. To pomeni, da v notranjosti kamninske mase, kjer je naravna vlaga konstantna delujejo stalne notranje sile sukcije, ki mu učinkovito zvišajo trdnost. Te sile hitro vpadejo zaradi spremembe vlažnosti v kontaktu z atmosfero, do katere prihaja pri izkopu predora. Mehčanje laporja zaradi vpada sukcije je potrebno v smislu stabilnosti, upoštevati tudi dolgoročno, zaradi spremembe režima vlažnosti okoli predorske cevi.

V dekanskem flišu so peščenjaki drobno in grobo zrnati. V petrografskem smislu peščenjak opredelimo kot glinenčevo - kremenovo - kalcitni peščenjak z granulacijsko sestavo meljevca, drobnozrnatega peščenjaka in grobnozrnatega peščenjaka. Med zrnji prevladujejo kremen in glinenci. Vezivo peščenjaka je apneno, kar mu daje veliko trdnost. Plasti peščenjaka so lahko debele od 1 cm do 2 m. V zaporedju z laporjem plasti peščenjaka prevzamejo glavnino napetostnih vplivov.

V strukturi dekanskega fliša dominirajo diskontinuitete in gube. Prvi tip diskontinuitet, pogojenih z prej opisano genezo, predstavljajo ploskve plastovitosti, ki nastopajo v medsebojni razdalji med nekaj mm do 1m. Pravokotno na plastovitost se pojavljata še dva sistema dikontinuitet, ki medsebojno oklepata kot 75° do 90°. Medsebojna oddaljenost teh razpok je približno 20 - 80 cm za prvi sistem in 50 do 180 cm za drugi sistem.

Predstavljeno kompleksno geološko sliko, ki jo je narekovala razgibana flišna struktura, lahko ocenimo kot neugodno za izvajanje izkopa predora. Dotoki medrazpoklinske vode, ki so bili redno prisotni v območju nizkega nadkritja, so dodatno oteževali dela v predoru.

Za območje raziskovalnega polja je bila izbrana relativno ugodna geološka zgradba v hribinski kategoriji B2. V geološki zgradbi so prevladovale plasti peščenjaka od 20cm do 1.0m debeline. V medplasteh so se nahajali glinovci in meljevci, katerih debelina je znašala do 5cm. Kamnina tektonsko ni bila močno poškodovana, zaprte in zmerno hrapave razpoke so bile usmerjene pravokotno na plastovitost. Z napredovanjem izkopa so se vrednosti koeficientov RMR na območju raziskovalnega polja dvignile s 50 na okoli 70 in se kategorizacija hribine spremenila iz B2 v B1. Zaradi tega je bilo raziskovalno polje samo delno uspešno zasnovano, ker je bilo prvotno načrtovano, da se v celoti nahaja v hribinski kategoriji B2.



Slika 3. Načrtovani podporni ukrepi v hribinski kategoriji B2

PODPORNI UKREPI IN OPAZOVANJE V RAZISKOVALNEM POLJU

Podporni ukrepi v primarni podgradnji za hribinsko kategorijo B2 s talnim obokom so predstavljeni na sliki 3. Primarna obloga brizganega betona MB25 debeline 20cm je bila enojno armirana z armaturno mrežo Q189. Uporabljeni so bili TH21 jekleni segmenti in SN sidra $\Phi 28\text{mm}$, z nazivno nosilnostjo 250kN v razporedu, ki je prikazan na sliki 3.

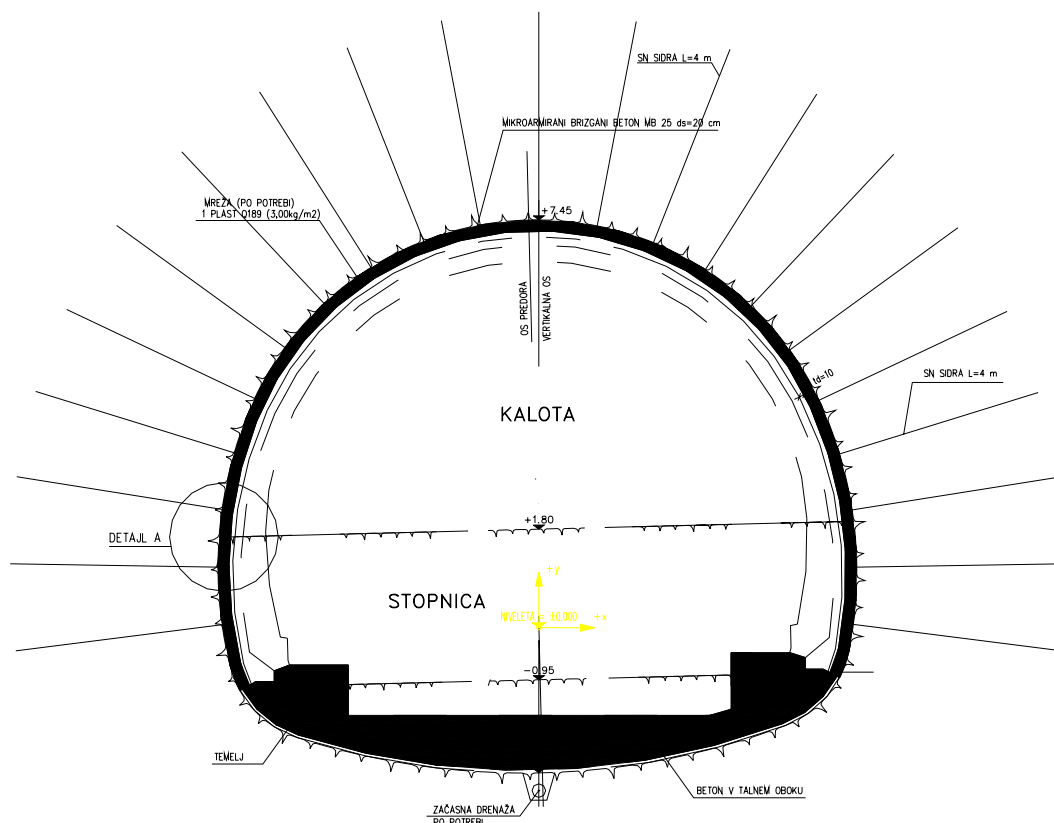
Podporni ukrepi v primarni podgradi, ki so bili uporabljeni v raziskovalnem polju pa so prikazani na sliki 4. Primarna obloga je bila narejene izključno iz MABB, marke MB25 debeline 20cm. Uporabljena so bila SN sidra $\Phi 28\text{mm}$ v razporedu, ki je bil enak kot v v primarni podgradi za hribinsko kategorijo B2.

Namen uporabe MABB je bilo nadomestiti armaturno mrežo in jeklene segmente, in sicer na ta način da mikroarmatura prevzame začetne natezne napetosti in s pospešeno duktilnostjo prepreči pojav mikro razpok. Vloga jeklenih segmentov je delno prevzeta s pospešenim strjevanjem MABB-a, ki je hitro dosegel nosilno tlačno trdnost.

Mikroarmirani brizgani beton z jeklenimi in polipropilenskimi vlakni (skrajšano: MABB-JPV) se je pripravljala po mokrem postopku. Vsi postopki priprave, transporta in vgrajevanja so bili podobni postopkom, ki se uporabljajo za brizgani beton brez vlaken. Osnovni sveži beton (brez pospešila) se je pripravljala na obstoječi betonarni v Dekanih in se je do gradbišča transportiral z agitatorji, kjer se je dodajala predpisana količina pospešila.

Za MABB-JPV so se uporabljale naslednje vrste osnovnih materialov:

- cement (CEM II/A-S 42,5 R Anhovo)
- plastifikator MAPEFLUID X 404
- pospešilo MAPEQUICK AF 1000
- jeklena vlakna JV40/16, dolžine 16mm premera 0.40mm – 0,4% vol
- polipropilenska vlakna PV10, dolžine 10mm - 0,05% vol.
- zamesna voda na suhi agregat
- frakcija agregata 0/1 mm, 0/4 mm in 4/8 mm



Slika 4. Podporni ukrepi uporabljeni v raziskovalnem polju

V raziskovalnem polju je bila postavljena merska oprema, ki je zajela konvergenčni merski profil, geotehnična merska sidra, ekstenzometre in napetostne celice. Za kontrolo deformacij okolne hribine okrog predorske cevi so bili uporabljeni normalni elektronski tahimetri (distometri). Konvergenčne merske točke so bile opremljene z optičnimi prizmami. V območju raziskovalnega polja so bili postavljeni konvergenčni merski profili na vsakih 10m. Merska sidra so bila izdelana iz rebrastih jeklenih palic z nosilnostjo $1550/1570 \text{ N/mm}^2$. Merski uporni lističi, ki so pritrjeni na jeklene palice diametralno v dveh smereh, so omogočali ugotavljanje osne sile v sidru in tudi raznos osnih sil v sidru.

Meritve z večtočkovnim ekstenzometrom so bile namenjene ugotavljanju premikov in sprememb napetosti po globini hribine okrog predorske cevi vključno s plastifikacijo, lezenjem in relaksacijo materiala. V geotehnični merski profil so bili vgrajeni ekstenzometri na globinah: 3m, 6m in 9m, na treh višinah v levem in desnem boku cevi. Za merjenje deformacij in porazdelitve napetosti v oblogi predora sta bila

predvidena dva sestava. Prvi za določanje napetosti med hribino in oblogo iz brizganega betona v radialni smeri (celice za merjenje napetosti), drugi pa za merjenje napetosti v oblogi iz brizganega betona v tangencialni smeri. V profilu je bilo vgrajenih 7 radialnih in 7 tangencialnih celic po obodu predora.

Rezultati meritev so splošno pokazali zelo umirjene pogoje. Vertikalni pomiki v prvih dveh tednih niso presegali 10mm, horizontalni pomiki pa so pravtako znašali cca. 10mm. Odziv kamnine na izkop je bil enakomeren. Rezultati meritev so tudi kazali na relativno nizko obremenitev sider. Tipične izmerjene sile niso prenašale več kot 50kN, kar je približno 20% od maksimalne predpisane nosilnosti sider. Globina mobilizacije sider znaša okoli 5m. Raznos sile po globini sidra je bil enakomeren, prav tako je mobilizacija sider po obodu izkopa enakomerna. Maksimalna mobilizirana sila ki znaša 70kN (28% mobilizacije) je izmerjena v sidru vgrajenem v levem boku stopnice. V nadaljevanju meritev v naslednjih štirih mesecih ni prišlo do značilne spremembe pomikov ali mobiliziranih sil.

Rezultati merjenja z ekstenzometrom so pokazali, da so pomiki na globinah večjih od 3m zanemarljivi. Izjema je bil desni bok v kaloti, kjer so zabeleženi premiki reda velikosti par milimetrov. V nadaljevanju meritev, v naslednjih štirih mesecih, je bil zabeležen le minimalen porast pomikov. Izmerjeni pritiski v celicah niso presegali 0.4MPa, ker so bile relativno nizke vrednosti pričakovane za tokratno fazo gradnje, ko še ni bilo talnega oboka.

POVRATNE RAČUNSKE ANALIZE

Rezultati geomehansko-geotehničnega opazovanja so bili uporabljeni za izdelavo povratnih numeričnih analiz po metodologiji, ki je prikazana v Jovičić [1]. Namen analiz je bil določitev parametrov za projektiranje, ki odgovarjajo izkopu in primarnem podpiranju predora za podane geološke in geomehanske pogoje. Ti parametri so uporabni za izkop predora podanih dimenzij v flišu v hribinski kategoriji B1, ker so zasnovani na dejanskih, izmerjenih pokazateljih odziva kamnine na izkop in podpiranje predora. Rezultati analiz so bili uporabljeni za potrditev podpornih vkrepev v hribinski kategoriji B1, ki se je uveljavljala v nadaljevanju izkopa. Povratne analize so bile narejene z metodo končnih elementov, s pomočjo programa PHASE 2.

Geometrija izkopa je prevzeta iz projekta PZI predora Dekani za hribinsko kategorijo B1 in prečni sklon 2.5%. Upoštewane so 3 faze izkopa in podpiranja (uporaba sider in MABB-a) v kaloti, stopnici in talnem oboku. Začetne napetosti so določene na podlagi poznane višine nadkritja za podano stacionažo čela izkopa, pri čemer je predpostavljeno, da so vertikalne napetosti enake horizontalnim.

Začetni togostni in trdnostni parametri zemljine so določeni na podlagi klasifikacije, ki sta jo predlagala Hoek in Brown [2]. Fliš je kategoriziran skladno s podatki podanimi v poročilu geološke spremljave izkopa in potem je uporabljen program RocLab za določanje mehanskih parametrov. Fliš je modeliran kot elasto-plastičen, Mohr-Coulomb-ov material.

Analize z začetnimi vhodnimi podatki so podale rezultate, ki so bili zelo blizu izmerjenim velikostim, čeprav so določena odstopanja opažena v mobilizaciji sider. V nadaljevanju so izdelane povratne analize, v katerih so osnovni parametri spremenjeni tako, da ne odstopajo značilno od osnovne Hoek in Brown-ove klasifikacije. Namen povratnih analiz je bil, da se po računski poti pride do mobilizacije podpornih elementov in hribinske mase, ki je dejansko izmerjena v merskem profilu. Končni rezultati povratnih analiz za projektne parametre za izkop predora v flišu so bili naslednji:

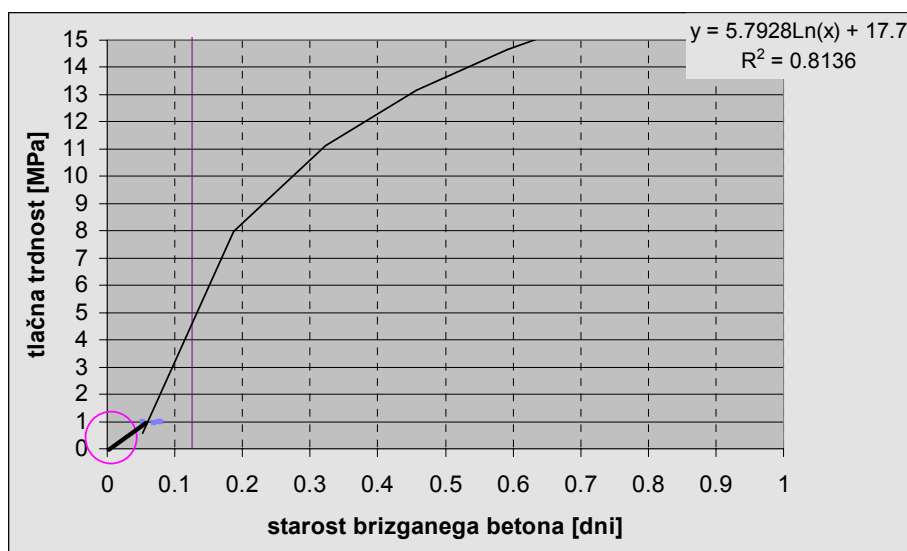
$c=377\text{kPa}$
 $\Phi=46^\circ$
 $E=2065\text{MPa}$
 $\nu=0.25$

kjer je c kohezija, Φ je kot strižne odpornosti, E je modul elastičnosti in ν poissonov koeficijent. Ti parametri so bili uporabljeni za določanje podpornih ukrepov z uporabo MABB-a v nadaljevanju izkopa po končanem raziskovalnem polju, v hribinski kategoriji B1.

REZULTATI PREIZKUSOV MABB

Rezultati na tekoče sprejetih vzorcih so pokazali karakteristično tlačno trdnost MABB-a $f_{BK}=27.3\text{MPa}$ kar je več od tlačne trdnosti zahtevane v specifikacijah za MB25=25.0MPa. Aritmetična sredina vseh rezultatov tlačne trdnosti znaša 37.5MPa. Rezultati tlačnih trdnosti pri starosti 100 dni kažejo, da se povprečna vrednost kock povečala na preko $f_{BK}=40\text{MPa}$, pri čemer rezultati valjev izkazujejo srednjo tlačno trdnost le nekoliko nad 30MPa. V okvirju raziskovalne naloge smo testirali še duktilnost, elastični modul ter upogibno in cepilno nosilnost MABB-a. Več podrobnosti o tehnologiji in karakteristikah MABB-JPV je podano v Šušteršič in dr. [3].

Tlačne trdnosti odvzetih vzorcev so preizkušene pri starosti 1, 3, 4, 7 in 28 dni po vgraditvi. S pomočjo penetracijske igle Meyco je ugotovljen prirast tlačne trdnosti MABB-a v prvih nekaj urah po ugraditvi. Prirast tlačne trdnosti je določen na osnovi statistične obdelave rezultatov, ki je prikazan s krivuljo ujemanja v Prilogi B. Detalj krivulje ujemanja priraščanja trdnosti za starost betona do enega dneva je prikazan na sliki 5.



Slika 5. Krivulja ujemanja tlačne trdnosti MABB-a

Iz krivulje ujemanja tlačne trdnosti lahko zaključimo da je pričakovana tlačna trdnost dve uri po vgradnji 3.5MPa, oziroma 4.5MPa po treh urah.

POVZETEK IN ZAKLJUČEK

Preliminarni rezultati raziskovalnega polja kažejo na to da je bilo raziskovaljno polje uspešno izvedeno v vseh načrtovanih podrobnostih. Poenostavljen tehnološki postopek je zvišal učinkovitost izvajalca in doseženo je bilo občutno znižanje stroškov pri izvajanju predora, tako v vgrajenih materialih kakor tudi v času. Odziv hribine je bil izjemno ugoden, kar je tudi rezultat izboljšanja geoloških pogojev izkopa. Lahko zaključimo, da je tehnološki postopek uporabljen v raziskovalnem polju učinkovit in varen za podane geološke pogoje.

Nevgrajevanje TH lokov, sulic in armaturnih mrež je imelo dvojni učinek. Po eni strani je pospešilo gradnjo, po drugi strani pa je gradnjo občutno pocenilo. Predlagani postopek je izboljšal varnosti pri delu. Eliminirani so postopki, ki ih izvajajo delavci na stiku z odprto kamnino, kjer so možnosti za nesrečo z nastankom porušitve največje. V tehnologiji, ki je definirana v raziskovalnem polju, najbolj kritične aktivnosti glede varnosti opravljajo stroji. S tem je nevarnost poškodbe delovne sile precej znižana.

Krivulja ujemanja tlačne trdnosti MABB prikazana na sliki 1 kaže na to, da lahko pričakujemo, da se v prvih dveh do treh urah tlačna trdnost MABB-a dvigne na več kot 3MPa. To je dovolj za preprečitev morebitnih zruškov pri sidranju v stropu, ki se izvaja en korak za izkopom v kontakto z MABB starim 2-3 ure. V nadaljevanju raziskovalne naloge se bo trdnost betona posebno merila v periodu starosti betona, ki je kritičen za varnost pri delu (med drugo in četrto uro).

V smislu uspešnosti raziskovalne naloge je raziskovano polje samo delno uspelo in sicer zaradi nepričakovanega izboljšanja lastnosti hribine. Naloga je bila uporabiti MABB v hribinski kategoriji B2 in ne v hribinski kategoriji B1. Raziskovalno polje je potekalo deloma v kategoriji B2 in deloma v kategoriji B1, kar je delno zmanjšalo raziskovalno težo naloge .

Kot posebno raziskovalno delo je bila narejena povratna računsko analiza odziva kamnine na izkop predora in vgrajevanje podpornih elementov. Rezultati povratne analize so bili uporabljeni pri določanju podpornih ukrepov v hribinski kategoriji B1 z uporabo MABB, ki je uveljavljanja v nadaljevanju izkopa predora po raziskovalnom polju. Uporaba mikroarmiranega betona se je pokazala kot tehnološko uspešna in naslednjih 400m predora je bilo izdelano s pospešeno dinamiko. To je prispevalo k občutnemu zmanjšanju stroškov v zaradi manjše porabe časa in materiala. Izvajalec je dosegel napredke v izkopu in primarnem podpiranju v zahtevnih pogojih tudi do 7m na dan in je končal izkop leve cevi 4 mesece pred rokom. Ti rezultati jasno kažejo, da je načrtovanje, ki se prilagaja dejanskim geomehanskim pogojem pri izkopu predora učinkovito. Ob tem pa je izvajalec del dosegal vseskozi predpisano kakovost del.

LITERATURA

- (1) Jovičić, V. Analyses of convergence displacements of Trojane tunnel at west portals = Analiza konvergentnih pomikov v predoru Trojane na območju zahodnega portala. RMZ-mater. geoenviron., 2002, let. 49, št. 1, str. 37-49.
- (2) Hoek, E. and Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.
- (3) Šušteršič J., Jovičić V., Zajc A., Ercegovič R., Evaluation of improvement in the bearing capacity of fibre reinforced shotcrete lining. V pripravi.