

Željeznički tunel *Passante Ferroviario* u Milanu

Davorin Kolić, Antonio Nicola, Anne Brissaud

Ključne riječi

željeznički tunel *Passante Ferroviario*, trasa tunela, regionalna linija, državna linija, kolodvori, stroj EPB TBM, kemijska pjena

Key words

Passante Ferroviario railway tunnel, tunnel route, regional line, national line, train stations, EPB TBM machine, chemical foam

Mots clés

tunnel ferroviaire *Passante Ferroviario*, tracé du tunnel, ligne régionale, ligne nationale, gare ferroviaire, machine EPB TBM, mousse chimique

Ключевые слова

железнодорожный тоннель *Passante Ferroviario*, трасса тоннеля, региональная линия, государственная линия, вокзалы, машина EPB TBM, химическая пена

Schlüsselworte

Eisenbahntunnel, *Passante Ferroviario*, Tunneltrasse, regionale Linie, Staatliche Linie, Bahnhöfe, EPB TBM Maschine, chemischer Schaum

D. Kolić, A. Nicola, A. Brissaud

Stručni rad

Željeznički tunel *Passante Ferroviario* u Milanu

U radu je prikazana gradnja željezničkog tunela *Passante Ferroviario* u Milanu koji spaja kolodvore Porta Garibaldi i Porta Vittoria. Trasa tunela se sastoji od tri dijela ukupne duljine 4.568,00 m. Dvije tunelske cijevi buše se iznad razine podzemnih voda u aluvijalnom, pjeskovitom i šljunkovitom tlu. Opisan je rad bušaćeg stroja EPB TBM kojim su bušene tunelske cijevi. To je bio prvi stroj u Europi opremljen sustavom za proizvodnju kemijske pjene prema originalnom rješenju.

D. Kolić, A. Nicola, A. Brissaud

Professional paper

Passante Ferroviario railway tunnel in Milan

The construction of the *Passante Ferroviario* railway tunnel in Milan, which links Porta Garibaldi and Porta Vittoria train stations, is presented in the paper. The tunnel route is made of three parts, and the total length is 4,568.00 m. Two tunnel tubes were drilled above the ground water level in alluvial, sandy and gravelly soil. The operation of the drilling machine EPB TBM that was used to drill the tunnel tubes is described. This was the first machine in Europe that was equipped with the chemical foam injection system based on an original solution.

D. Kolić, A. Nicola, A. Brissaud

Ouvrage professionnel

Tunnel ferroviaire *Passante Ferroviario* à Milan

La construction du tunnel ferroviaire *Passante Ferroviario* à Milan, qui relie les gares ferroviaires de Porta Garibaldi et Porta Vittoria, est présentée dans l'ouvrage. Le tracé du tunnel est composé de trois parties, et la longueur totale est de 4.568,00 m. Les deux tubes du tunnel ont été réalisés au-dessus de la nappe souterraine dans un sol alluvial, sableux et graveleux. Le fonctionnement de la machine de forage EPB TBM utilisée pour creuser les tubes du tunnel est décrit. Cette machine a été la première machine en Europe qui a été équipée avec un système d'injection de la mousse chimique basé sur une solution originale.

Д. Колич, А. Никола, А. Бриссауд

Отраслевая работа

Железнодорожный тоннель *Passante Ferroviario* в Милане

В работе описано строительство железнодорожного тоннеля *Passante Ferroviario* в Милане, который соединяет вокзалы Порта Гарибальди и Порта Виттория. Трасса тоннеля состоит из трех частей общей длиной 4.568,00 метров. Две магистральные трубы тоннеля пробурены выше уровня грунтовых вод в аллювиальной, песчаной и гравийной почве. Описана работа буровой машины EPB TBM, которая применялась для бурения магистральных труб тоннеля. Это была первая машина в Европе, оборудованная системой инъектирования химической пены в соответствии с оригинальным решением.

D. Kolić, A. Nicola, A. Brissaud

Fachbericht

Eisenbahntunnel *Passante Ferroviario* in Milano

Im Artikel ist der Bau des Eisenbahntunnels *Passante Ferroviario*, der die Bahnhöfe Porta Garibaldi und Porta Vittoria verbindet, dargestellt. Die Trasse des Tunnels besteht aus drei Teilen mit Gesamtlänge von 4.568,00 m. Zwei Tunnelrohre bohrt man oberhalb des Grundwasserspiegels in alluvialem Sand - und Schotterboden. Beschrieben ist die Arbeit der Bohrmaschine EPB TBM mit der die Tunnelrohre gebohrt werden. Das war die erste Maschine in Europa ausgerüstet mit einem System für das Injizieren eines chemischen Schaums nach originaler Lösung.

Autori: Dr. sc. **Davorin Kolić**, dipl. ing. grad., Neuron Consult ZT, Pasching, Austrija; Ing. Dott. **Antonio Nicola**, CE, Impregilo, Milano, Italia; **Anne Brissaud**, NFM Technologies, Lyon, France

1 Uvod

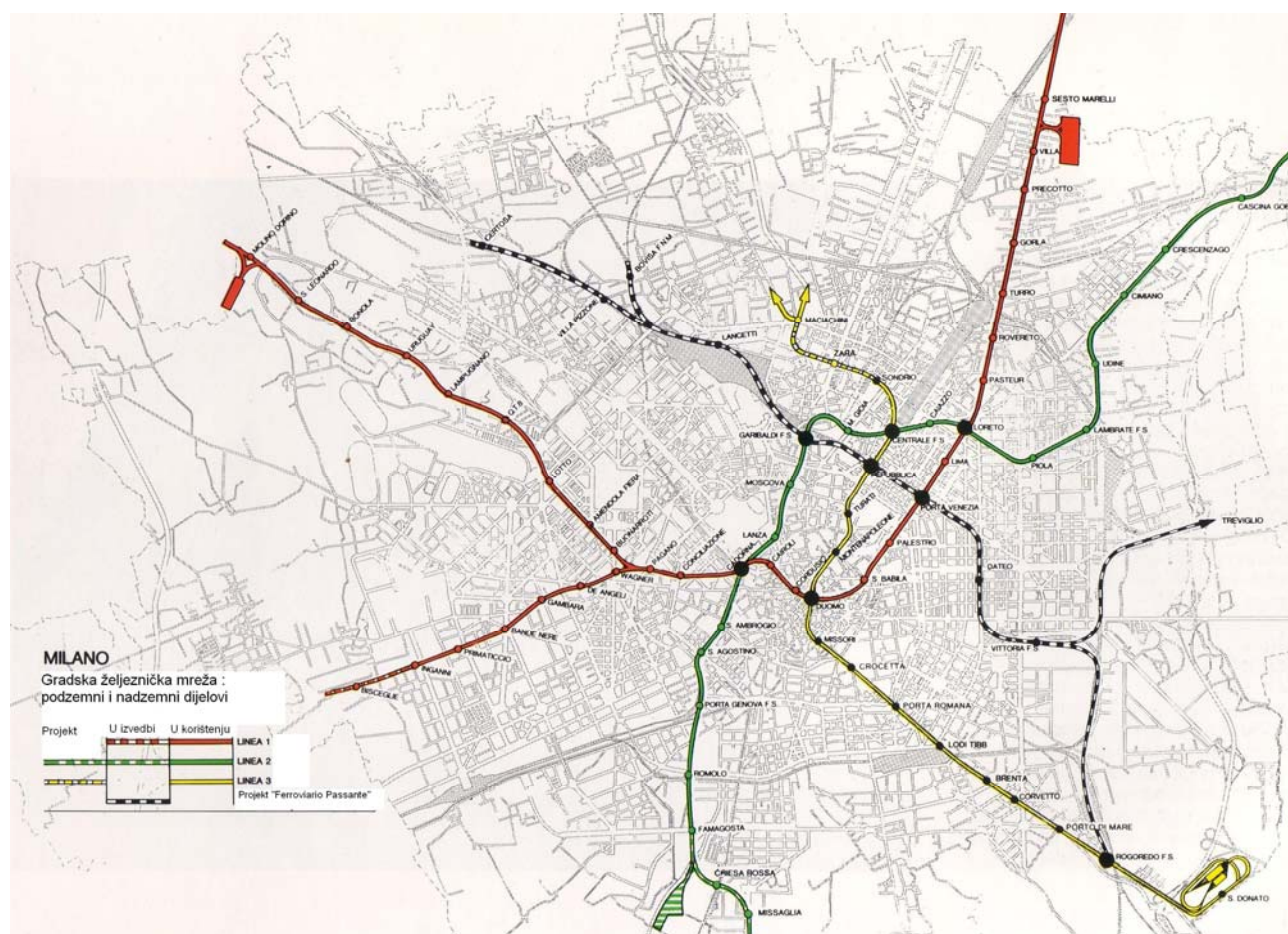
Grad Milano smješten je na sjeveru Italije (slika 1.), a prema popisu iz 2010. godine, ima 1,3 milijuna stanovnika. U njemu se nalaze dva glavna željeznička kolodvora - Porta Garibaldi i Porta Vittoria. Ti su kolodvori čelnog tipa i nisu izravno spojeni što je u skladu s načinom gradnje koji je prevladavao u devetnaestom stoljeću. Stoga bi nova željeznička linija, ukupne duljine 18.360 m, trebala povezivati kolodvore Porta Garibaldi i Porta Vittoria s regionalnim i državnim linijama te s kolodvorom Bovisa i Certosa koji se nalaze u sjeverozapadnom dijelu grada. Željeznički promet kroz Milano poboljšat će se između ostalog i gradnjom nove djelomično podzemne linije, kojom će se osigurati veza s regionalnom i državnom željezničkom mrežom te koja će povezivati i dva glavna željeznička kolodvora ovoga grada. Nova željeznička linija nosi naziv *Passante Ferroviario* (željeznički prolaz), a također je na četiri mjesta povezana i s postojećom gradskom mrežom.

Problem povezivanja čelnih kolodvora (takozvanih terminala) uspješno je riješen njihovim izravnim spajanjem u mnogim europskim gradovima kao što su München,



Slika 1. Lokacija projekta u Europi

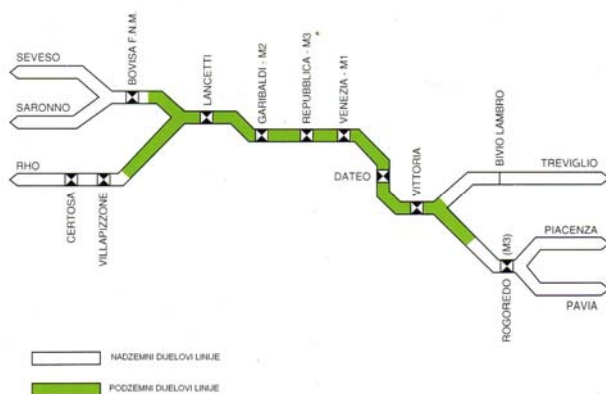
Oslo, London i Bruxelles, a radovi povezivanja su upravo u toku u Beču. Svi se takvi spojevi izvode ispod zemlje jer je površina terena zauzeta građevinama. U



Slika 2. Prikaz milanske željezničke mreže i podzemne željeznice - nova linija *Passante Ferroviario* označena je crno-bijelom linijom [3]

Milano su podzemno rješenje prihvatili grad, Državna i međunarodna željeznička mreža (FS) i Sjevernomilanske željeznice (FNM). U tom je smislu zaključen ugovor između pokrajine Lombardije, grada Milana, Državnih željeznica (FS) i Sjevernomilanskih željeznica (FNM). Novom će se linijom osigurati podzemna veza između kolodvora: Vittorie na jugoistoku, Garibaldi u središnjem dijelu grada te Bovisa i Certosa na sjeverozapadu Milana [3], [4]. Planirana su i tri spoja te nove linije s postojećim milanskim sustavom podzemne željeznice, i to na raskrižjima podzemnih postaja (stanice podzemne željeznice: Garibaldi, Republica i Venezia) (slika 2.). Sveukupna duljina nove željezničke linije (slika 2., crtkana crno-bijela linija) iznosi 18,36 km, s tim da duljina podzemnog dijela iznosi 11,3 km. Konzorcij „PASSANTE Scarl“ (vidi popis sudionika na projektu) dobio je posao izvođenja na tri dionice: 3P, 5P i 6P u ukupnoj duljini od 4568 m [2], [4].

Od toga 4003 m otpada na izvođenje tunela tunelskim bušačim strojem (TBM), dok će se u preostaloj duljini izvoditi podzemne građevine: raskrižje Aprica i podzemna postaja Lancetti (slika 3.) [3].



Slika 3. Situacijski prikaz nove željezničke linije *Passante Ferroviario* ukupne duljine 18,36 km (podzemne su dionice označene zelenom bojom) [4]

Pri izvođenju podzemnih radova prednost bi se trebala dati postupku izvođenja zasipavanjem, tj. gradnji zasutog tunela, jer je u konkretnom slučaju debljina nadsloja mala, a tlo je porozno i meko. Konačno je usvojeno bušenje TBM-om jer se tako ostvaruje minimalni konflikt s postojećim građevinama, najmanji utjecaj na razvojne potencijale postojećih građevina na površini i željezničke linije, a to je i jedini način kojim se može sigurno i trajno osigurati stabilnost na čelu iskopa. Upravo ta stabilnost na čelu iskopa ključan je faktor u iskopu bilo kojeg tunela jer bi se u slučaju nestabilnosti mogla ugroziti sigurnost ljudi i građevina u gusto naseljenim urbanim sredinama.

Stoga je odlučeno da se tunelski bušači stroj rabi za iskop tunela s jednim kolosijekom (dvije cijevi) na dionicama 3P, 5P i 6P željezničke linije između kolodvora Villapizzone - Lancetti - Porta Garibaldi u duljini od približno 2000 m.

Iskop tunela TBM-om trebao je početi od kolodvora Villapizzone metodom zasipavanja, gdje je TBM i postavljen. Stroj kopa na potezu do objekta Aprica i postaje Lancetti iz dalje prema kolodvoru Porta Garibaldi. Kod građevina Aprica i Lancetti stroj se provlači kroz samu građevinu bez bušenja, klizanjem po tračnicama učvršćenima na podnožnu ploču. Na kolodvoru Porta Garibaldi, stroj se probija kroz zid, gdje se rastavlja i u dijelovima prenosi natrag do početnog okna na stanici Villapizzone radi bušenja druge cijevi. Osnovni razlog zbog kojeg se stroj vraća na početno mjesto jest činjenica da na kolodvoru Villapizzone već postoji pribor i oprema za strojni iskop i odvoz iskopanog materijala (slika 3.).

2 Opis projekta

2.1 Geometrijski i geološki uvjeti tunela

Tlocrtno su obje linije s jednom cijevi položene tako da na potezu između Villapizzonea i Porta Garibaldi bilje-



Slika 4. Uzdužni presjek linije *Passante Ferroviario* s označenim dionicama na kojima se iskop obavlja TBM-om [4]

žimo nekoliko zavoja pri čemu minimalni radijus zakrivljenosti iznosi 360 m, a karakteristike obloge su zadovoljavajuće za horizontalne krivine radijusa 300 m. Stroj TBM može bušiti u krivinama i do 200 m radijusa zahvaljujući konstrukciji, tj. zglobnoj izvedbi štita.

Iz uzdužnog se presjeka (slika 4.) vidi da je linija položena dosta blizu površine tla, pa tako visina nadsloja varira od 4 do 15 m, a prosječna je dubina 8 m. Stoga, odnos iskopanog promjera i nadsloja varira od 0,5 do 2,0, s tim da je prosječna vrijednost otprilike 1,0 na gotovo čitavoj duljini trase.

Tuneli prolaze kroz meko tlo: radi se o aluvijalnom, pjeskovitom i šljunkovitom tlu u zoni iznad razine podzemnih voda. U području Milana aluvij se sastoji od fluvio-glacijalnih naslaga pijeska i šljunka, s tim da se veličina oblutaka uglavnom kreće do najviše 100 mm, ali ipak u rijetkim slučajevima doseže i do 300 mm. Očito je da se u čelu tunela može očekivati vrlo porozan materijal (poroznost varira od 33 % do 38 %). Radi se uglavnom o nestabilnom materijalu zbog čega se čelo iskopa trebalo podupirati u toku iskopavanja. Abrazivnost pijeska prilično je velika [5].

Karakteristični podaci:

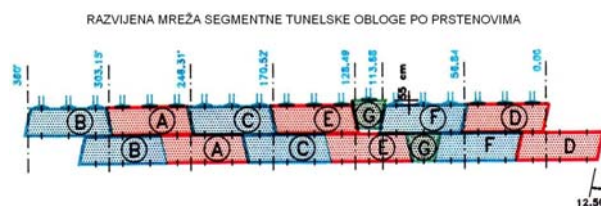
- kut trenja: 35 stupnjeva (32-35 stupnjeva)
- gustoća: 20 kN/m³
- kohezija Cu: 0
- granulometrijski sastav: veličina <0,074 mm - 20 % (glina < 5 %)
veličina >2 mm - 70 %
veličina > 10 mm - 10 % (do 100 mm)

2.2 Konceptija segmentne obloge

Segmentna obloga tunela izvedena je pomoću prstena širine 1,20 m. Obloga se sastoji od prstena unutarnjeg promjera 6,90 m i debljine 30 cm. Izrađuje se od betona razreda C30/37 u pogonu za izradu predgotovljenih elemenata smještenom izvan grada, odakle se svaki prsten zasebno kamionima prevozi do mjesta ugradnje.

Svaki se prsten sastoji se od 7 segmenata (slika 5.), a koristi se univerzalnim načelom prstena pri čemu se definira konusni prsten s konusom prema van na obje strane prstena (slika 6., tlocrt 1-1). Zbog toga vanjskog konusa širina prstena na jednoj strani iznosi 1,22 m, a na drugoj 1,18 m. Takav je oblik zadan da bi se postigao minimalni radijus od 300 m s rotacijom prstena u svakom koraku instalacije te prilagodbom horizontalnim i vertikalnim linijama kretanja.

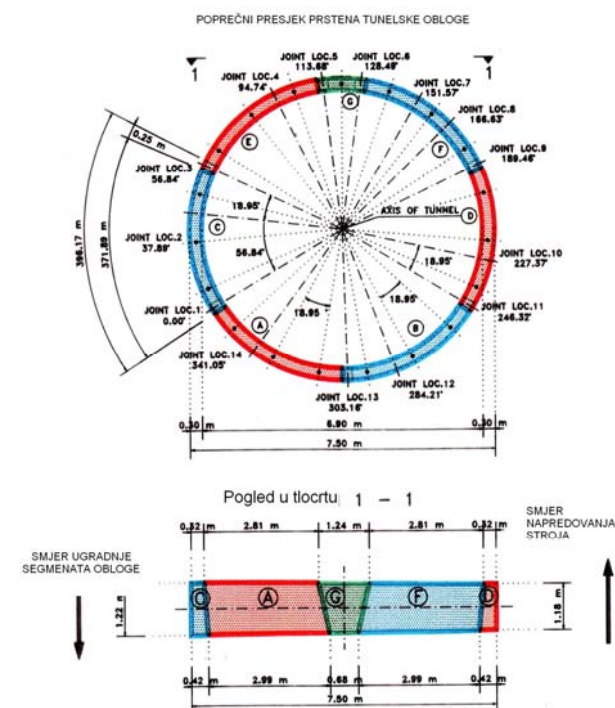
Na rasklopljenom prikazu prstena (slika 5.) vidimo da se prsten sastoji od jednog trapeznog segmenta ("B"),



Slika 5. Prikaz prstena s redosljedom instaliranja dvaju susjednih prstenva od kojih se sastoji univerzalna segmentna obloga tunela na projektu

pet rompskih segmenata ("A", "C", "D", "E" i "F") i jednoga maloga trapeznog veznog segmenta "G". Raspored montaže svakog prstena rađen je redosljedom: B-A-D-C-F-E i G, s tim da se svaki prsten počinje montirati sa segmentom "B" na nekom drugom položaju po obodu prstena unutar kruga od 360 stupnjeva, a u skladu s potrebama ispravnog praćenja geometrijskog oblika trase tunela minimalnog radijusa od 360 m [6].

Odluka o zajedničkoj upotrebi trapeznih i rompskih segmenata prstena tunelske obloge donesena je radi jednostavnije montaže te da bi se smanjila pojava pukotina u toku spajanja. Na poprečnom presjeku prstena (slika 6. gore) vidimo položaj svih segmenata prstena s rasporedom spojnih trnova koji su razmješteni na jednakim razmacima po obodu prstena [7]. Na ovom su se projektu segmenti prvi put spajali plastičnim trnovima tipa CONEX, dok su u uzdužnim spojnim reškama vodilice od recikliranog plastičnog materijala (slika 13.a i 16.b) [7].

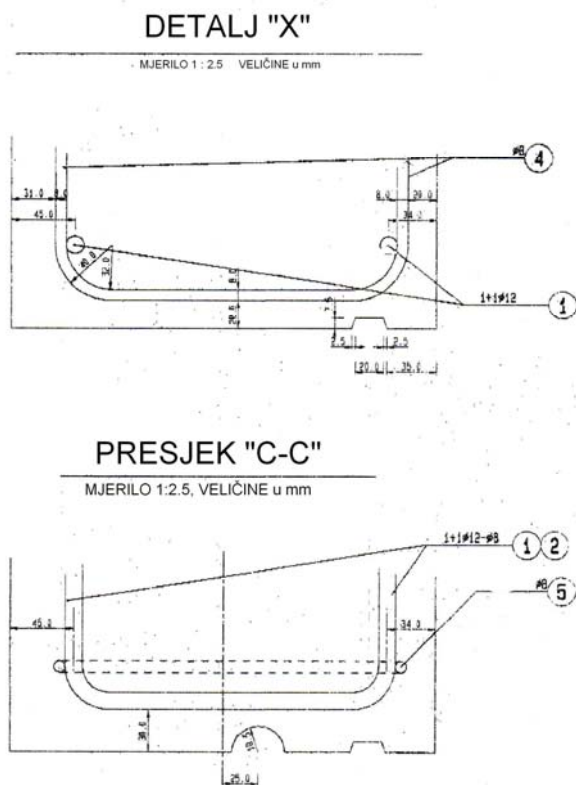


Slika 6. Poprečni presjek i raspored tipičnoga univerzalnog prstena tunelske segmentne obloge, s podjelom prstena na segmente prema zahtjevima koji su definirani za projekt

Plastični trnovi i vodilice razvijeni su nekoliko godina prije početka milanskog projekta (1991. godine) i to zato da bi se ubrzao postupak montaže obloge, da bi se ograničilo stvaranje pukotina u oblozi u toku instalacije uvođenjem plastičnih spojnih dijelova u reške te da bi se ostvarila elastoplastična zaštita od krutog kontakta između betonskih površina obloge. Za sadašnju je veličinu poprečnog presjeka prstena (unutarnji promjer 6,90 m, debljina obloge 30 cm i širina prstena 1,20 m) proračunano da je potrebno 19 plastičnih trnova u reški prstena te 7 vodilica promjera 35 mm i duljine 80 cm u spojevima prstena. Plastični trnovi kojima se spajaju segmenti djeluju na sile izvlačenja i posmika, dok su vodilice u uzdužnim spojevima ljepilom povezane u utoru betona te djeluju na radijalni posmik.

2.3 Armiranje segmentne obloge

Armatura za segmentnu oblogu dimenzionirana je u skladu s talijanskim normama za armirani beton, a segmenti su proračunani na opterećenje od okolnog tla te na sile koje se pojavljuju tijekom montaže. Nastojalo se, međutim, da se količina armature svede na minimum. Tipični armaturni koševi prikazani na slici 7. pokazuju da se kao zaštita protiv savijanja upotrebljavaju osnovne armaturne šipke promjera 12 mm, dok se šipke promjera 8 ili čak 6 mm upotrebljavaju kao poprečna armatura i spone na krajevima segmenata [6].



Slika 7. Armaturni koš s uzdužnom armaturom, sponama i detaljima armiranja na krajevima segmenata

Prosječna je količina armature za čitav tunel definirana vrijednostima koje su iskazane u tablici 1., pri čemu je u obzir uzeta širina prstena 1,20 m i debljina 30 cm.

Osim armaturnih detalja, koji su prikazani na slici 7., u otvore trnova treba ugraditi i dodatnu spiralnu armaturu za preuzimanje vlačnih sila koje se razvijaju oko trnova zbog radijalnih sila koje se aktiviraju preko elastičnih dijelova trnova.

Tablica 1. Prosječna količina armature potrebne za segmentnu oblogu

Ukupna količina armature po prstenu	518,88 kg
Količina betona po prstenu, segment $t = 30$ cm	14,053 m ³
Količina armature po kubnom metru betona	36,92 kg/m ³
Količina armature po dužnom metru tunela	432,4 kg/m ¹

3 Projektiranje i izrada TBM-a

Tunelski bušaći stroj (TBM) za izvođenje tunelskog dijela projekta zamišljen je kao štít za izjednačavanje tlaka tla (EPBM) zglobne izvedbe, s mogućnošću kopanja u promjeru od 8,03 m (s fiksnim dodatnim zahvatom od 15 mm) (slika 8.). Stroj je opremljen sustavom za injektiranje kemijske pjene u skladu s postupkom Obayashi [5].

U fazi ocjenjivanja, tj. prije same izrade stroja, analizirani su rezultati koji bi se mogli postignuti ako se umjesto predloženog rješenja primijeni štít s isplakom koji se obično upotrebljava u raznim vrstama mekoga aluvijalnog tla. Ustanovljeno je da taj sustav ima brojne nedostatke:

- Aluvijalno tlo na području projekta iznimno je porozno i bez dodavanja vode. Stoga bi upotreba stroja temeljenog na iskorištavanju isplake za stabiliziranje čela iskopa, zahtijevalo unošenje velike količine mulja i vode, čime bi se na prednjem dijelu stroja uspostavio "kolač" te bi se kontrolirala stabilnost na čelu iskopa. Zbog velike poroznosti tla može se očekivati da bi se velika količina isplake jednostavno izgubila u podzemlju te da bi zbog male debljine nadsloja moglo doći do ozbiljnog slijeganja.
- Granulometrijska krivulja pokazuje da je u ovom području materijal veoma heterogen i da sadrži mnogo šljunka i oblutaka, a otežava hidrauličku obradu tla te dovodi u pitanje stabilnost na čelu iskopa.
- Kako se iskopani materijal ne može odvoziti bez prethodne obrade to bi, zbog velike količine iskopa (190.000 m³), mogao postati značajan tehnološki problem.



Slika 8. Postavljeni stroj TBM EPBM u tvornici NFM u Lyonu (Francuska) [6]

Stoga se na ovom projektu upotrebljava stroj EPBM koji funkcionira po načelima koja su tipična za ovu vrstu tunelskih bušaćih strojeva [13, 14]:

- Iskop obavlja rotacijska glava s reznim zubima i diskovima, a iskopani se materijal miješa i pod tlakom ubacuje u komoru za iskopani materijal. Taj se miješani materijal zatim izbacuje iz komore pod atmosferskim tlakom putem Arhimedova puža (koji obično nazivamo pužastim transporterom).
- Stabilnost čela iskopa temelji se na upotrebi iskopanog materijala koji se miješa i unosi u komoru za iskopani materijal. Radi se o mješavini različite viskoznosti i plastičnosti koja održava i kontrolira izjednačenost tlaka na okolno tlo, čime se osigurava stabilnost čela iskopa tijekom napredovanja stroja.
- Tlak stroja na čelu iskopa treba biti usklađen s tlakom tla, a hidrauličko opterećenje varira ovisno o potisku samog stroja i količini iskopanog tla te brzini njegovog prolaza kroz pužasti transporter.
- Kako stroj napreduje, tlak na čelu ovisi o brzini izlaza iz transportera i potisku stroja na preše koje se nalaze na stražnjem dijelu štita. Tlak u komori za iskopani materijal kontroliraju 4 detektora tlaka (za 8-metarsko područje štita) koji su instalirani na stražnjem zidu komore za iskopani materijal (na takozvanoj *pregradi*). Ovim se regulacijskim sustavom izravno kontrolira i regulira stabilnost u zoni čela iskopa.
- Materijal koji se nalazi u komori za iskopani materijal treba držati pod tlakom, a količine zemljanog materijala koje se iskopavaju i ispuštaju preko pužastog transportera moraju biti stalno jednake. Zbog toga je brzina rotiranja puža promjenljiva i treba ju usklađivati s promjenljivom brzinom napredovanja stroja. Tlak u komori za iskopani materijal obično je za 0,2 bara veći od tlaka tla (tlak tla + tlak vode).

Taj se tlak postavlja unutar raspona u kojem je pasivni tlak tla gornja granica, dok je aktivni tlak tla donja granica.

- Ponekad se na čelu iskopa moraju injektirati fluidifikatori, što je potrebno kada nema dovoljno supstancija za vezivanje praha i gline, a iskopano tlo mora imati neka svojstva kao primjerice:
 - a) mora biti stišljivo
 - b) mora imati sposobnost plastičnog tečenja koje omogućuje adekvatno miješanje i ispuštanje kroz pužasti transporter.

Zato se ponekad, a to je bio slučaj i u Milanu, ubrzava pjena da bi se dobila potrebna svojstva plastičnog tečenja.

U tablici 2. dani su podaci o stroju.

Tablica 2. Kapacitet i ostali podaci o tunelskom bušaćem stroju [6, 14].

Promjer štita stroja	8,03 m
Duljina štita stroja	8,56 m
Duljina pratećeg vlaka	70 m
Težina	650 tona
Ukupna instalirana snaga	1.600 kW
Brzina rotacijske rezne glave	promjenljiva, od 0 do 1 okr/min u oba smjera, hidraulička pogonska jedinica
Trenutačna brzina prodiranja	70 mm/min
Nazivni okretni moment	9.000 kNm
Maksimalni neiskoristivi moment	13.500 kNm
Ukupni potisak	19 preša x 2.900 kN = 55.100 kN
Podizač segmenta	hod +/- 220 stupnjeva

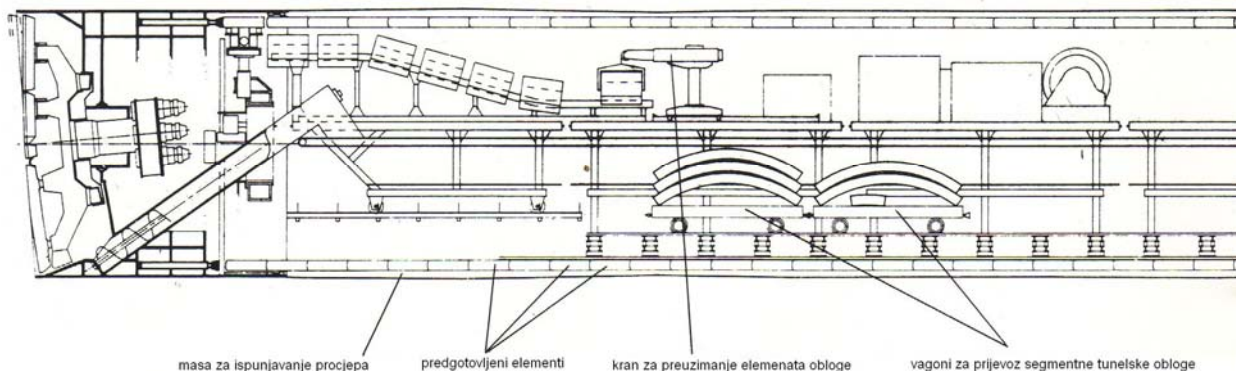
Kako se EPBM upotrebljava u poroznom tlu s niskim nadslojem, valja primijeniti i neke dodatne mjere u svrhu kontroliranja i smanjivanja površinskih slijeganja. Najveća kretanja na površini razvijaju se u trenutku kada segmentna obloga napušta rep štita te kada prostor između obloge i iskopanog tla još nije ispunjen (slika 9.).

Da bi se ispunio prostor između segmentne obloge i iskopanog tla rabi se postupak Hochtief s ekstrudiranim betonom. Taj postupak omogućuje trenutačno ispunjavanje prstenastog prostora između segmenata i tla. Zbog pretlaka koji se razvija u toku ovog injektiranja, ekstrudirani beton nosi tlo i sprečava njegovu dekompresiju i popuštanje.

Osnovni podaci o stroju EPBM koji je upotrijebljen u milanskom projektu:

- Štit
 - rezna glava promjera 8,03 m s reznim zubima i diskovima

UZDUŽNI PRESJEK STROJA



Slika 9. Uzdužni presjek EPBM-a koji je upotrijebljen na projektu [5]

- rezne krune: 66 za svaki smjer okretanja, ukupno 132 krune montirane na držače
- rezni diskovi: 20 trostrukih valjkastih rezača (15½"), 6 razmještenih po obodu i 4 na prednjoj strani
- Tijelo štita
 - čelično kućište, zglobni pomak u četiri smjera
- Pužasti transporter
 - središnji puž promjera 800 mm, korak navoja 650 mm
- Podizač (erektor)
 - prstenasti jednoručni podizač tunelske obloge s mehaničkim zahvatom u sredini segmenta, radijsko upravljanje s kontrolnog pulta
- Stražnji zatvarač
 - prednja klizna oplata sa školjkastim zatvaračem od gume i savitljivog metala
- Injektiranje
 - metoda s ekstrudiranim betonom
- Sustav za injektiranje
 - 5 mlaznica na prednjoj strani, 16 otvora u tijelu štita, injektiranje tekuće kemijske smjese za injektiranje
- Mjerenje potiska tla
 - 4 detektora tlaka na stražnjem zidu komore za iskapani materijal
- Sustav navođenja
 - ZED 260 sa zglobnom jedinicom
- Sustav podrške
 - 5 osnovnih sklopova za glavnu opremu štita
 - 3 dodatna sklopa za dopremu električne energije, za ventilaciju i za komprimirani zrak
 - 2 vlaka za iskapani materijal i segmente
 - 1 vlak za mort

- Odvoz iskopanog materijala
 - trakasti transporter 58 m, širine 800 mm, kapacitet: 600 t/h
- Ventilacija
 - ventilator 20 m³/s, ventilacijska cijev promjera 1200 mm

4 Rješenje tunelske obloge i njegov utjecaj na kvalitetu montaže

Kao što je već navedeno, osnovno rješenje segmentne obloge temelji se na prstenu koji je podijeljen na šest segmenata i jedan konus. Segmenti od kojih se sastoji prsten trapeznog su i rompskog oblika, čime se omogućuje jednostavnija montaža. Po svojim geometrijskim karakteristikama prsten je univerzalnog tipa, projektiran za minimalni radijus od 300 m s vanjskim konusom od 2 cm na svakoj strani prstena (slika 6., dolje). Za spajanje obloge rabe se plastični trnovi u reškama prstena, tj. plastične vodilice u uzdužnim reškama. Pri definiranju geometrijskog oblika poduzete su mjere kojima se omogućuje jednostavna montaža bez pojave pukotina ili ljuškanja [7].

4.1 Prvobitno rješenje segmenta i pojava pukotina

Već nakon montaže prvih 20-30 prstenova segmentne obloge uočena je loša kvaliteta obloge s brojnim pukotinama i ljuškanjem na rubovima (slika 10., lijevo i slika 13.). Zbog toga je zaključeno da uzrok treba tražiti u rješenju obloge ili u postupku montaže.

Istraživanjem uzroka ustanovljeno je da se pukotine pojavljuju zbog nekoliko razloga:

- 1) **Krivulja učenja:** kod timova koji rade na nekom postupku uvijek se pojavljuje "krivulja učenja": nakon nekoliko pokušaja kvaliteta konačnog proizvoda postaje sve bolja, kao rezultat faze učenja koja je neminovna u početku rada.

- 2) **Krutost zakrivljenoga spojnog elementa:** uz plastične trnove i vodilice, investitor je tražio i dodatne zakrivljene elemente za spajanje segmenata unutar prstena: na taj je način želio postignuti odgovarajuće spajanje unutar prstena jer su na ovom projektu prvi put upotrijebljene vodilice i trnovi, pa je investitor izrazio sumnju u pogledu ovalnosti, pomaka i funkcionalnosti brtvljenja. Međutim, kako je takav spoj bio suviše krut, geometrijski nedostaci u svakoj reški doveli su do ljuskanja, tj. pucanja kontaktnih betonskih površina ili rubnih dijelova.
- 3) **Ravne kontaktne površine:** bez obzira na kvalitetne segmente i dobru montažu, u stvarnosti je nemoguće instalirati sve segmente tako da budu točno na zamišljenim mjestima te da im oblik u potpunosti odgovara predviđanjima. Stoga se pokazalo da prvobitno rješenje s "teorijskim" geometrijskim detaljima nije prikladno, isto kao što nisu bili prikladni ni dodatni kruti zakrivljeni spojevi.

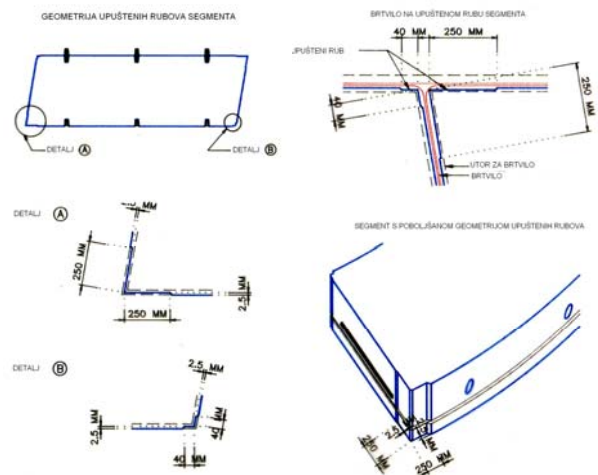
Zbog kombiniranog djelovanja spomenutih nedostataka na oblozi su se pojavile brojne pukotine i greške koje je trebalo naknadno sanirati, a to je dovelo do povećanja troškova.



Slika 10. Pojava pukotina na rubnim dijelovima segmentne obloge nakon montaže segmenata te uzdužna reška poboljšana ugradnjom čeličnih ploča [7]

4.2 Poboljšano rješenje segmenta i rezultati

Na temelju iskustava s drugih projekata na kojima su se javljali slični problemi s oblogom, te nakon analize konkretnog primjera u Milanu, ustanovljeno je kako treba razviti nov pristup da bi se na odgovarajući način izmijenilo prvobitno rješenje segmenata tunelske obloge. Iskustva stečena tijekom izvođenja pete linije podzemne željeznice u Münchenu, Lot 9-5 (1978.) pokazuju da je rješenje spoja vrlo važno za postizanje konačne kvalitete obloge, a to se osobito odnosi na vrijeme montaže prstena do zapune praznog prostora (slika 13.). Spomenuti primjer bio je destruktivniji i osjetljiviji na pojavu pukotina zbog primjene krutih metalnih svornjaka i spo-



Slika 11. Poboljšanje geometrijskog oblika segmenata pomoću rubnih upuštanja kontaktne plohe

ja pera i utora koji je jako osjetljiv na kontakte između segmenata, pa lako može doći do pojave pukotina u spojnim dijelovima. Mjere koje su primijenjene u Münchenu vrlo su brzo dovele do poboljšanja kvalitete obloge nakon montaže. Te su mjere odabrane prema vrsti problema: kruti metalni spojni elementi i smanjenje prostora koje bi dopustilo eventualan pomak ili rotaciju segmenta.

Na milanskom su projektu spojni elementi elastoplastični, a dodatno ukrućivanje zakrivljenim elementima uzrokovalo je prekomjerno ukrućivanje nakon zatezanja, s tim da su prije zatezanja određeni pomaci ipak bili mogući (promjer elementa 24 mm, otvor za element 36 mm). Osim toga, ravne površine u spoju ostavljale su dovoljno mjesta za prilagodbu krutom spoju samo ako se montiraju na točno određeno mjesto.

Predviđeno je rješenje s rubnim upuštanjima kontaktne plohe segmenta koja ostavljaju više prostora za pomak u rubnim područjima između susjednih segmenata (slika 11.).

Isto načelo treba primijeniti i na već proizvedene segmente, gdje se rubno upuštanje kontaktne plohe segmenta može simulirati čeličnim pločama koje se učvršćuju u uzdužnim spojevima (slika 10., desno), dok se za elemente koji još nisu proizvedeni mogu napraviti izmjene u kalupu za segmente (slika 12., lijevo). Promjenama su postignuti dobri rezultati i smanjila se pojava pukotina i ljuskanja, kao što se može vidjeti na uobičajenom elementu obloge te na posebnim dijelovima kao što su poprečna okna (slika 12, desno).



Slika 12. Povoljano rješenje segmenata s rubnim zakošenjima te prikaz mjesta na kojem je segmentna obloga izrezana da bi se dobilo poprečno okno [7]

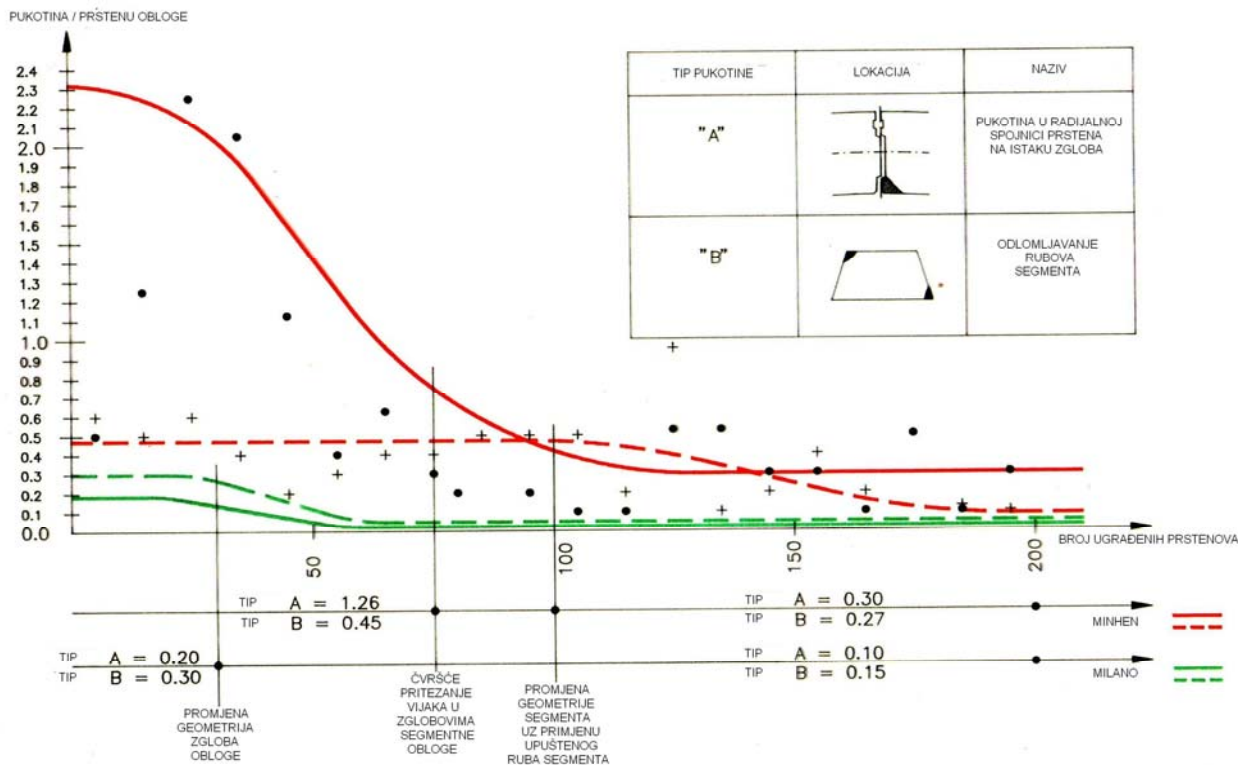
Nakon analize pojave pukotina i ljuskanja u oba se slučaja ispostavilo da su bitna poboljšanja ostvorena promjenom geometrijskog oblika u rubnom dijelu osnovnog segmenta, i to za obje vrste krutih spojeva kao što su metalni vijci te za mekše spojeve s jednim zakrivljenim metalnim vijkom. Takozvanom upuštenom izvedbom kontaktnih rubova segmenta otvara se prostor u rubnim dijelovima segmenata, a istovremeno se smanjuje područje kontakta između susjednih segmenata. Takvo rješenje geometrijskog oblika segmenata prihvaćeno je kao stan-

darno geometrijsko rješenje koje će se upotrebljavati u budućim projektima obloge.

5 Primjena štita i brzina napredovanja

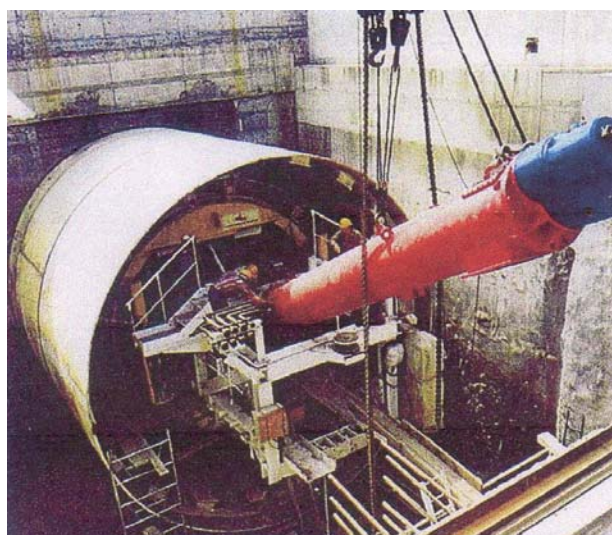
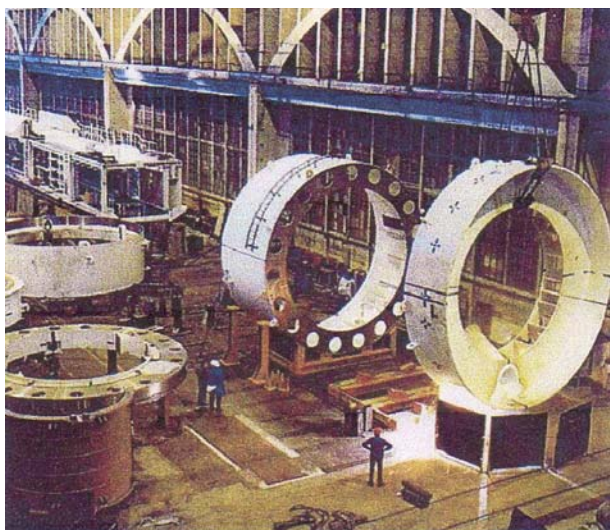
Iskop strojem EPBM počeo je u rujnu 1992. godine, a prosječna brzina napredovanja ustalila se nakon početnoga jednomjesečnog razdoblja učenja na otprilike 10 m/dan. Naravno, na samom početku radovi su napredovali prilično sporo, ponajprije zato što je na ovom projektu uvedeno nekoliko novih tehnologija: metoda s uređajem za izjednačivanje tlaka tla, ekstrudirani beton za ispunjavanje prostora između obloge i okolnog tla, injektiranje pjenu na čelu iskopa te spajanje segmenata obloge pomoću plastičnih trnova i vodilica.

Prva cijev duljine 2.054 m dovršena je nakon 14 mjeseci, a najviše je u jednom danu iskopano oko 17 metara (tablica 3.). Prije početka rada stroj je demontiran u proizvodnom pogonu u Lyonu te je u dijelovima transportiran u Milano. Tamo je montiran u početnom oknu i pripremljen za iskop (slike 14. i 15.). Da bi se moglo



Slika 13. Usporedna "krivulja učenja" iskazana brojem pukotina na segmentnoj oblozi za projekte "Münchenska metro linija 5, Lot 9-5" (1978.) i Passante Ferroviario, Milano (1992.) (puna linija: pukotina tipa "A", crtkana linija: pukotina tipa "B") [7]

početi s iskopom, u stražnjem dijelu stroja instalirana je okvirna konstrukcija. Zatim su aktivirane preše na zadnjem dijelu štita pa je tako bušuća glava uvedena u tunel.

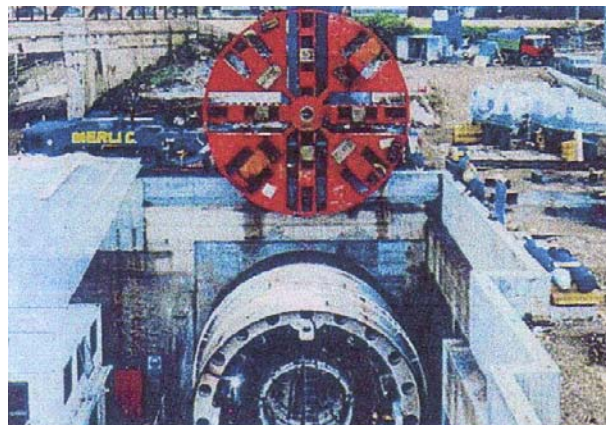


Slika 14. Montaža štita EPBM-a u tvornici i postavljanje pužastog transportera u polazno okno na gradilištu u Milanu

Nakon što je čitav stroj uveden u tunel, instaliran je sustav podrške s kompletnom opremom. Segmentna obloga dovedena je do početnog okna i spuštena na prijevozni vlak kojim su se segmenti prenosili, prsten po prsten, do podizača u stražnjem dijelu štita (slika 15., desno).

Brzina napredovanja prikazana je na dijagramu (slika 16.), a u iskazano vrijeme uključeno je i vrijeme potrebno za demontažu stroja i sustava podrške te za njihov prijenos kroz već izvedene građevine na stanicama Aprica i Lancetti. Prolaz kroz svaku građevinu trajao je i više od mjesec dana, a sam se postupak sastojao od sljedećih radnji: pripremanja tračnica za provođenje i montažu na podnožnu ploču, provođenja kroz stanicu i pripremanja

grede za reakciju radi pokretanja novog postupka iskopa. Nakon iskopa prve cijevi, graditeljima je trebalo 2 mjeseca da stroj prenesu do početnog mjesta te da obave predradnje za iskopavanje druge cijevi.



Slika 15. Postavljanje stroja u početno okno na gradilištu u Milanu; prikaz stražnjeg dijela stroja s podizačem kojim se segmenti postavljaju u prstenove segmentne obloge [7]

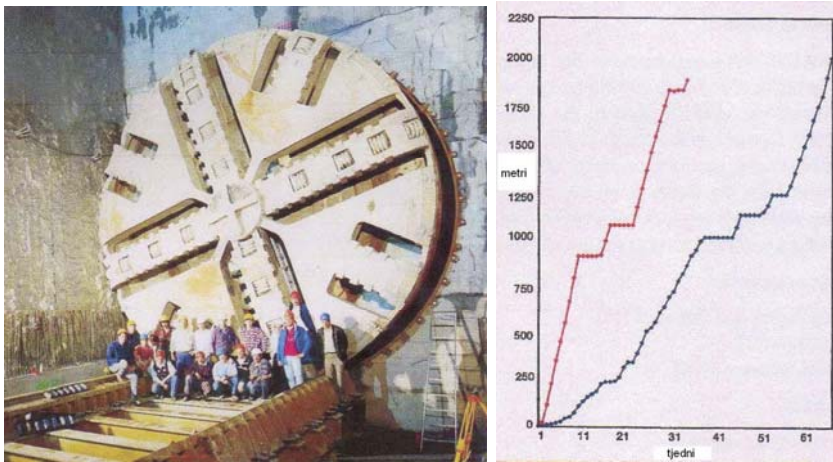
Iskop druge cijevi trajao je mnogo manje od iskopa prve cijevi, posao je završen za samo 7,5 mjeseci (tablica 3.).

Tablica 3. Iskaz napredovanja

Vrijeme	Prva cijev $L_1 = 2.054 \text{ m}$	Druga cijev $L_2 = 1.950 \text{ m}$
Najbolji dan (3 smjene)	14 prstenova (tj. otprilike 17 m)	20 prstenova (tj. otprilike 24 m)
Najbolji tjedan (7 dana, 3 smjene)	88 prstenova (tj. otprilike 106 m)	—
Najbolji mjesec (3 smjene)	267 prstenova (tj. otprilike 320 m, 26 dana)	390 prstenova (tj. otprilike 468 m, 31 dan)
Vrijeme izvođenja	14 mjeseci	7,5 mjeseci

Uz vrijeme potrebno za provedbu radnog postupka, te za pripremanje radnog prostora i postavljanje stroja, tre-

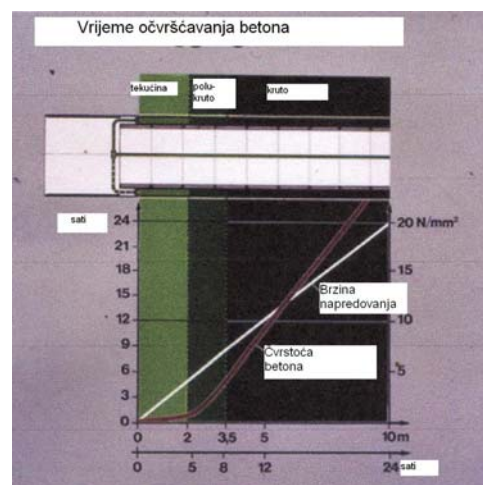
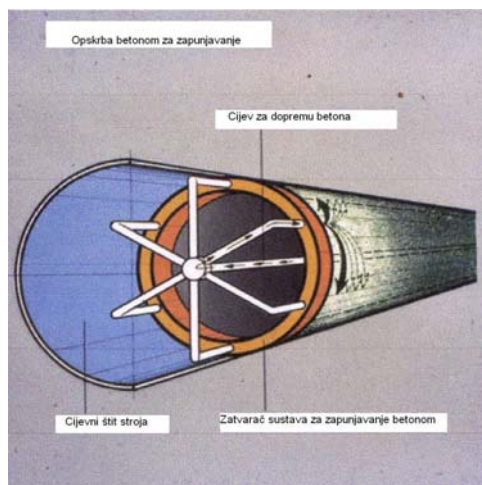
balo je predvidjeti i vrijeme za provlačenje stroja kroz stanice Aprica i Lancetti, dakle isto kao i pri izvođenju prve cijevi. Međutim, vrijeme učenja u ovom slučaju nije bilo potrebno jer su geološke značajke na mikrolokaciji već bile dobro poznate. Posao je u početnom razdoblju organiziran u dvije smjene (2 x 10 sati), ali je kasnije promijenjeno na rad u 3 smjene i takva je organizacija zadržana sve do probijanja tunela (3 x 8 sati, 7 dana u tjednu i 25 dana u mjesecu). Sljedeće je osoblje bilo angažirano na iskupu tunela (brojevi operatera iskazani su za jednu smjenu): 1 operater tunelskog stroja, 7 operatera za logističku podršku u tunelu i 6 operatera za rad izvan tunela. U radu u tunelu i na stroju sudjelovale



Slika 16. Završetak prvog tunela probijanjem kroz zid na kraju; dinamika iskopavanja za obje cijevi (prva cijev: plavo, druga cijev: crveno) [7]

su i osobe koje su radile na vlakovima za odvoz materijala i na poslovima dopreme i montaže segmenata. Na stroju je uglavnom radilo sljedeće osoblje: 1 voditelj smjene, 1 vozač, 1 električar, 1 strojarSKI tehničar i nekoliko radnika zaduženih za montažu segmenata i odvoz iskopanog materijala. Međutim, ponekad je i više osoba trebalo angažirati za obavljanje dodatnih aktivnosti potrebnih pri radu sa složenim strojevima temeljenim na novim tehnologijama kao što je EPBM [6].

Za obje je cijevi iskopavanje završeno bušenjem kroza zid na kraju tunela koji se, na mjestu završetka, uvijek izvodi bez armature. Na taj način rotacijska glava s reznim diskovima i krunama prolazi kroz betonski zid bez prepreka (slika 16., lijevo).



Slika 17. Postupak s ekstrudiranim betonom (lijevo); povećanje čvrstoće betona u vremenu i odgovarajuća brzina napredovanja (desno) [8]

6 Primjena novih tehnologija

6.1 Ekstrudirani beton

Metoda koja se temelji na upotrebi ekstrudirano g betona zanimljiva je zato što taj beton omogućuje trenutno zapunjavanje prostora između segmentne obloge i okolnog tla. Postupak se odvija u stražnjem dijelu štita a beton se nanosi kao tekuća mješavina kroz nekoliko mlaznica raspoređenih po obodu tunela [1]. Mlaznice za injektiranje (8 mlaznica) nalaze se na kliznom prstenu („završni zatvarač“) na stražnjem dijelu štita (slika 17., lijevo) [8]. Ekstrudirani se beton stalno drži pod tlakom pa tako djeluje radijalno po presjeku tunela. Na taj se način kontroliranim tlakom ekstrudirano g betona može kontrolirati i na minimum svesti slijeganje na površini, osobito u poroznom i mekom tlu [6].

Da bi se beton mogao crpiti, betonska mješavina treba imati odgovarajuću viskoznost. Tekući se beton doprema pomoću posebnog "vlaka s mortom" kojim se dovoze količine betona za ekstruziju, i to u skladu s napredovanjem stroja i zahtjevima za popunjavanjem prostora između obloge i okolnog tla. Betonska se mješavina sastoji od pijeska (1900 kg/m^3), cementa (250 kg/m^3), letječeg pepela (350 kg/m^3) i dodataka kao što su fluidifikator i usporivač. Također je

izuzetno važno kontrolirati i prilagođavati brzinu napredovanja stroja u skladu s vremenom povećanja čvrstoće ekstrudirano g betona (slika 17., desno) [8]. Prema zahtjevima iz plana napredovanja i porasta čvrstoće betona, tlačna čvrstoća treba iznositi oko 20 N/mm^2

približno 24 sata nakon što se ekstrudirani beton nanese na oko 10 m iza kraja štita.

6.2 Injektiranje kemijske pjene

Sustav injektiranja pjene razvio je Obayashi, a taj se sustav u vrijeme izvođenja milanskog projekta upotrebljavao na više od 150 raznih projekata, uglavnom na iskopima strojem EPBM [9]. U ovoj metodi pjena služi kao sredstvo za poboljšanje fluidnosti i smanjenje propusnosti materijala u komori za iskopani materijal. Ta metoda ima brojne prednosti u odnosu na tradicijske metode injektiranja koje se temelje na upotrebi guste isplake od gline/bentonita [13]: biorazgradiva je i omogućuje jednostavno zbrinjavanje materijala (što je bitno u urbanim područjima u kojima se primjenjuju vrlo stroge ekološke mjere), poboljšava protok iskopanog materijala pa se tako umanjuje mogućnost zagušenja komore

i smanjenja protoka, omogućuje bolju kontrolu stabilnosti na površini te poboljšava uvjete za odvoz materijala pomoću transportne trake [7].

Pjena koja se rabila na milanskom projektu sastoji se od mješavine sredstva za pjenjenje tipa *Foamex* i aditiva tipa *Drillam* temeljenog na celuloznom polimeru (stabilizator) koji se rabi za povećanje stabilnosti sredstva za pjenjenje. Sama je pjena mješavina zraka i tekućine s koeficijentom pjenjenja (odnos zraka i tekućine) koji varira od 5 do 8 ovisno o vrsti tla i brzini napredovanja štita. Na temelju spomenutih rješenja, u Milanu je u prethodnom desetljeću zabilježen znatan porast istraživanja i primjene pjene. Znanstvenim su istraživanjima razvijeni brojni novi pristupi koji su već sada spremni za praktičnu primjenu [9], [10], [12], [13], [15].

6.3 Plastični trnovi i vodilice kao spojna sredstva

Na ovom su projektu prvi put upotrijebljeni plastični trnovi u spojevima prstenova i plastične vodilice u uzdužnim spojevima segmenata. Plastični su trnovi samoblokirajući spojni elementi izrađeni od dviju vrsta plastike: tijelo trna izrađeno je od tvrde i krute plastike, a za izradu ekspanzirajućih prstenova koji se nalaze na tijelu trna rabi se elastična plastika [7]. Vodilice su također izrađene od plastičnog materijala, a zalijepljene su u utoru na površini betona u uzdužnom spoju segmenta. Tijekom montaže segmenata vodilica štiti betonske površine od pojave pukotina i ljuškanja. Kada se prsten zatvori, vodilica preuzima i posmično djelovanje pa tako štiti od radialnog proklizavanja susjednih segmenata. Tri su trna u jednom segmentu obloge kao spojni elementi prstena. Njihovo posmično djelovanje i posmik betona s armaturom u otvoru za trn dovoljni su za zadržavanje segmenta u traženom položaju u toku montaže, tj. prije zatvaranja prstena. Iako se primjenom sustava konektora s trnovima i vodilicama može umanjiti vrijeme montaže obloge, taj se sustav na ovom projektu nije rabio zbog brzine iskopavanja [11].

7 Koristi od projekta i tehničke implikacije

Primjenom rješenja kojim su spojena dva željeznička kolodvora u Milanu znatno se popravilo stanje u željezničkom prometu, a to je i bio osnovni cilj ovog projekta. S tehničkog stajališta, na ovom su projektu primijenjene mnoge nove tehnologije koje su se nakon toga primjenjivale i na mnogim drugim projektima diljem svijeta. Međutim, bez obzira na sve te nove metode i tehnologije, najvažnija zadaća na projektu bila je kontrola površinskih slijeganja. Dakle, iako su nove tehnologije dovele do novih rješenja, konačni rezultat primjene tih rješenja uvijek treba gledati u svjetlu kontrole površinskih slijeganja u vrlo prometnom urbanom području grada Milana.

SUDIONICI PROJEKTA

Projekt:

Passante Ferroviario di Milano, dionice 3P / 5P / 6P

Investitor:

M. M. Metropolitana Milanese, Strutture ed Infrastrutture del Territorio S.p.a., Milano, Italija

Projektant:

Italprogetti Srl, Rocksoil Spa, CP engineering Srl, REICO Spa

Savjetnik u projektiranju:

Dr. sc. Davorin Kolić, dipl. ing. građ., Mayreder Consult GmbH & Co.KG, Linz, Austrija

Geološki nadzor:

IFG Tettamanti, Genova, Italija

Nadzor na gradilištu:

Progetti & Costruzioni, Milano, Italija

Izvođač:

Konzorcij PASSANTE S.c.a.r.l. (Impreglio Spa kao vodeći izvođač te Torno i CogefarImpresit FIAT kao članovi konzorcija)

Proizvođač stroja:

NFM (Neyrpic Framatome Mechanique) prema licenci japanske tvrtke Mitsubishi Heavy Industries

Voditelj projekta:

Dr. Antonio Nicola, dipl.ing., Torno, Milano, 1998

Ukupni troškovi građenja:

225.195.217 \$ (za 4 km tunela i 2 podzemne stanice)

Vrijeme građenja:

Siječanj 1991. - studeni 1995.

Površinska su se slijeganja mjerila i pratila kroz čitavo razdoblje upotrebe tunelskog štita. Slijeganja zabilježena duž trasa tih dviju tunelskih cijevi iznosila su mnogo manje od 10 mm, u rijetkim su slučajevima slijeganja ipak dosegala i do 25 mm. Kontinuiranim mjerenjem slijeganja ustanovljeno je da je u područjima s nadslojem manjim od 10 m amplituda slijeganja takva da 25 % slijeganja nastaje otprilike 4 m ispred glave stroja EPBM, 65 % na duljini štita te otprilike 10 % iza štita. Takva je situacija nastala zbog meko poroznog tla kao materijala u kojem je obavljen iskop, tlaka bušaće glave i utjecaja na tlo ispred glave stroja te tlaka ekstrudiranog betona u stražnjem dijelu štita. Takvo površinsko ponašanje i rezultati već su zabilježeni na sličnim projektima kao npr. u Lyonu gdje je prvi put u svijetu upotrijebljen ekstrudirani beton [11].

Još je jedna pojava zabilježena nakon što je bušenje zaustavljeno tijekom vikenda: do slijeganja tla dolazilo je zbog materijala nagomilanog u komori za iskapani materijal. Zato je tlak stroja na čelo tunela bio manji od tlaka tijekom iskopa, a to je dovelo do pomaka i slijeganja

površine. To se dogodilo zato što je u tlo utisnuta prevelika količina pjene u posljednjim metrima prije zaustavljanja stroja, što je dovelo do bitno veće impregnacije tla, ali je istodobno otvorilo više mjesta u komori za iskapani materijal, pa je stoga tlak na čelo tunela smanjen. Da bi se površinska zona zaštitila od slijeganja, određene su preventivne mjere koje valja poduzeti ako stroj treba zaustaviti: u vremenu koje prethodi zaustavljanju stroja treba injektirati mnogo manje pjene nego inače, brzinu napredovanja treba smanjiti, a tlak u komori za materijal povećati, potisak stroja na stražnjem dijelu štita valja održavati i usklađivati u skladu s tlakom na čelu tunela, a otprilike 2-3 m³ trajne pjene ili druge polimerne otopine treba injektirati u komoru tijekom posljednjih okretaja rezne glave.

Sve se te mjere moraju poduzeti radi održavanja kontinuiranog tlaka u komori za materijal pri čemu taj tlak treba biti u skladu s obujmom iskapanog materijala koji valja izbaciti, tj. obujam i viskoznost materijala u komori moraju biti usklađeni s tlakom na čelu tunela.

LITERATURA

- [1] Babendererde S., 1986: *Extruded Concrete Lining*, Congresso internazionale su grandi opera sutterene, Firenze, June 1986, pp.8
- [2] Metropolitana Milanese, 1991: *Passante Ferroviario – Situazione dei lavori al 31. dicembre 1991*, L'informazione al servizio della città', pp.35-52
- [3] Metropolitana Milanese, 1992: *Qui c'è sotto un'idea per il nostro futuro – Il Passante Ferroviario*, L'informazione al servizio della città', pp.16
- [4] Metropolitana Milanese, 1994: *Collegamento ferroviario passante*, Strutture ed infrastrutture del territorio spa, pp.28
- [5] Peron, J.-Y.; Marcheselli, P. 1994: *Construction of the "Passante Ferroviario"* Link in Milano, Lots 3P-5P, 6P – Excavation by Large Earth Pressure Balanced Shield with Chemical Foam Injection", Tunnelling '94, IMM London, pp.679-707
- [6] Marcheselli, P.; Peron J.-Y. 1995: *Construction of the "Passante Ferroviario"* Link in Milano, Lots 3P-5P, 6P – Excavation by Large Earth Pressure Balanced Shield with Chemical Foam Injection", RETC 1995, Chapter 36, San Diego, June 1995, pp.459-483
- [7] Kolic, D. et al. 2000: *Development of Dowelled Connectors for Segmental Linings*, *Felsbau* 18 (2000), No.6, pp. 32-40
- [8] Babendererde, S.; Baendererde, J.O. 2001: *Extruded Concrete Lining – The Future Lining Technology for Industrialized Tunnelling*, RETC 2001, Chapter 55, San Diego, June 2001, pp.24
- [9] Langmaack, L., 2002: *Soil Conditioning for TBM Chances & Limits*, AFTES Journées Internationales, 21-23 octobre 2002, pp.3
- [10] Borio, L.; Peila, D.; Oggeri, C.; Pelizza, S. 2008: *Characterization of soil conditioning for mechanized tunnelling*, IATTMED 2008, pp.8
- [11] Kolić, D.; Balan, A.; Bordas, A.; Bouygues, O.; Guglielmetti, V. 2008: *Željeznički tuneli na liniji EOLE E u Parizu*, *Gradevinar* 60 (2008) 7, 615-624
- [12] Peila, D.; Oggeri, C.; Borio, L. 2008: *Influence of granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBS applications*, WTC 2008, Agra, India pp.881-891
- [13] Bäßler, K. 2008: *Entwicklung eines Zweikomponenten-Verpresssystems für Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb*, Tunnelbautaschenbuch 2008, VGE Verlag, S.263-304
- [14] Kolic, D., 2010: *Urban TBM Tunneling*, Seminar „New Technologies and Materials: Traffic Days 2010“, Four-Points Sheraton Zagreb, Feb.22-23, 2010, pp. 401-432 (in Croatian)
- [15] Borio, L., 2010: *Behaviour of Two Component Back-filling Grout used in Tunnel Boring Machine*, *Acta Geotechnica Slovenica* 2010, pp.20