

od potrebne točnosti koordinata točaka. Ona se iskazuje uvođenjem kriterijskih matrica koje pokazuju homogenost i izotropiju mreže.

Često se od kriterijskih matrica zahtijeva homogenost i izotropija, tj. elipse pogrešaka na točkama jednakih veličina i kružnog oblika. Obično se primjenjuju jedinične matrice koje zadovoljavaju kriterije homogenosti i izotropije, ali ne dopuštaju korelaciju između točaka, zatim dijagonalne matrice koje dopuštaju različitu točnost točaka mreže i Taylor-Karmanove matrice u kojima su apsolutne elipse pogrešaka homogene i izotropne, a koordinate točaka međusobno korelirane.

Nakon izjednačenja mreže uspoređuje se kriterijska matrica s kovarijacijskom matricom dobivenom izjednačenjem. Elipse pogrešaka koordinata točaka koje su dobivene na osnovi kriterijske matrice morale bi biti manje od elipsa pogrešaka dobivenih izjednačenjem mreže iz kovarijacijske matrice. Tada je, s obzirom na točnost, mreža dobro projektirana.

Kovarijacijske matrice slobodnih mreža ovise o datumu mreže. Sve upotrijebljene matrice trebaju se odnositi ili transformirati na isti datum mreže, pa se tek potom uspoređivati radi optimiranja mreža.

Pri optimiranju mreža treba zahtjevne projekata matematički formulirati kao funkciju cilja koja uključuje zahtjev za točnošću, pouzdanošću i ekonomičnošću uspostavljene mreže. Ti su zahtjevi proturječni (npr. točnost i financijski izdatci) i moraju se tražiti kompromisna rješenja, za što ima više metoda, od standardnih algoritama linearnih i nelinearnih optimiranja, preko aproksimacija na osnovi metode najmanjih kvadrata, do ponovljenih simuliranih izjednačenja.

LIT.: *F. R. Helmert, Theorien der höheren Geodäsie. B. G. Teubner Verlagsellschaft, Leipzig 1962.* – *N. Ćubranić, Viša geodezija I. Sveučilišna naklada Ljubomir, Zagreb 1974.* – *N. Ćubranić, Viša geodezija II. Tehnička knjiga, Zagreb 1974.* – *A. Mumunagić, Viša geodezija I. Građevinski fakultet, Sarajevo 1981.* – *L. P. Pelinen, Theoretische Geodäsie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1982.* – *E. W. Gräfarend, F. Sanso, Optimization and Design of Geodetic Networks. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo 1988.* – *G. Seeber, Satellitengeodäsie. Walter de Gruyter, Berlin-New York 1989.* – *A. Bilajbegović, B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, Osnovni geodetski radovi – suvremene metode – GPS. Tehnička knjiga, Zagreb 1991.* – *B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, GPS – Theory and Practice. Springer-Verlag, Wien-New York 1992.*

A. Bilajbegović

TUNEL, podzemna građevina koja služi za prolaz prometnica te provođenje vode ili komunalnih instalacija kroz prirodne ili umjetne zapreke ili ispod njih. U širem smislu tunelom se smatra i veći podzemni prostor za energetska ili druga postrojenja, garaže, trgovачke prostore, skladišta, skloništa, sportske objekte, trajne rudarske podzemne prostorije i podzemna odlagališta otpadnog otpada.

Zbog povećanja broja stanovnika, širenja gradova, sve većih potreba za pitkom vodom, energijom i prijevozom, te sve većeg komunalnog standarda, potrebno je više prometnih, energetskih i komunalnih objekata. S druge strane, nedostatak rekreativskih površina i širenje pješačkih zona u gradovima, izraženija ekološka svijest, nastojanje da se spriječi buka i vibracije, te zaštiti priroda nameću potrebu da se, gdje je to moguće, mnogi objekti izgraduju podzemno.

U velikim se gradovima gradi podzemna željezница kao jedino rješenje za učinkovit javni prijevoz. Povećani automobilski promet zahtijeva povoljnije elemente trase i izgradnju niza obilaznica oko gradova, a nove željezničke pruge s brzinama od 200 km/h ili većim traže ispruženju trasu i manje padove, što je moguće postići tek izgradnjom brojnih tunela. U posljednje se vrijeme u gradovima rješava dovođenje pitke vode i odvođenje otpadnih voda tunelima. Zbog svega je toga gradnja tunela kao sredstva za svladavanje prirodnih i umjetnih zapreka dobro gospodarsko i tehničko rješenje.

U neolitskoj je kulturi kamen bio osnovni materijal za izradbu oružja i oruđa. Do kremena se dolazio kopanjem dubokih rovova kroz pokrovne naslage. U

Egiptu i Španjolskoj podzemni su se hodnici kopali do dubine od nekoliko stotina metara. Iskapalo se tako da se stijena prvo zagrijavala vatrom, te naglo hladila vodom, a zatim se razbijala klinovima, dlijetima, čekićem i maljem (što je rudarski znak koji simbolizira staru način rada). Prvi graditeljski tuneli bile su kraljevske grobnice u Egiptu i Indiji te astečke grobnice u Americi.

U starom svijetu tuneli služili uglavnom za vodoopskrbu. Na području od Perzije do Egipta kopali su se ispod pustinje podzemni rovovi za dovod vode dugi i do 12 km. U Jeruzalemu je $\leftarrow 1000$. godine izgrađen tunel za gradski vodovod dug 537 m. Na otoku Samos graden je vodovodni tunel dug 1000 m ($\leftarrow 728-699$). Oko $\leftarrow 600$. izgrađen je tunel ispod Eufrata dug 900 m i širok 4,6 m, a služio je za komunikaciju između dvora i hrama. Korito Eufrata bilo je preloženo, radovi su obavljeni u otvorenoj jami, a zidovi i svodovi tunela izgrađeni su od opeke u mortu od asfalta. Između Napulja i Pozzuolijsa izgrađen je $\leftarrow 36$. godine cestovni tunel dug 1000 m i širok 8 m.

Velik je pothvat u starom vijeku bila gradnja tunela dugog 5 640 m kroz brdo Salviano za odvodnjavanje jezera Fuccino. Probijanje tunela s 30 000 radnika trajalo je od 44. do 54. godine. Tunel se počeo graditi istodobno iz 40 pristupnih rovova, što je u to doba bio neobičan uspjeh tunelogradnje i tehnike trasiranja.

Vodovodni sustav Atene bio je velikim dijelom graden tunelom. Gradnja je počela u $\leftarrow VI$. st., a završena je tek u $\leftarrow II$. st. za vrijeme rimskog cara Hadrijana. Za turske vladavine taj je objekt napušten, a 1840. ponovno je proradio. Godine 1925. atenski je vodovod rekonstruiran i proširen, a u njegov je sastav ušao i stari tunel, koji je i danas u upotrebi.

U nas je kod Novalje na Pagu u I. ili II. st. bio izgrađen vodovodni tunel dug ~ 1200 m. U Splitu je za dovod vode u Dioklecijanovu palaču bilo izgrađeno nekoliko tunela, od kojih je najdulji imao ~ 1000 m.

Među važnije sustave podzemnih hodnika i dvorana ubrajaju se katakombe izgrađene u Rimu u vrijeme progona kršćana. Nakon pada Rimskog Carstva zastoj u gradnji tunela trajao je kroz cijeli srednji vijek.

Prijevodom baruta dobila je tunelogradnja nov poticaj. U XVII. i XVIII. st. rijeke i kanali bili su glavne prometne arterije, pa su se tada tuneli gradili uglavnom za potrebe riječnog prometa. U XIX. st. tu je ulogu preuzeila željezница, a u XX. st. cesta.

Prvi plovni (brodarski) tunel duljine 164 m, širine 6,7 i visine 8,2 m izgrađen je 1681. na dionicu kanala Languedoc u Francuskoj, a spajao je rijeku Garonne sa Sredozemnim morem. Plovni su se tuneli gradili zatim i u Engleskoj, Njemačkoj, SAD i Japanu. Među najvećim se plovnim tunelima ističe tunel Rove s duljinom 7 118 m i širinom 22 m. Građen je od 1911. do 1922. na kanalu koji spaja rijeku Rhône i Marsic. Najvećim građevnim pothvatima prve polovice XIX. st. pripada i gradnja tunela (1825-1841) ispod Temze u Londonu, duljine 450 m (graditelj M. I. Brunel).

Pronalasci parnog stroja i bušačeg čekića na stlačeni zrak radikalno su u XIX. st. promjenili način gradnje tunela. Velik zamah u gradnji tunela započeo je s otvaranjem prvih željezničkih pruga. Prvi željeznički tunel duljine 1190 m gradio je od 1826-1830. G. Stephenson na pruzi Liverpool-Manchester.

U drugoj polovici XIX. st. probijaju se mnogi alpski željeznički tuneli. Prvi je među njima bio dvokološiće tunel Mont Cenis (*Fréjus*) između Francuske i Italije, koji je graden od 1857. do 1871. U početku se bušilo ručno, miniralo se barutom, a sredinu mjesечно napredovanje iznosilo je tek 20 m. Kada se 1861. prvi put u gradnji tunela počelo bušiti pomoću stlačenog zraka, postignuto je prosječno mjesечно napredovanje od 60 m. Najveći tunel koji se u to doba gradio (1898-1906) bio je jednokolosječni tunel Simplon I dug 19 803 m. Pri gradnji tunela posebne je teškoće zadavala visoka temperatura, velik dotok vode, vruci izvori, a posebno veliko brdsko opterećenje na kracim dionicama i spontano izbacivanje preopterećene stijenske mase u tunel (gorski udari).

U nas je pruga Karlovac-Rijeka građena od 1869. do 1873., a na njoj je od 14 tunela najdulji Kupjak (1223 m). Godine 1900. izgrađena je tunelska petlja Brajdica (Sušak) duga 1838 m, a 1920. tunel Sinjal na pruzi Ogulin-Gospic dug 2 274 m.

Povećani promet u velikim gradovima potaknuo je izgradnju podzemnih željeznica u Londonu (1863), Glasgowu (1895), Budimpešti (1896), Parizu i Bostonu (1898), Berlinu (1902) i New Yorku (1904).

Dvadeset stoljeća donjelo je znatne novine u miniranju, mehanizaciji i brzini rada te kapacitetu i pokretnosti vozila za utovar i odvoz materijala. Primjenom teleskopske oplate i betonskih pumpi ubrzala se izrada betonskih obloga. Novi načini podgradijanja (strcani beton, sidra, čelična mreža i čelični lukovi) omogućili su iskop u punom profilu te primjenu usavršene mehanizacije u tunelu. Konstruirani su strojevi za izradbu tunela malih profila i razvila se metoda utiskivanja cijevi.

Primjena hidroenergije za proizvodnju električne energije uzrok je gradnje dovodnih hidrotehničkih tunela diljem svijeta. U Hrvatskoj su prvi hidrotehnički tuneli za potrebe hidroelektrana građeni od 1947. do 1952. u sklopu hidroenergetskog sustava Vinodol.

S razvojem automobila kao novog prijevoznog sredstva grade se podvodni tuneli za automobilski promet, npr. 1927. tunel Holland ispod rijeke Hudson u New Yorku (2 820 m), zatim 1933. tunel ispod rijeke Schelde u Antwerpenu, 1940. ispod rukava Rijne u Rotterdamu itd.

Pošlije Drugoga svjetskog rata naglo se razvija cestovni promet, grade se autoceste, pa i cestovni tuneli, među kojima su s tehničkog stajališta najzanimljiviji tuneli kroz Alpe. Prvi veliki cestovni tunel bio je onaj ispod Mont Blanca, koji je u duljini od 11 600 m sagrađen 1965. godine. Za razvoj tunelogradnje važan je i tunel St. Gotthard dug 16 300 m. Završen je 1980. a odlikovao se nizom tehničkih novina s obzirom na sigurnosnu, ventilacijsku i drugu opremu.

U Hrvatskoj je najdulji cestovni tunel Učka (5 062 m), završen 1981. godine. Na obilaznicu oko Rijeke izgrađeni su tuneli ukupne duljine 2 278 m. Na novoj autocesti Rijeka-Karlovac predviđeno je 8 tunela ukupne duljine 6 042 m, a najdulji tunel Tušobić (2 141 m) probijen je 1990. godine. U Splitu je 1979. otvoren cestovni gradski tunel ispod Marjana dug 840 m.

U XX. st. rekordnu je duljinu postigao željeznički tunel Seikan u Japanu, koji povezuje otoke Honshu i Hokkaido. Ukupna je duljina tunela 53,85 km, od čega su 23,3 km ispod mora. Velik je građevni pothvat tunel ispod La Manchea. On se sastoji od dva prometna tunela svijetlog otvora 7,6 m i od servisnog tunela svjetlog otvora 4,8 m. Ukupna je duljina tunela 50,5 km, a od toga je pod morem 37,9 km. Radovi na gradnji započeli su 1986. servisni je tunel probijen 1990. a radovi su završeni 1994. godine.

R. Simić

Vrste tunela. Prema namjeni tuneli mogu biti prometni, hidrotehnički i instalacijski.

Kroz *prometne tunele* prolaze željezničke pruge, ceste, pješački prolazi, gradskna podzemna željezница i plovni putovi. *Hidrotehničkim tunelima* dovodi se ili odvodi voda za energetska postrojenja, vodovodne, melioracijske ili kanalizacijske sustave. U *instalacijske tunele* smještaju se kabeli visokog napona, energetska postrojenja i signalni kabeli, a u gradovima glavni razvodi električnih, vodovodnih, plinovodnih, toplovodnih i poštanskih instalacija i sl.

Prema položaju na terenu razlikuju se brdski, podvodni i gradski podzemni tuneli.

Brdski tunel najčešći je tip tunela, a gradi se obično s namjernom da se svladaju terenske zapreke, a katkad i radi smanjenja nagiba pri svladavanju visinskih razlika. Tunel koji prolazi kroz velik brdski masiv može ujedno biti i *vodorazvodni tunel*. On se naziva *bazni tunel* kad je niskoležeći, dug, i kad spaja dvije doline približno iste nadmorske visine, ili je visokoležeći, kraći, s usponima s obje strane i s prijelomom trase u tunelu.

Tunel *kroz brdske izbočine* obično je kratak i njegova je izvedba lagana. Najčešće se gradi na prometnici položenoj u dolini rijeke koja pravi velike zavoje, pa se tako skraćuje trasa. Tunel *na padini brda* gradi se kako bi se izbjegla mjesta s lošim karakteristikama tla (klizišta, odroni). Takav je tunel većinom kratak, ali izvedbeno težak. Posebna je vrsta brdskog tunela *zaokretni tunel*, kojim se pri svladavanju većih visinskih razlika smanjuje nagib produljenjem trase kroz brdo. Takav se tunel gradi samo za željezničku prugu.

Podvodni tunel gradi se kako bi se svladale vodene prirodne zapreke (rijekе, jezera, kanali, morski zaljevi i prolazi). On može biti probijen kroz tlo ispod vodene zapreke ili položen na njezinu dno (*uronjeni tunel*).

Gradski podzemni tunel najčešće služi za promet podzemne željeznice, a u velikim se gradovima grade i cestovni tuneli za prolaz ispod velikih prometnih čvorista, luka, stambenih četvrti i sl. Osim prometnih tunela, u gradu su vrlo rašireni i instalacijski tuneli.

Osim prema namjeni i položaju na terenu, tuneli se mogu svrstati i prema drugim kriterijima.

Prema duljini razlikuju se sasvim kratki (do 50 m), kratki (50–500 m), srednji (500–2000 m), dugi (2000–4000 m) i vrlo dugi tuneli (dulji od 4000 m).

Tuneli mogu biti plitki (do 10 m ispod površine) i duboki (više od 10 m ispod površine).

Prema veličini poprečnog presjeka tuneli se dijele na tunelne potkope ili hodnike ($5\cdots16 \text{ m}^2$), tunele s malim profilom ($16\cdots30 \text{ m}^2$), srednjim ($30\cdots60 \text{ m}^2$), velikim ($60\cdots80 \text{ m}^2$) i vrlo velikim profilom (više od 80 m^2).

Prema načinu izvedbe tunel može biti probojni, zasipni (ukopani) ili uronjeni. Probojni se tunel gradi probijanjem kroz stijenu ili tlo na rudarski način, zasipni se ukopa kao otvoreni usjek ili rov, koji se zatim zasipanjem prekrije, a uronjeni se polaze po riječnome ili morskom dnu.

ISTRAŽNI RADOVI

Osnovni se podaci za izradbu projekta podzemnog objekta dobivaju suradnjom stručnjaka različitih tehničkih struka, u prvom redu s područja inženjerske geologije, geodezije i geotehnike (geofizike, mehanike tla i mehanike stijena). U ovom se članku opisuju geološki istražni radovi i klasifikacija stijena, dok su ostali potrebni istražni radovi opisani na drugom mjestu (v. *Geofizika*, TE 6, str. 75; v. *Mehanika tla*, TE 6, str. 235; v. *Mjerenja u inženjerskoj geodeziji*, TE 8, str. 597).

Geološki istražni radovi

Poznavanje geološkog sastava terena uzduž trase tunela od velike je važnosti za projektiranje, gradnju i uporabu podzemnih objekata. Nijedan inženjerski objekt ne traži tako pažljivo i detaljno proučavanje inženjerskogeoloških prilika kao što to zahtjeva gradnja podzemnih objekata. Značenje je tih istraživanja to veće što je objekt dublje pod površinom terena.

Prema geološkoj gradi i geološkim uvjetima gradnje razlikuju se laki, srednje teški, teški i vrlo teški tuneli.

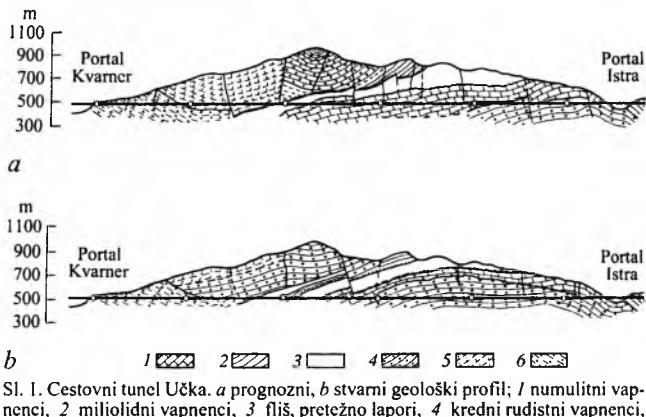
Laki tuneli su oni koji se grade u čvrstim stijenskim masama. To su magmatske stijene velike čvrstoće i žilavosti te sedimentne stijene (vapnenci i dolomiti) veće čvrstoće i žilavosti. Pri gradnji tunela u tim stijenskim masama nema većih deformacija iskopanih prostora, pa nije potrebno podgrađivanje.

Srednje teški tuneli grade se kroz meke stijenske mase, kao što su meki glinoviti pješčenjaci, lapor, neki škriljavci, prapor i slični materijali. U takvim stijenama pojavljuju se nakon iskopa manji vertikalni pomaci, a kadšto i bočni, koji opterećuju podgradu.

Teški tuneli grade se u stijenama koje su u raspadanju. To mogu biti i jako zdrobljene stijene već spomenutih kategorija. U tim se tunelima pojavljuje utjecaj vode i zraka, prisutne su veće deformacije i tlakovi, što sve zahtjeva osiguranje iskopanog obrisa tunela uz oprezan rad.

Vrlo teški tuneli grade se u terenima od pjesaka zasićenih vodom, raspadnutih glinovitih škriljavaca, glina i muljevitih zemljišta. U njima je stijenska masa pokretljiva, pa može nastati urušavanje. Česte su i poteškoće s vodom. Zato je potrebna složena i jaka podgrada, te vrlo oprezan rad, jer se pri gradnji tunela u tim sredinama pojavljuju veliki tlakovi.

Gradnja podzemnih objekata ovisi o nizu inženjerskogeoloških činilaca, koji se uklapaju u *prognosni inženjerskogeološki profil*. Cilj je istraživanja da prognosni profil bude što bliži stvarnom profilu (sl. 1).



Sl. 1. Cestovni tunel Učka. a) prognosni, b) stvarni geološki profil; 1 numulitni vapnenci, 2 miliojdini vapnenci, 3 fliš, pretežno lapor, 4 kredni rudistični vapnenci,

5 kredni dolomiti i dolomitne breče, 6 kredni pločasti i slojeviti vapnenci

Prognosni inženjerskogeološki profil služi projektantu kao podloga za izradbu projekta podzemne konstrukcije i gradevne tehnologije. Istraživanja obuhvaćaju litološki sastav i tektonski sklop terena, hidrogeološke prilike, pojavu zapaljivih ili otrovnih plinova, temperaturu pri izbijanju tunela, fizikalno-mehanička svojstva stijena i prognozu podzemnih tlakova.

Litološki sastav terena često se može odrediti površinskim geološkim kartiranjem, pogotovo ako tunel nije duboko pod površinom. Površinsko snimanje dopunjaje se kopanjem jama, potkopa, bušenjem i geofizičkim metodama ispitivanja. Litološki sastav utječe na trajanje građenja, težinu radova, način rada, a time i na ukupne troškove.

Stijenske mase mogu biti masivne, slojevite i škriljave, što čini prirodnu sredinu različitom za gradnju podzemnih objekata.

Masivne su stijene najpovoljnije za gradnju tunela. Masivnost pruža sigurne uvjete za rad, omogućuje da se i tuneli velikih presjeka izbijaju punim profilom te da se trasa i niveleta tunela lako odaberu, jer su uvjeti rada u svim pravcima podjednaki.

Slojevite stijene pružaju različite uvjete za gradnju. Osim debljine slojeva, važno je poznavati prostorni položaj slojeva i njihov odnos prema tunelnoj osi. Povoljne su debelo slojevite stijene s debljinom slojeva većom od 1 m. Slojevi stijena mogu biti prema tunelnoj osi različito položeni. Slojevi koji su vertikalni i okomiti na tunelnu os prikladni su za izvedbu i za stabilnost tunela, a najnepovoljnije je kada se pravac pružanja vertikalnih slojeva poklapa s tunelnom trasom, jer je tada moguće klizanje terena. I

horizontalni su slojevi povoljni, pogotovo ako su istog litološkog sastava i veće debljine.

Uvjeti za izvedbu tunela u nagnutim slojevima mogu biti vrlo različiti, a ovise o međusobnom položaju slojeva i tunelne trase. Manje je povoljno ako su slojevi blago nagnuti ili ako se njihovo pružanje podudara s pružanjem tunela.

U škriljavim je stijenskim masama rad na izgradnji tunela težak. Škriljavost pogoduje smicanju, pojavi podzemnih tlakova i odvaljivanju.

Tektonski poremećaji (rasjedi, bore, navlake i rasjedne zone) više ili manje otežavaju radove u podzemlju, a mogu i onemoćiće izgradnju većih podzemnih objekata. Položaj je tunela posebno nepovoljan kada se poklapa s pravcem pružanja rasjeda ili rasjednih zona. Iz njih se često urušava materijal u već iskopani dio tunela. Reverzni rasjedi i navlake prave velike poteškoće pri gradnji, jer je stijena redovito jače zdrobljena. U boranim stijenskim masama povoljnije je graditi u antiklinalnom dijelu bore, gdje je mogućnost ispadanja blokova manja, a i podzemni su tlakovi manji. Gradnja tunela u sinklinalam je nepovoljnija, blokovi lako ispadaju, a u jezgri sinklinale podzemni su tlakovi veći. Teorija blokova, razvijena u posljednje doba, omogućuje da se uz otvor tunela analizira stabilnost blokova ograničenih ploham diskontinuiteta u stijeni.

Već prema svojem mineralnom sastavu, strukturi i svježini sastojaka, stijene pružaju različite otpore pri bušenju, miniranju i iskopu stijenskih masa, a različit je i višak izbijanja.

Hidrogeološke prilike mogu imati velik utjecaj na gradnju i uporabu podzemnih objekata. Nepovoljan utjecaj podzemne vode može se očitovati velikim dotokom vode, promjenom fizikalno-mehaničkih svojstava stijena, povišenom temperaturom i kemijskim djelovanjem vode na beton i metalne dijelove objekata, a podizanje razine podzemne vode može uzrokovati plavljenje tunela. Prognoza dotoka vode u podzemne objekte dosta je složena, a teškoće su osobito velike ako su objekti duboko pod površinom.

Pojava plinova pri gradnji tunela može također uzrokovati znatne teškoće. Plinovi su uglavnom vezani uz ugljene naslage, bituminozne stijene i pirit, a mogu nastati i prilikom izvođenja radova. Najčešće se pojavljuju metan, ugljični dioksidi i sumporovodik, a pri miniranju dušični spojevi i ugljični monoksid. Međutim, je u tunelu najpasniji metan, jer s udjelom zraka od 5...14% čini eksplozivnu smjesu. Vezan je uz bituminozne stijene te pojave ugljena i nafte, lakši je od zraka i skuplja se u gornjem dijelovima tunela. Ugljični je dioksid teži od zraka i zadržava

se u donjim dijelovima tunela. Plinovi koji nastaju nepotpunom detonacijom pri miniranju otrovnii su, posebno ugljični monoksid. Štetni se plinovi prilikom gradnje tunela uklanjuju stalnim provjetravanjem.

Temperatura. Pri gradnji tunela većih duljina i s velikim nadstojem temperatura se u brdu može povećavati s napredovanjem iskopa, tj. s udaljenosti od ulaza. Termalna vrela, vulkanizam, oksidacijski procesi i radioaktivnost mogu i lokalno utjecati na povišenje temperature. Poznato je da je tijekom gradnje Simplonskog tunela izmjerena temperatura 55,4 °C pri nadstoju od 2 136 m. Međutim, pri gradnji tunela velikih duljina za naše hidroelektrane u kršu nisu zabilježene povišene temperature.

Povišena temperatura znatno smanjuje radnu sposobnost radnika u tunelu i treba je smanjiti na približno 25 °C ili najviše na 30 °C, što se postiže dovodom svježeg hladnog zraka.

Fizikalno-mehanička svojstva stijena činitelji su o kojima ovise stabilnost podzemnih objekata. Fizikalna svojstva stijenskih masa kao što su čvrstoća, homogenost, izotropnost i deformabilnost imaju veliko značenje za projektiranje i gradnju tunela. Svojstva stijenskih masa mijenjaju se uzduž trase tunela. Stijene su najčešće heterogene i anizotropne pa prema tome i različito deformabilne.

Stijene se u prirodi, s obzirom na naprezanje, nalaze u primarnim stanjima, koja se prilikom gradnje podzemnih objekata remete i narušavaju. Podzemni su tlakovi aktivna opterećenja koja djeluju na podgradu ili oblogu tunela, pa se prilikom gradnje deformiranje i urušavanje sprečava podgrađivanjem. Za opću ocjenu uvjeta stabilnosti podzemnih objekata važno je poznavati čvrstoću stijena, njihovu deformabilnost, debljinu nadstoga, tektomska naprezanja, pravac pružanja i smjer pada slojeva i pukotina, osobito većih tektonskih pukotina, hidrogeološke prilike, veličinu i oblik presjeka te način izvedbe radova.

A. Magdalenić

Klasifikacija stijenskih masa

Procjenom i mjeranjem mehaničkih, geotehničkih i drugih svojstava stijenske se mase ocjenjuju i klasificiraju s obzirom na prikladnost za gradnju tunela i drugih podzemnih objekata. Takva ocjena služi kao osnova za projektiranje te za izbor optimalne metode iskopa, potrebne mehanizacije, načina podgrađivanja i vrste tunelne obloge. Pitom se pod pojmom stijenske mase razumiju sve geološke naslage od kojih je izgrađena Zemljina kora, u svim oblicima i smjesama u kojima se pojavljuju. Stijenska je masa ani-

Tablica 1
OCJENA STIJENSKE MASE PRI GEOMEHANIČKOJ KLASIFIKACIJI

Svojstva i podaci o stijenskoj masi		Iznos i ocjena						
Čvrstoća monolita	Točkasto opterećenje	> 10 MN/m ²	4...10 MN/m ²	2...4 MN/m ²	1...2 MN/m ²			
	Jednoosna tlačna čvrstoća	> 250 MN/m ²	100...250 MN/m ²	50...100 MN/m ²	25...50 MN/m ²	5...25 MN/m ²	1...5 MN/m ²	1 MN/m ²
Ocjena		15	12	7	4	2	1	0
RQD*		90...100%	75...90%	50...75%	25...50%			< 25%
Ocjena		20	17	13	8			3
Razmak diskontinuiteta		> 2 m	0,6...2 m	20...60 cm	6...20 cm			< 6 cm
Ocjena		20	15	10	8			5
Stanje diskontinuiteta		vrlo hrapave površine, prekidi, nema zijeva, nema pojave trošenja	hrapave površine, zijev < 1 mm, pojava trošenja	hrapave površine, zijev < 1 mm, jako trošenje površina	ispuna < 5 mm ili nepreričuti zijev 1...5 mm			ispuna > 5 mm, neprekinuti zijev > 5 mm
Ocjena		30	25	20	10			0
Podzemna voda	dotok na 10 m duljinc tunela	nema ili 0 ili suho	< 10 L/min ili 0,0...0,1 ili vlažno	10...25 L/min ili 0,1...0,2 ili vlažno	25...125 L/min ili 0,2...0,5 ili kapa			> 125 L/min ili > 0,5 ili curi
	omjer tlaka vode u pukotinama i najvećeg naprezanja							
Ocjena		15	10	7	4			0
Smanjenje ocjene radi orientacije diskontinuiteta					0...12			
Ukupna ocjena		81...100	61...80	41...60	21...40			20
Klasa		I.	II.	III.	IV.			V.
Opis stijenske mase		vrlo dobra	dobra	zadovoljavajuća	loša			vrlo loša

*udio komada bušotinske jecgre duljih od 100 mm

Tablica 2
PODGRAĐIVANJE TUNELA NA OSNOVI GEOMEHANIČKE KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE*

Stijenska masa	Način izradbe tunela	Podgrada		
		Sidra ($\varnothing 20 \text{ mm}$)	Štrečani beton	Čelični lukovi
Vrlo dobra (I. klasa)	napredovanje cijelim čelom, napredak 3 m	općenito bez podgradijanja, osim mjestimice po potrebi		
Dobra (II. klasa)	napredovanje cijelim čelom, napredak 1...1,5 m, podgrada na razmaku od 20 m iza čela	duljina 3 m, razmak 2,5 m, lokalno u svodu, mjestimice mreža	svod 50 mm po potrebi	
Zadovoljavajuća (III. klasa)	napredovanje svodom, napredak 1,5...3 m u svodu, podgradivanje poslije svakog miniranja, podgrada na razmaku od 10 m iza čela	sustavno sidrenje, duljina 4 m, razmak 1,5...2 m u svodu i bokovima, mreža u svodu	svod 50...100 mm, bokovi 30 mm	
Loša (IV. klasa)	napredovanje svodom, napredak 1...1,5 m u svodu, podgradivanje suksesivno s napredovanjem	sustavno sidrenje, duljina 4...5 m, razmak 1...1,5 m u svodu i bokovima	svod 100...150 mm, bokovi 100 mm	lagani lukovi, razmak 1,5 m po potrebi
Vrlo loša (V. klasa)	višestruki mali profili, napredak 0,5...1,5 m u svodu, podgradivanje suksesivno s napredovanjem, torkretiranje neposredno poslije miniranja	sustavno sidrenje, duljina 5...6 m, razmak 1...1,5 m, s mrežom u svodu i bokovima, sidra u podu	svod 150...200 mm, bokovi 150 mm, čelo 50 mm	srednji do teški lukovi, razmak 0,75 m s čeličnim založnicama, zatvoreni okviri i obloga

*oblik tunela: potkovast, širina 10 m, vertikalno naprezanje 25 N/mm^2 , izvedba: bušenje i miniranje

zotropna i nehomogena. Sastoji se od monolita različitih veličina i oblika, koji su odijeljeni diskontinuitetima, tj. mjestima s izrazito promijenjenim mehaničkim svojstvima kao što su mikropukotine, makropukotine, rasjedi, slojne plohe, plohe lučenja, plohe škriljavosti i sl.

Više je autora razradilo metode za klasifikaciju stijenskih masa: K. Terzaghi (1946), H. Lauffer (1958), D. U. Deere (1964), G. E. Wickham, H. R. Tiedemann i E. H. Skinner (1972), Z. T. Bieniawski (1973), N. Barton, R. Lien i J. Lunde (1974). Često je korisno primijeniti nekoliko neovisnih klasifikacijskih metoda i rezultate međusobno usporediti, pa tek tada pristupiti projektiranju.

Kao primjer klasifikacije stijenske mase navodi se *geomehanička klasifikacija*, poznata i kao metoda RMR (prema engl. rock mass rating), koju je 1973. razvio Z. T. Bieniawski. Za tu se klasifikaciju među najvažnija svojstva i podatke o stijenskoj masi ubrajuju jednoosna čvrstoća kao čvrstoća monolita, udio komada bušotinske jezge duljih od 100 mm (označuje se s RQD, prema engl. rock quality designation), zatim podatci o položaju, razmaku i stanju diskontinuiteta i podaci o podzemnoj vodi (tabl. 1). Iz tih se svojstava i podataka dobiva ukupna ocjena i različiti se dijelovi stijenske mase srstavaju u jednu od klase, od vrlo dobre, I. klase do vrlo loše, V. klase, što je temelj za izbor načina gradnje tunela, duljinu eventualno nepodgrađenog raspona (v. *Rudarstvo, mehanička stijena*, TE 11, str. 610) te za odluku o vrsti i materijalu podgrade (tabl. 2).

S. Vuječić

STATIČKI PRORAČUN TUNELNE OBLOGE

Analogno pravilima proračuna i dimenzioniranja inženjerskih objekata treba metodama statike konstrukcija proračunati i stabilnost obloge podzemnih prostorija. Dok se u nadzemnim objektima opterećenja mogu predvidjeti s velikom vjerojatnošću, zna se da u podzemnim objektima opterećenja potječu od sila koje nastaju na mjestu dodira brdskog masiva i ugradene podgrade. Te sile ovise o mehaničkim svojstvima masiva i svojstvima podgrade te o načinu i vremenu ugradnje podgrade i obloge. Pokusi na modelima s realnim materijalima kakvi postoje u masivima bili su gotovo neizvedivi, pa su se zaključci o opterećenjima podgrade i obloge podzemnih prostorija temeljili na pokusima provedenim na modelima od pijeska i analognih materijala ili samo na kvalitativnim opažanjima na objektima. Nastalo je tako niz teorija, koje su danas samo povjesno zanimljive, jer su se otada koncepcija konstrukcije i način proračuna bitno izmijenili.

Pretpostavke o opterećenju obloge. Osnovna je zamisao tih pretpostavki da se stijena, odnosno tlo, smatra samo pasivnim medijem koji stvara opterećenje.

K. Terzaghi je 1946. objasnio pojave oko podzemnih prostorija na manjim dubinama polazeći od pravila mehanike tla, tj. uz pretpostavku pojave kliznih ploha i uzimajući u obzir Mohr-Coulombovu teoriju čvrstoće koherenčnih materijala (v. *Nauka o čvrstoći*, TE 9, str. 282). Neodređeni oblik kliznih ploha (sl. 2)

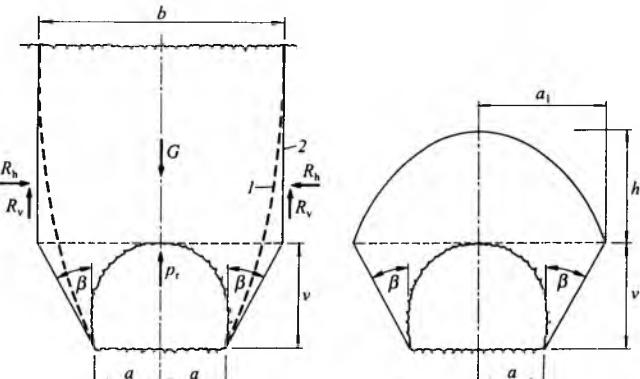
aproksimira se dvama pravcima. Posmični lom počinje uz donji brid prostorije, širi se koso prema gore pod kutom

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}, \quad (1)$$

pa je na visini kalote razmak između kliznih ploha

$$b = 2(a + v \tan \beta), \quad (2)$$

gdje je φ kut nagiba ovojnica (envelope) graničnih Mohrovinh kružnica, a polovica širine profila, a v visina prostorije.



Sl. 2. Kritične klizne plohe (prema K. Terzaghyju). 1 pretpostavljena, 2 aproksimativna klizna ploha, G težina nadstola, R_v , R_h vertikalne i horizontalne reakcije tla, p_r reaktivni tlak podgrade

Sl. 3. Samonosivi svod (prema M. M. Protodjakonovu)

Ravnoteža vertikalnih sila može se uspostaviti samo ako postoje horizontalni tlakovi, odnosno posmična naprezanja na vertikalnim kliznim ploham. Terzaghi je pokazao da je za stabilnost prostorije na većoj dubini potreban vertikalni reaktivni tlak podgrade na kalotu definiran izrazom

$$p_r = \frac{b(\rho g - 2\frac{c}{b})}{2k \tan \varphi}, \quad (3)$$

gdje je ρ gustoća, g ubrzanje sile teže, c kohezija, k omjer horizontalnog i vertikalnog tlaka u intaktnom tlu ili stijeni.

Osnovnu poteškoću predstavlja ocjena veličine omjera horizontalnog i vertikalnog tlaka (k), koji je veći od nule, a ovisi o geotehničkim uvjetima. Prema Hookeovu zakonu taj je omjer za elastični materijal

$$k = \frac{v}{1-v}, \quad (4)$$

gdje je v Poissonov koeficijent poprečne deformacije, kojemu su granice $0 < v < 0,5$ i koji je za plastificirane materijale vrlo blizu

svoje gornje granice, pa je tada $k=1$. Mjerjenjima je utvrđeno da horizontalni tlak može biti čak i višestruko veći od vertikalnoga, posebno u magmatskim stijenama i mlađem gorju sa snažnim tektonskim poremećajima.

Prije Terzaghyjeve pretpostavke često se primjenjivala i teorija O. Kommerella, koji je pretpostavio da se iznad otvora u stijeni može oblikovati svod koji nije potrebno poduprijeti. Samonosivi svod ima u vertikalnom presjeku oblik polovice elipse, a visina mu ovisi o kakvoći stijene.

Slično je i M. M. Protodjakonov pretpostavio da samonosivi svod ima oblik parabole (sl. 3), kojoj je visina

$$h = \frac{a}{f}, \quad (5)$$

gdje je a polovica širine profila, a f koeficijent čvrstoće koji ovisi o mehaničkim svojstvima materijala (za zemljane materijale $f=\tan\phi$, a za stijene $f=\sigma_c/10$, gdje je σ_c jednoosna čvrstoća stijene).

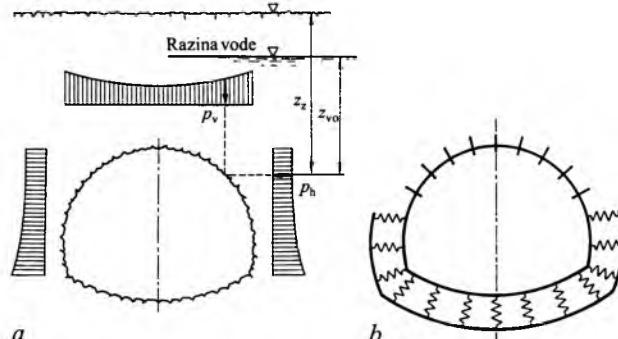
Kommerell i Protodjakonov nisu u svojim pretpostavkama uzeli u obzir visinu otvorene prostorije, pa je to poslije korigirano tako da se visine samonosivih svodova računaju sa širinom a , koja se dobiva prema Terzaghyjevoj pretpostavci pojave kliznih ploha.

Podgrade i obloge plitkih tunela i tunela koji se iskapaju pomoću štita opterećene su silama koje se većinom mogu definirati pravilima mehanike tla. Opterećenja su jednakata vertikalnim i horizontalnim aktivnim tlakovima, koji ovise o dubini na kojoj leži tunel i o tome je li prisutan i tlak vode. Nosiva konstrukcija tunela ima obično oblik prstena. Vertikalno je opterećenje jednak težini nadstola, tj. geostatičkom tlaku, a za horizontalno se opterećenje uzima da je jednako vertikalnom, što odgovara plastificiranom tlu ili stijeni. Vertikalno se opterećenje povećava u prisutnosti podzemne vode:

$$\rho_v = \rho_z g z_z + \rho_{vo} g z_{vo}, \quad (6)$$

gdje su ρ_z i ρ_{vo} gustoće, a z_z i z_{vo} dubine zemlje i vode.

Prsten obloge proračunava se kao elastičan, po pravilima statike linearnih nosača. Katkad se uzima u obzir i Winklerova pretpostavka elastičnog oslanjanja, tj. linearne ovisnosti reakcije podloge na boku i na podnožnom svodu o deformaciji prstena. Danas je uobičajen proračun programima za rješavanje okvirnih konstrukcija. Upotrebljavaju se programi prema metodi deformacije (matrična metoda) ili programi prema metodi konačnih elemenata, koji uz ostale tipove elemenata uključuju i linearne elemente. Dijagram opterećenja i shema proračunskog statičkog sustava prikazani su na slici 4.



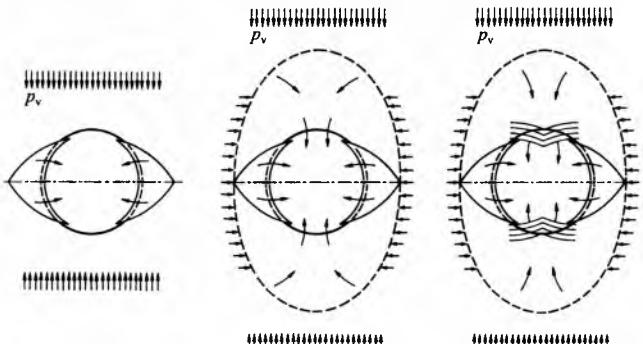
Sl. 4. Dijagram opterećenja (a) i shema proračunskog statičkog sustava okvirne konstrukcije (b)

Podgrada tunela koji se grade tunelnim strojevima i štitovima redovito je montažna i konačna. Sastavlja se od segmenata koji nisu međusobno kruto spojeni, pa ne mogu prenositi veće momente savijanja. U mekšim će stijenama s vremenom u neposrednoj okolini tunela nastati plastifikacija i uspostaviti će se probitno stanje kvazihidrostatskog naprezanja. U takvu je stanju podgrada opterećena okomito na prsten geostatičkim tlakom. Element podgrade opterećen je samo normalnim (uzdužnim) silama S , odnosno naprezzanjima prema tzv. kotlovskoj jednadžbi:

$$S = p_v R, \quad (7)$$

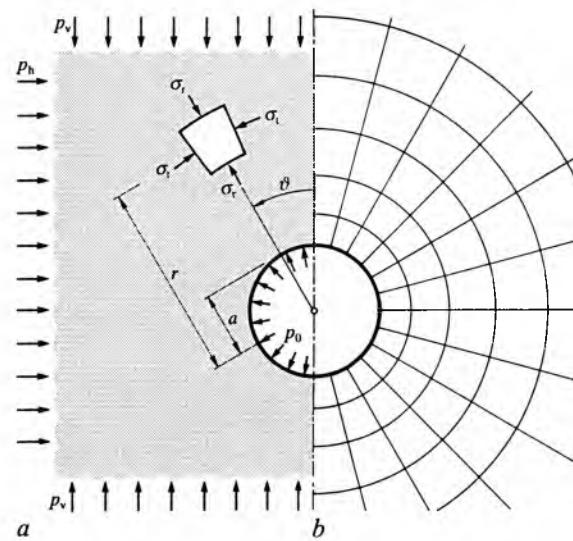
gdje je p_v geostatički tlak ($=\rho g h$), a R vanjski polumjer obloge.

L. Rabcewicz i drugi istraživači zapazili su 1960-ih godina da rušenju tunela okruglog profila prethodi nastanak kliznih ploha koje stvaraju klin na bokovima (sl. 5). Ako je svedana posmična čvrstoća stijene, klin ima tendenciju klizanja prema otvoru, a zatim se klizne plohe produljuju prema gore i dolje i nastaje kolaps.



Sl. 5. Mehanizam rušenja kružnog profila (prema L. Rabcewiczu)

Radi jednostavnosti promatra se rotacijsko-simetrično stanje s jednakim horizontalnim i vertikalnim tlakovima ($p_h=p_v$), uz dodani tlak podgrade p_0 na unutrašnjem rubu otvora, koji uzrokuju naprezanja u radijalnom (σ_r) i tangencijalnom smjeru (σ_t) (sl. 6a).



Sl. 6. Naprezanja oko kružnog profila u ravnini. a) shema opterećenja i oznaka naprezanja, b) trajektorije glavnih naprezanja uz $\sigma_r = \sigma_t$

Poznato Kirschovo rješenje za raspodjelu naprezanja glasi

$$\sigma_r = p_v \left[1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] + p_0 \left(\frac{a}{r} \right)^2, \quad (8)$$

$$\sigma_t = p_v \left[1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] - p_0 \left(\frac{a}{r} \right)^2, \quad (9)$$

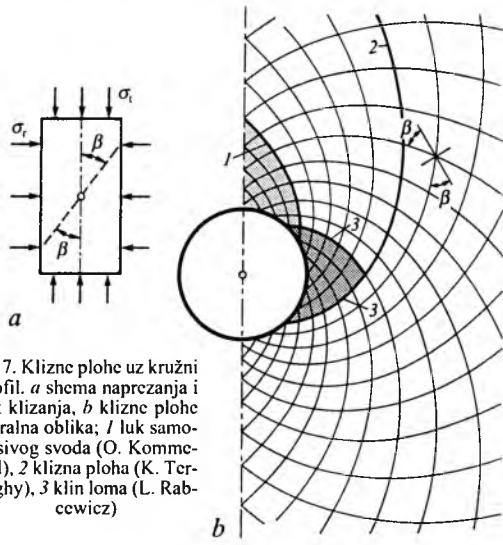
gdje je a polovica širine profila, a r udaljenost od središta. To su ujedno glavna naprezanja, pa radikalni pravci i koncentrične kružnice predstavljaju trajektorije naprezanja (sl. 6b). Prema Mohr-Coulombovoj teoriji čvrstoće lom klizanjem nastaje, prema izrazu (1), pod kutom β (sl. 7a) kada posmično naprezanje dosegne kritičnu veličinu τ_k :

$$\tau_k = c + \sigma_n \tan \phi, \quad (10)$$

gdje je c kohezija, a σ_n normalno naprezanje na kliznoj plohi. Jednadžba klizne plohe u polarnim koordinatama r i ϑ daje oblik logaritamske spirale (sl. 7b):

$$r = a e^{(\vartheta - \vartheta_0) \tan \beta}, \quad (11)$$

gdje je ϑ_0 početni kut klizne plohe. Rješenje točno odgovara Rabcewiczevim kliznim tijelima (3 na sl. 7b), ali se može uočiti i sličnost pojedinih kliznih linija s Protodjakonovim i Kommerellovim oblicima samonosivih svodova (1 na sl. 7b) te Terzaghyevom kliznom plohom (2 na sl. 7b).



Sl. 7. Klizne plohe uz kružni profil. a) shema naprezanja i kut klizanja, b) klizne plohe spiralna oblika; 1 luk samonosivog svoda (O. Kommerell), 2 klizna ploha (K. Terzaghy), 3 klin loma (L. Rabcewicz)

Iz jednadžbi (8) i (9) slijedi da na rubu nepodgrađenog otvora, uz $p_0=0$, djeluju naprezanja: $\sigma_r=0$ i $\sigma_c=2p_v$, pa plastično klizanje nastaje kad naprezanje σ_c dosegne jednoosnu čvrstoću stijene σ_c . H. Kastner je, uvrstivši uvjet (10) u jednadžbe ravnoteže, dobio rješenje za raspodjelu naprezanja. Polumjer granice plastične i elastične zone r_e , ako se uzme u obzir i tlak podgrade p_0 , iznosi

$$r_e = a \left(\frac{2}{\zeta+1} \cdot \frac{\delta_c + p_v(\zeta-1)}{\delta_c + p_0(\zeta-1)} \right)^{\frac{1}{\zeta-1}}, \quad (12)$$

gdje je

$$\zeta = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}. \quad (13)$$

Slične su izraze dobili E. Hoek, E. T. Brown i B. Ladany uvrstivši Hoek-Brownov kriterij loma. Pomoću tih se rješenja računaju i deformacije koje se mogu mjeriti. Pomak granice elastične i plastične zone u_e i pomak ruba otvora prema unutra u_0 iznose

$$u_e = \frac{r_e(1+v')}{E'} \cdot \frac{p_v(\zeta-1) + \sigma_c}{\zeta+1}, \quad (14)$$

$$u_0 = \psi u_e \frac{r_e}{a}, \quad (15)$$

gdje je E' modul elastičnosti, v' Poissonov koeficijent za ravno stanje, a ψ omjer obujma plastificirane stijene i početnog obujma, koji iznosi $\psi \geq 1$. Tako je uspostavljena veza između pomaka ruba otvora i reaktivnog tlaka podgrade.

Primjena numeričkih metoda. Statički se proračun usavršio primjenom numeričkih metoda, koje su omogućile detaljniji uvid u odnose deformacija i naprezanja.

Metoda deformacija (matrična metoda) za linearne konstrukcije (okvire) bila je prvo područje intenzivne primjene elektro-mekaničkih računala u građevinarstvu. Programi iz tog područja služe za proračune elastično oslonjenih podgrada i obloga tunela u uvjetima kada se tlo može smatrati samo medijem koji uzrokuje opterećenje.

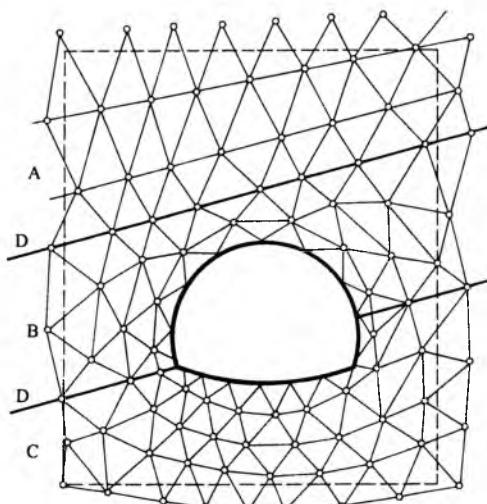
Metoda rubnih elemenata prikladna je upravo za rješavanje koncentracije naprezanja u okolini otvora i pogodna je za osobna računala, pa se često primjenjuje. Osniva se na teoriji elastičnosti i rješenjima koja su dali J. Boussinesq i L. Kelvin za koncentriranu silu i linearno opterećenje u proizvoljnoj točki kontinuma. Naprezanja koja bi se pojavila na rubu otvora poništavaju se silama suprotog smjera, a uvjeti ravnoteže sila po cijelom otvoru dovo-

de do sustava linearnih jednadžbi. Kada nema dovoljno podataka da bi se pouzdano primjenio složeniji model, prvi se proračun i idejni projekt rade s elastičnim kontinuumom. Mogućnost uključivanja djelovanja elemenata podgrada čini metodu vrlo prihvatljivom za proračun stabilnosti. Metoda se razvija u smjeru obuhvaćanja nelinearnih materijala, posebno materijala bez vlačne čvrstoće, i materijala s ograničenom posmičnom čvrstoćom, pa se novijim programima može pratiti razvoj vlačnih pukotina, pojava plastifikacije i napredovanje kliznih ploha.

Metoda konačnih razlika u klasičnom se obliku nije često primjenjivala za proračun podzemnih prostora. Stroga geometrijska pravilnost mreže točaka bila je prije zapreka za njezinu široku primjenu, ali noviji algoritmi (P. Cundall, 1986) omogućuju slobodno oblikovanje mreže, pa se metoda ponovno primjenjuje za proračun ravninskih problema s velikim deformacijama i mehaničkom i geometrijskom nelinearnošću.

Metoda konačnih elemenata uzrokovala je pravu revoluciju u diskretizaciji i matematičkom modeliranju konstrukcija zbog jednostavne primjene i velike slobode u oblikovanju mreže točaka i elemenata. Već u prvim radovima o primjeni te metode (C. Zienkiewicz, 1968) bilo je pokušaja da se njome obuhvate i pojave u okolišu podzemnih prostorija. Očigledni je nedostatak tada bio neprimjerenost elastičnog modela pojavama u realnoj stjeni. Stijena je obično i nehomogena i anizotropna, ima diskontinuitete i svojstva nelinearnosti, viskoznosti i plastičnosti, a uz to obično nema vlačnu čvrstoću. Metoda se stalno usavršava razvojem novih tipova ravninskih i prostornih elemenata koji uključuju anizotropiju i materijalnu nelinearnost, te biranje kriterija plastičnog loma primjenjenog pojavama u stijenama. Posebno su se razvijali elementi kojima se modeliraju linije diskontinuiteta, tj. slojnice i pukotinski sustavi u stijenama. Uz programe konačnih elemenata široke namjene postoje i specijalizirani programi za analizu pomaka i naprezanja uz podzemne prostore.

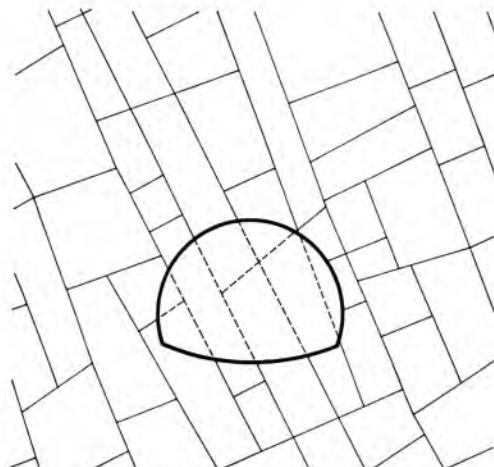
Pri postavljanju zadatka po metodi konačnih elemenata treba oko podzemnog otvora obuhvatiti dosta veliko područje, barem 3...5 promjera otvora. U točkama na rubu područja gubi se utjecaj promjene stanja deformacija i naprezanja zbog postojanja otvora, pa se zadaju sile ili pomaci koji slijede iz položaja rubnih točaka. Nepravilni oblik elemenata i nagle promjene u njihovoj veličini i obliku utječu na brojčane rezultate, pa treba nastojati da mreža bude što pravilnija. Povoljno je odabrat kružno ili eliptično područje u kojem je otvor u sredini, a rubne uvjete definirati pomacima rubnih točaka. Na slici 8 prikazan je i dio mreže elemenata s ugrađenim kliznim elementima na rubu područja s različitim mehaničkim svojstvima.



Sl. 8. Metoda konačnih elemenata uz tunelni profil s tri različita tipa stijena (A, B, C) i dvije ravnine diskontinuiteta (D)

Metoda distinktivnih elemenata usavršena je metoda konačnih elemenata, u kojoj se stijena smatra elastičnim ili neelastičnim tijelom, ali s diskontinuitetima. Oblik blokova, što ih ravnine diskontinuiteta ograničuju, uzima se stohastički prema zadanim orientacijama ravnina diskontinuiteta i njihovim međusobnim

razmacima. Kao rezultat dobivaju se pomaci na ravninama diskontinuiteta i raspodjela naprezanja unutar blokova (sl. 9).



Sl. 9. Mreža distinkтивnih elemenata uz tunelni profil

Metoda blokova. Zbog slojnih ploha i pukotina stijena je diskontinuirana i može se smatrati prostornim mozaikom blokova. U nepovoljnim geometrijskim uvjetima mogu se na obodu podzemnih prostora ili uz plohe otvorenih kosina stvoriti nestabilni ključni blokovi, a njihovo ispadanje ili klizanje može uzrokovati dalja rušenja. Polazište za takvu analizu su inžinjerskogeološki obrisni (konturni) dijagrami, kojima se prikazuje uslojenost i ispučalost stijene. Istražuju se geometrijski uvjeti oblikovanja blokova uz zadane diskontinuitete, te静stički uvjeti ravnoteže blokova. Ne vodi se računa o deformacijama stijene, nego samo o geometriji diskontinuiteta. Svrha je analize proračun elemenata podgrade koji mogu spriječiti pokretanje blokova, odnosno njihovo odvaljivanje i povećavanje iskopanog profila.

U svim prikazanim numeričkim metodama poteškoće čini zadavanje svojstava stijene. Što se složeniji modeli ponašanja stijene žele primijeniti, to je potrebno bolje poznavati materijale i znati više mehaničkih karakteristika koje opisuju njihovo ponašanje. Budući da te vrijednosti nisu konstantne, nego katkad variraju u vrlo širokim granicama, matematičko modeliranje stijene postaje vrlo složeno i odgovorno. Na žalost, česte razlike u svojstvima stijene, katkad i na kratkim odsječcima, čine primjenu numeričkih metoda i njihove rezultate manje pouzdanima.

GRADNJA TUNELA

Gradnja tunela obuhvaća nekoliko glavnih faza: iskop predušjeka, iskop tunelnog profila (s potkopima ili u punom profilu), podgradivanje i osiguranje iskopa, uklanjanje otkopanog materijala, betoniranje tunelne obloge i završne radove (uređenje kolnika, postavljanje pruge, ugradnju opreme i sl.). Betoniranjem obloge nastaje trajna nosiva konstrukcija tunela, koja stabilizira profil. Ona se može izgraditi odjednom po cijelom opsegu ili u fazama i pojedinim segmentima profila. Uobičajeni su materijali za oblogu opeka, beton, armirani beton i štrcani beton, montažni elementi i sl.

Metode za gradnju tunela mogu se svrstati u klasične i suvremene. One se međusobno razlikuju prema načinu i redoslijedu iskopa materijala i betoniranja tunelne obloge te prema primjenjenoj mehanizaciji, a izbor metode ovisi o mnogim parametrima kao što su geološki sastav i svojstva stijenske mase, hidrološki uvjeti, veličina i oblik poprečnog presjeka tunela, duljina i namjena tunela itd. Prilikom gradnje duljih tunela, kad se pojavljuju veće razlike u sastavu stijenske mase, mogu se pojedine dionice tunela graditi prema različitim metodama. Tako se i danas ponegdje primjenjuju klasične metode, posebno kad se uvjeti rada u tunelu pogoršaju i nije moguća primjena suvremenih metoda.

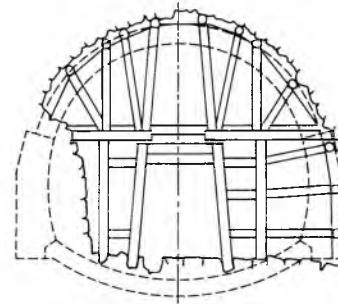
Klasične metode gradnje tunela

Klasičnim metodama nazivaju se načini gradnje kakvi su bili uobičajeni od polovice XIX. do polovice XX. stoljeća. Gradnja

tunela počinjala je iskopom malog *potkopa* poprečnog presjeka $4 \cdots 10 \text{ m}^2$, koji je služio kao istražni rov i kao jezgra daljeg iskopa. U težim se geotehničkim uvjetima potkop trapeznog profila podgradišao drvenom oblom građom s rudarskim vezovima, a napredovanje kroz zemljani materijal i slabu stijenu osiguravalo se drvenim zašiljenim probojnim platicama zabijanim prema naprijed. Prema položaju prvog potkopa i redoslijedu proširivanja razlikuje se nekoliko iskopnih metoda, nazvanih prema zemljama u kojima su nastale. Prema nekim se metodama, npr. prema belgijskoj i njemačkoj, profil tunela iskopa prvo samo djelomice, taj se dio podgradi i betonira, pa se tek tada nastavlja dalji iskop. Drugim se metodama, npr. starom austrijskom i engleskom metodom, prvo iskopa cijeli profil tunela, koji se podgradi i betonira u duljini od jednog prstena (nekoliko metara), a zatim se prelazi na rad u sljedećem prstenu.

Stara austrijska metoda nastala je u doba gradnje prvih duljih alpskih željezničkih tunela. Karakterističan je za nju redoslijed radova na probijanju dvokolosiječnog željezničkog tunela kroz Karavanke (1902–1906). Iskop je započeo donjem potkopom s rudarskim kolosijekom koji je služio za odvoz otkopanog materijala. Na razmaku od $\sim 10 \text{ m}$ slijedio je iskop gornjeg (tjemenog) potkopa, a zatim su se mjestimice spajala oba potkopa te bočno proširivao iskop. Osnovni su nosivi elementi podgrade poprečni okvir od oble građe (sl. 10).

Sl. 10. Iskop i podgradivanje po staroj austrijskoj metodi (željeznički tunel Karavanke)



Belgijska metoda. Iskop počinje gornjim potkopom, koji se proširuje na bokove gornje polovice profila. Nakon zamjene privremene drvene podgrade trajnom zidanom ili betonskom oblogom, produbljuje se iskop do donjeg svoda, najprije u sredini, a zatim se naizmjence kopaju i oziđaju bokovi.

Engleska metoda. Redoslijed iskopa sličan je kao u belgijskim metodama, a razlika je u tome što se donji dio presjeka otkapa u slojevima. Engleska je metoda prikladna za iskop visokih prostorija, kakve su npr. podzemne strojarnice hidrocentrala, ili za iskop prostorija u čvrstim stijenama, gdje nije potrebno podgradišati bokove. Od ostalih metoda razlikuje se i po tome što su glavni nosivi elementi podgrade uzdužne grede preko više okvira, što je povoljnije pri oziđivanju.

Njemačka metoda primjenjuje se za iskop većih profila i za teže geotehničke uvjete. Iskop počinje s tri potkopa, dolje u bokovima i gore u sredini, a nastavlja se po rubovima, odozgo prema bokovima, uz oslanjanje podgrade na neiskopanu srednju jezgru. Zamjena privremene podgrade konačnom oblogom počinje odozdo prema gore, a tek kad se zatvore svodovi, uklanja se središnja jezgra.

Zbog guste drvene podgrade klasičnim se metodama radilo sporo i u skućenim prostorima, uz ograničenu primjenu mehanizacija, a vrlo je opasno bilo uklanjanje podgrade prije zidanja ili betoniranja konačne obloge.

Suvremene metode gradnje tunela

Karakteristika je suvremenih metoda da se tunel iskapa odmah u punom profilu, bez potkopa. Takav je način rada brži i lakši, ali traži složenije strojeve i mehanizirane radne faze, od otkopa mini ranjem, osiguranja iskopa sidrima, mrežom i štrcanim betonom, rada pod zaštitom šita, do potpuno mehaniziranog iskopa i podgradišanja tunelnim rotacijskim strojevima.

Iskop miniranjem. Čvršće je stijene potrebno minirati. Na vertikalnom čelu otkopa izbušu se udarnim ili udarno-rotacijskim bušilicama minske bušotine, obično promjera $32 \cdots 48 \text{ mm}$.

Bušilice s pneumatskim ili hidrauličnim pogonom nalaze se na posebnim skelama ili su to samohodne bušilice s nekoliko krovova. Bušenjem se odnedavno upravlja pomoću računala. Obično se buši uz ispiranje bušotine vodom, koja služi za hlađenje svrda i odnošenje drobina od bušenja. U sredini čela nekoliko se zrakasto postavljenih mina pali prije ostalih, pa nastaje *zalom*, šupljina paralelna s osi. Ostale se mine, postavljene u bušotine paralelne s osi, pale s milisekundnim kašnjenjem za prvima i odbacuju materijal u smjeru manjeg otpora, prema zalomu u osi. Glatki odlom po rubu profila i manje oštećenje stijene izvan profila postiže se pomoću mina postavljenih po rubu u gusti niz bušotina. Ako se te mine opale prije mina u zalomu, stvorit će se po rubu profila pukotina, koja će reflektirati udarni val sljedećih eksplozija i tako štititi okolnu stijenu.

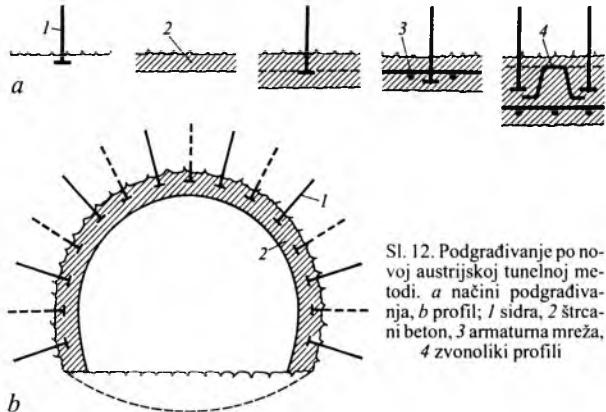
Iskop tunela miniranjem zbuva se u nekoliko radnih faza. To su: priprema (osiguranje čela iskopa, označavanje tunelne osi na čelu i položaja minskih bušotina), bušenje minskih bušotina, punjenje eksplozivom i konstrukcija mina, uklanjanje osoblja i strojeva, aktiviranje mina, utovar i odvoz iskopanog materijala, ugradivanje podgrade ili osiguranje iskopa te betoniranje obloge. Više o detaljnijem o miniranju pri gradnji tunela v. *Miniranje*, TE 8, str. 575.

Nova austrijska tunelna metoda. Znatan napredak u shvaćanju pojava u podzemnim prostorima i gradnji tunela većih profila ostvaren je novim tehnološkim pronalascima nakon Drugoga svjetskog rata. Ti su pronalasci, primijenjeni u tunelogradnji, omogućili L. Rabcewiczu, F. Pacheru, K. Sattleru, H. Kastneru i L. Mülleru da, u skladu sa zakonima mehanike stijena, razviju u razdoblju od 1950. do 1965. novu koncepciju gradnje tunela, koja se danas naziva novom austrijskom tunelnom metodom (NATM). Glavna je odlika te metode iskop tunela s čela u punom profilu, a zatim novi način podgradivanja, zapravo osiguranje obrisa iskopa bez klasične drvene podgrade i podupirača. Osiguranje iskopa postiže se uporabom štrcanog betona, sidra, čeličnih mreža, čeličnih lukova i savijenih limova.

Na stijenu se izravno nanosi betonski sloj štrcanjem kroz sapnicu pomoću komprimiranog zraka (v. *Beton*, TE 2, str. 8) poznat pod nazivom *štrecani beton*. Debljina sloja u jednom štrcanju može biti ~5 cm, a često se u taj sloj postavlja i mreža od čeličnih šipki. Dodatkom kemijskih ubrzivača za vezanje cementa postaje sloj betona djelomice nosiv već nakon nekoliko desetaka minuta. Istodobno se primjenjuju *geotehnička sidra*, tj. čelične šipke duljine nekoliko metara i promjera ~25 mm, koje se ugrađuju u radikalne bušotine i vežu sa stijenom. Najjednostavnija su sidra s rascjepkom, a postoje i sidra s bravom (čahurom) koja se okretanjem šipke s navojem uvlači u bravu, širi je i razupire u bokove bušotine, te sidra koja se cijelom duljinom vežu sa stijenom cementnim mortom (sl. 11). Mort se unosi u buštinu prije ugušavanja sidra ili injektiranjem pod tlakom pošto je sidro postavljeno. Postoji i mogućnost ispunjavanja bušotine polimernim ma-

terijalom koji veže već nakon nekoliko minuta. Iz prakse izgradnje rudarskih prostorija preuzeto je i podgradivanje čeličnim nosivim lukovima i limenom hladno oblikovanom probojnom podgradom, što se primjenjuje kao dodatno osiguranje u rastresitoj stijeni.

Sidra raspoređena s određenom gustoćom po cijelom obodu tunelne prostorije djeluju, zajedno s mrežom i štrcanim betonom, kao armatura koja spriječava lokalno mravljenje i ispadanje pojedinih dijelova, ali i kao spregnuta konstrukcija sposobna da trajno preuzme opterećenja i da nakon stabilizacije spriječi dalju deformaciju stijene. Način podgradivanja odabire se prema stanju, svojstvima i kategoriji stijene (sl. 12).

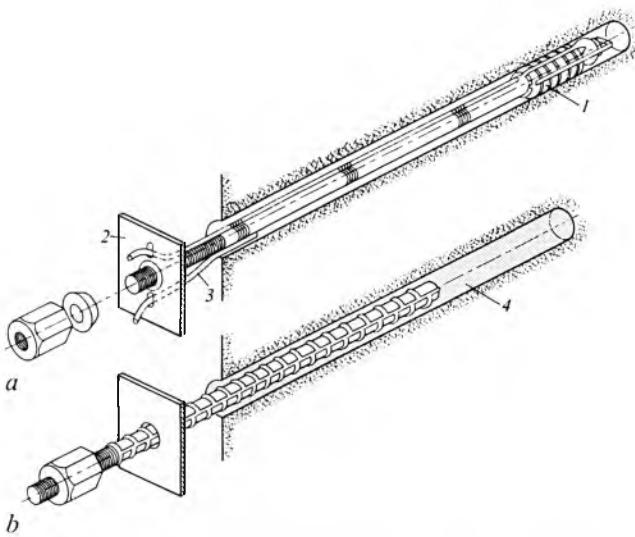


Sl. 12. Podgradivanje po novoj austrijskoj tunelnoj metodi. a) načini podgradivanja, b) profil; 1 sidra, 2 štrcani beton, 3 armaturna mreža, 4 zvonoliki profili

Betonski i čelični elementi podgrade mogu u stijeni ostati trajno i ne moraju se uklanjati prije izvedbe konačne obloge. Time se izostavlja do tada najneugodnija faza izgradnje tunela, tj. skidanje podgrade prije betoniranja obloge. Kako u profilu nisu potrebni podupirači, stvorena je mogućnost otvaranja većih profila odjednom, a time i mnogo bržeg rada, jer je prostor na čelu prostorije dovoljno velik za primjenu teže mehanizacije za iskop i transport.

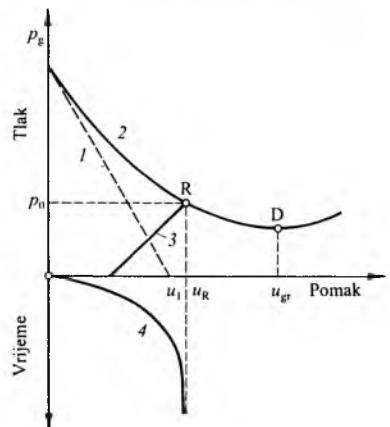
Osnovna je ideja nove austrijske tunelne metode da se podzemni prostor stabilizira podgradom uz najmanju moguću intervenciju. Iz toga slijede glavna načela metode, koja su predstavljala novost u koncepciji proračuna i izgradnje tunela, a temelje se na pretpostavkama o opterećenju obloge koje su opisane u izrazima (8) do (15). Prema tim je načelima stijena, bez obzira na kakvoču, osnovni nosivi element, koji treba osigurati stabilnost podzemne prostorije svojom čvrstoćom, a elementi podgrade služe samo za povećanje nosivosti i za sprečavanje prevelikih deformacija stijene.

Pojave relaksacije, odnosno sudjelovanja stijene i podgrade u procesu uravnoteženja mogu se prikazati dijagramom smanjenja promjera profila (konvergencije) prema opterećenju podgrade potrebnom da se proces smanjenja profila zaustavi (sl. 13). Prije otvaranja iskopa stijena se nalazi pod početnim geostatičkim tlakom p_g , pa ako bi se iskopana stijena nadomjestila kakvom konstrukcijom (podgradom ili oblogom) koja ne bi dopuštala nikakvu deformaciju, morala bi ta konstrukcija preuzeti cijeli geostatički tlak. Ako bi se otvor iskopao u vrlo čvrstoj, a uz to elastičnoj stijeni, stijena bi bila povećano napregnuta uz rub otvora,



Sl. 11. Geotehnička sidra. a) sidro s ekspanzijskom bravom, b) adhezijsko sidro; 1 glava, 2 sidrena ploča, 3 cjevica za injektiranje, 4 injekcijska smjesa

Sl. 13. Odnos konvergencije prema relaksaciji stijene.
1 elastična stijena, 2 viskoelastična ili plastična stijena,
3 nosivost obloge, 4 vremenski tijek konvergencije



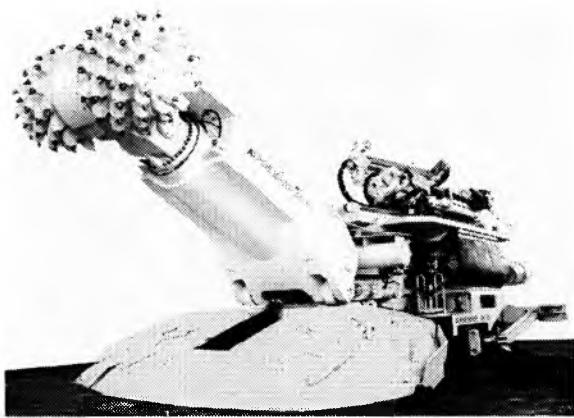
kao što je to pokazano u Kirschovu rješenju, a istodobno bi se i konačno, elastično deformirala za pomak u_1 . Međutim, u stijeni s plastičnim i viskoelastičnim svojstvima promjer se tunelnog profila postupno smanjuje, tj. opaža se pomak rubova profila prema središtu (*konvergencija profila*). Ako se nakon iskopa postavi podgrada, ona će postupno sprečavati deformiranje, preuzimati dio opterećenja, razmjerno deformaciji koja je zajednička za stijenu i podgradu, i zaustavljati proces konvergencije.

Pošto se ugrađi podgrada, potrebno je vremenski pratiti deformacije stijene i cijelog profila. Najjednostavnije je povremeno izravno mjeriti odabrane razmake u profilu između ugrađenih repera, a po potrebi treba i geodetski kontrolirati absolutne pojedinih točaka profila. Iz dinamike promjena mjernih razmaka ocjenjuje se smanjenje deformacija i zaključuje o približavanju ravnotežnom stanju. Uravnoteženje nastaje u točki R, u kojoj se sijeku krivulje relaksacije stijene i opterećenja podlage. Tada se konvergencija profila više ne povećava i novi se pomaci ne zamjećuju, što pokazuje da je podgrada preuzeila svoju punu funkciju i da je reaktivni tlak podgrade p_0 zaustavio deformiranje stijene. Ako je podgradivanje bilo nedovoljno, deformiranje se ne zaustavlja, te je potrebno ojačati podgradnu konstrukciju. Nešto veće dopuštene deformacije traže manju nosivost podgrade, ali kada deformacija stijene dosegne graničnu deformaciju u_{gr} , stijena se drobi (točka D). Tlak takve smrvljene stijene na podgradu postaje veći, pa je potrebna mnogo jača konstrukcija podgrade, što poskupljuje gradnju.

Na temelju predodžbe o ravnoteži između stijene i podgrade koja treba jamčiti stabilnost podzemne prostorije, moglo bi se pojednostavljeno zaključiti da konačna tunelna obloga nema statičku funkciju, nego služi samo za ostvarenje projektiranog profila i možda kao hidroizolacija. Međutim, ni nakon zaustavljanja procesa deformiranja ne može se ni približno ustanoviti odnos krične i stvarne nosivosti cijelog sustava, nego jedino utvrditi jesu li utvrđene deformacije blizu graničnih prihvatljivih deformacija za podgradu i treba li u konačnoj oblozi osigurati nosivost koja bi bila veća od nosivosti privremene podgrade na tome mjestu.

Nova je austrijska tunelna metoda sinteza dotadašnjih iskustava na gradnjama u podzemlju. Primjena u stijenama loše kvalitete pokazuje posebne prednosti te metode zbog fleksibilnosti u podgradivanju i mogućnosti lokalnog proširenja i ojačavanja profila. Metoda se primjenjuje i u gradnji tunela s niskim nadstojjem kao što su tuneli za podzemnu željeznicu ispod gradskih ulica i izgrađenih blokova. Moguće su i kombinacije sa zahvatima radi poboljšanja karakteristika tla i stijene injiciranjem kemijskih sredstava za očvršćivanje tla (cement, silikati, polimerni materijali), zamrzavanjem, snižavanjem razine podzemne vode i sprečavanjem dotoka vode pomoću zagata, zavjesa, injiciranim pilotima itd. Primjer je uspješne primjene nove austrijske tunelne metode vrlo dug željeznički tunel Seikan u Japanu, za koji je ta metoda, zbog mnogih promjena geoloških i geotehničkih uvjeta uzduž trase, odabrana kao jedina dovoljno fleksibilna i općenito primjenljiva.

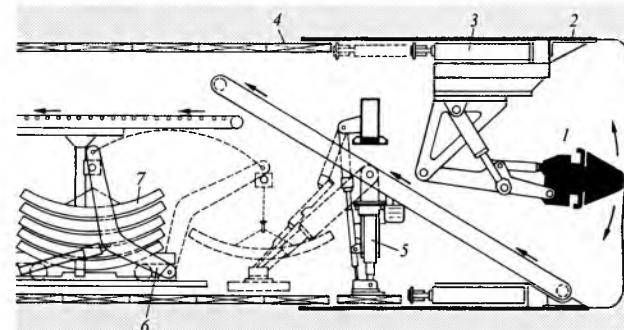
Iskop tunelnim kopačem. Tunelni je kopač stroj s rotirajućom nazubljenom glavom s rezalima, koja je smještena na kraju pokretljive ruke. Stroj mase $30 \cdots 150$ t i snage motora $100 \cdots 600$ kW pokreće se na gusjenicama, a može otkopati stijenu s cijelog profila otkopnog čela (sl. 14). Taj se stroj primjenjuje



Sl. 14. Tunelni kopač

za otkopanje srednje čvrstih ruda, a danas se upotrebljava za iskop tunela u stijenama srednje tlačne čvrstoće, do 100 N/mm^2 . Vrh je rezala od posebno čvrstog žilavog čelika. Oblik vrha rezala i način odlamanja stijene prilagođuje se vrsti i mehaničkim karakteristikama stijena, pa taj način iskopa nije povoljan za tunele u kojima se geotehnički uvjeti uzduž trase međusobno razlikuju. Kopač koji ima glavu okretljivu oko osi pokretljive ruke većeg je učinka u tvrdim stijenama, dok je kopač s dvije glave koje se okreću oko horizontalne osovine okomite na ruku, namijenjen manje čvrstim stijenama. Glodanje se potpomaže mlazom vode pod vrlo visokim tlakom, do 600 bar. Voda smanjuje stvaranje prašine i hladiti dlijeta, a istodobno povećava učinak odlamanja i smanjuje potrošnju energije. Zbog prašine je upravljanje strojem otežano, pa se pokretljivom rukom sve češće upravlja uz pomoć računala, čime se postiže i vrlo točna izradba profila. Kopač se može upotrijebiti i kad se neposredno iza čela iskopa osigurava prema jednoj od poznatih metoda, npr. prema novoj austrijskoj tunelnoj metodi. Kapacitet otkapanja kopačem s jednom glavom doseže $100 \text{ m}^3/\text{h}$, a kopač se može primijeniti na profilu ploštine $10 \cdots 80 \text{ m}^2$. Viši se tunel otkapa u dvije razine, a za širi se tunel upotrebljava kopač s dvije glave na istoj visini.

Iskop pod štitom. Rastresiti materijali (pijesak, šljunak i sitno razdrobljena stijena) nisu nakon iskopa stabilni i mogu se zarušavati. Zbog toga se početni dio iskopanog tunela zaštićuje nekoliko metara dugim čeličnim štitom koji na prednjem kraju ima nož kojim se usijeca u tlo (sl. 15). Štit ima oblik presjeka tunela, a prema naprijed se potiskuje sustavom hidrauličnih preša koje se odupiru na završeni dio tunelne obloge. Kada se štit potisne prema naprijed za duljinu jednog prstena obloge, neposredno iza štita ugrađuje se novi prsten montažnih elemenata podgrade ili konačne obloge, tzv. tubing. To su elementi od lejevanog željeza, čeličnih zavarenih profila i limova ili od armiranog betona, koji imaju punu nosivost neposredno nakon ugradnje. Nakon ugradnje novog prstena obloge uvlače se cilindri sustava preša i odupiru se o novi prsten, nakon čega se štit može gurati prema naprijed za idući korak, a prostor između novog prstena i tla injektirati.

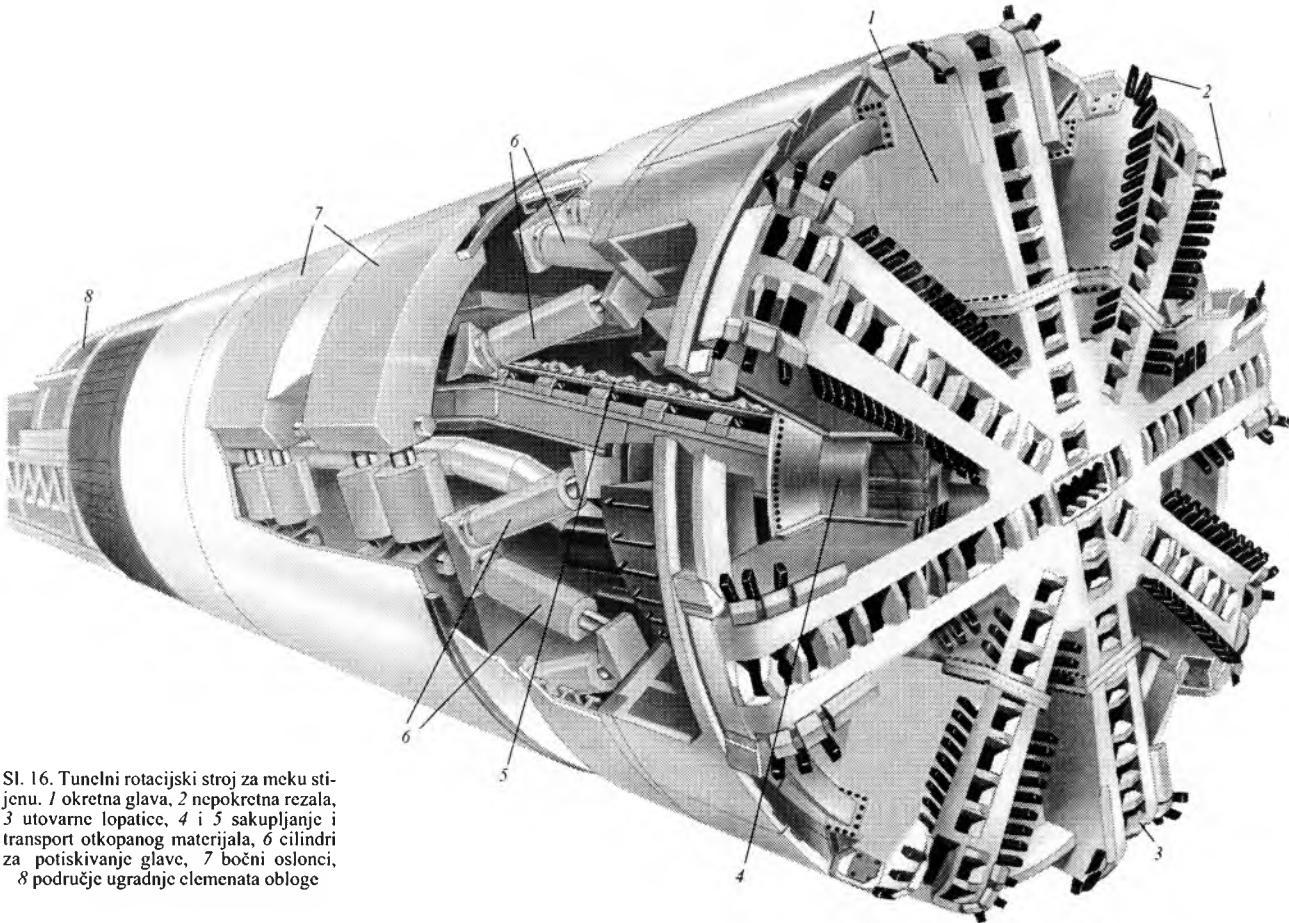


Sl. 15. Iskop pod štitom i ugradnja obloge. 1 glodač, 2 nož, 3 hidraulički cilindar, 4 ugrađeni element obloge, 5 uređaj za ugradnju elemenata, 6 dodavač elemenata, 7 elementi obloge prije ugradnje

Način otkopa stijene ili tla na čelu ovisi o geotehničkim uvjetima, pa to može biti otkop malim bagerom s okretnom žlicom ili otkop tunelnim kopačem. Ponekad se kopač veže na konstrukciju štita, pa se smanjuje manevriranje stroja. Pojava podzemne vode traži složeniji štit, jer treba raditi na kesonski način, s potpuno mehaniziranim otkopom i obično s hidrauličnom otpremom materijala.

Slično radi i stroj za iskop tunela malih profila (*mikrotunela*), promjera $0,8 \cdots 2,5$ m, koji služe za prolaz instalacija ili kanalizacije ispod prometnica i objekata. Stroj duljine nekoliko metara sa štitom i ugrađenim kopačem spušta se u okomito iskopanu rupu. Pošto kopač iskopa dio mikrotunela određene duljine, ugrađuje se prsten obloge i cijela se cijev obloge zajedno sa strojem potiskuje prema naprijed pomoću hidraulične preše, sve dok glava stroja ne probije zapreku.

Iskop tunelnim rotacijskim strojem. Nakon već zaboravljenog tunelnog stroja C. Beaumonta iz 1880, konstruirao je J. S. Robins 1954. godine stroj s rotirajućom glavom kojim se mogao kopati tunel velikog okruglog presjeka u čvrstim stijenama. To je

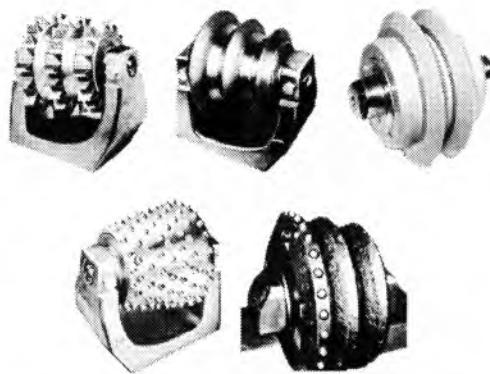


Sl. 16. Tunelni rotacijski stroj za meku stijenu. 1 okretna glava, 2 nepokretna rezala, 3 utovarne lopatice, 4 i 5 sakupljanje i transport otkopanog materijala, 6 cilindri za potiskivanje glave, 7 bočni oslonci, 8 područje ugradnje elemenata obloge

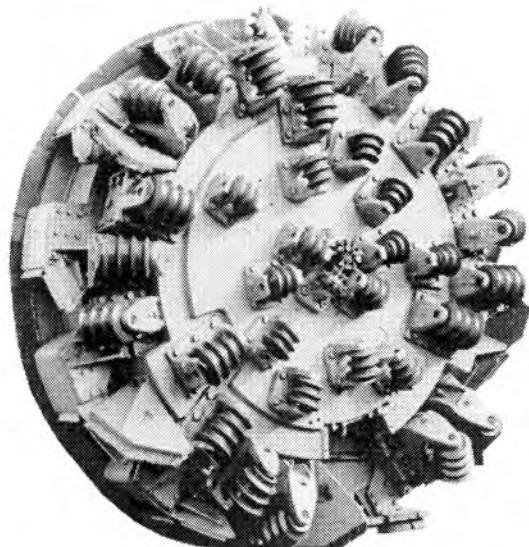
bio stroj promjera 3,27 m, s motorima snage 254 kW, potisnom silom od 143 kN, s 24 rotirajuća diska na čelu, a mogao je napredovati 3 m/h u stjeni čvrstoće 90…190 N/mm².

Iskop tunelnim rotacijskim strojem najsvršeniji je i potpuno mehanizirani način izradbe tunela. Stroj istodobno mehanički iskapa, utovaruje i transportira otkopani materijal te podgrađuje i osigurava iskopani profil (sl. 16). Čelo suvremenog tunelnog rotacijskog stroja (nazvanog *tuneler* ili popularno krtica) čini rezna glava koja rotira brzinom od 0,5…3 okretaja u minuti, pa promjer glave, koji može biti i veći od 10 m, određuje ujedno i promjer tunela. Rezna glava svojim okretanjem pokreće okretne diskove s oštrom rubovima ili žrvnjeve koji se nalaze u ležajima na njezinoj prednjoj strani (sl. 17). Diskovi su zapravo rezala promjera

30…40 cm, a noževi su im različita oblika, glatki, nazubljeni ili s krunom od umetaka vrlo tvrdih materijala (sl. 18). Diskovi nemaju vlastiti pogon, nego se okreću zbog rotacije glave, pa drobe i odlamaju komade stijene. Diskovi su po čelu tako raspoređeni da prilikom okretanja glave prelaze preko cijele iskopne površine. Uz diskove na glavi nalaze se i čvrsti noževi koji poravnavaju iskop u čvrstim stijenama. Za iskop u vrlo mekanim stijenama i tlima diskovi nisu učinkoviti, pa se na čelu stroja nalaze samo noževi.



Sl. 18. Različiti oblici okretnih diskova i žrvnjeva



Sl. 17. Rezna glava tunelnog rotacijskog stroja

Na reznu glavu stroja nastavlja se, bez obzira na kvalitetu stijena, valjkasti štit dug do desetak metara, unutar kojeg su smješteni glavni pogonski i radni strojevi. Reznu glavu stroja potiskuje prema naprijed jaka hidraulična preša, a štit se bočno odupire s pomoću dva posebna prstena. Stroj radi kontinuirano, a sustavi oslanjanja naizmjence napreduju za po jedan korak, uz istodobno uvlačenje klipa glavnog cilindra. Sila kojom se stroj potiskuje ovisi o veličini stroja i vrsti stijene, a iznosi 3…120 MN. Primjerice, strojevi za iskop Eurotunela imali su instaliranu snagu od 4,8 MW, sila potiskivanja iznosila je 115 MN, a na čelu su imali po 49 diskova i 236 čvrstih noževa.

Otkopani materijal pokretnim se vrcama transportira do kraja stroja, gdje se utovaruje u vagone. Noviji strojevi imaju mogućnost zamjene aktivnih dijelova za bušenje na glavi, pa i mogućnost zatvaranja čela i prelaska na kesonski rad i hidraulični transport ako se nađe na podzemnu vodu. Neposredno iza štita smješten je uredaj za ugradnju elemenata obloge.

Suvremeni tunelni rotacijski stroj u sredini čela ima bušilicu kojom se $10\cdots30$ m ispred čela ispituje stijena istražnim bušenjem. Iza glave stroja mogu se nalaziti bušilice i pumpe za injektiranje. Cijelim se procesom iskopa, odvoza materijala, injektiranja te dopreme i ugradnje obloge upravlja iz upravljačkog središta, u kojem se skupljaju podaci iz električkih senzora za praćenje rada svih pogonskih strojeva, smjera i nagiba stroja i dr.

U Hrvatskoj je prvi veći tunelni stroj, promjera 6,5 m, primijenjen 1966. prilikom gradnje Hidroelektrane Split.

Gradnja plitko položenog tunela. Plitko položeni tunel obično se gradi tako da se s površine iskopa usjek, u njemu izradi nosiva konstrukcija, a zatim se usjek zaspne. To je tunel kakav se često gradi za podzemnu željeznicu i za pojedine dionice brzih gradskih cesta.

Strane dubokih otvorenih iskopa osiguravaju se pribojima od čeličnih zagatnih profila ili betonskim dijafragmama. Iskopi za dijafragme kopaju se bagerima s posebno oblikovanim hvataljkama, a dijafragme se polažu u slojevima duljine $2\cdots5$ m i debeljine $0,5\cdots1$ m. Duboki iskopani prorez stabiliziraju se ispunom od teške isplačne glinene suspenzije s dodatkom baritnog praha. Kad se postigne konačna dubina, u prorez se spušta armaturni koš. Cijela se stijena betonira odozgo plastičnom betonskom masom koja potiskuje isplaku prema gore. Zaštitne se dijafragme mogu ostvariti i kao niz kopanih pilota većeg promjera koji se dodiruju. Na većim dubinama treba stranice priboga međusobno razuprijeti ili bočno usidriti.

Uronjeni tunel. Prijelaz prometnica preko plovnih putova za oceanske brodove trebalo bi podignuti vrlo visoko, više od 50 m. S druge strane, ispod vodotoka u nizinama obično se nalaze beli slojevi pijeska, mulja i tla nepovoljna za iskop tunela. Rješenje se našlo u prolasku prometnice po dnu vodene zapreke.

Dionice tunela duge $50\cdots150$ m izrađuju se u dokovima, zavaraju privremeno na čelima i plutajući dopremaju do mjesta ugradnje, gdje se spuštaju na dno, na pripremljeno ležište. U europskim se zemljama dionice pretežno izrađuju od armiranog betona, dok se u SAD i Japanu prednost daje čeličnim konstrukcijama. Pojedina se dionica konstruira tako da može plutati ako se šupljina djelomice ispuni vodom, te da se može spustiti na dno daljim upuštanjem vode u šupljine. U profilu se ostavljaju i šupljine za naknadno ispunjavanje teškim betonskim balastom, koji treba spriječiti izranjanje dionice kada se iz nje izbaci voda. Dionice se međusobno spajaju tako da ne propuštaju vodu ni pri većim pomacima, pa se spojnice sastavljaju od posebno profiliranih metalnih dijelova i plastičnih uložaka.

Profil uronjenog tunela omogućuje prolazak prometnice u istoj širini kao na površini. Za ceste se obično izrađuju dva odvojena profila. Prirodno provjetranje takva duboko položenog tunela nije dovoljno, pa se na obalama postavljaju ventilacijske stанице veće snage.

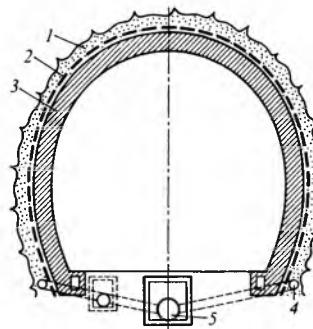
M. Hudec

ODVODNJA I IZOLACIJA TUNELA

Podzemna voda koja izbija u iskop tunela u gradnji ili u završeni tunel u uporabi velika je smetnja, a često i opasnost. Voda se stoga stalno sakuplja i kontrolirano odvodi, a njezin ulazak u završeni tunel sprečava se drenažom i hidroizolacijom tunelne obloge.

Iz tunela u gradnji voda se najjednostavnije odvodi kanalom izmjera $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ u sredini iskopa. Kako se tunel najčešće projektira s padom na obje strane, voda kanalom istječe djelovanjem gravitacije. U tunelu koji se iskapa u padu, posebno u tunelu ispod vodenih tokova, u kojem je najniža točka približno na polovici duljine, odvodnja je mnogo teža. Pri manjem dotoku voda se može kanalima suprotnog nagiba sakupljati u jamama i povremeno crpsti, dok se pri većem dotoku treba praktički kontinuirano uklanjati crpkama.

Zbog vodopropusnosti tla i stijena voda se nakuplja iza obloge završenog tunela i prokapljuje kroz nju. Time se obloga oštećeje i razara, a postoji i opasnost da se ispiranjem materijala iza obloge poveća njezino opterećenje od brdskog potiska. Stoga je tunelu cijev potrebno zaštititi i izolirati od procjeđivanja vode kroz oblogu, a svu vodu koja se nakuplja iza obloge potrebno je stalno sakupljati u drenažne cijevi uz temelje obloge, ispuštati kroz otvore u oblozi u kanal koji se nalazi unutar tunela i zatim odvodi iz tunela (sl. 19). U željezničkom jednokolosiječnom tunelu kanal se nalazi sa strane, u dvokolosiječnom tunelu u sredini, a u cestovnom tunelu u luku na nižoj strani. Kanal se betonira i pokriva armiranobetonским pločama ili se gradi od betonskih cijevi s otvorima za provjeru i čišćenje.



Sl. 19. Izolacija tunela i odvodnja. 1 štrcani beton, 2 izolacija, 3 obloga, 4 drenažni kanal, 5 odvodni kanal

Jednostavna se zaštita *drenažom* provodi na mjestima gdje je brdski potisak malen i kad nije potrebna izolacija. Prostor se iza obloge ispunjava drobljenim materijalom ili šljunkom, kroz koji se voda cijedi u drenažnu cijev.

Djelomična se izolacija obloge postiže drenažom pomoću krovnih kanalica ili cijevi *juvidur*. Na stijensku se masu prvo nаноси слој štrcanog betona, na koji se prije betoniranja obloge vertikalno postavljaju kanalice ili cijevi na razmaku od 10 do 50 cm.

Tunel se ne izolira potpuno po cijeloj svojoj duljini, nego uglavnom samo na onim mjestima i dionicama gdje se očekuje jače vlaženje i procjeđivanje vode kroz oblogu unatoč drenaži. Kvalitetna i trajna, ali skupa izolacija postiže se postavljanjem valovitog lima između štrcanog betona i obloge. Manje je kvalitetna izolacija od bitumena i krovne ljepenke ili jute s vanjske strane obloge, obično u više slojeva. Ona se zaštićuje opekom ili kamenom ili se između stijene i obloge nanosi sloj štrcanog betona. Bitumenska je izolacija djelotvorna, ali nije trajna i lako se oštećeje.

Suvremena je izolacija folijom od polimernog materijala. Na štrcani se beton kao zaštita od hraptavog betona stavlja pust, zatim foliju, a do nje betonska obloga. Veliki komadi folije (duljine $50\cdots100$ m i širine $6\cdots8$ m) spajaju se na preklopnim mjestima zavarivanjem u dvije linije, tako da u sredini ostaje zračni jastuk za kontrolu zavara. I injektiranjem u tlo oko tunelne cijevi postiže se zaštita od procjeđivanja vode kroz oblogu. Obično se injektiraju cement i bentonit (v. Silicij, TE 12, str. 88).

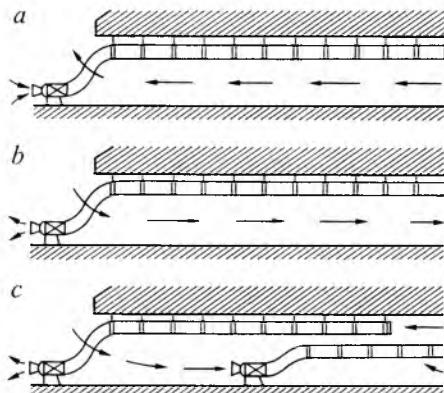
VJETRENJE TUNELA

Za vrijeme gradnje tunela, a i prilikom njegove uporabe, zrak se u tunelu kvari i potrebno ga je obnavljati odvođenjem istrošenog i dovodenjem svježeg zraka. Intenziteti i načini vjetrenja u gradnji i u uporabi tunela nisu jednaki, pa se razlikuje separatno (privremeno) i trajno vjetrenje.

Separatno vjetrenje traje do uključivanja tunela u protočnu zračnu struju, tj. do probroja tunela ili do spajanja s vjetrenim okonom. Separativno vjetrenjem treba dovoditi svježi zrak i istodobno osigurati uvjete za boravak i rad ljudi u tunelu (prikladna temperatura, vlaga, brzina strujanja zraka), a odvoditi zrak koji se kvari od prisutnosti ljudi, pojave podzemnih plinova, rada strojeva i stvaranja plinova i prahine nakon miniranja.

Prirodno separatno vjetrenje moguće je samo iznimno, kada lokalne prilike (nadmorska visina, konfiguracija, temperatura) omogućuju prirodno strujanje zraka do radnog mjeseta. Takvo je vjetrenje moguće u iskopu manjih duljina, gdje svježi zrak struji po dnu, a istrošeni zrak izlazi po gornjem dijelu iskopa.

Umjetno separatno vjetrenje može biti tlačno, usisno i kombinirano (sl. 20). Pri tlačnom je vjetrenju oplakivanje radilišta svježim zrakom dobro, ali je nedostatak što se povratna zračna struja koja nosi plinove i prašinu s radilišta kreće polako. Pri usisnom vjetrenju istrošeni zrak brzo izlazi u atmosferu, što je prednost tog načina vjetrenja, ali je oplakivanje radilišta svježim zrakom slabo. Kombiniranim se vjetrenjem otklanaju nedostaci tlačnog i usisnog vjetrenja.



Sl. 20. Tlačno (a), usisno (b) i kombinirano (c) vjetrenje tunela u gradnji

Separatno se vjetrenje provodi pomoću aksijalnih cijevnih ventilatora. Jednostupanjski ventilatori postižu tlakove do 3 500 Pa, a visokotlačni s protusmjernom vrtnjom i do 8 000 Pa. Promjena radne karakteristike ventilatora, tj. regulacija količine i tlaka zraka, moguća je na više načina, npr. uredajem za promjenu kuta lopatica, mijenjanjem broja okretaja, paralelnim ili serijskim spajanjem ventilatora itd. (v. *Ventilator*).

Vjetrene se cijevi izrađuju od lima debljine 0,5–2 mm ili od polimernih materijala. Limene se cijevi spajaju prirubnicama uz upotrebu brtivila i mogu se upotrebljavati za tlačno i usisno vjetrenje. Cijevi od polimernih materijala služe uglavnom za tlačno vjetrenje, a samo se spiralno armirane cijevi mogu upotrijebiti i za usisno vjetrenje.

Pri proračunu separatnog vjetrenja treba uzeti u obzir da se pri radu u tunelu vjetrene cijevi oštećuju i da se kroz otvore gubi zrak, zbog čega se znatno smanjuje količina zraka na kraju cijevi u usporedbi s količinom zraka koju daje ventilator. U cijevi promjera D , u kojoj je brzina strujanja zraka u i tlak p , smanjuju se brzina i tlak zraka. Prema Darcy-Weisbachovoj jednadžbi pod tlaka na duljini dx iznosi

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{u^2 \rho}{2}, \quad (16)$$

gdje je λ koeficijent trenja pri strujanju zraka, a ρ gustoća zraka. Promjena brzine du na duljini dx ovisi o ploštinu otvora i brzini istjecanja v , pa je

$$\frac{du}{dx} = \frac{4f'}{D} v, \quad (17)$$

gdje je f' omjer ploštine istjecanja i ploštine plašta cijevi.

Pri dimenzioniranju ventilatora i cjevovoda treba odrediti promjer cjevovoda, snagu i depresiju ventilatora te protok zraka na kraju cjevovoda. Snaga ventilatorskog motora iznosi

$$S = \frac{Q_1}{\eta_v \eta_m} \left[p_1 + (1 + \xi_g) u \frac{\rho}{2} \right], \quad (18)$$

gdje je Q_1 količina zraka na izlazu iz ventilatora, ξ_g koeficijent gubitaka pri ulazu zraka u ventilator, a η_v i η_m koeficijenti korisnog djelovanja ventilatora i motora.

Tlok u vjetrenim cjevima ne smije prijeći dopušteni tlak koji određuju proizvođači. Dopušteni statički tlak za cijevi od polimernog materijala iznosi obično 6 000 Pa. Proračunom se dobiva najmanji promjer cijevi s kojim se iskop duljine L može vjetriti uz količinu zraka Q_0 i tlak p_1 . Inače treba u vjetrene cijevi ugraditi još jedan ventilator.

Trajno vjetrenje primjenjuje se u tunelu u uporabi. *Prirodno vjetrenje* moguće je samo u kratkom tunelu i u posebno povoljnim okolnostima, npr. u tunelu s jednostranim nagibom u kojem prirodno strujanje nastaje zbog različitih atmosferskih prilika, u prvom redu zbog razlike u temperaturi, tlaku ili gustoći zraka na ulazu i izlazu tunela, a također i zbog razlike između vanjske i unutrašnje temperature. I vjetar može uzrokovati strujanje zraka u tunelu, osobito kada se njegov smjer poklapa sa smjerom tunela.

Vjetrenje može biti uzrokovano i prometom zbog stvaranja razlike tlakova pri gibanju vozila kroz tunel, ako je brzina vozila različita od brzine zraka (tzv. *stapni efekt*). Pritom je važna brzina i oblik vozila, omjer poprečnog presjeka vozila i tunela te gustoća i smjer prometa. Pri jednosmernom se prometu u dugom tunelu tako postiže dobro vjetrenje. U tunelu s dvosmernim prometom taj je efekt mnogo slabiji.

Umjetno vjetrenje primjenjuje se u dugom tunelu te u kraćem tunelu s intenzivnim prometom. Posebno je važno da se osigura djelotvorno *vjetrenje cestovnih tunela*, pa se u nastavku opisuje upravo vjetrenje tih tunela.

Količina svježeg zraka u cestovnom tunelu treba biti tolika da koncentracija štetnih i otrovnih plinova bude manja od najveće dopuštenе koncentracije, te da se osigura potrebna vidljivost pri pojavi dima i čade, pogotovo prilikom moguće nesreće ili požara.

Više je štetnih i otrovnih plinova koji se pojavljuju u cestovnom tunelu pri radu benzinskih i Dieselovih motorova, a najčešći su ugljični monoksid, ugljični dioksid, dušični oksidi i sumporovodik. Ugljični monoksid je najotrovniji i prema njemu se računa potrebna količina svježeg zraka u cestovnom tunelu. Prije 25 godina računalo se u SAD s prosječnom emisijom ugljičnog monoksida od $2,1 \text{ m}^3/\text{h}$ po osobnom automobilu, a danas je ta vrijednost $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

U Europi se pri projektiranju cestovnih tunela računa da je emisija ugljičnog monoksida iz osobnih vozila s benzinskim motorom $0,017 \text{ m}^3/(\text{tkm})$, i to pri vožnji brzinom od $40\cdots60 \text{ km/h}$ na nadmorskoj visini od 400 m. Za rad motora u mirovanju uzima se da je emisija $0,0076 \text{ m}^3/\text{min}$.

Potrebna količina svježeg zraka (obujam zraka po jedinici duljine tunela i jedinici vremena), računajući s radom benzinskih motorova, tj. sa zagadnjem ugljičnim monoksidom, iznosi

$$Q_b = N M \frac{q_{CO}}{q_{COMax}} f_h f_f f_d f_r, \quad (19)$$

gdje je N broj vozila u jedinici vremena, M prosječna ukupna masa jednog vozila, q_{CO} obujam ispuštenog ugljičnog monoksida po jedinici mase vozila i jedinici duljine tunela, q_{COMax} najveća dopuštena obujamna koncentracija ugljičnog monoksida, f_h , f_f i f_d korekcijski faktori za nadmorsknu visinu, brzinu vožnje i za vozila s Dieselovim motorom, a f_r je dodatni korekcijski faktor.

Osobni automobili i kamioni s Dieselovim motorima zaguđuju zrak dimom i čadom i time smanjuju vidljivost. Količina potrebnoga svježeg zraka radi osiguranja dovoljne vidljivosti može se izračunati na više načina. Tako se, npr., proračun tzv. težinskim postupkom temelji na utvrđivanju količine čvrstih čestica u zraku, pa potrebna količina svježeg zraka (obujam zraka po jedinici duljine tunela i jedinici vremena) iznosi

$$Q_d = N M \frac{q_d}{q_{dmax}} f_i f_h, \quad (20)$$

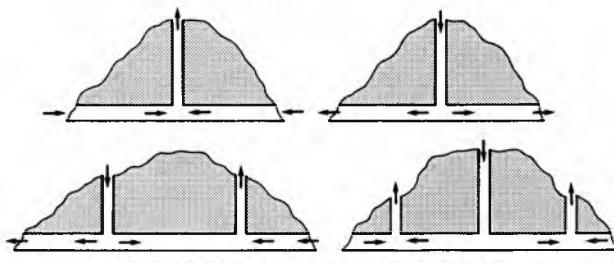
gdje je N broj vozila u jedinici vremena, M prosječna ukupna masa jednog vozila, q_d ispuštena masa dimnih čestica po jedinici mase vozila i jedinici duljine tunela, q_{dmax} najveća dopuštena masena koncentracija dimnih čestica u zraku, a f_i i f_h korekcijski faktori za nagib ceste i nadmorsknu visinu.

S obzirom na pravac strujanja zraka u tunelu razlikuje se uzdužno ili longitudinalno vjetrenje, polupoprečno vjetrenje i poprečno ili transverzalno vjetrenje.

Uzdužno vjetrenje ostvaruje se strujanjem zraka čitavim profilom tunela od ulaska do izlaska zraka iz tunela. Zrak pritom može strujati od jednog portala do drugoga ili između portala i jednog ili više vjetrenih okana (sl. 21). Brzina strujanja zraka u većini je europskih zemalja ograničena na 10 m/s , jer pri većim

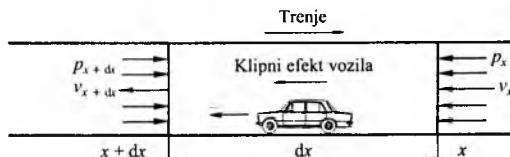
TUNEL

brzinama strujanja zraka vožnja tunelom postaje neugodna. Uređaji za uzdužno vjetrenje mnogo su jeftiniji od uređaja za druge načine vjetrenja, pa se i najviše upotrebljavaju unatoč manjoj sigurnosti u slučaju požara.



Sl. 21. Uzdužno vjetrenje pomoću vjetrenih okana

Energija za pokretanje zraka pri uzdužnom vjetrenju može potjecati od prirodnog vjetrenja, vjetrenja uzrokovanog prometom i od ventilatora, a koji će se izvori energije i u kojoj kombinaciji primijeniti utvrđuje se proračunom. Pritom su važne veličine duljina tunela, potrebna količina zraka i karakter prometa.



Sl. 22. Djelovanje sile na vozilo u tunelu uz prirodno vjetrenje i vjetrenje uzrokovanovo prometom

Prirodno vjetrenje i vjetrenje uzrokovanovo prometom (sl. 22) može se na dijelu tunela dx izraziti jednadžbom:

$$\rho A_T v_x^2 + A_T p_x = \rho A_T v_{x+dx}^2 + A_T p_{x+dx} - \sum F, \quad (21)$$

$$\rho A_T (v_{x+dx}^2 - v_x^2) = A_T (p_x - p_{x+dx}) + \sum F, \quad (22)$$

gdje je ρ gustoća, v brzina i p tlak zraka, A_T ploština poprečnog presjeka tunela, a $\sum F$ sile koje nastaju od trenja zraka o stijenke, gubitaka tlaka na krajevima tunela, djelovanja vjetra i temperature, stapnog efekta zbog gibanja vozila i od razlika tlakova između krajeva tunela. Zrak se pri tome uzima kao nestišljivi fluid, što je prihvatljivo za stvarne brzine strujanja u tunelu.

Trenje na zidovima tunela iznosi

$$F_1 = \frac{\lambda A_T}{D} \cdot \frac{\rho}{2} v_x^2 dx, \quad (23)$$

gdje je λ koeficijent trenja, a D hidraulični promjer tunela. Za tunel je koji nije okruglog poprečnog presjeka $D = 4A_T/U$, pri čemu je U opseg tunela. Zbog gibanja vozila pojavljuje se stapni efekt, pa je potisna sila stapa

$$F_2 = \frac{A_c C}{s} \cdot \frac{\rho}{2} (w - v_x)^2 dx, \quad (24)$$

gdje je A_c poprečni presjek vozila, C koeficijent trenja između zraka i vozila, s razmak vozila, a w brzina vožnje.

Ako se brzina i tlak na bilo kojem presjeku tunela označe s v_x i p_x , a brzina i tlak na ulazu tunela s v_0 i p_0 , te ako se uvrste vrijednosti F_1 i F_2 u izraz (22), dobiva se

$$\rho A_T (v_x^2 - v_0^2) = A_T (p_0 - p_x) + \int_0^x \frac{A_c C}{s} \cdot \frac{\rho}{2} (w - v_x)^2 dx - \int_0^x \frac{\lambda A_T}{D} \cdot \frac{\rho}{2} v_x^2 dx. \quad (25)$$

Gubitak tlaka ili depresija h na ulazu tunela izražava se Bernoullijevom jednadžbom. Ako se tlak, nadmorska visina i brzina neposredno ispred ulaza u tunel označe s P_0 , Z_0 , $V_0=0$, a neposredno iza ulaza s p_0 , z_0 , v_0 , te kako je $Z_0=z_0$, to je

$$P_0 = p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 (1 + \varepsilon), \quad (26)$$

gdje je ε koeficijent lokalnog otpora na ulazu. Na izlaznoj su strani tunela analogni presjeci, i to u tunelu (p_L , z_L , v_L) i izvan tunela (P_L , Z_L , $V_L=0$). Kako je $Z_L=z_L$, dobiva se da je

$$P_L = p_L + \frac{\rho}{2} v_L^2 (1 - c), \quad (27)$$

gdje je c koeficijent lokalnog otpora na izlazu.

Za cijeli je tunel $x=L$, te, kad se uvrste izrazi (26) i (27) u izraz (25), p_0 i p_L iznose

$$(P_L - P_0) A_T = \int_0^L \frac{A_c C}{s} \cdot \frac{\rho}{2} (w - v_x)^2 dx - \int_0^L \frac{\lambda A_T}{D} \cdot \frac{\rho}{2} v_x^2 dx - \frac{\rho}{2} v_0^2 A_T (1 + \varepsilon) + \frac{\rho}{2} v_L^2 A_T (1 - c). \quad (28)$$

Pri prirodnom se vjetrenju brzina u tunelu ne mijenja, tj. $v_0=v_x=v$, pa izraz (28) nakon integriranja dobiva oblik

$$(P_L - P_0) A_T = \frac{A_c C}{s} \cdot \frac{\rho}{2} L (w - v)^2 - v^2 A_T \frac{\rho}{2} \left(\frac{\lambda L}{D} + \varepsilon + c \right). \quad (29)$$

Taj izraz definira brzinu strujanja uz poznate podatke za koeficijente otpora (λ , ε , C), elemente tunela (L , A_T , D), gustoću zraka, te tlakove na krajevima tunela. Na razliku tlakova na krajevima tunela utječe vjetar, razlika visinskih kota i razlika temperature u tunelu i one izvan njega.

Ventilatori se za uzdužno vjetrenje primjenjuju u kraćem tunelu s intenzivnim prometom, u tunelu gdje se očekuju zastoje u prometu te u duljem tunelu. To su aksijalni ventilatori, a raspoređuju se na ulazu i izlazu tunela ili uzduž njegove trase.

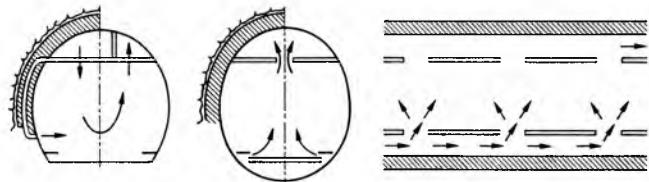
Na mjestu gdje rade, ventilatori stvaraju depresiju. Ako se depresija h uvrsti u izraz (29), te ako se zanemare razlike tlakova na portalima, dobiva se izraz koji se često primjenjuje za proračun ventilatora:

$$h + \frac{A_c C}{s A_T} \cdot \frac{\rho}{2} L (w - v)^2 = v^2 \frac{\rho}{2} \left(\frac{\lambda L}{D} + \varepsilon + c \right). \quad (30)$$

Aksijalni se ventilatori postavljaju uzduž tunelne trase. Ukupno se depresija tunela dijeli na veći broj ventilatora, koji se pojedinačno ili u skupinama vješaju u kalotu tunela. Pri jednosmjernom je prometu u tunelu rad ventilatora također jednosmjeren, kako bi se iskoristio utjecaj prometa na gibanje zraka. Pri dvosmjernom se prometu odabiru ventilatori s promjenljivim pravcem djelovanja ili se ugrađuje dvostruki broj ventilatora, tako da je moguća promjena pravca strujanja zraka, pa se on može prilagoditi smjeru prirodnog vjetrenja ili smjeru intenzivnijeg prometa.

Požar je u tunelu s jednosmjernim prometom manje opasan jer se dim i otrovni plinovi šire u dio tunela koji vozila napuštaju. Međutim, pri dvosmjernom su prometu ugroženi sudionici koji se iz oba smjera približavaju mjestu požara. Stoga se iz sigurnosnih razloga postavljaju na svakih 200–300 m prečnici do susjednoga, paralelnog tunela, ako on postoji, ili do površine, ako je to moguće. Ako se ne mogu izgraditi sigurnosne komore s dovodom svježeg zraka, tunel se oknima dijeli na kraće dionice da bi se smanjila opasnost od požara.

Poprečno vjetrenje ostvaruje se dovođenjem i odvođenjem zraka odvojenim kanalima s otvorima na pojedinim mjestima, pa zrak struji tunelom poprečno (sl. 23). Najbolje je da se svježi zrak



Sl. 23. Poprečno vjetrenje tunela

dovodi kroz otvore u donjem dijelu tunela, uz kolnik, a nečisti zrak odvodi iz gornjeg dijela. Najveće su brzine strujanja zraka u kanalima $25\cdots40$ m/s. Takvo je vjetrenje pogodno za dulje tunele, pa se oni dijele u dionice kao zasebne vjetrene jedinice. Ventilatori se ugrađuju na početku dovodnog i na kraju odvodnog kanala svake dionice. Promjenom brzine vrtnje i nagibom kuta lopatica ventilatori mogu raditi u više režima, tj. količine i depresije mogu se mijenjati u širokom rasponu.

Polupoprečno vjetrenje nastaje kada postoji samo vjetreni kanal za odvod zraka, pa zrak u prometnom dijelu tunela struji i izlazi u uzdužnom smjeru. Takvo će se vjetrenje pojaviti i kad je količina zraka u dovodnom kanalu različita od količine u odvodnom kanalu.

Oprema i izvedba za poprečno i polupoprečno vjetrenje skuplje su nego za uzdužno vjetrenje, ali je u tim tunelima opasnost od požara mnogo manja, što je i osnovna prednost takva načina vjetrenja. Ispravno dimenzionirani sustav poprečnog vjetrenja s brzom i automatskom regulacijom omogućit će prilikom požara zaustavljanje uzdužnog strujanja i brzo i intenzivno usisavanje dima u vjetrene kanale.

S. Vujec

ŽELJEZNIČKI TUNEL

Tehnički elementi željezničkog tunela (trasa, uzdužni nagib, poprečni presjek) ovisi o važnosti i vrsti pruge za koju se tunel gradi te o geološkom sastavu tla.

Trasa tunela može biti u pravcu ili u luku. Povoljniji je tunel u pravcu, gdje je os kolosijeka (pruge) ujedno i os tunela, a obje su tračnice na istoj visini. To je posebno važno za duge tunele radi boljeg provjetravanja, veće prometne sigurnosti i manjih troškova održavanja. Lukove je povoljnije izvesti ispred ulaznog, odnosno iza izlaznog tunelnog portala. Ako je trasa tunela u luku, treba izbjegavati protulukove.

Zaokretni tunel (kružni tunel, tunelna petlja) gradi se ondje gdje na kratkoj dionici treba svladati veliku visinsku razliku ili kada je padina kojom se vodi trasa strmija od dopuštenog nagiba, pa pruga treba produljiti kako bi se nagib smanjio. Trasa tada unutar tunela čini krug i izlazi obično nedaleko od ulaza tunela, ali na različitoj koti. Takav je tunel težak za izvedbu jer je u jednostranom nagibu, pa se praktički radi samo s jedne strane. Osim toga, potrebna su i ventilacijska okna, jer je zbog dugog luka prirodno provjetravanje vrlo slabo.

Uzdužni nagib tunela ovisi o konfiguraciji terena i o mjerodavnom nagibu, koji se određuje za svaku prugu posebno. Tuneli u horizontali grade se samo iznimno, kada su kraći od 300 m ili kada se odvodnja tunela može povoljno riješiti. Dobra odvodnja tunela potrebna je prilikom gradnje, a i tijekom uporabe. Da bi voda brže otjecala, donja granica uzdužnog nagiba u tunelu iznosi $2\cdots4\%$, već prema kakvoći stijenskog materijala. Gornja granica nagiba ograničena je mjerodavnim nagibom pruge, koji se smanjuje za vrijednost otpora lukova i za dodatni otpor u tunelu. Dodatni otpor nastaje zbog otpora zraka, koji je u tunelu veći nego na otvorenoj pruzi, i zbog smanjenog trenja između kotača vozila i tračnica, što je uzrokovan vlagom. Zbog dodatnog otpora gornja granica uzdužnog nagiba trase u tunelu može biti i do 20% manja od nagiba na otvorenoj pruzi.

Brdska se zapreka obično svladava *vodorazvodnim tunelom*. **Bazni tunel**, koji spaja dvije doline približno iste nadmorske visine, najčešće je velike duljine. Kraci vodorazvodni tunel bliži je gorskom sedlu, a njegova se duljina smanjuje s porastom visinske kote prijelaza. Prilazne rampe vodorazvodnom tunelu to su dulje što je tunel na višoj koti. One se obično grade s najvećim dopuštenim nagibom, pa su i svi tuneli na toj dionici u jednostranom nagibu. Na prilaznim je rampama vrlo često potrebno izgraditi zaokretni tunel ili više takvih tunela da bi se produljenjem trase smanjio njezin nagib.

Vodorazvodni se tunel gradi pretežno u dvostrešnom nagibu. Time se postiže dobra odvodnja i jednostavan odvoz iskopanog materijala. Mjesto promjene uzdužnog nagiba u vodorazvodnom tunelu ovisi u prvom redu o visinskoj razlici ulaznog i izlaznog portala te o potrebi i mogućnosti odlaganja iskopanog gradiva na jednu ili na obje strane, ali i o vrsti gradiva. Ako se geološkim

ispitivanjima ustanovi da će s jedne strane izvedba biti teža ili ako se s obje strane ne može upotrijebiti jednaka mehanizacija, mjesto promjene nagiba neće biti u sredini tunela. Pri sučeljavanju suprotnih nagiba većih od 5% potrebno je između njih umetnuti dionicu s manjim prijelaznim nagibom. Ako su sučeljeni nagibi manji od 5%, ali veći od 2%, dovoljno je područje promjene nagiba zaobliti vertikalnim kružnim lukom. Bazni tunel koji spaja dvije doline s većom razlikom nadmorskih visina izgradit će se u jednostranom nagibu, što znatno otežava izvedbu, ili nagib treba s jedne strane biti strmiji, a s druge blaži.

Izbor najviše kote na pruzi, odnosno kote vodorazvodnog tunela ovisi o prirodi brdskega lanca koji se prelazi i klimatskim uvjetima u tom području. U Hrvatskoj se željeznički prijelazi preko jadransko-crnomorskog razvoda nalaze na $700\cdots900$ m nadmorske visine: tunel Sljeme na pruzi Zagreb–Rijeka na 836,4 m, a prijevoj Rudopolje na pruzi Ogulin–Split na nadmorskoj visini od 870,3 m.

Poprečni presjek tunela ovisi o slobodnom profilu pruge, načinu vuče, širini, broju i razmaku kolosijeka, polumjeru luka, nadvišenju vanjske tračnice, opremi tunela te brdskom opterećenju. *Slobodni profil pruge* jest obris (kontura) određenih izmjera izvan kojeg moraju ostati svi objekti i postrojenja koji se nalaze na putu prolaza vlaka, i to pri trajnim i pri elastičnim pomicanjima kolosijeka. Na elektrificiranim prugama mora se osigurati dodatni prostor za prolaz pantografa, za kontaktну mrežu i za pričvrstne elemente vozognog voda (v. *Željeznica*). Stoga se prilikom izgradnje novih tunela primjenjuje slobodni profil za električnu vuču. Na prugama izgrađenim u XIX. i prvoj polovici XX. st. primjenjeni su manji slobodni profili (za parnu vuču), tako da na tim prugama tuneli ne mogu, bez veće rekonstrukcije, služiti za prolazak vlakova s električnom vućom i s teretom većih izmjera (kontejneri, poluprikolice i drugi teret).

S obzirom na otvorenu prugu, slobodni profil u tunelu treba povećati. Razlog je tome mogućnost deformacije tunelne obloge zbog brdskog opterećenja te sigurnost osoblja koje u tunelu nadzire prugu ili obavlja manje popravke. Za sigurnost osoblja za održavanje grade se i skloništa s obje strane kolosijeka na svakih 50 m. Oblik i izmjere skloništa u boku tunelne obloge određuju se prema potrebi, za osoblje najčešće $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2,1\text{ m}$, a za smještaj opreme izmjere su nešto veće.

Kada se gradi tunel za dvokolosiječnu prugu, valja odlučiti hoće li oba kolosijeka prolaziti kroz istu tunelnu cijev ili će svaki kolosijek imati svoju odvojenu cijev. Prva je varijanta $30\cdots40\%$ jeftinija, ali pri odlučivanju treba uzeti u obzir i druge činitelje, u prvom redu geotehnička svojstva tla i brdsko opterećenje. Kraći dvokolosiječni tunel ima obično samo jednu cijev.

Razmak kolosijeka u istoj tunelnoj cijevi ovisi o slobodnom profilu pruge, vrsti prometa, najvećoj brzini vlakova i aerodinamičkom faktoru. U lukovima se zbog višeg položaja vanjske tračnice vozilo naginje. Međutim, zbog jednostavnije izvedbe i ekonomičnosti tunelna se cijev u luku ne proširuje, nego se os kolosijeka pomiče prema vanjskoj strani luka, tako da se više ne poklapa s tunelnom osi. To, dakako, zahtijeva i veći razmak kolosijeka. Aerodinamički se faktor očituje pri mimoilaženju dvaju vlakova velikih brzina, pa razmak kolosijeka u tunelu treba biti takav da pri njihovu mimoilaženju bočni tlak na prozorna stakla ne bude veći od 1,3 MPa. Zbog svega toga potreban je i veći razmak kolosijeka, posebno na prugama za velike brzine s mješovitim prometom, pa on iznosi od 4,30 m u Italiji do 4,70 m u Njemačkoj.

U vrlo dugim tunelima gradi se i *servisni tunel*. On se nalazi uz glavnu tunelnu cijev ili u sredini između dviju jednokolosiječnih tunelnih cijevi. To je manji tunel koji je s glavnim tunelom povezan na svakih $200\cdots250$ m, a služi za povećanje sigurnosti putnika u slučaju opasnosti u glavnoj tunelnoj cijevi te za jednostavnije održavanje pruge i postrojenja lakšim pristupom kolosijecima bez obustave prometa. Servisni je tunel koristan i stoga što se tako tijekom njegove gradnje unaprijed dobivaju vrlo pouzdani geomehanički podaci, jer se on buši nekoliko kilometara ispred glavne tunelne cijevi. Osim toga, u servisni se tunel mogu smjestiti kabeli, vodoopskrbne cijevi i drugi uređaji, a može poslužiti i za prolazak cestovnih vozila s potrebnom opremom za održavanje kolosijeka i ostalih postrojenja.

Na ulazu i izlazu tunela grade se *portali*. Položaj portala ovisi o gradivu kroz koje pruga prolazi te o meteorološkim uvjetima

(bura, snježni zapusi i sl.). Portal služi kao zid koji čelno podupire gradivo brda, a obično ima i kanal za prihvrat vode s padine iznad portala. Katkada se u sklopu portala, posebno u dugim tunelima, nalaze i prateći objekti koji služe za pogon tunela (upravljačko mjesto za nadzor provjetravanja, osvjetljenja i sl.).

U tablici 3 i 4 navode se neki veći željeznički tuneli u svijetu i u Hrvatskoj. Među njima je kao posljednji sagraden *Eurotunel*, koji prolazi ispod La Manchea i spaja englesko i francusko kopno. Tunel čine tri paralelne cijevi, dvije su dva bočna jednokolosiječna tunela unutrašnjeg promjera 7,60 m na međusobnom razmaku od 30 m, a treća je servisni tunel promjera 4,8 m, koji je položen u sredini i nešto niže radi odvodnje. U servisnom su tunelu za vrijeme gradnje prometovali vlakovi s iskopanim materijalom, građevnim materijalom i montažnim elementima, dok je u uporabi predviđen za održavanje, intervencije prilikom nezgoda, evakuaciju putnika i sl.

Tablica 3
VEĆI ŽELJEZNIČKI TUNELI U SVIJETU

Naziv tunela	Godina izgradnje	Duljina m
Mont Cenis (Frčus), Italija/Francuska	1871.	12850
St. Gotthard, Švicarska	1882.	14980
Arlberg, Austrija	1884.	10248
Bohinj, Slovenija	1906.	6339
Simplon I, Švicarska/Italija	1906.	19803
Karavanke, Austrija/Slovenija	1906.	7976
Tauern, Austrija	1909.	8530
Lötschberg, Švicarska	1913.	14536
Simplon II, Švicarska/Italija	1922.	19821
Cascade, SAD	1929.	12543
Apeninski tunel, Italija	1934.	18507
Hokoriku, Japan	1962.	13870
Shin-Shimizu, Japan	1967.	13500
Rokko, Japan	1971.	16250
Schin-Kammon, Japan	1975.	18700
Daiishimizu, Japan	1982.	22228
Furka, Švicarska	1982.	15380
Seikan, Japan	1988.	53 850
Eurotunel, Engleska/Francuska	1994.	50 500

Tablica 4
VEĆI ŽELJEZNIČKI TUNELI U HRVATSKOJ

Naziv tunela	Pruga	Godina izgradnje	Duljina m	Opaska
Kupjak	Ogulin – Rijeka	1873.	1223	
Sljeme	Ogulin – Rijeka	1873.	457	
Kobiljak	Ogulin – Rijeka	1873.	557	
Brajdica	Sušak Pećine – Brajdica – Rijeka	1900.	1838	kružni tunel
Sinac	Ogulin – Knin	1920.	2274	
Vranja I	Lupoglav – Raša	1950/51.	494	
Vranja II	Lupoglav – Raša	1950/51.	728	
Tunel br. 20	Knin – Zadar	1956.	456	
Dujmovića	Knin – Split	1956.	888	
Debeljak	Knin – Zadar	1966.	1326	
Split	Knin – Split	1984.	1893	zasipni tunel

Duljina je tunela 50 500 m, od čega je ispod mora 37 900 m. Između glavnih tunela i servisnog tunela na svakih su 250 m otvoreni kanali za izjednačavanje tlaka i smanjenje buke, a na svakih 375 m prolazima su spojene sve tri tunelne cijevi. Izgrađene su i mimoilaznice duljine 150 m i širine 21 m, u kojima se sve tri cijevi spajaju u jednu prostoriju.

Tunel prolazi nepropusnim slojem krednog laporanog debljine između 70 i 85 m. Sloj je gotovo horizontalan, pa ga tunel svojom nivoletom prati po cijeloj duljini, a povoljna geotehnička svojstva omogućila su primjenu tunelnih strojeva za iskop. Tunel leži oko 100 m ispod morske površine i otprikljike 40 m ispod morskog dna.

Gradnja je započela iskopom servisnog tunela s obje strane, a spoj je ostvaren 1990. godine. Glavni su tuneli probijeni sljedeće godine, a probor je ostvaren velikim tunelnim rotacijskim strojevima s bušačom glavom promjera 8,7 m. Obloga debljine 30 cm

ugrađena je u segmentima, s plastičnim vrpcama u spojnim reška-ma, a mjesta dodira stijene i obloge dopunski su injektirana po opsegu i cijelom duljinom. Na obje su obale izgrađena vertikalna okna velikog promjera, u koja su u početku bili postavljeni tunelni strojevi, a poslije su okna služila za vertikalni transport iskopanog materijala i elemenata obloge. Na francuskoj je strani iskopa-ni materijal dijelom hidraulički cijevima transportiran do jezera za taloženje.

Na obje su obale izgrađeni terminali za utovar kamiona i osobnih automobila u posebne vagone. Vlakovi voze brzinama 120–160 km/h, pa prolaz kroz tunel traje svega 35 minuta. Sadašnji je kapacitet 20 vlakova na sat u svakom smjeru, a mogao bi se povećati i do 30 vlakova na sat.

D. Desselbrunner

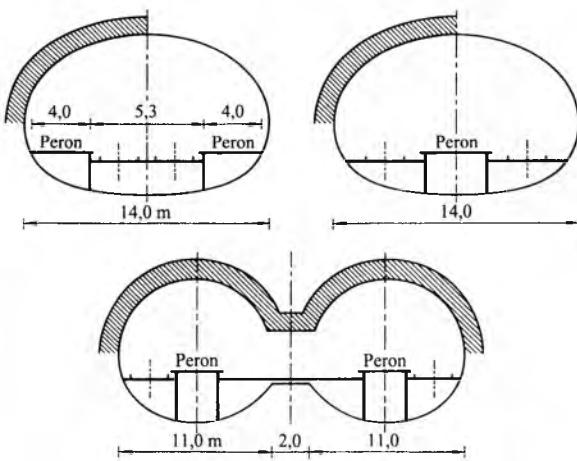
TUNEL ZA PODZEMNU ŽELJEZNICU

Tunel za gradsku podzemnu željeznicu posebna je vrsta tunela jer se u njemu ne nalazi samo željeznička pruga nego i postaje sa svojim peronima i prilazima. Trasa tunela potpuno ovisi o konfiguraciji grada, a razmještaj postaja o postojećoj uličnoj mreži. Obično se šire središte grada povezuje kružnom prugom, od koje se granaju pruge u ostale dijelove grada. Između postaja se trasa po mogućnosti postavlja u pravcu ispod kuća i ulica.

Niveleta tunela često se diže ili spušta zbog međusobnog križanja pojedinih pruga. To je posebno izraženo na velikim podzemnim postajama, gdje se sastaje više mrežnih krovova, pa se postaja gradi u nekoliko katova. Na postajama bez križanja niveleta se nastoji podići do površine kako bi pristup do perona bio što kraći i jednostavniji. Izvan gradskog središta pruga se, gdje god je to moguće, radi nadzemno ili u otvorenim usjecima.

Već prema geološko-hidrološkim svojstvima terena tuneli se smještaju plitko, na dubini od 10–15 m ispod površine (u New Yorku, Berlinu i Parizu) ili na dubini od 50–60 m ili više (u Moskvi, Londonu, Washingtonu).

Poprečni presjek tunela za podzemnu željeznicu manji je od poprečnog presjeka tunela za običnu željeznicu jer su vozila drugačijeg oblika i manjeg profila, a oduzimač struje nije na krovu vozila. Tunel građen tunelnim načinom (podzemnim kopanjem) ovalnog je oblika, a tunel građen otvorenim načinom (kopanjem s površine, a zatim zasipavanjem) ima četvrtast oblik. Širina je jednokolosiječnog tunela 4–5 m, a visina 4,5–5,5 m, dok je dvokolosiječni tunel širok ~9 m, a visok ~8 m. Zbog većeg kapaciteta tunel je većinom dvokolosiječni ili se u težim geotehničkim uvjetima grade dva paralelna, jednokolosiječna tunela. U postajama se tunel proširuje zbog putničkih perona ili se odijeljeni tuneli približuju tako da s peronima čine jedinstvenu prostoriju (sl. 24).



Sl. 24. Primjeri profila postaje dvokolosiječnog tunela podzemne željeznice sa smještajem perona i potrebnim izmjeraima

CESTOVNI TUNEL

Cestovni se promet naglo razvija nakon Drugoga svjetskog rata, grade se brze autoseste s vijaduktima i cestovnim tunelima

(tabl. 5 i 6). Osim na planinskim dijelovima trase, cestovni se tuneli grade i na mjestima gdje treba svladati druge zapreke, npr. geološki loš teren i sl. Već prema cestovnom razredu propisani su i osnovni tehnički elementi ceste kao što su širina kolnika, broj voznih trakova, polumjeri zavoja i najveći dopušteni uspon, pa se u skladu s tim prihvataju i osnovne karakteristike i izmjere cestovnog tunela.

Tablica 5
VEĆI CESTOVNI TUNELI U SVIJETU

Naziv tunela	Godina izgradnje	Duljina m
Kiushu, Japan	1941.	8 000
Kammon, Japan	1958.	9 680
St. Bernard, Švicarska	1964.	5 885
Mont Blanc, Francuska/Italija	1965.	11 600
Tauern, Austrija	1975.	6 398
Arlberg, Austrija	1978.	14 000
St. Gotthard, Švicarska	1980.	16 300
Fréjus, Francuska/Italija	1980.	12 800
Seelisberg, Švicarska	1980.	9 250
Učka, Hrvatska	1981.	5 062
Gudvangen, Norveška	1991.	11 400
Kan Etsu, Japan	1991.	11 010
Karavanke, Austrija/Slovenija	1991.	7 864

Tablica 6
VEĆI CESTOVNI TUNELI U HRVATSKOJ

Naziv tunela	Cesta	Godina izgradnje	Duljina m
Klis	Split – Sinj	1954.	170
Žutnica	Krapina – Macelj	1970.	215
Krapina	Krapina – Macelj	1970.	188
Prezid	Gračac – Obrovac	1972.	150
Marjan	Grad Split	1979.	840
Turija	Vrgorac – Zagvozd	1981.	151
Zrinčak I	Matulji – Lupoglav	1981.	185
Učka	Matulji – Lupoglav	1981.	5 062
Škurinje I	Riječka obilaznica	1988.	423
Škurinje II	Riječka obilaznica	1988.	590
Katarina	Riječka obilaznica	1988.	438
Trsat	Riječka obilaznica	1988.	827

Trasa cestovnog tunela može biti u pravcu, kružnom ili prijelaznom luku. U zavodu se trasa proširuje i gradi s poprečnim nagibom te ima sve tehničke elemente koji odgovaraju određenoj kategoriji ceste. Međutim, nastoji se da se, po mogućnosti, portalni tunela polože okomito na izohipse, kako bi tunel bio u što boljim geološkim uvjetima i primao što više dnevne svjetlosti.

Ako je tunel kraći od 200 m, treba ga graditi u pravcu ili iznimno u luku s polumjerom većim od 300 m. Trasu tunela duljih od 200 m treba na izlaznom dijelu izvesti u luku, kako bi se sprječio nepovoljan učinak svijetle točke koja zasljepljuje vozače pri izlasku iz tunela.

Trasa dugog tunela podređena je uvjetima tunela, što znači da treba biti takva da tunel bude što kraći i što ekonomičniji, a tome se prilagođuje i trasa prilaznih cesta.

Nagib nivelete ne smije biti manji od 0,3%, kako bi odvodnja gravitacijom bila djelotvorna, ali ni veći od 4% (u dugom tunelu do 2,5%), da bi se ispuštanje plinova izgaranja iz teretnih vozila na usponu svelo na podnošljivu mjeru i omogućilo lakše vjetrenje. Niveleta kraćeg tunela obično je u jednostranom nagibu, a duljeg tunela u dvostranom nagibu, s prijelomom na sredini. Iako se može i drugačije izvesti, tunel ispod riječka i morskih zaljeva ima u sredini trase svoju najnižu točku.

Poprečni profil cestovnog tunela ovisi o njegovoj duljini i lokaciji te o vrsti ceste na kojoj se nalazi (kratki ili dugi tunel na otvorenoj cesti, tunel s jakim prometom u blizini grada ili u gradu). Osim o prometnim uvjetima, profil ovisi i o potisku brda. Ako nema bočnog potiska, a vertikalni je potisak velik, tunelni je svod uzdignut. Kad je vertikalni potisak manji, svod je većinom paraboličan, bez obzira na veličinu bočnog potiska. Tunel ispod

rijeka i morskih zaljeva ima obično kružni profil. Veličina i oblik poprečnog profila ovise i o opremi i uređajima (za provjetravanje, rasvjetu, prometnu signalizaciju i dr.) koje treba ugraditi u tunelnu cijev.

Širina kratkog tunela na otvorenoj cesti potpuno odgovara širini ceste, a njegova je visina u skladu s propisanim cestovnim gabaritom. Razlika može biti samo s obzirom na prostor za pješake, jer cestovne bankine postaju pješačke staze u tunelu.

Širina dugog tunela na otvorenoj cesti ovisi o predviđenom intenzitetu prometa. Najčešće se za dvosmjerni promet gradi jedna tunelnih cijev bez zaustavnog traka, a na cesti s vrlo jakim prometom i na autocesti postavljaju se dvije tunelnih cijevi, po jedna za svaki smjer. U takvom se tunelu ne predviđa pješački promet i nema pješačke staze, nego postoji samo uska revizijska staza za prolazak službenog osoblja. Na svakih se 500 m grade proširenja za zaustavljanje vozila u kvaru, a na svakih 1500–2 000 m okreću se koja omogućuju povratak vozila u slučaju požara ili većih nesreća u tunelu.

Predusjek cestovnog tunela treba biti što kraći radi boljeg osvjetljenja tunela i iz estetskih razloga. Ako je moguće, treba otkopati i ukloniti jednu stranu predusjeka kako bi se dobilo što više svjetla.

Za razliku od portala željezničkih tunela, portalni cestovnih tunela dobro su uočljivi s ceste i iz automobila, pa trebaju biti estetski oblikovani i prilagođeni konfiguraciji okolnog terena i zahtjevima sigurne vožnje. Vrlo se dobrim pokazalo rješenje portala s tunelnom cijevi izvučenom do sjecišta s prirodnom kosinom terena. Izvučeni se dio cijevi naknadno zatvara zemljom i stvara dojam tunelnog ulaza srasla s brdom. Portalni zid, cijev i krilni zidovi obično se grade od obrađena ili poluobrađena kamena ili od betona s oblikovanim licem.

I. Banjad

Rasvjeta cestovnih tunela. Cestovni je tunel u građevno-prometnom smislu natkriveni dio otvorene ceste, pa njegova rasvjeta treba općenito udovoljavati svim zahtjevima dobre vidljivosti i vidne udobnosti koji vrijede za rasvjetu ceste na otvorenom. Kako je tunel specifičan prometni objekt, kojemu rasvjeta treba jamčiti sigurnu i udobnu vožnju danju i noću, tražena pouzdanost opažanja nameće nešto strože zahtjeve od onih utvrđenih za cestu na otvorenom.

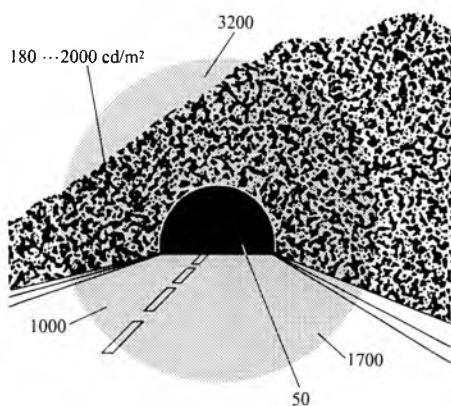
Vozačevo je oko kad vozač prilazi tunelu prilagođeno na veliko vanjsko osvjetljenje, te je slabo osjetljivo (v. *Optički instrumenti*, TE 9, str. 651). Vozač doživljava tunelnih ulaz kao *crni otvor* ili *crni okvir* (ako se vidi izlaz iz tunela) u kojem ne može raspoznati nikakve predmete ni zapreke. Rasvjetonim cestovnim tunelima smanjuje se učinak crnog otvora ili okvira pri ulasku vozača u tunel u vožnji danju ili pri njegovu izlasku iz tunela u vožnji noću i olakšava vozačeva vidna prilagodba. Zbog toga su rasvjeta unutar tunela i rasvjeta na otvorenoj cesti, ispred i iz tunela, danju i noću, u strogo utvrđenom odnosu. Postupno smanjenje, odnosno povećanje rasvjete slijedi približno fiziološku sposobnost prilagodbe vozačeva oka. U zatvorenom prostoru tunela opažanju pridonosi i rasvjjetljenost bočnih zidova, bilo da se moguća zapreka izravno očrtava na njihovim svjetlim plohama ili da se refleksijom sa zidova postigne bolja rasvjjetljenost kolnika tunela.

Rasvjetnim se sustavom opremanju cestovni tuneli duljina većih od tzv. kritične duljine (40–50 m). Međutim, i tuneli duljina manjih od kritične rasvjjetljuju se kada je cesta prije i poslije tunela rasvjjetljena, kada je promet kroz tunel velik, kada su pristupna cesta, tunel ili oboje u zavodu, pri čemu su ulaz tunela i moguća zapreka vidljivi tek s udaljenosti manjih od zaustavnog puta vozila, te kada su pristupna cesta i tunel u padu.

S obzirom na rasvjetu razlikuju se prilazna zona, ulazna zona ili zona prilagodbe (koja se sastoji od zone praga i prijelazne zone), unutrašnja zona i izlazna zona tunela.

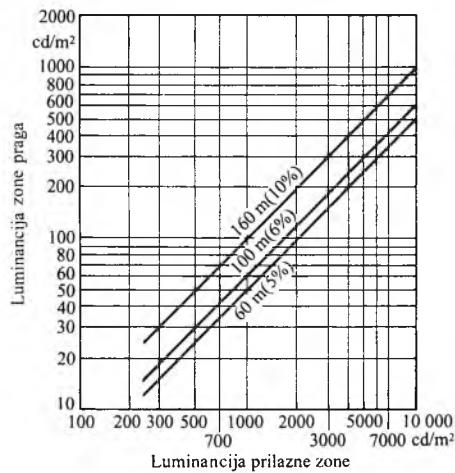
Prilazna zona dio je ceste ispred tunelnog portala u duljini zaustavnog puta (obično 100–150 m). Luminancija prilazne zone osnova je za utvrđivanje luminancije zone praga u tunelu i srednja je vrijednost pojedinih luminancija unutar vozačeva vidnog polja (vidljivi dio neba, površina kolnika ispred vozača, vidljivi okoliš uz tunelnih ulaz, otvor i portal tunela i svjetli sloj

atmosfere između vozača i tunelnog ulaza, sl. 25). Luminancija prilazne zone mijenja se tijekom dana i godine (dan, noć, sunčano, oblačno, ljetno, zima), a utvrđuje se mjeranjem ili procjenom na temelju iskustvenih podataka.



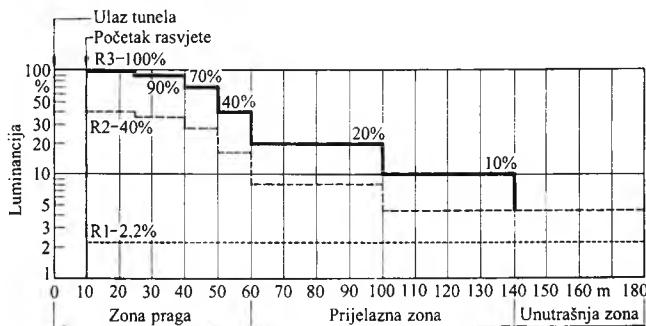
Sl. 25. Primjer vrijednosti trenutnih luminancija unutar vozačeva vidnog polja (zaustavni put 85 m)

Rasvjeta zone praga ($50 \dots 70$ m) i prijelazne zone (~ 200 m) takva je da omogućuje vozaču postupnu prilagodbu oka na smjenu osvjetljenost uz istodobno sigurno zapažanje mogućih zapreka. Drži se da je luminancija zone praga optimalna ako u početku iznosi od $5 \dots 10\%$ luminancije prilazne zone, što zavisi od brzine vozila, odnosno duljine zaustavnog puta (sl. 26). Lumi-



Sl. 26. Ovisnost luminancije zone praga o luminanciji prilazne zone za tri definirane duljine zaustavnog puta vozila

nancija zone praga i prijelazne zone postupno se smanjuje s porastom duljine tunela (sl. 27). U praksi se početne vrijednosti luminancije smanjuju stupnjevito, s time da omjer dvaju uzastopnih stupnjeva nije veći od $3 : 1$. Različiti intenzitet i stupnjevanje rasvjete postiže se ugradnjom većeg, odnosno manjeg broja rasvjetnih tijela ili automatskim ukapčanjem različitog broja svjetiljki.



Sl. 27. Srednja luminancija tunelnog kolnika za pojedine režime pogona. R1 noćni režim, R2 dnevni režim pri oblačnom vremenu, R3 dnevni režim pri sunčanom vremenu

Luminancija unutrašnje zone tunela uzduž čitave je zone stalna i iznosi $2 \dots 20$ cd/m², a odabire se prema duljini i lokaciji

tunela te prema gustoći prometa. Tome je jednaka ili neznatno veća i luminancija kolnika *izlazne zone*, dok luminancija unutrašnje zone za vožnju noću iznosi polovicu utvrđene vrijednosti za vožnju danju. Luminancija tunelnih zidova do visine od ~ 2 m od kolnika treba biti jednaka luminanciji kolnika.

Rasvjeta tunela treba biti jednolična, osvijetljene površine ne smiju blijestati, a štetno treperenje treba biti u dopuštenim granicama, što se postiže pravilnim međurazmakom svjetlosnih izvora. Tunel se osvjetljuje neprekidno, danju i noću, a luminancija površine kolnika mijenja se već prema luminanciji prilazne zone. Ta se promjena u praksi ostvaruje neprekidnim upravljanjem (neprekidnom promjenom svjetlosnog toka) ili isprekidanim upravljanjem (uključivanjem i isključivanjem pojedinačnih ili skupnih svjetlosnih izvora). Upravljački se rasvjetni sustavi sastoje od mjernih elemenata (mjerilo osvjetljenja), uklopnih elemenata i uređaja za prijenos signala (releji i sklopniči), a pod nadzorom su elektroničkih računala.

Elektroenergetski pojni, razvodni i upravljački uređaji.

Električna trošila u tunelu napajaju se pri normalnom pogonu iz tunelnih transformatorskih stanica (u kraćem tunelu iz okolne distributivne mreže) preko niskonaponskih razvodnih i upravljačkih uređaja. Transformatorsku je stanicu bolje smjestiti izvan tunelne cijevi, jer to olakšava izgradnju, rukovanje i održavanje te jamči sigurniji promet. Ako se stanica smjesti unutar tunelne cijevi, potrebno je izgraditi posebnu tunelnu nišu s dobrim provjetravanjem, ispred koje treba ostaviti dovoljno manipulativnog prostora za vozila službe održavanja. Preporuča se da napajanje bude iz dviju energetski nezavisnih pojnih točaka visokonaponske mreže s mogućnošću prekapčanja. Elektroenergetski se kabeli obično polazu u jedan kabelni kanal, a telekomunikacijski i signalni u drugi.

U slučaju nestanka mrežnog napona u prometno važnijem i duljem tunelu osigurava se napajanje kritičnih trošila iz jednog od pričuvnih izvora.

Prometna signalizacija. U sklopu vertikalne dinamičke signalizacije u tunelu upotrebljavaju se znakovi promjenljive obavijesti, tj. takvi na kojima se obavijesti mogu mijenjati upravljanjem iz udaljenog upravljačkog središta. To mogu biti elektromehanički znakovi, najčešće s okretnim istostraničnim prizmama, ili promjenljivi svjetlosni znakovi s optičkim vlaknima.

Vatrodojavni sustav. Uzroci požara u tunelu najčešće su posljedica sudara ili kvara na vozilu. Zbog ograničenog prostora, smanjenih mogućnosti brzog udaljivanja s mjesta nezgode, otrovnih plinova i panike, ugroženost je ljudi vrlo velika. I najmanja pojавa dima drastično smanjuje vidljivost u tunelu. Prilikom požara temperatura pri stropu tunela može biti i viša od 1000°C , što uzrokuje potpuno uništenje dijela rasvjete instalacije. Uključeno vjetrenje u trenutku požara pospješuje gorenje i rasprostiranje plinova i dima uzduž čitava tunela.

Vatrodojavni sustav treba brzo i sigurno otkriti i dojaviti požar, a sastoji se od signalne vatrodojavne centrale, automatskih i ručnih dojavnika požara, kontaktnih dojavnika o pomicanju vatrugasnih aparata i instalacijskih vodova. Radi priručne zaštite postavljaju se uzduž tunela na razmacima od približno 200 m ručni prijenosni aparati za gašenje požara.

Telekomunikacijski i alarmni sustav omogućuje vozačima i osobljiku službe održavanja brzu komunikaciju sa središnjim tunelnim službama pomoću telekomunikacijskih centrala, pojnih i signalnih vodova te tzv. SOS-ormarića, koji se obično postavljaju na svakih 300 m, a u kraćem tunelu na ulazne portale.

Sustav daljinskog upravljanja prikuplja i prenosi podatke, evidentira ih i obraduje te automatski upravlja i uskladjuje s ostalim tunelnim sustavima. Njegove su komponente: daljinske automatske stanice razmještene uzduž tunelne cijevi, elektroničko računalo, videoterminal, pisač, sinoptička ploča, tipkovnica te signalni i pojni vodovi.

Interna televizija dodatna je daljinska vizualna kontrola koja pomaže pri upravljanju prometom, a sastoji se od televizijskih kamera pravilno razmještenih uzduž tunelne cijevi, televizijskih monitora, pojačala, magnetoskopa i komandno-upravljačkih uređaja.

Razglas se u tunelu postavlja za davanje potrebnih obavijesti i uputa sudiionicima u prometu, posebno prilikom mogućih zaštoja ili nesreća.

U iznimno važne i duge tunele ugrađuje se uglavnom sva navedena oprema i uređaji, dok se kraći i prometno manje važni tuneli opremanju samo nekim od spomenutih sustava. Detaljnije o pojedinim sustavima v. *Signalno-sigurnosna tehnika*, TE12, str. 64; v. *Vatrogasni i protupožarni uređaji*.

E. Širola

HIDROTEHNIČKI TUNEL

Hidrotehnički je tunnel podzemna građevina koja služi za protjecanje (transport) vode ili je voda u njemu sredstvo za obavljanje prometa. Hidrotehnički tunnel može prema namjeni biti vodovodni, kanalizacioni, melioracijski, hidroenergetski, tj. tunnel za hidroelektranu, plovni ili višenamjenski (tabl. 7 i 8).

Tablica 7

VEĆI HIDROTEHNIČKI TUNELI U SVIJETU

Lokacija tunela	Namjena	Godina izgradnje	Duljina km	Izmjere otvora*
Shankade-Catskill (SAD)	vodoopskrbni	1914.	27	
Kilder (Engleska)	vodoopskrbni	1977.	32	$D=2,89$
Orange Fish (Lesoto)	hidroenergetski	1977.	82	$b/h=4,95/4,50$
New York	vodoopskrbni	1979.	21	$D=7,0$
San Francisco	vodoopskrbni		43	$D=3,2$
Chicago	kanalizacioni	1980.	210	$D=2,7\cdots11,0$
Južni Peru	melioracijski		37 tunela ukupne duljine 103 km	$D=2,5\cdots3,5$
Colorado-Tomson (SAD)	hidroenergetski i melioracijski		21	$D=3$
London	vodoopskrbni	u radu	140	$D=2,54$

*D = promjer, b = širina, h = visina tunela

Tablica 8

VEĆI HIDROTEHNIČKI TUNELI U HRVATSKOJ

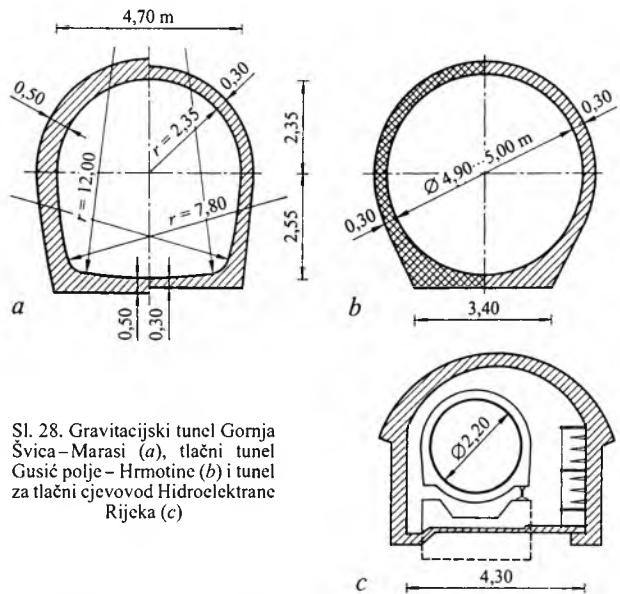
Lokacija tunela	Dionica	Namjena	Vrijeme gradnje	Duljina km	Izmjere otvora*
Čepić polje	Čepić polje-Boljunčica	odvodni	1934.	4,53	**
HES Vinodol	Lokvarka-Bajer, Kobiljak-Razromir kosi rov za tlačni cjevovod	hidroenergetski	1947-1952.	3,47 4,16 1,20	$D=2,40\cdots2,20$ $D=2,75$ $b/h=3,3/2,9$
HES Gojak	Sabljaki-Gojak tlačni cjevovod	hidroenergetski	1954-1958	9,4 0,705	$D=4,5$ $D=3,4\cdots2,8$
HE Zakučac	Prančevići-Zakučac tlačni cjevovod	hidroenergetski	1958-1962 1976-1980	9,9 9,9	$D=6,1$ $D=6,5$
	Zakučac tlačni cjevovod		1958-1962 1976-1980	2x0,289 2x0,289	$D=3,5\cdots3,3$ $D=3,75$
HES Senj	Lika-Gacka Gornja Švica-Marasi Prančevići-Zakučac tlačni cjevovod	hidroenergetski	1960-1965	10,5 9,2 13,6 0,614	$D=3,85$ $b/h=4,7/4,9$ $D=5,0$ $D=4,0\cdots3,55$
HE Rijeka	glavni tunel kosi rov za tlačni cjevovod	hidroenergetski	1966-1970	3,3 0,8	$D=3,2$ $b/h=4,30/3,80$
HE Orlovac		hidroenergetski	1970-1974	12,1	$D=5,5$
Otok Brač	Vidova gora	vodoopskrbni	1971-1976	8,5	$D=2,3$
RHE Obrovac		hidroenergetski	1978-1984	8,2	$D=4,6$

*D = promjer, b = širina, h = visina tunela

**ploština presjeka 20 m^2

Hidrotehnički tunnel kroz koji voda neposredno protječe jest onaj koji je djelomično ili potpuno ispunjen vodom. Ako voda teče kroz tunel pod djelovanjem gravitacije, voden je lice obično slobodno, odnosno dubina je vode u tunelu manja od svjetle visine poprečnog presjeka tunela (*gravitacijski tunnel*, sl. 28 a), a ako voda teče pod djelovanjem tlaka, cijeli je tunnel ispunjen vodom (*tlačni tunnel*, sl. 28 b).

Posebna vrsta hidrotehničkog tunela jest tunnel kroz koji voda posredno protječe, tj. tunnel u koji se ugrađuje cjevovod za transport vode (*cjevovodni tunnel*, sl. 28 c).



Sl. 28. Gravitacijski tunel Gornja Švica-Marasi (a), tlačni tunel Gusić polje-Hrmotine (b) i tunel za tlačni cjevovod Hidroelektrane Rijeka (c)

Tunelna trasa. Na izbor tunelne trase utječu topografske karakteristike i geološka građa terena, te mehaničke karakteristike materijala kroz koji se tunel probija. Pri projektiranju tunelne trase nastoji se početak i kraj tunela spojiti pravcem. Takva je trasa najkraća, a često i najekonomičnija. Horizontalni lom trase protjecajnog tunela treba izvesti sa što većim polumjerom i što manjim središnjim kutom, da bi gubitci energije zbog promjene pravca toka bili što manji.

Trasa plovног tunela mora biti potpuno u skladu s trasom i niveletom plovнog kanala na kojem se tunel nalazi. Trasa bi trebala biti ravna ili u vrlo blagom luku kako bi se sprječilo udaranje broda u rubove i smanjio otpor pri protjecanju vode.

Visinski položaj tunelne trase ovisi o vodostajima na ulazu i izlazu tunela, njihovim oscilacijama, topografskim uvjetima i hidrauličnim uvjetima tečenja.

Gravitacijski tunel treba visinski postaviti tako da za najveći projektirani protok omjer dubine toka u tunelu i ukupne visine tunela ne bude veći od 0,8, odnosno da slobodni prostor iznad vodenog lica iznosi najmanje 20% visine tunela. Tako se omogućuje normalno strujanje zraka kroz tunel, jer se inače pojavljuje pojačana turbulencija u površinskoj zoni toka koja uzrokuje dodatne gubitke energije tečenja. Kako protok ovisi o vodostaju na ulazu tunela, taj je tip tunela prikladan na onim vodozahvatima gdje su oscilacije vodostaja relativno malene, tj. gdje su malene i varijacije protoka.

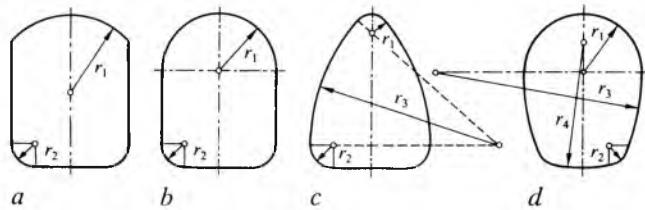
Tlačni tunel treba visinski postaviti tako da vodostaj tlačne (piezometarske) linije bude u najnepovoljnijim uvjetima toka i na najnepovoljnijim mjestima 1...2 m iznad tjemena tunela, kako se u tunelu ne bi stvorio podtlak, a time i nestabilan tok. Najnepovoljniji uvjeti tečenja nastaju kada pri najmanjem piezometarskom vodostaju na ulazu u tunel tunelom teče najveći protok i time određuje gornju granicu visinskog položaja tlačnog tunela. Budući da se tečenje u tlačnom tunelu zbiva pod djelovanjem tlaka, uzdužni presjek trase nije strogo definiran i može se mijenjati zbog topografskih, geoloških ili funkcionalnih razloga. Trasa dovodnog tunela hidroelektrana naglo pada na dionici ne-posredno ispred strojarnice. Te se dionice tlačnih tunela nazivaju i tlačnim cjevovodima ili tlačnim oknicima. U hidrauličnom smislu i po načinu izvedbe to su tlačni tuneli u kojima su zbog velike visinske razlike između početne i krajnje točke tlakovi mnogo veći, pa su time i hidrodinamičke karakteristike toka izraženije, a i uvjeti izvedbe teži.

Poprečni presjek. Oblik, površina i poprečni presjek hidrotehničkog tunela ovise o njegovoj namjeni, opterećenjima na tunelu oblogu i hidrauličnim uvjetima tečenja. Osnovne izmjere tunela koji služi za smještaj cjevovoda ovise o promjeru cjevovoda, smještaju pratećih uređaja te potrebnom prostoru za njihovu montažu, popravke i pregled tijekom uporabe. Za tunel kroz koji voda neposredno protječe osnovne se izmjere, širina i visina ili promjer, određuju prema kriteriju da je za potreban protok optimalna ona površina poprečnog presjeka tunela za koju je zbroj

troškova izgradnje i izgubljenih vrijednosti najmanji. Izgubljene vrijednosti čine uglavnom gubitci energije tečenja i troškovi održavanja tunela tijekom uporabe. Najveći dio gubitaka energije tečenja posljedica su trenja između vode i obloge, pa s hidrauličnog stajališta omoćeni dio opsega protjecajnog presjeka treba biti što manji, a površina presjeka što veća. S tog bi stajališta kružni oblik poprečnog presjeka bio najpovoljniji, jer mu je uz istu protjecajnu površinu omoćeni dio opsega najmanji.

Oblik poprečnog presjeka tunela prilagođuje se opterećenjima na tunelu oblogu, kako bi se što bolje iskoristile njezine mehaničke karakteristike i postigla što bolja nosivost. Osnovna su opterećenja tlak materijala kroz koji je tunel prokopan, hidrodinamički tlak vode koja protječe kroz tunel i podzemne vode u okolnom terenu, te vlastita težina obloge. Materijal djeluje kao opterećenje na tunelu oblogu, jer su iskopom u njemu uzrokovane deformacije i promjene prirodnog ravnotežnog stanja naprezanja. Opterećenje općenito djeluje po cijelom opsegu poprečnog presjeka tunela, ali je obično najjače na gornjem dijelu i bočnim stranama iskopa.

U gravitacijskom tunelu obloga je pretežno opterećena materijalom kroz koji se tunel probija, jer su opterećenja od hidrodinamičkog tlaka podzemne vode i vode koja protjeće tunelom međusobno suprotna smjera i njihova razlika relativno malo utječe na ukupno opterećenje obloge. Zbog toga se oblik poprečnog presjeka tunela prilagođava opterećenju okolnog materijala. Ako se tunel kopat kroz stijenu s velikim vrijednostima modula elastičnosti i modula deformacije, na tunelu oblogu djeluje relativno malen vertikalni tlak, što ga može preuzeti tjemni luk kojemu je visina manja od polumjera luka (sl. 29a). S porastom vertikalnog tlaka visina se luka povećava do veličine polumjera luka (sl. 29b). U oba je primjera horizontalni tlak stijene zanemariv, pa bočne stranice poprečnog presjeka mogu biti vertikalne. Veliki vertikalni i nešto manji horizontalni tlakovi zahitjavaju paraboličan poprečni presjek tunela (sl. 29c), koji se aproksimira kružnicama, dok se uz velike vertikalne i horizontalne tlakove gradi tunel potkovasta poprečnog presjeka (sl. 29d). Budući da se u području spoja bočnih strana tunela s dnem koncentrično naprezanje u oblozi, taj se dio izvodi s kružnim lukovima malih polumjera, čime se povećava nosivi presjek obloge, a i hidraulični su uvjeti tečenja povoljniji.



Sl. 29. Poprečni presjeci gravitacijskih tunela

Tlačni je tunel najčešće okrugla poprečnog presjeka, jer se naprezanja u oblozi od hidrodinamičkog tlaka vode u tunelu kao dominantnog opterećenja jednolično raspodjeljuju po cijelom opsegu te se tako najbolje iskoristavaju mehaničke karakteristike materijala obloge.

Poprečni presjek plovног tunela ovisi o veličini brodova koji će ploviti tim putom i o nacinu njihova pogona. Kroz kraći tunel brod plove vlastitim pogonom, a u duljem može imati posebnu vuču. Površina poprečnog presjeka vode treba biti $\sim 2,5$ puta veća od površine poprečnog presjeka uronjenog dijela broda, da bi otpor pri njegovu gibanju bio što manji, a vanjski rubovi broda trebaju biti udaljeni najmanje $1 \cdots 1,5$ m od unutrašnjeg obrisa tunela.

Obloga. Tunelu oblogu u širem smislu čine betonska obloga, koja može biti i armirana ili obložena čeličnim limom, te okolni materijal kroz koji je hidrotehnički tunel probijen. Okolni materijal boljih mehaničkih svojstava manje opterećuje oblogu. Ako je obloga opterećena unutrašnjim hidrodinamičkim tlakom, okolni materijal može preuzeti dio opterećenja i djelomično rasteretiti oblogu. Prema tome, okolni materijal i tunelu obloga u statičkom su smislu jedinstven sustav, pa se prilikom gradnje tunela sidrenjem, štrcanim betonom i injektiranjem osigurava iskopom narušena stabilnost okolnog materijala i smanjuje njegova deformacija.

Obloga treba biti glatka da bi gubitci energije tečenja bili što manji (uobičajene vrijednosti Manningova koeficijenta hrapa-

vosti iznose $0,013 \cdots 0,015$). Taložnicama ili pragovima smještenim na ulazu u tunel spriječava se da s vodom u tunel ulazi i sitan nanos koji bi erozijskim djelovanjem povećao hrapavost obloge. Betonska obloga treba biti i vodonepropusna da bi gubitci vode iz tunela bili što manji, ali i da spriječi ulazak procjedne vode koja slablji mehanička svojstva betona i armature.

Obloga gravitacijskog tunela i cjevovodnog tunela gradi se od nearmiranog ili armiranog betona, već prema mehaničkim svojstvima okolnog materijala, jer on najviše opterećuje oblogu. Najmanja je debljina obloge 30 cm, a najveća 50 cm. Ako se tunel probija kroz materijal koji na oblogu djeluje samo vertikalnim tlakom odozgo, dok je horizontalni tlak zanemariv, gradi se deblji tjemni luk, a bočne se stranice oblažu štrcanim nearmiranim ili armiranim betonom debljine 10 \cdots 15 cm ili ostaju neobložene.

Oblage tlačnog tunela grade se od nearmiranog ili armiranog betona, betona obložena čeličnim limom, te od prednapregnutog betona.

Nearmirana betonska obloga gradi se u tunelu probijenom u stijeni s velikim vrijednostima modula elastičnosti i modula deformacije. Hidrodinamički tlak preuzimaju zajednički betonska obloga i stijena, pri čemu se vlačno naprezanje u betonu ograničuje na 1 MN/m^2 .

Armiranobetonska obloga gradi se u tunelu probijenom u stijeni s manjim vrijednostima modula elastičnosti i modula deformacije. Hidrodinamički tlak preuzimaju zajednički betonska obloga i stijena, a dopušteno vlačno naprezanje betona iznosi 2 MN/m^2 . Prosječna masa armature iznosi $\sim 70 \text{ kg}$ po kubičnom metru ugrađenog betona, a na dionicama s izrazito malim vrijednostima modula elastičnosti i modula deformacije stijene može iznositi i više od 150 kg po kubičnom metru ugrađenog betona.

Betonska obloga obložena s unutrašnje strane čeličnim limom potrebna je u tunelu s velikim hidrodinamičkim tlakom, obično prilikom dovoda vode do strojarnice hidroelektrane (tlačno okno). Hidrodinamički tlak preuzimaju čelična obloga i djelomično stijena, a betonska obloga služi samo za prijenos opterećenja na stijenu.

Velika tlačna i mala vlačna čvrstoča betona nisu u skladu s njegovom primjenom za oblogu tlačnih tunela, u kojoj su naprezanja vlačna. Zbog toga se primjenjuje tlačno prednaprezanje obloge, što se postiže mehaničkim sredstvima, čeličnim šipkama ili kabelima koji se zatežu unutar ili oko oblogu hidrauličnim prešama ili injektiranjem cementno-bentonitne suspenzije iza obloga pod velikim tlakom. Postignuto tlačno prednaprezanje smanjuje se djelovanjem unutrašnjeg hidrodinamičkog tlaka, a u najnepovoljnijim okolnostima ostaje unutar dopuštenog iznosa vlačnog naprezanja. Kako bi se ostvario što bolji kontakt između tunelne obloge i stijene te smanjila deformacija stijene, provodi se vezno i konsolidacijsko injektiranje cementnim suspenzijama. To je posebno važno za tlačni tunel, jer dio unutrašnjeg hidrodinamičkog tlaka treba preuzeti i okolni materijal, da bi s oblogom tvorio jedinstven staticki sustav.

J. Rupčić

LIT.: H. Straub, *Dic Geschichte der Bauingenieurkunst*. Verlag Birkhäuser, Basel 1949. – J. Stini, *Tunnelbaugeologie*. Springer-Verlag, Wien 1950. – K. Szechy, *Tunnelbau*. Springer-Verlag, Wien 1969. – H. Kastner, *Statik des Tunnel- und Stollenbaues*. Springer-Verlag, Berlin 1971. – *Lüftung im Untergrund*, Richtlinien für die Bemessung und Betrieb von Baulüftungen. SIA, Zürich 1976. – *Tunnel- und Stollenlüftung*, Projektierung, Bau und Betrieb. SIA Dokumentation 14, Zürich 1976. – Q. Zaruba, V. Mencl, *Engineering Geology*. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York 1976. – L. Müller, *Tunnelbau*, u djelu *Felsbau*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1978. – B. Freibauer, *Bemessungsgrundlagen für die Lüftung von Straßentunneln*. Bundesministerium für Bauen und Technik, Wien 1978. – P. B. Attewell, I. W. Farmer, *Principles of Engineering Geology*. Chapman and Hall, London 1979. – F. Reuter, J. Klengel, J. Pašek, *Ingenieurgeologie*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1980. – W. J. M. van Bommel, J. B. de Boer, *Road Lighting*. Philips Technical Library, Eindhoven 1980. – E. Hoeck, E. T. Brown, *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London 1980. – M. Hudec, *Statika obloga podzemnih prostorija*, u zborniku: *Mehanika stijena, temeljenje, podzemni radovi*. DGITH, Zagreb 1983. – Z. T. Bieliawski, *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. A. A. Balkema, Rotterdam 1984. – H. Brady, E. Brown, *Rock Mechanics for Underground and Mining*. G. Allen & Unwin, London 1985. – R. Goodman, *Introduction to Rock Mechanics*. J. Wiley and Sons, New York 1989. – J. Franklin, M. Dusseault, *Rock Engineering*. McGraw-Hill, New York 1989. – B. Whittaker, R. Frith, *Tunneling*. Elsevier, London 1990. – H. Dudek et al., *Konstruktivni projekt tunela*. Građevinar, Zagreb 1992. – *Lighting Manual*. Philips Technical Library, Eindhoven 1993. – W. Striegler, *Tunnelbau*. Bauwesen, Berlin 1993.

I. Banjad D. Desselbrunner
M. Hudec A. Magdalenić J. Rupčić
R. Simić E. Širola S. Vujeć