

primljen: 26.02.2024.  
korigovan: 03.04.2024.  
prihvaćen: 08.04.2024.

Pregledni rad

UDK : 624.195  
<https://doi.org/10.62683/NiP27.57-68>

## TEHNOLOGIJA ISKOPA CESTOVNOG TUNELA HRANJEN MEHANIZOVANIM KONCEPTOM

Adam Avdić<sup>1</sup>, Kemal Gutić<sup>2</sup>, Ivan Mlakić Vuković<sup>3</sup>, Sanel Alić<sup>4</sup>

**Rezime:** Bosna i Hercegovina je zemlja u kojoj uglavnom prevladava brdsko planinski reljef, pa izrada nove putne infrastrukture ne predstavlja nimalo jednostavan zadatak, odnosno u manjoj ili većoj mjeri ovisno od konfiguracije terena nameće se kao potreba stalna izrada nadzemnih i podzemnih objekata kao što su mostovi, vijadukti i tuneli. Izrada cestovnog tunela Hranjen kao sastavnog dijela buduće brze ceste Prača-Hranjen-Goražde u istočnom dijelu zemlje predstavlja jedan od najzahtjevnijih projekata posljednjih decenija, a u momentu završetka izrade sa dužinom od preko 5.500,0 m tunel Hranjen predstavljati će najduži cestovni tunel u zemlji. S obzirom na složenost i kompleksnost koja proizilazi iz uslova radne sredine, odnosno izmjenjenih geoloških uslova sa kojima se učesnici u izradi susreću u odnosu na projektom predviđene uslove, daje se prikaz tehnologije njegove izrade, u konkretnom slučaju iskopa tunela primjenom mehanizovanog koncepta.

**Ključne reči:** Tunel, inženjerskogeološki uslovi, tehnološki proces, mehanizovani iskop, hidraulični i tunelski bager

## MECHANISED CONCEPT OF THE HRANJEN TUNNEL EXCAVATION TECHNOLOGY

**Abstract:** Bosnia and Herzegovina is a country with mountainous and hilly terrain, so the construction of new road infrastructure is not a simple task. Depending on the configuration of the terrain, the constant construction of above-ground and underground structures such as bridges, viaducts and tunnels is a necessity. The construction of the Hranjen road tunnel as an integral part of the future expressway Prača-Hranjen-Goražde in the eastern part of the country, and is one of the most demanding projects in the last decades which at the moment of completion will have a length of over 5,500.0 m. The Hranjen tunnel will be the longest road tunnel in the country. Taking complex working conditions into account, i.e. the geological conditions that the construction workers encounter in relation to the conditions foreseen by the project, the technology of tunnel excavation using a mechanised concept is presented.

**Key words:** Tunnel, engineering geological conditions, technological process, mechanized excavation, hydraulic and tunnel excavator.

<sup>1</sup> Mr., dipl.ing.rud., IPSA Institut d.o.o. Sarajevo, adam.avdic@ipsa-institut.com  
ORCID 0009-0001-6906-258X

<sup>2</sup> Prof., dr.sc., Univerzitet u Tuzli, Rudarsko Geološko Građevinski fakultet Tuzla, kemal.gutic@untz.ba  
ORCID 0009-0008-9107-4641

<sup>3</sup> Dipl.ing.građ., IPSA Institut d.o.o. Sarajevo, ivan.mlakic@ipsa-institut.com  
ORCID 0009-0005-5780-5947

<sup>4</sup> Dipl.ing.geol., IPSA Institut d.o.o. Sarajevo, sanel.alic@ipsa-institut.com  
ORCID 0009-0006-3153-5448

## 1 UVOD

Brza cesta Prača-Hranjen-Goražde u dužini od 13,7 km zamišljena je kao alternativa sadašnje loše veze između saobraćajnica M-5 i M-20 (dionica Sarajevo-Goražde), cestom R-448 preko opštine Pale.

Glavna karakteristika ove trase je tunel Hranjen, kroz brdski masiv Buložni-Hranjen, u pravcu sjeverozapad-jugoistok, sa maksimalnim nadslojem od oko 600,0 m.



Slika 1 – Geografski položaj tunela Hranjen

Sjeverni (ulazni) portal tunela nalazi se na području opštine Pale/Prača u dolini rijeke Čemernice (pritoka rijeke Prače) na koti 677 mnv. Od ulaza, tunel ima konstantan uzdužni nagib od 2,0% u dužini od 4,2 km, koji se na izlazu iz tunela povećava do 6,0%.

Južni (izlazni) portal nalazi se na području grada Goražda, oko 10,0 km udaljen od centra grada u pravcu sjeverozapada, u dolini Podhranjenskog potoka na koti 615 mnv.

Iskop tunela se izvodi sa dvije tunelske cijevi, glavnom za odvijanje saobraćaja i servisnom evakuacionom u fazi eksploatacije objekta.

Osovinski razmak između tunelskih cijevi je konstantan i iznosi 25,0 m, koje su međusobno povezane poprečnim vezama za vozila i pješake na svakih 250,0 m. Glavna tunelska cijev je projektovana sa dvije saobraćajne trake širine 3,5 m, dok je širina ivičnih traka 0,35 m, što je u skladu sa propisima iz oblasti sigurnosti saobraćaja.

Glavna cijev (st. km 2+752,8 do 8+309,7) ukupne je dužine 5.556,9 m (sa portalnim konstrukcijama), od čega podzemni iskop iznosi 5.497,5 m (st. km 2+772,5 do 8+270,00). Poprečni nagib tunela u krivinama iznosi 3,9%, a u pravcu 2,5%, dok svjetli (saobraćajni) profil iznosi 55,3 m<sup>2</sup>.

Servisna tunelska cijev (st. km 2+810,0 do 8+290,0) ukupne je dužine 5.480,0 m, od čega podzemni iskop iznosi 5.450,0 m (st. km 2+820,0 do 8+270,0). Poprečni nagib tunela je konstantan i iznosi 2,5%, a svjetli profil je 24,4 m<sup>2</sup>.

Iskopni profili glavne tunelske cijevi ovisno o inženjerskogeološkim uslovima i broju iskopnih faza su promjenjivi i kreću se od 79,2 do 103,0 m<sup>2</sup> za klasični tunelski profil, odnosno od 103,0 do 131,0 m<sup>2</sup> za prošireni profil sa parking nišama.

Iskopni profil servisne tunelske cijevi kreće se od 28,4 do 44,3 m<sup>2</sup>, u poprečnim vezama za pješake je 18,3 m<sup>2</sup>, a u poprečnim vezama za vozila 49,0 m<sup>2</sup>.

Tunel je osim navedenog opremljen i ostalim konstruktivnim elementima kao što su elektro, drenažne, hidrantske i SOS niše. Navedeni poprečni presjeci i konstruktivni elementi omogućavaju smještaj svih potrebnih uređaja i opreme, te provjetravanje uzdužnom ventilacijom u fazi eksploatacije objekta [1].

## 2 INŽENJERSKOGEOLOŠKI USLOVI

Da bi se prikupili svi potrebni podaci za projektovanje veoma dugih tunela,  $l \geq 4.000,0$  m [2] potrebno je da se obave određeni istražni radovi koji u konačnici koriste analizi i izradi:

- Geoloških, hidrogeoloških, seizmotektonskih i inženjerskogeoloških karakteristika terena;
- Fizičko-mehaničkih osobina tla i stijena i
- Geotehničkog modela i geotehničkih uslova.

### 2.1 REZULTATI ISTRAŽNIH RADOVA

Geološka i geotehnička istraživanja su aktivnosti kojima se istražuju sastav, osobine i stanje stijenske mase prije, za vrijeme i poslije izrade objekta, obuhvatajući prognoze i kontrole njihovog daljeg ponašanja.

Radna sredina predstavlja prostor u kome se vrše različite tehnološke operacije (iskop, utovar, transport, podgrađivanje i dr.), a geotehnički uslovi su skup okolnosti koje proizilaze iz karakteristika i stanja geološke građe radne sredine koji utiču na sigurnost i ekonomičnost radova [3].

Za potrebe izrade projektne dokumentacije tunela Hranjen izvedene su sljedeće aktivnosti:

- Inženjerskogeološko kartiranje;
- Hidrogeološka istraživanja;
- Geofizička istraživanja;
- Istražno bušenje sa uzorkovanjem i
- Laboratorijska ispitivanja.



- Sektor 7: st. km 5+560,0 do 5+720,0 (160,0 m). Ispucala, zdrobljena i jako razglinjena stijenska masa (V);
- Sektor 8: st. km 5+720,0 do 6+720,0 (1.000,0 m). Pješčari, alevroliti, glinci, sericitski škriljci sa proslojcima, ulošcima i sočivima krečnjaka, karbonatnih škriljaca, lidita i rožnjaca (III);
- Sektor 9: st. km 6+720,0 do 6+880,0 (160,0 m). Zastupljenost litoloških članova kao i u sektoru 7 sa rasjednim kontaktom u okviru klastita (V);
- Sektor 10: st. km 6+880,0 do 8+180,0 (1.300,0 m). Stijenska masa kao u sektoru 8 (III) i
- Sektor 11. st. km 8+180,0 do 8+270,0 (90,0 m). Slabo zaglinjene drobine i blokovi škriljaca (V).

## 2.2 GEOLOŠKA ANALIZA

Redovnim geološkim kartiranjem u toku radova i naknadnom analizom podataka nakon obavljenog iskopa sa sjeverne strane u dužini 789,0 m i 1.247,0 m sa južne strane (37,0% glavne i 35,0% servisne tunelske cijevi), ustanovljeno je da geološka građa stijenske mase znatno ostupa u odnosu na projektom predviđenu (tabele 2, 3 i 4), zbog izražene intenzivne tektonske aktivnosti, rasjednih zona, geološke navlake i pojave većih priliva podzemnih voda.

Tabela 2 – Stijenska masa u glavnoj tunelskoj cijevi

RMR kategorija	Opis	Stvarno obavljene iskop	
		m'	%
II	dobra stijena	0	0,0
III	povoljna stijena	142,7	7,0
IV	slaba stijena	1.075,5	52,8
V	vrlo slaba stijena	817,8	40,2
<b>Ukupno:</b>		<b>2.036,0</b>	<b>100,0</b>

Tabela 3 – Stijenska masa u servisnoj tunelskoj cijevi

RMR kategorija	Opis	Stvarno obavljene iskop	
		m'	%
II	dobra stijena	0	0
III	povoljna stijena	70,6	3,7
IV	slaba stijena	1.154,6	60,5
V	vrlo slaba stijena	681,8	35,8
<b>Ukupno:</b>		<b>1.907,0</b>	<b>100</b>

Tabela 4 – Usporedba geotehničkih uslova

RMR kategorija		II	III	IV	V	Σ
		Glavni projekat	m	1.365,0	3.180,0	340,0
	%	25,0	58,0	6,0	11,0	100
Izvedeni iskop	m	0,0	142,7	1.075,5	817,8	2.036,0
	%	0	7,0	52,8	40,2	37,0

Prema geološkoj prognozi, nastavak podzemnog iskopa će izvoditi u V stijenskoj kategoriji, oko 40,0% i IV stijenskoj kategoriji oko 60,0% prema RMR kategorizaciji sve do proboja tunela, što u konačnici određuje i primjenjenu tehnologiju rada.

BRZA CESTA HRENOVICA-HRANJEN-GORAŽDE; Faza ; Lot 1	List br. 29 / RMR
Gradjevina: TUNEL "HRANJEN" - GTC IZLAZ	Datum: 26.05.2021.
Izvođač: EURO-ASFALT d.o.o.	Vrijeme:
Nadzor: IPSA Institut d.o.o. Sarajevo	Stacionaža: 3+574.00
Investitor : JP Autoceste Federacije BiH	
<b>INŽENJERSKO GEOLOŠKI IZVJEŠTAJ</b>	
Metoda iskopa: mašinski/miniranje	Dnevni napredak:
Nadstoj: _____	Smjer napredovanja: 310-130°



Vrsta stijene:	alevroliti, glinci	Čvrstoća (MPa):	vrlo niska	< 25	MPa
Stratigrafska pripadnost:	verfen	RQD (%):	vrlo slab	< 25	%
Trošnost:	potpuno trošne	Boja:		siva	

Litološke, strukturne i inž. geološke karakteristike:  
Iskop prolazi kroz materijal koji je pretrpio uticaj intenzivne tektonske aktivnosti. Stijenski masiv je predstavljen svim tankoslojnim alevrolitima i glincim, podređeno mekim pjesčarima. Iskop prolazi kroz materijal ekstremno različitih fizičko-hemijskih karakteristika što predstavlja izrazito nepovoljne uslove za iskop. Trenutne prilike u stijenskoj masi zahtijevaju poseban pristup. Radi se o tektonskoj zoni

Oznaka diskontinuiteta:	SKUP 1	SKUP 2	SKUP 3	Pojedinačni disk.
Opis diskontinuiteta:				
Smjer pružanja/nagib:				
Razmak disk. (debljina):	vrlo mali <0,06			
Dužina, perzistencija:	3,0-10,0 m			
Zijev:	>5,0 mm			
Hrapavost:	glatke			
Ispuna:	meka ispunna <5mm			
Rastrošenost:	jako trošne			
Podzemna voda:				
Priljev na 10 m tunela:	nikakav	potpuno suho	Temp. / kemizam:	
Opće stanje:			Uzorci:	

### RMR - KLASIFIKACIJA

1. Čvrstoća st. mase (MPa)	vrlo niska	< 25		
br. bodova	2			
2. RQD (%)	vrlo slab	< 25		
br. bodova	0			
diskontinuiteti:	Skup 1	Skup 2	Skup 3	Pojed. disk.
3. Razmak diskontinuiteta	vrlo mali <0,06			
br. bodova	5			
4. Stanje diskontinuiteta				
Dužina:	3,0-10,0 mm			
br. bodova	2			
Zijev:	> 5,0 mm			
br. bodova	0			
Hrapavost:	glatke			
br. bodova	1			
Ispuna:	meka ispunna			
br. bodova	0			
Rastrošenost:	jako trošne			
br. bodova	1			
5. Podzemna voda:				
Priljev na 10 m tunela	nikakav			
Opće stanje	potpuno suho			
br. bodova	15			
6. Korekcija za utjecaj pružanja i nagiba disk.				
pružanja i nagiba disk.	vrlo nepovoljno			
br. bodova	-12			

UKUPAN BROJ BODOVA: 14

### KATEGORIJA STIJENSKE MASE

Bodovi	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Kategorija	I	II	III	IV	V
Opis stijene	Vrlo dobra	Dobra	Povoljna	Slaba	Vrlo slaba

Napomena:

Slika 3 – Primjer inženjerskogeološkog izvještaja za V stijensku kategoriju, izvor: terenske zabilješke

### 3 ISKOP TUNELA HRANJEN

Podzemni iskop tunela se obavlja istovremeno u glavnoj i servisnoj tunelskoj cijevi, sa obje tunelske strane, a iskopni materijal iz tunela se transportuje na predviđene deponije izvan tunela koje su formirane u skladu sa Zakonskom regulativom.

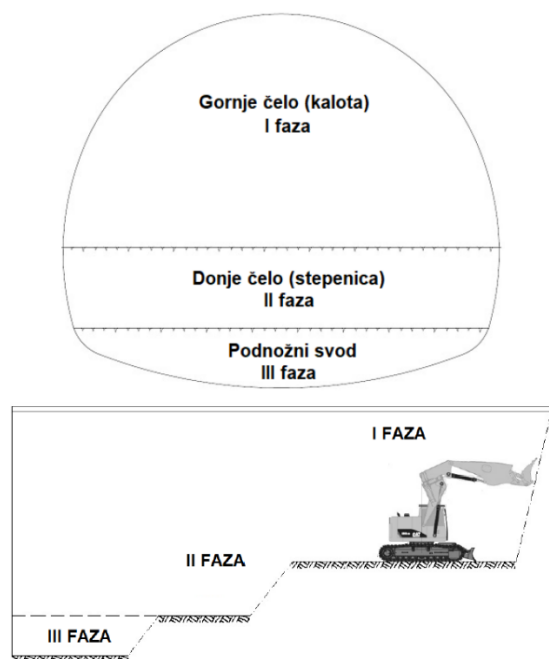
#### 3.1 METODE I FAZE ISKOPA

Iskop tunela Hranjen obavlja se na tri načina:

- Mehanizovano (hidrauličnim bagerima);
- Bušenjem i miniranjem i
- Kombinovano, u slabim stijenskim masama sa parcijalnim bušenjem i miniranjem.

S obzirom na metodu izrade po NATM (Nova austrijska tunelska metoda) i inženjerskogeološke uslove, iskop je podijeljen na više faza u glavnoj tunelskoj cijevi, dok se u servisnoj tunelskoj cijevi i poprečnim vezama obavlja u punom profilu, osim gdje je predviđen iskop podnožnog svoda (slika 4).

Glavna tunelska cijev podijeljena je na iskop gornjeg i donjeg čela radilišta (kalotu i stepenicu), a u izrazito nepovoljnim inženjerskogeološkim uslovima primjenjuje se i iskop treće faze, podnožnog svoda.



Slika 4 – Višefazni iskop tunelske cijevi

Za ispravno i kontrolisano vođenje iskopa, na radnim čelima obezbjeđuje se ispravna orijentacija sa obilježavanjem konture iskopa i označavanjem bojom (markiranjem) od strane geodetske službe za svaki korak iskopa ponaosob.

Na osnovu geološke analize i prognoze, a vodeći se principima za pojedine stijenske kategorije, lako je uočljivo da se većina iskopa obavlja mehanizovano (IV i V kategorija) u odnosu na projektom dominantno predviđenu metodu bušenja i miniranja.

#### 3.2 MEHANIZOVANI KONCEPT ISKOPA

Za primjenu mehanizovanog iskopa tunela koriste se hidraulični bageri odgovarajućih dimenzija, klasični ili tunelski sa posebnom rotirajućom kašikom čija tehnologija rada omogućava formiranje zahtjevane konture iskopnog profila.

Svi podzemni objekti, bez obzira na namjenu predstavljaju nazahtjevnije okruženje za rad bagera. Rad na iskopu podzemnih objekata postaje učinkovit kada bager, uprkos teškim uslovima rada u ograničenom radnom prostoru može obaviti iskop tunelskog profila koji je potreban, na siguran i efikasan način. U prevodu, bageri namjenjeni za podzemne iskope moraju proizvesti visok hidraulični kapacitet i biti opremljeni radnim elementima koji su prilagođeni određenim uslovima rada.

##### 3.2.1 Izbor opreme za mehanizovani iskop

Hidraulični bageri koji se koriste za iskop tunela Hranjen su:

- Tunelski bager HIDROMEK 220LC TX i
- Hidraulični bager HYUNDAI Robex 220LC 9S.

Radni elementi za iskop bagerima su:

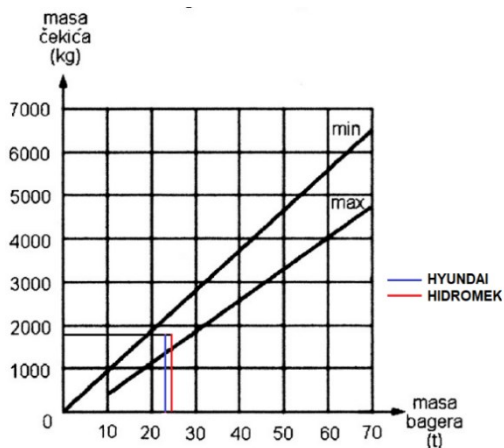
- Bagerska kašika, zapremine do 1,0 m<sup>3</sup>;
- Specijalna kašika za tunelski bager i
- Hidraulični čekić.

##### Hidraulični (HD) čekić

Predstavlja radni element čiji zadatak je da energiju fluida (ulja) pod pritiskom pretvori u mehaničku energiju. Svim vrstama hidrauličnih čekića princip rada je isti, ulje se pod pritiskom dovodi na klip čekića koji udara u radni alat i prenosi udar na iskopni materijal.

Pri izboru čekića važno je da njegova masa bude usklađena sa masom bagera, tj. bager ne smije biti pretežak niti prelagan za odabrani čekić i obratno. U suprotnom, dolazi do smanjene učinkovitosti i ubrzanim habanjem i kvarovima na čekiću ili bageru.

Pored činjenice da svi proizvođači hidrauličnih čekića u svojim tehničkim karakteristikama navode prihvatljivu masu bagera postoje i načini za provjeru usklađenosti, a jedan od načina je na osnovu dijagrama sa slike 5 [4].



Slika 5 – Dijagram za utvrđivanje usklađenosti HD čekića i bagera, izvor: Kujundžić, T., Rudarski i geotehnički strojevi, Sveučilište u Zagrebu, RGNF, 2015

Za iskop tunela Hranjen, u upotrebi su čekići mase od 1.800,0 kg, a s obzirom na mase bagera od 23,8 t za HIDROMEK [5], odnosno 21,9 t za HYUNDAI [6] prema predhodnom dijagramu, utvrđen je optimalan izbor mase čekića.

HD čekići imaju dva načina rada, otkopavanje prodiranjem i razrušavanje udarom. Otkopavanje prodiranjem se sastoji od drobljenja stijenskog materijala kombinacijom valova naprezanja, tj. visokih razina naprezanja koji djeluju u kratkom vremenu i „efekta klina“ koji proizvodi oblik radnog alata. Razrušavanje udarom lomi materijal pomoću valova naprezanja sa minimalnim udjelom prodiranja. Na koji će način čekić raditi, ovisi o odabiru radnog alata koji se može podijeliti u tri osnovne grupe (slika 6).

oštri završetak		
tupi završetak		
dlijeto		

Slika 6 – Radni alati hidrauličnih čekića

Radni alati HD čekića za iskop tunela Hranjen su dlijeto ili tupi završetak, kojima se postiže najbolji efekat jer se stijenska masa kopa prodiranjem alata u postojeće pukotine stijenske mase (dlijeto), dok se upotrebom tupog završetka postiže najučinkovitiji prenos udarne energije čekića na stijensku masu.

U lošoj stijenskoj masi, kakva je u tunelu, granulacija iskopnog materijala je zadovoljavajuća zbog činjenice da se nalazi u prirodno trošnom i ispucalom stanju i prije samog iskopa, pa radni alat sa oštrim završetkom koji je preporučljiv za usitnjavanje vangabaritnih blokova, nema veliku primjenu.

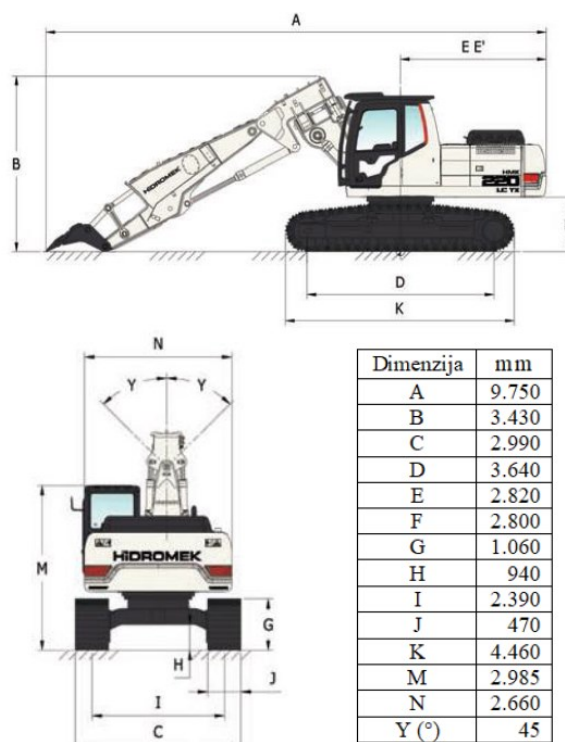
### Tunelski bager HIDROMEK 220LC TX

Tunelski bager HIDROMEK 220LC TX predviđen je za podzemni iskop. Prema namjeni spada u grupu bagera sa dubinskim kopanjem i opremljen je brzom spojnicom za jednostavnu promjenu radnog elementa.

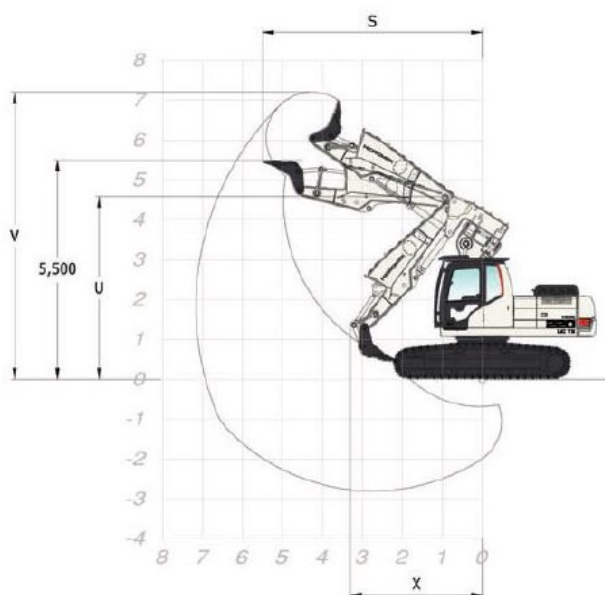


Slika 7 – Iskop čela tunelskim bagerom HIDROMEK 220LC TX, izvor: Avdić, A., 2020

Specifičnost tunelskih bagera u odnosu na klasične sastoji se u tome da su opremljeni specijalnom namjenskom rukom koja ima mogućnost rotacije u dva pravca pod uglom od 45° i omogućava radnom elementu da kod iskopa oblikuje predviđeni iskopni profil. Za ovakav vid iskopa kao radni element prijenjuje se specijalna kašika sa dva ili tri zuba.



Slika 8 – Dimenzije bagera HIDROMEK 220LC TX, izvor: Hidromek CO., 2016



Dimenzija	mm
S. Maksimalni dohvat iskopa na visini 5,5 m	5.500
U. Maksimalna visina iskopa	4.600
V. Ukupna visina	7.200
X. Poluprečnik zamaha	3.350

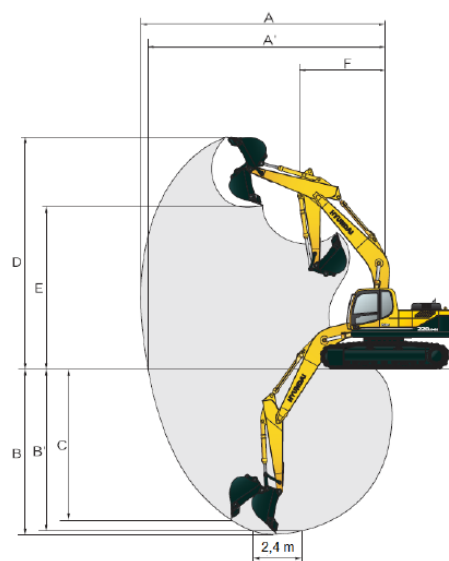
Slika 9 – Tehnološka šema rada bagera HIDROMEK 220LC TX, izvor: Hidromek CO., 2016

### Bager HYUNDAI Robex 220LC 9S

Hidraulični bager HYUNDAI Robex 220LC 9S, obzirom na dimenzije koristi se za iskop i utovar stijenske mase u tunelu, ali se može koristiti i za iskopne radove na površini. Kao i tunelski spada u grupu bagera sa dubinskim kopanjem, pomoću radnog elementa, bagerske kašike ili hidrauličnog čekića.

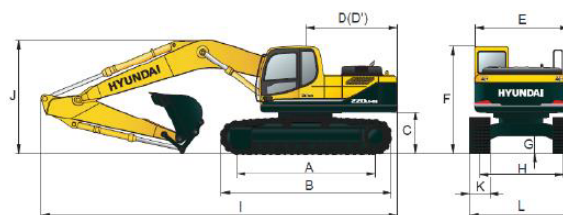


Slika 10 – Iskop podnožnog svoda hidrauličnim bagerom HYUNDAI Robex 220LC 9S, izvor: Avdić, A., 2020



Dimenzija	mm
A. Maksimalni dohvat iskopa	9.140
B. Maksimalna dubina iskopa	5.820
C. Maksimalna vertikalna dubina iskopa	5.280
D. Maksimalna visina iskopa	9.140
E. Maksimalna visina utovara – istovara	6.330
F. Minimalni radijus zaokretanja	3.750

Slika 11 – Tehnološka šema rada bagera HYUNDAI Robex 220LC 9S, izvor: Hyundai Heavy Industries CO., 2011



Dimenzija	mm	Dimenzija	mm
A	3.650	G	480
B	4.440	H	2.390
C	1.060	I	9.650
D	2.830	J	3.200
E	2.740	K	900
F	2.920	L	3.290

Slika 12 – Dimenzije bagera HYUNDAI Robex 220LC 9S, izvor: Hyundai Heavy Industries CO., 2011

### 3.2.2 Tehnologija mehanizovanog iskopa

Početak mehanizovanog iskopa dozvoljen je samo nakon što su preduzete sve potrebne mjere sigurnosti i zaštite na radu koje podrazumjevaju:

- Izvedena predhodna primarna podgrada;
- Čelo zaštićeno mlaznim betonom (po potrebi);
- Pripravna vodena mlaznica;
- Aktivno separatno provjetranje radilišta;
- Izvršena kontrola gasnog stanja;

- Osvjetljeno čelo radilišta;
- Uspostavljeno odvodnjavanje (po potrebi);
- Zaposlenici koji ne učestvuju u tehnološkom procesu povučeni na sigurnu udaljenost i
- Pregledani svi elementi bagera.

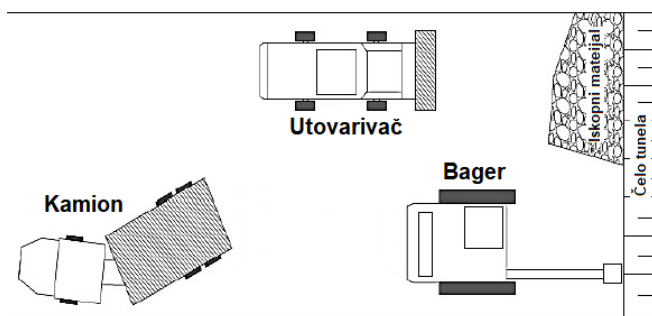


Slika 13 – Obaranje prašine vodenom mlaznicom pri mehanizovanom iskopa tunela, izvor: Avdić, A., 2020

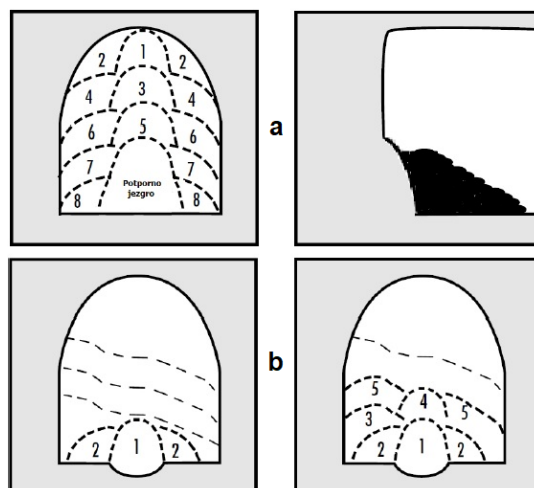
Mehanizovani iskop obavlja se maksimalno kontrolisano, kako bi se ograničio nepotreban prekopprofilni iskop i nepotrebno drobljenje stijenske mase izvan projektovane teorijske linije iskopa.

U ispucalim stijenskim masama gdje je kontrola otežana, iskop se obavlja od krovine prema podini radnog čela sa ostavljanjem potpornog jezgra čija funkcija je prihvatanje pritiska krovinskih naslaga i privremeno osiguranje čela sve do ugradnje primarne podgrade (slika 15).

Kada je stijenska masa na radnom čelu izrazito uslojena, što je najčešći slučaj kod iskopa tunela Hranjen, iskop se obavlja na način formiranja slobodne površine prema kojoj se dalje okomito na pravce pružanja slojeva stijenske mase obavlja iskop, čime se iskorištavaju prirodne slabosti stijene i povećava produktivnost bagera (slika 16).

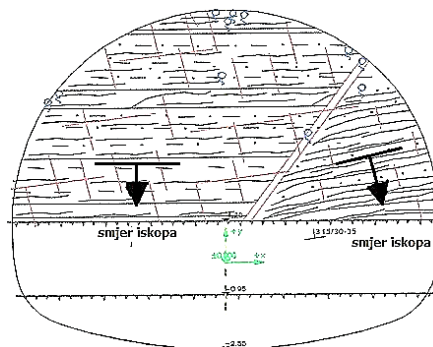


Slika 14 – Tehnološka šema mehanizovanog iskopa tunela



Slika 15 – Redosljed iskopa tunela, u trošnoj (a) i slojevitoj stijenskoj masi (b)

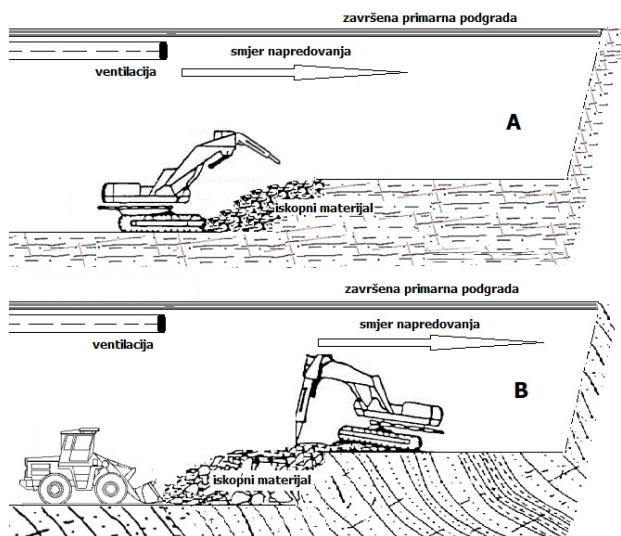
S obzirom na odnose između širine iskopnih profila i bagera, iskop gornjeg čela obavlja se na jednoj strani sa odbacivanjem iskopnog materijala na drugu stranu i obratno, čime se omogućava istovremeno obavljanje utovara i transporta iskopnog materijala (slika 14), smanjuje se vrijeme radne operacije, a samim tim i troškovi izrade tunela.



Slika 16 – Smjer iskopa u odnosu na pružanje slojevitosti

Tehnološki postupak iskopa donjeg čela, ako se obavlja po cijeloj širini, identičan je kao i za gornje čelo, a ukoliko je podijeljen na dva dijela (češći slučaj), bager nesmetano može obavljati iskop na jednoj polovini, dok se druga polovina koristi kao transportna rampa. Izuzetno, za iskop donjeg čela u ovisnosti od pravca pružanja slojeva stijenske mase, pozicija bagera može biti ispred čela u slučaju blago nagnutog ili horizontalnog pružanja slojeva, dok je u slučaju vertikalnijeg pružanja slojeva iskop lakše obavljati odozgo, kada se bager nalazi na čelu (slika 17) što dinamički posmatrano predstavlja bolju opciju, zbog mogućnosti istovremenog utovara i transporta iskopnog materijala.





Slika 17 – Mehaničani iskop donjeg čela (stepenice) u ovisnosti o pružanju slojeva

Kod iskopa servisne tunnelske cijevi i poprečnih prolaza, bageru je, s obzirom na širine iskopnih profila omogućen rad sa jedne pozicije, s tim da se iskop uglavnom obavlja od podine prema krovini čela, jer bi u suprotnom moglo doći do zastoja u čistom efektivnom radu bagera, obzirom na vrijeme koje bi mu bilo potrebno za uklanjanje iskopnog materijala kako bi se pristupilo iskopu donjeg dijela ili eventualnom povlačenju na određenu udaljenost i čekanja zbog utovara i transporta, a nakon toga i povratka.

### 3.2.3 Vanredne okolnosti (prekopprofilni iskop)

Kod pojave prekopprofilnog iskopa potrebno je odmah postaviti osiguranje kako bi se izvršila stabilizacija okolne stijenske mase. Odmah je potrebno obavijestiti Projektanta i Nadzor na gradilištu. Način i postupke sanacionih radova usaglašavaju Izvođač, Projektant i Nadzor.

Izvođač je obavezan da pripremi detaljan Tehnološki elaborat sanacionih radova koji mora biti odobren od strane Nadzora, a sanacione radove je potrebno izvesti prije daljeg napredovanja iskopa, ukoliko Nadzor ne odredi ili odobri drugačije.

Ako se utvrdi da su prekopprofilni iskop prouzrokovali fizički uslovi koji su izvan kontrole Izvođača, te da prekopprofilni iskop nije nastao usljed neispravne tehnologije izvođenja radova, nastali otvor treba izmjeriti na licu mjesta od strane geodetske službe, te na osnovu snimka utvrditi količine materijala koje su potrebne za sanaciju. Navedene količine odobrava Nadzor i ovjerava ih za plaćanje kod Investitora.

## 4 PRORAČUNI ZA ISKOP

Proračuni mehanizacije za iskop vrše se na osnovu smjenskog i dnevnog napredovanja radova.

Projektovani korak iskopa u slabim stijenskim kategorijama za tunel Hranjen u prosjeku je 1,0 m, a maksimalni praktični učinak po tunnelskim cijevima na dnevnoj bazi iznosi 2 koraka, odnosno 2,0 m/dan (ukupno 4,0 m/dan/cijev za napadne tačke). Dnevni kapacitet iskopa koji je potrebno zadovoljiti jednak je:

$$Q_d = \frac{S \cdot l \cdot k_r}{n_k}, (m^3/h \text{ č. m.}) \quad (1)$$

gdje su:

$S_1$  – iskopna površina (prosjeak) = 91,0 m<sup>2</sup>, GTC

$S_2$  = 36,0 m<sup>2</sup>, STC

$l$  – korak iskopa = 1,0 m

$k_r$  – koeficijent rastresitosti = 1,30 [7]

$n_k$  – dnevni napredak iskopa = 4,0 m

Prosječni koeficijenti rastresitosti stijenske mase u kašici bagera ( $k_r = 1,30$ ), punjenja kašike ( $k_{pu} = 1,0$ ) i bagerovanja kod iskopa u masivu ( $k_b = 0,75$ ) za tankoslojevite i rastresite stijenske mase preuzeti su iz izvora [7].

$Q_{s1} = 29,5 m^3/h \text{ č. m.}$ , za GTC

$Q_{s2} = 11,7 m^3/h \text{ č. m.}$ , za STC

### 4.1 KAPACITET BAGERA

Kapacitet bagera zavisi od osobina stijenske mase u kojoj se obavlja iskop, oblika i dimenzija iskopnog profila, konstrukcije bagera i organizacije radova.

**Teoretski kapacitet ( $Q_t$ )** odražava konstruktivne karakteristike bagera i jednak je:

$$Q_t = \frac{3.600}{t_{c(t)}} \cdot E, (m^3/hr. m.) \quad (2)$$

gdje su:

$E$  – zapremina kašike = 1,0 m<sup>3</sup>

$t_{c(t)}$  – teotetsko vrijeme ciklusa = 17,5 [8]

$Q_t = 206,0 m^3/hr. m.$

**Tehnički kapacitet ( $Q_{th}$ )** je maksimalni trenutni kapacitet u određenoj stijenskoj masi i pored konstrukcije bagera odražava i sve prirodne faktore:

$$Q_{th} = Q_t \cdot \frac{k_{pu}}{k_r} = \frac{3.600}{t_{c(t)}} \cdot E \cdot k_b, (m^3/h \text{ č. m.}) \quad (3)$$

$Q_{th} = 154,0 m^3/h \text{ č. m.}$

**Otkopni kapacitet ( $Q_{ot}$ )** bagera je maksimalno mogući kapacitet u određenom otkopu (čelo tunela) ili stijeni, a odražava, pored konstruktivnih i prirodnih i tehnološke faktore koji se odnose na dimenzije iskopa i jednak je:

$$Q_{ot} = Q_{th} \cdot k_{ot} = \frac{3.600}{t_c} \cdot E \cdot k_b, (m^3/h \text{ č.m.}) \quad (4)$$

gdje su:

$k_{ot} = t_{c(t)}/t_c$  – koeficijent otkopa

$t_c$  – stvarno vrijeme ciklusa

$$t_c = t_k + t_{o(i)} + t_{o(o)} + t_i, (s)$$

Proces iskopa bagerskom kašikom sastoji se iz četiri osnovne operacije u jednom ciklusu: kopanje i punjenje kašike ( $t_k$ ), prenos zahvaćenog materijala (okretanje) od otkopa do mjesta istresanja ( $t_{o(i)}$ ), istresanje kašike ( $t_i$ ) i povratak (okretanje) u otkop ( $t_{o(o)}$ ). Pomoćne operacije (izvlačenje i spuštanje kašike prije istresanja, spuštanje i uvlačenje kašike prije početka kopanja i dr.) izvode se istovremeno sa osnovnim operacijama pa za njih nije potrebno dodatno vrijeme u ciklusu.

Analizirajući rad bagera koji se koriste za iskop tunela Hranjen, izmjerene su sljedeće prosječne vrijednosti radnih operacija u jednom ciklusu:

$$t_c = 15 + 5 + 5 + 7 = 32 \text{ s}^*$$

\*Izmjerene vrijednosti potrebno je uzeti sa rezervom, jer brzina manevrisanja i manipulacije bagerom osim tehničkih mogućnosti i stanja stijenske mase ovisi i o ljudskom faktoru, tj. sposobnostima rukovaoca, tako da se vrijednosti razlikuju od smjene do smjene.

$$Q_{ot} = 84,0 \text{ m}^3/h \text{ č.m.}$$

$Q_{ot} > Q_{s1}, Q_{s2}$  - zadovoljeni dnevni kapaciteti.

**Eksploatacioni kapacitet ( $Q_{ex}$ )** uz predhodno nabrojane faktore odražava još i organizaciju rada, transporta i održavanja bagera u određenom vremenskom periodu i predstavlja maksimalni mogući kapacitet u određenom otkopu, a može se računati kao smjenski ( $Q_{ex(s)}$ ), dnevni ( $Q_{ex(d)}$ ) i godišnji ( $Q_{ex(g)}$ ):

$$Q_{ex(s)} = Q_{ot} \cdot k_v \cdot T_{sm}, (m^3/smj.) \quad (5)$$

gdje su:

$k_v$  – koef. iskorištenja smjenskog vremena

$T_{sm}$  – vrijeme smjene (kod tunela) = 12,0 h

$$k_v = \frac{T_{sm} - t_{pz} - t_{pr}}{T_{sm}}$$

$t_{pz}$  – vrijeme primopredaje smjene = 0,5 h

$t_{pr}$  – vrijeme prekida (pauza i sl.) = 1,0 h

$$k_v = 0,9$$

$$Q_{ex(s)} = 907,0 \text{ m}^3/smj.$$

$$Q_{ex(d)} = Q_{ex(s)} \cdot n_{sm}, (m^3/dan) \quad (6)$$

gdje je:

$n_{sm}$  – broj radnih smjena na dan = 2

$$Q_{ex(d)} = 1.814,0 \text{ m}^3/dan$$

$$Q_{ex(g)} = Q_{ex(d)} \cdot N_d, (m^3/god.) \quad (7)$$

gdje je:

$N_d$  – broj radnih dana bagera u godini

$$N_d = 365 - N_{sd} - 11 \cdot N_{pp} - N_r, (dan)$$

$N_{sd}$  – broj slobodnih dana u godini (praznici)

$N_{pp}$  – vrijeme mjesečnih pregleda bagera = 4

$N_r$  – broj dana u godini za servise = 5

Kod izrade tunela ne postoje pauze u radu, s obzirom na organizaciju (3 radne ekipe) 10 radnih dana (I smjena)/5 slobodnih dana/10 radnih dana (II smjena), tako da se iskopni radovi ne zaustavljaju, izuzev u slučajevima: državni i međunarodni praznici 5 dana i vjerski praznici do 6 dana, pa je ukupan broj slobodnih dana u godini jednak:

$$N_{sd} = 11$$

$$N_d = 365 - 11 - 11 \cdot 4 - 5 = 305 \text{ dana}$$

$$Q_{ex(g)} = 553.270,0 \text{ m}^3/god.$$

## 4.2 VRIJEME MEHANIZOVANOG ISKOPA

Za proračun vremena potrebnog za iskop stijenske mase, osim efektivnog vremena rada ( $t_i$ ), uzima se u obzir i pripremno vrijeme koje podrazumjeva dolazak bagera na čelo ( $t_p$ ), vrijeme potrebno za promjenu pozicije bagera na čelu ( $t_{pp}$ ) i povlačenje nakon završenog rada ( $t_{pb}$ ) i određuje se:

$$T_i = t_p + t_i + t_{pp} + t_{pb}, (h) \quad (8)$$

$$t_{i1} = \frac{S \cdot l \cdot k_r}{Q_{ot}} = 1,4 \text{ h, za GTC}$$

$$t_{i2} = 0,55 \text{ h, za STC}$$

Na osnovu vrijednosti izmjerenih u tunelu potrebnih za dolazak i pripremu bagera, promjenu pozicije i povlačenje, daje se prosječno vrijeme potrebno za mehanizovani iskop:

$$T_{i1} = 0,16 + 1,4 + 0,08 + 0,16 = 1,8 \text{ h, za GTC}$$

$$T_{i2} = 0,25 + 0,55 + 0 + 0,25 = 1,0 \text{ h, za STC}$$

Vrijeme potrebno za promjenu pozicije bagera u servisnoj tunelskoj cijevi jednako je „0“ na osnovu predhodno objašnjene tehnologije (mogućnost rada sa jedne pozicije), dok je vrijeme dolaska i povlačenja sa čela nešto veće u odnosu na glavnu tunelsku cijev, zbog širine profila, odnosno nemogućnosti mimoilaženja sa drugom mehanizacijom koja se povlači sa radilišta kada bager mora čekati na određenoj udaljenosti od čela (uobičajeno iza prve poprečne veze posmatrano od čela servisne tunelske cijevi).

### 4.3 POTROŠNJA GORIVA I MAZIVA

Utrošak goriva dizel mehanizacije ovisi o snazi i efikasnosti pogonskog motora, dotrajalosti, gubicima mehaničkog i hidrauličnog prenosa, uslovima rada, opterećenju mehanizacije i vještini rukovaoca. Neki od ovih faktora su nemjerljivi i moguće ih je samo okvirno procijeniti, a potrošnja goriva najviše ovisi o bruto snazi potrebnoj za obavljanje nekog rada. Stoga je uobičajeno potrošnju dizel goriva ( $q_d$ ) računati preko specifične potrošnje goriva ( $q_{sp}$ ), snage motora bagera ( $P$ ) i koeficijenta opterećenja ( $k_{opt}$ ) koji izražava iznos potrebne ili angažovane snage u odnosu na maksimalnu snagu mašine:

$$q_d = \frac{q_{sp} \cdot P \cdot k_{opt}}{Q_{ot}}, (kg/m^3) \quad (9)$$

$$P_1 = 128,0 \text{ kW (HIDROMEK)} [4]$$

$$P_2 = 112,0 \text{ kW (HYUNDAI)} [5]$$

Specifična potrošnja goriva je masa goriva potrošena za jedan sat rada motora pri maksimalnom opterećenju i ovisi o efikasnosti motora i unutrašnjim gubicima. Za uobičajene radne dizel motore specifična potrošnja goriva iznosi 0,21 do 0,26 kg/kWh, gdje niže vrijednosti postižu moderni, tehnološki napredniji motori, kakvi su i bageri na iskupu tunela Hranjen, pa se za proračune može uzeti vrijednost:

$$q_{sp} = 0,21 \text{ kg/kWh}$$

Koeficijent opterećenja ovisi o vrsti mašine odnosno uslovima specifičnim za tehnologiju rada. Obzirom da se rad u podzemnim objektima u tunelu svrstava u teške uslove, za bagere možemo uzeti vrijednost definisanu u tabeli 5.

Tabela 5 - Koeficijent opterećenja hidrauličnih bagera

Vrsta mašine	Radni uslovi		
	laki	prosječni	teški
Hidraulični bager	0,5	0,55	0,6

$$q_{d1} = 0,19 \text{ kg/m}^3 = 0,22 \text{ l/m}^3 \text{ (HIDROMEK)}$$

$$q_{d2} = 0,17 \text{ kg/m}^3 = 0,20 \text{ l/m}^3 \text{ (HYUNDAI)}$$

$$(1,0 \text{ l dizel goriva} = 0,85 \text{ kg})$$

Potrošnja ulja i maziva ovisi o redovnim intervalima izmjene ulja i kapacitetima rezervoara i cijelog sistema podmazivanja, iako se javljaju određeni gubici, naročito zbog izgaranja, te u vanrednim situacijama zbog oštećenja sistema i isticanja ulja. Kapaciteti rezervoara i sistema podmazivanja su u načelu proporcionalni veličini i snazi mašine zbog čega se i potrošnja ovih materijala

dovesti u vezu sa snagom mašine. Uobičajeni odnos snage mašine i satne potrošnje ulja i maziva prikazan je u tabeli 6.

Tabela 6 – Potrošnja ulja i maziva ovisna o snazi

Vrsta ulja	Potrošnja ovisna o snazi (l/h)	HIDROMEK 220LC TX	HYUNDAI 220 LC 9S
Motorno ulje	$0,8 \cdot P \cdot 10^{-3}$	0,10	0,09
Ulje prenosa	$0,6 \cdot P \cdot 10^{-3}$	0,07	0,06
Hidraulično ulje	$0,15 \cdot P \cdot 10^{-3}$	0,02	0,01
Kompresorsko ulje	$0,15 \cdot P \cdot 10^{-3}$	0,02	0,01
Mast	$0,05 \cdot P \cdot 10^{-3}$	0,006	0,005

## 5 ANALIZA CIJENE ISKOPA

Za formiranje cijene izrade tunela postoje dvije vrste troškova, direktni i indirektni. U direktne troškove spadaju troškovi materijala za rad i pogonske energije (gorivo, mazivo, električna energija, voda, vazduh i dr.), troškovi opreme (amortizacija i održavanje) i troškovi proizvodne radne snage. Indirektni troškovi su troškovi neproizvodne radne snage (služba održavanja), tehničke službe (inženjeri, administracija...), opšti troškovi projekta (osiguranje radova, bankarske usluge i sl.), nepredviđeni troškovi i troškovi pripremnih radova. Neproizvodni troškovi se iskazuju kroz „menadžer faktor“ i iznose oko 25% (sa dobitom) od ukupne cijene izrade objekta [9].

### 5.1 DIREKTNI TROŠKOVI

**Troškovi goriva ( $T_n$ ) i maziva ( $T_m$ )**

$$G_s = q_{sp} \cdot P, (kg/h) \quad (10)$$

$$G_{s1} = 26,9 \text{ kg/h} = 31,6 \text{ l/h (HIDROMEK)}$$

$$G_{s2} = 23,5 \text{ kg/h} = 27,6 \text{ l/h (HYUNDAI)}$$

Za cijenu nafte  $\approx 1,33 \text{ €/l}$ , troškovi goriva su:

$$T_{n1} = 42,00 \text{ €/h}$$

$$T_{n2} = 36,70 \text{ €/h}$$

Maziva i ulja (5,0 % od troškova goriva):

$$T_{m1} = 2,10 \text{ €/h}$$

$$T_{m2} = 1,89 \text{ €/h}$$

**Troškovi amortizacije ( $A$ ) i održavanja ( $I$ )**

Za proračun vremenske satne amortizacije može se upotrijebiti linearna metoda na osnovu ukupne nabavne vrijednosti (NV) i ekonomičnog fonda sati (n) za mehanizaciju:

$$A = NV/n, (\text{€/h}) \quad (11)$$

$$NV_1 = 230.800,0 \text{ € (HIDROMEK)}$$

$$NV_2 = 128.200,0 \text{ € (HYUNDAI)}$$

$$n \text{ (za bagere)} = 17.000 \text{ h [9]}$$

$$A_1 = 13,60 \text{ €/h}$$

$$A_2 = 7,60 \text{ €/h}$$

Investiciono-tekuće održavanje (50,0% od „A“):

$$I_1 = 6,80 \text{ €/h}$$

$$I_2 = 3,80 \text{ €/h}$$

#### Troškovi radne snage

Neto satnica rukovaoca na bageru kod izrade tunela, ovisno o radnom iskustvu prosječno iznosi:

$$\text{Neto satnica} = 7,20 \text{ €/h}$$

$$\text{Bruto satnica} = 7,20 \text{ €/h} \cdot 1,7 \approx 12,20 \text{ €/h}$$

1,7 – koeficijent za obračun bruto plate [10]

#### Ukupni troškovi

$$T = \frac{T_n + T_m + A + I + 12,2}{S \cdot l} \cdot T_v, (\text{€/m}^3) \quad (12)$$

HIDROMEK 220LC TX:

$$T_1 = 1,51 \text{ €/m}^3 \text{ č.m, za GTC}$$

$$T_2 = 2,13 \text{ €/m}^3 \text{ č.m, za STC}$$

HYUNDAI Robex 220LC 9S:

$$T_1 = 1,23 \text{ €/m}^3 \text{ č.m, za GTC}$$

$$T_2 = 1,72 \text{ €/m}^3 \text{ č.m, za STC}$$

## 6 ZAKLJUČAK

Nedostatak adekvatnih ulaznih parametara, na osnovu kojih je moguće izvršiti razradu projektnih rješenja u cilju kvalitetne izrade podzemnih objekata ispravnim odabirom tehnologije rada, svakako predstavlja određenu vrstu izazova, a svakodnevno i aktivno učestvovanje u izradi tunela Hranjen od strane svih autora ovog rada upravo je koncipirano na tom pristupu.

Koncept mehanizvanog iskopa tunela koji je posmatran odvojeno od tehnološke operacije utovara i transporta, sa kojom u principu predstavlja zajedničku stavku „iskop“, imao je za cilj prikazati upotrebu moderne mehanizacije i prikazati tehnološka rješenja obzirom na metodu izrade tunela u skladu sa stvarnim uslovima radne sredine.

Klasičnim proračunima sa „in situ“ analizama pri izvođenju radova dokazana je tehnička opravdanost odabira tehnologije kako bi se zadovoljili zahtjevani dnevni kapaciteti koji proizilaze iz postojećih dinamičkih mogućnosti izrade tunela.

U konačnici, metodologija obrađenog tehnološkog procesa predstavlja jedini ispravan pristup, način i postupak po kojem se, spram tehničkih mogućnosti može izvoditi iskop tunela u slabim i veoma slabim stijenskim masama i kao takva ima za cilj dati stručni i naučni doprinos na praktičnom primjeru tunela Hranjen.

## LITERATURA

- [1] **Geotehnička misija G21 za tunel Hranjen**, knjiga Ct 1520, Ft 1210 – 1290, *DESIGN & QC d.o.o.*, Sarajevo, 2019.
- [2] Jovanović Petar: **Izrada podzemnih prostorija velikog profila**, *Rudarsko-geološki fakultet Beograd*, Beograd, 1984.
- [3] Kovačević Jovo: **Savremeno građenje u podzemlju**, *AMG knjiga Beograd*, Beograd, 2014.
- [4] Kujundžić Tripimir: **Rudarski i geotehnički strojevi**, *Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb*, Zagreb, 2015.
- [5] Tehničke specifikacije Hidromek CO.: **HMK 220LC TX**, *Turkey*, 2016.
- [6] Tehničke specifikacije Hyundai CO.: **HYUNDAI 220LC 9S**, *Republic of Korea*, 2011.
- [7] Popović Nemanja: **Naučne osnove projektovanja površinskih kopova, II prerađeno i dopunjeno izdanje**, *Rudarsko-geološki fakultet Tuzla*, Tuzla, 1984.
- [8] Popović Nemanja: **Naučne osnove projektovanja površinskih kopova, I izdanje**, *Veselin Masleša Sarajevo*, 1975.
- [9] Savić Slavko: **Kalkulacije u građevinarstvu, II izdanje**, *Građevinska knjiga Beograd*, Beograd, 2008.
- [10] <https://finprofi.ba/view-more/obracun-plate/161> (15.02.2024.).