

Željeznički tuneli na liniji EOLE E u Parizu

Davorin Kolić, Alain Balan, Andre Bordas, Olivier Bouygues, Vittorio Guglielmetti

Ključne riječi

EOLE (Ekspresna veza istok-zapad), Pariz, prometna linija, tunel, geološki uvjeti, projektiranje, izvedba

Key words

EOLE (East-West Express Link), Paris, transport link, tunnel, geological conditions, design, construction

Mots clés

EOLE (Est-Ouest Liaison Express), Paris, liaison de transport, tunnel, conditions géologiques, étude, construction riječi

Ключевые слова

EOLE (Экспресная связь восток-запад), Париж, линия движения, тоннель, геологические условия, проектирование, возведение

Schlüsselworte

EOLE Expressverbindung Ost-West), Paris, Verkehrsline, Tunnel, geologische Verhältnisse, Entwerfen, Ausführung

D. Kolić, A. Balan, A. Bordas, O. Bouygues, V. Guglielmetti

Stručni rad

Željeznički tuneli na liniji EOLE E u Parizu

EOLE je kratica od "Est-Ouest Liaison Express" (Ekspresna veza istok-zapad), a njena je izgradnja jedan od najvećih podzemnih graditeljskih projekata poduzetih u Parizu u posljednjim desetljećima. U radu su opisane osnovne karakteristike prometne linije, a detaljnije je prikazan projekt dvaju tunela kroz koje prolazi trasa. Posebno su istaknuti složeni geološki uvjeti sa tri glavna geološka sloja na trasi tunela i prikazane su provedene numeričke analize te načini izvedbe.

D. Kolić, A. Balan, A. Bordas, O. Bouygues, V. Guglielmetti

Professional paper

Railway tunnels on the EOLE E line in Paris

The EOLE is the acronym of "Est-Ouest Liaison Express" (East-West Express Link), and its construction ranks among the biggest underground construction projects undertaken in Paris over the past several decades. The authors describe basic features of this transport facility, and present in more detail two tunnels situated along the route. A particular emphasis is placed on complex geological conditions, with three principal geological formations encountered along the tunnel route. Numerical analyses and realization methods are also presented.

D. Kolić, A. Balan, A. Bordas, O. Bouygues, V. Guglielmetti

Ouvrage professionnel

Tunnels ferroviaires sur la ligne E EOLE à Paris

EOLE est l'acronyme de "Est-Ouest Liaison Express" et sa construction est considérée comme un des plus grands projets souterrains réalisés à Paris au cours des dernières décades. Les auteurs décrivent quelques caractéristiques typiques de cette ligne de transport, et présentent en plus de détail deux tunnels situés le long du tracé. L'accent spécial est mis sur les conditions géologiques complexes, avec trois formations géologiques principales rencontrées sur le tracé du tunnel. Les analyses numériques et les méthodes de réalisation sont également présentées.

Д. Колич, А. Балан, А. Бордас, О. Буйгэс, В. Гуглиелметти

Отраслевая работа

Железнодорожные тоннели на линии EOLE E в Париже

EOLE – сокращение от «Est-Ouest Liaison Express» (Экспресная связь восток-запад), а её строительство является одним из самых больших подземных строительных проектов, предпринятых в Париже в последние десятилетия. В работе описаны основные характеристики дорожной линии, а детальнее показан проект двух тоннелей, через которые проходит трасса. Особо подчеркнуты сложные геологические условия с тремя главными геологическими слоями на трассе тоннеля и показаны проведённые числовые анализы, а также способы возведения.

D. Kolić, A. Balan, A. Bordas, O. Bouygues, V. Guglielmetti

Fachbericht

Eisenbahntunnel an der Linie EOLE in Paris

EOLE ist die Abkürzung von "Est-Ouest Liaison Express" (Expressverbindung Ost-West). Deren Ausbau ist eines der grössten unterirdischen Bauprojekte die in Paris in den letzten Jahrzehnten unternommen wurden. Im Artikel beschreibt man die Grundmerkmale der Verkehrsline, wobei der Entwurf von zwei Tunnelen, durch die die Trasse verläuft, detailliert dargestellt ist. Besonders sind die komplizierten geologischen Verhältnisse hervorgehoben, mit drei geologischen Hauptschichten an der Tunneltrasse. Dargestellt sind die durchgeführten numerischen Analysen sowie die Ausführungsweise.

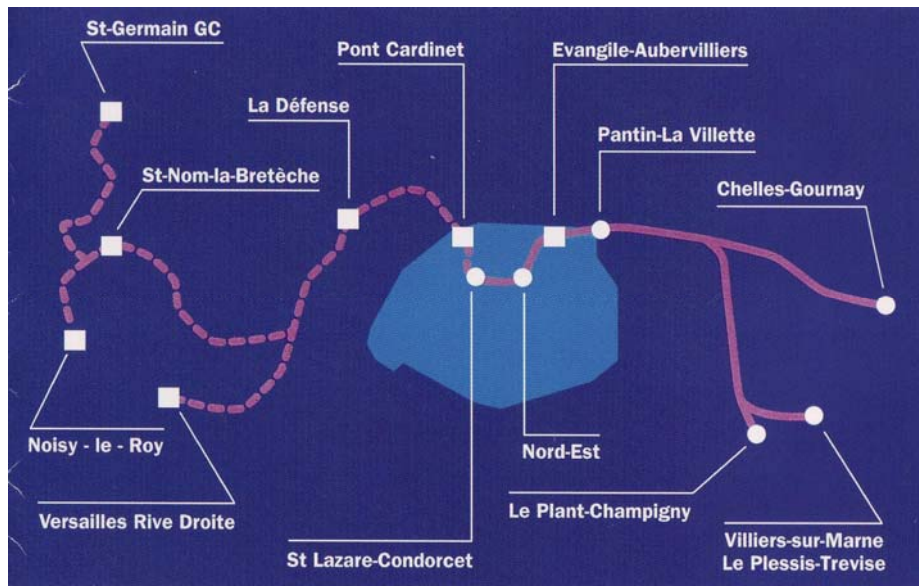
Autori: Podaci o autorima dani su u uokvirenom dijelu teksta – SUDIONICI U PROMETU

1 Uvod

Sustav podzemnog javnog prijevoza u Parizu sastoji se od linija gradske brze željeznice koje povezuju udaljena predgrađa sa središtem Pariza. Čitav sustav ima danas više od 400 stanica i javnim prijevozom pokriva golemo područje Pariza i širu parišku regiju. Kao dio mjera za

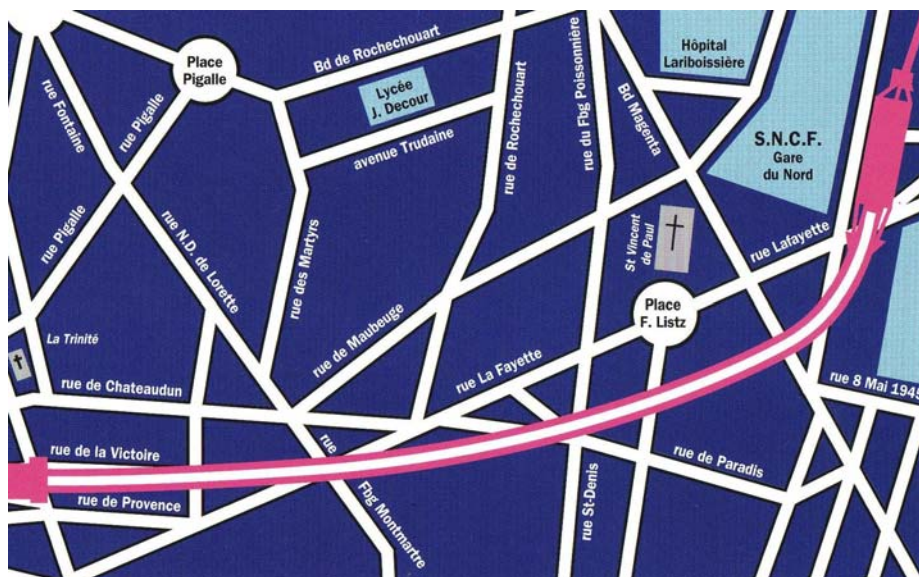
stanicama - Magenta je u blizini Gare du Nord, Condorcet-St.Lazare u centru grada, a protezat će se dalje na zapad do departmana Yvelines (slika 1.).

Linija EOLE morala je biti izvedena od dva dijela, pri čemu prvi dio uključuje željezničku prugu i podzemne stanice uključujući stanicu Concordet. Drugi dio uključuje



Slika 1. Plan EOLE RER linije "E" koja prolazi kroz Pariz s dionicom 35B koja povezuje stanice Nord-Est/Magenta i St. Lazare/Condorcet

čuje daljnjih 3 km tunela prema zapadu sve do spoja na postojeću zapadnu željezničku liniju, zatim izgradnju željezničke pruge i dvije nove R.E.R. stanice: Evangile Aubervilliers i Pont-Cardinet, koje trebaju biti dovršene do 2014. godine. Prvi dio linije je završen krajem 1999. godine i uključuje obje podzemne stanice - Magenta (poznata također pod imenom "Nord-Est") te Condorcet-St.Lazare, njihov spoj s prometnim tunelima, prilaznim dijelovima linije do stanice Magenta, željezničke linije na površini kao i novu stanicu u Le Plan Champigny.



Slika 2. Lokacija dionice 35B linije EOLE u središnjem dijelu Pariza

Jezgra prvog dijela linije EOLE jest izgradnja stanica Magenta i Condorcet i prometnih tunela između njih. Dionica 35B uključuje: dva gotovo usporedna prometna tunela svaki duljine 1670 m i tri povezna tunela duljine 200 m (poprečni prolazi) na južnom dijelu stanice Magenta između stanice s četiri kolosijeka i dvokolosiječnih prometnih tunela (slika 2.).

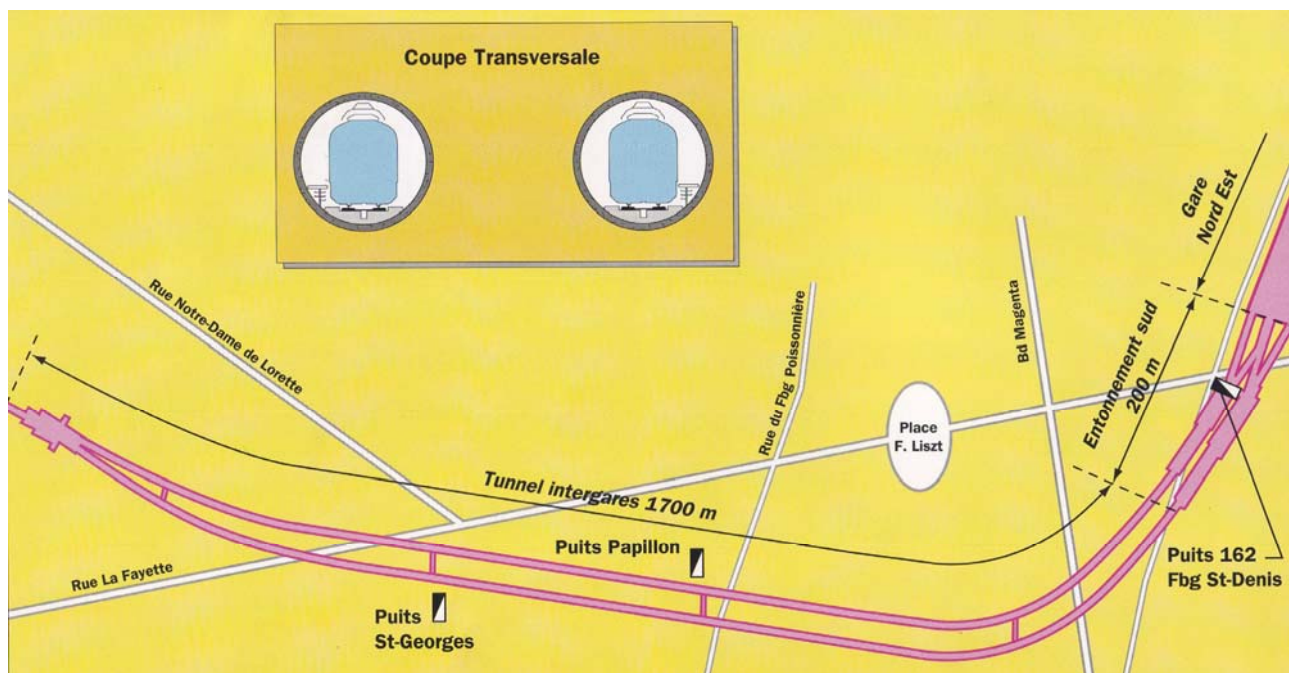
poboljšanje gustoće mreže javnog prometa planirana je nova brza linija po osi istok-zapad. Nova linija pod nazivom EOLE ("Est-Ouest Liaison Express") peta je brza željeznička linija (R.E.R. linija "E") u području Pariza. Povezivat će istočni dio šireg područja Pariza dvjema

duljini od 686 m odnosno 270 m s minimalnim polumjerom od 600 m. Veći je dio trase ravan (1097 m) (slika 3.). Uzdužni presjek pokazuje pad trase od stanice Magenta u smjeru stanice Condorcet uz maksimalni pad od 2,6 % na prvom ravnom dijelu trase, s time da su

2 Projekt i analiza

2.1 Trasa i koncept obloge

Dionica 35B ima dvije gotovo usporedne cijevi, a svaka je duljine 1670 m. Trasa prolazi kroz sam centar grada ispod zgrada iz 17. i 18. stoljeća. Horizontalni elementi trase imaju samo dva zakrivljenja u



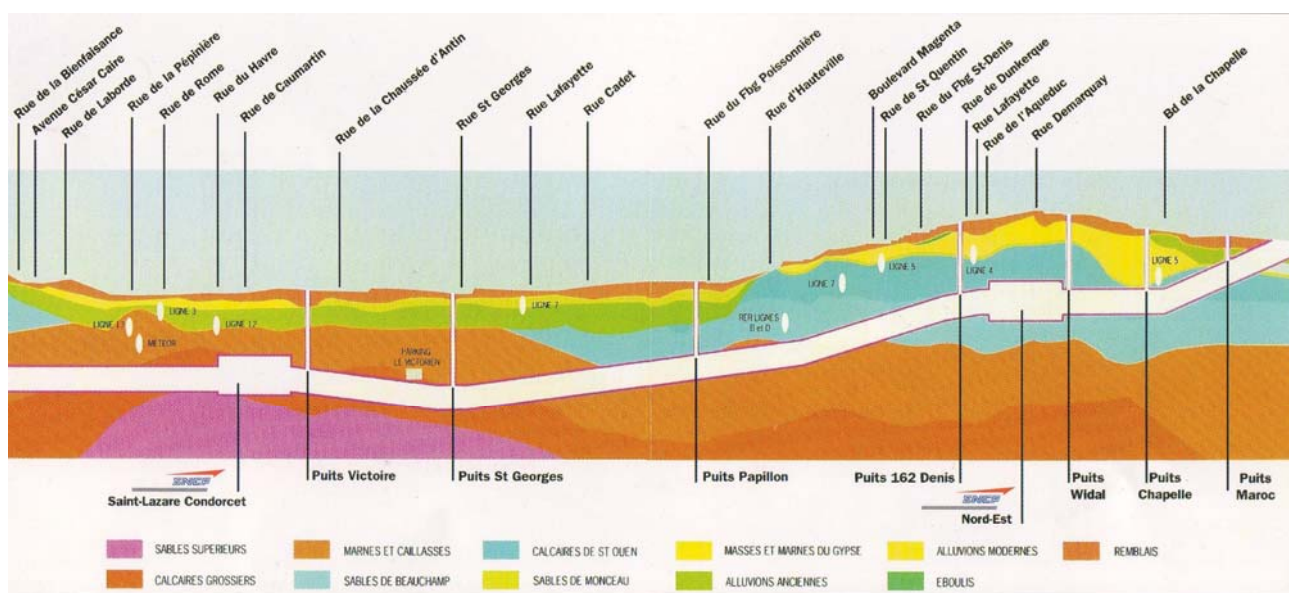
Slika3. Plan dionice 35B, uključujući prometne i povezne tunele

polumjeri u vertikalnoj ravnini 3000 m odnosno 10500 m (slika 4.). Geometrijski parametri trase i promjer iskopa tunela od 7,40 m te odabran način gradnje metodom štita odredili su oblik segmentne obloge. Kod optimizacije obloge uzeti su u obzir sljedeći parametri: minimalno vrijeme montaže, razmak zaglavnog elementa i raspoloživ prostor u repu štita.

Prsten segmentne obloge ima definiranu širinu od 1,40 m uz vanjski promjer obloge od 7,10 m i unutrašnji promjer od 6,40 m. Prsten je tipa "univerzalni prsten" i ima pet segmenata romboidnog i trapezoidnog oblika te je

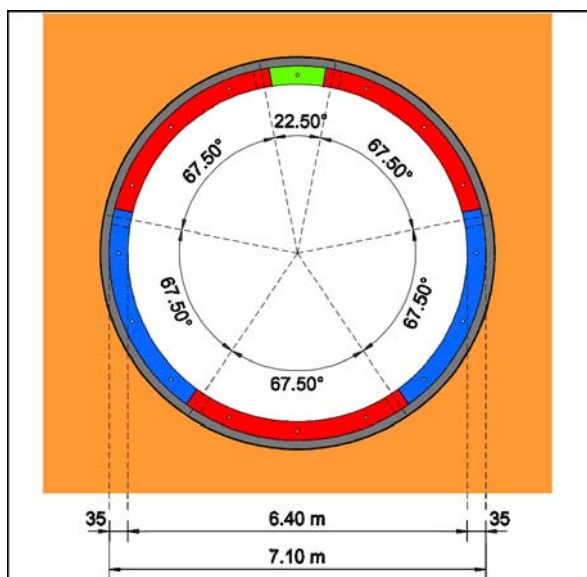
dan mali trapezoidni zaglavni element. Univerzalni je prsten takav tip prstena koji je konusnog oblika uz vanjsku konusnost od 4,0 cm a predviđen je za projektirani minimalni polumjer od 350 m. Kod optimizacije postupka montaže uzeti su u obzir sljedeći parametri: podjela prstena, orijentacija prstena, utjecaj interakcije između segmenata u prstenu, interakcija dvaju susjednih prstena, položaj deblje strane prstena za postupka montaže i položaj zaglavnog elementa tijekom montaže (slika 5.).

Premda danas izvedba i djelovanje stroja sa štitom i erektorom omogućuje pozicioniranje zaglavnog elementa



Slika 4. Uzdužni geološki presjek

po obodu svakog prstena, univerzalni je prsten predviđen s debljom stranom na početnom položaju 9:00 sati uz zaglavni element na položaju 12:00 sati (slika 5.).



Slika 5. Poprečni presjek jednocijevnoga prometnog tunela linije EOLE, dionica 35B s jednostrukom segmentnom oblogom

Takav projektni koncept osigurava da će ovisno o karakteristikama trase položaj zaglavnog elementa u većini slučajeva biti u gornjem dijelu prstena između 9:00 i 3:00 sata. Takav položaj zaglavnog elementa slijedi montažu svakog prstena u smjeru odozdo prema gore i olakšava pozicioniranje zaglavnog elementa i njegovu interakciju s drugim segmentima tijekom zatvaranja prstena zbog djelovanja gravitacije i vlastite mase segmenata.

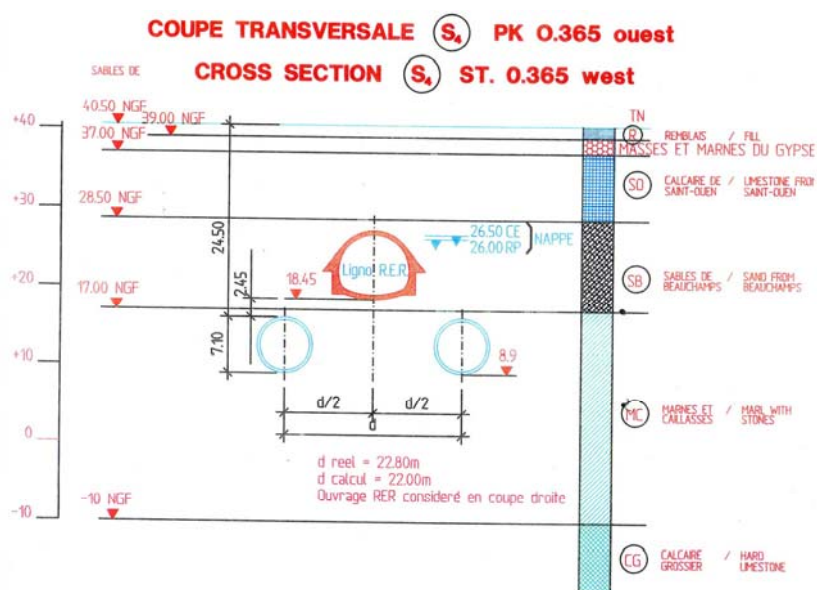
2.2 Geološki uvjeti

Trasa oba tunela prolazi kroz tri glavna geološka sloja počevši od stanice Magenta prema stanici Condorcet: slojevi pijeska tipa Beauchamp, lapor s kamenjem i tvrdi vapnenac. Pijesak tipa Beauchamp ima dobre geotehničke parametre u neporemećenim suhim uvjetima, ali gubi koheziju u kontaktu s vodom. Nestabilnost pješčanog sloja zajedno s neočekivanim slobodnim prostorima u slojevima lapora s kamenjem mogu uzrokovati slijeganje na površini, pa je to bio glavni razlog za odabir građenja metodom štita kojom se može uspješno prilagodavati različitim geološkim slojevima i dotocima vode. Koherentnost slojeva lapora s kamenjem (*marnes et caillasses*) ima vrlo dobre geotehničke parametre u suhim okolnostima kao i u

kontakta s vodom, ali posebna nestabilnost i slijedom toga problemi slijeganja mogu se očekivati pri oslobađanju oblutaka gipsa. Sloj tvrdog kamena (*calcaire grossier*) ima jednoosnu tlačnu čvrstoću od 10 MPa i modul elastičnosti od 3000 MPa, što ga kategorizira kao meki kamen.

Visina nadsloja prometnih tunela ne mijenja se zabrinjavajuće i ostaje u rasponu od 22,0 – 28,0 m. Vodno lice ostaje na istoj razini duž trase tunela i u rasponu je od 10,0 m (od okna 162 Denis prema stanici Magenta) do 23,0 m iznad krune tunela (od okna St. Georges prema stanici Condorcet) (slika 4.).

Posebna se pažnja morala posvetiti utjecaju susjednih podzemnih infrastruktura, kao što su tuneli prigradske željeznice (R.E.R.), podzemna željeznica, kanalizacija ili vododopskrba. Na početku trase postoji jedan tunel prigradske željeznice R.E.R. dimenzija približno 9 x 13 m kojega je dno smješteno oko 2,5 m iznad krune prometnih tunela i nalazi se u području pješčanog sloja Sables de Beauchamp. Usporedni prometni tuneli su na osnom razmaku od oko 22,0 m (slike 3. i 6.). Ovaj se razmak mijenja samo blizu stanice Condorcet na stacionaži 1+590,00 do 1+670,00 m, ali su tada obje cijevi već u području sloja stabilnoga tvrdog vapnenca. Iz tog su razloga istraživanja na trasi u odnosu na hidrološke, geometrijske i geotehničke uvjete pokazala dvije kritične dionice koje su numerički analizirane. Dionica “S4” na stacionaži 0+337,00 ima visinu nadsloja od 24,50 m, vodno lice iznad krune tunela 10,50 m, nalazi se u području sloja lapora s kamenjem, cijevi su na horizontalnom osnom razmaku od 22,00 m i jedan poprečni presjek tunela linije R.E.R. nalazi se upravo iznad jedne cijevi. Druga kritična dionica “S4” na stacionaži 0+365



Slika 6. Jedan od karakterističnih presjeka analiziranih u projektu

(slika 6.) ima iste geotehničke granične uvjete, ali se dionica linije R.E.R. nalazi u sredini i iznad oba prometna tunela. U oba slučaja dionica linije R.E.R. ima unutrašnju oblogu od armiranog betona debljine 1,0 m.

2.3 Numeričke analize

Provedeno je numeričko modeliranje postupka iskopa i segmentne obloge, uzimajući u obzir sva opterećenja koja djeluju na tunel i njegovo okruženje tijekom potiskivanja štita i montaže obloge u [5], [6]. Provedena su istraživanja kritičnih presjeka s utjecajem svih tipova geotehničkih opterećenja koja su brojna u gradskim uvjetima i različita za različite lokacije kritičnih presjeka.

lika: kao plošni element s dvije krutosti koje predstavljaju tekući i kruti injektirani ispun. Tlak vode je također simuliran uvođenjem posljednjeg podatka o razini vodnog lica, uzimajući u obzir da utjecaj pornog tlaka ne može uzrokovati vlačna naprezanja između, primjerice, injektiranog ispuna i okolnog tla. Čitava je geostatička analiza provedena uporabom *metode redukcije krutosti* [5], [6].

Usporedba rezultata na sličnim projektima (slike 7. i 8.) pokazuje da raspon vrijednosti dobiven sa dva tipa modela krutosti injektiranog ispuna (tekući nasuprot krutom) daje realistične rezultate u rasponu rezultata koji se sreću kod drugih projekata koji rabe stroj za bušenje (TBM) u uvjetima mekog tla. Slični projekti imali su

SUDIONICI U PROJEKTU

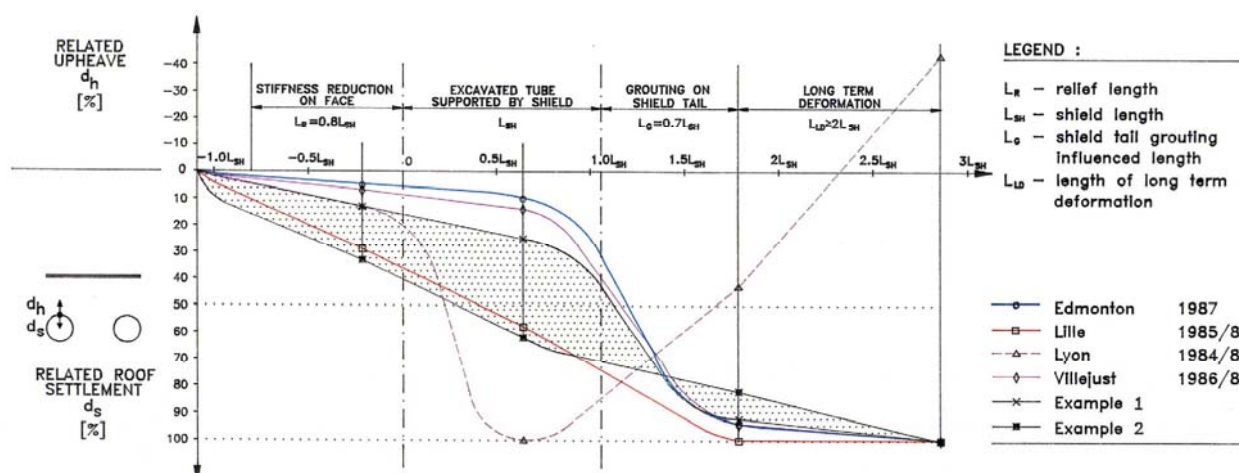
NARUČITELJ:	Alain Balan, direktor građenja projekta EOLE, SNCF – Agence Ile de France, Pariz, Francuska
PROJEKT I ANALIZA:	Davorin Kolić, voditelj projektiranja, MAYREDER Consult GmbH, Linz, Austrija
PROJEKTNI NADZOR:	SETEC-SIMECSOL J.V. Philippe Marguet, Jean-Marie Demorieux, SETEC, Pariz, Patrick Samama, Maria Bouhours, SIMECSOL, Le Plessis Robinson, Pariz
PROIZVOBAČ STROJA:	VOEST ALPINE BERGTECHNIK, Zeltweg (Austria)
PROIZVODNJA PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA OBLOGE:	BONNA – PARTEK MORIN J.V., Simon Bernard, Pierre Pallot, BONNA, Giovanni Pucci, M. Janssens, PARTEK MORIN
IZVOĐENJE RADOVA:	DESQUENNE ET GIRAL Construction – LODIGIANI / IMPREGILO J.V., Olivier Bouygues, direktor projekta EOLE Lot 35B, Desquenne et Giral Construction, Pariz (Francuska) Andre Bordas, Tehnički direktor projekta EOLE Lot 35B, Desquenne et Giral Construction, Pariz (Francuska), Vittorio Guglielmetti, Lodigiani/Impregilo, Milano, Italija
NADZOR GRAĐENJA:	SNCF – Agence Ile de France, Paris (France), M. Dardard, Direction de l'équipement, M. Cuellar, Direction de l'équipement

Provedena je simulacija geostatičkih opterećenja koja djeluju na obje tunelske cijevi zbog djelovanja postojećih podzemnih građevina i utječu na raspodjelu naprezanja u mediju okolnog tla u trenutku prije nego što je kruta metalna cijev štita prošla kroz kritični presjek. Simulacija prolaza stroja za iskop sa štitom kroz kritični presjek provedena je za svaku tunelsku cijev za faze: otpuštanje naprezanja na čelu iskopa ispred štita, prolaz krute metalne cijevi štita kroz presjek, injektiranje prostora između oplata i tla kroz rep štita te dugotrajna stabilizacija raspodjele naprezanja oko obloge nakon završetka izrade tunelske cijevi. S obzirom da se iskop tunela morao izvoditi samo s jednim strojem, simulirana je također odgovarajuća pojava odvojenih opterećenja. Modeliranje i analiza tla provedeni su na dvodimenzijском modelu BEM/FEM uporabom Mohr-Coulombovog elastoplastičnog kriterija sloma. Obloga je predstavljena simuliranim segmentima kvalitete C35 u dva oblika: kao elementi zglobno spojeni jedan s drugim sa slobodnom relativnom rotacijom i kao kruti zatvoreni prsten. Materijal za injektiranje je isto tako simuliran u dva ob-

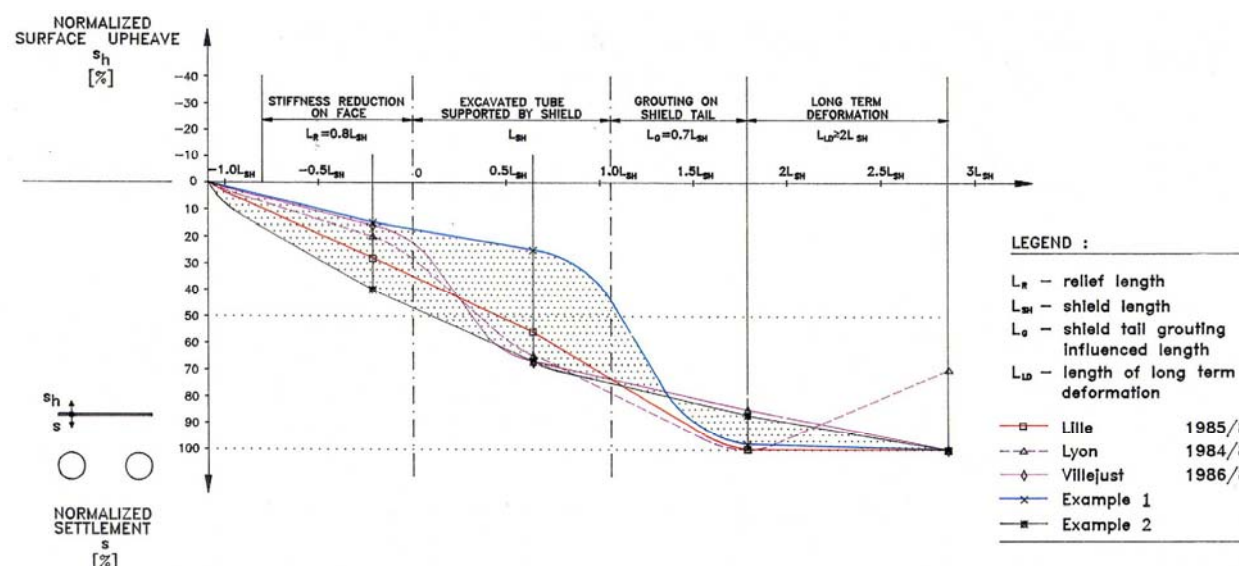
vrlo slične normalizirane vrijednosti rezultata pomaka kod vertikalnog pomicanja krune tunela (slika 7.) ili slijevanja površine (slika 8.). Apsolutni rezultati na uspoređivanim projektima imaju potpuno različite vrijednosti koje ovise uglavnom o visini nadsloja i tipu hidrogeoloških formacija, ali isto tako o veličini tunela. Niti na jednom promatranom tunelu nije se pokazalo nikakvo podizanje površine tla osim na primjeru Lyona (slika 8.).

Promjena vertikalnog pomaka uzduž trase napredovanja štita predstavljena je na dijagramima (slike 7. i 8.) iz kojih se vidi razvoj kumulirane vrijednosti pomaka duž trase napredovanja štita sve dok nije postignuta stabilizacija pomaka, što se zapravo događa nakon napredovanja u iznosu trostruke duljine stroja sa štitom.

Simulacije daljnjih glavnih opterećenja na oblogu koja su provedena jesu: djelovanje razupornih papuča tijekom potiskivanja štita punom instaliranom silom od 57000 kN po obodu štita, opterećenja prikolice i transport glavnog ležaja natrag kroz završeni tunel do početne dionice za sljedeću tunelsku cijev, opterećenja sekundarnog injek-



Slika 7. Normalizirano slijeganje krune tunela tijekom faze potiskivanja štita u kritičnom presjeku (EOLE primjer 1. – kruti injektirani ispun, EOLE primjer 2. – tekući/meki injektirani ispun)



Slika 8. Normalizirano slijeganje površine tijekom faza potiskivanja štita u kritičnom presjeku (EOLE primjer 1. – kruti injektirani ispun, EOLE primjer 2. – tekući/meki injektirani ispun)

tiranja, djelovanje vlastite mase tijekom skladištenja i montaže te utjecaj ekscentričnih opterećenja na oblogu pri potiskivanju štita. Utjecaj montaže je dodatno istraživan sa svim centričnim i ekscentričnim tipovima opterećenja koja utječu na segmentnu oblogu od trenutka vađenja pojedinačnih segmenata iz kalupa, preko transporta do gradilišta i dalje do čela iskopa tunela te na kraju uključujući djelovanje na oblogu tijekom potiskivanja štita.

Konačni su rezultati analize i dimenzioniranja pokazali da do kritičnog opterećenja dolazi zbog utjecaja potisnih sila hidrauličkih preša pri potiskivanju štita. U svakom slučaju posebnu pozornost treba posvetiti ekscentričnom djelovanju razupornih papučica na oblogu pri potiskivanju jer to izravno utječe na potrebnu količinu armature kako bi se spriječile raspukline u rubnom području obodnih spojeva prstena. Rezultati analize slijeganja pokazali su

da zbog dobrih parametara tla ne treba očekivati ozbiljnijih slijeganja ili nagibanja površine uz uvjet da takvi parametri ostaju isti duž trase. Dimenzioniranje je provedeno u skladu s odredbama francuskih norma za armirani beton BAEL'83, koje u velikoj mjeri odgovaraju eurokodovima koji su trenutačno u uporabi.

3 Obloga od predgotovljenih segmenata

Predgotovljeni segmenti tunelske obloge izrađivali su se u postrojenju smještenom sjeverno od Pariza. Samo se postrojenje nalazi u proizvodnoj hali i sastoji se od dva sloga stacionarnih kalupa kojima se može proizvesti najviše 6 prstena na dan. Stoga je njihova proizvodnja počela odmah nakon potpisivanja ugovora za izvođenje glavnih radova. Već su tijekom proizvodnje izrađeni segmenti prstena transportirani izvan hale i odlagani na skladišni prostor u blizini postrojenja (slika 9.).



Slika 9. Gotovi segmenti na stolovima prije odvoza izvan produkcijske hale

S obzirom da je sustav kalupa koncipiran kao stacionaran, svaki je kalup učvršćen na pod hale i predviđen s vibracijskom jedinicom ispod kalupa. Parenje kalupa obavljeno je vodenom parom iz posuda koje su se prenosile kroz halu portalnom dizalicom. Predgotovljeni su segmenti prstena transportirani kamionima na gradilište u samom centru Pariza i to prsten po prsten.

Tijekom proizvodnje segmentnih obloga dosegnuta je planirana kvaliteta betona C35, a pojedina su laboratorijska ispitivanja pokazala čak i kvalitetu C50. Svaki od 5 većih segmenata u prstenu (slika 5.) ima širinu 1,40 m, približnu srednju duljinu od 3,97 m, debljinu 35 cm i masu 4,87 t. Kvaliteta predgotovljenih segmenata obloge kontinuirano se provjeravala primjenom intenzivnog programa osiguravanja kvalitete. Osim kvalitete materijala kontrola je obuhvaćala i mjerenje deformacije segmenta i usporedbu s dopuštenim odstupanjima, te mjerenje i kalibriranje kalupa u odnosu na deformacije i izobličenje. Na početku proizvodnje u prostoru betonare sastavljen je pokusni prsten koji se je sastojao od dva prstena segmentne obloge sa spojnim elementima, ali bez brtvi. Važnost kvalitete dimenzija segmentne obloge pokazala se ključnom pri montaži obloge u tunelu.

4 Strojni iskop pod zaštitom štita

Projekt EOLE u Parizu bio je drugi u svijetu nakon tunela Passante Ferroviario Milano kod kojeg su za spojne elemente upotrijebljeni vodilice i zatici od plastike. Ta-

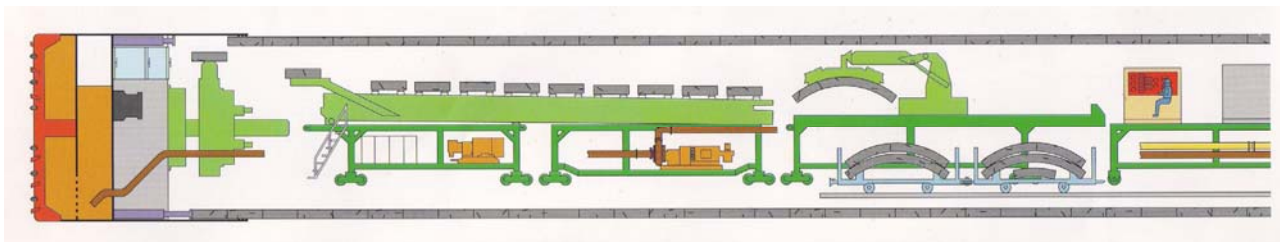
kav sustav zahtijeva veliku točnost proizvodnje u betonari. Segmentna obloga dovezena na gradilište bila je privremeno uskladištena u blizini početnog okna, otkuda se slog od 6 segmenata koji tvore jedan prsten spuštao niz okno uz pomoć portalne dizalice (slika 10.). Slog segmenata koji tvore prsten ima upravo takav redoslijed segmenata kakav će imati kod sastava u prsten na licu mjesta. Na dnu okna predviđen je transportni vlak koji prevozi slog segmenata do stražnjeg dijela stroja za bušenje (slika 11.).



Slika 10. Prsten segmentne obloge spreman za spuštanje do mjesta montaže u tunelu

Stroj za iskop tunela (TBM (*Tunnel Boring Machine*)) koji je primijenjen polivalentnog je tipa sa štitom (tip Polyshield): konstruiran za iskop u različitim geološkim formacijama (slike 11. i 12.). U slučaju projekta EOLE stroj za iskop sa štitom trebao je proći kroz formacije koje su se mijenjale od nekoherentnog pijeska, preko lapora s kamenjem do vapnenca. Stoga je konceptom i izvedbom stroja predviđen rad u 3 režima: u području iskopa kroz sloj pijeska kao TBM sa štitom pri čemu se čelo iskopa stabilizira isplakom, u području lapora s kamenjem kao štit pri čemu iskopano tlo služi za stabiliziranje čela iskopa, te u području iskopa kroz vapnenac kao TBM sa štitom za čvrstu stijensku masu (slike 11. i 12.).

Glavno je tijelo TBM-a duljine 8,35 m, promjera iskopa od 7,40 m i mase 380 t. Na vagonima iza čela iskopa nalazi se mnogo dodatne opreme, tako da je ukupna duljina stroja oko 120 m. Stroj je dopremljen do okna u dijelovima i sastavljen u početnom oknu. Tijekom iskopa



Slika 11. Uzdužni presjek kroz stroj Polyshield PDS 740-OS/RM nazvan *Martine* (transportni vlak)

prosječno napredovanje bilo je u rasponu od samo 7-10 m/dan zbog ograničenja postavljenih poradi opasnosti od slijeganja površine. Pošto je iskopan prvi tunel i stroj je došao do ciljnog okna, stroj je rastavljen i opet u dijelovima dopremljen natrag do početnog okna, gdje je ponovno sastavljen na početku iskopa druge tunelske cijevi.

Kao što je uobičajeno kod TBM-a, stroj je nazvan ženskim imenom *Martine* i njime je uspješno izvršeno bušenje tunela tijekom dviju godina rada. Nakon završetka projekta stroj je prodan na gradilište podzemne željeznice u St.Petersburgu u Rusiji gdje je njegova uporaba nastavljena u sličnim geološkim uvjetima.

Na početku tunelske dionice stroj se mora osloniti na neku čvrstu točku da bi se mogao pravilno započeti iskop i uspješno montirati prvi prsteni segmentne obloge. Zbog toga je ugrađen čelični okvir kao početni oslonac za razuporne papuče stroja smještene na stražnjem dijelu stroja.



Slika 12. Pogled s čela na stroj Polyshield PDS 740-OS/RM nazvan Martine

Strojni je iskop prometnih tunela izveden takozvanim postupkom "stani i kreni" ("*stop-and-go*"). To znači da stroj sam sebe podupire preko papučica na stražnjem dijelu stroja i potiskom na čelo s rotirajućom reznom glavom za iskop. Maksimalni instalirani kapacitet potiska stroja jest 6000 t s 32 preše i snagom od 2500 kW. Napredovanje iskopa u prvom koraku bilo je za širinu jednog prstena, to jest 1,40 m. U drugom koraku erektor u stražnjem dijelu stroja sastavlja dijelove segmentne obloge u prsten. U trećem koraku kad potisne preše u stražnjem dijelu stroja oslobode prostor ugrađuje se segmentni prsten obloge pod zaštitom štita, čime je ciklus završen i iskop može opet početi korakom 1.

Segmentna je obloga prvi put u svijetu sastavljena uporabom plastičnih spojnih elemenata: žute štapne vodilice u uzdužnim spojevima i crveno-bijeli zatici u obodnim spojevima (slika 13.). Zahvaljujući svojstvima samovo-

đenja plastičnih elemenata postignuta je visoka kvaliteta ugrađene obloge, bez pukotina i naprslina.



Slika 13. Stražnji dio stroja sa segmentima na montažnom stolu prije njihove montaže u stražnjem dijelu stroja Polyshield

Materijal iskopa na čelu tunela mijenjao se uzduž tunela, a time i način transportiranja materijala iz tunela. Na početku iskopa stroj je prolazio kroz pješčane formacije gdje je primijenjen režim iskopa pri kojem se čelo iskopa stabilizira isplakom. Pijesak iz čela iskopa sadrži vodu i dodatno se miješa s vodom i bentonitom te se kao mješavina bentonitne suspenzije i tla ispumpava kroz cijevi izvan stroja.

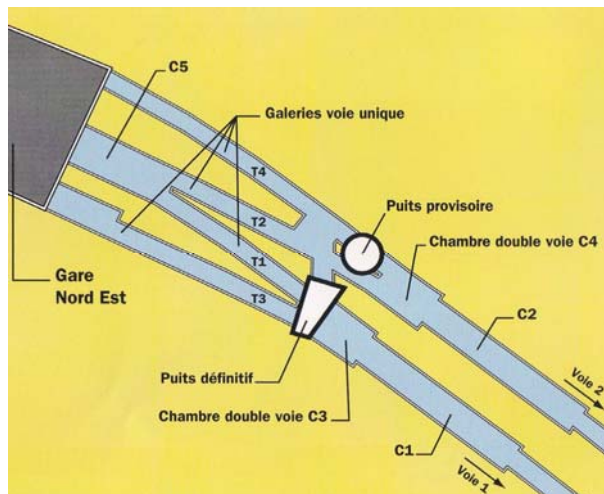
Tijekom iskopa kroz konfiguraciju lapora s kamenjem, kamenje se drobi čeljustima za drobljenje na donjem dijelu rezne glave, nakon čega se iskopani lapor s usitnjenim kamenjem odvozi iz tunela pokretnim transportnim trakovima. Dok su se pri iskopu pijeska i lapora rabili alati-rezači na glavi stroja, kod iskopa vapnenca upotrijebljeni su disk-rezači za drobljenje vapnenca koji se zatim odvozio iz tunela također pokretnim transportnim trakovima.

5 Specifičnosti projekta

U projektu EOLE tijekom izvođenja radova primijenjene su različite inovacije uz već spomenute nove pristupe kao što su: "polivalentni" koncept izvedbe stroja za iskop, segmentna obloga s plastičnim spojnim elementima te zaštitne mjere protiv slijeganja.

5.1 Iskop klasičnom tunelskom metodom podzemne građevine s nekoliko komora

Na početku dionice koja polazi od stanice Gare Nord-Est predviđena je komora za križanje koja treba omogućiti vlakovima sustava R.E.R promjenu smjera prije nego uđu u prometne tunele u pravcu stanice Condorcet – St.Lazare (slika 14.). Izgradnja te složene podzemne građevine s nekoliko komora u uvjetima konfiguracije slabih mekih materijala izvedena je klasičnim metodama iskopa tunela.



Slika 14. Prilazne galerije između glavnog dijela podzemne stanice Nord-Est/Magenta i dvaju usporednih tunela

Iskop različitih komora i povezanih galerija izveden je metodom podjele čela tunela u različitim dijelovima, metodom iskopa u koracima, sustavom primarne podgrade osnovane uglavnom na načelima nove austrijske metode (NATM) i primjenom sveobuhvatnog programa opažanja slijeganja površine uključujući pričuvna rješenja za zaštitu od neočekivanih slijeganja.

5.2 Mlazni beton armiran čeličnim vlaknima za klasičnu metodu izvedbe tunela

Iako je primjena mlaznog betona s čeličnim vlaknima bila već poznata u vrijeme izgradnje galerija, ipak je projekt EOLE prvi projekt u Francuskoj u kojem je došlo do njegove masovnije primjene. Glavni argumenti za odluku o odabiru i odobrenje primjene mlaznog betona s čeličnim vlaknima bili su sigurnosni razlozi: kod primjene mlaznog betona operatori su na sigurnoj udaljenosti od tunelskog svoda, što im omogućuje brzu evakuaciju u slučaju havarije. Primjena mlaznog betona s čeličnim vlaknima umjesto zavarenih žičanih mreža dala je očekivane rezultate usprkos mekom terenu i intenzivno se rabila u daljnjim podzemnim projektima u Parizu.

5.3 Segmentna obloga armirana čeličnim vlaknima

Nakon uspješne primjene čeličnih vlakana u mlaznom betonu provedena su istraživanja o uporabi čeličnih vlakana za segmentne tunelske obloge. Istraživanja su pokazala da francuske norme dopuštaju primjenu čeličnih vlakana samo u slučaju dodatnog armiranja. Glavnu armaturu koja preuzima naprezanja na savijanje treba izvesti od čeličnih šipki, a armatura s čeličnim vlaknima može se upotrijebiti na rubovima segmenata za sprečavanje lokalnih lomova i pukotina. Stoga su na nekim pokusnim prstenima ugrađenim u oblogu upotrijebljena

čelična vlakna u kombinaciji s armaturom od čeličnih šipki.

Konačni su rezultati pokazali da primjena čeličnih vlakana ima mjesto u segmentima obloge samo u kombinaciji s uobičajenom armaturom od čeličnih šipki. Tijekom montaže to je znatno poboljšanje i zajedno s primjenom plastičnih spojnih elemenata sprječava nastanak eventualnih pukotina i oštećenja zbog kontakta segmenata pri sastavljanju u prsten.

5.4 Nalijepljene čelične ploče kao podupora kod poprečnih prolaza

U projektu su predviđeni povezni tuneli (poprečni prolazi) na svakih 400 m duž prometnih tunela, čime se poboljšava opća sigurnost putnika u slučaju nesreće (slika 15.). Obično se ti poprečni prolazi izvode nakon završene glavne tunelske cijevi. U tom se trenutku obloga izrezuje na mjestu gdje će započeti iskop poveznih tunela klasičnom metodom iskopa. Za podupiranje krune u otvorima obaju tunela obično se rabi čelična okvirna konstrukcija.



Slika 15. Poprečni prolaz između dviju tunelskih cijevi s privremenom potporom krune segmentne obloge uz uporabu čeličnih ploča zalijepljenih na betonsku segmentnu oblogu

Kod projekta EOLE projektant je primijenio originalno rješenje za podupiranje segmentne obloge iznad poveznog tunela s pomoću čeličnih ploča koje su nalijepljene na betonsku oblogu. Te čelične potporne ploče osiguravaju zadovoljavajuću privremenu poduporu za normalnog iskopa poveznog tunela, a nakon završenog iskopa konačno se betonira obloga poveznog kanala.

6 Zaključak

Osim što je na ovom složenom projektu iskorišteno mnogo inovacija, dosadašnja izgradnja linije EOLE predstavljala je velik izazov što sada čeka nastavak na produžetku linije od stanice Condorcet-St.Lazare prema zapadu. Međutim, najteži je dio projekta bio onaj koji prolazi

kroz samo središte Pariza s velikim brojem zgrada iz 17. i 18. stoljeća koje su jako osjetljive na podzemne pomake.

Projekt je imao planirani proračun od 5,0 milijarda francuskih franaka (1992.) (oko 725 milijuna eura), sa sljedećom raspodjelom financiranja: 40 % država, 40 % regija (grad Pariz) i 20 % francuske državne željeznice (SNCF). Dionica prometnih tunela Lot 35B procijenjena je na otprilike 73 milijuna eura (1992.). Konačni su troškovi građenja premašili proračun, s time da je na nekim mjestima premašaj veći od 50 % u odnosu na procije-

njene iznose, ali zbog značenja projekta ovi podaci nisu nikad službeno objavljeni.

Drugu polovicu projekta treba završiti u godinama koje dolaze, što će omogućiti širi pristup zapadnim predgrađima Pariza i dodatno unaprijediti opći sustav gradskog prijevoza. Završna se stanica u ovom momentu nalazi u središtu grada, u blizini Madleine, i jedna je od glavnih stanica u središtu grada koja odvodi putnike izravno do glavnoga gradskog aerodroma Charles de Gaulle na sjeverozapadu Pariza.

LITERATURA

- [1] Bougard, J. F.: *Future Tunneling Works in the Greater Paris Area*, Symposium Options for Tunneling, ed. H. Burger, Elsevier, Rotterdam 1993, pp. 25-36
- [2] Balan, A.; Laplace, G.: *EOLE: Un grand chantier souterrain dans Paris*, Travaux (1993), Nr. 690, 1-8
- [3] ***** : *EOLE, la future ligne E du RER – Lot 35B: tunnel intergares et entonnement sud*, Paris, 1994 (official brochure du SNCF)
- [4] Gehring, K., Kogler, P.: *Der Eisenbahntunnel EOLE in Paris, Projektbedingungen, eingesetztes Schildvortriebssystem und erste Betriebsergebnisse*, 9. Christan Veder Kolloquium: Bauen im Grundwasser, Graz 7.-8. April 1994, S. 49-66
- [5] Kolic, D., et al.: *On Design Criteria for Segmental Tunnel Linings*, Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, W. Virginia, May 22-28 1994, Balkema, pp. 2589-2595
- [6] Kolic, D., et al.: *Design of Segmental Lining in Soft Soil*, Građevinar (1994), Vol.46, No.10, pp.605-612
- [7] Balan, A.: *EOLE – Die neue Schlagader der Paris Nahverkehrs*, Tunnel 1/95 S. 6-18
- [8] *****: *Alpine Polysield PDS 740-OS/RM*, Zeltweg 1995 (internal brochure of VOEST ALPINE BERGTECHNIK GmbH)
- [9] *****: *EOLE: Est-Ouest-Liaison-Express*, Paris, 1995 (official brochure of SNCF)
- [10] Bouygues, O.; Guglielmetti, V.: *The Alpine Polysield at the EOLE Project*, 4th Inter. Tunneling Symposium, Munich, 3. April 1995, pp. 65-67
- [11] Andre, D.; Balan, A.; Bouygues, O.: *EOLE – La future ligne E du R.E.R. qui touché Paris au Coeur*, Tunnels et ouvrages souterrains, No. 128, mars/avril 1995, 75-78
- [12] Kolic, D.; Bordas, A.; Longchamp, P.: *Tunneling in the Underground of Paris*, Symposium Modern Construction Methods, Brijuni 19.-21.06.1995, pp. 395-403
- [13] Bouygues, O.: *Geotechnical Investigation During TBM Drive at EOLE Project, Paris*, Symposium TBM – Trends in Design and Construction of Mechanised Tunneling, Balkema, Rotterdam 1996, pp. 139-146
- [14] Scheuch G.: “Die Pariser Expressmetro EOLE”, Bautechnik 73 (1996) Heft 1, S. 41-43
- [15] Balan, A.: *EOLE – Construction Works in Paris and Stations in the Town Paris*, ITA World Tunneling Congress, Vienna, April 12-17 1997, pp. 34-42
- [16] Balan, A.; Bouygues, O.; Kogler, M.: *Les tribulations de Martine dans le Sous-Sol Parisien on EOLE et son bouclier en terrain heterogene*, ITA World Tunneling Congress, Vienna, April 12-17 1997, pp 1022-1028
- [17] <http://www.urbanrail.net/eu/par/paris.htm>: «R.E.R. Lines », (10.01.2008)
- [18] <http://www.sncf.fr/>: *R.E.R. Lines in Paris Area*, (10.01.2008)
- [19] <http://www.ratp.fr/>: *R.E.R. Urban Lines in Paris*, (10.01.2008)
- [20] <http://www.robert-schwandl.de/fran/>: *Christoph Groeneck Metros in France*, (10.01.2008)