Posebne mjere podgrađivanja u tunelogradnji

Peter, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:147340

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij Rudarstva

POSEBNE MJERE PODGRAĐIVANJA U TUNELOGRADNJI

Diplomski rad

Josip Peter

R 224

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

POSEBNE MJERE PODGRAĐIVANJA U TUNELOGRADNJI

Josip Peter

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Posebne mjere podgrađivanja u tunelogradnji koriste se kod stijenskih masa/tla lošijih fizičko-mehaničkih karakteristika. U radu je opisano šest osnovnih metoda koje se koriste pri izradi tunela u nestabilnim stijenama/tlima, a to su: cijevni kišobran, mlazno injektiranje, zamrzavanje tla i stijene, iskop pod komprimiranim zrakom, čelična koplja te odvodnja. Cilj ovog rada jest opisati pojedinu metodu te prikazati način i svrhu primjene u određenim uvjetima.

Ključne riječi: Podgrađivanje, poboljšanje svojstava tla/stijene, tunelogradnja

Završni rad sadrži: 37 stranica, 2 tablica, 30 slika i 15 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 17. siječnja 2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

TUNNEL SUPPORTS IN WEAK GROUNDS

Josip Peter

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Tunnel supports in weak grounds are used when the ground chosen to build a tunnel has poorer physical and mechanical characteristics. This thesis describes six basic methods used for the construction of tunnels in weak grounds: pipe roof, jet grouting, ground freezing, pressure tunnels, steel bolts and drainage. The purpose of thesis is to briefly describe each method and their use in certain conditions.

Keywords: Support, ground improvement, tunneling

Thesis contains: 37 pages, 2 tables, 30 figures and 15 references

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assistant Professor Vinko Škrlec, Ph.D

Reviewers: Assistant Professor Vinko Škrlec, Ph.D
Associate Professor Mario Dobrilović, Ph.D
Assistant Professor Vječislav Bohanek, Ph.D

Defence date: 17th January 2020, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. POSEBNE MJERE PODGRAĐIVANJA – METODE 2
2.1. Cijevni kišobran 2
2.1.1. Opis cijevnih kišobrana 3
2.1.2. Ugradnja 4
2.1.3. Cijevi 8
2.1.4. Utjecaj injekcijske smjese 8
2.1.5. Utjecaj injekcijskih otvora (ili rupa) 9
2.1.6. Utjecaj spajanja cijevi 10
2.1.7. Projekti izvođeni metodom cijevnih kišobrana 11
2.1.7.1. Birgl tunel 11
2.1.7.2. Trojane tunel 12
2.2. Mlazno injektiranje 13
2.2.1. Vrste injektiranja 13
2.2.2. Mlazno injektiranje 14
2.2.3. Jednofluidni sustav 16
2.2.4. Dvofluidni sustav 18
2.2.5. Trofluidni sustav 21
2.2.6. Injektiranje u stijenama 23
2.2.7. Korištenje mlaznog injektiranja kao brtveni sustav 24
2.3. Zamrzavanje tla i stijena 25
2.3.1. Opis metode 25
2.4. Iskop pod komprimiranim tlakom 29
2.5. Čelična koplja 31
2.6. Odvodnja 32
3. ZAKLJUČAK 35
4. LITERATURA 36

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Zapadni ulaz tunela Birgl (Austria) podgrađen metodom cijevnih kišobrana (Volkmann & Schubert, 2007.) 3
Slika 2-2 Ugradnja cijevi (Tunneling, Rock Support & Geotechnical Solutions by MIPL & ROBIT, 2019) 4
Slika 2-3 Poseban stroj za prethodno bušenje (Volkmann & Schubert, 2008) 5
Slika 2-4 Stroj za bušenje kod metode bušenja sa kućištem (Volkmann & Schubert, 2008) 6
Slika 2-5 Deformacije nastale metodom bušenja s kućištem (Volkmann & Schubert, 2006) 7
Slika 2-6 Deformacije nastale metodom prethodnog bušenja (Volkmann & Schubert, 2006) 7
Slika 2-7 Uređaj za ispitivanje deformacije cijevi (Volkmann & Schubert, 2008) 8
Slika 2-8 Rezultati ispitivanja na cijevi bez otvora te na cijevi sa otvorom (Volkmann & Schubert, 2008) 10
Slika 2-9 Rezultati ispitivanja na cijevima s različitim spojevima (Volkmann & Schubert, 2008) 11
Slika 2-10 Shematski prikaz vrsta injektiranja (Welshetal., 1986) 14
Slika 2-11 Mlaz iz mlaznice na bušaćoj šipki (Dimitrios Kolymbas, 2008) 15
Slika 2-12 Cilindrična tijela u slojevitom tlu (Dimitrios Kolymbas, 2008) 15
Slika 2-13 Shematski prikaz postrojenja jednofluidnog sustava mlaznog (Čorko, 1997.) . 17
Slika 2-14 Shema toka fluida kod jednofluidnog sustava mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.) 18
Slika 2-15 Shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju korištenja zraka (Čorko, 1997.) 19
Slika 2-16 Shema toka fluida pri korištenju zraka (Čorko, 1997.) 20
Slika 2-17 Shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju korištenja vode (Čorko, 1997.) 20
Slika 2-18 Shema toka fluida pri korištenju vode (Čorko, 1997.) 21
Slika 2-19 Shematski prikaz postrojenja trofluidnog sustava mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.) 22
Slika 2-20 Shema toka fluida pri trofluidnom sustavu mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.) 23
Slika 2-21 Zaštita iskopa tunela od vode horizontalnim bušotinama (Čorko, 1997.) 24

Slika 2-22 Zamrznuto tlo oko čela iskopa tunela (POLONIA - METROPOLITANA VARSAVIA - LINEA II, 2019) 25
Slika 2-23 Shema zaleđivanja tla oko cijevi (Artificial ground freezing technique is used to construct substructures in soft, unstable water-bearing soils, 2019) 27
Slika 2-24 Shema postrojenja za zamrzavanje tla (Tatiya, 2005.) 27
Slika 2-25 Shema cijevi za zamrzavanje tla (Tatiya, 2005.) 28
Slika 2-26 Shema tunela pod komprimiranim zrakom za hidroelektranu (Rancourt, 2010.) 29
Slika 2-27 Vrste obloga kod tunela pod tlakom (Rancourt, 2010.) 30
Slika 2-28 Podupiranje iskopa tunela I profilom (Smjernice za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima, 2019) 31
Slika 2-29 Drenažne cijevi (Kolymbas, 2008.) 32
Slika 2-30 Drenaža podzemne željeznice (Kolymbas, 2008.) 33

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Kratkoročna svojstva smrznutnog tla (sedam dana) 26
Tablica 2-2 Dugoročna svojstva smrznutnog tla (365 dana) 26

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	bar	tlak
L	m	duljina
ρ	kg/m^3	gustoća
O	m	opseg
A	m^2	površina
v	m/s	brzina
q_u	MPa	čvrstoća
v	-	Poissonov koeficijent
k	cm/s	propusnost
V_p	l	volumen pora
T	℃	temperatura
c	MN/ m^2	kohezija
E	MN/ m^2	Youngov modul
ϕ	°	kut trenja

1. UVOD

Oduvijek je bila velika potreba za iskopom tunela. Najčešći razlog za iskop tunela kako u prošlosti tako i u sadašnjosti je savladavanje terenskih prepreka. Terenskim preprekama smatraju se planine, jezera, morski zaljevi, klizišta itd. U posljednjih nekoliko desetljeća javlja se problem nedostatka prostora, prenapučenosti naselja te zaštite okoliša, pa se tunelogradnja počela koristiti i u te svrhe.

Razvijanjem tunelogradnje kroz godine došlo je i do razvijanja raznih metoda, tehnologija i znanja koje služe da bi iskop tunela bio brži, sigurniji, jednostavniji i jeftiniji. Tako su se razvile i razne metode podgrađivanja tunela.

Primarne podgrade obuhvaćaju one elemente tunelske obloge koji su potrebni kako bi se osigurala stabilnost tunelskog iskopa. Primjenjuju se za vrijeme iskopa kako bi se omogućio rad u sigurnim uvjetima. Svaka dodatna podgrada u kasnijoj fazi naziva se sekundarna. Elementi primarne podgrade tunela su:

1) stijenska masa,
2) mlazni beton,
3) čelične mreže i lukovi i
4) sidra.

Još jedna vrsta podgrađivanja koja se je razvila posljednjih desetljeća je podgrađivanje u posebnim uvjetima, odnosno posebne mjere podgrađivanja. Ova metoda upotrebljava se kod iskopa tunela: u slabijoj stijeni/tlu s vrlo malim nadslojem, u stijenama gdje se javljaju velika naprezanja, u naseljenim područjima te kod iskopa u kojima velike probleme stvaraju podzemne vode.

2. POSEBNE MJERE PODGRAĐIVANJA – METODE

Pod posebnim mjerama podgrađivanja u tunelogradnji smatraju se sljedeće metode:

1) cijevni kišobran,
2) mlazno injektiranje,
3) zamrzavanje tla i stijene,
4) iskop pod komprimiranim tlakom,
5) čelična koplja i
6) odvodnja.

2.1. Cijevni kišobran

Sve veći broj stanovnika u urbanim područjima zahtijeva proširenje grada ispod površine zemlje (npr. podzemne željeznice, parkinzi, trgovački centri, pješački prolazi, itd.), posebice u velikim gradovima. Zbog već postojećih objekata i infrastrukture izrada novih projekata suočava se s problemima buke i slijeganja tla. Također, u urbanim područjima javljaju se velika naprezanja i deformacije tla pri izradi tunela i podzemnih prostorija jer je stijena, u kojoj se izrađuje tunel, vrlo istrošena zbog prijašnjih radova i projekata. Ovi problemi utječu na cjelokupni proces projektiranja jer su zbog njih često potrebne posebne mjere podgrađivanja.

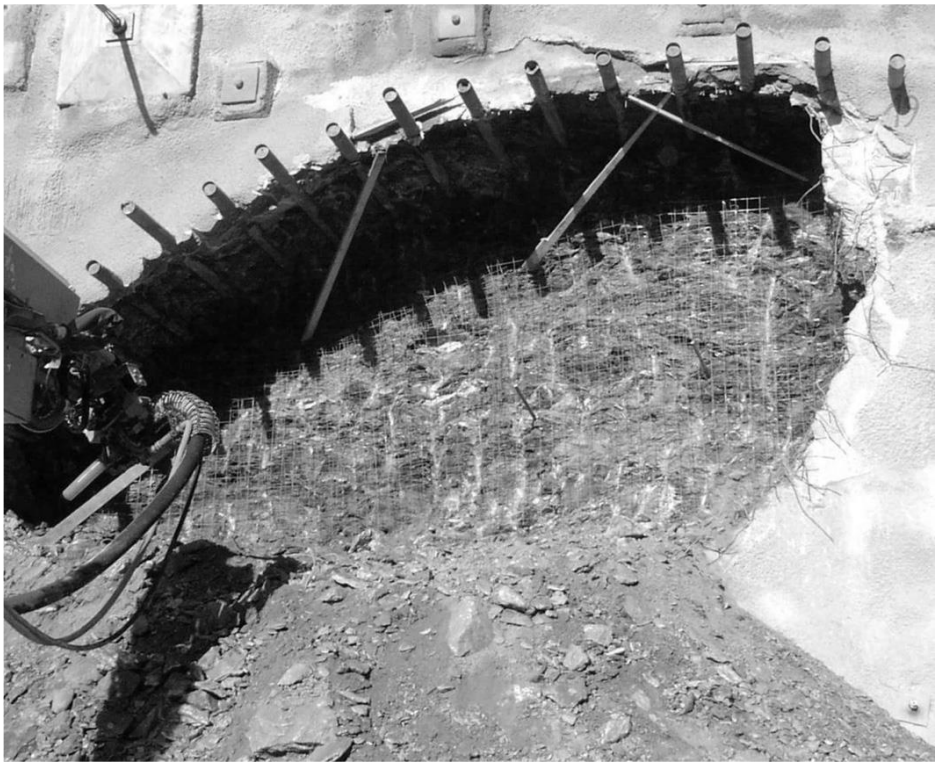
Metoda cijevnih kišobrana često je jeftinija i brža od drugih metoda. Također, iskustvo i razni projekti pokazali su da se ovom metodom povećava stabilnost radne površine te da se smanjuju slijeganja uzrokovana iskopom. Ove su činjenice dovele do velikog porasta korištenja metode cijevnih kišobrana bez dodatnih istraživanja i određivanja projektnih parametara. To je predstavljalo problem jer se nije sa sigurnošću moglo pokazati hoće li projektno rješenje biti odgovarajuće za određeni projekt. Međutim, u posljednjih nekoliko desetljeća taj se problem počeo rješavati te su se počela provoditi detaljnija istraživanja. To se postiglo ugradnjom inklinometara paralelno sa smjerom u kojem će kasnije biti položene cijevi koje se koriste u ovoj metodi. Inklinometri se koriste kako bi se obavila „*in situ*“ mjerenja s ciljem boljeg razumijevanja interakcije podgrade i stijene. Ugradnjom inklinometara dobivaju se podaci o pomacima u podzemlju te na površini. Rezultat koji se dobije je geotehnički model metode cijevnih kišobrana. Također, obavljaju se laboratorijska ispitivanja na cijevima te na stijeni kako bi se dobili podaci o

čvrstoći i krutosti. Svi se ovi podaci onda koriste za numerička ispitivanja kojima se dobivaju dimenzije i pravilan dizajn metode cijevnih kišobrana.

2.1.1. Opis cijevnih kišobrana

Metoda cijevnih kišobrana samo je jedna od metoda posebnih mjera podgrađivanja. U ovoj metodi uglavnom se koriste čelične cijevi, premda se ponekad koriste i cijevi od staklenih vlakana. One se ugrađuju od početka tunela prema smjeru napredovanja (slika 2-1). Postavljaju se u obliku kišobrana ili nadstrešnice oko područja koje se kasnije iskopava.

Promjer čeličnih cijevi iznosi između 60 mm i 200 mm, a debljina stijenke od 4 mm do 8 mm. Duljina jednog kišobrana općenito je između 12 m i 15 m. Iskop pod jednim kišobranom može iznositi od 6 m do 12 m.



Slika 2-1 Zapadni ulaz tunela Birgl (Austria) podgrađen metodom cijevnih kišobrana (Volkmann & Schubert, 2007.)

U cijevi se nakon ugradnje utiskuje injekcijska smjesa gustoće oko 2200 kg/m^3, vodocementnog koeficijenta od 0,45 do 0,80 te tlakom injektiranja najčešće manjom od 10 bara. Injekcijska smjesa služi kako bi se povećala nosivost samog potpornog sustava te kako ne bi došlo do deformacija cijevi prilikom iskopa tunela. Također se smjesom

zapunjavaju praznine između cijevi i okolnog tla/stijene da bi se dobio bolji kontakt između njih.

2.1.2. Ugradnja

Za ugradnju cijevi mogu se koristiti bušilice ili specijalni strojevi (slika 2-2).



Slika 2-2 Ugradnja cijevi (Tunneling, Rock Support & Geotechnical Solutions by MIPL & ROBIT, 2019)

Postoje dvije različite metode za postavljane cijevi, a to su:

a) prethodno bušenje i
b) bušenje s kućištem.

Metodu prethodnog bušenja karakterizira postupak postavljanja cijevi u dva koraka. Prvi korak je da se izbuši bušotina, a u drugom koraku se u nju ugrađuje cijev. Za ovu metodu su potrebni posebni strojevi (slika 2-3) koji imaju dugačku „*ruku*“ pomoću koje izrađuju bušotinu. Za hlađenje svrdla nakon bušenja koristi se zrak ili voda. Mlaznice se nalaze na vrhu bušaćeg svrdla te se hladi cijelo svrdlo i ispiru čestice tla/stijene. Nakon što se svrdlo izvuče iz bušotine, unutra se ugrađuje cijev. Uobičajen je postupak da se prvo

izbuši nekoliko bušotina, a zatim se ugrađuju cijevi. Time se smanjuje vrijeme trajanja radova. Nedostatak ove metode je što bušotina nije poduprta, stoga to predstavlja rizik u nestabilnim i slabim tlima/stijenama (Volkmann & Schubert, 2008).



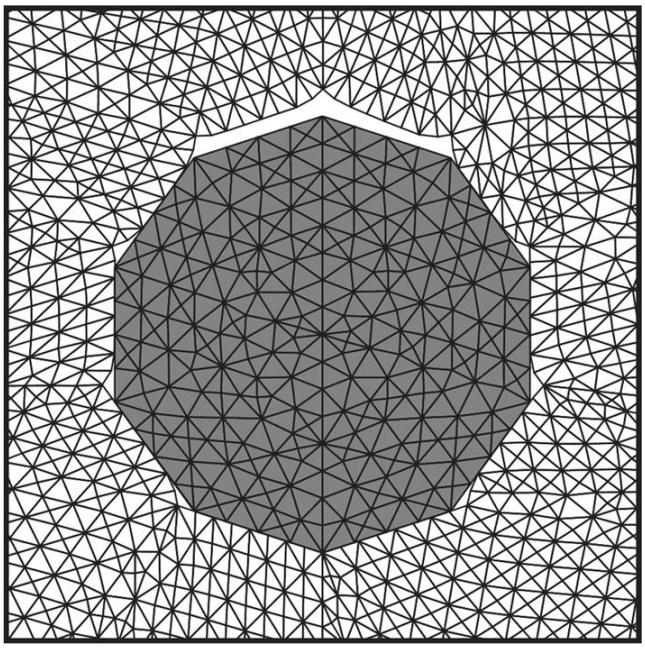
Slika 2-3 Poseban stroj za prethodno bušenje (Volkmann & Schubert, 2008)

Kod metode bušenja s kućištem postoji samo jedan korak ugradnje. Cijev se odmah nakon bušenja ugrađuje u bušotinu te tamo ostaje i nakon završetka bušenja. Kod ove metode koriste se bušilice s dvije ili više „*ruku*“ (slika 2-4) kako bi se moglo ubrzati vrijeme ugradnje. Ovom se metodom cijeli proces ugradnje cijevnih kišobrana, a to je oko 600 m cijevi, može završiti u 24 sata. Bitno je naglasiti kako to uključuje cijeli proces podgrađivanja metodom cijevnih kišobrana, uključujući i ubrizgavanje injekcijske smjese u cijevi. Cijevi su duže od dohvata bušilice pa se postupak prekida skoro svaka 3 m, nadodaje se sljedeća cijev i nastavlja se ugradnja. Za ispiranje i hlađenje uglavnom se koristi voda.

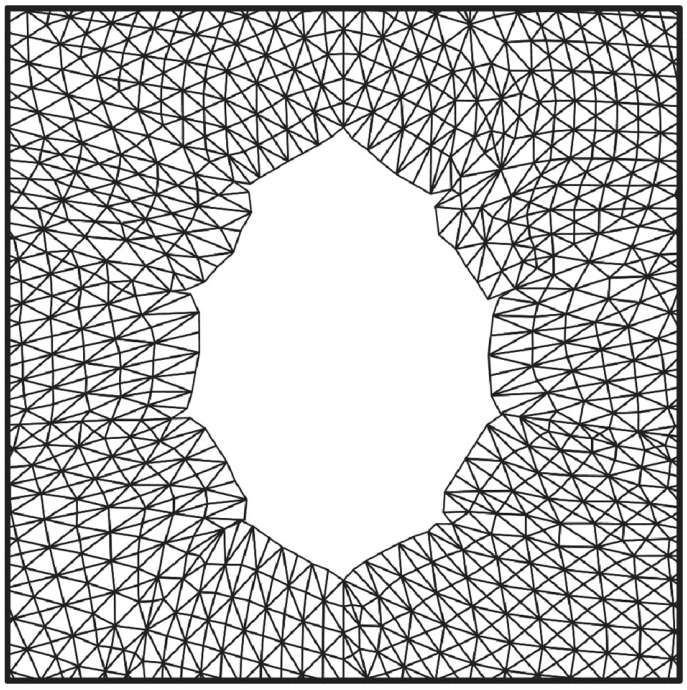


Slika 2-4 Stroj za bušenje kod metode bušenja sa kućištem (Volkmann & Schubert, 2008)

Na slici 2-5 prikazani su rezultati deformacija kad se koristila metoda bušenja s kućištem, dok se na slici 2-6 nalaze deformacije nastale metodom prethodnog bušenja. Jasno se vidi da su deformacije veće na slici 2-6 od deformacije na slici 2-5 i to iz razloga što je bušotina poduprta odmah nakon bušenja.



Slika 2-5 Deformacije nastale metodom bušenja s kućištem (Volkmann & Schubert, 2006)



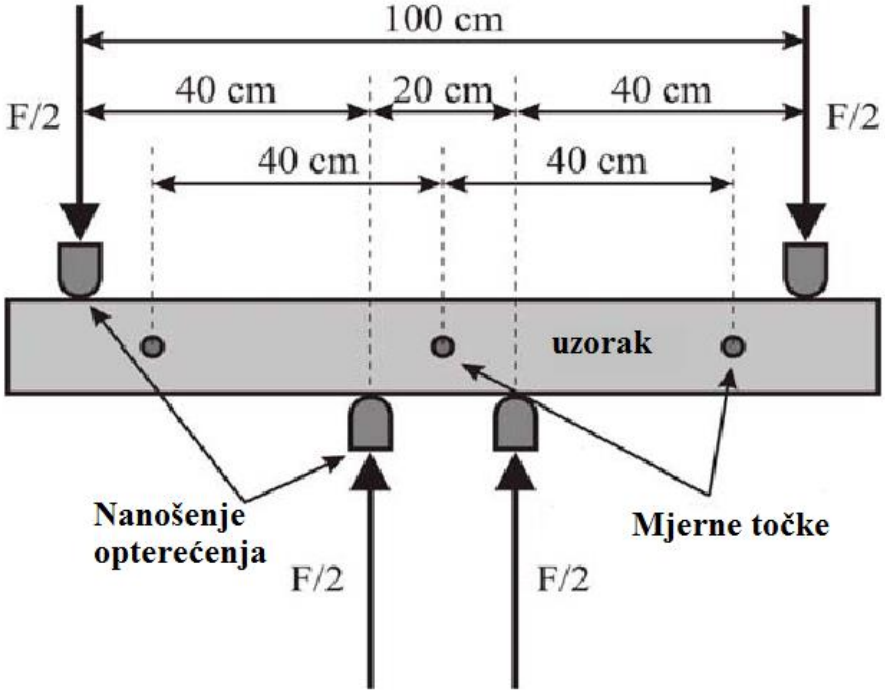
Slika 2-6 Deformacije nastale metodom prethodnog bušenja (Volkmann & Schubert, 2006)

U nestabilnim tlima i stijenskim masivima naprezanje nastalo bušenjem bušotine za ugradnju cijevi može uzrokovati zatvaranje praznine koja se nalazi između tla/stijene i cijevi prije nego je počeo iskop tunela. Međutim, ova naprezanja na cijevi su minimalna, praktički su jednaka nuli te ne stvaraju dodatno opterećenje na cijevi. Također, treba napomenuti da vrsta isplake prilikom bušenja bušotine za ugradnju cijevi ne utječe na

početna naprezanja prilikom iskopa, ali treba uzeti u obzir da korištenje vode može rezultirati smanjenjem inženjerskih svojstva tla/stijene (Volkmann & Schubert, 2006).

2.1.3. Cijevi

Cijevi koje se koriste u ovoj metodi imaju, uz promjer i debljinu stijenki, dodatne značajke koje mogu utjecati na krutost i čvrstoću odabrane podgrade. Ispitivanja se zbog toga provode na praznim cijevima i cijevima koje su ispunjene injekcijskom smjesom. Na slici 2-7 su prikazane dimenzije uređaja zaispitivanje uzoraka cijevi. Relativni pomak koji se uočava između triju mjernih točaka na uređaju označava deformaciju uzorka. Ispitivanja se provode do opterećenja pri kojem cijevi pucaju ili značajno smanjuju svoja svojstva. Istraživanja su pokazala da su cijevi koje se koriste za podgradu opterećene u elastičnom području (Volkmann & Schubert, 2008).



Slika 2-7 Uređaj za ispitivanje deformacije cijevi (Volkmann & Schubert, 2008)

2.1.4. Utjecaj injekcijske smjese

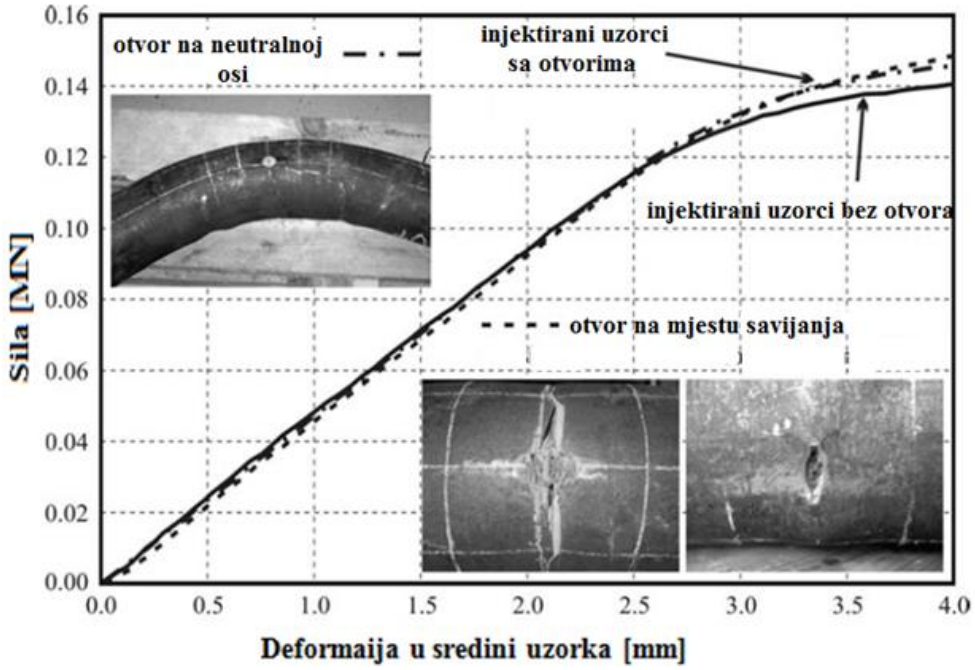
Ispitivanjem injekcijske smjese pokušava se utvrditi kako udio injekcijske smjese utječe na deformacije cijevi pod opterećenjem. Određeno je da se za sva ispitivanja koristi

vodocementni omjer 0,45 te se ispituje pet uzoraka cijevi. Prvi uzorak predstavlja prazna cijev. Drugi uzorak je cijev ispunjena 100% injekcijskom smjesom koja se stvrdnjivala minimalno sedam dana, treći je cijev ispunjena 75% injekcijskom smjesom, a četvrti je cijev ispunjena 75% injekcijskom smjesom, a ostatak pijeskom. Peti uzorak je cijev kod koje isplaka nije uklonila sve krhotine i ostatke tla/stijene prilikom ugrađivanja cijevi u bušotinu. Dno te cijevi ispunjeno je krhotinama i ostatcima tla/stijene, a ostatak je ispunjen injekcijskom smjesom.

Rezultati dobiveni ovim istraživanjem pokazuju da nema velikih odstupanja u vrijednosti deformacija kod ispitivanih uzoraka. Najznačajnija razlika uočena je kod praznih cijevi gdje se poprečni presjek blago mijenjao prilikom povećanja opterećenja. Ova značajka vidljiva je samo kod cijevi većih promjera (114,5 mm i 139,7 mm) te rezultira smanjenjem čvrstoće za 15%. Iz tog razloga, cijevi koje se koriste u ovoj metodi treba ispuniti injekcijskom smjesom prije početka iskopa tunela (Volkmann & Schubert, 2006).

2.1.5. Utjecaj injekcijskih otvora (ili rupa)

Cijevi koje se koriste u metodi cijevnih kišobrana obični imaju na sebi otvore (ili rupe) koji služe za ubrizgavanje injekcijske smjese. Ovi otvori također služe da bi se ispunile praznine između tla/stijene i cijevi te popunila pukotine i pore u tlu/stijeni i oko bušotine. Nedostatak ovih otvora je što smanjuju čvrstoću i krutost cijevi. Iz tog razloga rade se ispitivanja na cijevima s otvorom na sredini uzorka, koje su ispunjene injekcijskom smjesom (otvrdnutom sedam dana). Na slici 3-8 prikazani su rezultati tih ispitivanja. Puna linija predstavlja rezultat cijevi bez injekcijskih otvora (dimenzija 114,3 mm x 6,3 mm), dok isprekidana linija i linija crta-točka-crta predstavljaju uzorke s injekcijskim otvorima. Ispitan je uzorak s otvorom na neutralnoj osi te uzorak s otvorom na mjestu savijanja. Ispitivanjem je utvrđeno da mjesto otvora nema veliki značaj te ne utječe na otpornost cijevi na savijanje pri opterećenju (Volkmann & Schubert, 2008).



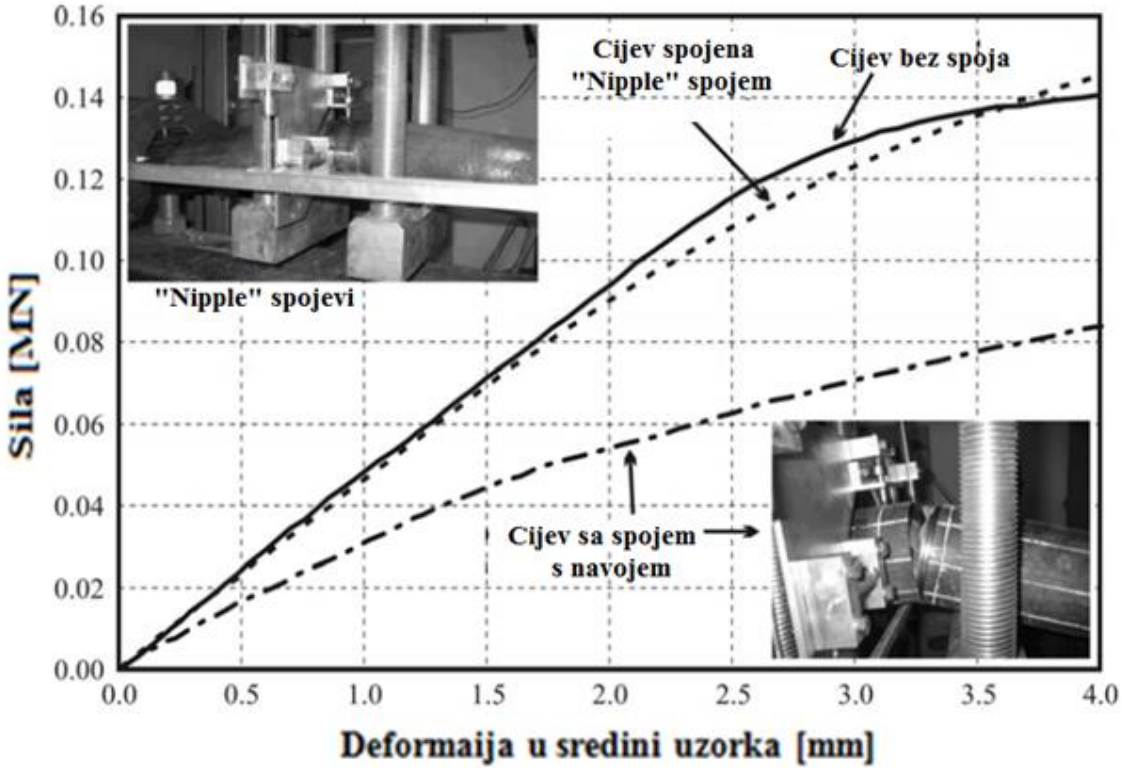
Slika 2-8 Rezultati ispitivanja na cijevi bez otvora te na cijevi sa otvorom (Volkmann & Schubert, 2008)

2.1.6. Utjecaj spajanja cijevi

Uobičajeno je da se metodom prethodog bušenja ugrađuju duge jednodijelne cijevi, dok se kod metode bušenja s kućištem ugrađuju cijevi dugačke po tri metra koje se međusobno spajaju navojima. Ispitivanja su pokazala da su ti spojevi najnestabilniji dio metode cijevnih kišobrana. Na slici 2-9, u donjem desnom kutu, prikazan je slom na spojnom području.

Otpornost na savijanje, kao i maksimalno opterećenje koje ovi spojevi mogu podnijeti, manji su nego kod ostatka cijevi, stoga se za izradu cijele konstrukcije koriste čvrstoća i krutost koje su određene za spojeve. Ovi nedostaci doveli su do razvijanja novih vrsta spojeva, takozvanih „*Nipple*“ spojeva. Prednost ove vrste spoja je ta što s obje strane sadrži navoj na koji se spajaju cijevi te u sredini spoja sadrži ojačanje.

Na slici 2-9 vidljivo je kako „*Nipple*“ spoj, koji ima otpornost na savijanje, ima slične karakteristike kao i cijev koja se ugrađuje kod metode prethodnog bušenja. Također, ispitivanja su pokazala da ovaj spoj može podnijeti veće opterećenje nego obične cijevi.



Slika 2-9 Rezultati ispitivanja na cijevima s različitim spojevima (Volkmann & Schubert, 2008)

2.1.7. Projekti izvođeni metodom cijevnih kišobrana

U ovom poglavlju opisana su dva tunela u kojima se koristila metoda cijevnih kišobrana sa različitim metodama bušenja za ugradnju cijevi.

2.1.7.1. *Birgl tunel*

Birgl tunel je željeznički tunel u Austriji. Sadrži dva kolosjeka, a dugačak je 950 m. Površina iskopa iznosila je 130 m^2. Zapadni portal tunela i sljedećih 80 m nalaze se u „*Tauernnordrandstörung*“, glavnoj pukotinskoj zoni u Alpama. Ovaj dio tunela izgrađen je Novom Austrijskom Tunelskom Metodom (NATM) u kojoj je korištena metoda cijevnih kišobrana. Za ugradnju cijevi korištena je metoda bušenja s kućištem. Stijenska masa sastojala se od glinovitih kataklastičnih pukotinskih zona. Ispitivanjem su dobiveni parametri za stijensku masu: kohezija je iznosila do 0,03 MPa, kut trenja je bio 20°, a čvrstoća jezgre 0,3 MPa-0,8 MPa.

2.1.7.2. *Trojane tunel*

Tunel Trojane je 2900 km dug tunel u Sloveniji otvoren 2005. godine. Nalazi se na autocesti koja spaja Celje i Ljubljanu. Promjer tunela iznosi oko 11 m. Izgrađen je Novom Austrijskom Tunelskom Metodom u kojoj je korištena metoda cijevnih kišobrana. Za ugradnju cijevi korištena je metoda prethodnog bušenja. U geološkim uvjetima koje su zatekli izvođači radova dominirali su muljnjaci, pješčenjaci i konglomerati. Stijena je bila jako istrošena, što je rezultiralo velikom razlikom u debljini slojeva. Zelder (2003) je prikazao parametre stijenske mase u ovom projektu: Young-ov modul elastičnosti iznosio je 20 MPa, Poisson-ov koeficijent bio je 0,25, kut trenja 18° te je kohezija iznosila 0,016 MPa (Volkmann & Schubert, 2006).

2.2. Mlazno injektiranje

Metoda mlaznog injektiranja jedna je od najsuvremenijih metoda podgrađivanja te poboljšanja tla i stijena. Služi da bi se poboljšala svojstva krutosti, čvrstoće i/ili stabilnosti, a primjenjuje se u situacijama koje zahtijevaju kontrolu podzemnih voda ili pri iskopu u rahlom, nevezanom tlu. Ova se metoda u početku koristila u američkim ugljenokopima na način da bi se pomoću mlaza vode pod pritiskom razbila prvotna struktura tla, dok je u Japanu početkom 70-ih godina razvijeno mlazno injektiranje. Danas se u tunelogradnji koristi najčešće u sitnozrnim rahlim tlima.

2.2.1. Vrste injektiranja

Razlikuju se četiri osnovne vrste injektiranja:

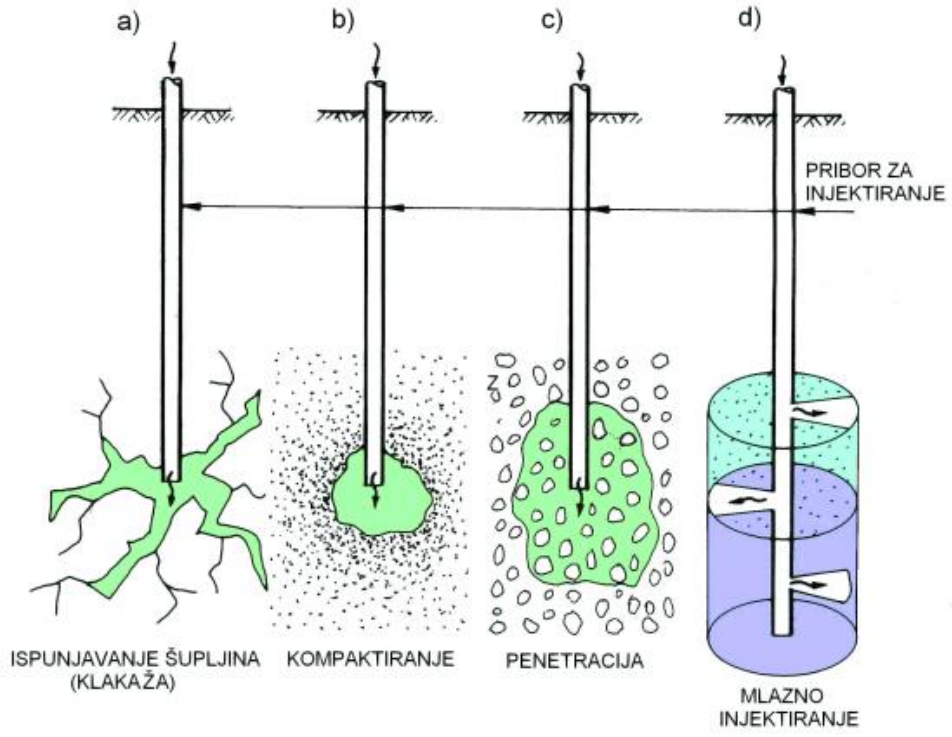
a) ispunjavanje šupljina – injekcijska se smjesa utiskuje u prazne šupljine (ili pukotine) tla/stijene (slika 2-10a),

b) kompakcijsko injektiranje - injekcijske smjese s visokim unutarnjim trenjem se utiskuju u stišljivo tlo pa dolazi do pomaka čestica tla i povećanja gustoće okolnog tla (slika 2-10b),

c) penetracijsko injektiranje - injekcijska smjesa utiskuje se u tlo pod razmjerno niskim tlakom tako da ne dolazi do promjene obujma i strukture tla.

Osnovni parametar na temelju kojeg se određuje sastav i karakteristika injekcijske smjese je propusnost tla, k. Ovisno o tom koeficijentu tla koriste se: cementne smjese (kada je $k > 10^{-2}$ cm/s), silikatne smjese (kada je k između 10^{-2} cm/s i 10^{-4} cm/s), rezorcinske smjese (kada je k između 10^{-4}cm/s do 10^{-6} cm/s). Ova vrsta injektiranja nije primjenjiva kod slabopropusnih vrsta tala (slika 2-10c) te

d) mlazno injektiranje (slika 2-10d).



Slika 2-10 Shematski prikaz vrsta injektiranja (Welshetal., 1986)

2.2.2. Mlazno injektiranje

Ova metoda injektiranja značajno se razlikuje od ostalih metoda. Primjenjujući ovu metodu posve se razbija struktura tla te se čestice tla miješaju s injekcijskom smjesom pa nastaje homogenizirana masa poboljšanih karakteristika. Jedna od osnovnih prednosti metode mlaznog injektiranja u odnosu na ostale tri metode je u bitnom smanjenju tehničkih i ekonomskih nepoznanica koje su posljedica stvarnih okolnosti u tlu.

Injekcijska se smjesa pod visokim tlakom (u iznosu od 300 bara do 600 bara) utiskuje u tlo iz mlaznica na kraju bušaće šipke (slika 2-11). Mlaz smjese pod tako velikim tlakom erodira na okolno tlo. Cijev se izvlači nakon dosegnute određene dubine formirajući iza sebe cilindrično tijelo sastavljeno od tla i cementne smjese (slika 2-12). Promjer cilindra ovisi o više faktora, a jedan od njih je i brzina izvlačenja šipke. Suvremenom tehnologijom dostižu se promjeri i do pet metara (Čorko, 1997).



Slika 2-11 Mlaz iz mlaznice na bušaćoj šipki (Dimitrios Kolymbas, 2008)



Slika 2-12 Cilindrična tijela u slojevitom tlu (Dimitrios Kolymbas, 2008)

2.2.3. Jednofluidni sustav

Jednofluidni sustav mlaznog injektiranja je najraširenij, najjednostavniji i najjeftiniji sustav. Pri ispuštanju injekcijskog mlaza dolazi do razbijanja strukture tla te miješanja tla s injekcijskom smjesom. Orijentacija rotirajućeg mlaza može biti od horizontalne do vertikalne.

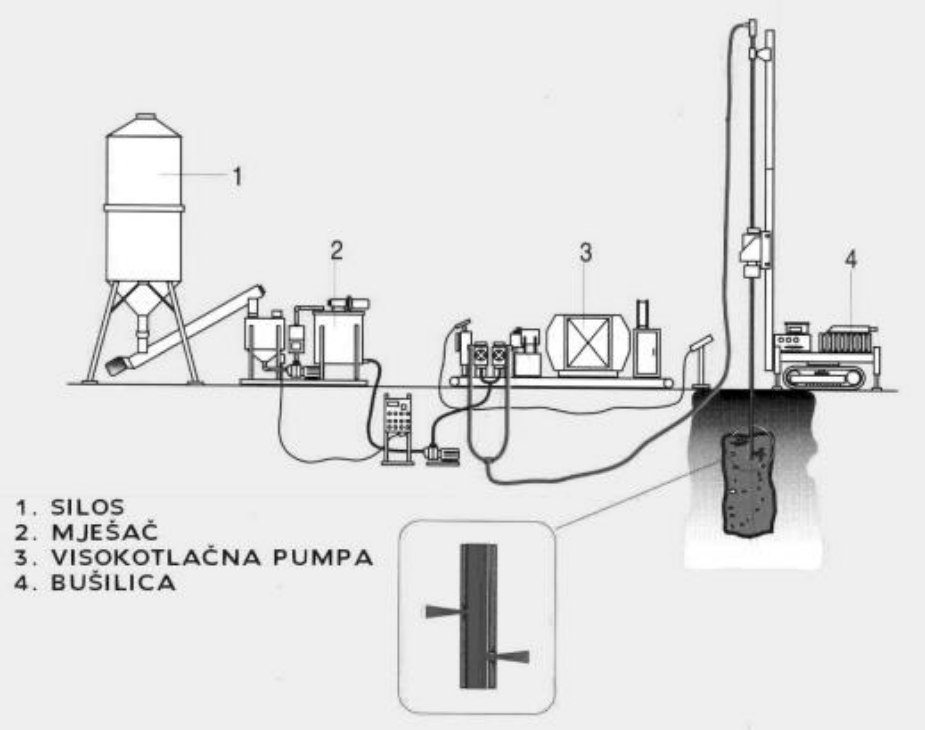
Za jednofluidni sustav nije karakteristično preveliko izbacivanje tla na površinu. Stoga je problem osiguranja protoka fluida uz bušaći pribor prema površini tla najmanje izražen u odnosu na više fluidne sustave. Bitno je napomenuti kako je kod ovog sustava izraženo zbijanje tla oko plašta injektiranog valjka u širini najčešće oko pola promjera injektiranog valjka. U jednofluidnom sustavu postoji šest parametara koji izravno utječu na injektiranje, a to su: tlak injektiranja, broj i promjer mlaznica, vodocementni faktor injekcijske smjese, brzina podizanja pribora te trajanje rotacije.

Promjeri valjka koji se postižu koristeći jednofluidni sustav mlaznog injektiranja su manji, usporedivši ih s dvofluidnim i trofluidnim sustavima mlaznog injektiranja. Oni u glinovitom tlu iznose oko 40 cm do 60 cm, dok su iznosi promjera veći u pjeskovitom tlu (od 50 cm do 120 cm). Promjer valjka ovisi izravno o snazi pumpanja injektiranja i protoku injekcijske smjese. Visokotlačna pumpa je kritični element u čitavom sustavu i treba biti tako odabrana da jamči protok od 60 l/min do 220 l/min, uz tlak od 300 bara do 500 bara i to u razdoblju od jedan do osam sati kontinuiranog rada. Pribor za bušenje i injektiranje kod jednofluidnog sustava ima središnju rupu, a promjer mu je obično od 90 mm do 110 mm (minimalno 65 mm). Debljina stijenki pribora je oko 10 mm. Bušenje može biti izvedeno: rotacijom, rotacijsko-udarno ili kombinacijom rotacijskog bušenja i mlaznog ispiranja tla. Mlazno ispiranje ubrzava bušenje i pospješuje vertikalnost bušotine. Kad se bušenjem dosegne predviđena dubina uključuje se visokotlačna pumpa i počinje injektiranje uz stalnu rotaciju i postepeno podizanje pribora (najčešće u inkrementima visine koji su unaprijed određeni, odnosno s prethodno određenom brzinom podizanja pribora).

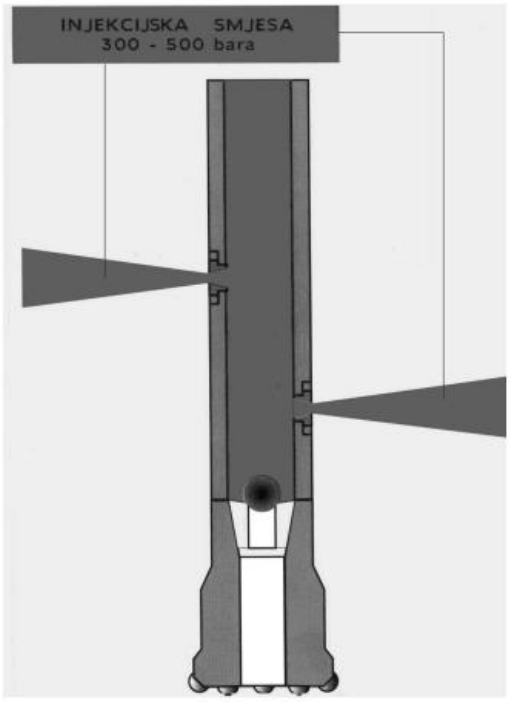
Neki proizvođači opreme za jednofluidne sustave ugrađuju čelična krilca po opsegu pribora zbog osiguranja nesmetanog protoka fluida duž bušaćih šipki. Ta krilca režu tlo u promjeru većem od samih šipki što povećava sigurnost komunikacije fluida duž šipke do površine tla. Naravno, čelična krilca mogu se izraditi i na priboru za ostale sustave mlaznog injektiranja. Treba napomenuti da se povećanje promjera injektiranog valjka

postiže u prvom redu povećanjem trajanja injektiranja na nekom horizontu, a ne, kako se to često misli, povećanjem tlaka pumpanja.

Na slici 2-13 je shematski prikaz postrojenja jednofluidnog sustava mlaznog injektiranja, a na slici 2-14 prikazana je shema toka fluida kod jednofluidnog sustava (Čorko, 1997.).



Slika 2-13 Shematski prikaz postrojenja jednofluidnog sustava mlaznog (Čorko, 1997.)



Slika 2-14 Shema toka fluida kod jednofluidnog sustava mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.)

2.2.4. Dvofluidni sustav

Glavna razlika između jednofluidnog i dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja je u tome što se kod dvofluidnog sustava istovremeno kroz mlaznice ispušta i zrak i injekcijska smjesa. Zrak ili voda služe da bi se razbila početna struktura tla te kako bi se napravio prostor za injektirani stup. Ovaj sustav zapravo je unaprjeđenje jednofluidnog sustava.

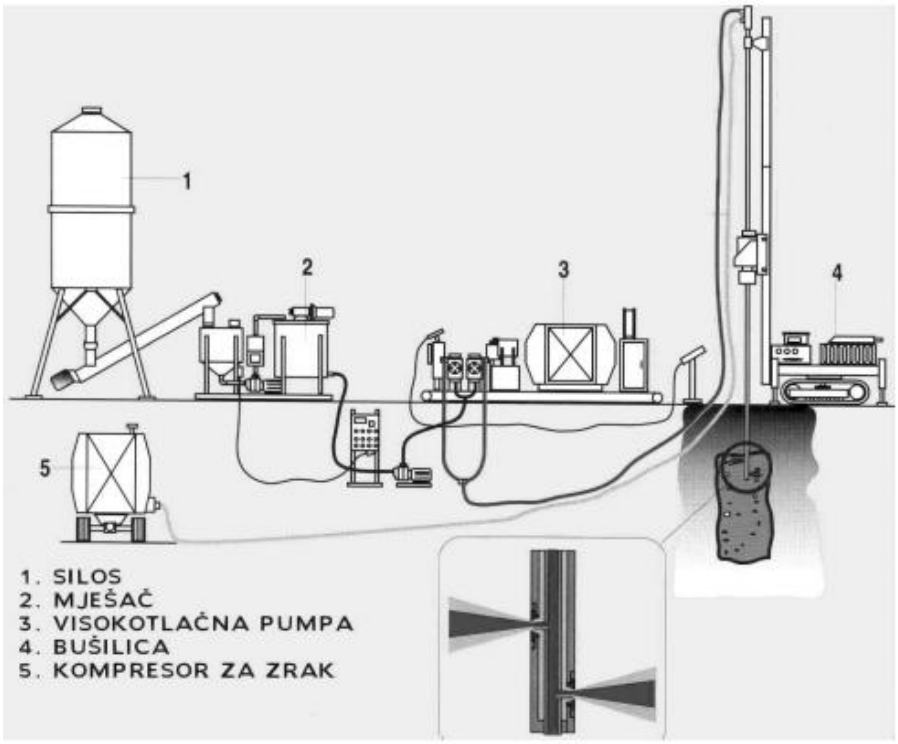
Zbog prisustva zraka ili vode dolazi do povećanja promjera injekcijskog stupa za 200% do 250% u odnosu na jednofluidni sustav. Postoji nekoliko čimbenika zašto prisustvo zraka ili vode dovodi do povećanja promjera. Primjerice, stlačeni zrak siječe tzv. prijelaznu zonu (zonu između injekcijskog mlaza i podzemne vode) pa se injekcijska smjesa širi 200% više nego kada se radi bez zraka ili vode, a čestice razbijenog tla bolje se pomiču iz zone razaranja te se kroz mjehuriće stlačenog zraka ispiru prema površini. Parametri koji utječu na injektiranje kod dvofluidnog sustava su: tlak injektiranja, broj i promjer mlaznica, vodocementni faktor injekcijske smjese, brzina podizanja pribora, trajanje rotacije, tlak zraka i protok zraka.

Problem kod dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja je u tome što injektirano tlo sadrži više zraka, a to rezultira manjom kvalitetom u odnosu na ostala dva sustava.

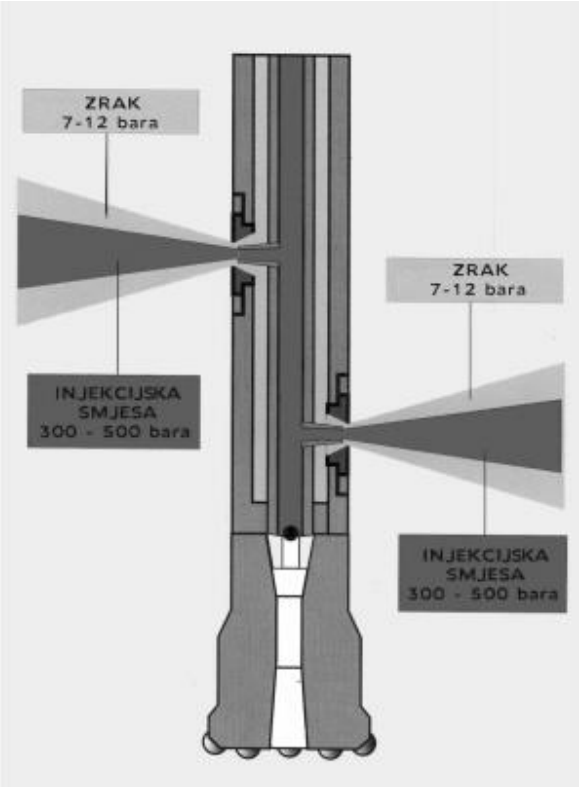
Oprema koja se koristi kod dvofluidnog sustava složenija je od opreme koja se koristi za jednofluidni. Bušaća cijev sastoji se od unutarnje i vanjske šipke. Unutarnja šipka

koristi se za protok injekcijske smjese, dok se prostor (u iznosu oko 5 mm) između ovih dviju šipki koristi za zrak. Vrlo je bitno da taj prostor bude cijelo vrijeme prohodan. Ukoliko se taj prolaz začepi, izvodi se injektiranje prema karakteristikama jednofluidnog sustava. Kako bi se tijekom bušenja osigurao nesmetan prolaz zraka kroz mlaznice, mlaznica je zaštićena gumenom brtvom koja se otvara kad se zrak počne utiskivati u cijev.

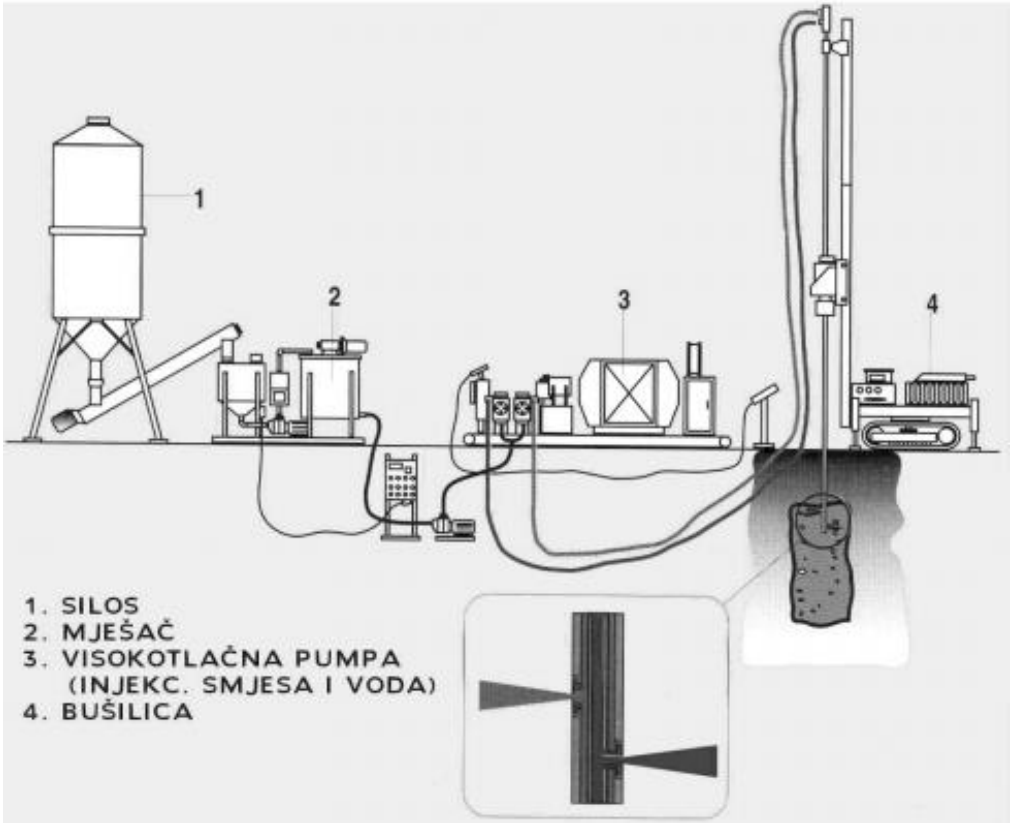
Kod ovog sustava injektiranja uz injekcijsku smjesu mogu se koristiti ili zrak ili voda. Stoga, postoji razlika u postrojenju koje se koristi. Na slici 2-15 nalazi se shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju korištenja zraka kao drugog fluida, dok se na slici 2-16 nalazi shema toka fluida za isti slučaj. Na slici 2-17 prikazana je shema postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju kad se koristi voda, a na slici 2-18 prikazana je shema toka vode i injekcijske smjese kroz mlaznice (Čorko, 1997.).



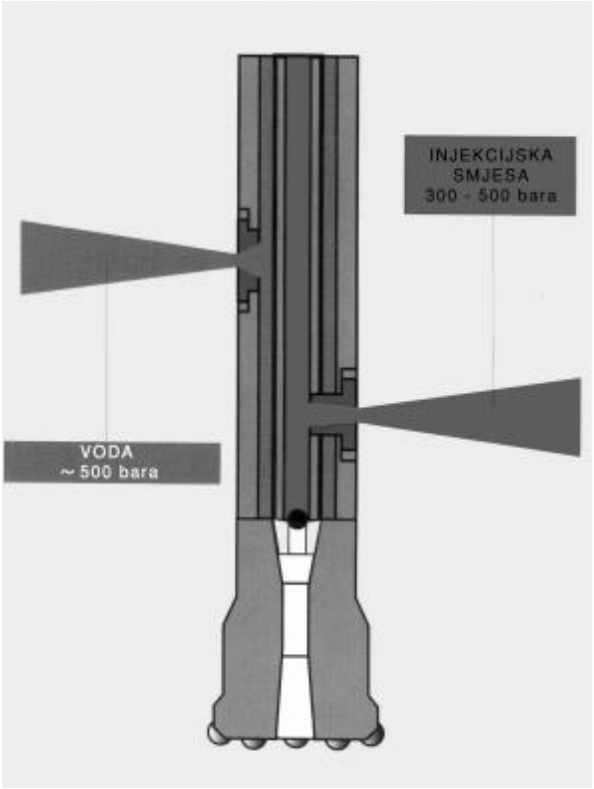
Slika 2-15 Shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju korištenja zraka (Čorko, 1997.)



Slika 2-16 Shema toka fluida pri korištenju zraka (Čorko, 1997.)



Slika 2-17 Shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja u slučaju korištenja vode (Čorko, 1997.)



Slika 2-18 Shema toka fluida pri korištenju vode (Čorko, 1997.)

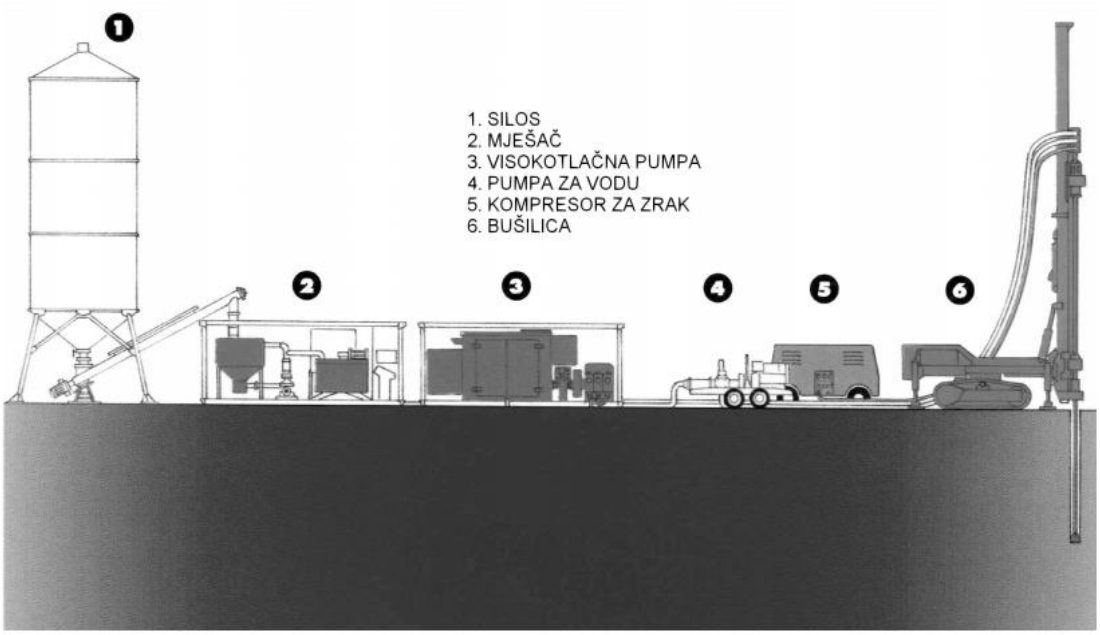
2.2.5. Trofluidni sustav

Trofluidni sustav mlaznog injektiranja najsloženiji je sustav od sva tri sustava, a razlog tome je što se u ovom slučaju utiskuju tri različite vrste fluida: voda, zrak i injekcijska smjesa. Prilikom rada istiskuje se znatno veća količina čestica tla na površinu pa se veliki postotak tla izmiješa s injekcijskom smjesom (više od 50%). Kod trofluidnog sustava na injektiranje utječu sljedeći parametri: tlak injektiranja, broj i promjer mlaznica, vodocementni faktor injekcijske smjese, brzina podizanja pribora, trajanje rotacije, tlak i protok zraka te tlak vode.

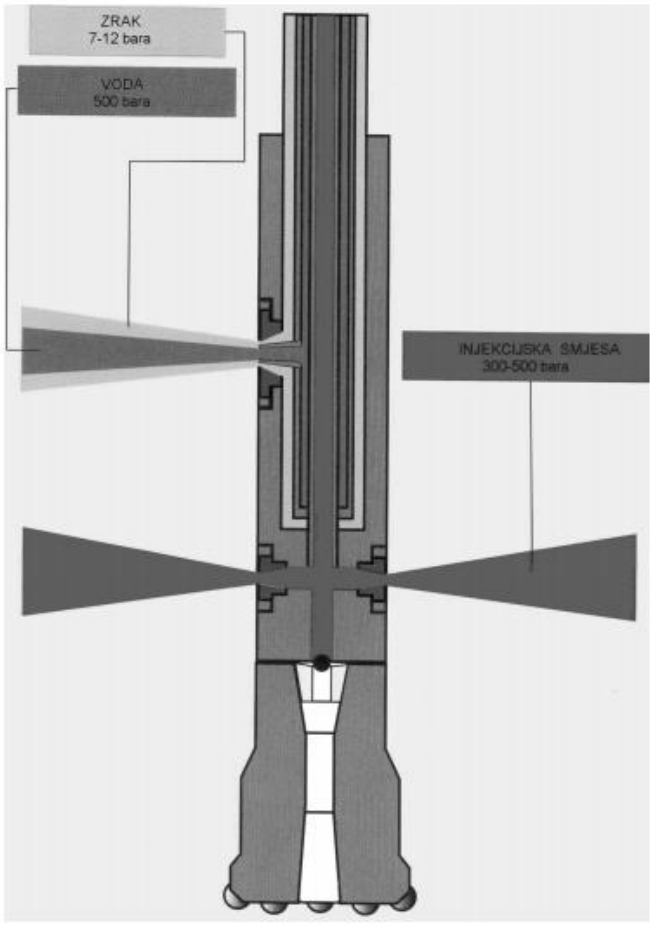
Koristeći ovaj sustav dobivaju se najveći promjeri injektiranih stupova, a razlog tome je činjenica što se posebno injektira zrak i voda, a posebno injekcijska smjesa. U glinovitim tlima promjer može biti od 50 cm do 150 cm, dok u pješčanim tlima promjer može iznositi od 50 cm do 250 cm.

Gledajući tok fluida kroz trostruke šipke, razvijene su dvije uobičajene tehnologije koje se koriste pri radu s ovim sustavom mlaznog injektiranja. Kod prve tehnologije unutarnja šipka služi za injekcijsku smjesu s nižim tlakom (10 bara do 40 bara), dok

srednja služi za vodu pod visokim tlakom, a vanjska za zrak. Druga tehnologija je malo drugačija. Unutarnja šipka služi za vodu pod visokim tlakom, kroz srednju šipku prolazi zrak, dok injekcijska smjesa ide kroz vanjsku. Na slici 2-19 nalazi se shematski prikaz postrojenja trofluidnog sustava mlaznog injektiranja, a na slici 2-20 shema toka fluida (Čorko, 1997.).



Slika 2-19 Shematski prikaz postrojenja trofluidnog sustava mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.)



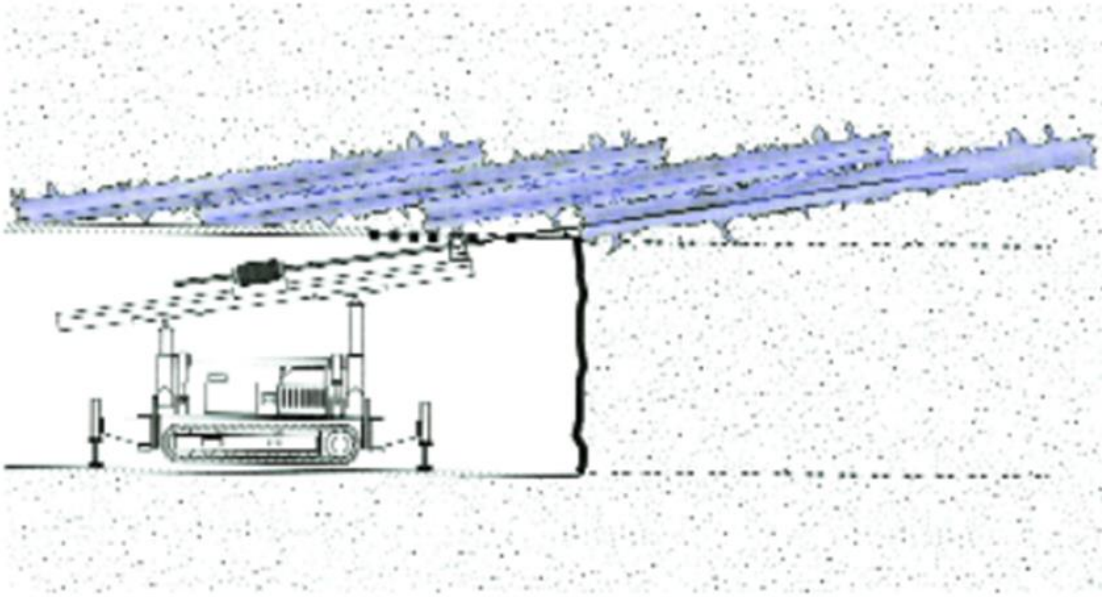
Slika 2-20 Shema toka fluida pri trofluidnom sustavu mlaznog injektiranja (Čorko, 1997.)

2.2.6. Injektiranje u stijenama

Volumen pora u stijenama značajno je manji nego u tlima stoga je teže ravnomjerno ispuniti pukotine injekcijskom smjesom u stijenama. Primjerice, u jednom kubnom metru tla volumen pora može biti i do 300 l, dok je u istoj količini stijene volumen pora uglavnom između 0,1 l i 0,4 l. Lako se može dogoditi da se injektirana smjesa širi samo glavnom većom pukotinom, dok ove sitnije pukotine ostaju prazne. To se može izbjeći na tri načina: prvi je da se naprave deblji injektirani stupovi, drugi je da se ograniči volumen injekcijske smjese, a treći način je da se ograniči tlak injektiranja. Najčešće se koristi prvi način. Ograničavanje volumena preporučuje se u situacijama kad se injektira velika količina injekcijske smjese kako bi se zapunile male pukotine, dok se ograničavanje tlaka injektiranja primjenjuje u situacijama kad postoji opasnost od hidrauličkog sloma, u slučaju da se koriste veći tlakovi.

2.2.7. Korištenje mlaznog injektiranja kao brtveni sustav

Mlazno injektiranje također se koristi kako bi se spriječio dotok vode na gradilište. Dotok vode mora biti ograničen na određenu vrijednost koja je oko 1 l do 5 l vode na 100 m tunela. Ovaj postupak brtvljenja izvodi se tako da se buše bušotine (duljine 20 m) s lica gradilišta. Zatim se u njih injektira odgovarajući cement, koji može biti pomiješan s određenim kemijskim sredstvima, pod tlakom od 50 bara do 60 bara. Ukoliko se ovaj postupak ponavlja svakih desetak metara napravi se tzv. injektirani kišobran (slika 2-21).
Ova se metoda često koristi premda se ne može predvidjeti hoće li biti uspješna. Uvijek može postojati nekoliko razloga da voda i dalje curi u iskop u nedozvoljenim količinama, a to mogu biti: povećana brzina toka vode, nekvalitetno izvedeni radovi ili erozija.



Slika 2-21 Zaštita iskopa tunela od vode horizontalnim bušotinama (Čorko, 1997.)

2.3. Zamrzavanje tla i stijena

Metoda zamrzavanja tla (slika 2-22) u tunelogradnji primjenjuje se kad se javljaju problemi s pornim tlakovima, odnosno u slučaju javljanja nestabilnih uvjeta tla. Ova metoda prvo se počela koristiti u rudarstvu. Kasnije se napretkom tehnologije počela koristiti i u tunelogradnji. Zamrzavanje tla isplati se pri velikim iskopima i dugoročnim projektima koji se rade u nestabilnim tlima/stijenama. Najveći ekonomski trošak ove metode je stvaranje zamrznute (ledene) prepreke, dok troškovi održavanja nisu preveliki.

Prilikom iskopa tunela i podzemnih prostorija ova metoda jamči sigurne, nepropusne i stabilne uvjete za rad.



Slika 2-22 Zamrznuto tlo oko čela iskopa tunela (POLONIA - METROPOLITANA VARSAVIA - LINEA II, 2019)

2.3.1. Opis metode

Zamrzavanje tla postiže se tako da se prvo izbuše vertikalne bušotine u koje se ugrađuju dvije čelične cijevi. U vertikalnu bušotinu promjera 150 mm ugrađuje se jedna cijev od 125 mm te druga (unutarnja) od 50 mm. U unutarnju cijev ubrizgava se otopina soli temperature od -20° C ili tekući dušik temperature -196° C. Ta otopina teče između

cijevi te odvodi toplinu iz slojeva tla u spremnik u kojem se nalazi zavojnica kojom teče rashladni amonijak. Taj amonijak odvlači toplinu i isparava.

Ubrizgavanje otopine može se izvesti istovremeno u više cijevi što dovodi do zaleđivanja tla oko svih cijevi (slika 2-23) stvarajući zaleđenu prepreku. Vrijeme koje je potrebno da se stvori ovakva prepreka ovisi o klimatskim uvjetima u kojima se provode radovi te o vrsti i dubini tla, no ono može potrajati čak i do šest mjeseci.

Jednom kad je tlo zamrznuto, upotrebljavaju se uobičajene metode kako bi se napredovalo u iskopu tunela (npr. TBM, miniranje...). Za miniranje u ovakvim uvjetima koriste se specijalni eksplozivi za miniranje.

Na slici 2-24 nalazi se shema postrojenja za zamrzavanje, a na slici 2-25 vidi se shema cijevi za zamrzavanje.

U tablici 2-1 prikazana su svojstva tla u kratkom periodu od sedam dana nakon smrzavanja, dok su u tablici 2-2 prikazana svojstva zamrznutog tla za duže stanje zaleđenosti od 365 dana. Jasno se vidi da su svojstva tla nešto lošija pri dugoročnom zamrzavanju, no to je i očekivano iz razloga što je kompliciranо i neekonomično održavati visoka svojstva zaleđenog tla na dulji period.

Tablica 2-1 Kratkoročna svojstva smrznutnog tla (sedam dana)

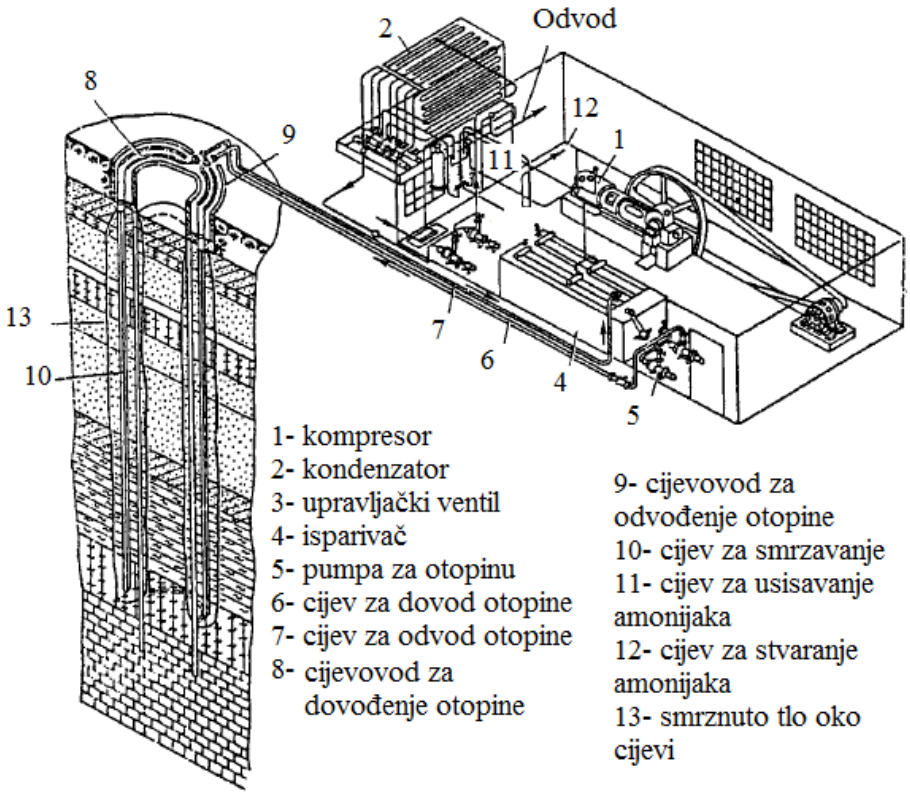
Vrsta tla	q_u(MN/m^2)	ϕ (˚)	c (MN/m^2)	Youngov modul (MN/m^2)
krupnozrnato tlo	4,3	20-25	1,5	500
sitnozrnato tlo	2,2	15-20	0,8	300

Tablica 2-2 Dugoročna svojstva smrznutnog tla (365 dana)

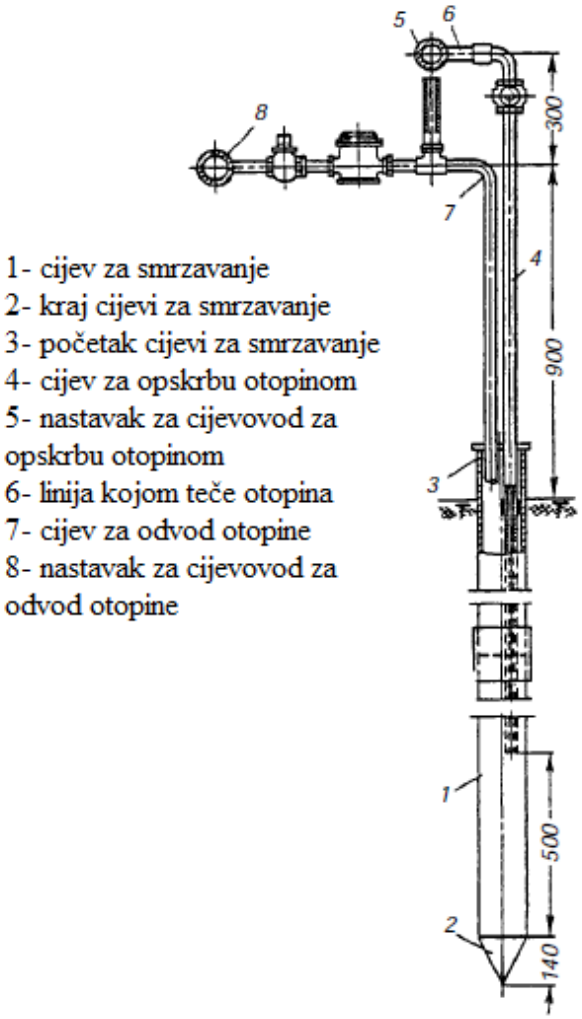
Vrsta tla	q_u(MN/m^2)	ϕ (˚)	c (MN/m^2)	Youngov modul (MN/m^2)
krupnozrnato tlo	3,6	20-25	1,2	250
sitnozrnato tlo	1,6	15-20	0,6	120



Slika 2-23 Shema zaleđivanja tla oko cijevi (Artificial ground freezing technique is used to construct substructures in soft, unstable water-bearing soils, 2019)



Slika 2-24 Shema postrojenja za zamrzavanje tla (Tatiya, 2005.)



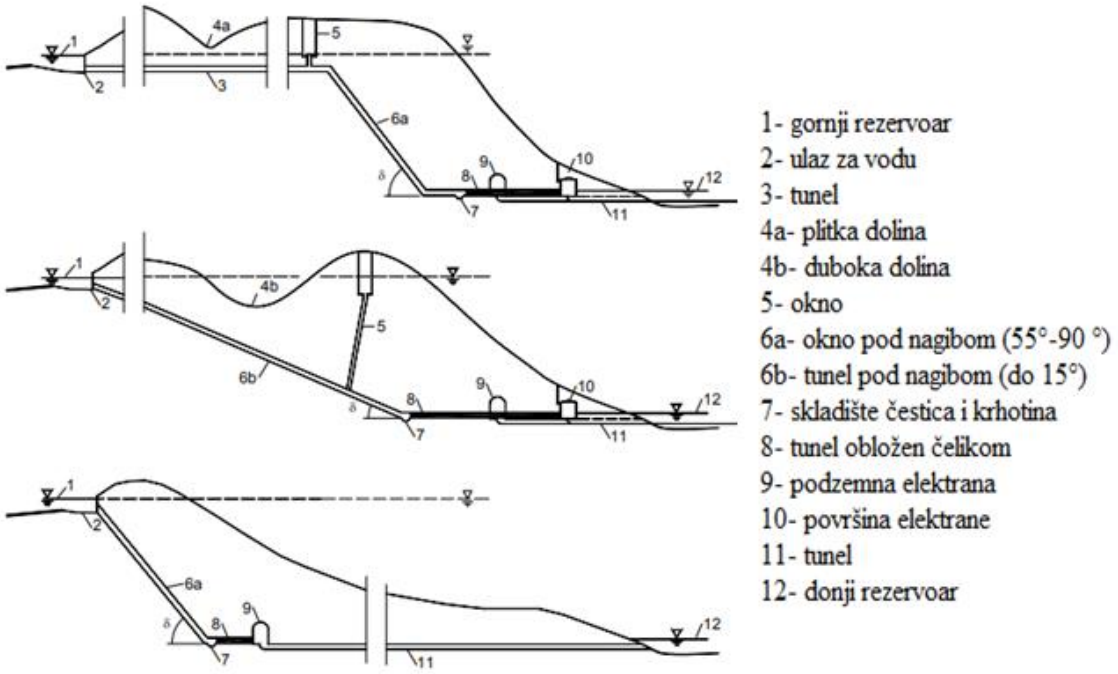
Slika 2-25 Shema cijevi za zamrzavanje tla (Tatiya, 2005.)

2.4. Iskop pod komprimiranim tlakom

Iskop tunela pod komprimiranim zrakom danas nailazi na čestu primjenu. Ovom suvremenom metodom najčešće se rade tuneli u hidroelektranama (slika 2-26). Kroz tunele teče voda koja koristi visinu brane kako bi se generirala što veća energija. Također, ti tuneli služe za ispust akumulirane vode te za prijenos pitke vode od akumuliranog jezera do naselja. Još jedna funkcija ovih tunela je odvodnja poplavnih voda u rijeke.

Ova metoda zasnovana je na principu da su i najmanja „*in situ*“ naprezanja veća od pornoga tlaka duž cijele osi tunela. Hidraulički gradijent iznad krune tunela stvara pozitivan pritisak i time osigurava dodatnu stabilnost stijenske mase.

U kvalitetnim stijenskim masivima ovakvi se tuneli rade bez betonske ili čelične obloge jer je stijenska masa dovoljno kvalitetna da bi sama izdržala opterećenja. Ispuštanje vode kroz ovakve tunele bit će sporije zbog hrapovosti podloge nastale uslijed iskopa. Dopuštena brzina tečenja vode ne bi smjela prelaziti 1 m/s.



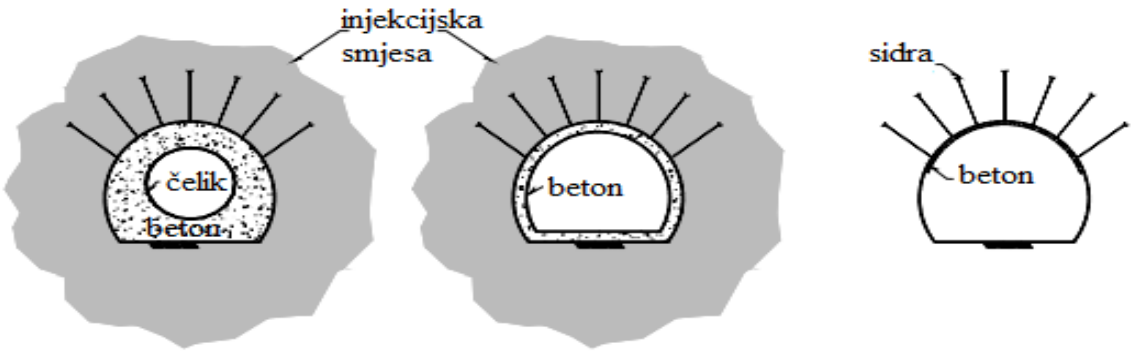
Slika 2-26 Shema tunela pod komprimiranim zrakom za hidroelektranu (Rancourt, 2010.)

Većina tunela pod komprimiranim tlakom obložena je betonskom podlogom da bi se smanjilo trenje između površine tunela i vode. Time bi se smanjila opasnost od aktiviranja opasnih klinova. Na slici 2-27 prikazane su različite vrste obloga. Uobičajeno je da se uz oblogu koriste sidra ili injekcijska smjesa.

Betonska obloga koristi se kad je stijenska masa loše kvalitete, porozna ili raspucana. Također, beton služi za poboljšanje hidrauličkih svojstava tunela, ali se ne može smatrati potpuno nepropusnom oblogom jer uvijek može doći do lošeg vezanja betona te stvaranja pukotina. Ukoliko se uz betonsku oblogu koristi čelično ojačanje, obloga se smatra polupropusna zbog kontroliranog pucanja betona. Ojačanje mora biti pažljivo izvedeno u skladu sa svojstvima elastičnosti stijenske mase i „*in-situ*“ naprezanjima kako bi se ograničilo pucanje i deformacija obloge. Ova vrsta obloge pruža polupropusnost na duže vrijeme što uvelike doprinosi smanjenju tlaka vode kroz pukotine, a posljedično dovodi do pozitivnih tlakova za stijensku masu.

Kao što je vidljivo na slici 2-27 prije postavljanja čelične obloge tunel se ojača injekcijskom smjesom da bi se popunile pore i pukotine u stijenskoj masi, a zatim betonom, na koji se stavlja čelična obloga. Umjesto čelika može se koristiti i geosintetička membrana, no to se rješenje rijetko koristi zbog kompleksnosti postupka. Obje vrste obloga nepropusne su te ih se mora pažljivo projektirati i izvoditi kako ne bi došlo do narušavanja stabilnosti.

Jedan od većih problema u tunelima pod tlakom je mjesto i duljina obloge tunela jer je ova vrsta obloge vrlo skupa, stoga je zbog ekonomskih razloga važno odrediti koji će dijelovi tunela biti obloženi, a koji će ostati bez obloge. Vrsta obloge također je bitna te se treba s posebnom pozornošću odabrati. Ukoliko su uzeti pogrešni parametri stijenske mase (poput raspodjele pornog tlaka, promjer i geometrija tunela i propusnost stijene) te se postavila neprikladna obloga, moguć je pogrešan proračun minimalnih naprezanja. Posljedično, može doći do nestabilnosti tunela, nepotrebnih troškovima za sanaciju te havarije.



Slika 2-27 Vrste obloga kod tunela pod tlakom (Rancourt, 2010.)

2.5. Čelična koplja

Čelična koplja predstavljaju metodu posebnih mjera podgrađivanja koja je neophodna za izvođenje geotehničkih radnji na iskopu tunela. Ova metoda primjenjuje se za poboljšanje svojstava stijena i tla kod kojih se pojavljuje mogućnost urušavanja ili odronjavanja materijala po završetku iskopa. Čelična koplja moguće je ugraditi lokalno ili postepeno, a to ovisi o uvjetima i sigurnosti na gradilištu. Dužina čeličnih cijevi ili šipki treba biti najmanje jedan metar dulja od predviđene dužine iskopa.

Razlikuju se dvije vrste čeličnih koplja. Prva vrsta je injektirana cijev. To su samobušive cijevi koje se ispunjavaju injekcijskom smjesom. Cijevi se sastoje od neprekidnog hladnog valjanog navoja. Koriste se čelične cijevi minimalnog vanjskog promjera od 32 mm i s otvorom za bušenje promjera od 20 mm. Injekcijska smjesa utiskuje se kroz mlaznicu neposredno nakon završetka bušenja. Razmak između cijevi mora biti prilagođen geološkim uvjetima na gradilištu.

Također, koriste se i čelične šipke koje se ugrađuju u injekcijsku smjesu. Ova vrsta čeličnih koplja izvodi se tako da se u stijenu/tlo prvo izbuše bušotine koje se zapunjavaju injekcijskom smjesom te se u nju ugrađuju čelične šipke minimalnog promjera od 26 mm. Osim čeličnih šipki, prihvatljive su i određene vrste čeličnih profila (slika 2-28) (JP CESTE FEDERACIJE BIH, 2020).

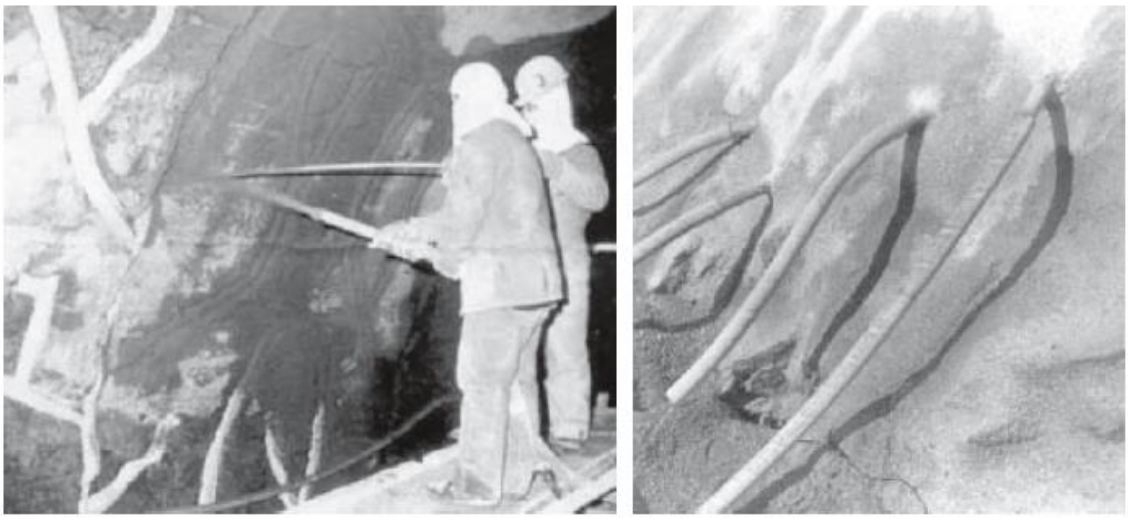


Slika 2-28 Podupiranje iskopa tunela I profilom (Smjernice za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima, 2019)

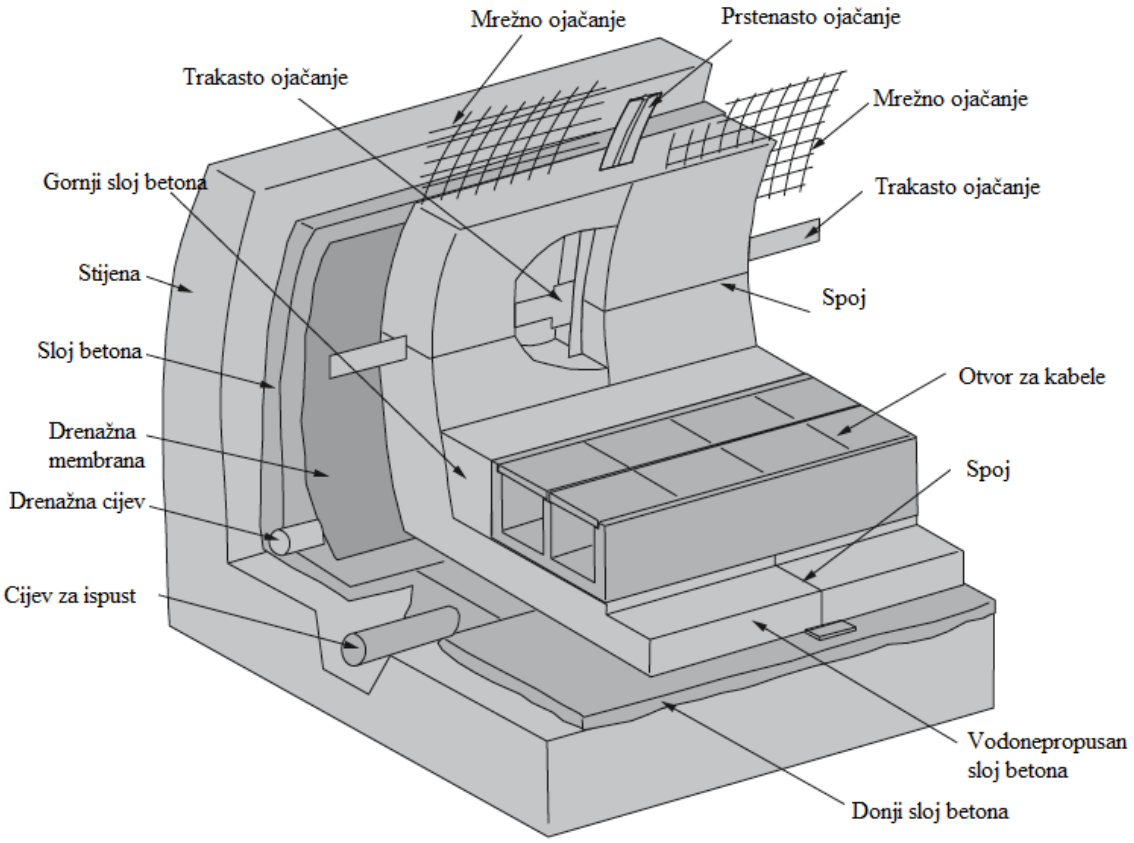
2.6. Odvodnja

Odvodnja podzemne vode iz tunela smanjuje mogućnost pojave hidrauličkog sloma te smanjuje hidrostatski pritisak na podgradu i oblogu tunela. Ta podzemna voda se preusmjerava, sakuplja te otpušta na odgovarajući način. Važno je da odvodnja vode iz tunela bude omogućena od samog početka iskopa tunela.

Podzemne vode prodiru u tunel kroz pukotine betona te kroz posebne bušotine koje su izbušene radi drenaže. Između betonske podgrade i obloge tunela postavlja se drenažni sistem (tzv. „*unutarnja*“ drenaža). Ukoliko se želi postići spora drenaža koristi se vuna, a u slučaju brze drenaže koristi se geosintetička membrana. Postoji mnogo vrsta membrana koje su napravljene tako da omogućuju stalno i neometano propuštanje vode. Veće količine vode nakupljaju se u konstrukciji tunela te ulaze u cijevi kojima se dovode do drenažnih cijevi (slika 2-29). Ovaj dio drenažnog sustava prihvaća podzemnu vodu s krune i bočnih strana tunela te ju vodi do uzdužnih drenažnih cijevi koje su postavljene uz svod tunela. Ovaj sustav „*unutarnje*“ drenaže tunela iznutra je obložen filterom da minerali tla/stijene ne bi začepili i zaustavili cijeli drenažni sustav. Na slici 2-30 prikazan je presjek drenažnog sustava za podzemnu željeznicu.



Slika 2-29 Drenažne cijevi (Kolymbas, 2008.)



Slika 2-30 Drenaža podzemne željeznice (Kolymbas, 2008.)

Poprečni otvori usmjeravaju podzemnu vodu od cijevi koje su postavljene uz svod tunela do glavnog spremnika koji je smješten ispod kolnika. Onečišćene i zagađene vode odvode se s kolnika pomoću kanala ili otvora u uzdužne cijevi. Cilj ovih kanala i otvora je odvodnja zapaljivih tekućina u slučaju nezgoda. Te zagađene vode privremeno se skladište u rezervoarima izvan tunela te se tretiraju nakon određenog vremena. U slučaju čišćenja, do uzdužnih cijevi ispod kolnika dolazi se do pomoću šahtova. Čišćenje se izvodi ispiranjem pomoću vode pod visokim tlakom (od 150 bara) te pri protoku od 500 litara po minuti.

Važno je osigurati da u drenažnom sustavu ne dođe do začepljenja. Do začepljenja najčešće dolazi zbog taloženja sitnih čestica tla/stijene. Također, kalcij u otopljenoj podzemnoj vodi može se taložiti zbog njegovih kemijskih reakcija na promjenu tlaka, temperature ili pH vrijednosti. Da ne bi došlo do taloženja kalcija, osim redovnog čišćenja, treba spriječiti kontakt osjetljivih mineralnih čestica s zrakom te koristiti određene kemijske preparate. Također, određene vrste kiselina sprječavaju taloženje karbonata. Ti preparati dodavaju se u cijevi u tekućem obliku ili se stavljaju u drenažni sustav u krutom

obliku. Održavanje drenažnog sustava u tunelima je skupo te često zaustavlja promet tunelom.

Drenaža utječe na prvotni podvodni sustav te može imati ozbiljan utjecaj na okoliš, primjerice može doći do slijeganja, izvori mogu presušiti i dr. Budući da odvodnja može imati velike posljedice u prirodi, treba djelovati preventivno da posljedice budu što blaže. U tu svrhu moraju se provoditi kemijske i bakterijske kontrole izvora.

3. ZAKLJUČAK

Širenjem te nastajanjem novih urbanih zona dolazi do potražnje novih rješenja za smještaj potrebne infrastrukture. Sve je češće rješenje odlazak u podzemlje te gradnja raznih vrsta potrebitih građevina. Danas u urbanim sredinama, ali i kod svladavanja terenskih prepreka u prometu, sve češće se koriste tuneli odnosno tunelogradnja. Često je iskop tunela u slaboj stijenskoj masi odnosno u stijenskoj masi s lošim fizičko-mehaničkim svojstvima.

Povijesno gledajući, razvojem tunelogradnje, došlo je do razvoja raznih tehnika i tehnologija za poboljšanje svojstva stijena i tla u svrhu nosivosti primarne podgrade.

Sve metode navedene u radu imaju svoje određene prednosti, no sve su financijski veoma zahtjevne. Ukoliko uvjeti u stijeni odnosno tlu to zahtijevaju, mogu se koristiti i kombinirano.

Metoda cijevnih kišobrana primjenjuje se: kod iskopa tunela u slaboj stijeni/tlu s malim nadslojem, pri iskopu tunela u urbanim sredinama (ispod temelja postojećih građevina), pri iskopu tunela kroz rasjedne zone te pri osiguranju tunelskih portala. M

Metoda mlaznog injektiranja primjenjuje se u situacijama koje zahtijevaju kontrolu podzemnih voda, odnosno u situacijama u kojima se želi spriječiti pojava podzemne vode u iskopanom tlu te pri iskopu tunela kroz rahlo nevezano tlo.

Metoda zamrzavanja koristi se: kad su prisutni problemi i nestabilnosti uzrokovani visokim pornim tlakovima, u urbanim sredinama gdje nije pogodno snižavanje razine podzemne vode te za osiguranje vodonepropusnosti prilikom iskopa.

Iskop tunela pod komprimiranim zrakom najčešće se izvodi kod hidroelektrana te za izgradnju tunela za odvodnju vode.

Čelična koplja koriste se za poboljšanje svojstava stijena i tla kod kojih se pojavljuje mogućnost urušavanja ili odronjavanja materijala po završetku iskopa.

Bitno je napomenuti da je prije bilo kakvih zahvata potrebno obaviti detaljna istraživanja kako bi utvrdili karakteristike stijene/tla i naposlijetku odabrali najkvalitetnije i najpovoljnije rješenje.

4. LITERATURA

AKAGI H., AFSHANI A., 2015. Artificial ground freezing application in shield tunneling

BRADY B.H.G., BROWN E.T., 2004. Rock Mechanics for underground mining. Third edition.

CORCE P., RUSSO G., MODONI G. 2004. Grouting Performance in Tunnelling.

ČORKO D., KOVAČIĆ D., LOVRENČIĆ D., MARIĆ B. 1997. Prikaz tehnologije i primjene mlaznog injektiranja.

DEPARTMENT OF THE ARMY. 1997. Engineeringand Design, Tunnels and shafts in rock.

ELSEVIER GEO-ENGINEERING BOOK SERIES VOLUME 5. 2006. Tunnelling in Weak Rocks.

JP CESTE FEDERACIJE BIH. 2020. Smjernice za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima. Knjiga II: GRAĐENJE. Dio 2: POSEBNI TEHNIČKI USLOVI. URL: https://www.jpdcfbh.ba/bs/poslovanje/legislativa/smjernice (15.12.2019.)

KOLYMBAS D. 2008. Tunneling and Tunnel Mechanics.

TATIYA R.R., 2005. Surfaceand Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment.

URL:https://www.nbmcw.com/tech-articles/metro-tunneling/40767-tunneling-rock-support-geotechnical-solutions-by-mipl-robit.html, Tunneling, Rock Support & Geotechnical Solutions by MIPL & ROBIT (13.12.2019.)

URL: http://www.cipaspa.it/ita/mobile/realizzazioni.asp?ds_sub=119&scheda=82&incorso=0, POLONIA - METROPOLITANA VARSAVIA - LINEA II (14.12.2019)

URL: https://www.bkdelta.by/en/technologies/artificial-ground-freezing, Artificial ground freezing technique is used to construct substructures in soft, unstable water-bearing soils, (14.12.2019)

VOLKMANN G., SCHUBERT W. 2006. Contribution to the design of tunnels with pipe roof support.

VOLKMANN G., SCHUBERT W. 2007. Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling.

VOLKMANN G., SCHUBERT W. 2008. Tender document specifications for pipe umbrella installation methods.