

# Zaštita duboke građevinske jame u urbanoj sredini korištenjem stupnjaka od mlazno injektiranog tla

---

Hanc, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:895324>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**PETAR HANC**

**ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME U URBANOJ SREDINI**  
**KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG**  
**TLA**

**DIPLOMSKI RAD**

**VARAŽDIN, 2020.**

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za \_\_\_\_\_ u \_\_\_\_\_ sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, \_\_\_\_\_

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Igor Petronić

### Članovi povjerenstva

- 1) izr. prof. dr. sc. Kreso Ivanović
- 2) prof. dr. sc. Stjepan Strelac
- 3) izr. prof. dr. sc. Boris Kaurer

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME U URBANOJ SREDINI  
KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA

KANDIDAT:

PETAR HANC

*Hanc Petar*

MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. KREŠO IVANDIĆ

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: PETAR HANC  
Matični broj: 232 - 2018./2019.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME U URBANOJ SREDINI KORIŠTENJEM  
STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Građevinske jame  
3. Mlazno injektiranje tla  
4. Mlazno injektirani stupnjaci  
5. Zaštita duboke građevinske jame poslovne građevine - dilatacija „I“  
u Varaždinu korištenjem stupnjaka od mlazno injektiranog tla  
6. Zaključak  
7. Popis literature  
8. Popis slika  
9. Popis tablica

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 10.03.2020.


Rok predaje: 07.09.2020.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME U URBANOJ SREDINI KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom

**Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 01.09.2020.

Petar Hanc

(Ime i prezime)

*Petar Hanc*

(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

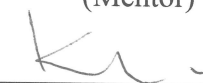
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### **ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME U URBANOJ SREDINI KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 01.09.2020.

Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić  
(Mentor)



\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

**Sažetak rada:** Građevinske jame izvode se u svrhu obavljanja građevinskih radova na temeljenju budućeg objekta ili izvođenju objekata ispod površine tla. Prema potrebnoj dubini izvođenja radova postoje plitke i duboke građevinske jame. Prilikom iskopa građevinske jame, prvenstveno kod dubokih jama izvodi se zaštita građevinske jame različitim metodama zaštite i tehnologijama izvođenja konstrukcija. U radu se prikazuje zaštita duboke građevinske jame pomoću stupnjaka korištenjem mlazno injektiranog tla. Obraduje se pojam građevinske jame te opći prikaz vrste konstrukcija koje se koriste u svrhu zaštite građevinskih jama. Tehnologija mlaznog injektiranja tla detaljnije je opisana prikazom mogućih postupaka izvođenja, preklapanje stupnjaka tvoreći vertikalnu zavjesu, kontrola i monitoring radova, prednosti i nedostaci mlaznog injektiranja. Primjer projekta izvedbe zaštite građevinske jame korištenjem stupnjaka je izvedba poslovne građevine dilatacije „I“. Projekt je poslužio u svrhu prikaza izvođenja tehnologije mlaznog injektiranja u uvjetima visoke razine podzemne vode i neposredne blizine okolnih građevina s prikazom problematike tijekom izvedbe radova na gradilištu.

**Ključne riječi:** građevinska jama, stupnjaci, mlazno injektiranje tla

**Abstract:** Construction pits are dug for the purpose of performing construction works based on the future establishment or the performance of objects below soil surface. According to the required depth of performing works, there are shallow and deep construction pits. When excavating construction pits, primarily deep pits, their protection is provided by using various protection methods and construction technologies. This paper shows the protection of a deep construction pit through columns using a jet grouting technology. The concept of a pit construction and the general view of the type of the constructions used for the purpose of the protection of construction pits are presented in the paper. The jet grouting technology is described in more detail by displaying possible methods of performance, overlapping of columns forming vertical curtain, control and monitoring of the works, advantages and disadvantages of jet grouting. An example of a construction project to protect the construction pit using columns is the construction of a business building dilatation “I”. The project was used for the purpose of presenting export jet grouting technologies in conditions of high groundwater levels and the immediate vicinity of surrounding buildings with the presentation of problems during the executions of the works on the construction site.

**Keywords:** construction pit, columns, jet grouting technology



## **SADRŽAJ:**

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRAĐEVINSKE JAME</b> .....	<b>2</b>
2.1	Zaštita građevinskih jama .....	3
2.2	Zbijeni čelični profili (talpe).....	4
2.3	Armirano – betonske dijafragme .....	6
2.4	Čavvano tlo .....	8
2.5	Zaštita berlinskim zidom .....	9
2.6	Injektiranje tla .....	10
2.6.1	Klakaža (hidrofrakturiranje).....	11
2.6.2	Kompakcijsko injektiranje .....	12
2.6.3	Penetracijsko injektiranje .....	13
<b>3</b>	<b>MLAZNO INJEKTIRANJE TLA</b> .....	<b>11</b>
3.1	Općenito o mlaznom injektiranju .....	11
3.2	Povijest mlaznog injektiranja.....	12
3.3	Postupci mlaznog injektiranja.....	13
3.3.1	Jednofluidni sustav .....	14
3.3.2	Dvofluidni sustav .....	16
3.3.3	Trofluidni sustav .....	17
3.4	Preklapanje stupnjaka .....	18
3.5	Monitoring i kontrola.....	21
3.5.1	Kontrola injektiranja .....	21
3.5.2	Kontrola rezultata.....	22
3.5.3	Praćenje utjecaja na okoliš .....	22
3.5.4	Utjecaj na okolne konstrukcije.....	22
3.6	Prednosti i nedostaci mlaznog injektiranja .....	23
<b>4</b>	<b>MLAZNO INJEKTIRANI STUPNJACI</b> .....	<b>24</b>
4.1	Dubina i promjer stupnjaka.....	24
4.2	Armatura u stupnjacima.....	24
4.3	Injekcijska smjesa .....	25
<b>5</b>	<b>ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME POSLOVNE GRAĐEVINE - DILATACIJA „I“ U VARAŽDINU KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA</b> .....	<b>27</b>
5.1	Predmetna lokacija.....	27
5.2	Sastav i karakteristike tla .....	28
5.3	Izvođenje stupnjaka za zaštitu građevinske jame .....	30
5.3.1	Mlazno injektiranje .....	32

5.3.2	Injekcijska smjesa .....	33
5.4	Izvedba geotehničkih sidara.....	34
5.5	Monitoring i praćenje radova.....	36
5.6	Problematika tijekom izvođenja radova .....	36
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>POPIS LITERATURE.....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>41</b>

# 1 UVOD

Izrada građevinskih objekata i konstrukcija vrši se na čvrstim i stabilnim temeljima koji imaju funkciju prijenosa opterećenja sila konstrukcija na temeljno tlo. Potrebno temeljenje konstrukcija većih objekata često se izvodi u dubljim dijelovima tla, što zbog potrebe da se temelji na čvrstim stijenama i tlu ili zbog izvođenja podzemnih etaža. Takav postupak izvođenja radova iziskuje potrebu za izradom građevinskih jama. Zbog ograničenog prostora izvođenja radova u urbanim sredinama gradova i naselja, potrebno je osigurati stabilnost pokosa građevinskih jama na siguran način u cilju mogućih radova unutar jama i sprječavanju urušavanja ili oštećenja temelja i konstrukcija okolnih objekata.

Zavisno prema potrebnoj dubini izvođenja građevinske jame (plitkih ili dubokih) ovisit će odabir tipa zaštitnog sustava pokosa građevinske jame. Uz najekonomičniji odabir uzimaju se u obzir i drugi faktori koji utječu na mogući tip zaštite (vrsta i sastav tla, razina podzemne vode, blizina okolnih građevina...) te da li će sustav zaštite činiti sklop buduće građevine ili ima privremenu svrhu osiguravanja pokosa tijekom izvođenja radova.

Od dostupnih različitih vrsta konstrukcija u svrhu zaštite građevinske jame, ovaj diplomski rad se bazira na postupku izvođenja zaštite duboke građevinske jame korištenjem stupnjaka od mlaznog injektiranja. Metoda mlaznog injektiranja spada u relativno nove metode izvođenja u svrhu stabilizacije pokosa i poboljšanja mehaničkih svojstava tla, a ujedno zbog svojih prednosti u odnosu na druge metode jedna je od metoda koja se najčešće primjenjuje. Moguće je korištenje ove tehnologije u urbanim sredinama skučenih prostora, do velikih dubina uz minimalno opterećenje koje se vrši na okolne objekte i konstrukcije. Ovisno o projektnom zadatku primijenit će se jedan od triju mogućih postupaka mlaznog injektiranja (jednofluidni, dvofluidni i trofluidni sustav). Najčešći produkti mlaznog injektiranja u svrhu zaštite građevinske jame su stupnjaci određenog promjera koji se izvode u nizu tvoreći vodonepropusni zid po obodu građevinske jame.

## 2 GRAĐEVINSKE JAME

Građevinska jama obuhvaća prostor u dubinskom dijelu iskopanog tla gdje se naknadno vrši temeljenje buduće građevine kao što je prikazano na slici 1. Neovisno o dubini građevinske jame ona mora osiguravati i zadovoljavati određene uvjete koji se odnose na sigurnost rada ljudi unutar jame te osigurati mogućnost korištenja odgovarajućih strojeva. Sastav tla, prisutnost podzemnih i površinskih voda te vrsta i oblik građevine odlučuju projekt građevinske jame. Prilikom pojave određenih rizika i veći broj nepovoljnih uvjeta potrebno je izvesti zaštitu građevinske jame s ciljem stabiliziranja i osiguranja vertikalnih zidova tla ili pokosa građevinskih jama. Zaštita građevinskih jama sprječava pojavu većih deformacija vertikalnih zidova tla ili urušavanje tla u građevinsku jamu. Potrebni postupci u svrhu rješavanja zaštite građevinske jame prvenstveno ovise o sastavu i karakteristikama geomedija na području zahvata, razini podzemnih voda i geometriji iskopa [1].



*Slika 1. Građevinska jama [2]*

Građevinske jame poznate su, te se koristile još od davnih vremena. Izgradnjom objekata i konstrukcija koje su s vremenom postojale sve kompleksnije i složenije javlja se potreba za većim dubinama temeljenja, a samim time i dubljim građevinskim jamama u svrhu mogućeg temeljenja. Stoga, za potporne konstrukcije građevinskih jama može se reći kako su nastale u počecima građevinske nauke. Za stabilnost građevinskih jama najčešće se koriste drveni, betonski i čelični materijali [1].

## 2.1 Zaštita građevinskih jama

Razvojem suvremene tehnologije izvedbe i složenosti građevine uvjetuju da pojedini dijelovi građevinskih jama ili cijela građevinska jama tvore trajni dio nastalog objekta ili konstrukcije gdje je građevna jama osiguravala stabilnost zidova jama tokom gradnje. U tablici 1 prikazana je sistematizacija uvjeta radova te načini izvođenja građevinskih jama koju je dao Nonveiller (1979.). On navodi kako je nemoguće dati prikaz svih mogućih metoda izvedbe građevne jame već da tablica predstavlja podsjetnik na neke mogućnosti izvođenja građevinskih jama [2].

Tablica 1. Uvjeti rada i načini izrade građevinskih jama (Nonveiller, 1979.)

POLOŽAJ VODE	VRSTA TLA	UVJETI RADA		NAČIN ODVODNJE
		NEOGRANIČENI	OGRANIČENI	
Razina vode ispod temeljne plohe	Koherentno	Iskop bez ograničenja	Uspravne stijenske iskopa	Crpljenje kišnice iz jama
	Bilo koje	Iskop s privremeno stabilnim pokosom ( $F_s=1,2$ )	Podupore*	Crpljenje kišnice iz jama
Plitko ispod površine tla	Koherentno i šljunak	Iskop s privremeno stabilnim pokosom uz moguće strujanje niz kosinu	Podupore*	Crpljenje kišnice i procjedne vode iz jama
	Pijesak	Iskop s privremeno stabilnim pokosom ( $F_s=1,2$ )	Podupore*	Crpljenje iz bunara u ili oko jame

			Podupore* koje sprječava hidraulički slom tla	Crpljenje iz jame
			Podupore* uz iskop pod vodom	
			Smrzavanje	
Iznad površine tla	Tlo bez samaca	Zagati, otoci, bunari, kesoni	Plivajući sanduci, bunari, kesoni, zagati s ispunom	Iz jame između zagata
	Tlo sa samcima i stijenama	Zagati, plivajući sanduci	Čelijasti zagati	Iz jame između zagata

\* mogućnost korištenja bilo koje podgrade ili zagatne stijene

Danas se u praksi koristi velik broj različitih vrsta konstrukcija u svrhu zaštite građevne jame, a najčešće se primjenjuju:

- zbijeni čelični profili (talpe)
- armirano – betonske dijafragme
- čavvano tlo
- zaštita berlinskim zidom
- injektiranje tla

## 2.2 Zbijeni čelični profili (talpe)

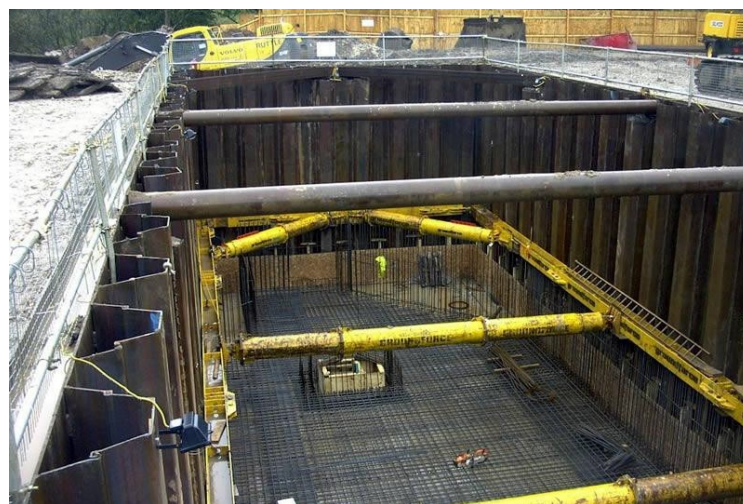
Čelični profili predstavljaju zagatni jednostruki zid od pojedinačno spojenih elemenata tako da tvore brtveni spoj. Sastoji se od talpa relativno tankih debljina, i određenih duljina od različitih vrsta materijala. Talpe se prije iskopa građevinske jame zabijaju u tlo pomoću strojeva za nabijanje neposredno jedna pored druge tako da čine određenu ravninu zida građevinske jame. Osnovna namjena čeličnih profila je zaštita građevinske jame od mogućeg urušavanja tla, s time da preuzima pritisak djelovanja okolnog tla i podzemne vode. Koriste se kod relativno plitkih i jednostavnih jama, a nakon upotrebe se vadi i koristi u više navrata. Čelični profili se mogu izraditi od

drvenih, čeličnih (Slika 2.) i armirano betonskih materijala, međutim, najviše su u upotrebi čelični profili zbog svoje trajnosti.



*Slika 2. Čelične talpe [10]*

Čelični profili čine više čeličnih komada međusobno spojenih spojnicama, debljine stijenke do 10 milimetara, s mogućnošću odabira različitih vrsta i oblika. Koriste se u svim vrstama tla osim u tlima gdje ima krupnijih komada kamena. Mogućnost korištenja čeličnih profila je do dubina od 20 metara. Ovisno o opterećenju kojeg vrši okolno tlo na talpe, moguće je prema potrebi razupiranje talpa razuporama ili sidrenje u okolno tlo. Zbog svoje trajnosti i jednostavnosti upotrebe, čelične talpe su našle veliku primjenu u zaštiti građevnih jama. Slika 3 prikazuje zaštitu građevinske jame korištenjem čeličnih profila uz podupiranje na visini kote terena i u dubini, neposredno iznad visine radnog prostora [3].



*Slika 3. Čelični profili kao zaštita građevinske jame [11]*

### 2.3 Armirano – betonske dijafragme

Armirano betonska dijafragma (Slika 4.) je vertikalni zid koji se izvodi u geomediju neposredno prije iskopa građevinske jame nakon čega se iskopava građevinska jama, a dijafragma se osigurava sidrenjem u tlo. Koristi se kod dubokih građevinskih jama (na dubine veće od 30 metara) s ciljem osiguranja bočnih strana jame od mogućeg urušavanja tla i ulaska podzemne vode u radni prostor jame. Djelovanje aktivnog tlaka okolnog tla i mogućeg hidrostatskog tlaka osnovne su sile koje djeluju na armirano betonsku dijafragmu koja se mora uspješno oduprijeti djelovanju tih sila [3]. Faze izrade armirano betonske dijafragme sastoje se od iskopa, ugradnje armaturnih koševa i ugradnje mase ispune.



*Slika 4. Armirano betonska dijafragma*

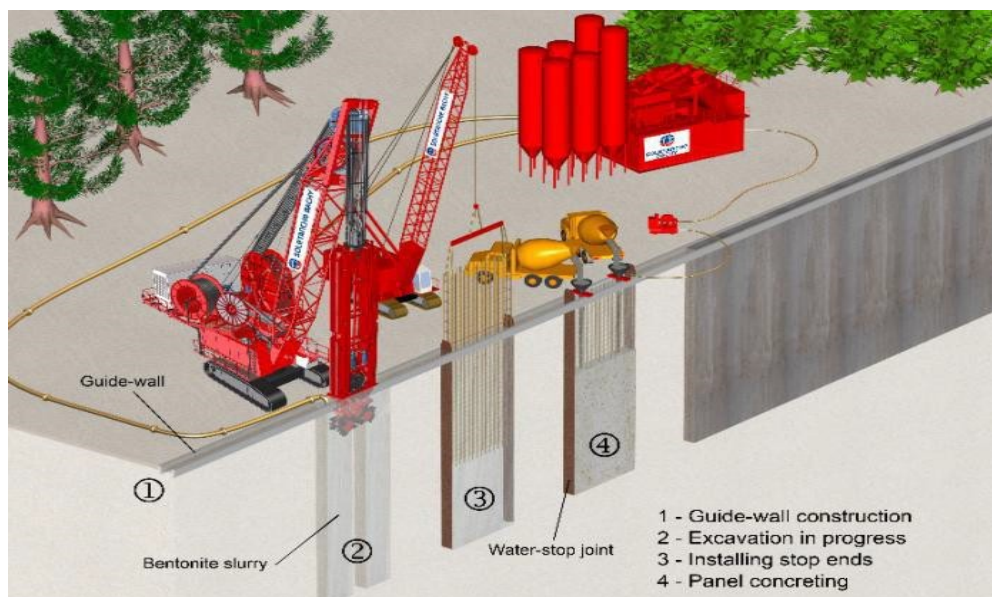
Prvo se vrši iskop neparanog broja kampadi po projektiranoj liniji. Strojevi koji se koriste za iskop kampada su takozvane grabilice. Ovisno prema zadanim zahtjevima dijafragme, debljina grabilica kreće se od 0,5 pa do 1,2 m, a puni zagriz kojeg može izvršiti grabilica kreće se od 2 do 2,5 m. Utiskivanjem otvorene grabilice u tlo kreće



postupak iskopa te se nakon toga izvlači na površinu i utovaruje na prijevozno sredstvo. Nakon iskopa neparanog broja kampada, na rubove iskopa ugrađuju se cijevi koje se nakon postupka betoniranja izvlače te tvore šupljine potrebne za iskop parnog dijela kampada. Minimalno su potrebna dva iskopa neparanih kampada nakon čega se vrši betoniranje ispune, a zatim se može vršiti iskop kampada između njih [3].

U iskopani prostor često se ugrađuju armaturni koševi izrađeni od čeličnih šipki. Armatura u dijafragmama se najčešće izvodi kada se javljaju sile momenata savijanja i kod građevina kod kojih će dijafragma biti sastavni dio njene konstrukcije. Armaturni koševi ugrađuju se pomoću dizalica.

Ispuna kampada dijafragme vrši se pomoću kontaktor postupka. Lijevak koji se nalazi na vrhu cijevi, ispušta se do dubine dna iskopa te se ugrađuje po principu stožastog razlijevanja. Cijev kontaktora prilikom ugradnje mase mora biti kontinuirano u masi ispune sve dok se ne završi postupak ugradnje mase. Betoniranje se provodi i ponavlja dok se ne ispune sve kampade dijafragme. Međusobno spojeni elementi čine neprekinutu dijafragmu [3]. Postupci izrade prikazani su na slici 5.

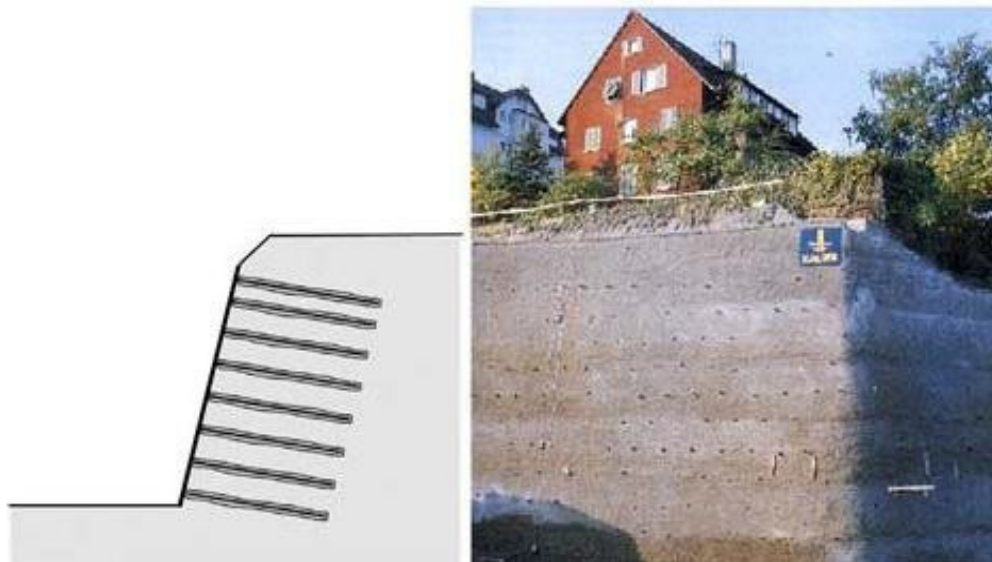


Slika 5. Postupci izrade armirano betonske dijafragme [11]

## 2.4 Čavlando tlo

Čavlando tlo je sustav ugrađenih pasivnih sidara okomito ili pod određenim kutom u odnosu na lice zida građevinske jame. Raspored ugrađenih sidara je u gustom rasteru površine pokosa s ciljem manjeg opterećenja samih sidara kako bi se otklonila mogućnost otkazivanja pojedinog elementa. Slika 6 prikazuje lice i presjek čavlanog tla sa ugrađenim sidrima.

Nakon iskopa građevinske jame do dubine 1 – 2 m, u lice vertikalnog zida ugrađuju se šipke postupkom zbijanja, bušenja i injektiranja ili pneumatskim nabijanjem. Šipke od metalnih materijala moraju zadovoljavati stupanj zaštite od korozije koja se javlja unutar tla. Strminski dijelovi pokosa oblažu se mlaznim betonom ili betonskim panelima dok se kod blažih kutova pokosa koriste geomreže. Navedeni postupak izrade čavlanog tla provodi se do projektirane dubine građevinske jame. Ovisno prema potrebi izmjeni projekta ili pojave neželjenih deformacija konstrukcije uslijed djelovanja opterećenja tla, relativno lako je moguće naknadno ugrađivati dodatne sidrene šipke [2].



*Slika 6. Lice i presjek čavlanog tla [10]*

## 2.5 Zaštita berlinskim zidom

Berlinski zid je sustav koji se sastoji od stupova, odnosno pilota od čeličnog materijala ili armirano betonskih zbijenih ili u tlu izvedenih pilota, te platica koje se polažu između dva pilota (Slika 7.). Djelovanje opterećenja pritiska tla preuzimaju platice te prenose opterećenja na ugrađene pilote u tlu. Stoga, za manje dubine građevinskih jama nije potrebno izvesti razupiranje. Ovaj sustav podgrađivanja tla veliku primjenu pronašao je u izgradnji podzemne željeznice u Berlinu. Berlinski zid se najčešće koristi kod nekoherentnih šljunčanih i pjeskovitih tla kako bi se izbjegla pojava djelovanja hidrostatskog tlaka i u uvjetima gdje je razina podzemne vode ispod projektirane dubine građevinske jame [2].



*Slika 7. Zaštita berlinskim zidom od drvenih platica [2]*

## 2.6 Injektiranje tla

Proces injektiranja odnosi se na postupak ubrizgavanja tekuće mase u prostorno stanje geomedija koje se neposredno buši prije injektiranja pri kontroliranim uvjetima ugradnje. Injekcijska masa skrutnjavanjem unutar geomedija bitno mijenja svojstva i karakteristike injektiranog tla.

Postupak injektiranja sastoji se od tri glavne faze:

1. Izrada injekcijske bušotine
2. Odabir i priprema injekcijske mase
3. Ugradnja injekcijske smjese

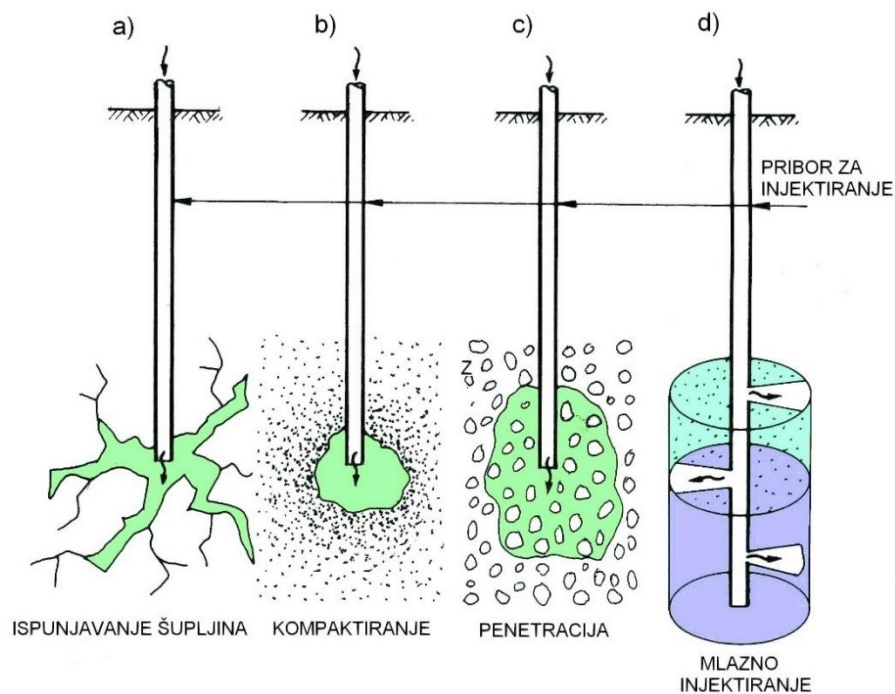
Postupkom injektiranja tla može se postići:

- povećanje čvrstoće i nosivosti temeljnog tla
- osiguravanje stabilnosti tla lica građevinske jame
- smanjiti propusnost vode, stvaranje barijere prodoru vode
- očvršćivanje zatega i sidra za prednapinjanje
- ispunjavanje šupljih prirodnih prostora i prostora između građevine i tla
- podupiranje građevina i infrastrukture

Postupak izvođenja injektiranja i odabira tehnike prvenstveno ovisi o karakteristikama, svojstvima i sastavu tla. Prije postupka izrade projekta injektiranja potrebni su geotehnički istražni radovi za određivanje geološkog sastava i određivanje razine podzemne vode na lokaciji zahvata. Kako bi se odabrala što kompetentnija i ekonomično isplativija tehnika injektiranja potrebno je definirati svrhu, namjenu i cilj injektiranja (smanjenje vodopropusnosti, povećanje mehaničkih svojstava tla...)

Danas postupci injektiranja tla imaju široku primjenu u različitim građevinskim, geotehničkim i drugim djelatnostima. Ovisno prema potrebi koriste se četiri glavne tehnike injektiranja tla prikazano na slici 8:

- a) Klakaža (hidrofrakturiranje)
- b) Kompakcijsko injektiranje
- c) Penetracijsko injektiranje
- d) Mlazno injektiranje



Slika 8. Tehnike injektiranja tla (Welshetal, 1986.)

### 2.6.1 Klakaža (hidrofrakturiranje)

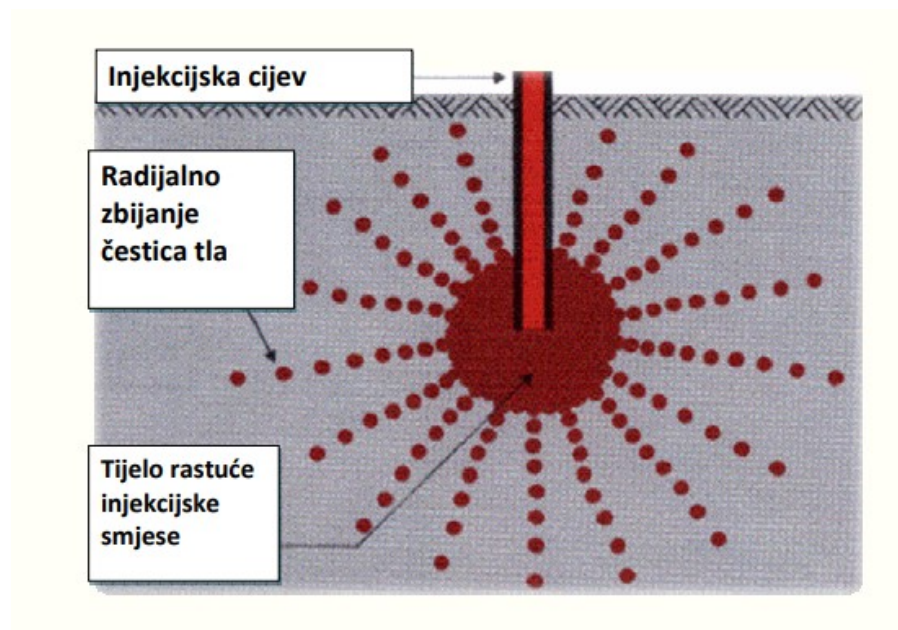
Postupak gdje se zbog djelovanja velikih tlakova injekcije ili vode razara postojeće stanje geomedija u smjeru najmanjeg otpora te se popunjava injekcijskom smjesom. Krajnji produkt hidrofrakturiranja je mreža pukotina ispunjena očvrslom masom koja u

tretiranom tlu čini armaturu te tako poboljšava svojstva geomedija. Ova metoda se najčešće koristi u sitnozrnatim tlima s malom propusnošću [4].

### 2.6.2 Kompakcijsko injektiranje

Svrha kompakcijskog injektiranja je ubrizgavanje injekcijskih krutih, viskoznih masa ili mortova (Slika 9.). Kod ugradnje paste dolazi do vlastite ekspanzije injekcijskog tijela, te se tlo razmiče i zbija radi povećanja čvrstoće, krutosti i nosivosti tla. Tehnika kompakcijskog injektiranja ima primjenu u različitim vrstama tla, međutim, najveću učinkovitost ima kod nekoherentnih, rahlih, aluvijalnih tala.

Primjenjiva je za povećanje svojstva nosivog tla na većim dubinama s ciljem sprječavanja pojave slijeganja te u prostorima s ograničenim lukom izvođenja radova [4].

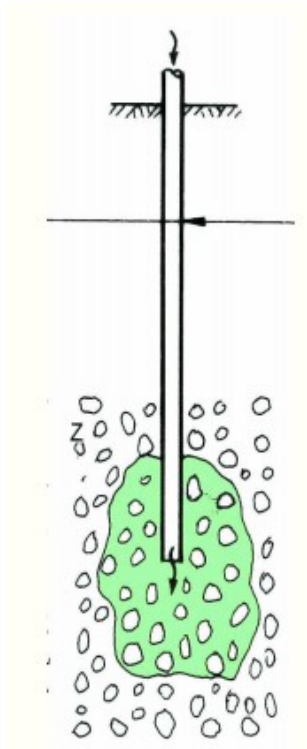


Slika 9. Kompakcijsko injektiranje [12]

### 2.6.3 Penetracijsko injektiranje

Ovaj postupak odnosi se na tehniku popunjavanja prostornih šupljina unutar geomedija injekcijskom smjesom bez narušavanja postojeće strukture geomedija. Kvaliteta injektiranja ovisi o propusnosti tla i masi za ugradnju koja je najčešće na bazi cementne smjese, niske viskoznosti i male veličine cementnih čestica. Koristi se u nekoherentnim, krupnozrnatim tlima, pijescima i šljuncima.

Osnovna namjena ove tehnike je smanjenje vodopropusnosti tla i povećanje nosivosti i čvrstoće geomedija. Često se koristi za stabiliziranje tla ispod postojećih građevina ili temelja te okolnog tla bez narušavanja stabilnosti i stvaranja oštećenja okolnih konstrukcija [4]. Slika 10 prikazuje širenje injekcijske mase u krupnozrnatom tlu postupkom penetracijskog injektiranja.



Slika 10. Penetracijsko injektiranje [8]

### 3 MLAZNO INJEKTIRANJE TLA

#### 3.1 Općenito o mlaznom injektiranju

Mlazno injektiranje tla (engl. „Jet Grouting“) predstavlja jednu vrstu injekcijskih metoda koja je danas prepoznata kao najčešće korištena tehnologija poboljšanja mehaničkih svojstava tla, za stabiliziranje dubokih građevinskih jama i drugih postupaka u geotehnici diljem svijeta. Tehnologija se predstavlja kao relativno nova metoda injektiranja [4].

Ova tehnika predstavlja injektiranje mase u tlo pri relativno visokim tlačnim silama upumpavanja fluida (tlakovi se kreću u rasponu od 200 – 700 bara) s brzinom utiskivanja fluida od približno 250 – 330 m/s prilikom čega dolazi do narušavanja i razbijanja postojeće strukture tla, čestice tla se miješaju s injekcijskom smjesom i tvore kompaktnu homogeniziranu masu poboljšanih svojstava tla. Produkt mlaznog injektiranja su stupnjaci kao što su prikazani na slici 11, koje je moguće izvoditi u tri smjera: horizontalno, vertikalno i pod određenim kutom velikih dubina [5].



*Slika 11. Stupnjaci nastali postupkom mlaznog injektiranja [6]*



Metoda izvedbe mlaznog injektiranja izvodi se kao „in-situ“ metoda, odnosno izvodi se direktno u tlu na projektnoj lokaciji korištenjem sofisticirane tehnologije i strojeva za izvođenja radova. Na slici 12 prikazano je mlazno injektiranje tla.



*Slika 12. Mlazno injektiranje tla*

### **3.2 Povijest mlaznog injektiranja**

Prva pojava gdje se struktura tla razbijala djelovanjem vode pod tlakom primijenjena je u američkim ugljenokopima. Početkom sedamdesetih godina 20-tog stoljeća ideju primjene ove tehnologije u svrhu ojačanja i poboljšanja tla postavila su braća Yamakado (približno 1965. godine) u Japanu, a ubrzo nakon toga postavljena su dva tipa postrojenja za mlazno injektiranja tla, 1970-te godine [8].

Prvi tip mlaznog injektiranja pod nazivom „CCP“ (engl. Chemical Churning Pile) ili injektiranje pomoću jednog fluida, razvio je Nakanishi koristeći suspenziju na bazi cementa za injektiranje u visokim tlakovima kroz mlaznice smještene na dnu bušućeg pribora. Postupak injektiranja vršio je od dna prema vrhu bušotine uz kontinuiranu rotaciju pribora gdje je produkt nastanka valjkasto tijelo od mješavine cementa i razorenih čestica tla [8].

Drugi tip mlaznog injektiranja, „JG“ (engl. Jet Grouting) ili injektiranje pomoću tri fluida, razvio je Teruo Yahiro koristeći trostruke bušće šipke. Svaka šipka služila je za

pojedini fluid (zrak, voda i cementna masa), gdje se pomoću komprimiranog zraka i vode razbijala postojeća struktura geomedija, a cementna smjesa se utiskivala u već razbijeno tlo bušotine s potrebnim manjim tlakovima u odnosu na CCP (10 – 40 bara). U početku korištenja ove tehnologije nije se vršila rotacija pribora te su se formirali paneli. Naknadno je Yahiro modificirao model trofluidnog mlaznog injektiranja u sustav „CJG“ (engl. Column Jet Grount) gdje se koristi trofluidni sustav s rotacijom bušućeg pribora pri čemu nastaju valjkasta tijela unutar tla [8].

Bitna modifikacija mlaznog injektiranja na navedena dva tipa modela je sustav „JSG“ (engl. Jumbo Special Grout) koji se bazira na sustav CCP gdje se osim cementne mase koristi i zrak za stvaranje valjkastih tijela unutar tla. Uvođenjem zraka moguće je dobiti veći promjer stupnjaka u odnosu na CCP i to za 1 do 2 puta pri istim uvjetima rada [8].

Korištenje mlaznog injektiranja izvan Japana počelo je 1976. godine na području Italije, Zapadne Njemačke i Južne Amerike. Daljnji razvoj metoda mlaznog injektiranja nastavlja se i danas, međutim, sve su to glavne varijacije na gore navedene metode [8].

### **3.3 Postupci mlaznog injektiranja**

Razvojem tehnologije mlaznog injektiranja nastala su tri osnovna postupka mlaznog injektiranja ovisno o broju fluida koji se koristi:

1. Jednofluidni sustav
2. Dvofluidni sustav
3. Trofluidni sustav

Ovisno o sustavu koji se koristi za mlazno injektiranje, svaki ima specifične parametre izvedbe mlaznog injektiranja koji su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz odnosa parametara izvedbe za sva tri sustava mlaznog injektiranja

Parametri izvedbe		Broj fluida		
		Jedan fluid	Dva fluida	Tri fluida
Tlak injektiranja [bar]	voda	–	–	300–550
	injekcijska smjesa	300–550	300–550	10–40
	zrak	–	7–17	7–17
Protok	voda [l/min]	–	–	70–100
	inj. smj. [l/min]	60–150	100–150	150–250
	zrak [m <sup>3</sup> /min]	–	1–3	1–3
Promjer mlaznica [mm]	voda	–	–	1,8–2,6
	injekcijska smjesa	1,8–3,0	2,4–3,4	3,5–6,0
Broj mlaznica [kom]	voda	–	–	1–2
	injekcijska smjesa	2–6	1–2	1
W/C		0,8:1 do 2:1		
Sadržaj cementa	[kg/m <sup>3</sup> ]	200–500	300–1000	500–2000
	[kg/m <sup>3</sup> ]	400–1000	150–550	150–650
Brzina rotacije šipki [okr/min]		10–30	10–30	3–8
Brzina podizanja šipki [min/m]		3–8	3–10	10–25
Promjer injek. valjka [m]	krupnozrnato tlo	0,50–1,00	1,00–2,00	1,50–3,00
	sitnozrnato tlo	0,40–0,80	1,00–1,50	1,00–2,00
Čvrstoća valjka [N/mm <sup>2</sup> ]	pjeskovito tlo	10–30	7,5–15	10–20
	glinovito tlo	1,5–10	1,5–5,0	1,5–7,5

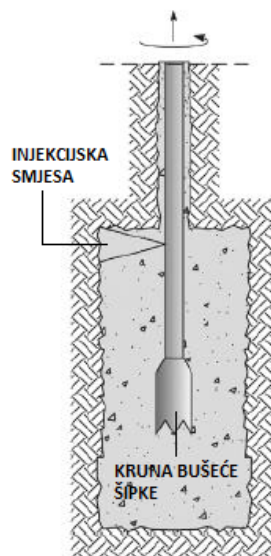
### 3.3.1 Jednofluidni sustav

Sustav mlaznog injektiranja kod kojeg se koristi baza jednog fluida čini najjednostavniju, najkorišteniju i ekonomski najisplativiju metodu mlaznog injektiranja. Osnovni fluid koji se koristi kod ovog sustava je pripremljena cementna smjesa koja se pod tlačnim pritiskom injektira okomito na stijenke bušotine, razara čestice tla i stvara stupnjake od izmiješane mase čestice tla i cementne smjese. Prilikom injektiranja višak cementne smjese izlazi iz bušotine, međutim, kod jednofluidnog sustava prodiranje smjese na površinu bušotine je najmanje izražena. Prilikom injektiranja, višak fluida nema lako prohodni prostor kako bi izlazio na površinu bušotine pa može doći do pomicanja i izdizanja tla na površini terena [6]. Na postupak jednofluidnog injektiranja postoji šest bitnih parametara koji utječu na kvalitetu injektiranja tla:

- Injektirani tlak
- Vodocementni faktor
- Količina mlaznica
- Promjer mlaznice
- Brzina podizanja pribora
- Brzina i trajanje rotacije mlaznice

Produkt jednofluidnog injektiranja su valjkasti stupnjaci koji se u koherentnim tlima kreću u promjeru od 40 – 60 cm, dok se u nekoherentnim tlima kreću u rasponu od 50 – 120 cm. Uspoređujući promjere stupnjaka s dvofluidnim i trofluidnim sustavima, promjeri jednofluidnog stupnjaka predstavljaju najmanji mogući dobiveni promjer stupnjaka. Dimenzije stupnjaka izražene su ovisno o tlaku upumpavanja injekcijske mase i protoku same mase.

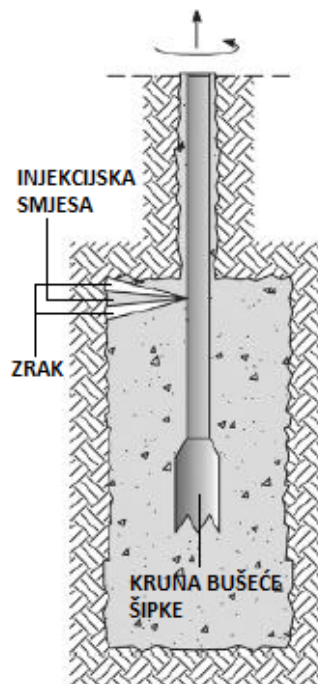
Postupak bušenja prvi je korak u mlaznom injektiranju koje se može vršiti pomoću rotacijskog, rotacijsko – udarnog ili korištenjem sustava rotacijskog bušenja i ispiranja tla. Sam pribor bušenja ima u središtu rupu, promjera od 90 – 110 milimetara s debljinom stijenki oko 10 milimetara. Bitno ulogu u postupku injektiranja ima visokotlačna pumpa koja mora osiguravati dotok smjese od 60 – 220 l/min, uz tlak mlaza od 300 – 500 bara. Prilikom završetka bušenja i dostizanja željene dubine, dovodi se injekcijska smjesa na dno bušotine uz upumpavanje preko visokotlačne pumpe i započinje postupak injektiranja. Pribor za injektiranje se polagano podiže prema vrhu bušotine uz stalno rotaciju kako bi se izvelo kontinuirano ubrizgavanje injekcijske mase. Željeni promjer stupnjaka postiže se vremenskim zadržavanjem pribora na nekom pravcu injektiranja. Nedostatak jednofluidnog sustava je injektiranje cementne smjese u tlu gdje ima podzemne vode, jer se erozija tla smanjuje zbog opadanja tlačnog pritiska injekcijske mase u vodi. Rezultat su manji promjeri injektiranih stupnjaka [6]. Slika 13 prikazuje sustav jednofluidnog mlaznog injektiranja.



Slika 13. Jednofluidni sustav injektiranja [5]

### 3.3.2 Dvofluidni sustav

Dvofluidni sustav mlaznog injektiranja koristi dva fluida, injekcijsku smjesu i zrak ili vodu, za razaranje strukture tla i injektiranje mase (Slika 14.). Zrak ili voda koja se pod pritiskom izbacuje iz mlaznice, obavija mlaz injekcijske smjese s funkcijom razaranja strukture geomedija unutar bušotine tla dok injekcijska smjesa služi za popunjavanje slobodnog prostora bušotine tvoreći stupnjake. Ova metoda injektiranja je unaprijeđeni i učinkovitiji sustav jednofluidnog mlaznog injektiranja jer omogućuje razaranje čestica tla pomoću vode tvoreći stupnjake većih promjera [6].



Slika 14. Dvofluidni sustav injektiranja [5]

Zrak ili voda koji se pod velikim tlačnim pritiscima izbacuju okomito na stijenke bušotine, dovode do razaranja strukture tla i u odnosu na jednofluidni sustav mogu tvoriti 2 – 2.5 puta veće promjere stupnjaka.

Jedan od čimbenika koji utječe na mogućnost većeg promjera stupnjaka je taj što stlačeni zrak razorene čestice tla lakše ispire na površinu bušotine stvarajući slobodan prostor injekcijskoj masi.

Na postupak dvofluidnog injektiranja postoji nekoliko bitnih parametara koji utječu na kvalitetu injektiranja tla. Uz navedene faktore jednofluidnog sustava, dodatni parametar je tlačni pritisak zraka/vode i njihov protok.

Uspoređujući radni pribor dva sustava injektiranja, dvofluidni sustava složenije je građe gdje se mlaznica injektora sastoji od unutarnje te vanjske šipke. Kroz prostor unutarnje šipke upumpava se injekcijska smjesa, a vanjska šipka služi za prolaz zraka ili vode. Prostor vanjske šipke mora biti prolazan i osiguravati nesmetan prolaz zraku ili vode jer u slučaju začepljenja dolazi do ponašanja sustava injektiranja kao i kod jednofluidnog. Prilikom bušenja, prostor mlaznice je osiguran i zabrtven gumenom oblogom kako bi se spriječilo začepljenje mlaznice. Nakon završetka bušenja gumena brtva se otvara i omogućuje nesmetan prolaz zraku ili vode [6].

Bitni nedostatak u odnosu na jednofluidni sustav javlja se prilikom upumpavanja zraka gdje se u tlu nakupi više prostora zračnom masom te se smanjuje kvaliteta injektiranja u odnosu na druge sustave i javlja se veći povrat injekcijske mase na površinu bušotine, a samim time potrebna je i veća količina cementne smjese.

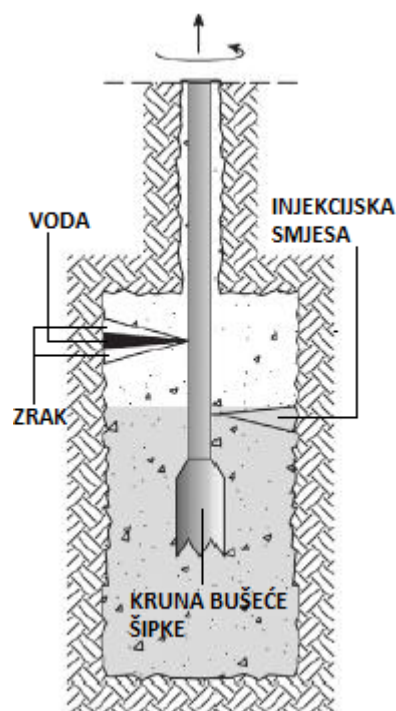
### 3.3.3 Trofluidni sustav

Kao što se kod dvofluidnog sustava injektiranja koriste dva fluida, ovaj sustav bazira se na sustavu tri fluida: injekcijska masa, voda i zrak. Zrak obavija mlaz vode i zajedno djeluju okomito na stijenke bušotine, razaraju strukturu tla i oslobađaju čestice tla koje se miješaju sa injekcijskom masom injektirane u slobodni prostor bušotine, kako je prikazano na slici 15. Velik dio razorenih čestica tla istiskuje se na površinu bušotine djelovanjem zraka i vode te se stvara prostor za slobodno injektiranje injekcijske smjese [6].

Zasebno injektiranje zraka i vode te injekcijske smjese, omogućuje se dobivanje najvećih promjera mlaznih stupnjaka koji se kreću u promjerima od 50 – 150 cm za koherentna tla, dok se u koherentnom tlu mogu postići nešto veći promjeri stupnjaka, od 50 – 250 cm.

Pribor za injektiranje sastoji se od trostruke šipke razvijene u dvije varijante. Prva varijanta je gdje se na priboru kroz glavnu unutarnju šipku injektira injekcijska masa pri nižim tlakovima (10 – 40 bara), srednja šipka je namijenjena injektiranju vode pri visokim tlakovima, a vanjska se koristi za zrak. Druga varijanta je gdje se kroz unutarnju šipku injektira mlaz vode, srednjom šipkom polazi zrak, a vanjskom šipkom se injektira pripremljena smjesa [6].

Od sva tri navedena postupka injektiranja, trofluidni sustav ima najučinkovitiju metodu mlaznog injektiranja, međutim, bitni nedostatak je složenost postupka injektiranja i potrebne opreme te financijski troškovi.

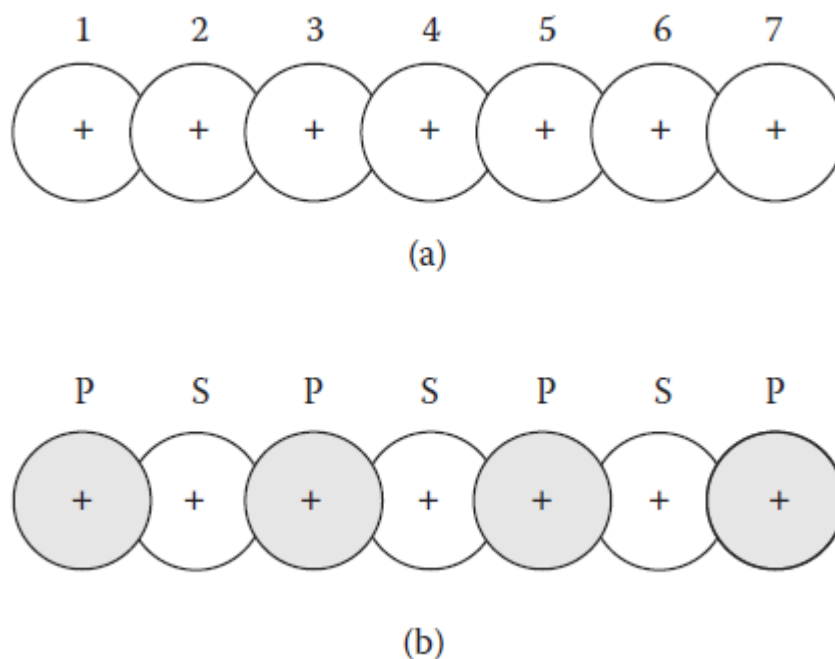


Slika 15. Trofluidni sustav injektiranja [5]

### 3.4 Preklapanje stupnjaka

Primjena mlazno injektiranja tla temeljena je na stvaranju različitih oblika elemenata mlaznog injektiranja s ciljem dobivanja stupnjaka koji se međusobno preklapaju. Kod zaštite građevinskih jama, preklapanje stupnjaka je neophodno kako bi se spriječilo urušavanje tla ili smanjio prodor podzemnih voda u građevinsku jamu. Koriste se dvije alternativne proizvodne sekvence, tzv. „sveže u svježem“ i „svježe u tvrdom“ [5].

U postupku izvođenja niza „svježe u svježem“ susjedni stupovi izvode se u kratkom vremenskom periodu, bez da se čeka stvrdnjavanje injekcijske mase prethodno izvedenog stupnjaka. Ovim se postupkom može prethodno stvoreni stup erodirati te injektirati novom injekcijskom smjesom tvoreći stalni cementirani volumen ili nepropusni mlazno injektirani zid s međusobno preklapanjem stupnjaka. Posebna pažnja pridodaje se u fazi bušenja kako bi se izbjeglo pranje prethodno stvorenih još uvijek svježih stupnjaka [5]. Kao što je prikazano na slici 16. a) stupnjaci se izvode u nizu, jedan do drugoga prema projektno zadanom pravcu izvođenja.



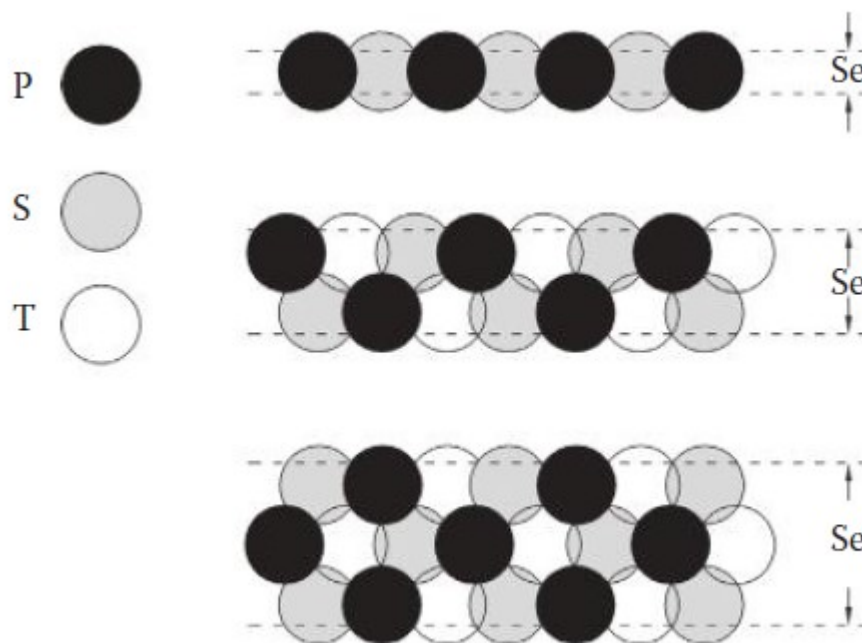
Slika 16. Niz „svježe u svježem“ (a) i niz „svježe u tvrdom“ (b)

(primarni [P] i sekundarni [S] stupnjaci) [5]

Niz „svježe u tvrdom“ koji se još naziva „primarno – sekundarni niz“ (Slika 18.) izvodi se tako da se prvo injektiraju neparni ili primarni stupnjaci, a zatim se injektiraju parni ili sekundarni između dva već očvrsla primarna stupnjaka (Slika 16. b).

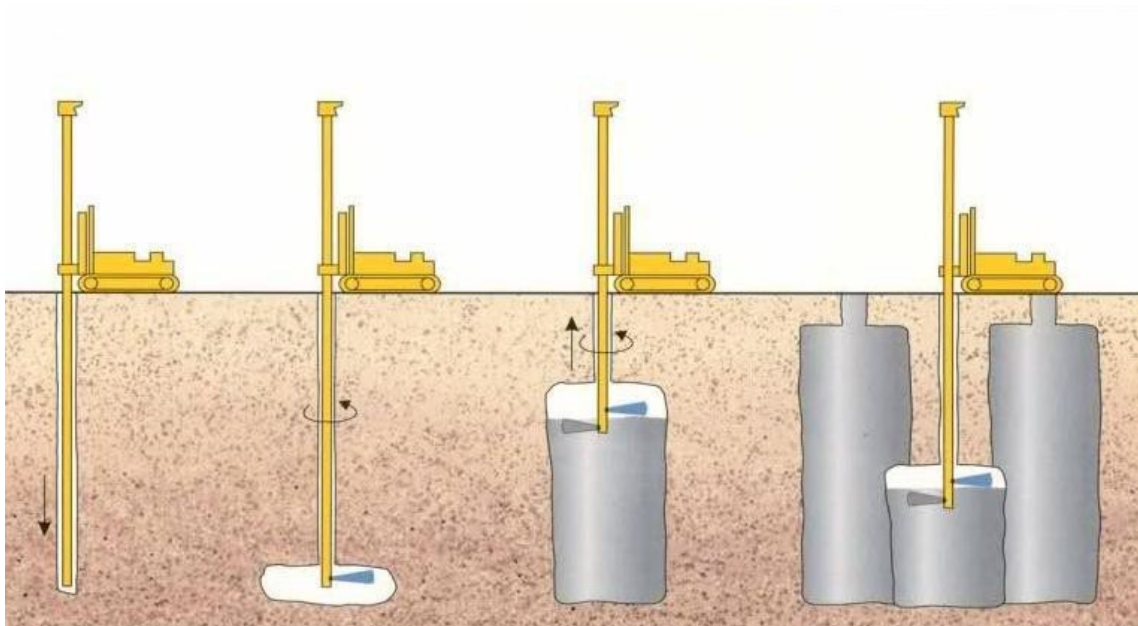


Korištenjem ovog niza iziskuje izradu detaljnog plana obrade s primarnim i sekundarnim setovima stupnjaka, a ponekad je potrebno i korištenje tercijalnih setova (Slika 17.). Potrebno ih je pravilno specificirati ovisno o vrsti strukture koju je potrebno formirati. Ovaj niz izvođenja mlaznog injektiranja stupnjaka je najpopularniji i najviše se koristi, međutim javlja se problem „efekta stijene“ zato što primarni stupnjaci koji su već očvrsnuli ne dopuštaju da se erodiraju prilikom izvođenja sekundarnih stupnjaka što ima za posljedicu manje dimenzije stupnjaka i problem preklapanja istih [5].



*Slika 17. Primjer sveukupnog niza preklopnih stupova*

*(primarni [P], sekundarni [S] i tercijalni [T] stupnjaci) [5]*



*Slika 18. Postupak izvođenja primarno – sekundarnog niza [11]*

### **3.5 Monitoring i kontrola**

Mlazno injektiranje smatra se jednim od najprimjerenijih tehnika injektiranja jer učinkovito ovisi o različitim radnim parametrima. Stoga je kontrola kvalitete radova mlaznog injektiranja veoma važna za osiguravanje učinkovite i kvalitetne izvedbe injektiranja. Kontrola se provodi na području različitih parametara, provjera rezultata i učinaka mlaznog injektiranja [7].

#### **3.5.1 Kontrola injektiranja**

Kontrolom radnih parametara tijekom injektiranja kao što su tlačni mlazovi, protok injekcije, brzina dizanja i zakretanja mlaznica, presudna je za kvalitetu konačnog rezultata, npr. ako dođe do pojave blokade povratka injekcijske mase, brzim odgovorom spriječit će se neželjeno izdizanje površine tla.

Pravilna kontrola rezultirat će dobivanjem zadane dimenzije stupnjaka i ravnomjerno razastiranje injekcijske mase u bušotini. Podaci o tlaku injektiranja i potrošnji injekcijske mase veoma su važni za dobivanje povratnih informacija. Kod automatiziranih sustava injektiranja podaci se skupljaju elektroničkim putem u

stvarnom vremenu. Ako sustav nije automatiziran, kontrolu vrši operater periodičnim ručnim pregledom instrumenata i stanja injektiranja [7].

Kada se javlja sustav stupnjaka koji se međusobno preklapaju za stvaranje kontinuirane masivne konstrukcije, vrlo je važan precizan položaj prethodno izbušenih bušotina, a prvenstveno ako su promjeri stupnjaka veoma mali [7].

### 3.5.2 Kontrola rezultata

Kod kontrole rezultata bitna je provjera da li se kontinuirani stupnjaci međusobno preklapaju prema projektno navedenim zahtjevima. Kako bi se procijenile dimenzije i cjelovitost formiranja stupnjaka koriste se različiti geodetske i geofizičke metode. Provjera kvalitete cementne smjese i jezgre mlaznih stupnjaka uzimaju se ispitni uzorci tj. provodi se uzorkovanje postojećih stupnjaka u svrhu laboratorijskih ispitivanja kako bi se ocijenila kvaliteta konstrukcije mlaznog injektiranja [7].

### 3.5.3 Praćenje utjecaja na okoliš

Mlazno injektiranje provodi se u tlu, stoga ovisno o području injektiranja potrebno je pratiti utjecaj injekcijske smjese na okoliš. Postavljanjem piezometara, promatračkih bušotina može se uočiti širenje injekcijske smjese i intervenirati te ukloniti mogućnost štetnog utjecaja na okoliš [7].

### 3.5.4 Utjecaj na okolne konstrukcije

Prilikom provedbe mlaznog injektiranja u području urbane sredine i neposrednoj prisutnosti susjednih temelja i konstrukcija, provodi se snimka trenutnog stanja postojećih susjednih građevina prije postupka injektiranja te se provodi nadzor utjecaja mlaznog injektiranja kako bi se spriječilo narušavanje mehaničke otpornosti i stabilnosti okolnih objekata [7].

### **3.6 Prednosti i nedostaci mlaznog injektiranja**

Glavna prednost mlaznog injektiranja je mogućnost korištenja ove metode za poboljšanje mehaničkih svojstava koherentnih i nekoherentnih tala, s zanemarenim štetnim utjecajem na okoliš korištenjem vodo – cementne injekcijske smjese. Ova metoda injektiranja koristi se za izradu stupnjaka u tri smjera u odnosu na površinu terena (horizontalno, vertikalno i koso) s mogućnošću dosezanja velikih dubina zahvata (najdublja zabilježena dubina je 70 m.). Potrebni pribor za mlazno injektiranje je malih dimenzija, stoga prepreke koje se javljaju u tlu mogu se zaobići ili ukloniti (npr. veći komadi kamena, drveta ...) [8].

Glavni nedostatak mlaznog injektiranja javlja se prilikom sprječavanja toka injekcijske mase iz bušotine. Porastom purnog tlaka vode do tlaka injekcijske smjese može se javiti hidraulički slom tla što za posljedicu ima izdizanje površine injektiranog prostora. Ako je tok injekcijske mase prema površini terena velik, dolazi do istiskivanja razorenih čestica tla i cementne smjese na površinu bušotine. Gubitci koji se javljaju prilikom izlaska mogu biti i do 60 %. Uz navedene nedostatke bitnu ulogu ima i cijena radova mlaznog injektiranja, prvenstveno kod izrade stupnjaka većih dimenzija gdje cijena radova može biti vrlo visoka. U području injektiranja gdje su brzine podzemnih voda vrlo visoke javlja se mogućnost ispiranja cementnih čestica što utječe na kvalitetu mlaznog injektiranja [8].

## **4 MLAZNO INJEKTIRANI STUPNJACI**

Prilikom projektiranja stupnjaka od mlaznog injektiranja u svrhu zaštite duboke građevinske jame potrebno je prikupiti relevantne podatke o sastavu i svojstvima tla projektiranog područja. Potrebni parametri tla dobivaju se geotehničkim postupcima bušenja uz dobivanje uzoraka, te se prikupljeni uzorci dostavljaju u akreditirane laboratorije s svrhom dobivanja potrebnih geomehaničkih parametara tla za proračun djelovanja tla na projektiranu zaštitu građevinske jame. Uz parametre tla bitni faktor kod proračuna mehaničke otpornosti i stabilnosti stupnjaka je razina podzemne vode. Ova dva navedena faktora utječu na daljnji tijek projektiranja stupnjaka, odnosno određivanje dubine i promjera stupnjaka, količinu potrebne armature, odabir cementne injekcijske smjese s kemijskim dodacima, potrebno preklapanje stupnjaka, odabir vrste mlaznog injektiranja itd.

### **4.1 Dubina i promjer stupnjaka**

Zavisno prema potrebnoj dubini građevinske jame, potrebno je projektirati dubinu i promjer stupnjaka u svrhu zaštite građevinske jame. Djelovanje pritiska tla na stupnjake od mlaznog injektiranja koji tvore zaštitni sustav određuje se potrebni promjer stupnjaka u svrhu stabilnosti kosina građevinske jame. Promjer stupnjaka određuje metodu koja će se koristiti za mlazno injektiranje (jednofluidni, dvofluidni ili trofluidni sustav), a ujedno određuje potrebnu dubinu ukopavanja stupnjaka ispod radne kote terena. Kada je dubina izvođenja ograničena, a stabilnost stupnjaka narušena, moguće je sidrenje stupnjaka u okolno tlo.

### **4.2 Armatura u stupnjacima**

Stupnjaci od mlaznog injektiranja i kombinacija stupnjaka koji tvore zaštitni zid u građevinskoj jami mogu se ojačati ugradnjom ili umetanjem čeličnih armaturnih šipki ili armaturnih koševa kako bi se ojačala čvrstoća stupnjaka na savijanje, prvenstveno gornjeg dijela stupnjaka, odnosno glave stupnjaka. Ugradnja armature moguća je

izravno u svježe izrađeni stupnjak ili nakon djelomičnog ili potpunog stvrdnjavanja injekcijske mase postupkom bušenja rupe te fugiranja rupe nakon ugradnje armature. Ugradnja armature u svježi stupnjak predstavlja problem pri većim dubinama stoga se često koristi metoda bušenja i fugiranja za veće dubine stupnjaka, ali čini cjelokupni proizvodni proces složeniji i ekonomski iziskuje veće troškove izrade. U oba slučaja potrebno je pridodati posebnu pažnju prilikom ugradnje armature kako bi se pojačanje postavilo u željenom položaju [5].

### 4.3 Injekcijska smjesa

Injekcijska smjesa se sastoji od mješavine vode i cementa koja se dozira prema omjerima težine (W/C), a kreće se između 0.6 i 1.3. ovisno prema vrsti projekta odabire se najprikladniji omjer vode i cementa, uzimajući u obzir da se povećanjem omjera W/C povećava učinkovitost erozije injekcijske smjese te smanjuje kvaliteta mlaznog injektiranja.

Općenito, nema posebnih uvjeta za odabir vrste cementa iako se njegove karakteristike moraju odabrati uzimajući u obzir uvjete na lokaciji, a u nekim slučajevima može biti korisno odabrati posebne vrste cementa. U nekim slučajevima mlaznog injektiranja koriste se aditivi za poboljšanje karakteristika injekcijske smjese. Najrašireniji aditiv je bentonit koji se dodaju u obliku suspenzije kako bi se smanjila vodopropusnost same cementne smjese. Jedan od aditiva koji se koristi je kalcijev klorid koji se koristi u svrhu ubrzavanja otvrdnuća injekcijske smjese u uvjetima mogućeg ispiranja podzemnom vodom [5]. Tijekom postupka injektiranja, dio injekcijske smjese i erodiranog tla izlazi će na površinu bušotine kroz prstenasti otvor koji se formira između pribora za injektiranje i stijenki bušotine. Smjesa koja izlazi iz bušotine bi u načelu trebalo svesti na najmanju moguću mjeru zbog troškova izvođenja i postupka uklanjanja i zbrinjavanja u okviru svih restriktivnijih pravila o okolišu. Međutim, umjereni iznos smjese koja izlazi iz bušotine neophodna je kako bi tretman bio učinkovit jer izlazni tok pokazuje da nema začepjenja između bušećeg pribora i stijenki bušotine. U slučaju ako nema slobodnog prostora, odnosno injekcijska smjesa

nema slobodan prolaz na površinu bušotine, tlak u prostoru injektiranja može narasti do razine koja će izazvati izdizanje površine radnog prostora i dovesti do oštećenja obližnjih postojećih konstrukcija [5].

## **5 ZAŠTITA DUBOKE GRAĐEVINSKE JAME POSLOVNE GRAĐEVINE - DILATACIJA „I“ U VARAŽDINU KORIŠTENJEM STUPNJAKA OD MLAZNO INJEKTIRANOG TLA**

### **5.1 Predmetna lokacija**

Za izgradnju objekta poslovne građevine dilatacije „I“ vršila se privremena zaštita duboke građevinske jame korištenjem stupnjaka od mlazno injektiranog tla. Predmetna lokacija nalazi se u gradu Varaždinu, na križanju Zagrebačke i Supilove ulice. Izgradnja objekta obuhvaća dvije podzemne etaže uz potrebnu dubinu iskopa od 8.50 m.

Postupak izvođenja privremene zaštitne konstrukcije građevinske jame vršio se tehnologijom mlaznog injektiranja s vertikalnom potpornom konstrukcijom te podupiranjem istih korištenjem geotehničkih sidara. Na dnu građevne jame izvodili su se mlazno injektirani elementi kako bi se osigurao radni prostor jame od prodora podzemne vode. Kako je izvođenje građevinskih radova ograničeno zbog neposredne blizine okolnih građevina po cijelom obodu građevinske jame i zbog utjecaja visoke razine podzemne vode u krupnozrnatom tlu velike propusnosti, izvođenje takvih radova je predstavljalo veoma složeni geotehnički zahvat. Na slici 19 vidi se blizina okolnih građevina prema području zahvata građevinske jame.

Privremena zaštita građevinske jame izvodila se u svrhu osiguravanja:

- mehaničke otpornosti i stabilnosti vertikalnih stijenki tla iskopa
- od prodora podzemne vode u građevinsku jamu stvaranjem vodonepropusne zaštitne barijere
- stabilnosti i sprječavanja pomaka te osiguranja okolnih konstrukcija





*Slika 19. Neposredna blizina okolnih konstrukcija i građevinske jame*

## **5.2 Sastav i karakteristike tla**

Za provjeru stanja mehaničke otpornosti i stabilnosti te čvrstoće tla tijekom provedbe izgradnje i tijekom eksploatacije objekta neophodni su geotehnički istražni radovi u svrhu određivanja vrste i svojstva tla projektiranog područja. Za potrebe gradnje objekta dilatacije „I“ koristili su se geotehnički elaborati terenskih istražnih radova na šest lokacija objekata dilatacije G i H koje se nalaze neposredno uz budući objekt dilatacije „I“. Uvidom u provedena terenska istraživanja zaključuje se kako sastav i svojstva tla imaju povoljan učinak na provedbu upotrebe stupnjaka s tehnologijom mlazno injektiranog tla u svrhu privremene zaštite građevinske jame.

Temeljem provedenih istražnih radova interpretiraju se karakteristike tla projektnog područja:

- u debljini od 0.80 – 1.10 m od površine terena nalazi se sloj nasipnog dijela koji se sastoji od humusa i građevinskog otpada
- nastavlja se sloj zaglinjenog šljunka (GC) debljine od 0.70 – 1.10 m, žutosmeđe boje

- sloj dubine od 3.10 – 4.30 m koji seže ispod sloja GC-a, sastoji se od šljunka uz povećan sadržaj pijeska (GF), smeđe do sive boje
- najdublji sloj do kojeg su vršeni istražni radovi sastoji se od dobro građiranog šljunka (GM/GW) koji je vrlo zbijen, a maksimalno zabilježeni promjer zrna je 6 cm
- područje izvođenja radova izvodi se na ravninskom dijelu terena

Na bušotinama istražnih radova promatrala se i očitavala razina podzemne vode. Tijekom izvedbe bušotina zabilježena je razina od 5.80 m u odnosu na kotu terena, dok je u promatranom razdoblju od 22 mjeseca maksimalna varijacija razine podzemne vode bila približno 1.00 m. Zaključuje se kako je potrebno izvršiti zaštitu građevinske jame s sprječavanjem prodora podzemne vode u građevinsku jamu (dubina građevinske jame do 8.50 m). Slika 20 prikazuje prodor podzemne vode u građevinsku jamu objekta dilatacije „I“.



*Slika 20. Podzemna voda u građevinskoj jami*

### 5.3 Izvođenje stupnjaka za zaštitu građevinske jame

Prema projektnom zadatku određeno je kako će se koristiti stupnjaci od mlazno injektiranog tla u svrhu zaštite duboke građevinske jame od urušavanja vertikalnih stijenci tla i sprječavanja prodora podzemne vode. Nakon provedenih geotehničkih istraživanja interpretirani su karakteristike tla i razina podzemne vode koji su služili za projektiranje mlazno injektiranih stupnjaka. U svrhu zaštite građevinske jame koristile su se konstrukcije od mlazno injektiranih stupnjaka i geotehničkih sidara koji su poslužili u svrhu ojačanja stupnjaka u dva nivoa.

Tijek izvođenja zaštite građevinske jame sastojao se od:

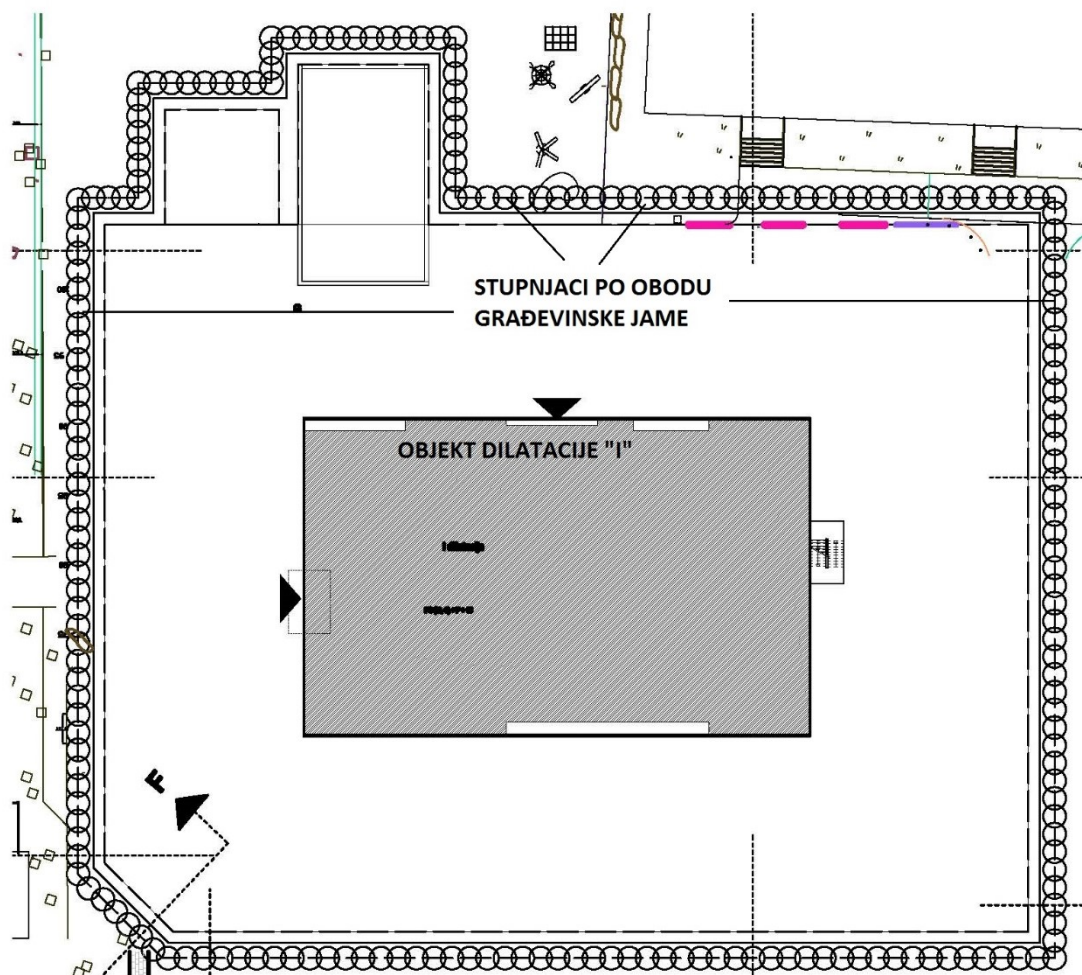
- Pripremnih radova
- Radova iskopa
- Izvedbe mlaznog injektiranja
- Izvedbe geotehničkih sidara
- Praćenje kontrole kvalitete
- Praćenje pomaka zaštitne konstrukcije i susjednih objekata



*Slika 21. Izvedeni stupnjaci kao zaštitna konstrukcija*

Po obodu iskopa građevinske jame projektirani su vertikalni stupnjaci koji tvore vertikalnu zavjesu dobiveni postupkom mlaznog injektiranja kako je prikazano na slici 21 i slici 22. Izradom statičkog proračuna određen je broj stupnjaka po metru dužnom s

uvjetom njegove vodopropusnosti. Na temelju iskustva projektanta, određen je promjer stupnjaka od približno 180 cm, s osnim razmakom od 140 cm. Tako projektiranim dimenzijama postiže se međusobno preklapanje stupnjaka od približno 40 cm, što zadovoljava na uvjet dozvoljenih tolerancija od 2 % ( $0.02 \times 11 = 22 \text{ cm}$ ) gdje broj 11 predstavlja dubinu stupnjaka. Preklapanjem stupnjaka postiže se smanjenje mogućnosti prodora podzemne vode u građevinsku jamu. Izvoženje stupnjaka provodi se tehnologijom mlazno injektiranog tla prema principu primarno – sekundarnog niza gdje se u prvoj fazi izvodi neparni broj stupnjaka, a nakon stvrdnjavanja injekcijske mase u drugoj fazi se buši i popunjava prostor između neparnog broja stupnjaka.



Slika 22. Prikaz projektiranih stupnjaka

### 5.3.1 Mlazno injektiranje

Mlazno injektiranje stupnjaka vrši se s prethodno uređenog radnog platoa s mogućnošću nesmetanog izvođenja radova i kretanja mehanizacije. Razina radnog platoa nalazi se 2,00 m ispod razine kote terena. Nakon provedenih radnji pripreme radnog prostora vrši se postupak komisijskog pregleda susjednih objekata kako bi se utvrdilo da li je postupak izvođenja radova imao neželjene posljedice na okolnu konstrukciju.

Za postupak mlaznog injektiranja koristi se stroj za bušenje i injektiranje mase pomoću pribora s jednim mlazom (Slika 23.). Injektiranje se sastoji od dvije faze izvođenja, prva faza je postupak bušenja do projektirane dubine stupnjaka od 11 metara, dok se u drugoj fazi vrši injektiranje injekcijske smjese u tlo pod visokim pritiskom od približno 400 bara s rotacijom pribora. Injektiranje se vrši od dna bušotine prema vrhu s rotacijom mlaznice kako bi se ravnomjerno formirala valjkasta tijela stupnjaka unutar bušotine. Visokim pritiskom injekcijske smjese narušava se i razbija struktura stijenki bušotine prilikom čega dolazi do miješanja čestica tla s injekcijskom smjesom.

Ovakav postupak injektiranja dovodi do poboljšanja mehaničke nosivosti tla. Postupak mlaznog injektiranja provodi se sve dok se ne formira vodonepropusna zavjesa po obodu građevinske jame. Parametri mlaznog injektiranja prikazani su u tablici 3 i nastavku teksta ispod tablice.

*Tablica 3. Određeni potrebni parametri mlaznog injektiranja*

<b>Tlak injektiranja</b>	400	bara
<b>Brzina izvlačenja pribora</b>	45	cm/min
<b>Gustoća suspenzije</b>	1.45	kg/l
<b>Protok injekcijske smjese</b>	320	l/min
<b>Vodocementni faktor</b>	0.82	
<b>Broj mlaznica</b>	1	
<b>Promjer mlaznice</b>	5.5	mm

- Određivanje položaja bušotine s približnom točnošću od 1 cm
- Dovođenje bušećeg pribora u centar stupa te bušenje bušotine do predviđene dubine. Tijekom bušenja potrebno je odrediti sastav materijala kroz koji se buši
- Po završetku bušenja počinje postupak injektiranja injekcijske mase za formiranje mlazno injektiranog tijela
- Mlaznica koja ima funkciju injektiranja cementne suspenzije. Prilikom injektiranja mlaznica se rotira te pod pritiskom ubrizgava cementnu smjesu od 400 bara



*Slika 23. Mlazno injektiranje pomoću strojeva*

### 5.3.2 Injekcijska smjesa

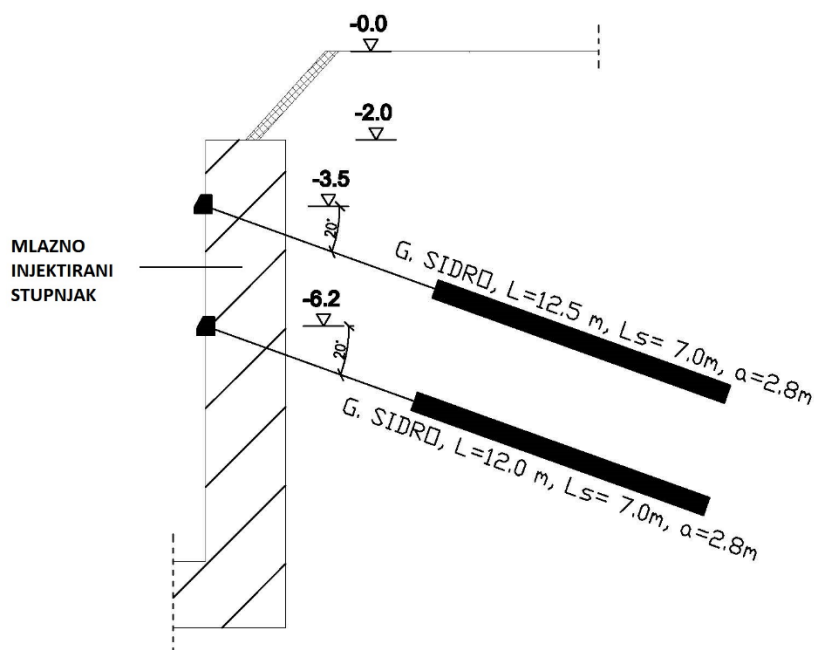
Za izradu stupnjaka mlaznim injektiranjem tla koristi se injekcijska smjesa koja se upumpava u prostor bušotine tvoreći valjkaste elemente stupnjaka. Injekcijska smjesa koja se koristi je na bazi cementa, odnosno miješana suspenzija vode i cementa uz dodatak bentonita kako bi se osigurala stabilnost suspenzije. Vrsta cementa koja se koristi za injektiranje je obični portland cement oznake CI 42.5. Vodocementni faktor mora biti u omjeru  $c/v = 0.82$ . Uz cement i vodu dodaje se 3 % bentonita. Prema

navedenim omjerima, injekcijska smjesa sastoji se od 645 kg cementa, 15 kg bentonita i 786 l vode u 1 000 l injekcijske smjese.

Prilikom izrade prvih stupnjaka, ako se ukaže potreba za izmjenom sastava injekcijske smjese, moguće je provesti korekciju uz dopuštenje nadležnih osoba (voditelja tehničkog nadzora ili projektanta).

#### 5.4 Izvedba geotehničkih sidara

Geotehnička sidra ugrađuju se nakon završetka izvedbe privremene zaštitne konstrukcije od mlazno injektiranih stupnjaka. Prvo se vrši iskop građevinske jame do dubine od približno 50 cm ispod glave sidra u svrhu stvaranja radnih uvjeta za ugradnju geotehničkih sidara. Geodetskim izmjerama određuje se lokacija i položaj mjesta ugradnje sidara, slijedi bušenje pod određenim kutem s promjerom bušotine od  $\varnothing 160$  mm. Po završetku bušenja ugrađuju se vlačni elementi od visokovrijednog čelika koji se polažu centrično u bušotinu. Geotehnička sidra izvode se u dva reda po dubini zaštitne konstrukcije kao što je prikazano na slici 24. Gornji red sidra ugrađuje se pod kutem od  $\alpha=20^\circ$  isto kao i donji red u odnosu na horizontalu, dok je razlika u duljini sidara, gornji red je duljine 12.50 m, a donji red duljine 12.00 m.

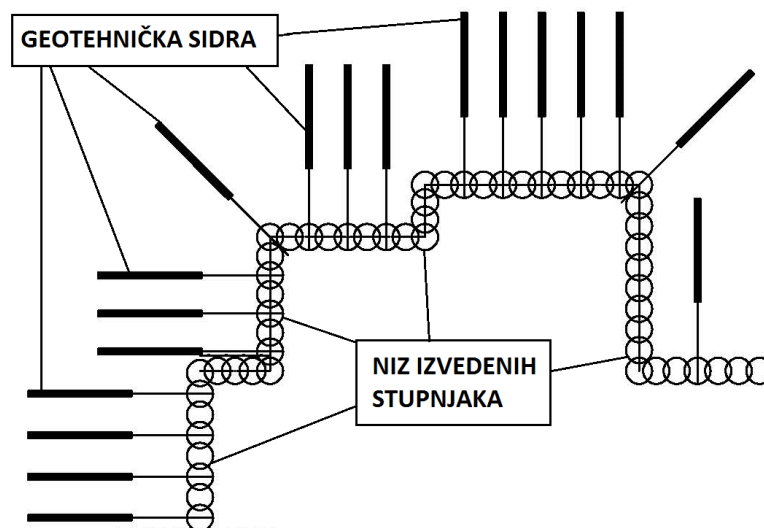


Slika 24. Raspored geotehničkih sidara po dubini građevinske jame

Svako sljedeće sidro izvodi se u uvjetima kada je prethodno izvedeno sidro još uvijek u stanju stvrdnjavanja, odnosno injekcijska masa nije postigla punu čvrstoću ali je smjesa postala stabilna. Redosljedom izvođenja potrebno je paziti da se ne oštećuju prethodno izvedena sidra. Slika 25 prikazuje projektirani raspored i položaj geotehničkih sidara u dijelu tlocrtnog pogleda.

Injektiranje sidrišne dionice provodi se cementom smjesom, cementne klase 45 nakon što su ugrađena sidra prema projektnom zadatku. Pritisak injekcijske smjese postepeno se podiže do završetka injektiranja koji iznosi 5 bara za prvi red sidara i 6 bara za drugi red sidara. Završni pritisak održava se u vremenskom periodu od minimalno 10 minuta. Minimalno nakon 7 dana injektiranja sidrišne dionice koja je dosegla čvrstoću od  $30 \text{ MN/m}^2$ , slijedi prednaprezanje ugrađenih sidara koji se izvode u dvije faze. Prvoj fazi se sidro zateže do predviđene vrijednosti kojom se dokazuje da je sidro u stanju preuzeti projektiranu radnu silu, a u drugoj fazi se sidra otpuštaju te zatežu na silu prednaprezanja. Za sidrenje se koriste sidra promjera  $\varnothing 0.6''$  sa površinom poprečnog presjeka  $A=150 \text{ mm}^2$ .

Sidra se pomoću naglavne grede i glave povezuju sa stupnjacima. Nakon završetka izrade geotehničkih sidra, sidra imaju funkciju ojačanja nosivosti i lakšeg odupiranja zaštitne konstrukcije na djelovanje aktivnih sila tla i hidrostatskog tlaka.



Slika 25. Tlocrtni raspored geotehničkih sidara jednog dijela zaštitne konstrukcije



## 5.5 Monitoring i praćenje radova

Kako bi se pratilo stanje i mogući pomaci izgrađene zaštitne konstrukcije i stanje okolnih konstrukcija od početka izvođenja radova iskopa pa do završetka prve podrumске ploče buduće građevine, postavljaju se ukupno 23 geodetska repera. Na vrhove stupnjaka postavilo se 8 geodetskih repera za praćenje pomaka zaštitne konstrukcije dok se ostalih 15 rasporedilo po susjednim objektima na visini od približno 1 m iznad kote terena.

Za praćenje mogućih kutova zaokreta konstrukcije te horizontalnih pomaka stupnjaka koriste se 4 ugrađena inklinometra.

Ovaj postupak praćenja kontrole stanja ugrađenih elemenata i okolnih konstrukcija ima za funkciju kako bi se pravovremeno mogli utvrditi moguće javljanje deformacija ili promjene na konstrukcijama te pravovremeno poduzimanje odgovarajućih mjera sanacija ili zaštite.

## 5.6 Problematika tijekom izvođenja radova

U fazi iskopa javljaju se problemi prodora materijala i vode u građevinsku jamu. Tijekom iskopa ispod naglavne grede prodor materijala je približno 3 m<sup>3</sup> dok se tijekom iskopa do konačne kote građevinske jame neprestano slijevala veća količina podzemne vode. U takvim uvjetima nije moguće izvoditi građevinske radove temeljenja temeljne ploče [9].

Zbog neželjenog prodora materijala i podzemne vode zaključilo se kako je potrebno ojačati brtvljenje postojeće zaštitne konstrukcije od mlazno injektiranih stupnjaka. Na kontaktu postojećih stupnjaka krenulo se s izvođenjem dodatnog reda stupnjaka (promjera 80 cm) od mlazno injektiranog tla. Injekcijska smjesa injektirala se cikličkom rotacijom pod kutem do 120° u prostor između postojećih stupnjaka, te se dodavali aditivi za bubrenje kako bi se pospješilo brtvljenje. Crpljenje vode iz građevinske jame se zaustavilo s ciljem izjednačavanja pornih tlakova na obje strane građevinske jame (Slika 26.). Izjednačavanjem pornih tlakova i izradom bermi za rad strojeva postignuti su radni uvjeti za početak izvođenja dodatnih stupnjaka [9].



*Slika 26. Prodor podzemne vode u građevinsku jamu*

Do konačne kote iskopa građevinske jame povremeno se dešavao prodor podzemne vode koji se uspješno sanirao standardnim metodama (umetanje cijevi za naknadno injektiranje i brtvljenje brzovezujućim sredstvom). Problem se javlja u trenutku kada je izvedba temeljne ploče bila pri kraju gdje se na sjevernoj strani građevinske jame pojavio prodor veće količine podzemne vode. Hitnom intervencijom dato je rješenje zbijanjem mini talpi neposredno uz postojeće stupnjake (Slika 27.), dobetoniravanjem i ugradnjom injekcijske smjese s brzovezujućim sredstvom [9].



*Slika 27. Izvođenje mini talpi*

## 6 ZAKLJUČAK

Izgradnjom sve složenijih objekata i konstrukcija te potreba da se sve više gradi prema visini i dubini s podzemnim etažama na području različitih karakteristika tla za gradnju, javlja se potreba za izvođenjem dubokih građevinskih jama s ciljem temeljenja ili izvođenja podzemnih etaža.

Kao problem složenosti konstrukcija javlja se i potreba gradnje objekata na području urbanih sredina neposredno u blizini već postojećih objekata. Kako bi se mogli izvoditi građevinski radovi sigurni za nesmetan rad ljudi i potrebne mehanizacije potrebno je izvesti privremenu ili trajnu zaštitu građevinske jame od mogućeg urušavanja građevinske jame ili izvesti brtvljenje s nemogućnošću prodora podzemne vode. Za izvedbu takvih konstrukcija danas su dostupne različite vrste tehnologija i metoda izvedbe. U ovom radu baziram se na tehnologiju zaštite građevinske jame korištenjem stupnjaka od mlazno injektiranog tla.

Tehnologija mlaznog injektiranja tla relativno je nova tehnologija injektiranja, međutim zbog svojih dobrih karakteristika kao tehnologije prepoznata je kao jedna od najčešće korištenih tehnologija za zaštitu građevinske jame, prvenstveno kod dubokih građevinskih jama gdje je razina podzemne vode iznad kote građevinske jame i u području urbane sredine skućenog prostora izvođenja radova.

Ovisno o svojstvima i karakteristikama tla, razini podzemne vode, potrebnoj dubini i promjeru stupnjaka te drugim parametrima koristi se jedna od tri glavna postupka mlaznog injektiranja (jednofluidni, dvofluidni i trofluidni sustav). Postupkom mlaznog injektiranja moguće je odgovoriti na različite probleme koji se javljaju tijekom zaštite građevinske jame (dubina iskopa, sprječavanje prodora podzemne vode, osiguravanje okolnih konstrukcija u uvjetima neposredne blizine okolnih objekata prema građevinskoj jami...). Iz ekološkog stajališta postupak injektiranja i injekcijska smjesa imaju relativno povoljan učinak na okoliš, odnosno negativan učinak je smanjen na najmanju moguću mjeru ovisno o vrsti aditiva koja se dodaje.

## 7 POPIS LITERATURE

- [1] Talić, Z.; Isaković, A.; Trako, H.: *Primjer projektiranja zaštite građevinske jame*, Univerzitet u Zenici, Stručni rad, Zenica, 2019.
- [2] Roje – Bonacci, T.: *Potporne građevine i građevne jame*, Sveučilište u Splitu, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Split, 2005.
- [3] Stopić, F.: *Analiza naprezanja i deformacija na primjenu građevne jame Velikogorička*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Diplomski rad, Zagreb, 2017.
- [4] Kavur, B.: *Tehnike poboljšanja svojstava tla i stijena*, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Interna skripta, Varaždin, 2018.
- [5] Croce, P; Flora, A; Modoni, G.: *Jet Grouting; Technology, Design and Control*, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 2014.
- [6] Peter, J.: *Posebne mjere podgrađivanja u tunelogradnji*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Diplomski rad, Zagreb, 2020.
- [7] Fun Yiu Choi, R.: *Review of the Jet Grouting Method*, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Toowoombi, 2005.
- [8] Čorko, D.;Kovačić, D.; Lovrenčić, D.; Marić, B.: *Mlazno injektiranje – prikaz tehnologije i primjene mlaznog injektiranja*, Conex d.o.o., Zagreb, 1998.
- [9] Orešković, M.; Ivandić, K.; Lebo, Ž.: *Zaštita duboke građevinske jame u složenim uvjetima u urbanoj sredini*, Tehnički glasnik, vol. 4, br. 1-2, str. 10-14, 2010.
- [10] Osrečak, L.: *Prikaz postupaka zaštita dubokih građevinskih jama u urbanim sredinama*, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Diplomski rad, Varaždin, 2014.
- [11] Futač, T.: *Primjeri zaštite građevinskih jama u blizini postojećih građevina*, Sveučilište Sjever, Odjel za Graditeljstvo, Varaždin, 2016.
- [12] Kovačević Zelić, B.: *Poboljšanje svojstava tla i stijena*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Interna skripta, Zagreb, 2006.

## 8 POPIS SLIKA

Slika 1. Građevinska jama

Slika 2. Čelične talpe

Slika 3. Čelični profili kao zaštita građevinske jame

Slika 4. Armirano betonska dijafragma

Slika 5. Postupci izrade armirano betonske dijafragme

Slika 6. Lice i presjek čavlanog tla

Slika 7. Zaštita berlinskim zidom od drvenih platica

Slika 8. Tehnike injektiranja tla (Welshetal, 1986.)

Slika 9. Kompakcijsko injektiranje

Slika 10. Penetracijsko injektiranje

Slika 11. Stupnjaci nastali postupkom mlaznog injektiranja

Slika 12. Mlazno injektiranje tla

Slika 13. Jednofluidni sustav injektiranja

Slika 14. Dvofluidni sustav injektiranja

Slika 15. Trofluidni sustav injektiranja

Slika 16. Niz „svježe u svježem“ (a) i niz „svježe u tvrdom“ (b) (primarni [P] i sekundarni [S] stupnjaci)

Slika 17. Primjer sveukupnog niza preklopnih stupova (primarni [P], sekundarni [S] i tercijalni [T] stupnjaci)

Slika 18. Postupak izvođenja primarno – sekundarnog niza

Slika 19. Neposredna blizina okolnih konstrukcija i građevinske jame

Slika 20. Podzemna voda u građevinskoj jami

Slika 21. Izvedeni stupnjaci kao zaštitna konstrukcija

Slika 22. Prikaz projektiranih stupnjaka

Slika 23. Mlazno injektiranje pomoću strojeva

Slika 24. Raspored geotehničkih sidara po dubini građevinske jame

Slika 25. Tlocrtni raspored geotehničkih sidara jednog dijela zaštitne konstrukcije

Slika 26. Prodor podzemne vode u građevinsku jamu

Slika 27. Izvođenje mini talpi

## **9 POPIS TABLICA**

*Tablica 1. Uvjeti rada i načini izrade građevinskih jama (Nonveiller, 1979.)*

*Tablica 2. Prikaz odnosa parametara izvedbe za sva tri sustava mlaznog injektiranja*

*Tablica 3. Određeni potrebni parametri mlaznog injektiranja*