



UDRUŽENJE INŽENJERA
GEOTEHNIČARA U BIH

Sarajevo, 14/03/2023.

TUNELOGRADNJA U BIH KORIDOR Vc

TUNEL IVAN VOJKAN JOVIČIĆ I ALAGA HUSIĆ

Alaga Husić, dipl. ing. građ.
JP Autoceste FBiH d.o.o. Mostar
Bosna i Hercegovina



Ovaj projekat finansira
Evropska unija



European
Investment
Bank

The EU bank

AC JP **Autoceste** **FBiH**

SADRŽAJ

1. UVOD

2. USLOVI PRI ISKOPU TUNELA IVAN

- Geološki i hidrogeološki uslovi pri tunelskom iskopu

3. IZAZOVI U TOKU IZGRADNJE TUNELA IVAN

- Prevazilaženje problema pojave kaverni
- Dodatni pritisci usljed bubrenja
- Uticaj agresivnosti sredine i upotreba sulfatno-otpornog betona

4. ZAKLJUČAK

V. Jovičić, B. Hekić, M. Mujkić, A. Husić, Technical aspects of tunnel construction in anhydrite containing rocks, 2022, ISRM, IX Latin American Rock Mechanics Symposium, Asunción-Paraguay

UVOD

- Tunel Ivan je dvocijevni autocestovni tunel dužine 1.75 km, koji se nalazi na europskom tranzitnom koridoru Vc u Bosni i Hercegovini, na dionici Tarčin – Mostar.



USLOVI PRI ISKOPU TUNELA IVAN

Tunel Ivan se nalazi unutar geološke sekvence tektonske jedinice srednjobosanskog škriljastog gorja ispod kojeg je bosanski fliš, što je oko 500 km dugačak pojas kasne jure do kredne stijenske mase.

Na kontaktu sa starijim trijaskim i paleozoičkim tektonskim jedinicama srednjobosanskog škriljastog gorja postojali su uvjeti za nastanak permskih evaporita koji su tijekom orogeneze izbili na površinu.

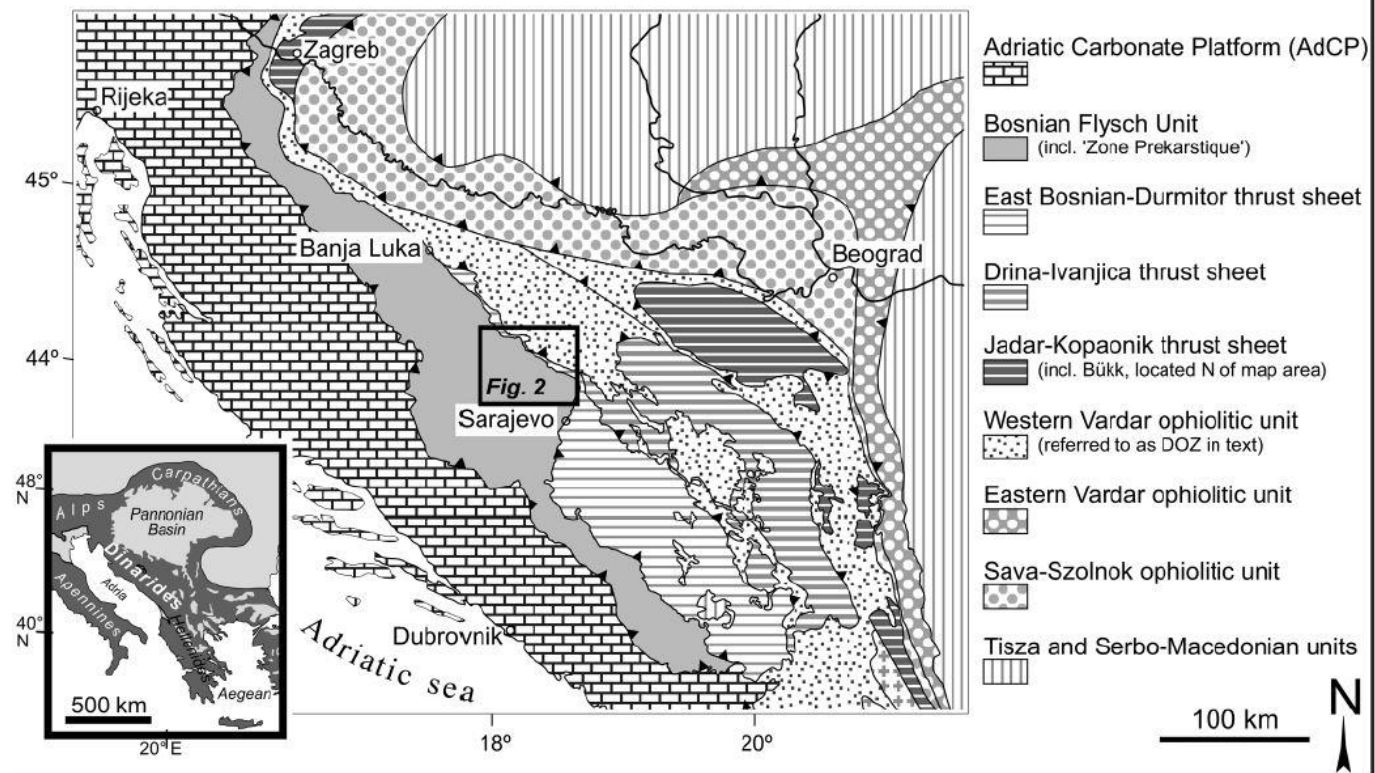
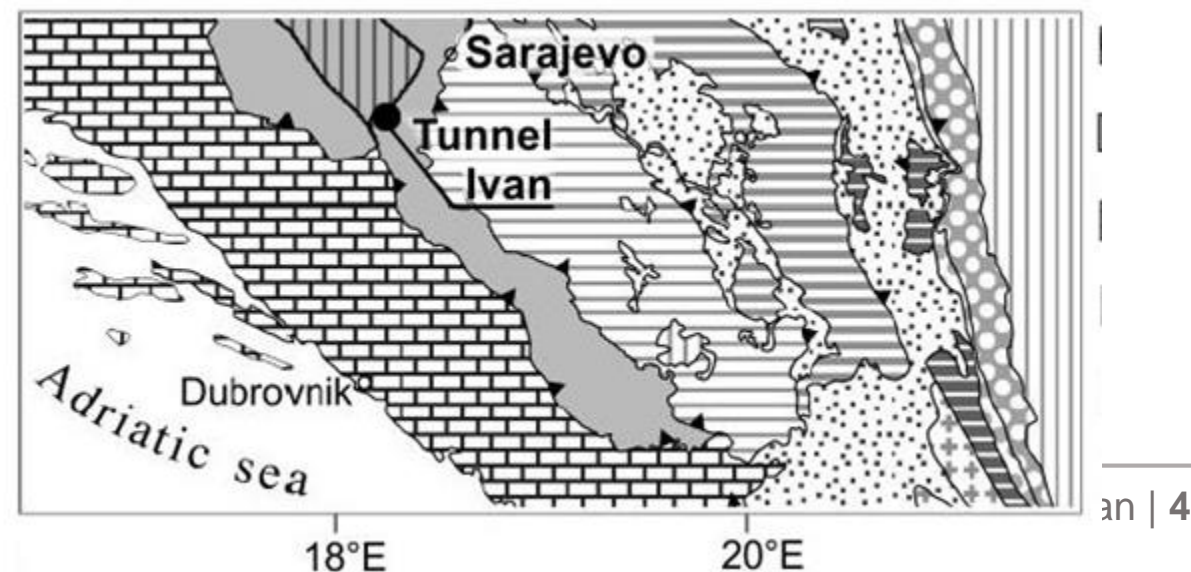
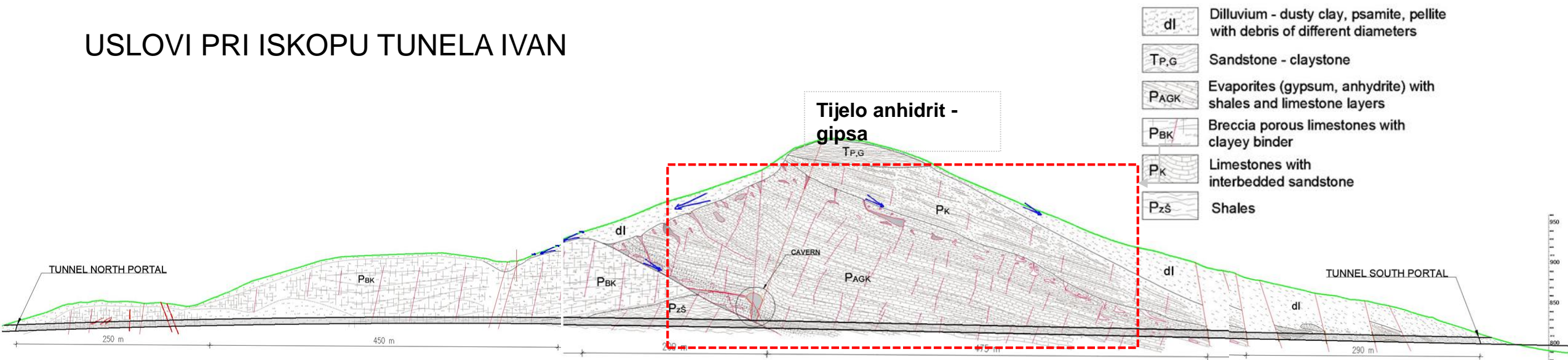


Fig. 1. Map showing the major structural units of the Dinarides (after Schmid et al. 2008, slightly modified).



USLOVI PRI ISKOPU TUNELA IVAN



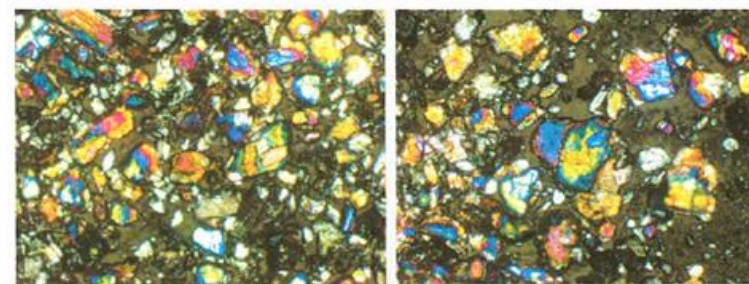
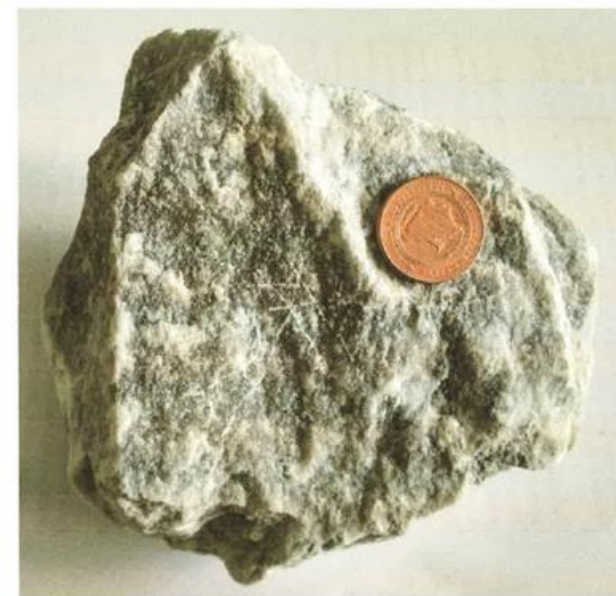
Muris Mujkić, Finalni geološki izvještaj, tunel Ivan, Euro-asfalt 2021

- 450 metara trase tunela je iskopano u materijalima brečastih šupljikavih krečnjaka (bigar) s glinovitom ispunom. Zbog aktivne izloženosti tektonskim procesima došlo je do haotičnog i nejasnog izgleda evaporitnih slojeva – gipsa i anhidrita. Uobičajeno se susreću kaverne s ili bez glinene ispune, ali bile su metarskih razmjera, tako da to nije značajno ometalo napredak iskopavanja,
- Sljedećih 475 metara stijenske mase sastojalo se isključivo od permskih evaporita predstavljenih slojevitim gipsom i anhidritom kristalne strukture.

USLOVI PRI ISKOPU TUNELA IVAN

- Stijenska masa je uglavnom sačinjena od anhidrita (kalcijum-sulfat) do 66% od ukupne mase, dok ostali dio sačinjavaju minerali kalcijum i magnezijum karbonata.

Mineral %	Sample	
	LTC-SP	DTC-JP
CaSO ₄	66.64	65.31
CaCO ₃	<u>7.03</u>	13.35
MgCO ₃	1.99	3.11
SiO ₂	0.9	<u>1.49</u>



Uzorak anhidrita i mikroskopska slika koja pokazuje kristale minerala anhidrita i sporadično gipsa prikazano u bojama (Hadžić, 2020).

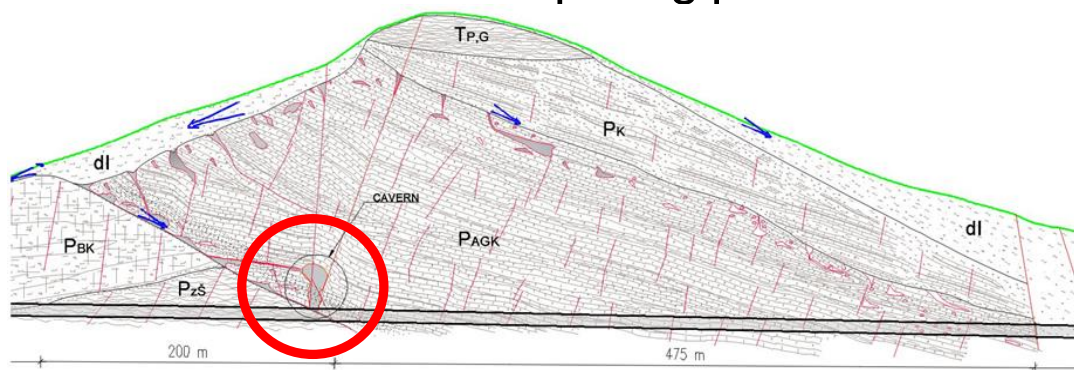


- Uslovi bez prisustva vode.
- Uslojena tekstura.
- Kristalna struktura.
- $\sigma_{ci} = 50$ MPa, RMR 50-55 (GSI 40-50)
- Iskop u punom profilu tunela

IZAZOVI U TOKU IZGRADNJE TUNELA IVAN

Prevazilaženje problema pojave kaverni i mjere sanacije

- Erozivno-tektonska granica na prijelazu iz škriljaca u evaporite bila je opterećena stalnim dotokom vode, što je praćeno pojavom gipsnog i anhidritnog raspadnutog materijala u džepovima.
- Daljnje otapanje anhidrita ili gipsa rezultiralo je stvaranjem kaverni ispunjenih (prezasićenom) teškom tekućinom otopine gipsa.



Gubitak stabilnosti i pojava kaverne u stropu desne cijevi tunela Ivan.



Prevazilaženje problema pojave kaverni i mjere sanacije

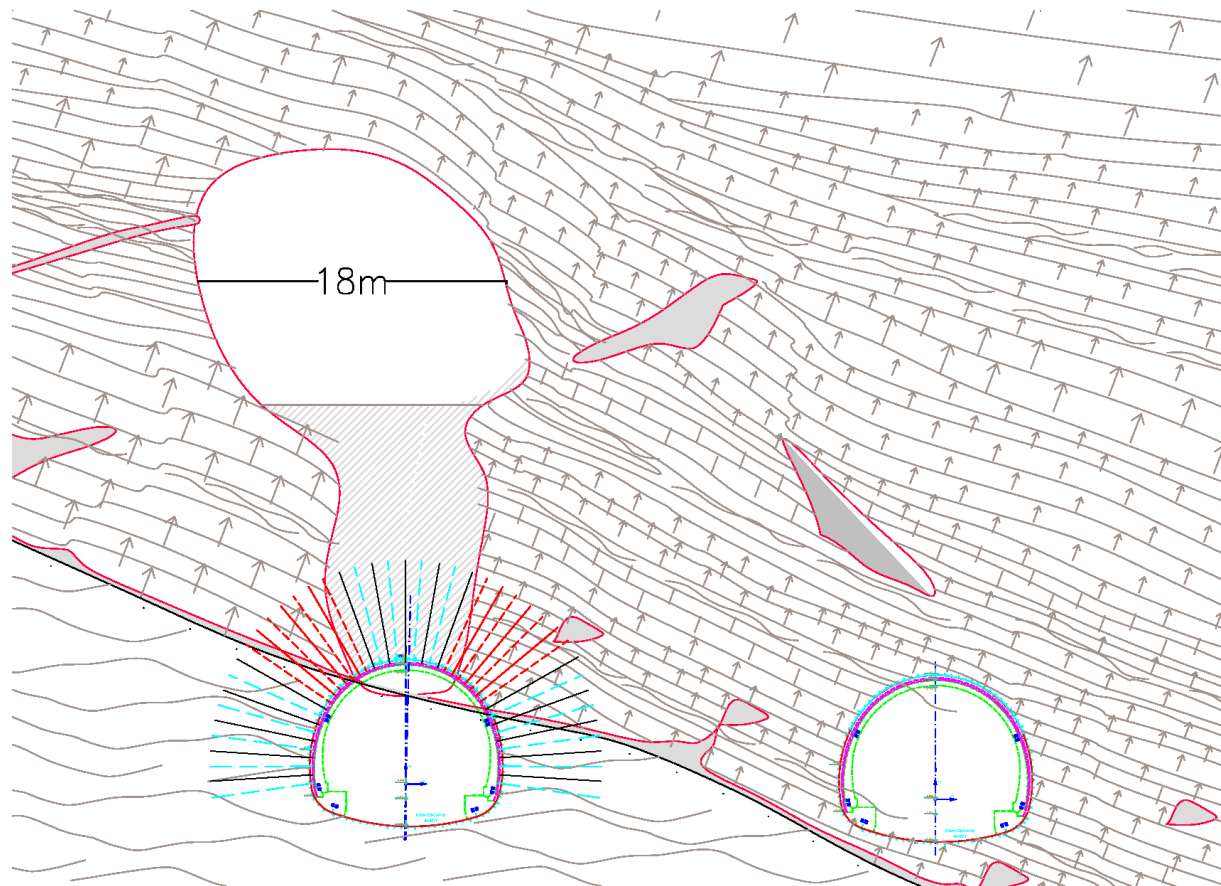
- Prikazani gubitak stabilnosti očitovao se naglim oslobađanjem heterogenog materijala u teškom tekućem stanju (otopina gipsa s pojedinačnim blokovima anhidrita) u stropu iskopa tunela.
- Kaverna je ispražnjena za nekoliko minuta.
- Visina kaverne je oko 30 m, promjenjive širine u oba horizontalna smjera (6-18 m) ukupne zapremine od oko 5500 m³.



Gubitak stabilnosti i pojava kaverne u stropu desne cijevi tunela Ivan (pogled prema gore).

Mjere sanacije (prvi dio)

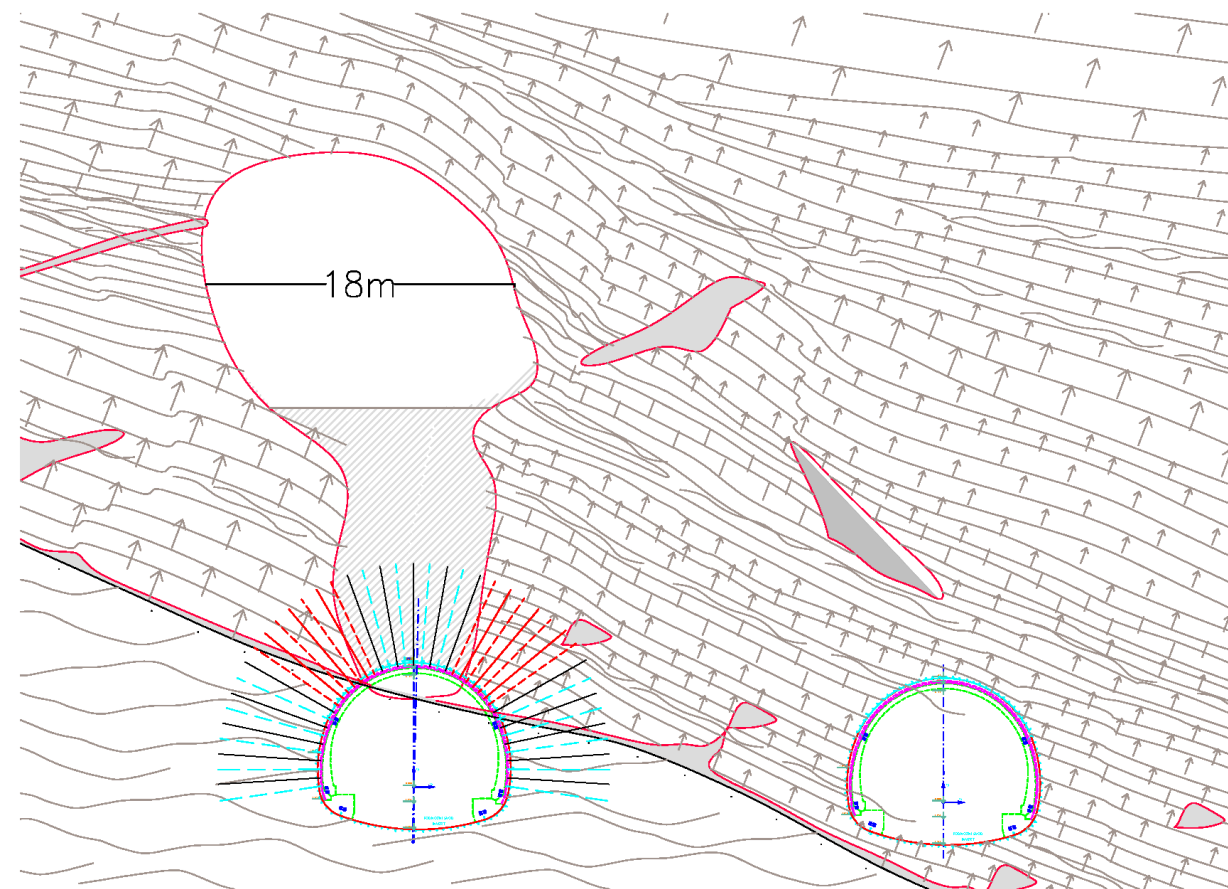
- Zatrpavanje tunelske cijevi (vraćanje u sigurno područje).
- Konsolidacijsko injektiranje u području iznad stropa ispred čela iskopa u kaloti.
- Ugradnja cijevnog štita (čelične cijevi od 4 inča duge 15 m na udaljenosti od 20 cm).
- Napredovanje tunela korištenjem teške podgrade (čelične ploče i rešetkasti nosači na razmaku od 0,5 m); dva dodatna urušavanja stropa.
- Ugradnja primarne podgrade (armirana obloga od mlaznog betonska debljine 30 cm i IBO sidra duljine 9 do 12 metara na radijalnim razmacima od 1,5 m).
- Dio kaverne ostavljen je dijelom otvoren kako bi se osigurala daljnja drenaža otopine gipsa.



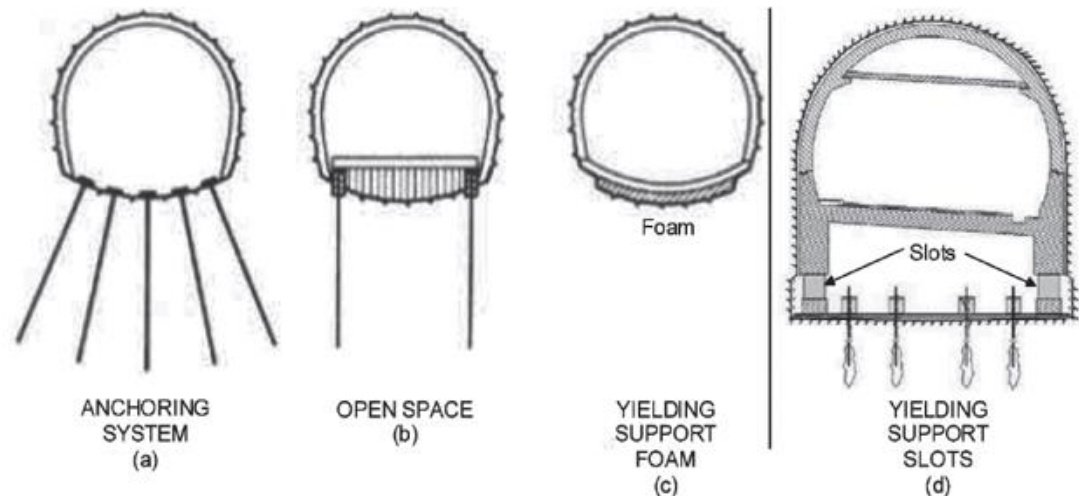
Presjek tunela u području kaverne

Mjere sanacije (drugi dio)

- Prije injektiranja dno kaverne je drenirano i očišćeno od otopine gipsa i rastresitog materijala.
- Kaverna je zatvorena i ispunjena do visine 6-8m lakim betonom, čija je razina potvrđena revizijskim cijevima.
- Nakon što je beton očvrstnuo, dodatne drenažne cijevi postavljene su na višem nivou za odvođenje perkolirane otopine gipsa i vode iz kaverne.
- Nakon izgradnje primarne obloge kaverna je dodatno ispunjena lakim betonom do visine od 18 metara
- Preostali prazan (neispunjen) prostor špilje je visok oko 12 m i širok oko 12 do 18 m.



Presjek tunela u području kaverne



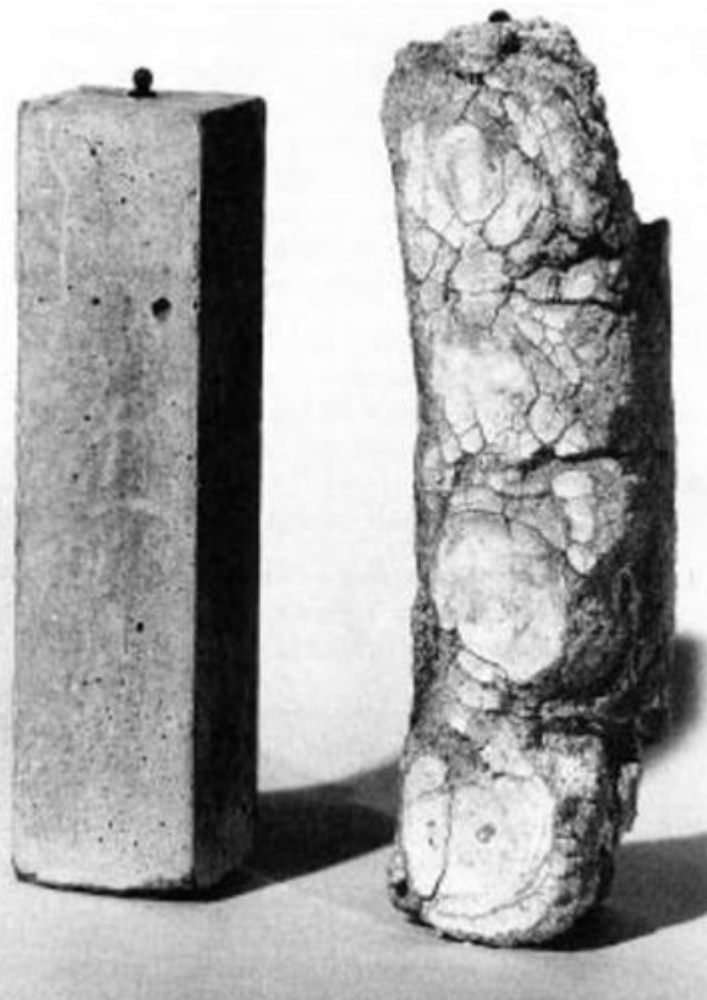
Alternativni načini osiguranja u tunelogradnji u stijenama sklinim bubrenju, Kovari, 1988.

Pritisci usljed bubrenja

- Bubrenje je bilo uglavnom prisutno u dijelovima koji graniče tijelom anhidritnog gipsa zbog kontaktnog procjeđivanja podzemne vode.
- Pritisci bubrenja uzrokovali su ugradnju dodatnih radijalnih sidara (princip otpornosti) kao i reprofilaciju poprečnog presjeka tunela u razdoblju od 12 mjeseci nakon iskopa tunela.
- Nakon tog razdoblja nisu otkriveni daljnji pomaci ili naprezanja koja djeluju na oblogu (samobrtvljenje zbog bubrenja, Wittke 2006).
- Armirana sekundarna obloga ugrađena je s kapacitetom da se suprotstavi mogućim dugotrajnim pritiscima bubrenja.
- U presjeku u kojem je dominirala stijena koja sadrži čisti anhidrit, nisu otkriveni pritisci bubrenja ili naknadna oštećenja primarne obloge.

Agresivnost vode i korištenje sulfatno otpornog betona

- Prema podacima ispitivanja podzemnih voda, hemijska agresivnost je klasificirana kao zaštitna kategorija XA3 i XA2 (prema EN 206-1).
- Upotreba mikroarmiranog mlaznog betona s cementom otpornim na sulfate predložena je kao zamjena za konvencionalnu oblogu od mlaznog betona ojačanu žičanom mrežom.
- Sulfatootporni cement je korišten za temelje i podnožni svod.
- Za injektiranje sidara koristio se sulfatno otporna cementna masa za injektiranje.



Forografija preuzeta od CEB Design Guide, Durable Concrete Structures, London, Thomas Telford, 1989.

Mehanizam djelovanja sulfata u betonu

- Sulfati iz sredine u kojoj se gradi prodiru u očvršli beton (tlo i voda)
- Reakcija sulfata sa komponentama betona
- Moguće posljedice: ekspanzije, ljuštenja, gubitka čvrstoće itd.
- Najčešće sulfati reaguju sa monosulfatima te uz prisustvo vode nastaje **etringit**
- Etringit u početku može poboljšati svojstva betona jer zapunjava pore
- Da bi etringit nastao potrebne su njegove sve četiri osnovne komponente: $\text{Al}(\text{OH})_4$, CA, OH i SO_4
- Značajan mogući izvor aluminija su nehidratizirane faze kalcij aluminata iz klinkera
- Kako bi se ograničilo nastajanje etringita preporučuju se betonske mješavine sa nižim v/c faktorom i sulfatno – otpornim cementom tj. C3A – free (trikalcijaluminat).

REZULTATI HEMIJSKE ANALIZE UZORAKA STIJENE IZ TUNELA

Tunelska cijev	Stacionaža	Sadržaj SO4 u tlu
	km	%
Desna	5+362	0,16
Desna	5+885	0,08
Desna	6+006	0,5
Desna	6+010	0,67
Desna	6+165	48,00
Desna	6+317	46,9
Desna	6+317	9,92
Desna	6+390	46,88

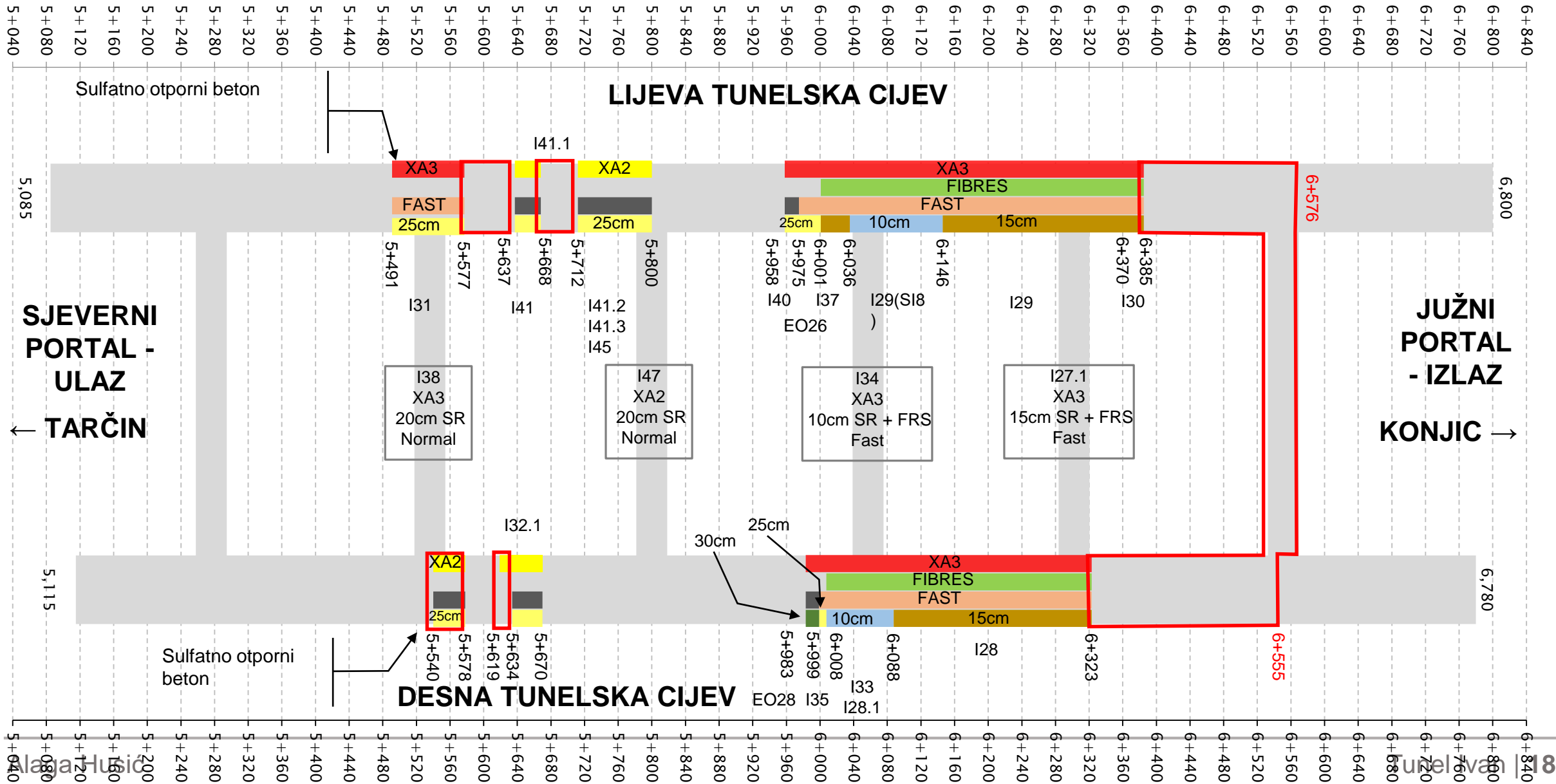
Tunelska cijev	Stacionaža	Sadržaj SO4 u tlu
	km	%
Lijeva	5+448	47,06
Lijeva	5+542 d	0,49
Lijeva	5+542 I	0,17
Lijeva	5+795	0,08
Lijeva	6+050	48,56
Lijeva	6+132	1,44
Popr. Veza L	6+565	47,22

REZULTATI HEMIJSKE ANALIZE UZORAKA STIJENE IZ TUNELA

Tunelska cijev	Stacionaža	Sadržaj SO4 u vodi
	km	mg/l
Desna	5+619	820
Desna	5+999	1220
Desna	6+390	>800
Desna	6+390	1439,80
Desna	6+455	>1200
Desna	6+490	>400
Desna	6+490	1263,70

Tunelska cijev	Stacionaža	Sadržaj SO4 u vodi
	km	mg/l
Lijeva	5+425	>400
Lijeva	5+425	776,50
Lijeva	5+445	>400
Lijeva	5+445	1295,00
Lijeva	5+580	>400
Lijeva	5+637	1060
Lijeva	5+712	1180
Lijeva	5+730	1180
Lijeva	5+741	1160
Lijeva	6+015	>400
Lijeva	6+415	>400

Grafički prikaz hemijski agresivne sredine prema stacionažama tunela



ZAKLJUČAK

- Kaverne ispunjene visoko koncentrisanim rastvorima gipsa su velika opasnost za iskop tunela u stenama koje sadrže anhidrit.
- Potencijal bubrenja anhidritne stene se najviše ostvaruje na prelazima između anhidrita i drugih geoloških slojeva usled nagle promene transmisivnosti stenske mase i posledičnog zadržavanja vode.
- U netaknutom i suvom anhidritu postoji mali potencijal za bubrenje tokom izgradnje tunela. Dugoročno, postoji velika verovatnoća da može doći do bubrenja usled promene hidrogeoloških uslova. U tom slučaju treba koristiti armaturu sekundarne obloge kako bi se omogućila dugoročna funkcionalnost tunela.
- Rastvor gipsa u prisustvu vode predstavlja u stenama koje sadrže anhidrit agresivnu hemijsku sredinu koja izaziva sulfatnu koroziju betona. Cement otporan na sulfate treba koristiti za primarnu podlogu (obloga od mlaznog betona, mlazni beton od mikrovlakana, cement za injektiranje sidra itd.), kao i za liveni beton za sekundarnu oblogu.



Hvala na pažnji