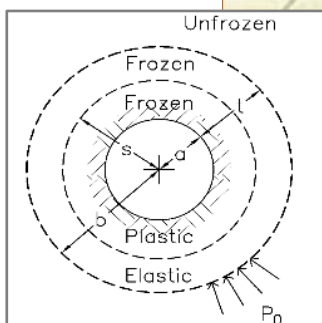
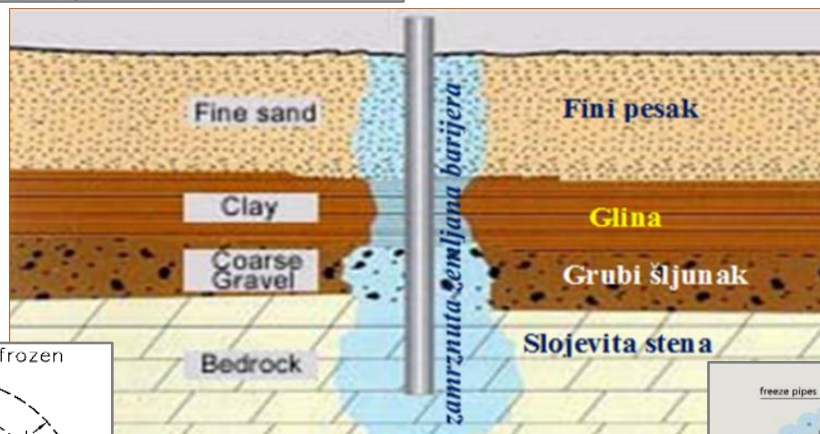
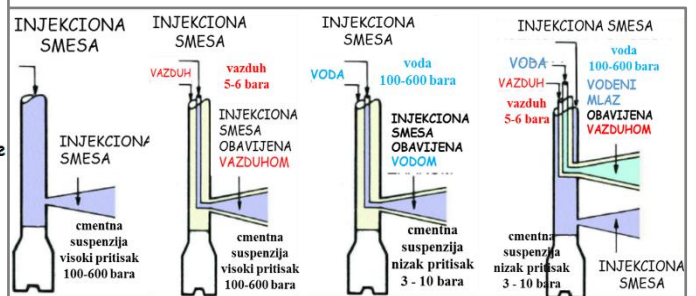




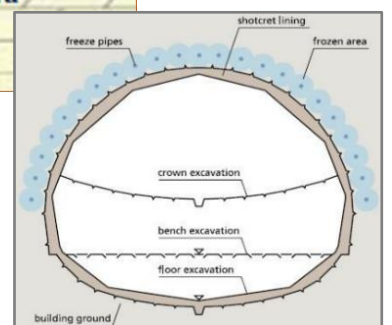
MSc Mirko Stanković, dipl. inž.

POBOLJŠANJE STENSKIH MASA (ROCK IMPROVEMENT)

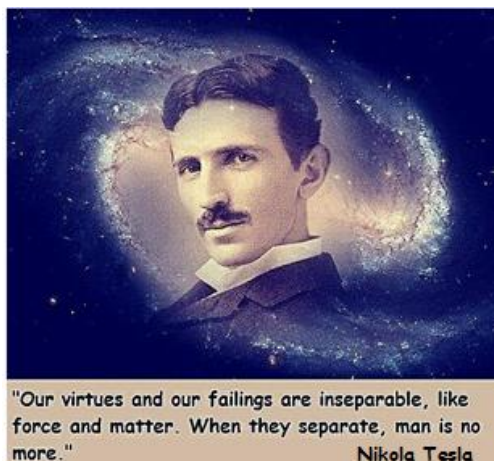
Injektiranje, Torkretiranje, Zamrzavanje



Zamrzavanje



Beograd, juni 2020. god.



*Naše vrline i naši neuspesi su neodvojivi, poput sile i materije. Kada se razdvoje, više nije čovek.
Nikola Tesla*

Posvećeno mojoj porodici: supruzi MD Snežani, ćerkama - master d.i.a Maji i MD Sanji, koje su mi svesrdno pomagale i izdržale moju "tiraniju" tokom pisanja ovog rada. Takođe sam zahvalan roditeljima koji su me školovali u teškim uslovima.



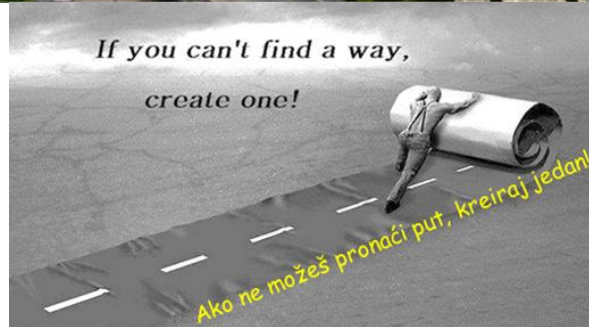
Posebnu zahvalnost i Sizifu koji me je naučio upornosti...



*Sizif je vrlo predano radio svoj posao i postao pojam.
Hvala, Sizife!*



Zašto je potrebno poboljšanje tla?



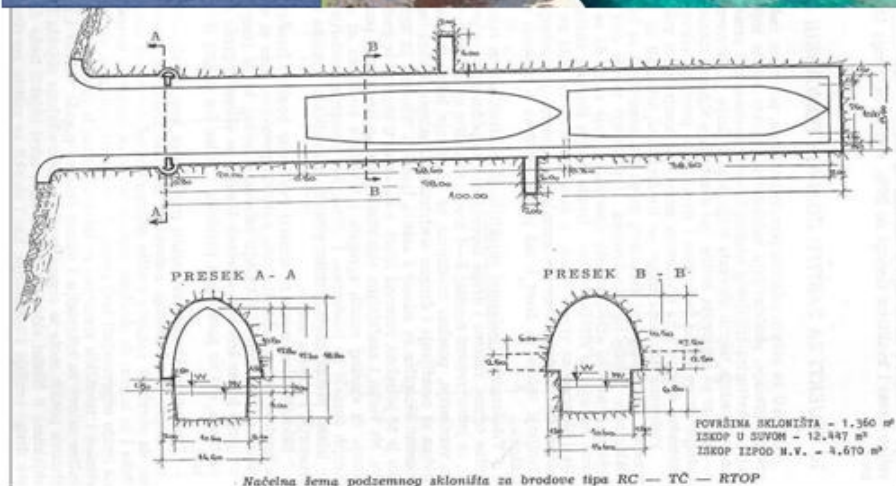
If you can't find a way,
create one!

Ako ne možeš pronaći put, kreiraj jedan!

Kao inženjer u Direkciji za investicione radove, Beograd, Balkanska 53, VP 4479 - odelenje VGU Split - VP 4416, direktno sam projektovao i rukovodio ugradnjom na oko 60.000 m² torkreta, oko 25.000 ankera i preko 15.000 m² betonskih obloga tunela. Većina ovih površina je na saobraćajnicama, najčešće useci i tuneli, ali i na podzemnim objektima tipa „Strela“, „Jastog“, „KM“... najčešće uz primenu klinastih i ekspanzionih ankera a nešto manje perfo ankera i geotehničkih sidara.



Objekti tipa „Jastog“
Vis, Hrvatska



SADRŽAJ:

| | |
|--|-----|
| UVOD | 5 |
| <i>1. Pojam građevine i postupaka geotehničkih melioracija</i> | 7 |
| <i>2. Metode poboljšanja stenskih masa - podela postupaka geotehničkih melioracija</i> | 8 |
| 1. Poboljšanje stenskih masa - postupci geotehničkih melioracija | 18 |
| 1.1. Injektiranje | 19 |
| 1.1.1. Kontaktno injektiranje - klakaža..... | 23 |
| 1.1.2. Vezno injektiranje..... | 25 |
| 1.1.3. Zaptivno - periferno injektiranje..... | 26 |
| 1.1.4. Konsolidaciono (kompaktno) injektiranje..... | 30 |
| <i>1.1.4.1. Primena konsolidacionog injektiranja</i> | 35 |
| <i>1.1.4.2. Vrste i svojstva tla pogodna za primenu konsolidacionog injektiranja</i> | 37 |
| <i>1.1.4.3. Projektovanje i kontrola kvaliteta konsolidacionog injektiranja</i> | 39 |
| 1.1.5. Naponsko (mlazno) injektiranje..... | 40 |
| <i>1.1.5.1. Mlazno injektiranje – karakteristike</i> | 42 |
| <i>1.1.5.2. Parametri koji utiču na injektiranje i oprema</i> | 44 |
| <i>1.1.5.2.1. Jednofluidni sistem mlaznog injektiranja</i> | 47 |
| <i>1.1.5.2.2. Dvofluidni sistem mlaznog injektiranja</i> | 48 |
| <i>1.1.5.2.3. Trofluidni sistem mlaznog injektiranja</i> | 49 |
| <i>1.1.5.3. Odnos pritiska i protoka fluida kod mlaznog injektiranja</i> | 52 |
| <i>1.1.5.4. Zaključak o izvođenju mlaznog injektiranja</i> | 57 |
| 1.1.6. Lokalno injektiranje..... | 58 |
| <i>1.1.7. Primena injektiranja u građevinarstvu (sistemi i tehnologije injektiranja)</i> | 59 |
| <i>1.1.7.1. Injekcione zavese</i> | 59 |
| <i>1.1.7.2. Kontaktno injektiranje</i> | 64 |
| <i>1.1.7.3. Vezno injektiranje</i> | 65 |
| <i>1.1.7.4. Zaptivno injektiranje</i> | 65 |
| <i>1.1.7.5. Knsolidaciono injektiranje</i> | 68 |
| <i>1.1.7.6. Naponsko (mlazno) injektiranje</i> | 69 |
| 1.1.8. Injekcione mase..... | 75 |
| <i>1.1.8.1. Vrste injekcionih smesa</i> | 77 |
| 1.2. Torkretiranje | 82 |
| <i>1.2.1. Suvi postupak</i> | 83 |
| <i>1.2.2. Mokri postupak</i> | 83 |
| <i>1.2.3. Torkret uređaji - mašine</i> | 86 |
| 1.3. Zamrzavanje | 88 |
| - Sniženje nivoa podzemne vode | |
| <i>1.3.1. Metode zamrzavanja tla</i> | 89 |
| <i>1.3.2. Primena tehnike zamrzavanja tla</i> | 91 |
| <i>1.3.3. Načela - principi</i> | 93 |
| <i>1.3.4. Projektiovanje zamrzavanja</i> | 94 |
| <i>1.3.5. Oprema za zamrzavanje (Freezing equipments)</i> | 96 |
| Literatura | 100 |

UVOD

Velika većina građevinskih materijala proizvedeno je od prirodnih ili veštačkih jednorodnih ili višerodnih materijala sa unapred definisanim i zahtevanim tehno - ekonomskim svojstvima. Jedino drvo i tlo (stena i zemlja - stenski materijal) su čisto prirodni „proizvod“ i njihova tehno-ekonomska svojstva su „stečena“.

Laboratorijskim i drugim ispitivanjima samo se potvrđuju svojstva koja proizvod ima i treba imati. Sa potpuno pozantim materijalom projektuju se i izvode zamišljeni i projektovani objekti - građevine. Međutim, stena (stenski materijal) je starija (milioni godina) i kompleksnija radna sredina koja je pretrpela brojna mehanička, hemijska i termalna delovanja.

Stenski materijal (stena) u građevinarstvu se koristi kao:

- ⇒ **materijal od kojeg se gradi** (*arhitektonski, ukrasni i građevinski kamen*),
- ⇒ **materijal u kojem se gradi** (*razni iskopi - podzemni i površinski*),
- ⇒ **materijal na kojem se gradi** (*temeljenje tačkastih i linijskih objekata*).

Upotreba stena kao **materijala od kojeg se gradije** najlakši inženjerski problem vezan za korišćenje stene kao građevinskog materijala jer je činjenica da stenu (kamen) možemo birati sa kojom ćemo graditi. Različite građevine postavljaju i definišu različite zahteve i uslove pred stenom. Na primer, nasip lokalne saobraćajnice (puta) može se graditi od stene lošijeg kvaliteta, međutim, stena kojom se oblaže fasada zgrade, mora zadovoljiti vrlo visoke kriterijume kvaliteta.

Daleko teži problem je **gradenje u i na steni**. Naime, kod ovih radova najčešće nismo u mogućnosti birati stenu - radnu sredinu već moramo graditi u steni kakva se nalazi u prirodi - **in situ**. Dakle, moramo se suočiti sa stenom kakva je u prirodi a ona je:

- *heterogena,*
- *anizotropna,*
- *ispucala,*
- *prirodno napregnuta.*

Samo kod vrlo važnih, zahtevnih i skupih građevina kao što je, na primer, podzemno skladište nuklearnog otpada, podzemna skladišta gasa, ... mora se istražiti više lokacija i nakon toga odabrati ona najbolja. Međutim, lokaciju nekog tačkastog objekta - zgrade nećemo menjati bez obzira na kvalitet stene već moramo tražiti načine temeljenja koji će osigurati stabilnost i trajnost zgrade, tj. vršiti poboljšanje tehničkih karakteristika te stenske mase. Kod linijskih objekata - trase saobraćajnica (puteva, železnica, aerodroma, vodovoda, gasovoda...) može se lokalno izbeći neka zona izrazito loše stene makar se menjali neki zahtevani projektni elemenati trase iako su takve situacije sve ređe.

Inženjerskim (građevinskim) zahvatom prirodno stanje napona radne sredine biće poremećeno zato, kao inženjeri (graditelji), moramo odrediti svojstva materijala kako bi mogli projektovati i izgraditi građevinski objekat.

Poznato je da ispucalost stenske mase uslovljava - „kontroliše“ stabilnost građevina blizu površine dok prirodna napregnutost uslovljava - „kontroliše“ stabilnost dubokih građevina. Naprimera, stabilnost temelja betonske brane ili mosta, zavisice od deformabilnosti i vodopropusnosti temeljne stene (kod brana) koja je u funkciji njene

ispucalosti. Slično je i sa plitkim površinskim iskopima i plitkim tunelima. Međutim kod srednje dubokih tunela u slaboj steni ili kod dubokih tunela (npr. južnoafrički rudnici zlata), prirodni naponi, koji će se građevinskim zahvatom poremetiti, postaju glavni problem.

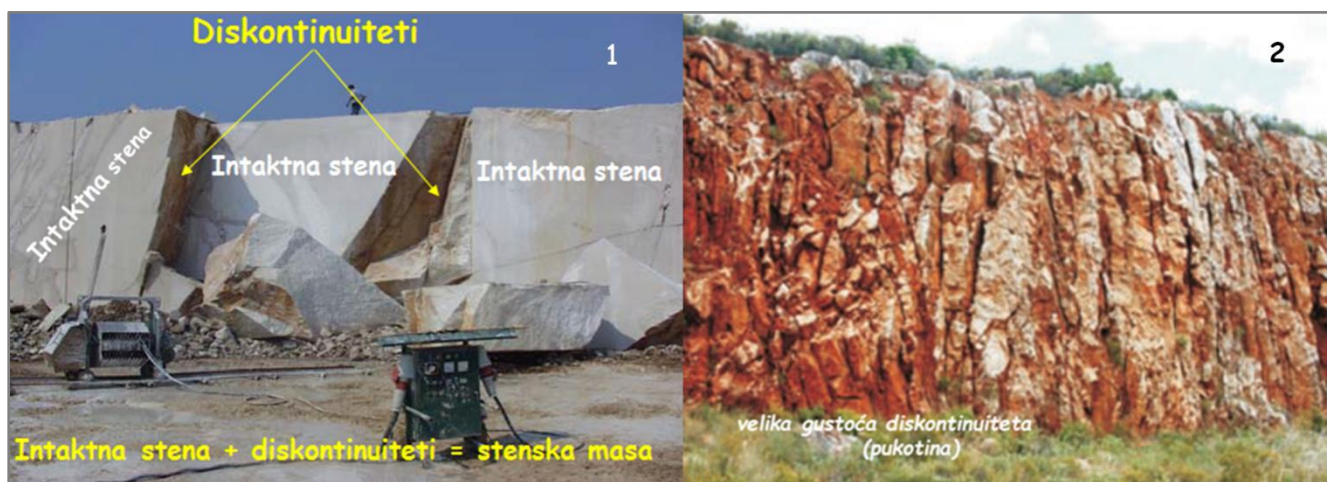
Dakle, *medij - radna sredina* u kojem ili na kojem se gradi, sastavljen je od ispucale, prirodno napregnute stene. Ovakav prirodni medij nazivamo *stenskom masom*.

Radi lakšeg razlikovanja elemenata stenske mase, „zdravu“ stenu obično nazivamo **intaktnom stenom** dok „ispucalu“ opisuju **diskontinuiteti** različitih tipova i geneze.

➤ **Intaktna stena** (*intact rock*) je materijal stenske mase, predstavljen tipično celim jezgrom iz bušotine koje ne sadrži guste strukturne diskontinuitete - pukotine (*ISRM, 1975*).

➤ **Stenska masa** (*rock mass*) je „prirodna“ stena, tj. in-situ, uključujući njene strukturne diskontinuitete (*ISRM, 1975*).

⇒ **Diskontinuitet** (*discontinuity*) - opšti naziv za bilo koji mehanički diskontinuitet u stenskoj masi koji ima malu ili nikakvu zateznu čvrstoću. To je zajednički termin za većinu tipova pukotina, slojnih površina, površina škrljavosti kao i za oslabljene zone i rasede. Skup paralelnih diskontinuiteta čini set diskontinuiteta (*ISRM, 1978*).



Sl.1:- Stenska masa: mala gustina diskontinuiteta - 1i velika gustina diskontinuiteta-2

Pojmom poboljšanje svojstava tla i stena (*eng. ground improvement, engineering treatment, ground modifications*) obuhvaćene su razne tehnike i metode koje se sprovode radi poboljšanja geotehničkih osobina kako bi se omogućila izgradnja različitih objekata. S obzirom da su tzv. „*dobre*“ lokacije za izgradnju već iskorišćene, javila se potreba za korišćenjem lokacija koje „*nisu povoljne*“ što je „*nateralo*“ - proizvelo i ubrzalo razvoj metoda poboljšanja svojstava stenskih masa (*tla i stena*). Pri izgradnji objekata na nepovoljnim lokacijama najčešće se nailazi na probleme vezane uz nedovoljnu čvrstoću, i kao posledica toga nedozvoljeno velike deformacije ili lom materijala, kao i probleme koji nastaju zbog prisutnosti vode u tlu (*hidraulični lom, bujajuća i kolapsibilna tla*).

Tipičan i veoma poznat primer izgradnje na nepovoljnoj lokaciji je kosi toranj u Pizi, Italija (sl.2). Na slici prikazan je sastav tla na mestu izgradnje i razvoj sleganja u odnosu na vreme.

Tehnikama poboljšanja tla i stena zapravo želi se povećanje njihove čvrstoće ili umanjiti tj. eliminisati nepovoljan uticaj vode i pukotina (diskontinuiteta).

Metode i tehnike poboljšanja mogu biti *privremene* ili *trajne*. U prvom slučaju efekti poboljšanja svojstava traju relativno kratko (obično samo u fazi izgradnje objekata, npr. zamrzavanje tla, sniženje nivoa podzemnih voda - NPV) dok se u drugom slučaju efekti zadržavaju kroz duži vremenski period ili do kraja trajanja objekta (npr. injektiranje, armiranje, dinamičko zbijanje).

Osnovne metode poboljšanja svojstava tla su: *dreniranje, zbijanje* (povećanje gustoće), *cementiranje* (povezivanje čestica npr. kod injektiranja), *armiranje* (geosintetici, sidra), *sušenje, promene temperature*.

Metode i tehnike poboljšanja značajno su se razvile u prošlom veku, ne samo zbog potrebe gradnje na „*lošim tlima*“, nego i zbog pojave uređaja i mašina koji su omogućili postizanje boljih efekata (npr. *vibro-zbijanje*) ili zbog pojave novih tehnika (npr. *mlazno injektiranje, „ekserisanje tla“*). Tehnike poboljšanja stalno se razvijaju, a među najnovije ubrajaju se: *armirano i ekserisano tlo*, kao i upotreba *geosintetičkih materijala*.

Ideja, želja i namera ovog pisanog materijala je dati pregled i osnovne karakteristike odabranih tehnika-metoda poboljšanja stenskih masa - tla, odgovoriti na pitanje u kojim uslovima i vrstama materijala se pojedine tehnike poboljšanja mogu uspešno primenjivati i kako se raznim metodama merenja (*monitoringom*) može proveriti učinak i efikasnost primenjenih metoda.

1. Pojam građevine i postupaka geotehničkih melioracija

Građevinski objekat (građevina) je sklop povezan sa tlom namenjen da zadovolji neke ljudske potrebe, a nastao je građenjem uz upotrebu različitih materijala.

Prema potrebama koje zadovoljavaju, građevinski objekti se dele na:

- *stambene* - kuće, zgrade, slično...
- *poslovne i javne* - škole, bolnice, pozorišta, muzeji,...
- *inženjerske* - brane, elektrane, dalekovodi, naftovodi, gasovodi, luke, plovni kanali, vodovodi...
- *specijalne* - mostovi, tornjevi, odašiljači...
- *saobraćajne* - putevi, železnice, aerodromi, plovni kanali...
- *industrijske* - fabrike, skladišta, distributivni centri, brodogradilišta...

Građenje je stvaranje materijalnih dobara više upotrebne vrednosti u obliku građevinskog objekta neprofitne ili profitne namene.

Građenje, kao neposredna proizvodna delatnost, obuhvata sledeće tehnološke faze:

- **Izvođenje građevinskih radova** (priprema građenja i građenje novih konstrukcija i građevina):
 - ✓ **Pripremni radovi** (zemljani radovi - iskopi, useci, nasipi; uređenje gradilišta - privremeni objekti, prilazni i transportni putevi...).
 - ✓ **Glavni građevinski radovi** (tesarski radovi, armirački radovi, betonski radovi, metalni radovi...).
 - ✓ **Završni (zanatski) radovi** (stolarski, bravarski, električarski, vodoinstalaterski, keramičarski).

Građenje, kao neposredna proizvodna delatnost, realizuje:

➤ *Izgradnju, rekonstrukciju ili (na)dogradnju* postojećih konstrukcija i/ili celih konstrukcija prethodno rušenje konstrukcija, (dela) građevina, i recikliranje građevinskog otpada.

Građenje u tlu i od tla je staro koliko i istorija čovečanstva, ali se do početka 19. veka zasnivalo uglavnom na iskustvu. *Brži industrijski razvoj* početkom 19. veka postavio je velike zahteve pred graditeljima koji se moraju izuzetno poznavati i poštovati.

Bez obzira na vrstu, način i potrebu građenja i najmanjeg objekta, neophodno je znati gde, na čemu i od čega se gradi objekat, tj. treba izabrati lokalitete koji su povoljni za građenje i eksploataciju objekata.

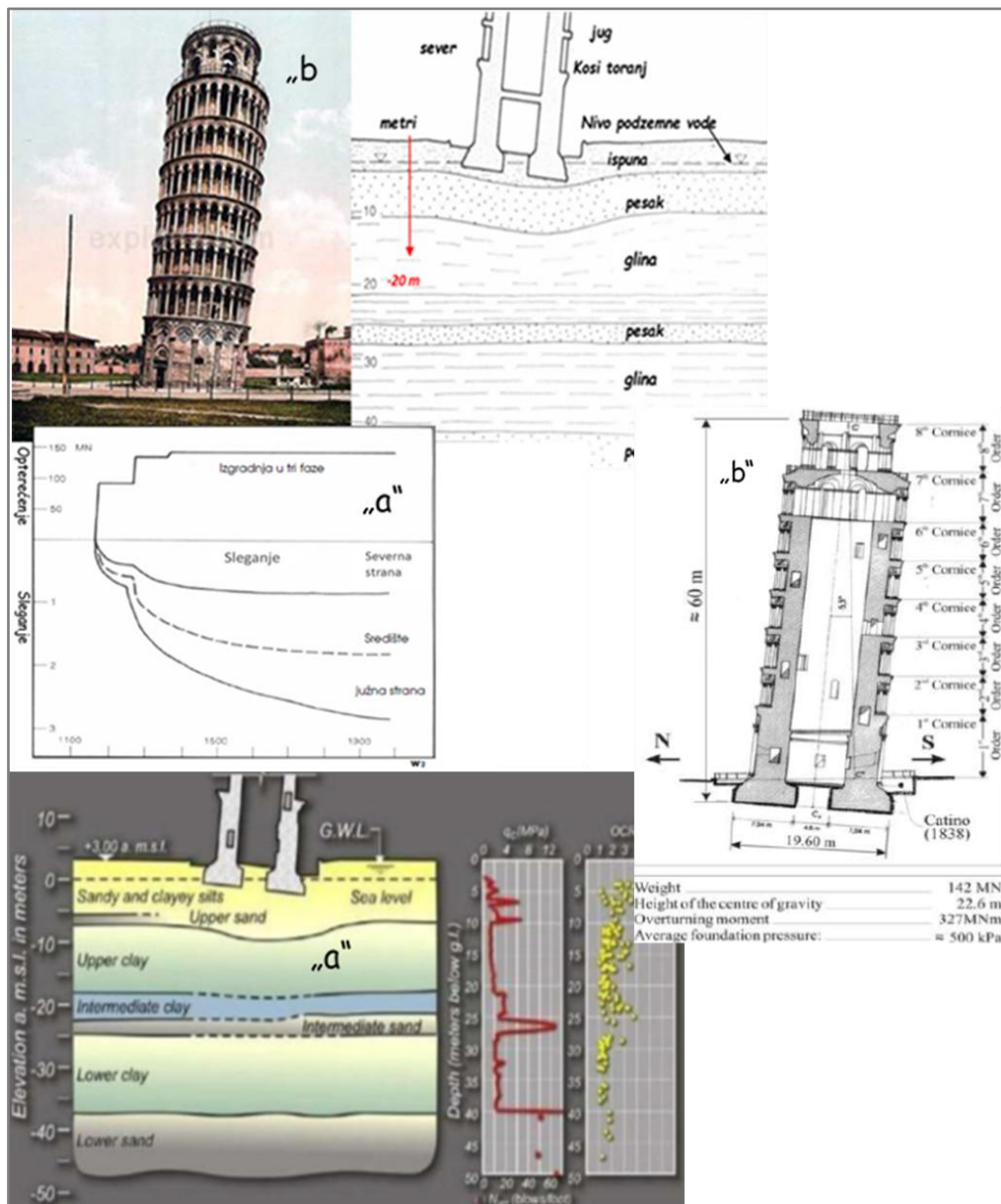
2. Metode poboljšanja stenskih masa - podela postupaka geotehničkih melioracija

Neimari (graditelji) oduvek su težili cilju da izaberu lokalitete koji su povoljni za građenje i eksploataciju objekata. Od izgradnje objekata na nepovoljnim terenima se najčešće odustajalo. Zato i nije bilo potrebe da se vrše poboljšavanja svojstava terena, a kada je to i činjeno bilo je najčešće privremenog karaktera i mahom sa ciljem da se obezbede samo povoljniji i bezbedniji uslovi pri građenju (npr. skretanje toka reke Eufkrat). Trajna poboljšanja svojstava terena ređe su primenjivana, ali ima i takvih primera (npr. poboljšanje tla pobijanjem šipova kod temeljenja mnogih građevina u Holandiji, Italiji - Venecija... i drugde, u Srednjem veku i kasnije.

Najčešći problemi na koje se nailazi na geotehnički nepovoljnim lokacijama odnose se na nedovoljnu čvrstoću, velike deformacije ili lom materijala, odnosno na probleme nastali - izazvani zbog prisutnosti vode u tlu ili pukotina, kaverni...

Najčešći inženjerski problemi prisutni na nepovoljnim lokacijama su:

1. *Nedovoljna čvrstoća,*
2. *Nedopustivo velike deformacije,*
3. *Lom materijala,*
4. *Hidraulični slom,*
5. *Bujajuća (bubrenje) tla,*
6. *Kolapsibilna tla,*
7. *Prisutnosti vode u tlu,*
8. *Prisutnost diskontinuiteta, pukotina, kaverni...*



Sl.2.- Kosi toranj u Pizi, Italija, a i b - razvoj sleganja u odnosu na vreme

Postupcima poboljšanja tla želi se da se poboljšaju mehanička svojstva prirodnog temeljnog tla i/ili eliminiše nepovoljan uticaj vode u tlu sa ciljem povećanja nosivosti, smanjenja stišljivosti i sleganja.

Prema tome da li su poboljšanja vremenski ograničena, npr. samo dok traje izgradnja, ili su njihovi efekti dugotrajni npr. za ceo eksploatacioni vek objekta, postupci se mogu podeliti na dve grupe:

- ✓ **postupke privremenog poboljšanja svojstava terena** - efekti poboljšanja svojstava traju relativno kratko - obično samo u fazi izgradnje objekata (**zamrzavanje tla** -npr. zamrzavanje tečnih peskova kroz koje se probija tunel ili okno; **sniženje NPV** - dreniranje terena oko temeljne jame, u cilju sniženja nivoa podzemnih voda - NPV);
- ✓ **postupke trajnog poboljšanja svojstava terena** - efekti se zadržavaju kroz duži vremenski period, odnosno za ceo vek trajanja objekta (**injektiranje** - npr. zaptivanje terena na mestu brane; konsolidaciono injektiranje zone oko tunela pod pritiskom; stvaranje šljunčanih šipova ispod temelja zgrada, **armiranje tla, zbijanje** i dr.).

Podela prema vremenu primene postupka, mogu se podeliti u dve grupe:

- *preventivne i*
- *sanacione.*

Preventivni postupci primenjuju se u cilju poboljšanja svojstava terena i sprečavanje deformacija i to pre nego što do deformacija dođe.

Sanacioni postupci primenjuju se za poboljšanje terena u kome su se deformacije već dogodile, odnosno kod terena čija je stabilnost narušena.

Prema osnovnom efektu koji se postiže geotehničkim melioracionim radovima dele se na:

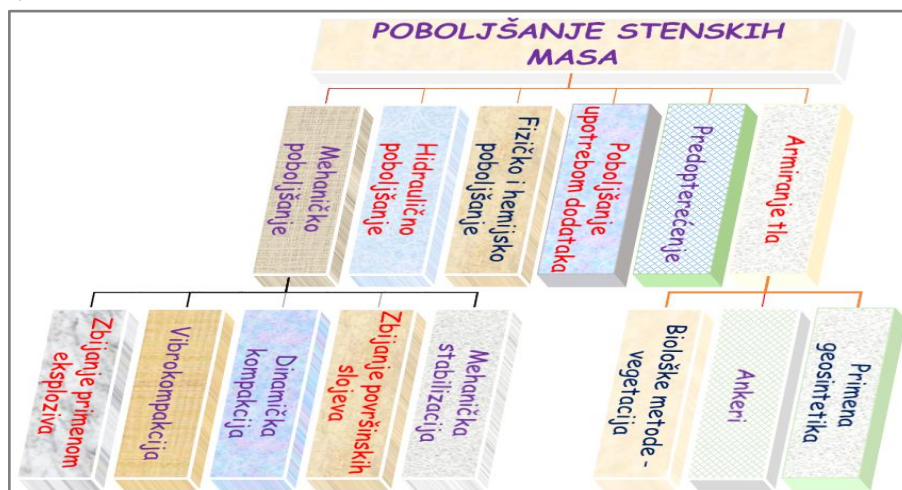
- postupke kojima se poboljšavaju deformaciona svojstva;
- postupke kojima se poboljšavaju svojstva otpornosti na smicanje;
- postupke kojima se poboljšavaju filtraciona svojstva terena.

Osnovni koncepti poboljšanja svojstava tla su:

- *Dreniranje,*
- *Zbijanje (povećanje gustine),*
- *Cementiranje (povezivanje čestica npr. kod injektiranja),*
- *Stabilizacija,*
- *Armiranje (sidra, geosintetici),*
- *Sušenje i*
- *Promene temperature.*

Metode i tehnike poboljšanja svojstava tla i stena mogu se podeliti u četiri osnovne grupe:

- *Mehaničko poboljšanje,*
- *Hidraulično poboljšanje,*
- *Fizičko i hemijsko poboljšanje,*
- *Poboljšanje upotrebom dodataka,*
- *Predopterećenje i*
- *Armiranje tla.*



➤ **Mehaničko poboljšanje:**

- *Mehanička stabilizacija - formiranje optimalnog granulometrijskog sastava*
- *Zbijanje površinskih slojeva primenom mehanizacije za zbijanje (valjci)*
- *Dinamička kompaktacija*
- *Vibrokompakcija*
- *Zbijanje primenom eksploziva*

- ⇒ **Mehanička stabilizacija - formiranje optimalnog granulometrijskog sastava**
- **Mehaničko poboljšanje- metode zbijanja tla**
- ⇒ **Zbijanje površinskih slojeva primenom mehanizacije za zbijanje (valjci):**
 - **Vučeni i samohodni**
 - Zbijanje se može vršiti statički i dinamički.
- **Zbijanje statičkim dejstvom:**
 - Glatki valjci
 - Ježevi
 - Valjci na pneumaticima
- **Zbijanje dinamičkim dejstvom:**
 - Vibracioni valjci
 - Vibro ploče
- ⇒ **Dinamička kompakcija:**
 - Zbijanje tla padom tege velike težine na tlo
- ⇒ **Vibrokompakcija (vibroflotacija):**
 - Zbijanje tla (naročito peska) primenom pribora za vibriranje koji se ubacuje u tlo
- ⇒ **Zbijanje pomoću eksploziva:**
 - U seriju bušotina ubacuje se eksploziv
 - Aktivacijom eksploziva izaziva se likvefakcija i zbijanje rastresitog materijala talasima i vibracijama
- **Poboljšanje sitnozrnog materijala bez dodavanja aditiva:**
 - Zamena tla,
 - Predopterećenje tla,
 - Predopterećenje uz primenu vertikalnih drenova,
 - Elektro - osmoza i
 - Termička stabilizacija.
- **Zamena tla:**
 - Zasićena sitnozrna tla, muljevita tla, tla organskog porekla
 - Tlo niske nosivosti se zamenjuje najčešće slojem peskovito-šljunkovitog materijala
 - Primena metode je ograničena na 3-4 m
 - Na slabo nosivom tlu, nasip može da se radi od lakih materijala kao što je gasbeton ili geopena koji imaju značajno nižu zapreminsku težinu od zemljanih materijala
- **Predopterećenje tla - Izrada nasipa sa predopterećenjem:**
- **Predopterećenje uz primenu vertikalnih drenova:**
 - Postupak nanošenja opterećenja na slabo nosivo tlo
 - Dolazi do konsolidacije tla, povećava se nosivost i smanjuje deformabilnost
 - Za konsolidaciju tla niske vodopropusnosti potrebno je mnogo vremena - nedostatak
 - Za ubrzanje procesa konsolidacije koriste se vertikalni drenovi koji omogućavaju radijalno dreniranje
 - Kod izrade nasipa na slabo nosivom tlu koristi se nadopterećenje radi skraćanja vremena konsolidacije
- Izrada nasipa sa predopterećenjem**

→**Elektro-osmoza:**

- Elektro-osmoza se koristi kao tehnički postupak za konsolidaciju i ojačanje mekog glinovitog vodom zasićenog tla. U tlo se pobiju dve metalne elektrode i kroz njih se pusti jednosmerna struja. Prvi pozitivan efekat ovog procesa je pojava filtracionih sila u određenom smeru, a drugi je delimično uklanjanje vode iz tla. Ako se obezbedi dreniranje odvijaće se proces konsolidacije

→**Termička stabilizacija:**

- Zagrevanje tla - porastom temperature povećava se sleganje gline pod datim opterećenjem. Nakon hlađenja dolazi do termalne prekonsolidacije gline
- Smrzavanje tla - metod veštačkog zamrzavanja se koristi za privremeno ojačanje tla kod podzemnih iskopa.

Može se primeniti na sve tipove tla.

➤ **Poboljšanje tla sa dodacima**

- **Poboljšanje tla dodavanjem materijala**

- Vibro zamena - šljunčani šipovi
- Dinamička zamena

- **Injektiranje tla**

- **Mešanje tla sa vezivima** (cement, kreč, bitumen, pepeo...)
- **Mlazno cementiranje - Jet grouting**

→**Poboljšanje tla dodavanjem materijala**

- *Vibro zamena - šljunčani šipovi (stone columns)*
- Dinamička zamena tla - prečnik 2.5 m u mekom tlu

→**Injektiranje:**

- U tlo se ubacuje injekciona masa - cementna ili hemijska mešavina pod pritiskom u cilju povećanja čvrstoće i smanjenja vodopropusnosti
- U steni se mogu popunjavati prsline i pukotine

→**Mešanje tla sa vezivima:**

- Cement
- Kreč
- Bitumen
- Pepeo i šljaka
- Postupak stabilizacije:
 - na licu mesta (razrivanje površine terena, rastresanje-aerisanje, dodavanje stabilizacionog sredstva, mešanje, razastiranje i zbijanje)
 - mešanje pre ugrađivanja (stabilizovana mešavina se pripremi van mesta ugrađivanja i onda dopremi na gradilište)

Stabilizacija cementom:

- Pogodna su krupnozrna tla i tla na prelazu ka sitnozrnim.

Stabilizacija krečom:

- Pogodna su sitnozrna tla.

Stabilizacija bitumenom:

- Primenjuje se kod svih vrsta materijala
- Izaziva slepljivanje čestica (povećava se kohezija)
- Količina bitumena 2-4%, izuzetno 10%

Stabilizacija pepelom:

Poboljšanje tla sa dodacima- površinsko mešanje:

- Rotofrezer (Pulvimikser) (engl. pulverizing mixer)
- DSM - Deep Soil Mixing

Poboljšanje tla sa dodacima- dubinsko mešanje:

DSM- Deep Soil Mixing

- Vlažna metoda
- Suva metoda

Jet grouting (mlazno cementiranje)

➤ **Armiranje tla:**

- Primena geosintetika
- Ankeri
- Biološke metode korišćenjem vegetacije

Detaljnije...

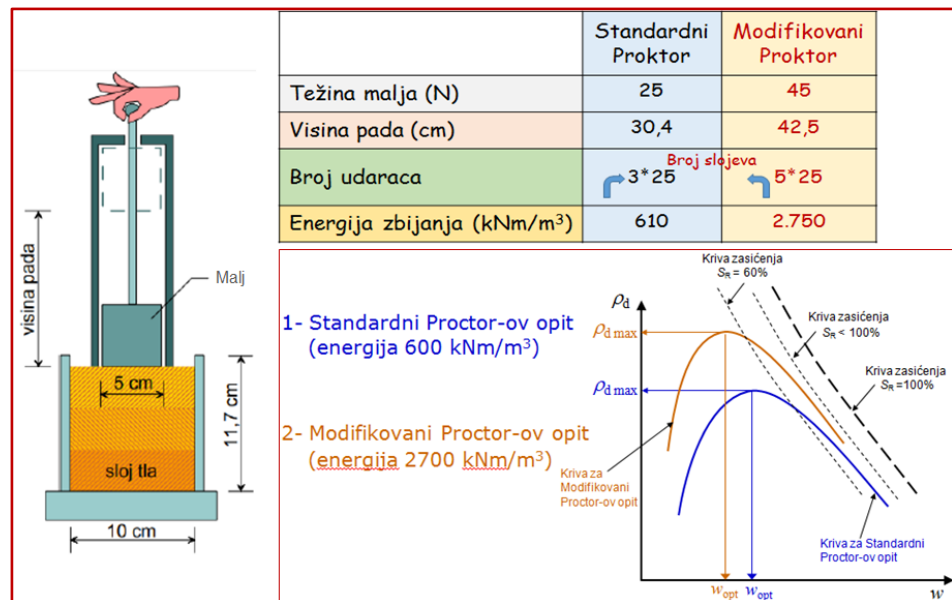
Mehaničko poboljšanje odnosi se na povećanje gustine delovanjem neke spoljne sile. Najčešće se govori o metodama zbijanja pri čemu pored metoda površinskog zbijanja postoje i metode dubokog zbijanja i dr.

- *Plitko zbijanje -zbijanje površinskih slojeva primenom mehanizacije za zbijanje (valjci)*
- *Duboko zbijanje,*
- *Hidrominiranje,*
- *Dinamička konsolidacija (heavy tamping)-dinamička kompakcija*
- *Vibraciono zbijanje (vibroflotation) -dinamička kompakcija*
- *Preopterećenje (precompression).*
- *Zbijanje primenom eksploziva*

Mehaničkim zbijanjem postiže se sledeće:

- *povećanje smičuće čvrstoće,*
- *povećanje nosivosti,*
- *poboljšanje stabilnosti kosina,*
- *smanjenje stišljivosti i sleganja,*
- *smanjenje propusnosti,*
- *smanjenje potencijala likvefakcije,*
- *kontrola bujanja.*

Metode zbijanja primenjuju se pri izgradnji saobraćajnica, aerodroma, luka, brana, nasipa, za pripremu temeljnog tla, zasipa iza potpornih konstrukcija i sl. Najčešće se sprovode standardni i modifikovani opit zbijanja, tzv. Proktorov (*Proctor*) opit.



Sl.3:- Skica Proktorovog uređaja.

Pri planiranju zbijanja potrebno je:

- **definisati uslove ugradnje:** vlažnost i gustinu tla, debljinu slojeva i sl.,
- **odabrati odgovarajuću mehanizaciju:** ježevi, vibracioni ježevi, valjci,
- **definisati postupak zbijanja:** broj prelaza, raspored zbijanja,
- **definisati postupke kontrole kvaliteta:** vrsta i broj opita.

Plitko ili površinsko zbijanje jedna je od najstarijih metoda poboljšanja svojstava tla. S obzirom na dugu primenu ove metode postoji veliki broj raznovrsne mehanizacije (valjci, ježevi, vibrovaljci, vibro ploče), koja se razlikuje po veličini, obliku i načinu rada. Zavisno od načina rada ovih mašina zbijanje može biti **statičko** ili **dinamičko**.

Duboko zbijanje primenjuje se kada postoje naslage nekoherentnog materijala a znatne su debljine. Svrha ovog postupka je eliminacija velikih sleganja, bilo da se radi o totalnim ili diferencijalnim sleganjima, kao i sprečavanje pojave likvefakcije.

Duboko zbijanje postiže se primenom neke od sledećih metoda:

- **prethodno opterećenje** (precompression),
- **primena eksploziva**,
- **dinamička konsolidacija** (heavy tamping),
- **vibraciono zbijanje** (vibroflotation **vibratory** compaction) i
- **konsolidaciono(kompakciono) injektiranje** (compacting grouting).

Hidrominiranje - primena eksploziva

Eksplozivi se mogu primeniti na površini terena ili češće u bušotinama, čime se postiže lom u rasutim materijalima te njihovo preslaganje u gušće (zbijenije) strukture. Zbijanje tla upotrebom eksploziva često predstavlja brzo i isplativo rešenje.

Procedura zbijanja tla ovom metodom sastoji se od sledećih faza:

- **bušenje**,
- **punjenje bušotina eksplozivom**,
- **zapunjavanje (začepljavanje) bušotina**,
- **detoniranje po određenom rasporedu paljenja**.

Ova metoda daje dobre rezultate u saturiranim, čistim pescima. Uspešnost metode zavisi od sposobnosti dinamičkih talasa da slome početnu strukturu tla, izazovu likvefakciju i preraspodelu u gušću strukturu. Iz toga sledi, da su veća punjenja potrebna ukoliko se postupak provodi u boljim pescima (veće početne relativne gustine, dr.) ili je potrebno postići zbijanje do većih dubina.

➤ **Hidraulično poboljšanje:**

- Površinsko odvodnjavanje,
- Gravitacioni i vakuum bunari,
- Unutrašnja drenaža,
- Upotreba geosintetika za dreniranje,
- Elektroosmoza i
- Predopterećenje (*precompression*).

➤ **Fizičko i hemijsko poboljšanje:**

- Stabilizacija uz upotrebu smesa,
- Injektiranje,
- Mlazno injektiranje i
- Tehnike zamrzavanja.

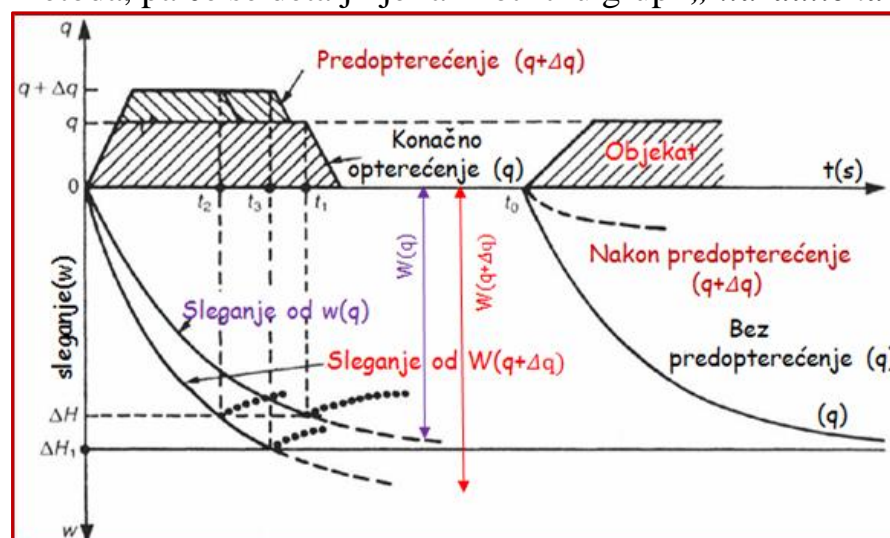
➤ **Poboljšanje upotrebom dodataka:**

- Prednapregnuta geotehnička sidra,
- Armirano tlo,
- Igličano (ekserano) tlo i
- Primena geosintetika za armiranje tla.

➤ **Predopterećenje (prethodno opterećenje)**

Prethodnim opterećenjem (predopterećenje ili sniženje NPV) postiže se konsolidacija tla pre izgradnje nekog objekta, čime se smanjuje sleganje koje će se pojaviti nakon izgradnje tog objekta, sl.4. Primenjuje se uglavnom u koherentnim tlima, s obzirom da je njihov proces konsolidacije dugotrajan.

Konsolidacija se može ubrzati izgradnjom raznih drenažnih sistema. Kako uspeh ove metode zavisi najviše od hidrauličkih svojstvima tla, ova metoda pripada više grupi hidrauličkih metoda, pa će se detaljnije razmotriti u grupi „hidraulična poboljšanja“.



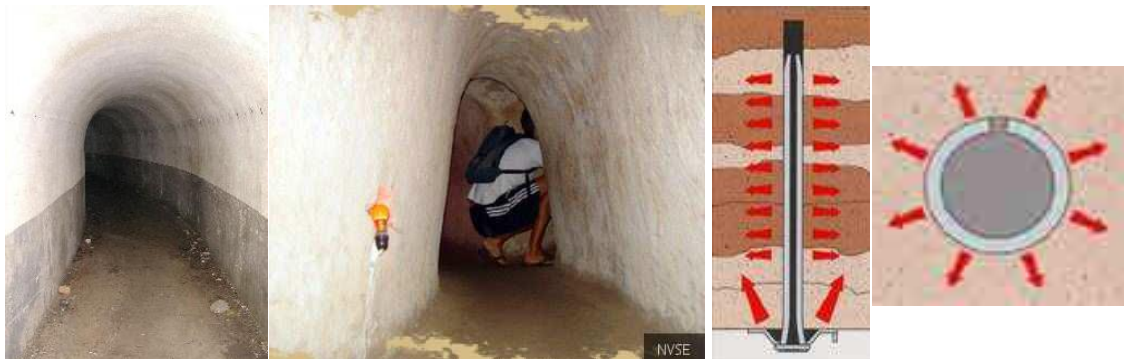
Sl. 4:- Vremenski razvoj sleganja usled prethodnog opterećenja.

Konsolidacija i sleganje terena nastaje nanošenjem spoljnog - dodatnog opterećenja (izgradnjom nasipa odgovarajuće visine) ili snižavanjem NPV.

Dodatno opterećenje može „delovati“ u periodu od nekoliko meseci do nekoliko godina, zavisno od očekivanih i stvarnih rezultata koji se žele postići. Opterećenje može biti jednako opterećenju budućeg objekta (q) ili čak veće od konačnog opterećenja ($q+\Delta q$), kako bi se proces konsolidacije dodatno ubrzao. Ovo opterećenje se uklanja nakon ostvarenog i određenog sleganje materijala. Nakon što se tlo rastereti, objekti koji će biti sagrađeni na toj lokaciji prouzrokovace (najčešće) manja sleganja, jer je deo deformacija već nastao prethodnim opterećenjem.

Metode poboljšanja stenske mase:

- prednaprezanje stenske mase
 - štapna sidra,
 - split-set sidra,
 - samobušiva sidra i
 - kablovska (geotehnička) sidra.
- mlazni beton,
- čelične mreže,
- sintetičke obloge,
- injektiranje stenske mase i
- dreniranje stenske mase.



Sl.5:- Metode poboljšanja stenske mase: torkretiranje i ankerisanje

Njima se, u suštini, poboljšavaju svojstva terena kao **prirodne konstrukcije** i kao **radne sredine**:

- ⇒ **mehanička poboljšanja i stabilizacija**, povećanje gustoće (dinamičko zbijanje, miniranje, vibrozbijanje, zbijeni peščani ili šljunčani piloti, drenovi, stubovi od kamena)
- ⇒ **hemijsko i fizičko poboljšanje** (stubovi od kreča i cementa, dubinsko mešanje, injektiranje tla, mlazno injektiranje)
- ⇒ **armiranje tla** (poboljšanje umetanjem građevinskih elemenata ili proizvoda u tlo - geosintetici, fašine, mikropiloti, sidra)
- ⇒ **hidraulično poboljšanje** (snižavanje nivoa podzemne vode).

Postupci geotehničkih melioracija su najčešće vrlo skupi pa se o njihovoj primeni odlučuje tek pošto se tehničkim i ekonomskim analizama dokaže njihova ekonomičnost. Primena metoda poboljšanja stenskih masa - tla pri rešavanju geotehničkih problema i izgradnji objekata:

- *podgradne konstrukcije,*
- *kosine,*
- *nasipi na stišljivoj podlozi,*
- *podzemne prostorije i tuneli...*

Nakon izvedenih radova poboljšanja stenskih masa raznim metodama i tehnikama neophodno je proveriti uspešnost primenjenih tehnika i postupaka poboljšanja. To se vrši naknadnim merenjima i opažanjima, kao npr.:

- terensko ispitivanje vodopropusnosti kao kriterijum za ocenu uspešnosti injektiranja,
- ispitivanje pritiskom jastukom kod dinamičkog zbijanja,
- SPT ili CPT kod vibroflotacije,
- seizmička ispitivanja.

Laboratorijski i terenski postupci:

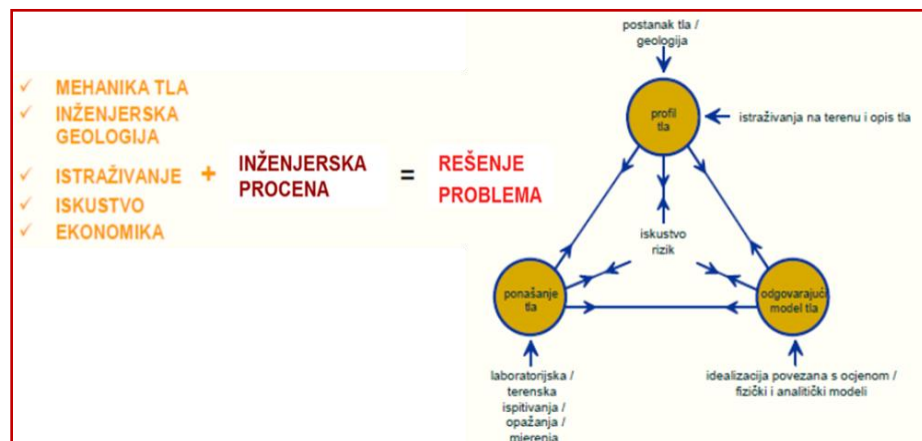
- *Merenje gustoće kalibrisanim peskom,*
- *In-situ denzimetar,*
- *Penetracioni opiti,*
- *Presiometar,*
- *Dilatometar,*
- *Praćenje pomaka i*
- *Praćenje naprezanja i pornih pritisaka.*



Sl.6:- Jedna od metoda terenskog ispitivanja

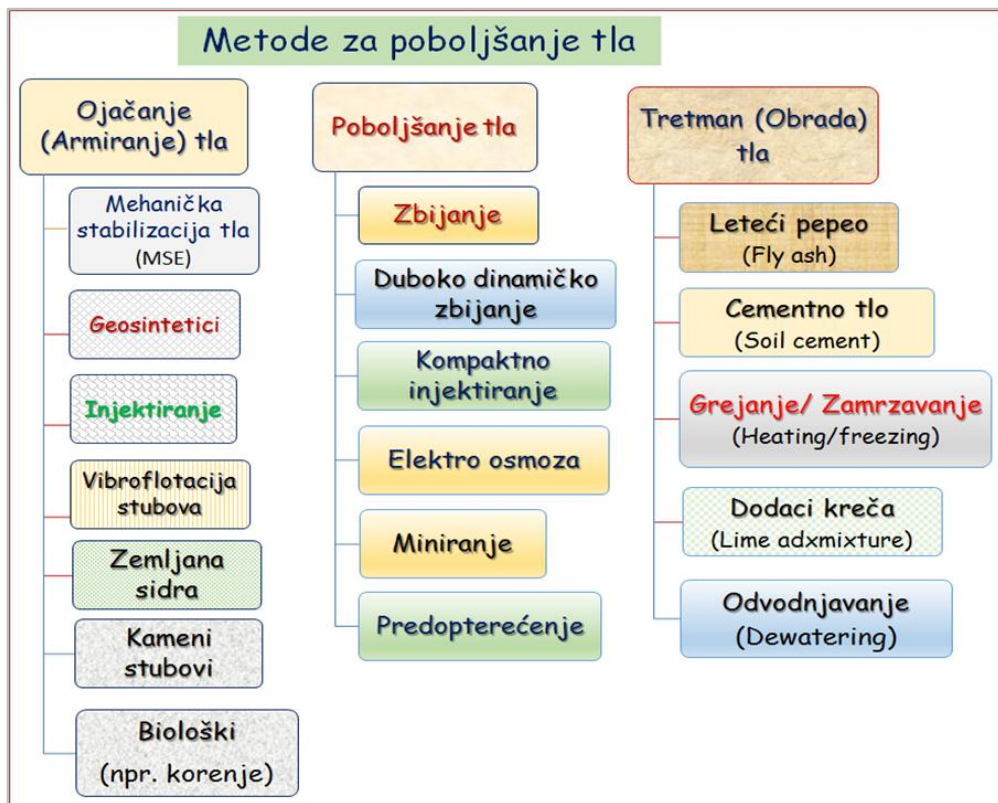
Pri realizaciji svih metoda i postupaka poboljšanja stenskih masa osnovno je imati predznanja, npr. Burland-ov trougao ili metode rešavanja problema - Lambe, 1979. iz oblasti:

- *Mehanike tla,*
- *Mehanike stena,*
- *Hidrogeologije,*
- *Inženjerske geologije i*
- *Poznavanje načina rada i funkcionisanje primenjenih alata, uređaja i instrumenata, kako za ugradnju, tako i za ispitivanje - monitoring rezultata izvedenih radova.*



Sl.7:- Metode rešavanja problema - Lambe, 1979. i Burland-ov trougao

1. POBOLJŠANJE STENSKIH MASA -postupci geotehničkih melioracija



Sl.8:- Jedna šema metoda za poboljšanje tla

Najznačajniji postupci geotehničkih melioracija su:

1. *injektiranje,*
2. *sidrenje,*
3. *dreniranje,*
4. *zbijanje,*
5. *torkretiranje,*
6. *zamrzavanje,*
7. *podgrađivanje i oblaganje,*
8. *elektrohemijsko očvršćavanje,*
9. *zamena materijala,*
10. *rasterećenje, i*
11. *armiranje tla - primena geosintetika.*



Sl.9:- Šema metoda poboljšanje stenskih masa

1.1. Injektiranje

Izgradnja geotehničkih objekata na terenima nepogodnim za građenje uslovljena je primenom tehnoloških postupaka za poboljšanje tih terena. Jedan od (najčešćih) postupaka je injektiranje stenskih masa.

Injektiranje je tehničko-tehnološki postupak kojim se vrši poboljšanje mehaničkih svojstava stenske mase, smanjuje se vodopropustljivost, ostvaruje se intimni kontakt objekta i terena. Postupak se izvodi tako što se, jedna ili više suspenzija, emulzija ili rastvora, pod pritiskom ubrizgavaju u osnovnu stenu, tlo ili građevinu u cilju poboljšanja nosivosti i vodopropusnosti terena, te stabilnosti izgrađenih objekata. Injekciona masa tu očvršćava i doprinosi poboljšanju: kontakta objekta i terena; mehaničkih karakteristika stenske mase u zoni sadejstva; smanjenju vodopropustljivosti stenske mase i dr.

Injektiranje je jedina metoda stabilizacije terena koja se sastoji u ubrizgavanju stabilizacionih sredstava u tlo pod pritiskom, kroz bušotine, pomoću odgovarajućih mašina i uređaja, na području koje želimo poboljšati - konsolidovati.

Dakle, injektiranje (lat. *iniectare*, iterativ od *inicare*: uvesti unutra), ubrizgavanje tečnih ili žitkih sredstava (raznih injekcionih smesa) u šupljine i pore tla ili građevine radi postizanja vodonepropusnosti, učvršćivanja, konsolidacije ili homogenizacije, a u izvesnim slučajevima da obezbedi neposrednu vezu između objekta i stenske mase. Postupak se primenjuje pri iskopu građevinske jame, ispunjavanju šupljina u steni, izradi zaštitnih zavesa na branama, učvršćivanju rastresitih materijala ispod temelja, učvršćivanju materijala iza tunelske obloge, sanaciji delova građevine i dr.

Prvi počeci injektiranja datiraju još iz 1802. Godine kada je Charles Bérigny otkrio proces injektiranja i primenio ga na sanaciji ispranog tla ispod obale (*gata*) u luci kod Dieppe-a.

Ovo injektiranje izvedeno je udarnom pumpom koja se sastojala od drvene cevi unutrašnjeg prečnika 8 cm. Cev je na kraju imala metalni poklopac, perforisan šupljinama prečnika 3 cm, i bila je ispunjena glinom. Glina je utiskivana u šupljine ispranih temelja pomoću pokretnog drvenog klipa.

Dalji tok razvitka tehnologije injektiranja uključivao je korišćenje sve efikasnijih i korisnijih injekcionih smesa - od prvog injektiranja tla glinom i cementnim injekcijama, pa sve do razvoja i primene hemijskih injekcija do kombinovanih postupaka injektiranja.

Počeci injektiranja u našoj zemlji datiraju iz 1932. godine, kada je građena brana Grošnica za snabdevanje vodom grada Kragujevca. Izgrađena je betonska gravitaciona brana visine 42 m. Brana je građena od 1931. do 1938. godine. Prema oskudnim podacima o tom radu, bušene su u temelju brane rupe za injektiranje, iz kojih su cevi promera 5 cm vodile u injekcionu galeriju. Kroz te cevi injektirala se cementna suspenzija, ali detalji postupka i utrošak cementa nisu poznati.



Sl.10:- Brana Grošnica kod Kragujevca, Srbija

Intenzivnija upotreba - primena injektiranja usledila je nakon 1945. godine i to kao posledica izgradnje mnogih hidroenergetskih objekata u to vreme. Takva potreba za specijalizovanim građevinskim zahvatima rezultirala je formiranjem preduzeća specijalizovanog isključivo za injekcione radove. Tako je krajem 1947. godine u Beogradu pri Ministarstvu elektroprivrede osnovana specijalna gupa za injekcione radove, koja se 1948. godine preselila u Zagreb gde je osnovano prvo, jugoslovensko preduzeće za injekcione radove „Geotehnika“ sa nazivom „Elektrosond“. Elektrosond je osnovao i prvu laboratoriju za proučavanje injekcionih materijala, smesa i suspenzija, kao i primenu dodataka cementu za injektiranje, kao što su deflokulatori, gline i bentonit.

Zatim je i Preduzeće za bušenje (*PIB, posle Geoistraživanja, a nakon integracije sa Elektrosandom, Geotehnika*) u Zagrebu preuzelo deo opsežnog injektiranja temelja prve akumulacione brane u karstifikovanom krečnjaku Peruće na Cetini. Tako su razvijene nove metode ispitivanja smesa i novi postupci za injektiranje u karstu primenom velike količine gline umesto cementa. To je otvorilo put iskorišćavanju vodnih snaga karsta, pa danas imamo u pogon velike hidroelektrane kao što su Grančarevo, Perućica, Piva, Split, Senj, Dubrovnik, Peruća, Selakovac, ... i Orlovac.

Injektiranja se mogu podeliti u nekoliko grupa:

- ⇒ **kontaktno injektiranje - ispunavanje šupljina na kontaktu betona i stenske mase,**
- ⇒ **vezno injektiranje - povezivanje u konstruktivnu celinu obloge i stenske mase,**
- ⇒ **konsolidaciono injektiranje - poboljšanje mehaničkih karakteristika stena,**
- ⇒ **naponsko injektiranje (stvaranje pritiska u okolini tunelske obloge ili betonske konstrukcije postiže se prednaprežanjem konstrukcija) i**
- ⇒ **zaptivno (postizanje vodonepropusnosti oko građevine ili ispod nje) kao i**
- ⇒ **lokalno (tzv. prepakt metoda za zapunjavanje pojedinačnih šupljina - kaverni, pri čemu se zapunjava prvo granulisanim šljunkom, a zatim injektira cementno - bentonitnim injekcijama).**

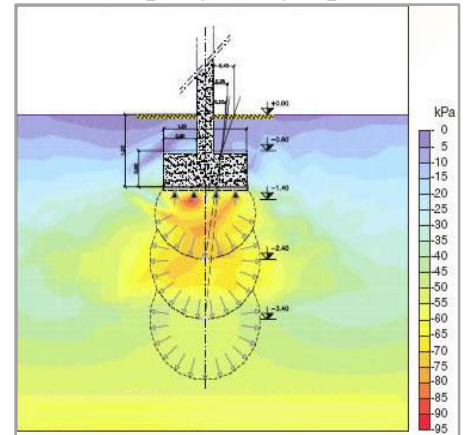
Primena:

- povećavanje nosivosti slabonosivog tla,
- zapunjavanje pukotina i
- ugradnja geotehničkih sidara i mikropilota.

Injektiranje je univerzalna metoda ubrizgavanja pod pritiskom za ispunu konstrukcijskih pukotina, šupljina i spojeva u temeljima ili zidovima koji se nalaze u zemlji. Injektiranje se vrši na bazi strogo definisanih i propisanih metoda.

Injekcionim mašinama - uređajima (injektorima) popunjavamo bušotine pod pritiskom do 10 bara čime se uspostavlja nužna interakcija tlo/tlo kod zapunjavanja pukotina odnosno tlo/sidro (kod ugradnje sidara).

Poseban vid injektiranja je **mlazno injektiranje** - injektiranje pod velikim pritiskom, pri čemu smesa izlazi iz mlaznice smeštene na bušećoj garnituri.

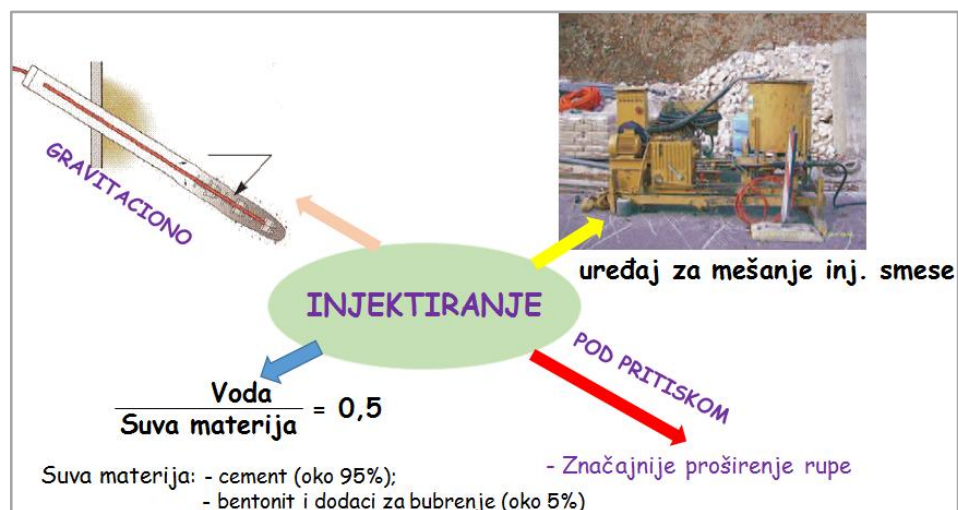


Sl.11:- Stanje napona ispod temelja i šema načina ojačanja tla - injektiranje koncentrisano na prostor kruškaste zone napona (Boussinesq-ova teorija)

U zavisnosti od namene injektiranja (*prekid prodora vode, konstrukciono lepljenje*) koriste se smole različitih karakteristika (*npr. bubrenje u kontaktu sa vodom*). Bez obzira o kojoj se vrsti problema radi - prodor vode u podrumne ili podzemne objekte i temelje, primenjujemo najbolju tehniku za konkretan slučaj da spreči nastajanje problema koji mogu ugroziti sigurnost samog objekta.

Sanacija ovakvih objekata može biti izuzetno zahtevna i skupa, te zbog toga, sanaciju ovih problema mogu obavljati firme koje su dobro opremljene, imaju iskustvo i znanje za takve specijalne zahvate.

Zbog specifičnosti svakog pojedinačnog objekta, sanacija injektiranjem je tehnički zahtevna i komplikovana metoda. Najčešće tehnike ubrizgavanja ili injektiranja su metode pod visokim (**mlazno injektiranje**) ili niskim pritiskom sa pumpama visokog ili niskog pritiska.



Sl.12:- Šematski prikaz vrste injektiranja

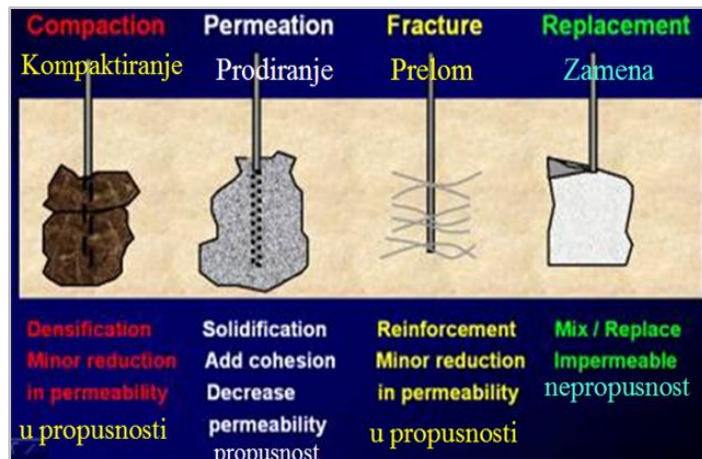
U zavisnosti od metode sanacije, primenjuju se proizvodi kojima se vrši zaptivanje, najčešće se koriste poliuretanske, epoksidne smole i cementne suspenzije. Za sada za injektiranje najčešće se koristi cementni malter ili druge smese cementa, gline, hemijskih sredstava, bitumenskih i drugih emulzija.

Pri svemu tome ekonomičnost gradnje je najvažniji zahtev.

Kako je već rečeno, postoji niz tehnologija građenja koje se koriste u takvim slučajevima, a u poslednje vreme razvijena je i tehnologija tzv. mlaznog injektiranja (*Jet Grouting*) koja sadrži niz pogodnosti, i široko je primenljiva, kod poboljšanja mehaničkih svojstava tla - stenskih masa.

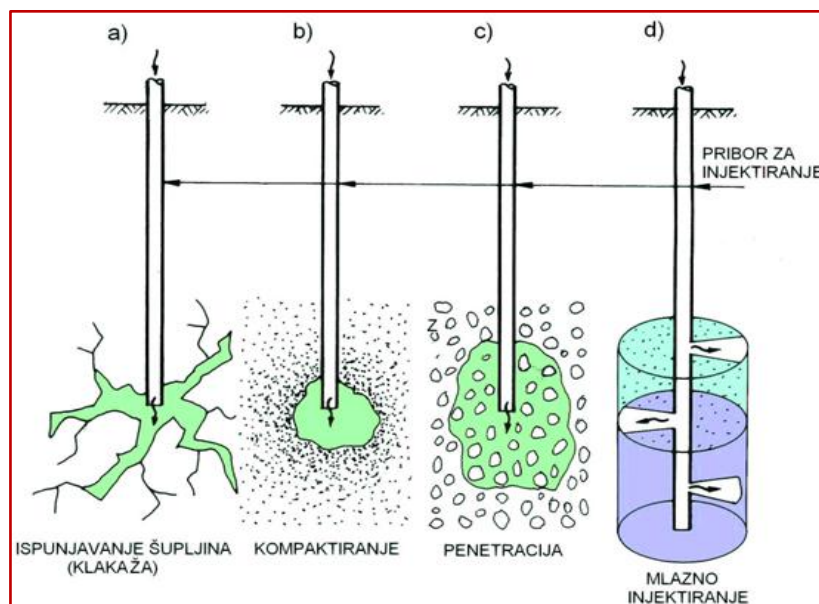
Potrebno je razlikovati tehnologiju mlaznog injektiranja od, tzv. klasičnog injektiranja. Postoje razne tehnologije injektiranja, na primer:

- ✓ *klakaža (kontaktno injektiranje),*
- ✓ *konsolidacija (kompakciono) injektiranje,*
- ✓ *penetraciono injektiranje i*
- ✓ *mlazno (naponsko) injektiranje.*



Sl.13:-Šematski prikaz metoda injektiranja tla - vrste injektiranja (Welsh i sar., 1986)

ŠEMATSKI PRIKAZ VRSTE INJEKTIRANJA

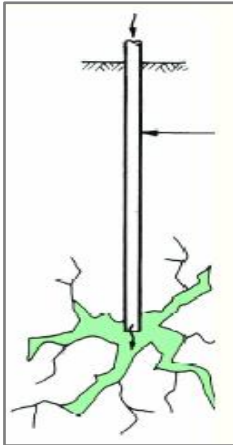


Sl.14:- Šematski prikaz vrste injektiranja (Welsh i sar., 1986)

ISPUNJAVANJE ŠUPLJINA - KLAKAŽA

Ispunjavanje šupljina (kontaktno injektiranje)-Injekciona smesa (najčešće na bazi cementa) utiskuje se u prazne prostore pukotine (šupljine) tla (stene).

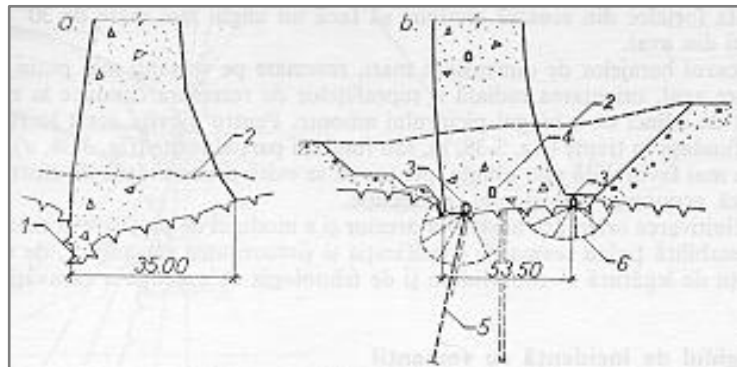
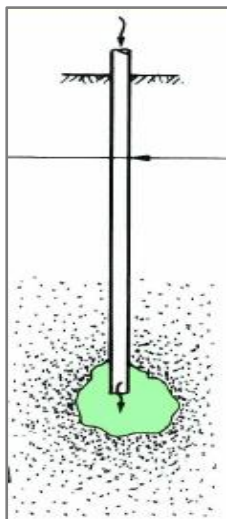
Poseban slučaj ove vrste injektiranja je tzv. **klakaža** - injeksiona smesa utiskuje se u tlo pod visokim pritiskom što uzrokuje hidraulički lom tla. Nastalu pukotinu ispunjava injeksiona smesa, a okolno tlo se zbija.



Sl.15:- Ispunjavanje šupljina (kontaktno injektiranje)-**klakaža**

✓ **KONSOLIDACIONO (kompakciono) INJEKTIRANJE**

Injeksione smese sa visokim unutrašnjim trenjem utiskuju se u stišljivo tlo, deluje kao radijalna hidraulična presa, tako dolazi do pomaka čestica tla i povećanja gustoće okolnog tla.



FUNDAMENT U POPREČNOM PRESEKU: A - SA UZVODNIM ZUBOM; B - SA HORIZONTALNIM FUNDAMENTOM; 1 - ZUB; 2 - LINIJA PRIRODNOG TERENA; 3 - INJEKSIONA GALERIJA; 4 - DRENAŽNA GALERIJA; 5 - KONSOLIDACIONO INJEKTIRANJE.

Sl.16:- Konsolidaciono injektiranje - (kompakcija)

✓ **PENETRACIONO INJEKTIRANJE**

Injeksiona smesa utiskuje se u tlo pod relativno niskim pritiskom, tako da ne dolazi do promene obima i strukture tla.

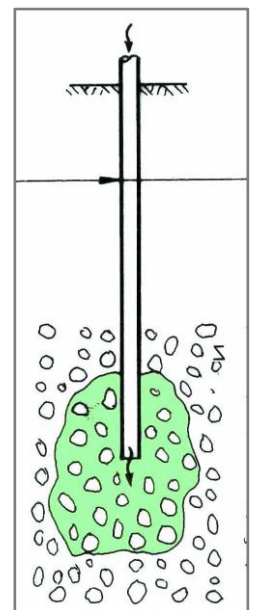
Injeksione smese koje se pri tome koriste raznog su sastava i karakteristika, a osnovna baza za njihovo određivanje je propusnost tla. Ovo je veoma važna konstatacija, zato se ona posebno ističe, jer se često smatra da su neki drugi zahtevi pri tome odlučujući.

Zavisno od koeficijenta propusnosti tla **k**, koriste se sledeće suspenzije:

- *cementne suspenzije* (koriste se kada $jk \geq 10^{-2}$ cm/s)
- *silikatne suspenzije* (koriste se kada jk veličine 10^{-2} do 10^{-4} cm/s)
- *rezorcinske suspenzije* (koriste se kada jk veličine 10^{-4} do 10^{-6} cm/s)

Kod slabije propusnih vrsta tla, primena ove vrste injektiranja nije

Sl.17:- Penetraciono injektiranje - penetracija



✓ **MLAZNO (naponsko) INJEKTIRANJE (jet grouting)**

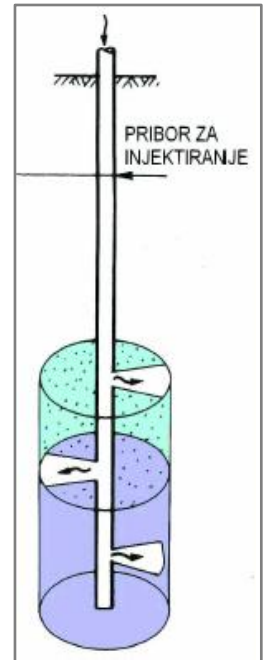
Mlazno injektiranje - injektiranje pod velikim pritiskom, pri čemu smesa izlazi iz [mlaznice](#) smeštene na [bušećoj](#) garnituri, više u 1.1.5.

Mlazno injektiranje, tj. *Jet Grout*, je uobičajeni naziv za svaki izvedeni postupak gde se koristi izuzetno visok pritisak (od 300 do 700 bara, tj. 30 do 70 MPa) za unos energije u fluid koji se utiskuje u tlo brzinom od 250 do 330 m/s sa ciljem razbijanja strukture tla, premeštanja čestica, kao i njihovog mešanja sa cementnom smesom.

- Mlaznim injektiranjem u tlu se stvaraju valjkasta tela sastavljena od mešavine injekcionemesa i čestica tla, koji su poboljšanih karakteristika u odnosu na prirodno tlo.
- Soilcrete (concrete).
- Pogodnom kombinacijom takvih valjaka (eventualno i izduženih panela) tla dobijamo razne konstrukcije koje mogu rešiti niz geotehničkih problema.
- Koristi se više od 40 godina.

Ova tehnologija bitno se razlikuje od prethodnih. Njenom primenom totalno se razbija struktura tla, zato se čestice tla mešaju (in-situ) sa vezivnim sredstvom, kada nastaje homogenizovana masa poboljšanih mehaničkih svojstava.

Tehnologija se primenjuje kod raznih vrsta tla sa raznim injekcionim smesama, iako se normalno koriste vodo-cementne, ili vodo-cementno-bentonitne smese.

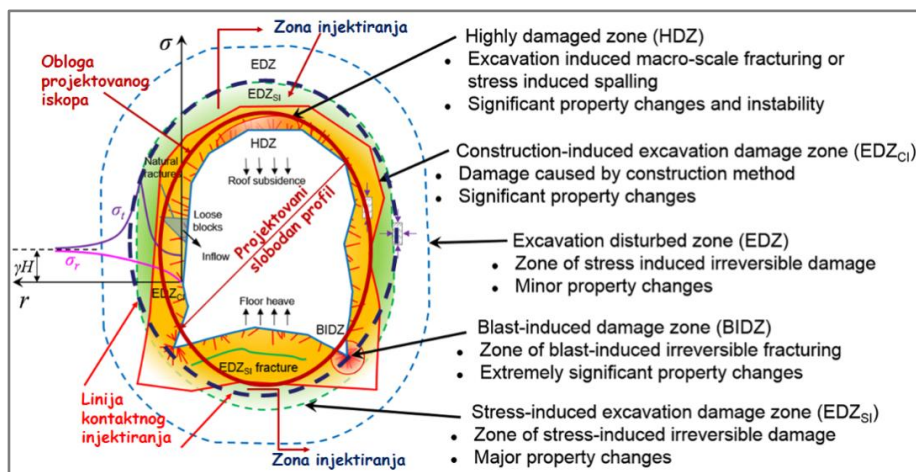


Sl.18:- Mlazno injektiranje - (jet grouting)

1.1.1. Kontaktno injektiranje - klakaža

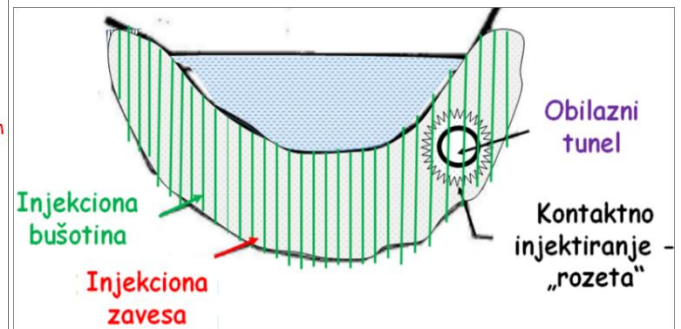
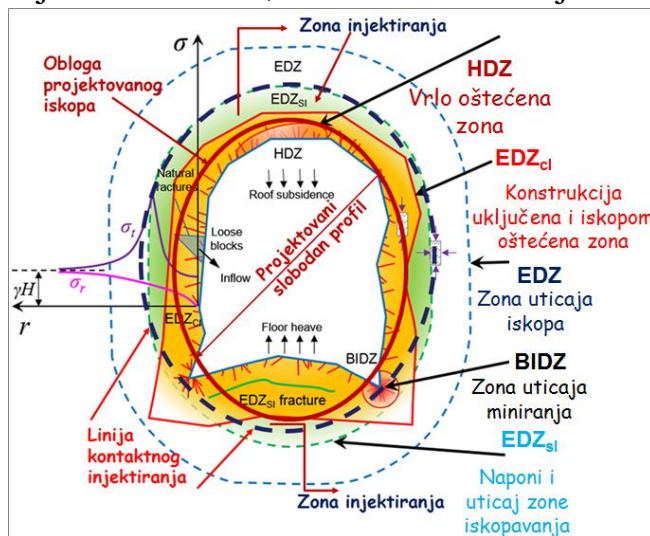
Kontaktinim injektiranjem postiže se bolji kontakt objekta i stenske mase (ispunjava zaostale šupljine između podgrade i iskopa) nego što je on bio pre injektiranja. Kod hidrotehničkih tunela i okana pod pritiskom, kontaktno injektiranje se izvodi samo u slučajevima kada stenska masa treba da primi unutrašnje hidrostatičke pritiske, a obloga ima za cilj samo da osigura projektovan oblik tunelskog otvora.

Ispunjavanje šupljina (kontaktno injektiranje)-Injekciona smesa (najčešće na bazi cementa) utiskuje se u prazne prostore pukotine (šupljine) tla (stene).

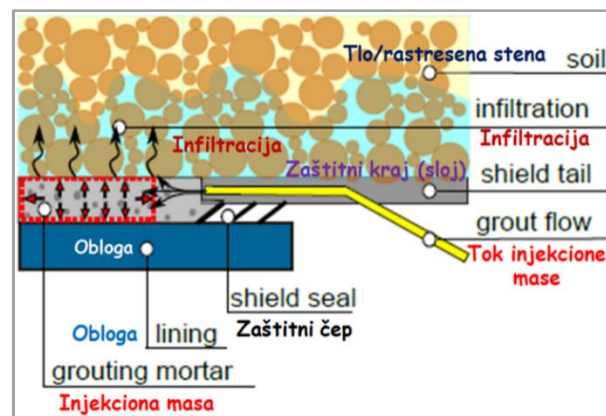


Sl.19. Pregled različitih zona oštećenja oko podzemnog iskopa, gde je σ_r radijalni napon, σ_t je tangencijalni napon, γ je prosečna sila opterećenja nadslojeva, a H je dubina iskopa

Poseban slučaj ove vrste injektiranja je tzv. **klakaža** - injeksiona smesa utiskuje se u tlo pod visokim pritiskom što izaziva hidraulički slom tla. Nastalu pukotinu ispunjava injeksiona smesa, a okolno tlo se zbijaja.



Sl. 20:- Kontaktno injektiranje



Sl.21:- Injektiranje pratećih pukotina - skica injektiranja prstenastog prostora između obloge i okolnog tla injeksionom masom pod pritiskom kroz zaštitnuoblogu

1.1.2. Vezno injektiranje

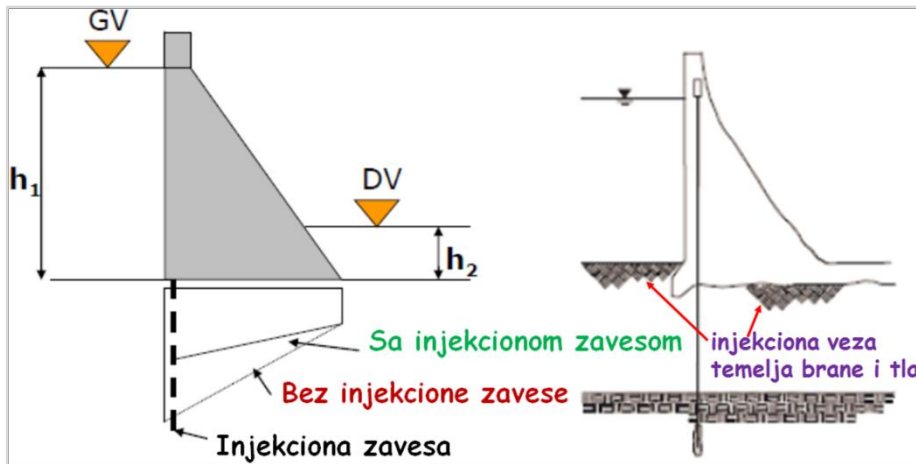
Vezno injektiranje postiže se bolje susedstvo objekta i stenske mase. Izvodi se u kontaktnoj zoni objekta i stene pri čemu je debljina te zone obično 0,5 m do nekoliko metara. Stenske mase su u toj zoni obično ispugalije nego u dubljim delovima terena.

Razlog tome su uticaji iskopavanja, miniranja i oslobađanja napona uopšte. Kada se pukotine, ili drugi prazni prostori u zoni veznog injektiranja zapune injeksionom masom, postiže se bolja veza objekta i terena.

Vezno injektiranje se primenjuje kod podzemnih objekata i betonskih brana.

Kod hidrotehničkih objekata i okana pod pritiskom, skoro uvek se izvodi vezno injektiranje i to do dubine 0,5-1 m, zavisno od dimenzija objekta, broja i rasporeda bušotina. Injekcioni pritisak je obično jednak unutrašnjem pritisku, koji će vladati u hidrotehničkom objektu pri njegovoj eksploataciji.

Osnovni zadatak veznog injektiranja je da se u zoni terena gde su najveći uticaji objekta na teren i obrnuto, poboljšaju mehanička svojstva stenskih masa. Pored toga, veznim injektiranjem smanjuju se uticaji podzemnih voda na objekat i vodopropustljivost terena.



Sl.22:-Vezno injektiranje

1.1.3. Zaptivno injektiranje

U cilju sprečavanja kretanja podzemnih voda, zaptivanjaporoznosti u stenskoj masi izvodi se **zaptivno injektiranje**. Kao mera može imati privremeno ili trajno dejstvo.

Injekcione mase su višekomponentne, tj. kombinacija gline, cementa i vode. Ovim masama treba sprečiti kretanje vode, i nije potrebno da imaju velike čvrstoće. Dovoljno je, sa stanovišta zaptivanja, da je njihova čvrstoća takva da ih pritisak vode i njeno kretanje ne razori. Najčešće težinsko učešće cementa je oko 75%, a bentonita do 30%.

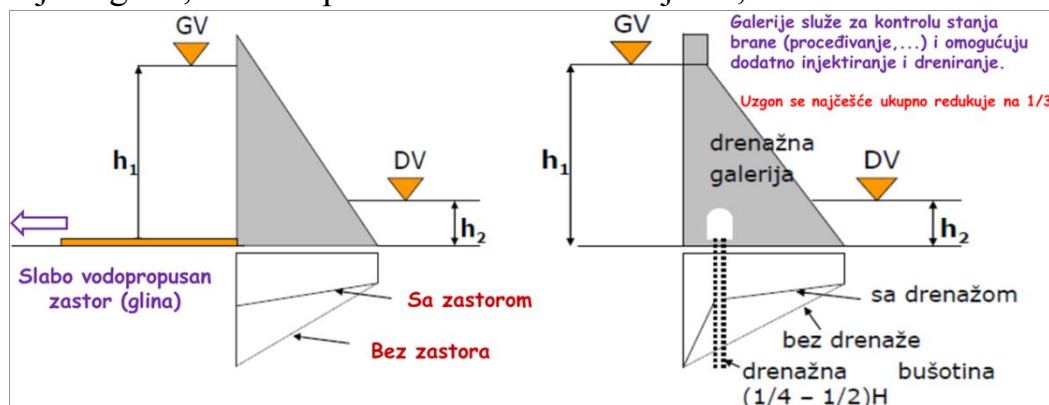
Tiksotropne mase, u odnosu na cementne, su povoljnije jer su penetrativnije i ekonomičnije.

Kod visokih brana, zaptivno injektiranje ima veliku primenu. Za ove objekte izvode se injekcione zavese koje zadobijaju nazive u zavisnosti od njihovog položaja u odnosu na branu. Prema tome one mogu biti:

- dubinske (ispod tela brane);
- bočne (u bokovima brane);
- obodne (po obodu akumulacionog objekta);

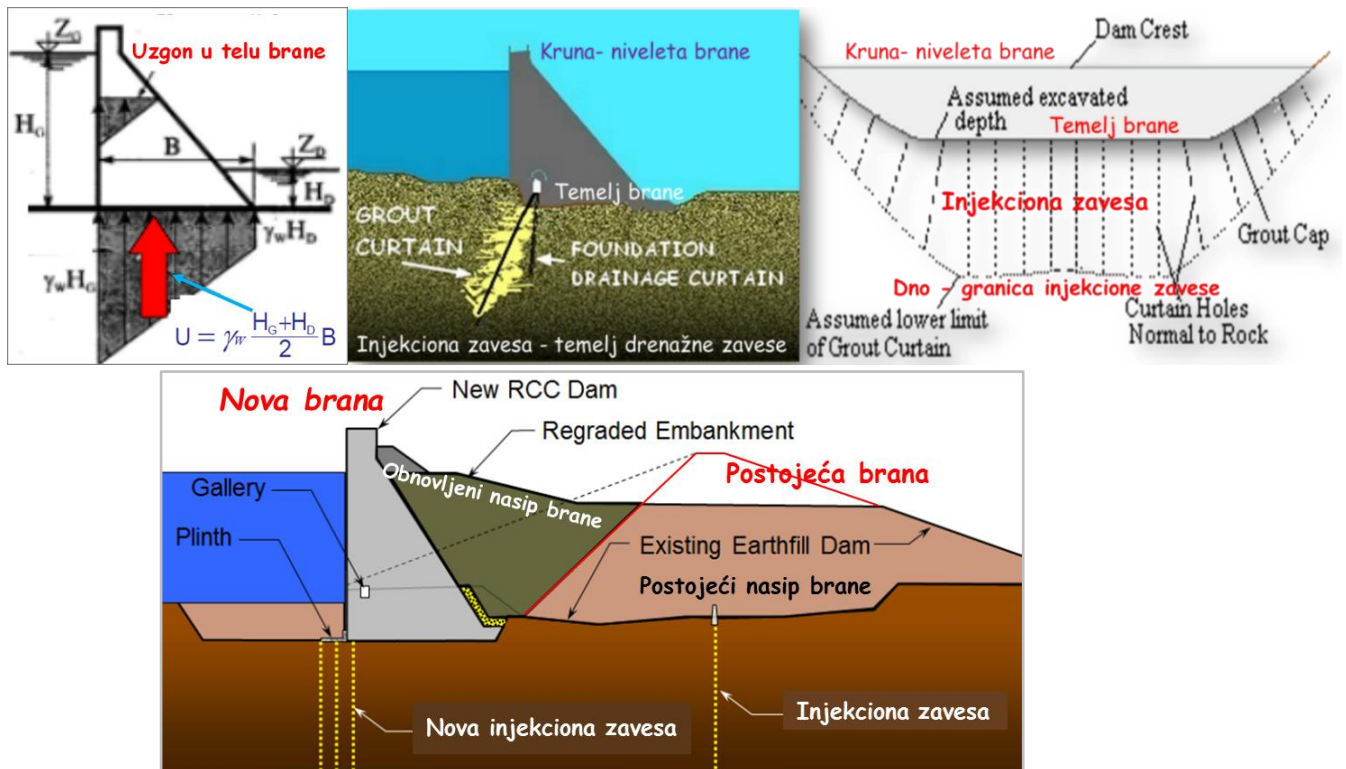
Svrha izvodjenja injekcionih zavesa je:

- ◆ smanjenje gubitka vode iz akumulacije, na mestu brane i iz akumulacionog bazena uopšte;
- ◆ sprečavanje štetnog uticaja filtacionih tokova vode, ispod i oko brane. Time se onemogućuje iznošenje sitnih čestica iz betona i stenske mase i sprečavaju štetni procesi koji bi time bili izazvani;
- ◆ smanjenje uzgona, čime se povećava stabilnost objekta;



Sl.23:-Zaptivno injektiranje

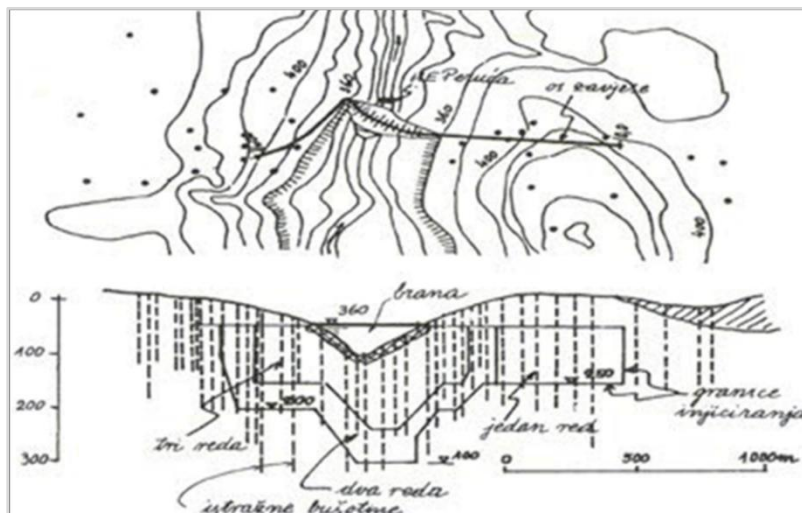
U tehno-ekonomskom smislu, injekcione zavese su veoma komplikovani tehnički objekti, a u ekonomskom pogledu su vrlo skupi. Elementi svake zavese moraju biti prilagođeni specifičnostima konkretnog objekta i geološke građe terena.



Sl. 24:- Izvođenje i primena injekcionih zavesa na branama

Zavese prema dubini i vodonepropusnoj podlozi ispod objekta mogu biti:

- vezane i
 - lebdeće.
- Vezane zavese su izvedene do vodonepropusne, prirodne, sredine - sloja.
- Lebdeće ne dopiru do vodonepropusnog sloja, stim što se za kriterijum dubine dubinskih zavesa usvaja ona dubina na kojoj je vodopropustljivost $1 Lu$ (u nekim slučajevima 2 ližona).
- Za bočne zavese kritična dubina je ona na kojoj je vodopropustljivost $2 Lu$ (odnosno $4 Lu$: $1Lu = 1 \text{ lit/min/m}^2/1\text{MPa}$).



Sl.25:- Osnova nasute brane Peruća sa trasom i uzdužnim presekom injekcione zavese

| | | |
|---|--|---|
| <p>➔ NEDOSTATAK TEHNOLOGIJE ZA IZVOĐENJE OBLOGA</p> | <p>➔ TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA BETONSKE OBLOGE NE OMOGUĆUJE ODGOVARAJUĆU SARADNJU IZMEĐU OBLOGE I STENSKOG MASIVA</p> | <p>☐ SVI OVI PROBLEMI REŠAVAJU SE INJEKTIRANJEM</p> |
| | <p>➔ U TEMENU OSTAJE PRAZAN PORSTOR</p> <p>➔ PUKOTINE U STENI STVORENE NAKON EKSPLOZIJE OSTAJU NEZATVORENE</p> | |
| <p>➔ TIPOVI INJEKTIRANJA</p> | <p>➔ Injektiranje za popunu - kontaktno, sl. 26.a.</p> <p>➔ Konsolidaciono injektiranje, sl. 26.b.</p> | |
| <p>➔ INJEKTIRANJE ZA POPUNU - KONTAKTNO sl.26.a.</p> | <p>ZADATAK</p> <p>➔ INJEKCIJONA MASA</p> | <p>☐ POPUNJAVA PRAZAN PROSTOR IZMEĐU OBLOGE I STENE, sl.26.a.</p> <p>☐ RADI SE OD CEMENTNOG MALTERA</p> <p>☐ RAZMERA MALTERA (CEMENT + PESAK + VODA) JE 1:3:1 I 1:1:1</p> |
| | | <p>Sl.26. Šema lokacije bušotina za injektiranje:</p> <p>a - ispunja;</p> <p>b - konsolidacija;</p> <p>1 - betonska obloga;</p> <p>2 - ispunja od kamena;</p> <p>3 - štucevi;</p> <p>4 - dilatacija između prstenova;</p> <p>5 - bušotine za konsolidaciono injektiranje.</p> |

Sl.26.- Šema lokacije bušotina za injektiranje: a - ispunja; b - konsolidacija; 1 - betonska obloga; 2 - ispunja od kamena; 3 - štucevi; 4 - dilatacija između prstenova; 5 - bušotine za konsolidaciono injektiranje.

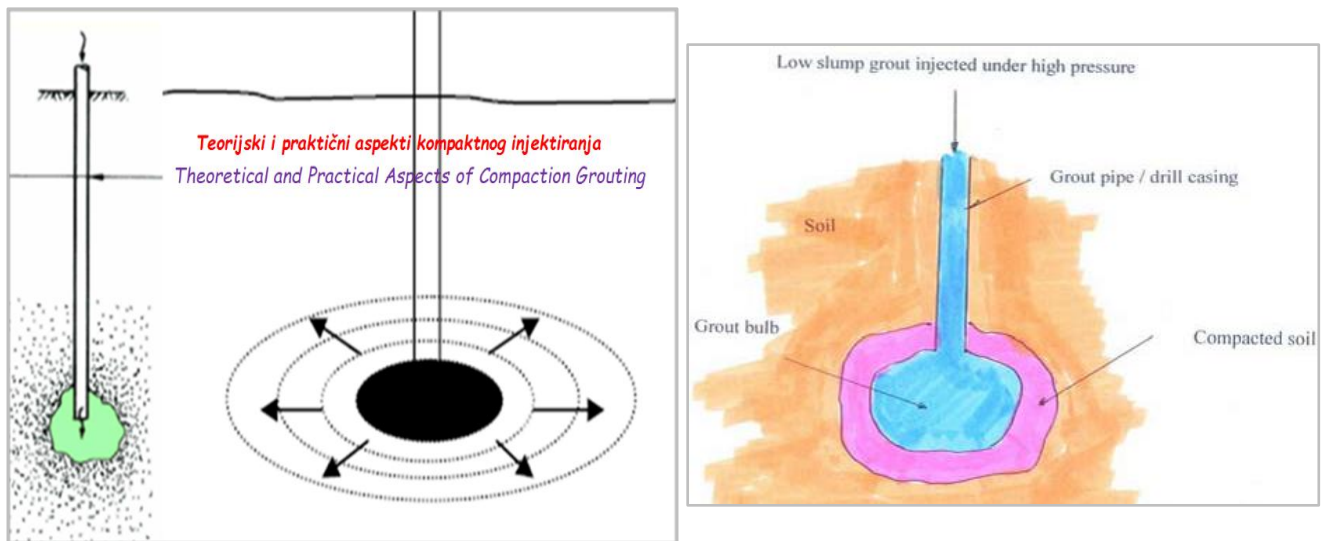
Zadatak konsolidacionog injektiranja može biti, sl.26.b.

1.1.4. Konsolidaciono (kompaktno) injektiranje

Konsolidaciono (kompaktno) injektiranje je jedna od metoda mehaničkog poboljšanja tla zbijanjem u dubinama. Koristi se kao metoda za poboljšanje svojstva tla, odnosno povećanje gustine i nosivosti tla zbijanjem. Metoda se zasniva na utiskivanju injekcione smese pod velikim pritiskom u tlo, kako bi se ojačale oslabljene formacije rastresitog tla, pa je za takav proces povezivanja čestica tla u upotrebi termin "*Compaction grouting*", odnosno "*Kompaktno (konsolidaciono) injektiranje*". Godine 1980. američko društvo građevinskih inženjera dalo je definiciju za konsolidaciono injektiranje:

"Konsolidaciono injektiranje - injektiranje cementnom smesom za sleganja manja od 25 mm. Za dobro cementirano tlo potrebna je određena količina prašine radi plastifikacije materijala, odnosno odgovarajuće količine peska radi razvijanja unutrašnjeg trenja. Cementna smesa ne ulazi u pore tla, već se formira kao homogena masa, kojom možemo kontrolisano zbijati rastresita tla, koristiti je za kontrolisano izdizanje objekata ili koristiti je za oboje".

Godine 1980., ASCE komitet za injektiranje definisao je kompaktno injektiranje kao tehniku injektiranja, gde materijal za tlo-cementnu podlogu sa sleganje manjim od 25 mm (1 inča) koji se sastoji od dovoljnih veličina mulja kako bi se osigurala plastičnost zajedno s dovoljnim veličinama pijeska za razvoj internih trenje ubrizgava se pri vrlo visokim pritiscima, a da ne ulazi u pore tla, ali ostaje u širenju mase oko tačke ubrizgavanja i time daje kontrolisano zbijanje okolnog labavog tla ili davanje kontrolisanog pomeranja pomak za podizanje nadzemnih objekata (sl. 27).



Sl.27:- Šematski prikaz kompaktnog injektiranja

Konsolidacija stenskog masiva:

- Zadatak: popunjava pukotine u steni i na kontaktu stene i obloge, poboljšava fizičko - mehaničke karakteristike stenske mase u blizini obloge;
- Sastav injekcione mase: injekcionu masu čini voda + cement, razmera cementa i vode je 1:1 do 1:10;
- Raspored bušotina je simetričan po konturi obloge. Kod betoniranja obloge ostavlja se „štuc“ na mestu budućih injekcionih bušotina;
- Dubina bušotina zavisi od dubine stene koja je oštećena eksplozijom (sl.26.b) varira između 0.5 do 2 m.

Pprednaprezanje obloge pripada tipu konsolidacionog injektiranja. Izvodi se pod velikim pritiskom od 10 ... 25 atm.

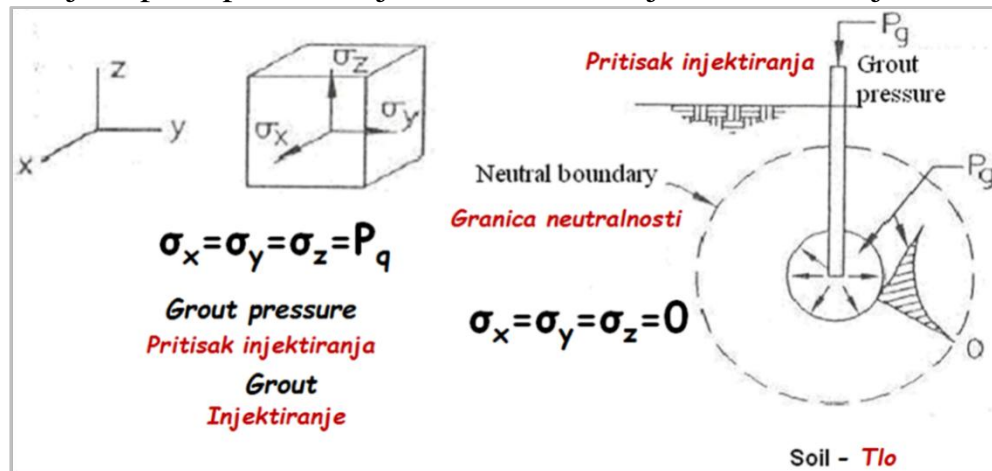
→ **Teoretski pristup**

Kritična tačka u primeni postupka kompaktnog injektiranja je taloženje injekcione mase pri širenju loptaste mase u blizini tačke ubrizgavanja. U slučaju da je upotrebljena injekciona masa previše pokretna (*niska viskoznost*), može doći do hidrauličnog loma okolnog zemljišta, što se može izgubiti kontrola nad postupkom sabijanja. Štaviše, to može dovesti do oštećenja nadzemnih ili podzemnih objekata.

Kompaktno injektiranje uspešno se koristi u gotovo svim vrstama tla, iako se moraju obezbediti posebna razmatranja za rad u mekim glinama gde će sporo odvodnjavanje verovatno izazvati visok porni pritisak koji zahteva poseban tretman.

Slika 27 prikazuje teorijski opis procesa koji pretpostavlja da bi injektirane mase uglavnom bile sferične, i radijalno zgušnjavanje injektiranog tla u svim pravcima. Prvi izveštaj koji opisuje stvarni mehanizam, obezbeđujući i podatke koji su izvedeni iz iskopavanja ispitnih mesta injektiranja, uradili su Brown i Varner. U ovim radovima veliki broj injekcionih masa je izložen i procenjen u istraživačkim demonstracijama u vezi sa stvarnim ili predloženim projektima i parametrima injektiranja koji utiču na postupak, bočne - lateralne sile koje utiču na susedne podstrukture ispitivanje promena gustine tretiranog tla. Gustine su testirane primenom standardnih testova penetracije ili konusnog penetrometra pre i nakon injektiranja tla.

Ako se pretpostavlja da je tlo homogeni i izotropni materijal, pritisci zatezanja unutar mase tla rasipati će se (*disipirati*) na sfernoj granici, usmereni na vrh injekcione cevi. Pritisak i naponi izazvani postupkom injektiranja biće na nuli na ovoj granici (*neutralna granica*). Stanje napona prikazano je na slici 28 za injekcioni materijal i za tlo.



Sl.28:- Stanje napona za injekcioni materijal i tlo

Naponi za tlo i materijal za injektiranje prikazani su na slici 29.

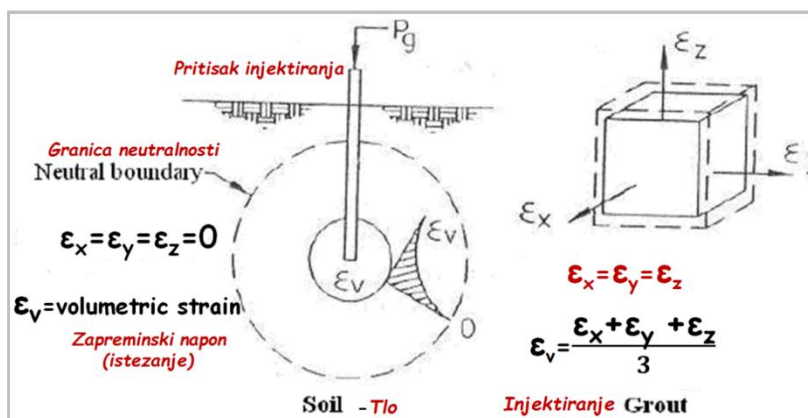
Za homogeni, linearni, elastični i izotropni materijal, zapreminski napon je zapremina injektiranja koja je podeljena sa zapreminom tla unutar neutralne granice i može se formulisati jednačinom 1.

$$\varepsilon_v = \frac{V_g}{V_{nb}} \quad (1).$$

gde je:

V_g = zapremina injekcione mase (*volume of grout*)

V_{nb} = zapremina tla unutar neutralne granice (*volume of soil within the neutral boundary*)



Sl.29:- Naponi u materijalu za injektiranje i tla

Teorijski i praktični aspekti kompaktnog injektiranja

Ako definišemo modul za raspodelu tla kao $E_b = \frac{P_g}{\varepsilon_v}$, (1)

tada je $\varepsilon_v = \frac{P_g}{E_b}$ (2)

Zamenjujući jednačinu 1 u jednačinu 2, dobijamo sledeći izraz.

$$\frac{V_g}{V_{nb}} = \frac{P_g}{E_b} \quad (3)$$

Povećanje gustine mase tla ($\Delta\gamma$) može se izraziti kao: $\Delta\gamma = \frac{\Delta_m}{V_{nb}}$

gde Δ_m predstavlja utisnutu (uvezenu) injekcionu masu.

Zamenjujući V_{nb} iz jednačine 3, dobija se: $\Delta\gamma = \frac{\Delta_m}{V_g} \cdot \frac{P_g}{E_b}$.

Međutim, uvedena masa se ne može posmatrati jednostavno kao umnožavanje zapremine mase po jediničnoj težini. Masa uneta u zapreminu (V_{nb}) koja efikasno povećava gustinu tla unutar (V_{nb}) je zapremina uvedene injekcione mase pomnožene sa gustinom samog tla. Da budemo eksplicitniji, pretpostavimo da se ubrizgavanje (injektiranje) mase u balon i da se koristi vazduh umesto injekcione smese - lepila. U tom slučaju što će se vazduh iz „balona“ istisnuti (zameniti) biće umnožavanje zapremine smese (tj. vazduha) gustinom tla. Kao što se može videti, efekat gustine injekcije biće nebitan. Zbog toga je:

$$\Delta_m = V_g \cdot \gamma_s$$

gde je γ_s jedinična težina tla na mestu injektiranja.

Zbog toga je povećanje gustine mase tla $\Delta\gamma = \gamma_s \cdot \frac{P_g}{E_b}$ or $E_b = \gamma_s \cdot \frac{P_g}{\Delta\gamma}$ (4)

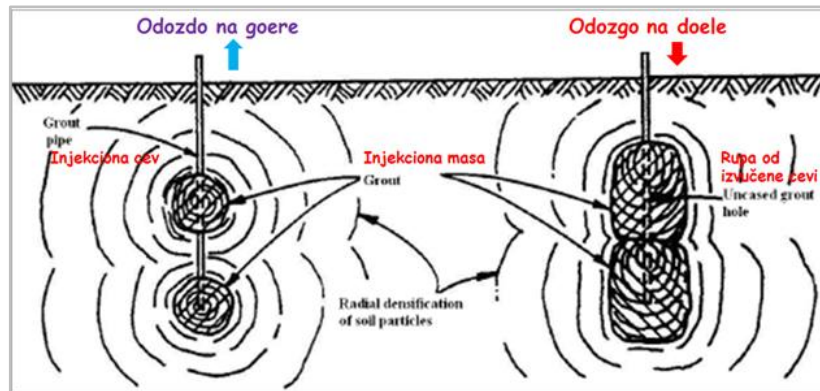
Za praktične potrebe gustoća tla, γ_s , može se uzeti kao konstanta. Svojtvo tla, E_b , po definiciji, predstavlja odnos između zapremine i pritiska injekcione mase.

Kompakcioni pritisci za zatezanje primenjuju se u različitim i odgovarajućim vrstama tla. Povećanje gustine tla prikazano je u tabeli 1.

Tabela 1- Vrednosti modula rastresitosti materijala za različite vrste tla

| Vrsta tla | Vrsta tla | Gustina tla, kg/m ³ | Pritisak injektiranja, kPa | Povećanje gustine, % | Modul rastresitosti, E _b , kPa × 10 ⁶ |
|--|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|---|
| | Soil Type | Soil Density, kg/m ³ | Grouting Pressure, kPa | Increase in Density, % | Bulk Modulus, E _b , kPa × 10 ⁶ |
| Treset | Peat | 970 | 1500 | 0.30 | 4.8 |
| Meka glina / muljevita glina | Soft clay / silty clay | 1300 | 2000 | 0.20 | 19.5 |
| Srednje čvrsta glina / muljevita glina | Medium stiff clay/silty clay | 1450 | 3500 | 0.15 | 33.8 |
| Meki peščani mulj / glina | Soft sandy silt/clay | 1300 | 3500 | 0.15 | 30.3 |
| Srednje čvrsti peskoviti mulj / glina | Medium stiff sandy silt/clay | 1450 | 4100 | 0.10 | 59.5 |
| Rastresit glinoviti pesak / pesak | Loose silty sand/sand | 1300 | 4100 | 0.08 | 66.6 |
| Srednje gusti muljeviti pesak/pesak | Medium dense silty sand/sand | 1600 | 5500 | 0.07 | 125.7 |

Zbog pretpostavki o homogenosti, izotropiji, linearnosti i elastičnosti tla, potrebno je izvršiti potrebne izmene uzimajući u obzir vrstu i dubinu tla i nivoa napona kako bi se izbegli nedostaci tokom primene.

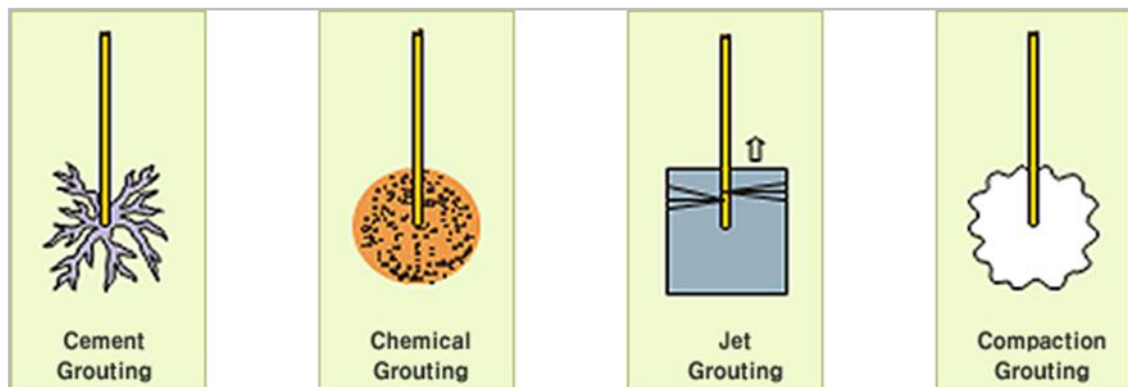


Sl.30:- Tehnika kompresionog injektiranja „odozdo na gore“ i „odozgo na dole“

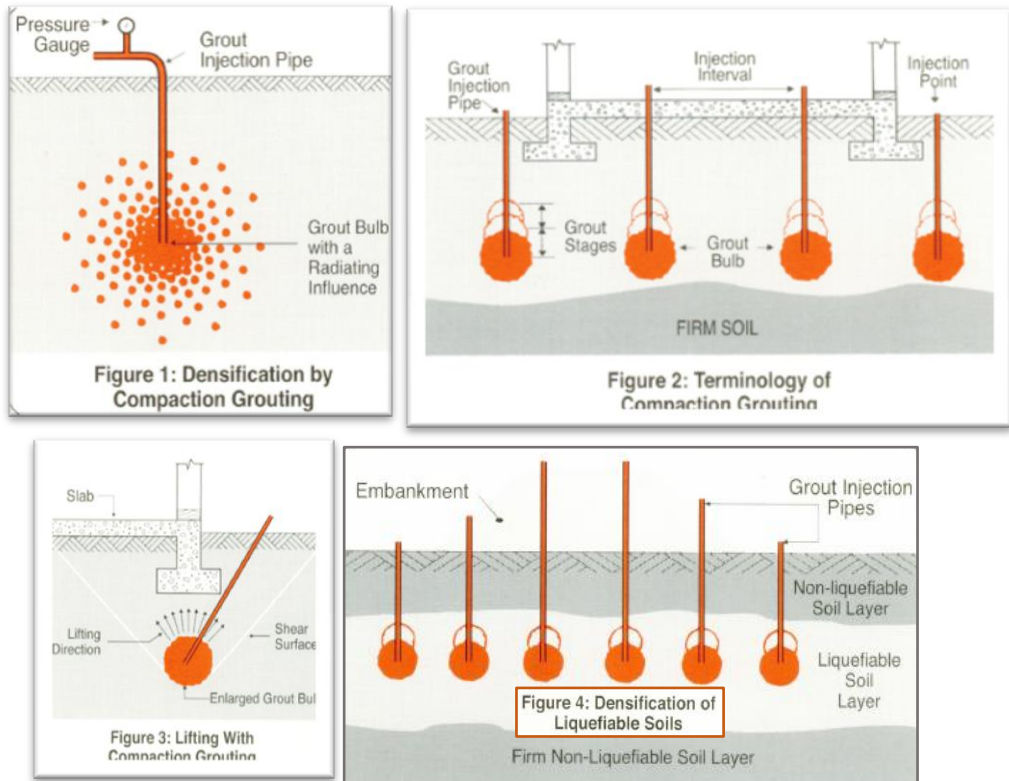
Napomena:rezime

Teorijski i praktični aspekti kompaktnog injektiranja, kao jedna od metoda poboljšanja tla (denzifikacije), objašnjena su područja primene, posebno njegova upotreba za ublažavanje uticaja u poslednjih 10-15 godina, a parametri tla i injektiranja su ukratko opisani. Naglašeno je da treba preduzeti posebne mere opreza u slučaju korišćenja ove tehnike u mekim glinama zbog nastanka visokih porednih pritisaka vode i da se otpornost na penetraciju tretiranog tla može vremenom smanjiti s obzirom da se bočni naponi smanjuju u dužem vremenskom periodu.

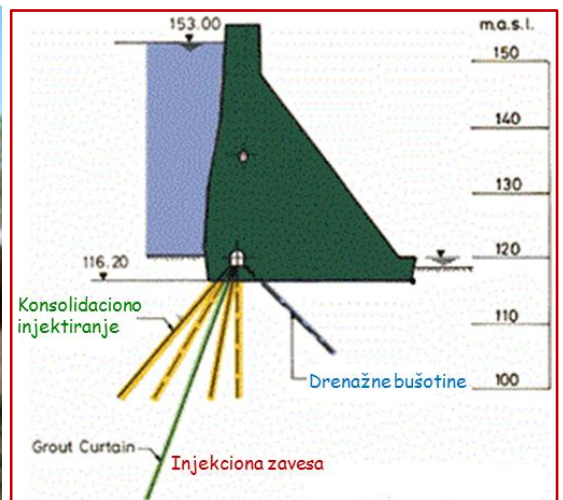
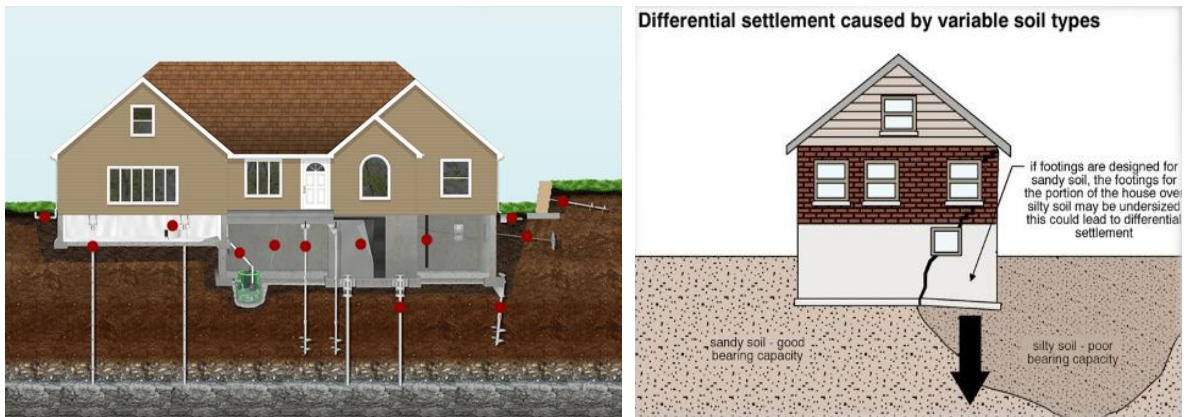
Ranih50-ih godina prošlog veka u SAD-u su počela istraživanja i primena konsolidacionog injektiranja. Na početku se obično koristila kao pomoćna tehnika već postojećim metodama za poboljšanje svojstava tla. Kasnije, ova metoda se pokazala vrlo dobrom i kod primene u urbanim sredinama prilikom tunelogradnje u mekim tlima. Tako, početkom 80-ih konsolidaciono injektiranje se koristi kao tehnika za poboljšanje terena pre izgradnje novih objekata, i korišćena je zajedno sa dinamičkim dubokim zbijanjem prilikom poboljšanja tla ispod jedne elektrane.



Sl.31:- Šema injekcionih metoda



Sl.32:- Šema injekcionih metoda



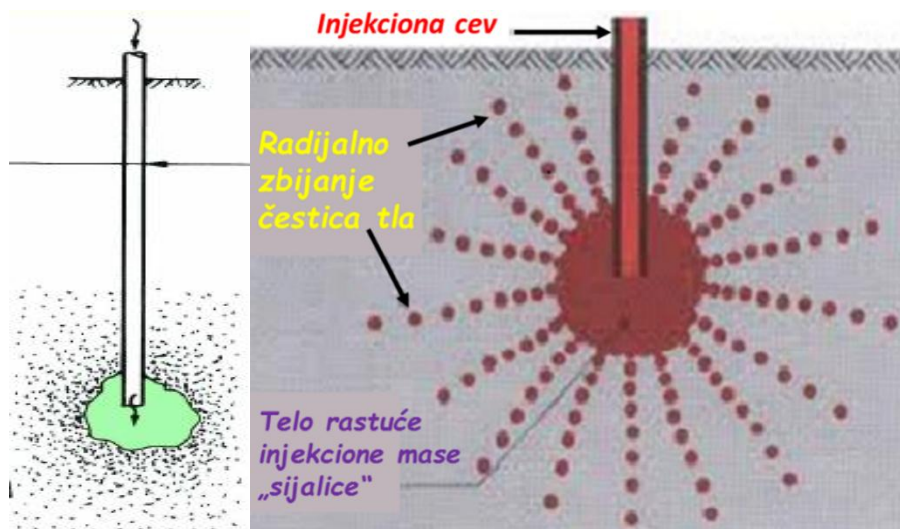
Sl.33:- Primena konsolidacionog injektiranja na raznim objektima

Konsolidaciono injektiranje primenjuje se za smanjivanje deformabilnosti stenske mase i za učvršćivanje slabe i rastršene stene iza obloge hidrotehničkih tunela kako bi se

kod novih hidrotehničkih tunela sprečilo otvaranje *zatezних* pukotina u betonu obloge. Kod već izvedenih hidrotehničkih tunela konsolidaciono injektiranje se sprovodi zbog sprečavanja nastajanja novih pukotina kao i proširenja postojećih pukotina u betonu obloge tunela. **Efekat konsolidacionog injektiranja** najveći je u jako razlomljenim stenama sa malim modulom deformabilnosti. Što je modul deformabilnosti neporemećene stene veći, to je i efekat kojemu se postiže konsolidacionim injektiranjem manji. U praksi se modul deformabilnosti prirodne stene teško može povećati na više od 8.000 MN/m^2 .

Konsolidacionoinjektiranje obuhvata postupke ispunjavanja pora i pukotina u tlu ili steni muljevitim rastvorima ili suspenzijama raznih veziva i punila. Izvodi se na taj način da se u prethodno izvedene bušotine u tlu ili steni ubrizgavaju navedene smese (suspenzije, rastvori), dok se ne postigne određeni "pritisak injektiranja" koji raste kako raste otpor proticanja suspenzije kroz pukotine i pore u tlu ili steni. Materijali za injektiranje tla ili stene su: smeše cementa, gline ili bentonita sa peskom i vodom.

Dakle, metoda konsolidacionog injektiranja koristi se u situacijama kod kojih je došlo do slabljenja tla bilo zbog delovanja antropogenog faktora (čoveka) ili zbog prirodnih procesa u zemlji, odnosno pojava urušavanja u tlu. Takođe se može primieniti kao ojačanje postojećih temelja nekog objekta, za izravnavanje i izdizanje slegnutih terena pod opterećenjem, pripremu terena za građenje budućih objekata i sl. Glavni, osnovni cilj konsolidacionog injektiranja jeste zbijanje, odnosno povećanje gustoće i čvrstoće oslabljenih formacija tla. Ovaj cilj se postiže utiskivanjem injekcione smese kroz cilindrične injekcione cevi, kada dolazi do širenja injekcione smese i zbijanja okolnog tla. Novoformirano telo konsolidacionim injektiranjem je uglavnom kuglastog oblika prečnika oko **1 m** ili više što zavisi od uslova u tlu (sl.34).



Sl.34:- Telo formirano konsolidacionim (kompaktnim) injektiranjem.

Prilikom utiskivanja injekcione smese u tlo, formirano telo se radijalno širi što izaziva i plastične deformacije u zonama kontakta injekcione smese i okolnog tla, dok se u zonama udaljenijim od tog kontakta čestice tla zbijaju, tj. povećava im se gustoća, pa su u tom području deformacije više elastične nego plastične.

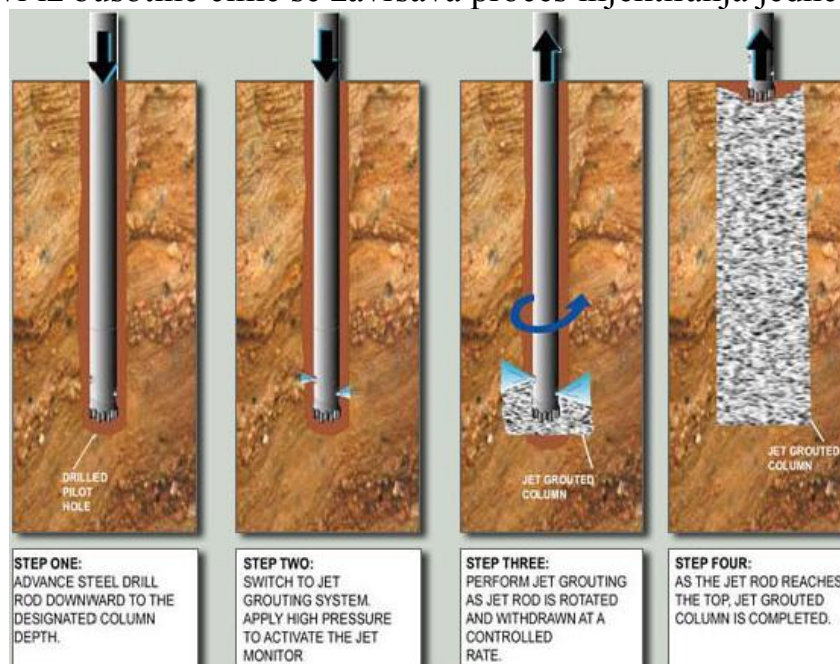
Utiskivanje injekcione smese, u zavisnosti od redosleda injektiranja, može se vršiti na dva načina. Jedan način je injektiranje *od vrha prema dnu*, a drugi *od dna prema vrhu* injekcione cevi. Injektiranje od dna prema vrhu, tj. izvlačenje cevi prema površini je najčešće korišćen način injektiranja, jer se pokazao jeftinijim i efikasnijim od suprotnog načina injektiranja, tj. utiskivanjem injekcione smese od vrha prema dnu. Izvođenje procesa injektiranja jedne bušotine odvija se u četiri koraka:

1. *Izrada bušotine namenjene za konsolidaciono injektiranje,*
2. *Umetanje injekcione cevi u bušotinu,*
3. *Utiskivanje injekcione smese u fazama i*
4. *Izvlačenje injekcione cevi nakon injektiranja.*

Pre početka konsolidacionog injektiranja, izbuši se bušotina određene dužine u koju se naknadno ubacuje odgovarajuća injekciona cev. Sledi utiskivanje injekcione smese u fazama npr. počevši od dna bušotine prema vrhu.

Završetkom prethodne faze injektiranja, cev se izvlači prema gore za određenu dužinu i sledi izvođenje sledeće faze - faza utiskivanja injekcione smese.

Poslednja faza injektiranja je pri samoj površini terena, kada počinje izvlačenje injekcione cevi iz bušotine čime se završava proces injektiranja jedne bušotine (sl.35).



Sl.35:-Proces injektiranja jedne bušotine izvlačenjem injekcione cevi od dna prema površini. Injekciona smesa se utiskuje cilindrično kroz injekcione cevi unutrašnjeg prečnika minimalno 5 cm, dok debljina cevi može biti po želji. Kako je redosled injektiranja bitan za pojedinu bušotinu, tako je raspored bušotina i razmak između injekcionih cevi od velike važnosti za čitav projekat kompacionog injektiranja. Geometrija - raspored i razmak između injekcionih bušotina. Geometrija injekcionih bušotina zavisna je od karakteristika tla, potrebne efikasnosti i ekonomske isplativosti.

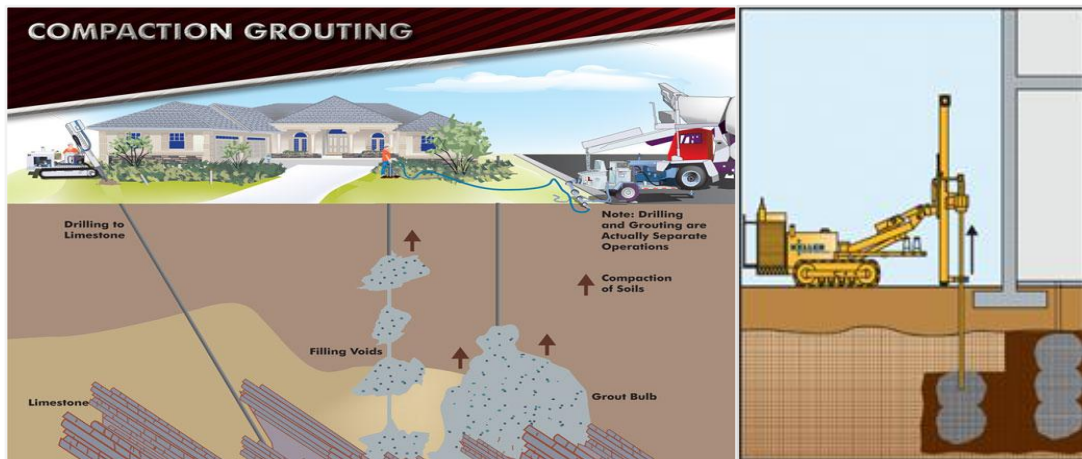
Veoma bitna je i instalacija injekcionih cevi u bušotinu, kako ne bi došlo do neželjenih problema unutar bušotine tokom injektiranja. Iz tog razloga cevi u bušotini spojene su čeličnim navojima i moraju biti dobro prilepljene uz zid - tlo, kako bi se usled jakog pritiska tokom injektiranja, izbegli problemi poput curenja i odbacivanja injekcione smese.

1.1.4.1. Primena konsolidacionog injektiranja

Primena metode konsolidacionog injektiranja je raznovrsna, iako je njena svrha u svakoj primeni ista, koristi se u raznim situacijama. Sve u svemu, konsolidaciono injektiranje se koristi radi poboljšanja svojstava tla kod kojih je došlo do slabljenja bilo zbog antropogenog (čovekovog) delovanja (geotehnički, građevinski, rudarski zahvati i sl.) ili zbog prirodnih procesa u tlu. Iz tih razloga, primena ove metode može se podeliti na *primarnu i sekundarnu primenu*.

Primarna primena konsolidacionog injektiranja preduzima se u situacijama kod:

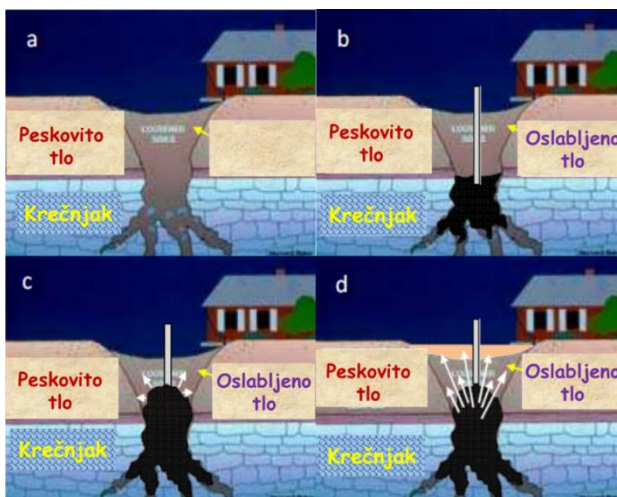
- *oslabljenja i propadanja (organsko raspadanje) prirodnih uslova u tlu,*
- *oslabljenja tla i pojave pukotina zbog loše ugradnje,*
- *oslabljenja tla nastala iskopavanjem u blizini objekta,*
- *oslabljenja tla nastala i uzrokovana pojavom urušavanja,*
- *oslabljenja tla nastala odvodnjavanjem i*
- *oslabljenja tla nastala i uzrokovana kvarovima na infrastrukturi (npr.vodovod,kanaliz).*



Sl.36:- Prikaz izdizanja i poravnavanja površine nadsloja iznad urušenog tla konsolidacionim injektiranjem.

Na slici 37 može se videti primena konsolidacionog injektiranja u situaciji u kojoj je došlo do urušavanja tla. Utiskivanjem injekcione smese u tlo, postiže se izdizanje terena i izravnavanje površine u sledećim fazama:

- a. prikaz urušenog tla,
- b. utiskivanje injekcione smese u tlo,
- c. zbijanje nadsloja konsolidacionim injektiranjem i
- d. izdizanje i poravnanje površine nadsloja.

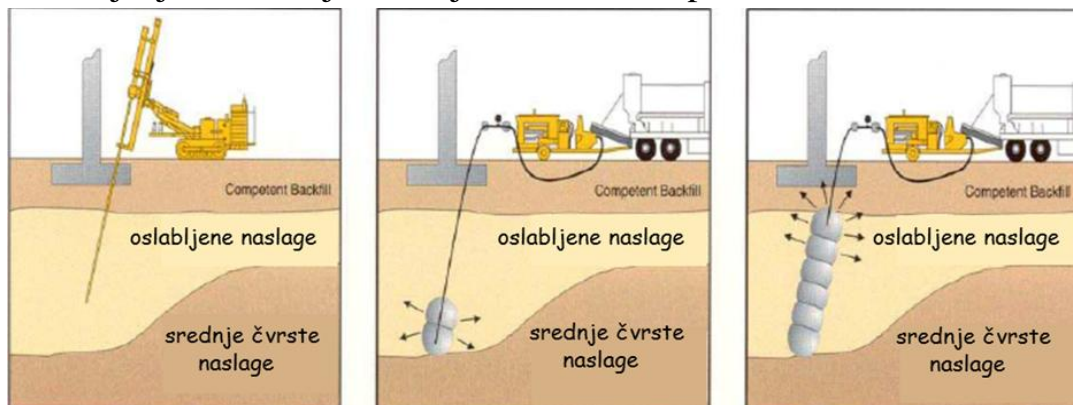


Sl.37:- Prikaz izdizanja i poravnavanja površine nadsloja iznad urušenog tla konsolidacionim injektiranjem.

Konsolidaciono injektiranje, kao oblik sekundarne primene, može se koristiti i kod izravnjavanja slegnutih terena ispod građevina, kao priprema budućeg gradilišta, odnosno poboljšanje svojstava tla pre gradnje novih objekata (kao konstrukcioni element), kao potpora već postojećim temeljima (sl.38) i sl. Primena konsolidacionog injektiranja u svrhu pripreme terena gradilišta koristi se isključivo u uslovima u kojima je svaka druga metoda ekonomski neisplativa.

Okolnosti kod kojih se konsolidaciono injektiranje može upotrebiti kao priprema gradilišta za gradnju novih objekata su:

- prisutnost tankih i dubokih "problematičnih zona" koje bi mogle izazvati velika sleganja tokom novih opterećenja ili budućih seizmičkih aktivnosti
- prisutnost oslabljenog nadsloja u jako promenjivim krečnjačkim naslagama, gde duboko temeljenje u zdravoj steni nije ekonomski isplativo.



Sl.38:- Ojačanje tla ispod postojećih temelja objekta i faze injektiranja.

Proces konsolidacije sa povećanom nosivosti koriste razne firme, zasniva se na injektiranje i širenje smole. Svrha tih procesa je da se poveća **stabilnost tla**, kako bi se poboljšala svojstva mehaničke otpornosti i dobio efekt **podizanje terena** i objekata koji su u njemu temelje.



Sl.39:- Ojačanje tla ispod postojećih temelja objekta i faze injektiranja.

Studije u ispitnim poljima, pokazale su kako normalne tehnike ubrizgavanja ne mogu rešiti sve probleme koji su rezultirali lomom i oštećenjem.

Potreba za konsolidacijom tla u homogenu strukturu podrazumeva usvajanje mera i postupaka koji mogu upravljati injekcionom masom na više načina u skladu sa karakteristikama tla i postojećih razlika u interakciji tlo - temelj .

Metoda ubrizgavanja zove se smola JET stvorena je kako bi se zadovoljile potrebe, gde god su potrebne za konsolidaciju i/ili odstranjenje vode u dubini tla.

Za širenje smole koriste se mehaničko - hemijska svojstva i razlikuju se prema različitim stepenima zgušnjavanja u tlu koje želimo postići i od svojstava temelja. Važno je projektovanje geometrije i šeme za injektiranje, vrstu smole koja se koristi i pozicioniranje podizanja senzora.

Posebno usvajanje određenih smola omogućava učvršćivanje tla pretežno zasićenjem ili pukotinama zbog ispiranja procedne vode.

U finije veličine zrna materijala, tehnike ubrizgavanja omogućuju stvaranje više gustih struktura, visoka krutost koja, zajedno sa širenjem delovanja smole, pridonose značajno povećanju geotehničkih karakteristika obrađenih materijala.

U takvim tlima vidljivo je superiornost sistema u upoređenju sa normalnim tehnikama injektiranja jer omogućuje programiranje toka, količinu i dubinu emisija smole.

Ekspanzivna smola sastoji se od smese sa kontrolisanim pritiskom ubrizgava proizvoda. Reakcija sastojci polimerizacije je brza: ona se javlja nakon nekoliko minuta na većinu te je u pratnji skućeni ekspanziju. *Konaćna ćvrstoća pene dobija se nakon nekoliko sati.*

Prednost: Tretman injektiranja smolama je minimalno invazivna i omogućuje delimićni ili potpuni popravak oštećenja: ojaćanje temelja, asfaltiranje stabilizaciju i podizanje, jaćanje zidova, punjenje šupljine, itd.

Ova vrsta poboljšanja tla ubrizgavanjem poliuretanskih smola, ekspanzivna - prema metodi, zahteva specijalizovanu stručnost i veliku veštinu. To se sprovodi samostalno ili sa drugim komplementarnim tehnikama (zamrzavanje, stvrdnjavanje, odvodnjavanje, ...).

1.1.4.2. Vrste i svojstva tla pogodna za primenu konsolidacionog injektiranja

Vrste tla u kojima se postižu dobri rezultati (efekti) primenom konsolidacionog injektiranja dele se na 5 kategorija:

⇒ Rastresita krupnozrna tla iznad i ispod nivoa podzemne vode

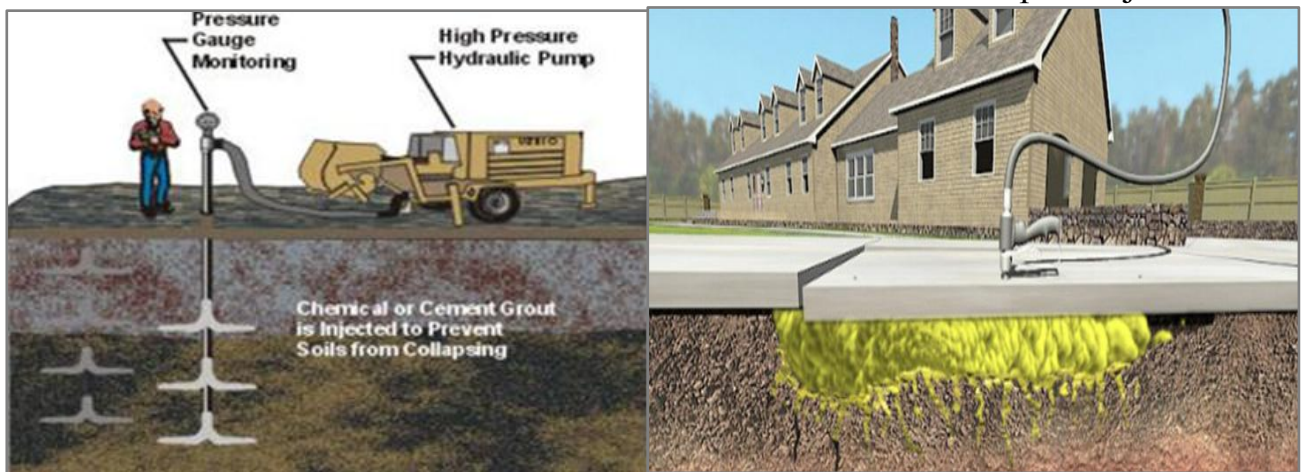
Tla okarakterisana ovom kategorijom su najpogodnija za upotrebu kompakcionog injektiranja. U ovakvim tlima se obićno javljaju peskovi ili šljunkovi sa sadržajem prašine i nekih glina. Broj udaraca, dobijeni SPT opitima, obićno se kreću izmenu 0 do 15 ili 20. U ovim tlima kompakciono injektiranje izvodi se bez obzira na postojeću gustoću i postojanje ili ne postojanje opterećenja.

⇒ Meka nesaturirana sitnozrnata tla

U ovim tlima se najvećim delom javljaju mulj i/ili prašina, te se kompakciono injektiranje može primeniti samo u slučaju da su tla nesaturirana. Zahvati u debelim saturiranim slojevima gline i prašine mogu biti i dodatni problem, odnosno dodatno ubrzati sleganje, pa se u takvim tlima ne bi smelo izvoditi kompakciono injektiranje. Vrednosti N - broja udaraca za meka nesaturirana sitnozrnata tla, dobijene SPT opitima, obićno se kreću izmenu 0 i 10.

⇒ *Kolapsivna tla*

Kompakciono injektiranje uspešno se primenjuje i u lesnim naslagama nastalim nanosima vetra u suvim područjima. Problem kod ove kategorije može biti saturacija tla izazvana loše izvedenim drenažnim sistemom na nekom određenom području.



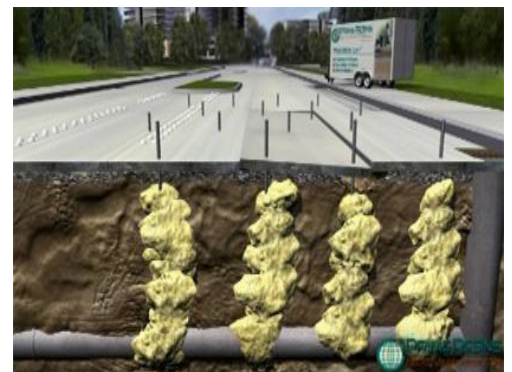
Sl.40:- Ojačanje tla ispod postojećih temelja objekta i faze injektiranja.

⇒ *Porozna tla*

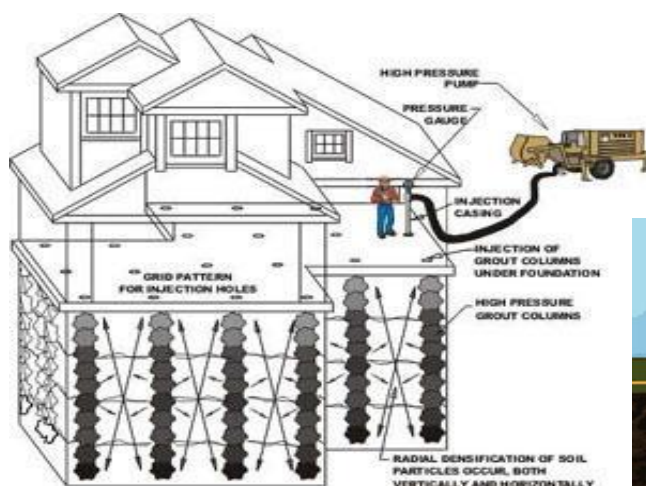
Popunjavanje pora unutar tla ili stena kompakcionim injektiranjem je efikasnije od zapunjavanja pora žitkim smesama. Injekcione smese utisnute kompakcionim injektiranjem lakše je kontrolisati, pa se smese neće dodatno proširivati. Iz tih razloga se kompakciono injektiranje koristi i kod sanacije terena kod kojih je došlo do urušavanja pojavom unutrašnjih erozija u podzemlju.

⇒ *Tanki nepopravljivi slojevi praćeni određenim opterećenjem*

Tla mogu biti suva ili saturirana prašina, glina ili organsko tlo (treset), ali debljine naslaga ne bi smele biti manje od 2 m a ti slojevi trebaju nalaziti 2 m ispod opterećenja izazvanog objektima na površini.



Sl.41:- Ojačanje tla ispod postojećih objekata



Sl.42:- Praktična primena konsolidacionog injektiranja na ugroženi stambeni objekat

1.1.4.3. Projektovanje i kontrola kvaliteta konsolidacionog injektiranja

Parametri projektovanja

Pre početka izvođenja konsolidacionog injektiranja, treba izvesti istražne radove na terenu kojima se ispituju i utvrđuju karakteristike tla i stene, vrsta materijala, njihov položaj i fizičko - mehanička svojstva. Istražni radovi sprovedeni na terenu i u laboratoriji, prikazuju se geološkim i geotehničkim profilom, koji je nužno potreban za određivanje optimalnih parametara budućih zahvata, kao što je konsolidaciono injektiranje. Kao i u svim sličnim projektnim rešenjima, određivanje parametara uslovljavaju, osim karakteristika podzemlja, i ekonomska isplativost zahvata.

Važni parametri koji se uzimaju u obzir pri projektovanju radova koji se izvode konsolidacionim injektiranjem:

a) Razmak između injekcionih cevi

- razmak između cevi se kreće obično 1 i 5 m zavisno od uslova u tlu,
- manji razmak služi za postizanje veće konsolidacije blizu površine terena, pa gde je debljina nadsloja manjih dimenzija, razmaci su obično između 1,5 do 2.10 m i
- veći razmak se koristi kod većih debljina nadsloja (10 m), i gde su uslovi tla dobri što ne zahteva veliko poboljšanje tla, razmaci su obično između 2,40 do 3,0 m.

b) Redosled injektiranja

- prvi i najčešće korišćen način injektiranja je od dna prema vrhu izvlačenjem injekcione cevi,
- drugi način je utiskivanje injekcione smese počevši od vrha prema dnu bušotine.

c) Pritisak tokom injektiranja

- pumpe koje se koriste za konsolidaciono injektiranje trebaju omogućiti pritiske injektiranja i do 110 kN/cm².

d) Brzina injektiranja

- manje količine injektiranja u iznosu od 0,15 do 0,3 m³/min koriste se za injektiranje oslabljenih dreniranih tla blizu površine,
- srednje vrednosti u razmaku od 0,3 do 1,2 m³/min koriste se u uslovima slobodnog dreniranja i u suvim tlima i
- veće vrednosti od 1,2 do 4,0 m³/min koriste se u mekim raspucalim formacijama sa čvrstom krovinom.

e) Zapremina injekcione smese

- zapremina smese mora biti određena s obzirom na postizanje željenog efekta, jer ne sme se dogoditi preterano izdizanje terena,
- povećanje zapremine je moguće ukoliko se ne vide (postignu) željeni rezultati, tj. nedovoljno izdizanje terena,
- smanjenje zapremine primenjuje se ukoliko se uoči izdizanje već u ranim fazama Injektiranja,
- zapremina se određuje prema razmaku između injekcionih cevi unutar mreže bušotina i prema dužini faza injektiranja unutar bušotine.

f) Izdizanje

- pre injektiranja treba postaviti granice izdizanja površine terena odnosno objekata na površini,
- izdizanja se prate geodetski na površini, pa je potrebno pratiti i najmanja izdizanja u

višestrukim fazama injektiranja i

- kao dobar kriterijum izdizanja smatraju se vrednosti od 1,77 cm za ukupno izdizanje, ili 0,25 cm za izdizanje pojedine faze injektiranja;

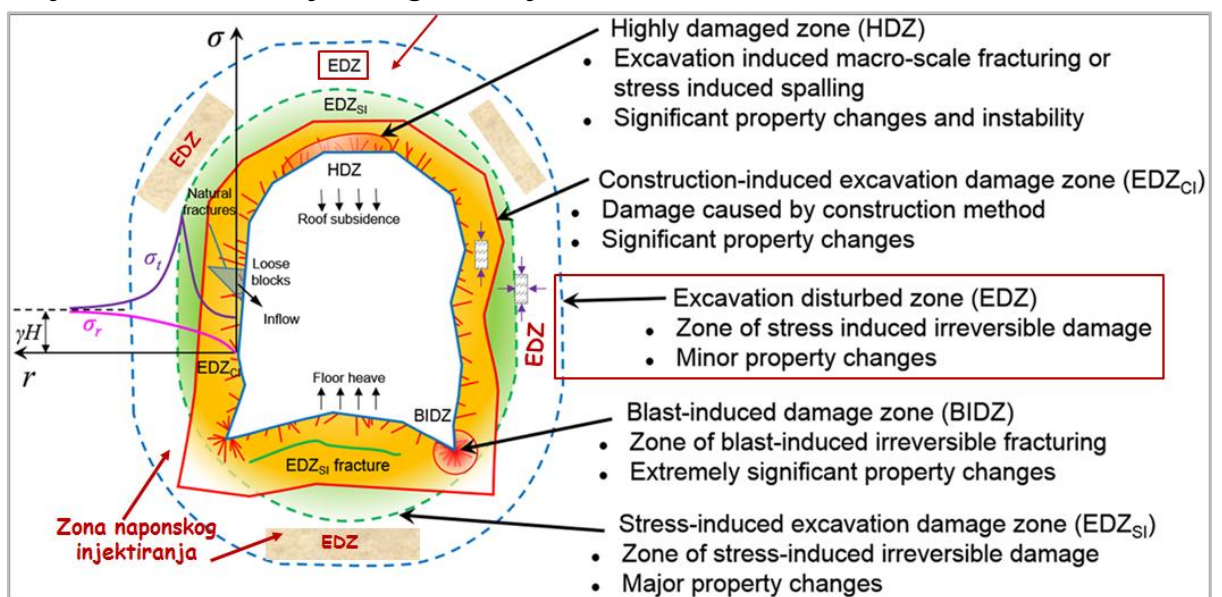
g) Injekciona smesa

- materijal kompacione smese trebao bi da sadrži dovoljno finih čestica radi plastifikacije smese, te dovoljno zrnastih materijala radi poboljšanja unutrašnjeg trenja
- komponente injekcione smese su obično pesak/peskovito tlo, i razne primese, kao što su cement, lebdeći pepeo, bentonit, krupni agregat;
- glavna komponenta injekcione smese je pesak odnosno peskovito tlo koji se koristi sam ili u kombinaciji sa cementom kao primesom;
- ukoliko je prirodni i dobro grannulisan pesak teško dostupan, može se koristiti i veštački proizveden materijal u kombinaciji sa lako dostupnim materijalima;
- cement se koristi kao primesa radi povećanja čvrstoće injekcione smese;
- lebdeći pepeo se koristi takođe kao primesa kako bi se dobila odgovarajuća finoća smese ili kao zamena za cement;
- učešće bentonita u smesi svedeno je na minimum, preterana upotreba bentonita uzrokuje ponašanje smese kao konzistente masti i
- šljunak i ostali krupni agregat sa malim zrnima valjčastog oblika (veličine ispod 1,7 cm) se takođe mogu koristiti kao primesa u injekcionim smesama.

1.1.5. MLAZNO (naponsko) INJEKTIRANJE (jet grouting)

Mlazno injektiranje - injektiranje pod velikim pritiskom, pri čemu smesa izlazi iz [mlaznice](#) smeštene na [bušećoj](#) garnituri.

Mlazno injektiranje, tj. *Jet Grout*, je uobičajeni naziv za svaki izvedeni postupak gde se koristi izuzetno visok pritisak (od 300 do 700 bara, tj. 30 do 70 MPa) za unos energije u fluid koji se utiskuje u tlo brzinom od 250 do 330 m/s sa ciljem razbijanja strukture tla, premeštanja čestica, kao i njihovog mešanja sa cementnom smesom.



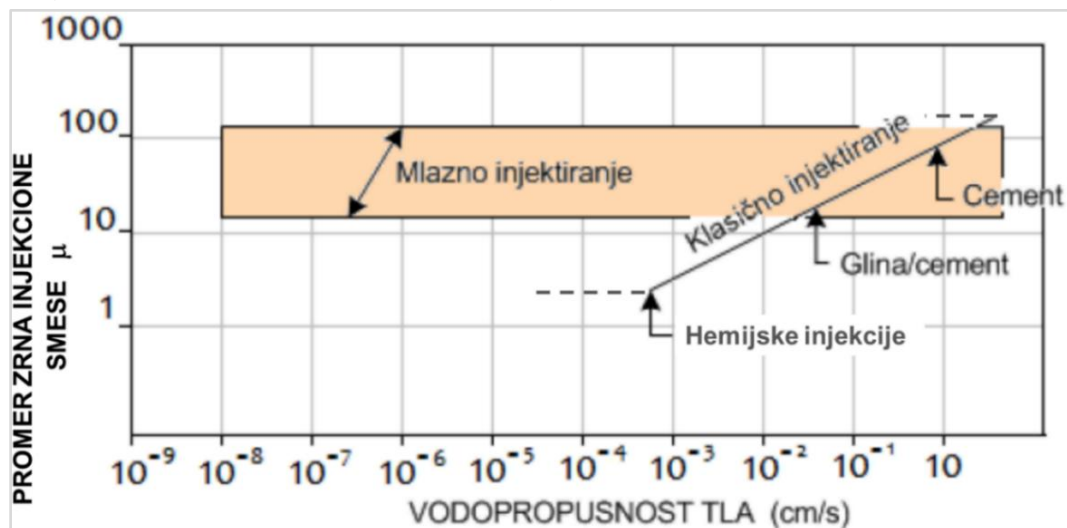
Sl.43:- Pregled različitih zona oštećenja oko podzemnog iskopa, gde je σ_r radijalni napon, σ_t je tangencijalni napon, γ je prosečna sila opterećenja nadslojeva, a H je dubina iskopa, EDZ - Podni beton (beton). Zona stresa poremećena od iskopavanja uključuje nepovratna oštećenja. manje promjene imovine

- Mlaznim injektiranjem u tlu se stvaraju valjkasta tela sastavljena od mešavine injekcione smese i čestica tla, koji su poboljšanih karakteristika u odnosu na prirodno tlo.
- Soilcrete (concrete).
- Pogodnom kombinacijom takvih valjaka (eventualno i izduženih panela) tla dobijamo razne konstrukcije koje mogu rešiti niz geotehničkih problema.
- Koristi se više od 40 godina. Prva primena mlaznog injektiranja datira iz 1970. god. u Japanu. U Evropi se pojavila tek 1976.

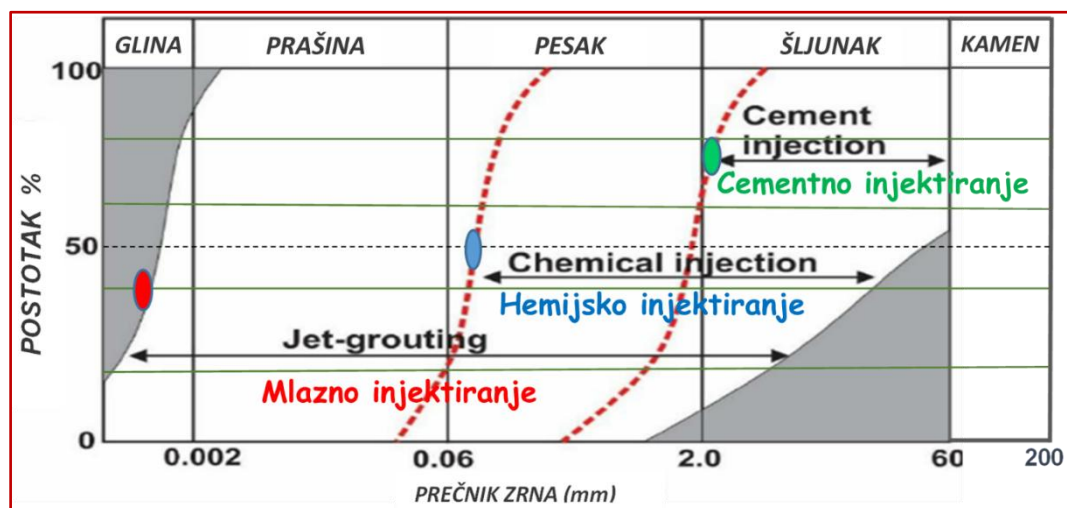
Tehnologija „mlazno injektiranje“ bitno se razlikuje od prethodnih. Njenom primenom totalno se razbija struktura tla, zato se čestice tla mešaju (in-situ) sa vezivnim sredstvom, kada nastaje homogenizovana masa poboljšanih mehaničkih svojstava.

Ova tehnologija se primenjuje kod raznih vrsta tla sa raznim injekcionim smesama:

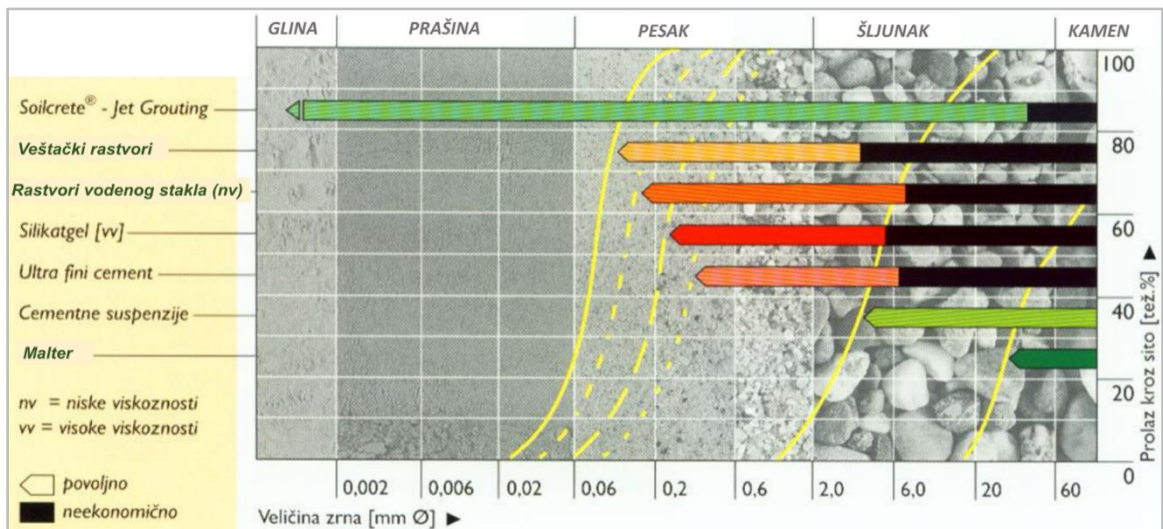
- vodo-cementne,
- vodo-cementno-bentonitne smese,
- u određenim slučajevima koristi se i
- kreč (čisti kreč, kreč sa cementom i dr.)



Sl.44:- Primenjivost injekcionih smesa u odnosu na vodopropusnost tla (Welsh i sar., 1986)



Sl.45:- Primenjivost injekcionih smesa u odnosu na prečnik čestica tla (Welsh i sar., 1986)



Sl.46:- Primenjivost injekcionih smesa u odnosu na prečnik čestica tla (Welsh i sar., 1986) Soilcrete postupka mlaznog injektiranja

1.1.5.1. Mlazno injektiranje - karakteristike

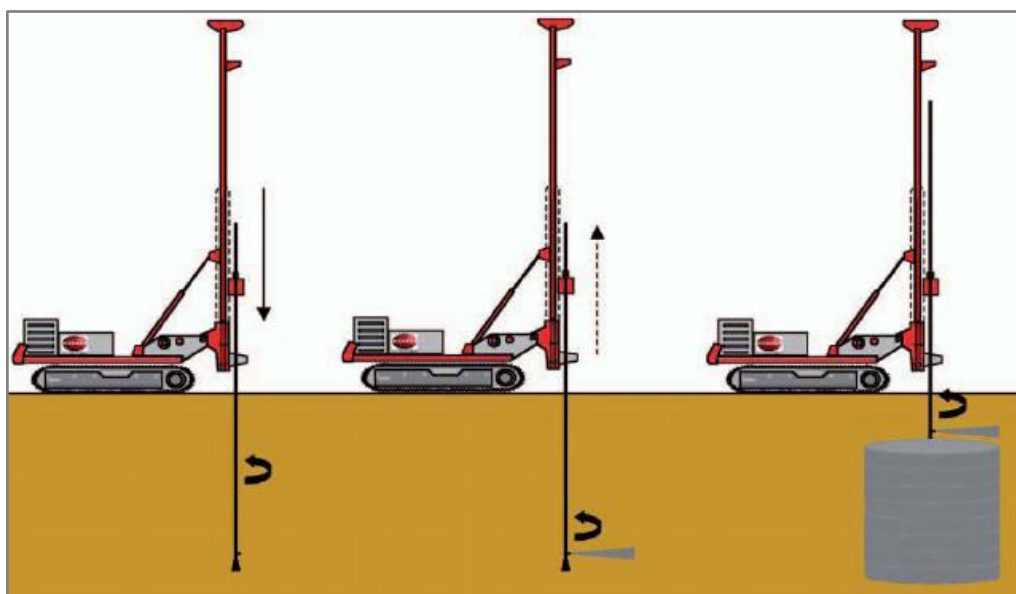
- ✓ koriste se ekstremno visoki pritisci: 30 -70 MPa (300 -700 bara);
- ✓ fluid se utiskuje u tlo brzinom 250-330 m/s;
- ✓ velika brzina fluida služi za razbijanje (rezanje) strukture tla, premeštanje čestica kao i njihovo mešanje sa cementnom smesom.

Tri su osnovna postupka izvođenja mlaznog injektiranja, a koja su ujedno i osnova za još

dvanaestak različitih varijacija. Osnovni postupci su:

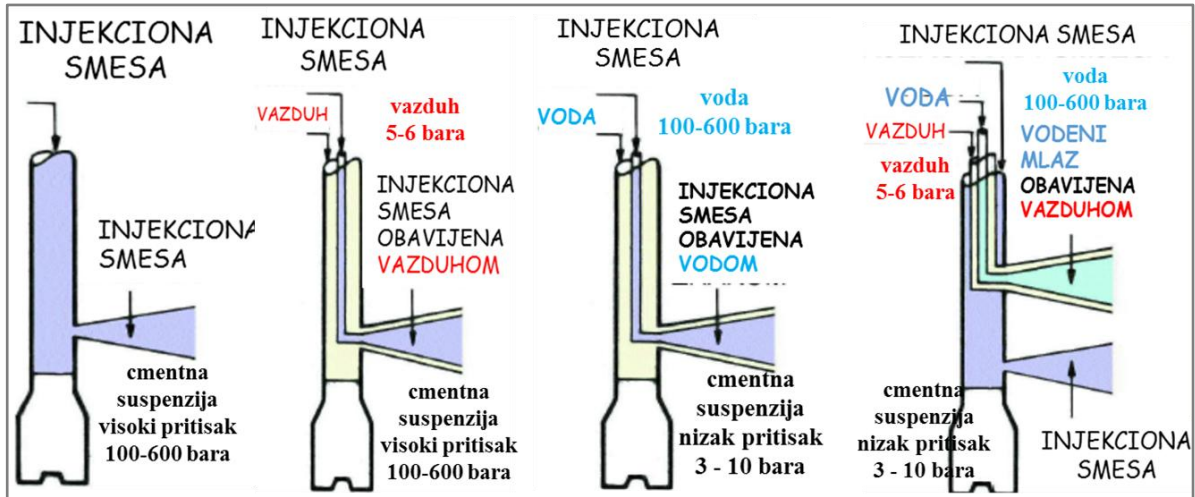
- ⇒ jednofluidni sistem (injekciona smesa),
- ⇒ dvofluidni sistem (injekciona smesa + vazduh ili injekciona smesa + voda) i
- ⇒ trofluidni sistem (injekciona smesa + voda + vazduh).

Sva tri sistema mlaznog injektiranja sastoje se od dve osnovne radne pozicije - izrada bušotine određene dubine i prečnika i izvođenje mlaznog injektiranja, sl.45.



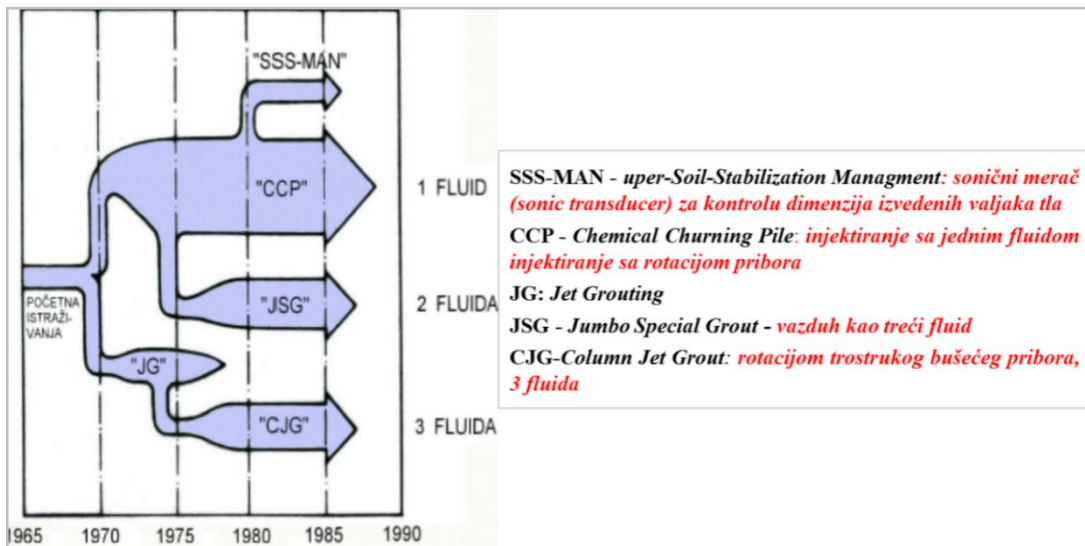
Sl.47:- Faze rada pri izvođenja mlaznog injektiranja

Prikaz razlika izvođenja mlaznog injektiranja sa jednim, dva i tri fluida



Sl.48:- Prikaz razlika izvođenja mlaznog injektiranja sa jednim, dva i tri fluida

Tok (hronologija) razvoja osnovnih sistema mlaznog injektiranja



Sl.49:- Hronologija razvoja osnovnih sistema mlaznog injektiranja

| | "CCP" - JEDAN FLUID Mešanje injekcione smese pod velikim pritiskom | "JSG" - DVA FLUIDA Mešanje injekcione smese obavijene vazduhom | "CJG" - TRI FLUIDA Delimično ispiranje materijala tla vodom pod pritiskom obavijene vazduhom i utiskivanje injekcione smese |
|--|---|--|---|
| ŠEMATSKI PRIKAZ pozicije radova | JEDNOSTRUKA ŠIPKE VISOKOTLAČNA PUMPA MJEŠAČ D 300-800 mm | DVOSTRUKA ŠIPKE ZRAČNI KOMPRESOR VISOKOTLAČNA PUMPA MJEŠAČ D 800-2000 mm | TROSTRUKA ŠIPKE KOMPRESOR PULVERIZUJKA PUMPA VISOKOTLAČNA PUMPA MJEŠAČ VODA D 1000-3000 |
| KARAKTERISTIKE IZVEDENIA RADOVA | - Podizanje pribora uz rotaciju - Horizontalno injektiranje pod visokim tlakom i mješanje čestica tla s injekcijskom smjesom | - Podizanje pribora uz rotaciju - Horizontalno injektiranje pod visokim tlakom injekcijske smjese obavijene zračnom strujom | - Podizanje pribora uz rotaciju - Utiskivanje mlaza vode obavijene zračnom strujom, pod visokim tlakom - Razbijanje strukture tla i njegovo djelomično ispiranje (izbacivanje na površinu) - Ubacivanje injekcijske smjese i mješanje s preostalim česticama tla |
| Pogodne vrste tla | Koherentni materijali, prah, pijesak | Koherentni materijali, prah, pijesak, šljunak | Koherentni materijali, prah, pijesak, šljunak |

Sl.50:- Uporedni prikaz mlaznog injektiranja sa jednim, dva i tri fluida (Miki i sar., 1984)

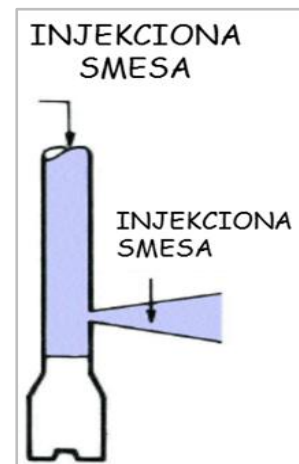
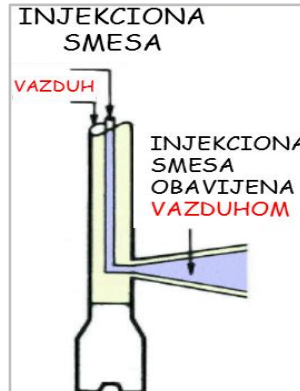
1.1.5.2. Parametri koji utiču na injektiranje i oprema

Jednofluidni sistem (5):

- pritisak injektiranja,
- broj i prečnik mlaznica,
- vodocementni faktor injektione smese,
- brzina podizanja pribora,
- trajanje rotacije

Dvofluidni sistem (5+2):

- pritisak i
- protok vazduha

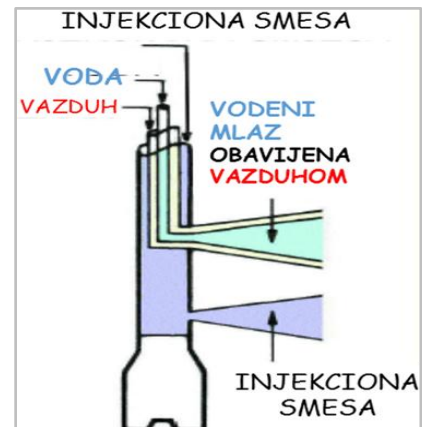


Trofluidni sistem (ukupno 10, tj. 5 kao i za jednofluidni sistem i 5 bitnih za režim vode i vazduha):

- pritisak vode,
- prečnik i broj mlaznica za utiskivanje vode,
- pritisak i protok vazduha

Ostali uticajni faktori

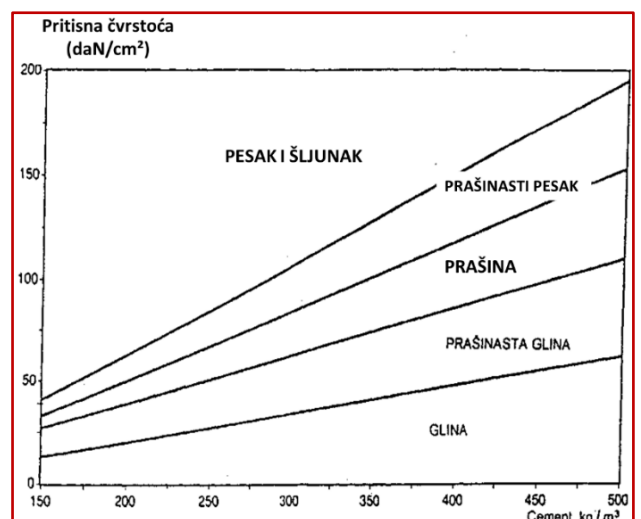
- vrsta, zbijenost, plastičnost, vlažnost tla;
- nivo podzemnih voda (NPV);
- količina cementa i
- utrošena energija.



Da bi se postigle dobre vrednosti (jednoosne čvrstoće injektionog tela izvedenog u tlu) potrebno je predvideti ugradnju odgovarajuće količine cementa. Odnos između čvrstoće i količine cementa injektiono ugrađenog u odgovarajući obim tla vidljivdat je na dijagramu (sl.51).

Vodopropusnost mlazno injektiranog tla leži unutar vrednosti 10^{-7} do 10^{-9} m/s (10^{-5} i 10^{-7} cm/s)

Sl.51:-Odnos čvrstoće i količine cementa injektiranog u odgovarajući obim tla



→ Parametri izvođenja sistema mlaznog injektiranja

U tabelama prikazani su neki tehnički podaci o parametrima izvođenja mlaznog injektiranja sa raznim sistemima, uz napomenu kako su analize u tabeli 2 izrađene tako da sistem sa jednim fluidom predstavlja etalon vrednosti veličine = 1,0.

Tabela 2 - Prikaz parametara izvođenja radova kod tri sistema mlaznog injektiranja

| Parametri pri izvođenju radova injektiranja | | Broj fluida | | |
|---|------------------------------|------------------|------------|------------|
| | | Jedan fluid | Dva fluida | Tri fluida |
| Pritisak injektiranja (bar) | Voda | - | - | 300 – 550 |
| | Injekciona smesa | 300 – 550 | 300 – 550 | 10 - 40 |
| | Vazduh | - | 7 - 17 | 7 - 17 |
| Protok | Voda (l/min) | - | - | 70 – 100 |
| | Injekciona smesa (l/min) | 60 - 150 | 100 - 150 | 150 - 250 |
| | Vazduh (m ³ /min) | - | 1 - 3 | 1 - 3 |
| Prečnik mlaznica (mm) | Voda | - | - | 1,8 - 2,6 |
| | Injekciona smesa | 1,8 - 3,0 | 2,4 - 3,4 | 3,5 - 6,0 |
| Broj mlaznica (kom) | Voda | - | - | 1 - 2 |
| | Injekciona smesa | 2 - 6 | 1-2 | 1 |
| W/C | | 0.8 : 1 do 2 : 1 | | |
| Sadržaj cementa | (kg/m ³) | 200-500 | 300-1000 | 500-2000 |
| | (kg/m ³) | 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 |
| Prečnik injek. valjka (m) | Krupnozrno tlo | 0,50-1,00 | 1,00-2,00 | 1,50-3,00 |
| | Sitnozrno tlo | 0,40-0,80 | 1,00-1,50 | 1,00-2,00 |
| Čvrstoća valjka (N/mm ²) | Peskovito tlo | 10-30 | 7,5-15 | 10-20 |
| | Glinovito tlo | 1,5-10 | 1,5-5 | 1,5-7,5 |

Neka upoređenja tri sistema mlaznog injektiranja: prečnici, čvrstoća i utrošak cementa.

Tabela 3 - Prečnik injektiranih stubova kod tri sistema mlaznog injektiranja

| Prečnik injektiranih stubova | | | |
|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------------|
| Vrsta tla | Sastav | Srednji prečnik - promer (m) | Faktor upoređenja |
| Krupnozrno tlo | Jedan fluid | 0,75 | 1,00 |
| | Dva fluida | 1,50 | 2,00 |
| | Tri fluida | 2,25 | 3,00 |
| Sitnozrno tlo | Jedan fluid | 0,60 | 1,00 |
| | Dva fluida | 1,25 | 2,10 |
| | Tri fluida | 1,50 | 2,50 |

Tabela 4 - Čvrstoća injektiranih stubova kod tri sistema mlaznog injektiranja

| Čvrstoća injektiranih stubova | | | |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------|
| Vrsta tla | Sastav | Srednja čvrstoća N/mm ²) | Faktor upoređenja |
| Krupnozrno tlo | Jedan fluid | 20,00 | 1,00 |
| | Dva fluida | 11,25 | 0,56 |
| | Tri fluida | 15,00 | 0,75 |
| Sitnozrno tlo | Jedan fluid | 5,75 | 1,00 |
| | Dva fluida | 10,75 | 1,90 |
| | Tri fluida | 4,50 | 0,80 |

Tabela 5 - Prikaz parametara - utrošak cementa kod tri sistema mlaznog injektiranja

| Sastav | Utrošak cementa (kg/m ³) | Faktor upoređenja |
|-------------|--------------------------------------|-------------------|
| Jedan fluid | 350 | 1,00 |
| Dva fluida | 650 | 1,85 |
| Tri fluida | 1.250 | 3,60 |

Tabela 6 - Prikaz parametara - zbirna upoređenja kod tri sistema mlaznog injektiranja

| Sastav | Srednji prečnik (m) | Zapremina tela (m ³ /m ¹) | Utrošak cementa (kg/m ¹) | Faktor upoređenja |
|-------------|---------------------|--|--------------------------------------|-------------------|
| Jedan fluid | 0,75 | 0,44 | 350 | 1,00 |
| Dva fluida | 1,50 | 1,77 | 650 | 0,50 |
| Tri fluida | 2,25 | 3,97 | 1.250 | 0,40 |

Dakle, osnovni elementi od kojih zavisi čvrstoća mlazno (naponsko) injektiranog tla su:

- 1. Vodocementni faktor** (što je W/C veći, čvrstoća je niža).
- 2. Sadržaj cementa** (što je veća količina cementa, čvrstoća je veća).
- 3. Vrsta tla i granulometrijski sastav** (u pesku i šljunku postižu se veće čvrstoće nego u glini i prašini).
- 4. Starost** (što je injektirana smesa starija, to joj je i veća čvrstoća, s tim da je porast čvrstoće sporiji nego kod betona).
- 5. Korišćeni sistem mlaznog injektiranja** (1 fluid, 2 fluida ili 3 fluida).

Prečnik injektiranog tela zavisi od više faktora, a ograničavajući element je vrsta tla i primenjena tehnologija (broj fluida korišćen pri izradi).

Tabela 7 - Odnos vrste tla i mogućih prečnika injekcionih tela

| Vrsta tla | Prečnik (cm) |
|-----------------------------|----------------------------------|
| ŠLJUNAK | 80 - 120 |
| Sa malo peska | do 100 |
| Sa puno peska | 80 - 90 |
| PESAK | 55 - 80 |
| Vrlo zbijen | 55 - 60 |
| Srednje zbijen | 70 - 75 |
| GLINA | 45 - 100 |
| Žitka | do 100 |
| Meka | do 75 |
| Polučvrsta do čvrsta | 45 - 50 |
| Čvrsta | 55 - 60 |
| ORGANSKO TLO I NASIP | vrlo promenljivo (do 100) |

Čvrstoća injektiranog tla i modul elastičnosti su, takođe, posledica vrste tla u kojem se injektira, te je moguće postići sledeće vrednosti, tabela 8:

Tabela 8 - Moguće čvrstoće injektiranog tela u različitim vrstama tla

| JEDNOOSNA PRITISNA ČVRSTOĆA INJEKTIRANOG TELA | | MODUL ELASTIČNOSTI INJEKTIRANOG TELA |
|---|---|--------------------------------------|
| Šljunak | do 20,0 N/mm ² (20,0 MN/m ²) | 10 000 - 15 000 MN/m ² |
| Pesak | do 15,0 N/mm ² (15,0 MN/m ²) | 7 000 - 10 000 MN/m ² |
| Prah i glina | do 8,0 N/mm ² (8,0 MN/m ²) | 4 000 - 5 000 MN/m ² |
| Organsko tlo | do 3,0 N/mm ² (3,0 MN/m ²) | 1 500 - 3 000 MN/m ² |

Faktor sigurnosti bitno zavisi od konstrukcije, a okvirna vrednost mu je $F_s = 2,0$

Upoređivanje ove tri osnovne metode injektiranja nije laka i jednostavna. Razlog tome je što dobijeni promeri injektiranog tela zavise od više parametara koje je teško ujednačiti, zato je svako upoređivanje uslovno merodavno.

1.1.5.2.1. Jednofluidni sistem mlaznog injektiranja

Jednofluidni sistem mlaznog injektiranja je najjednostavniji i najrasprostranjeniji sistem.

Kod njega injekcioni mlaz služi za razbijanje strukture tla (rezanje) i mešanje injekcione smese. To je u stvari mešanje in-situ a manje je prisutno premeštanje čestica.

Orijentacija rotirajućeg mlaza može biti od horizontalnoge do vertikalnog položaja.

Sl.52:- Šema jednofluidnog sistema mlaznog injektiranja



Ovaj sistem izaziva najmanje izbacivanje tla na površinu, tj. najmanje je izražen problem osiguranja protoka fluida uz buševići pribor prema površini tla. Takođe, kod ovog sistema izraženije je zbijanje tla oko plašta injektiranog valjka, i to u širini od oko pola prečnika injektiranog valjka.

Kod jednofluidnog sistema postoji šest parametara koji direktno utiču na injektiranje, to su:

- 1- pritisak injektiranja,
- 2- broj mlaznica,
- 3- prečnik mlaznica,
- 4- vodocementni faktor injekcione smese,
- 5- brzina podizanja pribora,
- 6- trajanje rotacije.

Uz isti utrošak cementa kod ovog sistema postižu se najveće čvrstoće injektiranog tla.

Prečnik valjka injektiranog tla kod ovog sistema je najmanji (otprilike 40 do 60 cm u glinovitom tlu, ili od 50 do 120 cm u peskovitom tlu). Prečnik valjka direktno zavisi od snage pumpanja i od protoka injekcione smese. Visokopritisna pumpa pri tome je kritični element u čitavom sistemu, i zato treba biti tako odabrana da garantuje protok od oko 60 do 220 l/min, uz pritisak od oko 400 do 500 bara, i to u vremenu od jedan do osam sati kontinuiranog rada.

Pribor za bušenje i injektiranje kod jednofluidnog sistema ima središnu rupu, a prečnik mu je obično 90 -110 mm (min oko 65 mm). Debljina zida pribora je oko 10 mm. Bušenje može biti konvencionalno rotacijom, rotaciono udarno ili kombinacija rotacionog bušenja i mlaznog ispiranja tla. Mlazno ispiranje ubrzava bušenje i pospešuje vertikalnost bušotine. Kad se bušenjem dostigne predviđena dubina, uključuje se visokopritisna pumpa i počinje injektiranje uz stalnu rotaciju i postepeno podizanje pribora (najčešće u inkrementima visine koji se unapred odrede, odnosno unapred određenom brzinom podizanja pribora).

Povećanje prečnika injektiranog valjka postiže se u prvom redu povećanjem trajanja injektiranja na nekom horizontu, a ne, kako se to često misli, povećanjem pritiska pumpanja.



Sl.53:- Izgled i prečnik injektiranog stuba - valjka

1.1.5.2.2. Dvofluidni sistem mlaznog injektiranja

Osnovna karakteristika dvofluidnog sistema je istovremeno injektiranje injekcionog mlaza velike brzine unutar konusa komprimovanog vazduha. Tehnologija dvofluidnog sistema mlaznog injektiranja predstavlja relativno jednostavno unapređenje jednofluidnog sistema, zato sve navedeno u poglavlju **Jednofluidni sistem mlaznog injektiranja** važi i kod dvofluidnog sistema.

Razlike u sistemima su parametri koji utiču na injektiranje, tj. osim ranije nabrojanih šet uticajnih parametara u slučaju jednofluidnog sistema, kod dvofluidnog sistema prisutna su i dva dodatna, a to su pritisak i protok vazduha.

Sl.54:- Dvofluidni sistem vazduh - cementna suspenzija

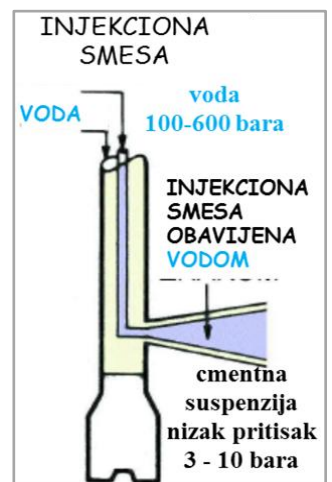
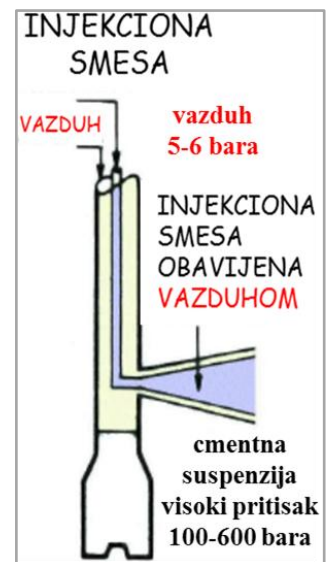
Takođe treba napomenuti da se u trošnim (nevezanim) tlima češće koristi jednofluidni sistem, dok je, s druge strane, u vezanim tlima (koherentnim), pozitivni uticaj vazduha je naglašeniji, pa se zato, u takvim tlima češće koriste dvofluidni sistemi.

Konačno, glavna razlika je u prečmicima injektiranog tela. Naime, zbog prisustva vazduha dolazi do povećanja prečnika injekcionog valjka tla za 2 do 2,5 puta u odnosu na jednofluidni sistem.

Sl.55:- Dvofluidni sistem voda - cementna suspenzija

Do povećanja prečnika dolazi iz više razloga:

- Komprimovani vazduh seče prelaznu zonu između injekcionog mlaza i podzemne vode pa se injekcioni mlaz širi dvostruko više nego kad se radi bez vazduha.
- Tlo razbijeno mlazom ne dospeva natrag u injekcioni mlaz što smanjuje izgublenu energiju izazvanu turbulencijom čestica tla.
- Čestice razbijenog tla su pokterljivije - pomeraju se iz zone razaranja i kroz mehuriće komprimovanog vazduha ispiru se prema površini.



Osnovni nedostatak dvofluidnog sistema je što injektirano tlo sadrži više vazduha, a to rezultira nižim kvalitetom (čvrstoćom) u odnosu na jednofluidni i trofluidni sistem.

Oprema za izvođenje dvofluidnog mlaznog injektiranja je složenija od one kod jednofluidnog. Dvostruke šipke sastoje se od unutrašnje i spoljne. Unutrašnja šipka standardno se koristi za protok injekcione smese, a prostor između unutrašnje i spoljne šipke koristi se za vazduh. Taj prostor je širine oko 5 mm. Važno je da taj 5 mm široki prostor bude sve vreme prohodan (prazan). U suprotnom praktično se izvodi injektiranje prema karakteristikama jednofluidnog sistema.

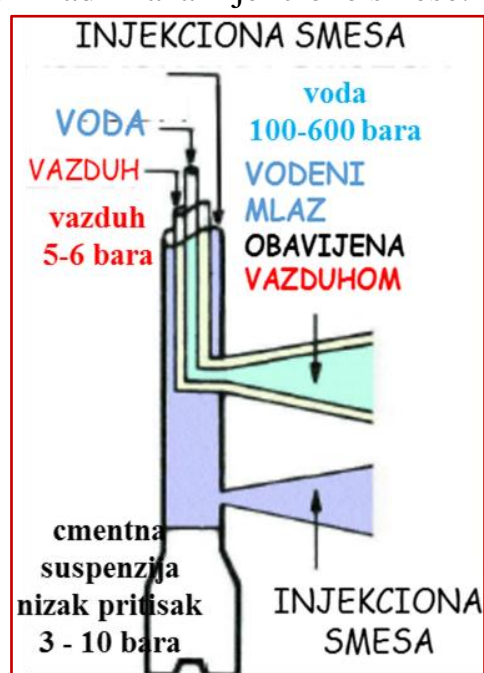
Problem održavanja čistog prolaza za vazduh izuzetno je otežan ako se radi na većim dubinama koje traže nastavljanje šipki bušećeg pribora tokom rada. Tada je verovatnost da injekciona smesa začepi ovaj prostor izuzetno velika. Kako bi se sprečilo da se prilikom bušenja začepi mlaznica za vazduh, ona je zaštićena gumenim čepom, koji se otvara kad se počne utiskivati vazduh.

1.1.5.2.3. Trofluidni sistem mlaznog injektiranja

Trofluidni sistem mlaznog injektiranja najsloženiji je od sva tri sistema injektiranja. Ovaj postupak podrazumeva istovremeno utiskivanje tri različita medija (fluida) - *vazduha, vode i injekcione smese*. Prilikom rada istiskuje se veća količina čestica tla na površinu pa se tada velika količina tla izmeni sa injekcionom smesom - skoro 50 %.

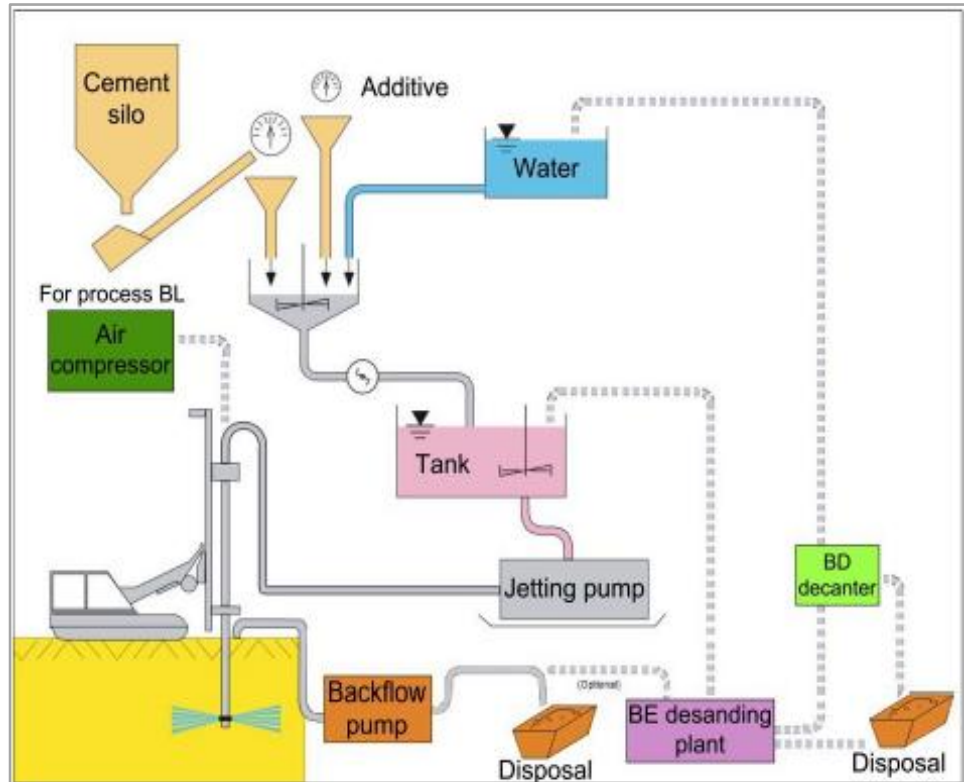
Kod trofluidnog sistema postoji ukupno deset parametara koji direktno utiču na injektiranje, tj. šest kao i za jednofluidni sistem, kao i dodatnih pet parametara povezanih sa režimom vode i vazduha (pritisak vode, prečnik i broj mlaznica za utiskivanje vode, pritisak i protok vazduha). Prečnik injektiranih valjaka je najveći i dostiže u glinovitim tlima 50 do 150 cm, a u peščanim 50 do 250 cm. Ovaj povećani prečnik posledica je činjenice što se posebno injektira voda i vazduh posebno injekciona smesa.

Nema posebnog pravila kroz koju od tri cevi treba ići koji fluid, bitno je jedino da mlaz vazduha i vode bude iznad mlaza injekcione smese.



Sl.56:- Trofluidni sistem voda - vazduh - cementna suspenzija

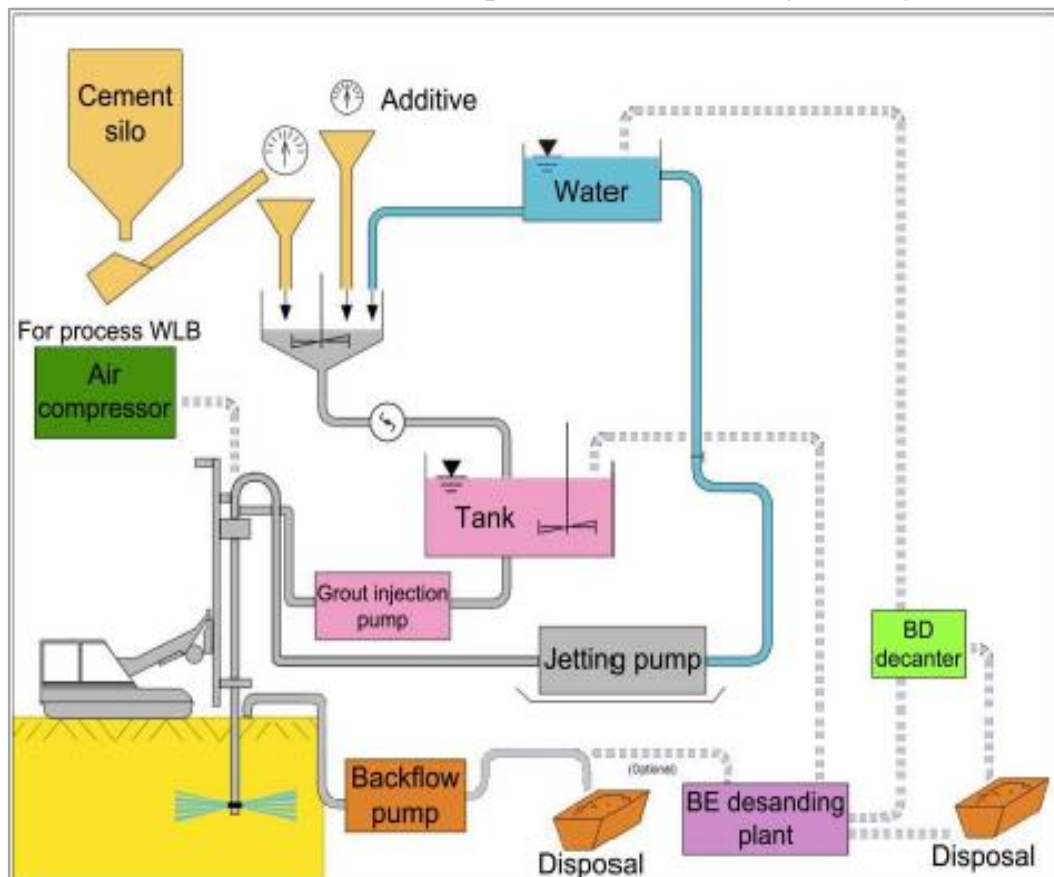
Šema instalacije na gradilištu



Sl.57:- Procedura B

Procesi B i BL primarno se koriste u nekohezivnim tlima.

U procesu BL, sa dodatkom vazduha povećava se obim injektiranja.



Sl.58:- Procedure WBL

Procedure WB i WLB

WB i WLB procesi prvenstveno se koriste u kohezivnim tlima. U oba postupka, struktura tla je erodirana od visokopritsnog vodenog mlaza a zatim se meša sa suspenzijom veziva.

Tabela 9 - Procedure B, BL, WB i WLB

| BAUER definition | | Definition in accordance with EN 12716:2001 |
|------------------|---|---|
| B | Binder cutting. In granular soils for small to medium column diameters | 1-Phase System |
| BL | Binder cutting with air shrouding. In granular soils for medium to large column diameters | 2-Phase System (suspension and air) |
| WB | Water cutting and filling the soil with binder. In cohesive soils for small to medium column diameters | 2-Phase System (water and suspension) |
| WLB | Water cutting with air shrouding and filling the soil with binder. In cohesive soils for medium to large column diameters | 3-Phase System |

Dakle, na slikama 53 i 65 prikazani su izvedeni injekcioni stubovi na jednom probnom polju (*radove izvela firma "Bauer"*). Tokom rada menjani su razni parametri izvođenja (*npr. pritisak, utrošak injekcione smese, vreme injektiranja, visina podizanja pribora i sl.*). Vidi se kako se u istom tlu razlikuju izvedena tela, u prvom redu prečnik stubova, ali menja se i čvrstoća injekcionog valjkastog tela.

Očigledno je, da je na odgovarajući način, potrebno projektovati elemente mlazno injektirane konstrukcije, kao i odrediti izvođačke parametre, kako bi se stvarno i izvela projektovana konstrukcija.

Izvođač radova treba (mora), zavisno od raspoložive opreme, odrediti izvođačke parametre, s tim da projekat treba predvideti realno izvedivu konstrukciju, pri čemu su parametri tla od presudne važnosti.

I pored svih znanja i iskustava, na svakoj lokaciji treba predvideti izvođenje odgovarajućeg probnog polja, na kojem će se proveriti (po potrebi i korigovati) elementi izvođenja konstrukcije mlaznog injektiranja.

Kod izrade projekta mlaznog injektiranja neophodno je definisati realne tehničke karakteristike osnovnog konstruktivnog elementa, a to je *injekciono telo tj. nosivi stub* u tlu. Njegovi osnovni elementi su: dužina, prečnik, čvrstoća injektiranog tela, vodopropusnost, modul elastičnosti.

⇒ *Dužina*

Dužina injekcionog tela (stuba) zavisi od raspoloživoj tehnologiji (bušilici) i kreće se do nekih dvadeset (čak i trideset) metara.

⇒ *Prečnik*

Prečnik injekcionog tela zavisi od radnih pritisaka i vremena injektiranja, a ograničavajući element su karakteristike tla, tj. vrsta tla, *tabela 7*.

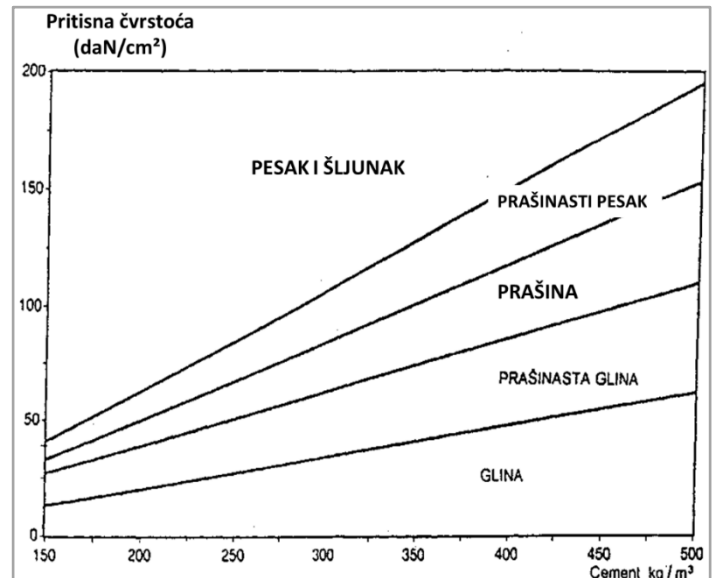
⇒ *Karakteristike inekcionog tela izvedenog u tlu*

Zavisno od vrste tla moguće je postići sledeće jednoosne čvrstoće inekcionog tela izvedenog u tlu:

- u šljunku do 20,0 N/mm²
- u pesku do 15,0 N/mm²
- u prašini i glini do 8,0 N/mm²
- u organskom tlu do 3,0 N/mm²

Da bi se postigle dobre vrednosti (jednoosne čvrstoće inekcionog tela izvedenog u tlu) potrebno je predvideti ugradnju odgovarajuće količine cementa. Odnos između čvrstoće i količine cementa inekciono ugrađenog u odgovarajući obim tla vidljivdat je na dijagramu (sl. 59).

Vodopropusnost mlazno injektiranog tla leži unutar vrednosti 10⁻⁷ do 10⁻⁹ m/s (10⁻⁵ i 10⁻⁷ cm/s).



Sl.59:- Odnos čvrstoće i količine cementa injektiranog u odgovarajući obim tla

1.1.5.3. Odnos pritiska i protoka fluida kod mlaznog injektiranja

Mehanizam mlaznog injektiranja može se tumačiti kroz analizu osnovnih odnosa pritiska, protoka i brzine inekcionog mlaza. Normalna veličina pritiska koja se koristi kod mlaznog injektiranja je oko 500 bara, a pri tome je brzina inekcionog mlaza oko 300 m/s (1.080 km/h). Kod inekcione smese sa vodocementnim faktorom W/C - 1/1 to odgovara stubu visine oko 3.600 m.

Kod malih udaljenosti između pumpne stanice i položaja injektiranja gubitak pritiska kroz cevi (lokalni gubici) je zanemariv, posebno u upoređenju sa visinom pumpanja (3.600 m). Kako je brzina inekcione smese u bušecim cevima relativno mala, to je kod uobičajenih dužina cevi i pad pritiska između mlaznice i bušecé glave takođe mali. S obzirom na male gubitke pritiska, moguće je postaviti Bernulijevu (*Bernoulli*) jednačinu za proračun idealne brzine inekcionog mlaza:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p} \quad (1)$$

gde je:

- v_i - brzina inekcionog mlaza,
- H_p - visina inekcione smese (zavisna od pritiska pumpanja i gustine inekcione smese),
- g - konstanta gravitacije - 9,81.

Gornji izraz može se koristiti za izračunavanje brzine mlaza u vazduhu i uronjenog u vodu.

Visoki pritisak injekcionog mlaza potreban za razaranje strukture tla stvara nadzvučne brzine injekcionog fluida. Visoki pritisci injekcionog fluida mogu izazvati hidraulički slom tla, tj. dovesti do velikih izdizanja površine terena uz veliki porast pornog pritiska. Ispravnim i kontrolisanim izvođenjem mlaznog injektiranja, podizanje terena i porast pornog pritiska će biti mali. Najvažnije je da je otvoren put injekcione smese od mlaznice prema površini terena. Tada je u tlu prisutan samo hidrostatički pritisak koji je zavisen od udaljenosti položaja injektiranja do površine terena (težina nadsloja smese do površine terena). Ako je taj put zatvoren (delimično ili potpuno - se npr. često događa u mekim glinama), tada porni pritisak u tlu može porasti na veličinu pritiska na pumpi. Očigledno je da stanje bez slobodnog puta prema površini ne može potrajati dugo i tlo se duž bušaćih cevi počinje istiskivati na površinu. U takvom slučaju rukovaoc mašine treba prekinuti injektiranje pre nego se napravi šteta. Idealna brzina injektiranog mlaza v_i , iz izraza (1) može se koristiti za proračunavanje protoka Q kroz mlaznice:

$$Q = C_c \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_m^2 \cdot C_v \cdot v_i$$

$$Q_{total} = n \times Q \quad (2)$$

gde je:

- C_c - bezdimenzionalni koeficijent kontrakcije injekcionog mlaza (0,95 do 1,0),
- ϕ_m - promer mlaznice,
- C_v - bezdimenzionalni koeficijent brzine (0,8 do 0,98),
- Q - protok kroz jednu mlaznicu i
- n - broj mlaznica.

Potrebna snaga koja može ostvariti traženi protok prema izrazu (2) proračunava se izrazom:

$$P = Q_{total} \times p$$

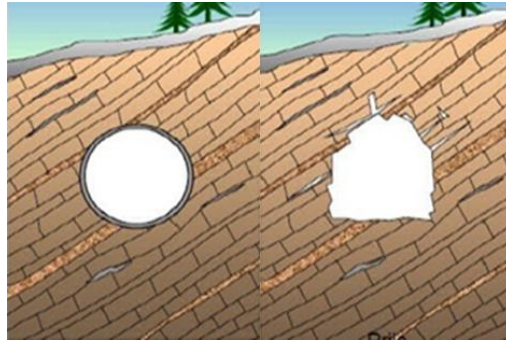
gde je:

- P snaga u hidrauličnom mediju kW,
- p pritisak pumpanja kN/m²,
- Q_{total} ukupan protok m³/s.

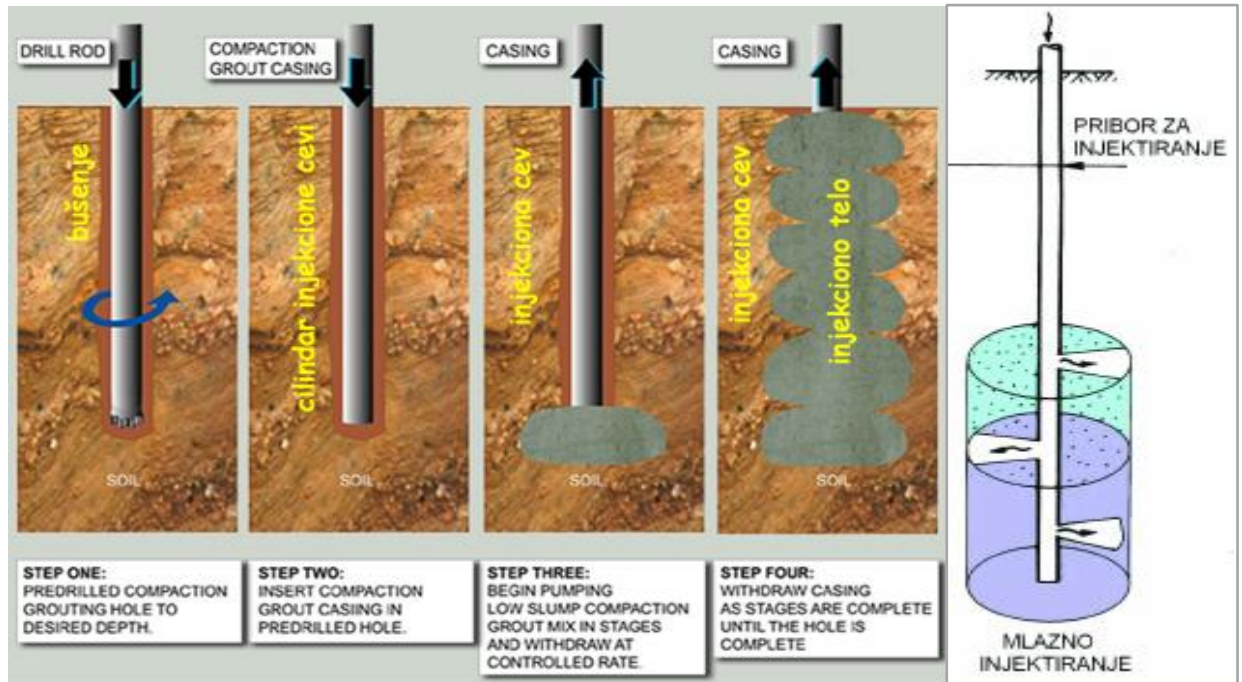
Snaga koju treba ostvariti motor je za oko 15% veća od one u hidrauličnom mediju, pa proizlazi da se za injektiranje smese sa W/C = 1/1, pumpane sa 500 bara kroz dve mlaznice prečnika 2,0 mm i idealne brzine mlaza od 300 m/s, ostvaruje protok od oko 90 l/min uz minimlnu snagu motora od 75 kW. Iz ovoga se vidi da su potrebne pumpe sa motorima velike snage.

Primena mlaznog injektiranja - primenjuje se kod velikog broja raznih konstrukcija. Kod nekih od njih (npr. ojačanje temelja, potporne konstrukcije, zaštita iskopa tunela, i sl.) ali je važna i čvrstoća injektirane zapremine tla.

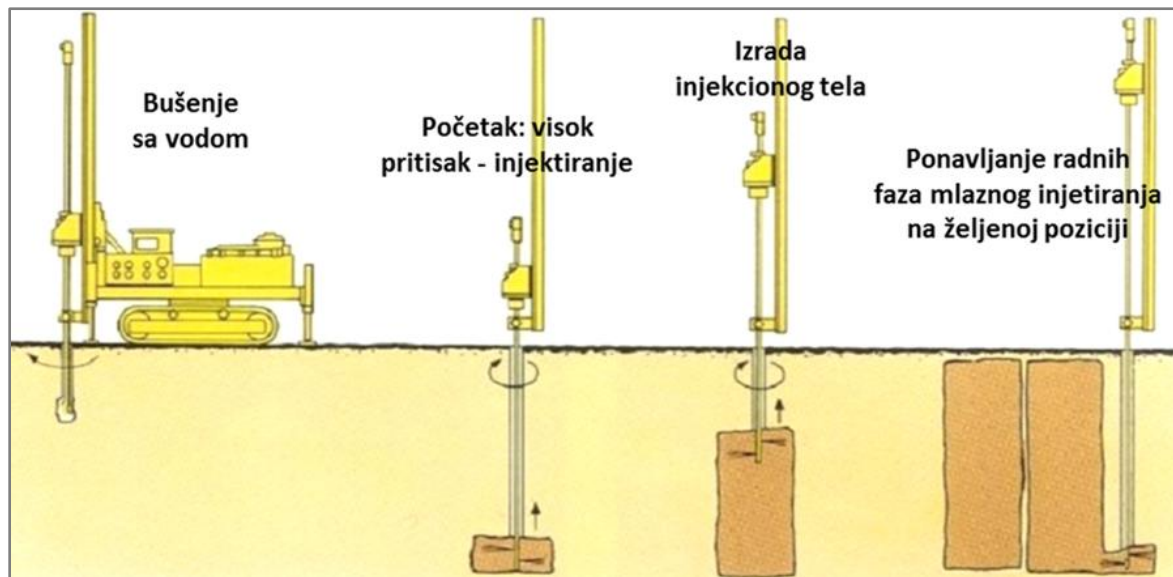
Sastav mlazno injektirane zapremine tla u suštini je sličan betonu. Materijal sadrži čestice tla, cement, nešto vazduha (pore) i vodu (mlazno injektirana zapremina tla se u nekoj literaturi često naziva "**soil-crete**" - mešavina tla i cementa.



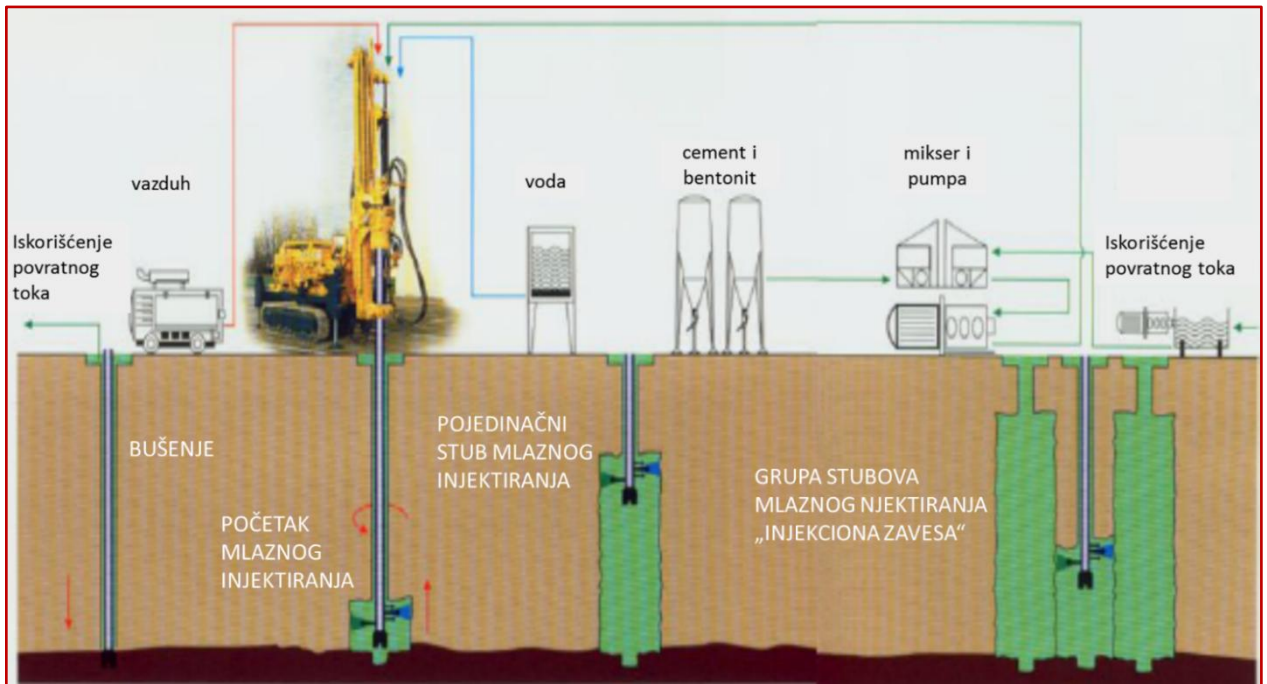
Sl.60:- Slika koso - pravo injektiranje



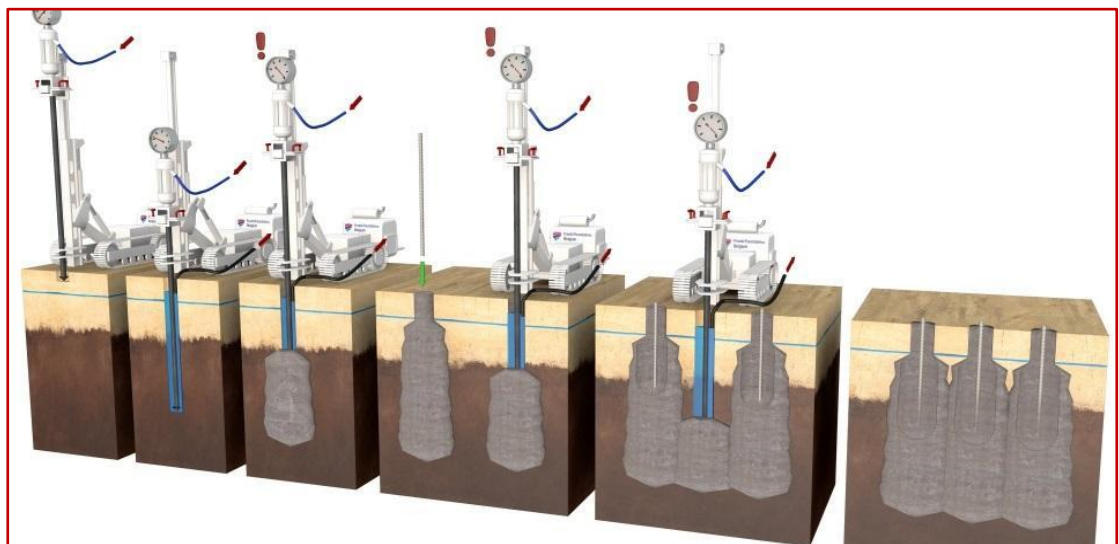
Sl.61:- Koraci - faze izvođenja mlaznog injektiranja



Sl.62:- Koraci - faze izvođenja mlaznog injektiranja - primena mehanizacije



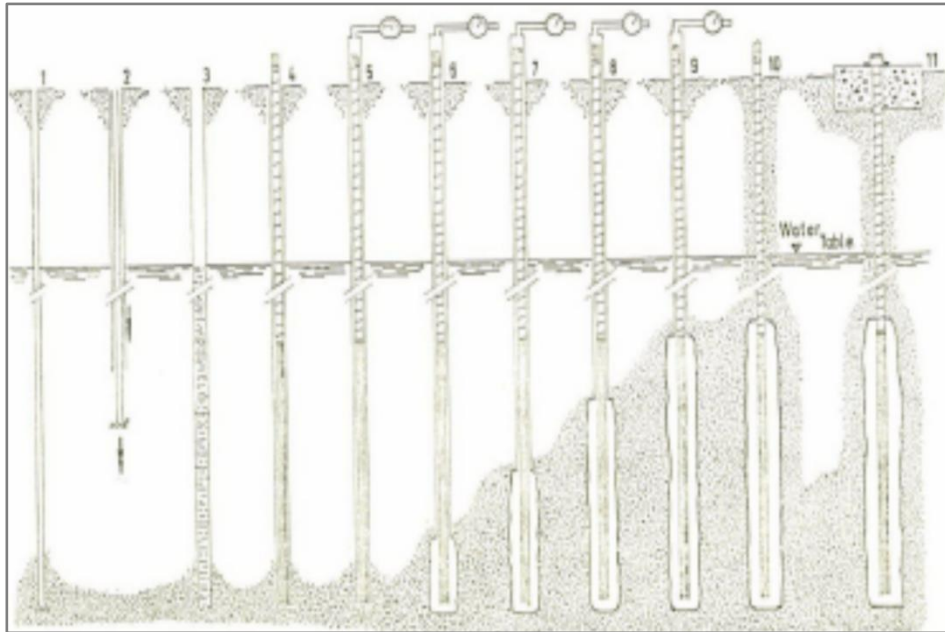
Sl.63:- Mlazno injektiranje tla, izrada neprekinutih zavesa u tlu



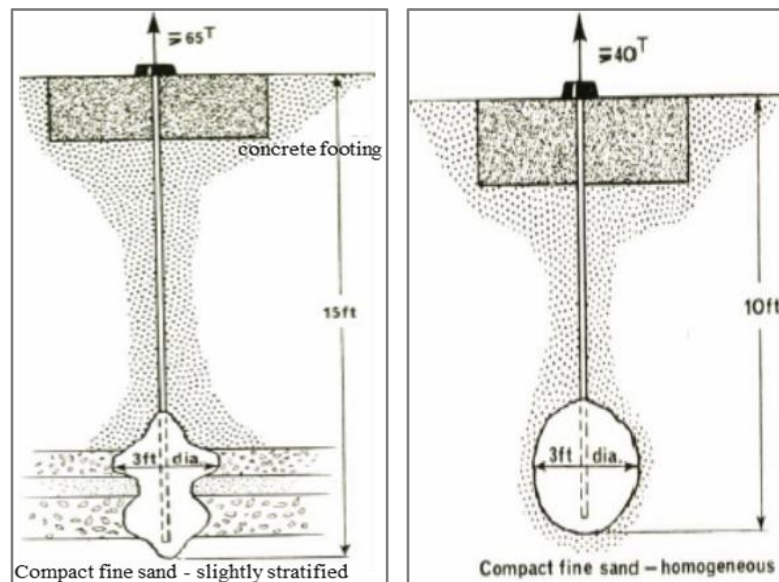
Sl. 64: - Faze izvođenja mlaznog injektiranja - izrada zavesa



Sl.65:-Izgled mlazno injektiranih tela - stubova (iskopana opitna deonica)



Sl.66:- Faze izgradnje sidrenja u aluvionu



Hemijsko injektiranje sidra u stratifikovanom sitnom pesku *Hemijsko injektiranje sidra u homogenom sitnom pesku.*

Sl.67:- Hemijsko injektiranje sidra u peskovima

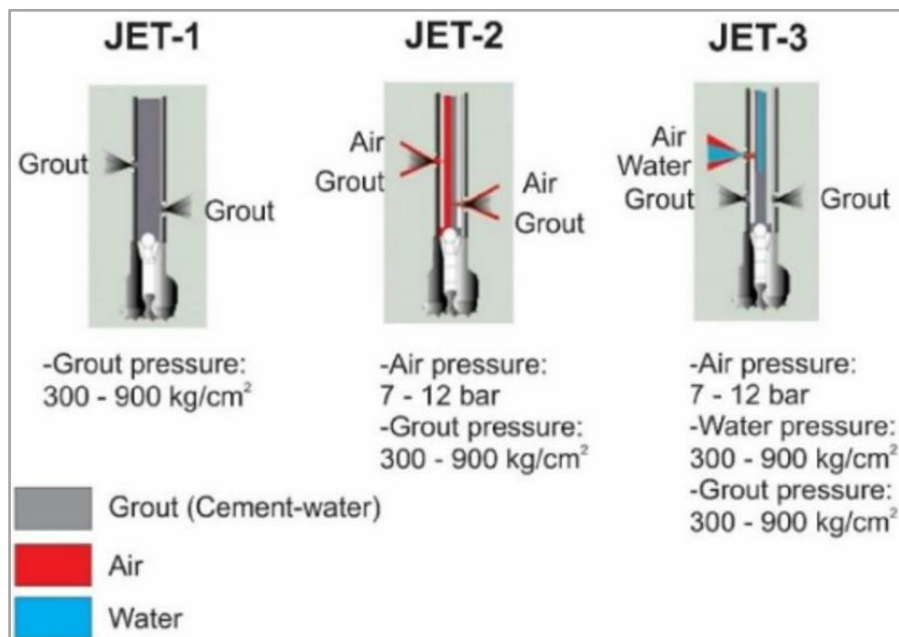
Da ponovimo:

Osnovni elementi od kojih zavisi čvrstoća mlazno (naponsko) injektiranog tla su:

1. **Vodocementni faktor** (što je W/C veći, čvrstoća je niža).
2. **Sadržaj cementa** (što je veća količina cementa, čvrstoća je veća).
3. **Vrsta tla i granulometrijski sastav** (u pesku i šljunku postizu se veće čvrstoće nego u glini i prašini).
4. **Starost** (što je injektirana smesa starija, to joj je i veća čvrstoća, s tim da je porast čvrstoće sporiji nego kod betona).
5. **Korišćeni sistem mlaznog injektiranja** (1 fluid, 2 fluida ili 3 fluida).

1.1.5.4. Zaključak o izvođenju mlaznog injektiranja

- Izvođenje injektiranja sa 2-fluidnim sistemom postiže se skoro dvostruki prečnik valjka u odnosu na 1-fluidni, a kod 3-fluidnog sistema on je približno 3 puta veći od prečnika valjka izvedenog sa 1-fluidnim sistemom, ali samo 50% u odnosu na izradu sa 2 -fluidnim sistemom.
- Utrošak cementa raste sa porastom obima injektiranog tela ali njegovo učešće u mešavini „cement - čestice tla“ pada. Time je delom objašnjiv i određeni pad čvrstoće injektirane mase tla kod rada sa više fluida u odnosu na jedan.
- Cena opreme za rad sa više fluida znatno se povećava, a to bitno utiče i na cenu konačnog proizvoda



Sl.68:- Izvođenje mlaznog injektiranja - fluidni sistemi injektiranja

PREDNOSTI

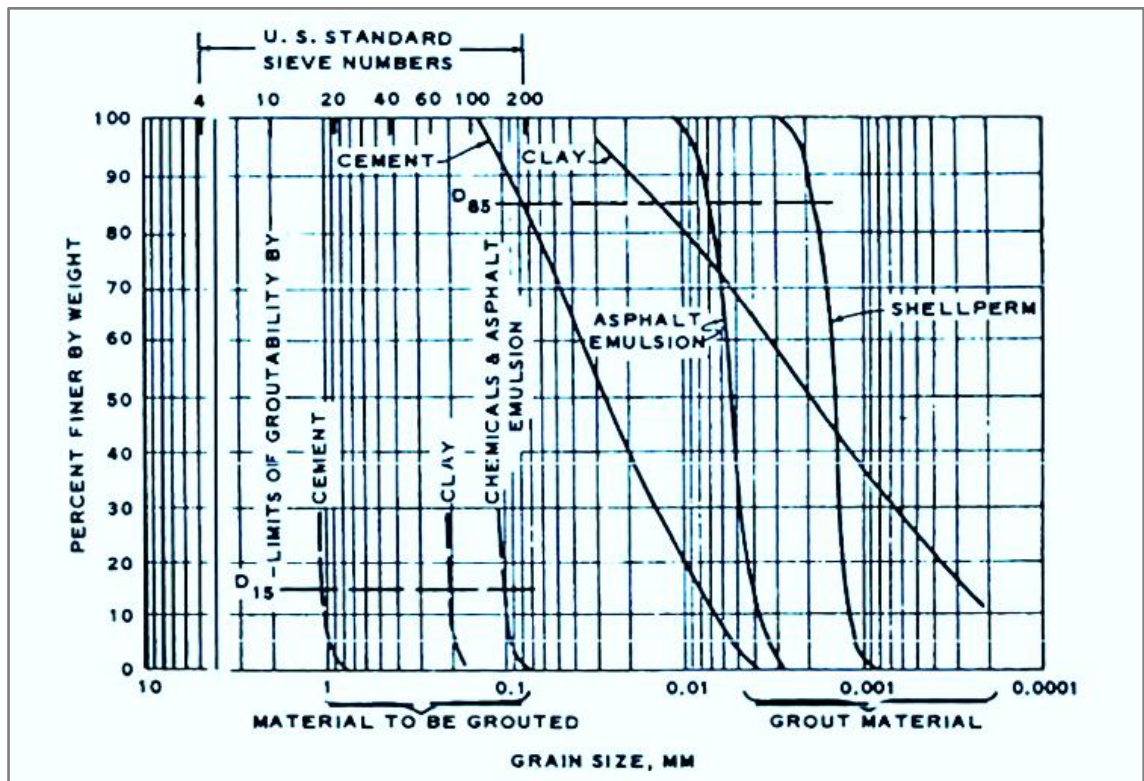
- Može se koristiti kod svih vrsta tla (*šljunak, pesak, prašina, glina*) sa ekološki prihvatljivim vodo-cementnim injekcionim materijalima,
- Veliki prečnici valjaka injektiranih stubova tla (50-300 cm) izvode se priborom malih dimenzija
- Prepreke u tlu (npr. komadi drveta, gromade kamenja i dr.) mogu biti zaobiđene ili uklopljene u injektiranu zonu tla,
- Mlazno injektiranje može započeti na gotovo svakoj (dostupnoj) dubini, i biti završeno na bilo kojem nivou i ispod površine terena i
- Mlazno injektiranje može se izvoditi u svim pravcima - položajima u odnosu na površinu terena (*vertikalno, koso i horizontalno*).

NEDOSTACI

- Osnovni nedostatak je zahtev za osiguravanjem nesmetane komunikacije (toka) fluida od položaja injektiranja do površine terena. Ako je komunikacija sprečena, to može izazvati hidraulički slom tla.
- **Cena može biti vrlo visoka.**
- Čvrstoće injektiranog tla dosta variraju, a kod prašinih i glinovitih vrsta tla relativno su niske.

- U slučaju velikih brzina podzemnih voda, može se desiti ispiranje cementa (pre no što on veže), što onda utiče na kvalitet očvrslje injektirane zapremine tla.

Zainjektiranje najčešće se koristi cementni malter ili druge smese cementa, gline, bentonita, hemijskih sredstava, bitumenskih i drugih emulzija.

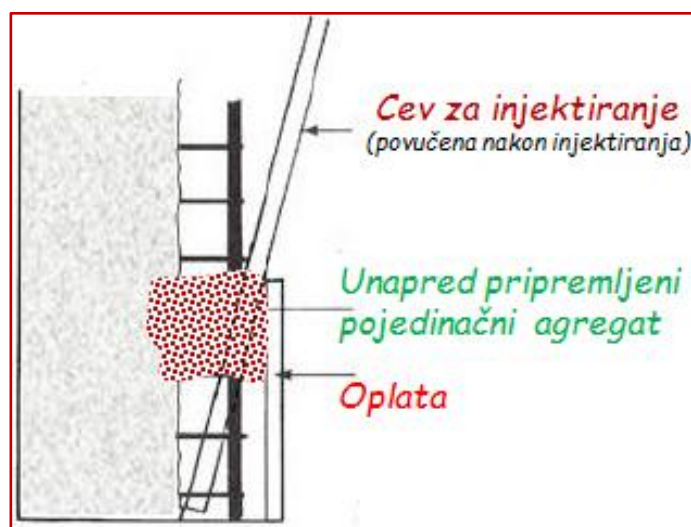


Sl.69:- Nomogram najčešćeg učešća materijala za injektiranje, US standard

1.1.6. Lokalno injektiranje

Lokalno (tzv. *prepakt metoda*) za zapunjavanje pojedinačnih šupljina - kaverni, pri čemu se zapunjava prvo granulisanim šljunkom, a zatim injektira cementno-bentonitnim injekcijama.

- Postavljanje čistog agregata u pripremljenu oplatu
- Postavljanje sistema sa mlaznicama i puštanje injekcione smese koja popunjava šupljine između agregata



Sl.70:- Sekcija - deo koji prikazuje osnove pripremljenog popravka (prepakt metoda)

1.1.7. Primena injektiranja u građevinarstvu (*sistemi i tehnologije injektiranja*)

Najznajznajčajnije vrste injektiranja su:

- ✚ *kontaktno;*
- ✚ *vezno;*
- ✚ *zaptivno;*
- ✚ *konsolidaciono i*
- ✚ *naponsko.*

Za sprečavanje prodiranja vode ispod temelja visokih brana izvodi se injekciona zavesa. To je niz bušotina u koje se injektira sredstvo koje pod pritiskom prodire u šupljine u tlu.

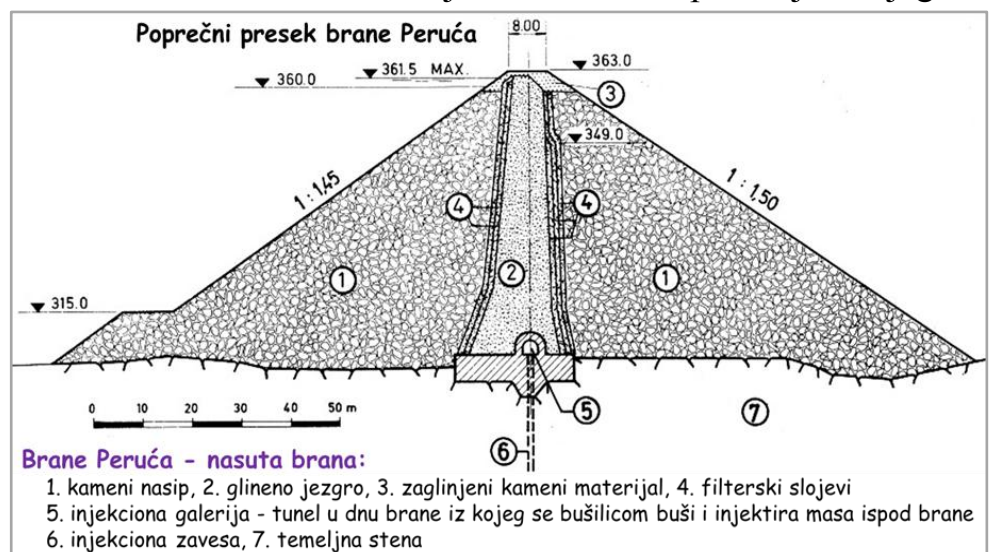
Sl.71:- Izvođenjem injekcione zavesa



1.1.7.1. Injekcione zavesa

Zavesa se sastoji od dubokih injekcija ispod temelja brane i njenih bokova, ubrizganih sa ciljem da se spreči proceđivanje i odlazak vode iz veštačkog jezera. Zavesa se obično produžuje do nepropusnih slojeva, ukoliko se ovi nalaze na dohvatnoj dubini, ali može biti i lebdeća, kao što je na brani Peruća. Dubina zavesa redovno ne prelazi visinu brane, ali u propustljivim terenskim uslovima može dostići i trostruku visinu brane. Dužina zavesa utvrđuje se prethodnim sondažnim bušenjem terena i ispitivanjem njegove propustljivosti.

Sl.72:-Brana Peruća



Tereni u kojima gubitak vode po dužinskom metru bušotine ne prelazi $1 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m})$, na 10 bara pritiska vode, smatraju se praktično nepropusnim za vodu. Za brane visine manje od 30 metara, ovaj kriterijum se ublažava do $3 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m})$, na 10 bara pritiska vode. Potreban utrošak injekcione smese utvrđuje se praktičnim injektionim poljem na mestu brane. Takođe, utvrđuje se potreban razmak bušotina, koji se kreće od 2 do 5 metara.

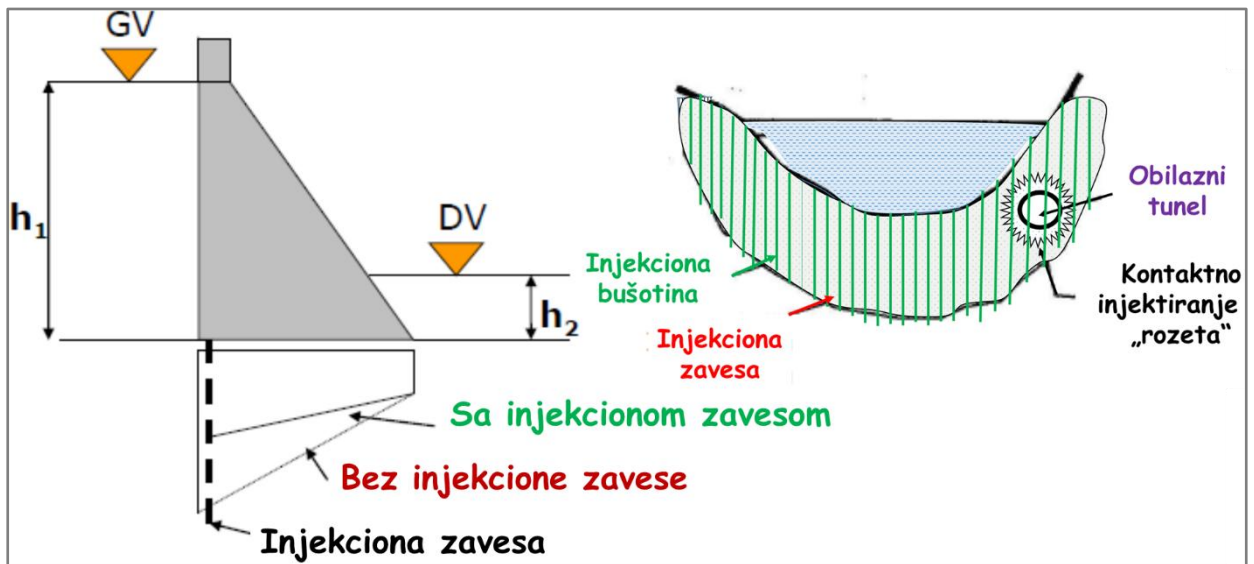
Injektiranje se danas izvodi pod pritiskom do 60 bara, ali se, za svaki slučaj, mora utvrditi prema stvarnim uslovima na terenu. Zavesa može biti jednoredna, dvoredna ili troredna. Teži se da bude najviše dvoredna, kako bi se smanjili troškovi izvođenja i skratilo vreme završetka radova. Za manje propusne stene utrošak suve materije za injektiranje iznosi svega nekoliko kilograma, a za vrlo propusne, krečnjačke stene, penje se do nekoliko stotina kilograma. Na brani Peruća on je iznosio 300 kg/m.

Za injektiranje se upotrebljavaju čiste cementne smese, cement sa peskom, cement sa glinom, sa bentonitom, vodeno staklo i drugi hemijske smeše, zavisno od stepena raspucanosti sredine i karakteru pukotina. Bentonit i vodeno staklo sprečavaju da u vrlo šupljikavim stenama smesa nepotrebno odlazi u širinu, što bi poskupilo radove. Po položaju, injekcije mogu biti vertikalne ili kose, što zavisi od uslojenosti terena.

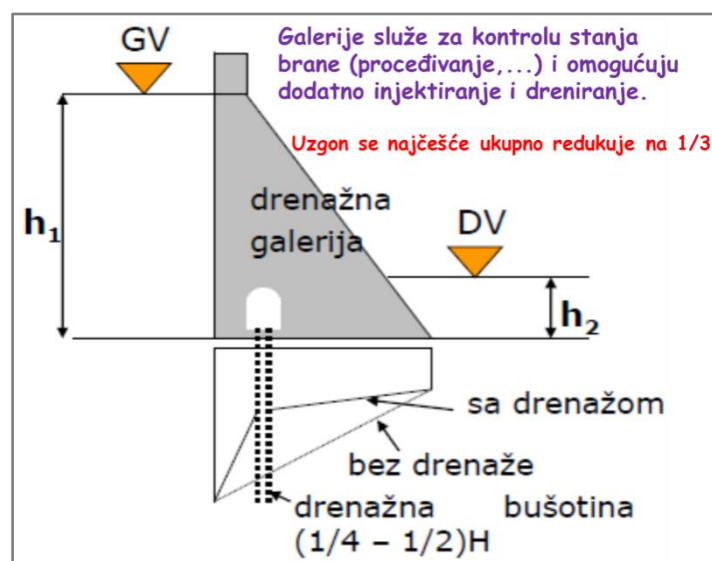
Zavesa se može injektirati ili pre početka radova na iskopu temelja, što zahteva veliku dužinu jalovog bušenja, ili nakon dovršenja radova na iskopu, ili pak nakon betoniranja najdonjih slojeva brane, kada se stvori potreban nadsloj, što sprečava izdizanje pojedinih slojeva. Zavesa se obično nalazi sa uzvodne strane ispod temelja. Time se ujedno smanjuje uzgon, što je za gravitacione brane veoma važno.

Smanjenje uzgona:

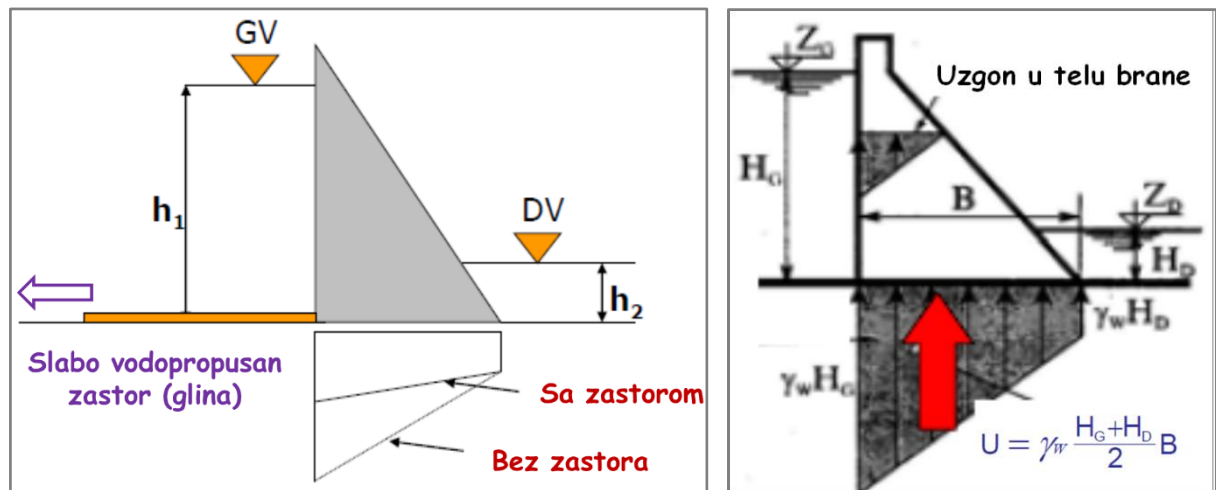
1. Izvođenjem injektione zavesa - injektira se smesa za povećanje vododrživosti,
2. Dreniranjem iza injektione zavesa,
3. Produžavanje puta izvodi se izvođenjem horizontalnog slabo vodopropusnog zastora.



Sl.73:- Smanjenje uzgona izvođenjem injektione zavesa injektira se smesa za povećanje vododrživosti

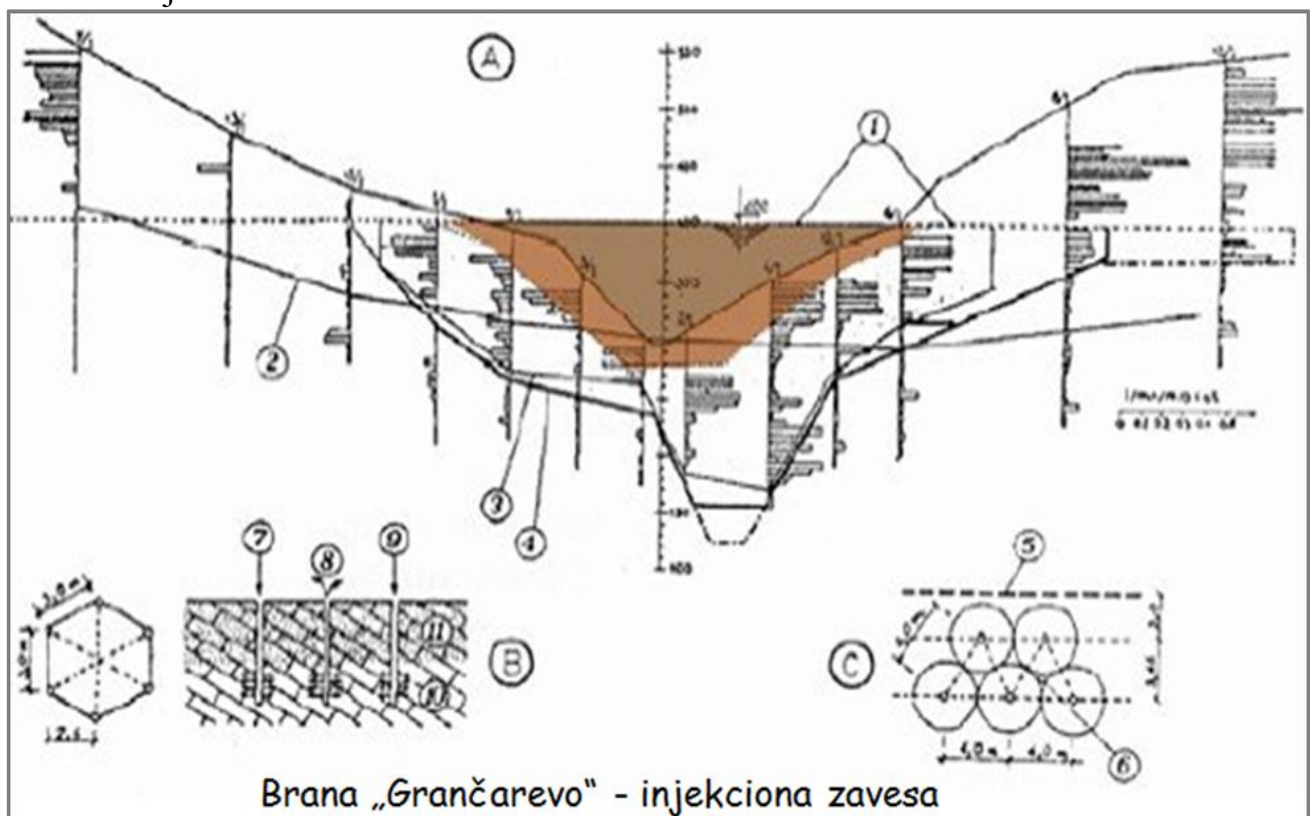


Sl.74:- Smanjenje uzgona dreniranjem iza injektione zavesa



Sl.75:- Smanjenje uzgona izvodi se produžavanjem horizontalnog slabo vodopropusnog zastora (najčešće glina).

Nakon završetka izrade zavese i betoniranja donjih delova brane, vrši se vezno injektiranje po celoj površini temelja, da bi se brana sa stenom povezala u monolit; dubina ovih injekcija obično ne prelazi 2 do 5 metara. Injektiranje se sprovodi bilo iz kontrolnog hodnika ili sa nizvodnog lica brane. Prema dosadašnjem iskustvu potrebno je na svakih 4 do 7 m² površine temelja jedna bušotina. Ove inekcije ujedno služe za poboljšanje kvalitete stena koja je miniranjem bila oštećena pri iskopu. Lučne brane zahtevaju injektiranje duž celog perimetra brane; normalno je potrebno da se obavi i konsolidaciono injektiranje ispod cele širine njihovog temelja, da bi se poboljšao kvalitet i smanjile deformacije podloge. Dubina ovih injekcija iznosi najmanje polovinu širine temelja.



Sl.76:- Izrada (postavljanje) injekcione zavese na brani „Grančarevo“

Primena tehnologije injektiranja i sistema injektiranja u rudarstvu i građenju tunela i podzemnih objekata

- Ojačavanje stenske mase, poboljšavanje mehaničkih svojstava stenske okoline, najviše čvrstoće pri zatezanju i pri pritisku;
- Poboljšanje mehaničkih svojstava eksploatisanih minerala pre eksploatacije;
- Smanjivanje i sprečavanje doticanja vode u rudnike;
- Ankerisanje i stabilizacija stena;
- Smanjenje prodiranja gasa u oblast rudnika;
- Sprečavanje neželjenog isticanja gasa iz rudnika u okruženje;
- Sprečavanje isticanja otpadnih voda iz napuštenih oblasti rudnika;
- Sprečavanje proticanja neželjenih vazdušnih struja u rudniku;
- Ispunjavanje višestruko izlomljenih - ispućalih stena;
- Injektiranje brana i njihove okoline radi sprečavanja infiltracije vode;
- Ankerovanje i injektiranje površine uglja za vreme eksploatacije;
- Injektiranje stena male stabilnosti za vreme tunelogradnje i iskopavanja u horizontalnim jamama rudnika;
- Obezbeđivanje prelaza radova u rudniku preko tektonskih oštećenja.

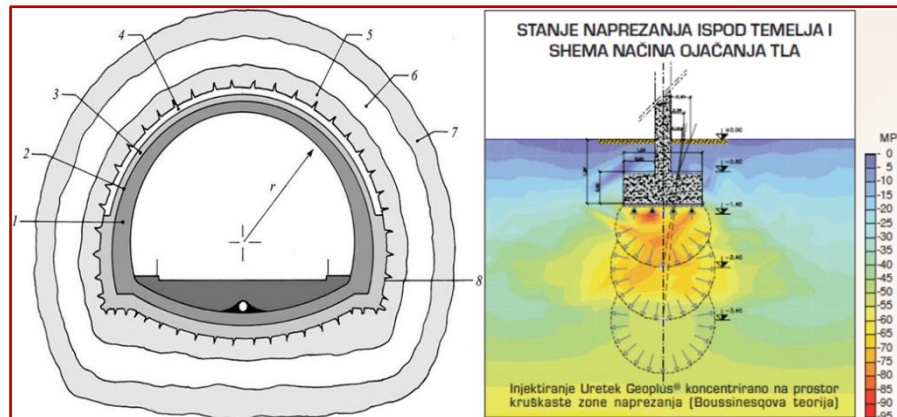
Kod izrade (sanacije) tunela primenjuju se sledeće vrste injektiranja:

- **vezno** (popunjavanje šupljina između tunelske obloge i tla, tj. stene),
- **kontaktno** (povezivanje tunelske obloge i stene, povezivanje više slojeva obloge ili betonske obloge i čelične podgrade),
- **konsolidaciono** (poboljšanje mehaničkih svojstava stene cementno-betonskom smesom uz dodatak peska),
- **pritisno - naponsko** (stvaranjem pritiska u okolini tunelske obloge ili betonske konstrukcije postiže se prednaprezanje konstrukcija),
- **zaptivno** (postizanje vodonepropusnosti oko građevine ili ispod nje) kao i
- **lokalno** (tzv. prepakt metoda za zapunjavanje pojedinačnih šupljina - kaverni, pri čemu se zapunjava prvo granulisanim šljunkom, a zatim injektira cementno-bentonitnim injekcijama).

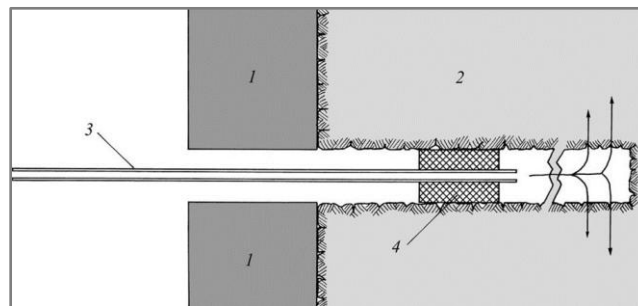


Sl.77:- Injektiranje: primer kontaktnog injektiranja tunela

Poseban postupak je **mlazno**injektiranje (vidi 1.1.5. i 1.1.7.6. engl. *jet grouting*) pod velikim pritiskom, pri čemu smesa izlazi iz mlaznice smeštene na bušaćoj garnituri. Injektiranje se izvodi građevinskom mašinom - uređajem *injektorom*.



Sl.78:- Injektiranje: primer zaptivnog i konsolidacionog injektiranja tunela i naponskog kod stabilizacije temelja: 1. konačna betonska obloga, 2. folija od plastike-hidroizolacija (PVC ili tsl), 3. betonska obloga, 4. torkret-beton, 5. zona injektirana cementom, 6. zona injektirana akrilnim smolama, 7. zona injektirana cementom, 8. zaptivanje cementnim i hemijskim smesama.



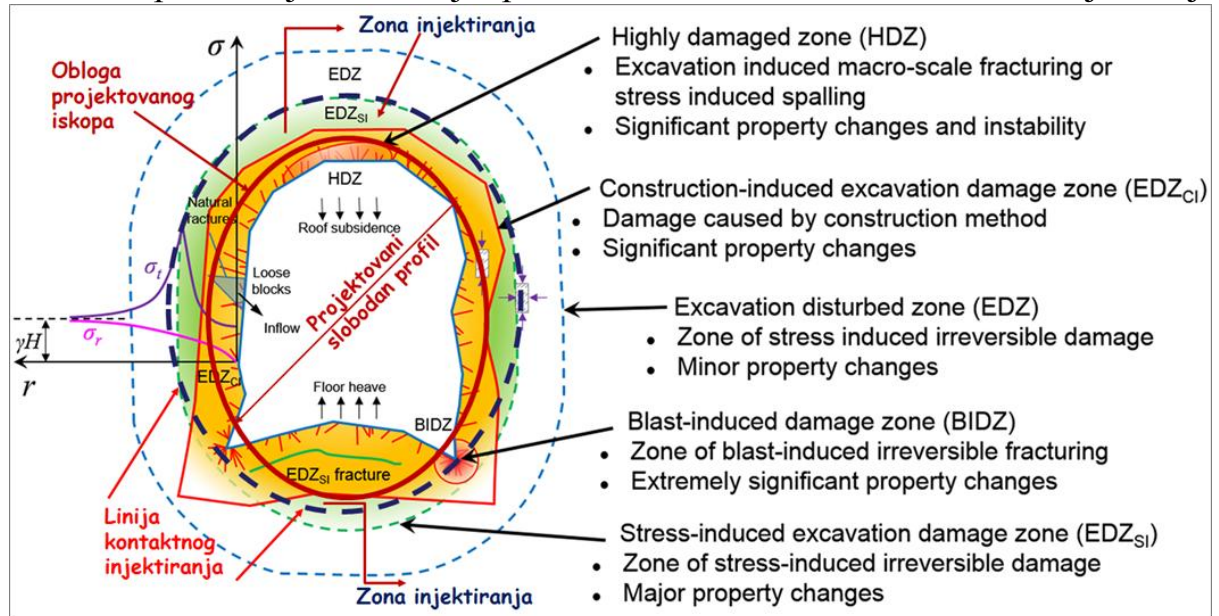
Sl.79:- Injektiranje: kontakt beton-stena: 1. beton, 2. stena, 3. injkcioni vod, 4. gumena zaptivka



Sl.80:- Injektiranje ugrađenih sidara (naponsko injektiranje)

1.1.7.2. Kontaktno injektiranje

Kontaktinim injektiranjem postiže se bolji kontakt objekta i stenske mase nego što je on bio pre injektiranja. Kod hidrotehničkih tunela i okana pod pritiskom, kontaktno injektiranje se izvodi samo u onim slučajevima kada stenska masa treba da primi unutrašnje hidrostatičke pritiske, a obloga ima za cilj samo da obezbedi projektovani oblik tunelskog otvora. Pri tome, kontaktnim injektiranjem (sl.81). se obezbeđuje kontinuirano prenošenje unutrašnjih pritisaka na stensku masu, odnosno bolje sadejstvo.



Sl.81:- Pregled različitih zona oštećenja oko podzemnog iskopa koju treba sanirati kontaktnim injektiranjem. U EDZ zonu su: σ_r radijalni napon, σ_t je tangencijalni napon, γH je prosečna sila opterećenja nadslojeva, a H je dubina iskopa.

U protivnom, betonska obloga bi zbog postojanja prostora nepopunjenog betonom morala u celini da primi unutrašnji pritisak, morala bi biti dimenzionisana saglasno takvim uslovima. Slični efekti se ostvaruju i kod kontaktnog injektiranja betonske obloge i čelične košuljice, ako ona postoji, ili eventualno dvoslojne betonske obloge kod tunela u kome su tečnosti pod relativno velikim pritiscima (npr. tuneli kojima se voda dovodi iz akumulacionog bazena na turbine, vodostani i dr.).



Sl.82:- Tunel i zona kontaktnog injektiranja

Injektiranje se izvodi tako što se prvo izbuše bušotine, a onda se kroz njih utiskuje injkciona masa. Dužina bušotina je uslovljena debljinom obloge, dimenzijama i oblikom praznog prostora koji se injektira. Kod tunela kružnog poprečnog preseka, bušotine su radijalno raspoređene.

Injektiranje se izvodi planski i to tako da se prvo utiskuje injkciona masa u bušotine koje se nalaze u podnožnom svodu (u donjem delu objekta), a zatim naizmenično levo i desno prema kaloti, a zadnja bušotina u najvišem delu kalote-objekta.

Injekcioni pritisak treba da bude toliki da obezbedi popunu praznog prostora između stene i obloge, ili između više obloga. Ne sme da bude ni previsok, jer bi se time injektirala i stenska masa, što nije zadatak kontaktnog injektiranja, niti prenizak da zbog toga ne bude uspešno završeno kontaktno injektiranje. Po pravilu, pritisci su na početku procesa injektiranja niži, a na kraju viši. Pritisak injektiranja je obično u granicama 0,3-0,5 MPa.

1.1.7.3. Vezno injektiranje

Veznim injektiranje se postiže bolje sadejstvo objekta i stenske mase. Izvodi se u kontaktnoj zoni objekta i stenske pri čemu je debljina te zone obično 0,5 m do nekoliko metara. Stenske mase su u toj zoni obično ispucalije nego u dubljim delovima terena.

Razlog tome su uticaji iskopavanja, miniranja i oslobađanja napona uopšte. Kada se pukotine, ili drugi prazni prostori u zoni veznog injektiranja zapune injkcionom masom, postiže se bolja veza objekta i terena. Vezno injektiranje se primenjuje kod podzemnih objekata i betonskih brana.

Kod hidrotehničkih objekata i okana pod pritiskom, skoro uvek se izvodi vezno injektiranje i to do dubine 0,5-1 m, zavisno od dimenzija objekta, broja i rasporeda bušotina. Injekcioni pritisak je obično jednak unutrašnjem pritisku, koji će vladati u hidrotehničkom objektu pri njegovoj eksploataciji.

Osnovni zadatak veznog injektiranja je da se u zoni terena gde su najveći uticaji objekta na teren i obrnuto, poboljšaju mehanička svojstva stenskih masa. Pored toga, veznim injektiranjem se smanjuju uticaji podzemnih voda na objekat i vodopropustljivost terena.

1.1.7.4. Zaptivno injektiranje

Izvodi se u cilju zaptivanja poroznosti u stenskoj masi i sprečavanja kretanja podzemnih voda. Kao mera može imati privremeno ili trajno dejstvo.

Injekcione mase su, po pravilu, višekomponentne, tj. kombinacija: gline, cementa i vode. Njima treba sprečiti kretanje vode, a nije potrebno da imaju velike čvrstoće. Obično je dovoljno, sa stanovišta zaptivanja, da je njihova čvrstoća takva da ih pritisak vode i njeno kretanje ne razori. Uobičajeno je težinsko učešće cementa oko 75%, a bentonita do 30%. Prednost tiksotropnih masa, u odnosu na cementne, je u tome što su one penetrativnije i ekonomičnije.

Zaptivno injektiranje veliku primenu je našlo kod visokih brana. Za ove objekte izvode se injkcionne zavese koje, u zavisnosti od njihovog položaja u odnosu na branu, i dobijaju nazive. Tako, na primer, mogu biti:

- **dubinske**(ispod tela brane);
- **bočne**(u bokovima brane);
- **obodne**(po obodu akumulacionog jezera).

Cilj i zadatak izvođenja injekcionih zavesa je:

- ◆ smanjenje gubitka vode iz akumulacije, na mestu brane i iz akumulacionog bazena uopšte;
- ◆ sprečavanje štetnog uticaja filtacionih tokova vode, ispod i oko brane. Time se onemogućuje iznošenje sitnih čestica iz betona i stenske mase i sprečavaju štetni procesi koji bi time bili izazvani;
- ◆ smanjenje uzgona, čime se povećava stabilnost objekta.

Injekciona zavesa i/ili zastor sprečava ili produžava put procednoj vodi, čime smanjuje uzgon i procedni protok kroz branu i temelj.

Kako je rečeno, u tehno-ekonomskom smislu, injekcione zavesa su veoma komplikovani tehnički objekti, a u ekonomskom pogledu su vrlo skupi. Elementi svake zavesa moraju biti prilagođeni specifičnostima konkretnog objekta i geološke građe terena

Zavesa prema dubini i vodonepropusnoj podlozi ispod objekta mogu biti:

- ***vezane i***
- ***lebdeće.***

- Vezane zavesa su izvedene do vodonepropusne, prirodne, sredine - sloja.
- Lebdeće ne dopiru do vodonepropusnog sloja, stin što se za kriterijum dubine dubinskih zavesa usvaja ona dubina na kojoj je vodopropustljivost **1 Lu** (u nekim slučajevima 2 ližona).
- Za bočne zavesa kritična dubina je ona na kojoj je vodopropustljivost 2 Lu (odnosno 4 Lu: 1Lu = 1 lit/min/m'/1MPa).

Položaj dubinske injekcione zavesa kod brana zavisi od njihovog tipa. Kod gravitacionih betonskih brana zavesa se izvodi na uzvodnom delu, radi smanjenja uzgona, a kod brana nasutog tipa, obično se zavesa izvodi ispod glinenog jezgra brane. Kod lučnih brana, uzgon je mali, pa se položaj zavesa određuje u skladu sa geološkim uslovima.

Trase bočnih injekcionih zavesa su, u načelu, normalne na pravac strujanja vode u bokovima brane. Kod lučnih brana se izvode obično koso uzvodno, radi obezbeđenja oslonaca brane.

Dubinske injekcione zavesa mogu se izvoditi:

- sa površine terena;
- iz namenski izvedenih injekcionih galerija u telu brane;
- kroz telo brane, kad ono bude izgrađeno do izvesne visine.

To zavisi od geoloških uslova i opšte dinamike i organizacije izvođenja radova. Bočne zavesa izvode se ili sa površine terena ili iz injekcionih galerija, kada je visina nadsloja velika i nije opravdan veliki obim jalovog bušenja. Na to mogu uticati i drugi opšti uslovi izvođenja.

Pri definisanju svake injekcione zavesa najvažnije je:

- izabrati položaj injekcione zavesa;
- odrediti dimenzije zavesa;

Radi definisanja pojedinih elemenata zavesa obavezno treba u probnim injekcionim poljima definisati:

- * istražne, injekcione i kontrolne bušotine (rastojanje između bušotina, broj redova, dubinu, prečnik, pravac i dr.);

- * vodopropustljivost stenskih masa (VDP);
- * vrste injekcionih masa, sirovine za njihovu pripremu;
- * injekcione pritiske;
- * kriterijum završetka injektiranja;
- * kontrolna ispitivanja i osmatranje injekcione zavese.

Broj bušotina, njihovo međusobno rastojanje i dubina prevashodno zavise od svojstava stenske mase koja se injektira, kao i specifičnosti zahteva koji su postavljeni projektom injektiranja. Najvažniji su da se injektiranjem injektira sav prostor obuhvaćen zavesom kako po dubini, tako i na projektovanoj dužini. Kao kriterijum završetka injektiranja u svakoj pojedinačnoj bušotini obično se koristi postizanje projektovanog pritiska injektiranja ili količina utisnute injekcione mase. Drugi kriterijum je pouzdaniji.

Geometrija injektiranja (broj bušotina, njihovo međusobno rastojanje i dubina) prvenstveno zavisi od geološke građe terena - svojstava stenske mase koja se injektira, specifičnostima konkretnog objekta i zahteva koji su postavljeni projektom injektiranja. Najvažnije je da se injektiranjem injektira sav prostor obuhvaćen zavesom kako po dubini, tako i na projektovanoj dužini. Kao kriterijum završetka injektiranja u svakoj pojedinačnoj bušotini obično se koristi postizanje projektovanog pritiska injektiranja ili količina utisnute injekcione mase. Drugi kriterijum je pouzdaniji.

Izvođenje injektiranja može se vršiti **sledećim postupcima**:

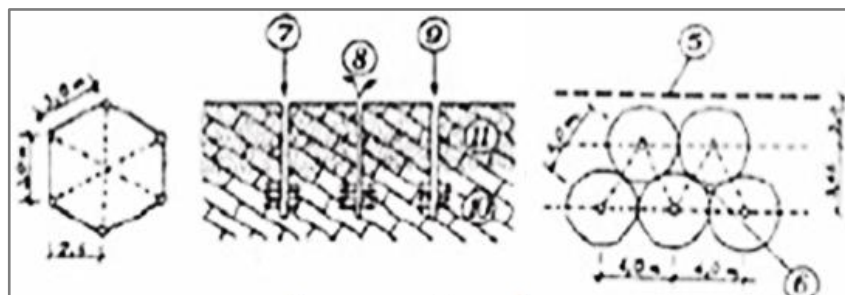
- silaznim;
- uzlaznim;
- mešovitim;
- cirkulacionim.

Silazni postupak obuhvata više tehničko-tehnoloških postupaka. Prvo se izbuši bušotina određene dužine (etaža), a onda se na toj dužini izvede injektiranje. Kada je to uspešno urađeno, pristupa se čišćenju bušotine, produžetku bušenja sledeće etaže, ponovno injektiranje i tako redom na celoj dužini bušotine.

Uzlazni postupak se primenjuje kada su zidovi bušotine stabilni. U tim slučajevima moguće je izbušiti celu bušotinu, očistiti je od sitnih čestica koje su zaostale na zidovima bušotine ili njenom dnu, a potom izvršiti injektiranje. Izvodi od dna do vrha, pri čemu je moguće pakerima ograničiti dužinu etaže koja se injektira, ili odjednom injektirati celu bušotinu.

Mešoviti postupak injektiranja je ustvari kombinacija silaznog i uzlaznog postupka.

Cirkulacioni postupak je specifična vrsta uzlaznog postupka injektiranja.



Sl.83:- Šematski prikaz injekcione zavese- Dijagram opita vodopropustljivosti (VDP) po metodi Ližona, u istražnoj bušotini

Povećanje otpora proceđivanju injektiranjem (zaptivanjem) uz smanjenje otpora dreniranjem injekciona zavesa (zaptivka) stvara heterogenost materijala čime se postiže maksimalno smanjenje uzgona. Injektiranjem (zaptivanjem) i dreniranjem može se značajno smanjiti diferencijalni deo uzgona, pa se izraz za uzgon aproksimira sa:

$$U = \gamma_w \cdot B \cdot HD + \delta \cdot (\gamma_w \cdot B/2) \cdot \Delta H$$

Gde je koeficijent "δ" vrednost dejstva drenaže i zaptivanja -(0 < δ < 1).

1.1.7.5. Knsolidaciono injektiranje

Konsolidacionim injektiranjem (*dataljnije u delu 1.1.4*) se poboljšavaju karakteristike mehaničkih svojstava stenskih masa, tj. smanjuje se njihova deformabilnost. Kao dopunski efekat konsolidacionog injektiranja dobija se još:

- *povećanje otpornosti stenske mase na smicanje;*
- *homogenizacija stenske mase;*
- *stanje napona na koje ispucalost ima manji uticaj;*
- *smanjuje se vodopropustljivost stenskih masa.*

Konsolidaciono injektiranje se može primenjivati kao privremena i stalna meliorativna mera. Najčešće se za to primenjuju cementne injekcione mase, koje grade stvrđnuto injekciono telo - dobrih mehaničkih karakteristika. Važna svojstva cementnih suspenzija su: stabilnost i penetrabilnost, a zavise od finoće mliva cementa, disperzije cementnih čestica itd. S obzirom na veličinu čestica cementa, injektirati se mogu pukotine širine zeva 0,10-0,25 mm. Pošto visok vodocementni faktor suspenzije negativno utiče na ofiltriranje viška vode, to se penetrabilnost i fluidalnost cementnih suspenzija postiže dodavanjem aktivnih dodataka.

Injekcioni pritisci, da bi ostvarili svoju svrhu, moraju biti prilagođeni svojstvima stenskih masa i injekcionoj masi. Što je masa fluidnija, a pukotine većeg zeva, mogu se postići veći radijusi dejstva, odnosno može se usvojiti veće rastojanje između bušotina, uz povećanu sigurnost i optimalni efekat injektiranja. Ukoliko su pukotine ispunjene trošnom ispunom, tada je neophodno da se one isperu. Za to se primenjuju različiti postupci, a vodi kojom se vrši ispiranje dodaju se deterdženti ili druga sredstva. Pritisci treba da budu takvi da ne izazovu nepoželjne deformacije i lomove u stenskoj masi. Konsolidaciono injektiranje, u principu, daje mali efekat u slabo vodopropusnim sredinama, gde su pukotine stisnute, a to je najčešće slučaj na većim dubinama i u plastičnim sredinama.

Konsolidaciono injektiranje tunela pod pritiskom izvodi se vrlo često. Razlog tome je što se pri iskopu tunela, koji su relativno velikog prečnika, oko njega formira zona rasterećenja prirodnih napona i ta zona trpi nepoželjne deformacije na objekat i ne može da prenese unutrašnje hidrosatičke pritiske. Zato je neophodno, tu zonu rasterećenja, **konsolidaciono injektirati**. Dubina oslobađanja napona je u funkciji svojstava sredine, prečnika iksopa i može biti od 0,5 do nekoliko metara. Dubina bušotina treba da bude, teorijski posmatrano, kolika je zona rasterećenja.

Konsolidaciono injektiranje visokih brana je tehničko-ekonomski opravdano da se izvodi do dubine 20-25 m. Injektiranjem se obezbeđuje mogućnost građenja brana i na lošijim terenima.

Injektiranje se izvodi ili sa površine terena, ili kroz telo brane, kada je ona izgrađena do izvesne visine, ili iz injekcionih galerija.

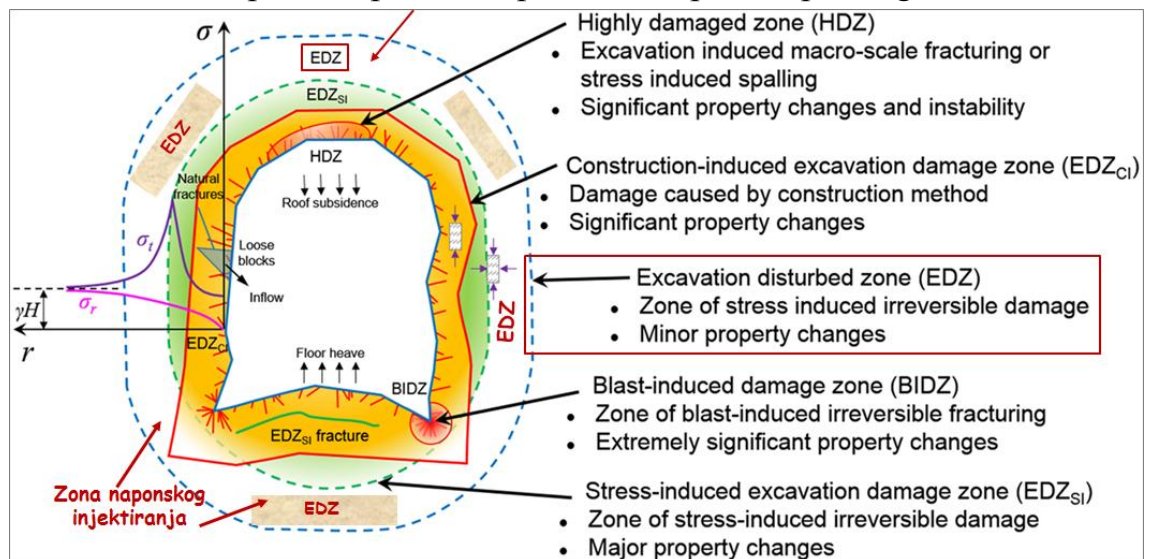
Ostali elementi injektiranja: ispiranje ispune, injekcioni pritisci, injekciona masa, režim injektiranja i dr. projektuju se u svakom konkretnom slučaju, uz uvažavanje opštih principa i uloge svakog posebnog elementa.

1.1.7.6. Naponsko (mlazno) injektiranje

Naponskim injektiranjem postiže se da se u zoni terena oko objekta, gde je došlo do oslobađanja napona usled iskopa, uspostavi prvobitno stanje napona. Time se, npr. u tunelu u kome je voda pod pritiskom, postiže jedan vrlo koristan efekat dejstva pritiska stenske mase na oblogu, obrnuto od pritiska vode koja je unutar objekta. Efekat injektiranja se ogleda u tome da obloga, koja pre injektiranja može da primi pritisak vode u iznosu 0,8-1 MPa, posle naponskog injektiranja može da primi unutrašnje pritiske i do 2,5 MPa.

Dakle, naponsko injektiranje ima zadatak da u stenskoj masi oko tunela izazove pritiske koji će izvršiti prednaprezanje, dajući joj prednapone pritiska. Prednaprezanje naponskim injekcijama je složen postupak, a uspeh zavisi od stanja stenske mase i kvaliteta izvedenih radova. Kako bi efekat naponskog injektiranja imao pravu svrhu, *pre početka naponskog injektiranja* neophodno je uraditi kontaktno injektiranje kojim se popunjavaju sve šupljine između obloge i stenske mase, odnosno obezbeđuje njihov neposredan kontakt.

Naponsko injektiranje ima za cilj **da se u zoni oslobađanja napona** (*Excavation Damaged Zone - EDZ*) uspostave prvobitni primarni naponi, a po mogućnosti i veći.



Sl.84:- Pregled različitih zona oštećenja oko podzemnog iskopa EDZ - poremećena zona iskopa koju treba sanirati naponskim injektiranjem.

U tom slučaju se oko tunela stvara zona sa povećanim **radijalnim i tangencijalnim naponima**. Oni se istovremeno prenose na stensku masu i tunelsku oblogu izazivajući u njoj prednapone pritiska. Naponsko injektiranje je moguće zbog deformacije stenske mase pod dejstvom injekcionih pritisaka. Pri tome stenska masa trpi deformacije usled čega dolazi do povećanja zeva pukotine u kojima se nalazi injekciona masa pod pritiskom. Kada se injektiranje završi, injekciona masa postaje čvrsta i suproavlja se smanjenju veličine pukotina.

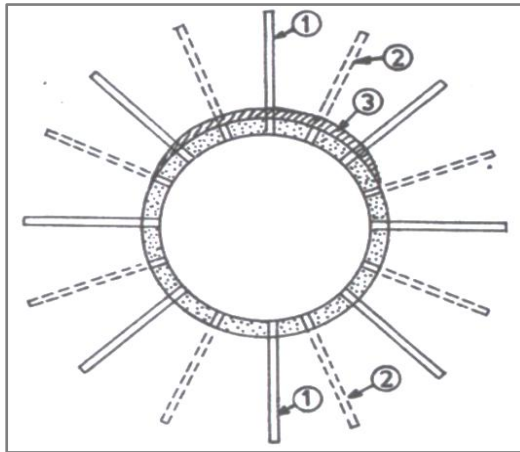
Naponsko injektiranje (*Jet Grouting*) je uobičajeni naziv za svaki postupak građenja upotrebom visokih pritisaka od 30 do 70 MPa. Velika brzina fluida koji se utiskuje (250 do 330 m/s) omogućava razbijanje strukture tla, premeštanje čestica i njihovo mešanje sa injekcionom smesom.

Danas su u primeni tri osnovna postupka izvođenja naponskog (mlaznog) injektiranja:

- **jednofluidni sistem**(*injekciona smesa*),
- **dvofluidni sistem**(*injekciona smesa - vazduh ili injekciona smesa - voda*) i
- **trofluidni siste**(*injekciona smesa - voda - vazduh*).

Injekcione mase moraju biti visokih mehaničkih karakteristika. Moraju imati malo skupljanje i plastično tečenje. Najčešće se koriste cementne injekcione mase, koje su od normalnog portland cementa, ili su od ekspanzivnih cemenata.

Injekcioni pritisak, pri naponskom injektiranju, mora biti dovoljno veliki, kako bi obezbedio traženo prednaprezanje i naknadno opadanje napona usled plastičnog tečenja stenske i injekcione mase, pada temperature itd. U načelu, trebalo bi da bude veći od prirodnih napona pre iskopa, a iskustvo je pokazalo da je dovoljno primeniti pritiske 2-2,5 puta veće od unutrašnjih radnih pritisaka.

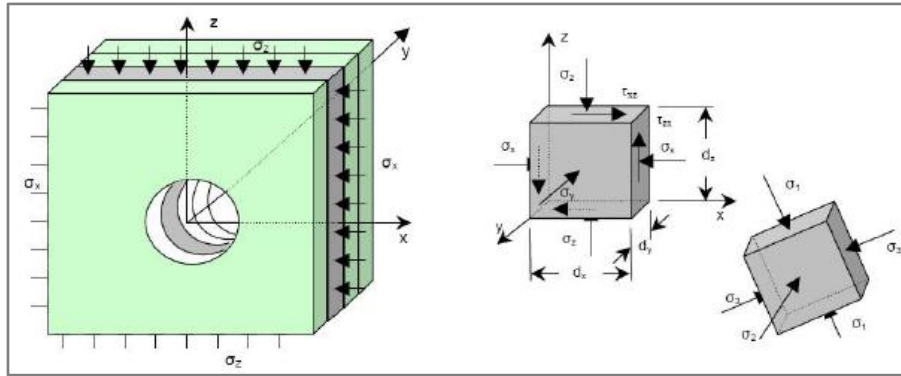


Sl.85:- Šema naponskog injektiranja-bušotine za naponsko injektiranje (1- neparni profil, 2 - parni profil); 3 - kontaktno injektiranje

Da bi se dobio potreban efekat prednaprezanja, potrebno je istovremeno injektirati u svim bušotinama u jednom profilu, ili u više profila ako je to potrebno, što se u konkretnim uslovima utvrđuje na probnim deonicama.

Posebna pažnja se posvećuje izboru postupka injektiranja. Po pravilu, naponsko injektiranje se izvodi posle kontaktnog, ili posle izvođenja zaptivnog oreola na izvesnom rastojanju od obloge, ako je stenska masa jako ispućala i vodopropusna. Problem odfiltriranja viška vode mora se pažljivo razmatrati i ukoliko za to nema prirodnih uslova potrebno je izvesti drenažne bušotine.

U sledećem primeru posmatraće se ravno stanje deformacija, uz uslov da su sprečene defomacije tela u pravcu normalnom na posmatranu ravan. Posmatra se tunelski otvor kod koga se analiza može pojednostaviti ravnim stanjem deformacija jer se sva pomeranja dešavaju u ravni normalnoj na osu tunela (sl.86).



Sl.86:- Uslovi ravnog stanja deformacija

Problem napona oko tunelskog otvora u stenskoj masi predstaviće se kao problem ploče sa otvorom, napregnute u svojoj ravni. U ovom slučaju stenska masa se posmatra kao **homogena, izotropna i linearno elastična sredina izložena hidrostatičkom pritisku**,

$$\lambda = 1 \Rightarrow P_V = P_H = P_O$$

pa se zbog simetrije opterećenja **posmatra samo deo ploče**.

Kakao se radijalni i tangencijalni naponi sa povećanjem udaljenosti od otvora približavaju naponu P_O koji predstavlja primarne napone, problem beskonačne ploče se zamenjuje pločom konačnih dimenzija uzimajući u obzir da za $r/a > 4$ priraštaj napona je manji od 6%. Na ovom primeru će se izvršiti poređenje rezultata dobijenih Kiršovim jednačinama sa rezultatima koji se dobijaju primenom metode konačnih elemenata odnosno korišćenjem programskog paketa **ABAQUS 6.10.(CPS4R)**.

Primer - ulazni podaci:

- radijus otvora $a = 1$ m,
- dimezija ploče $l = 5 \times 5$ m,
- hidrostatički pritisak kojem je izložena stenska masa $P_O = 30$ MPa (primarno naponsko stanje),
- Jungov (*Young*) modul elastičnosti $E = 6.780$ MPa,
- Poasonov (*Poisson*) koeficijent $\nu = 0,21$.

Mreža ploče i mreža konačnih elemenata ovde se neće prikazati (*zbog obima rada*), već se prikazuju samo dijagrami.

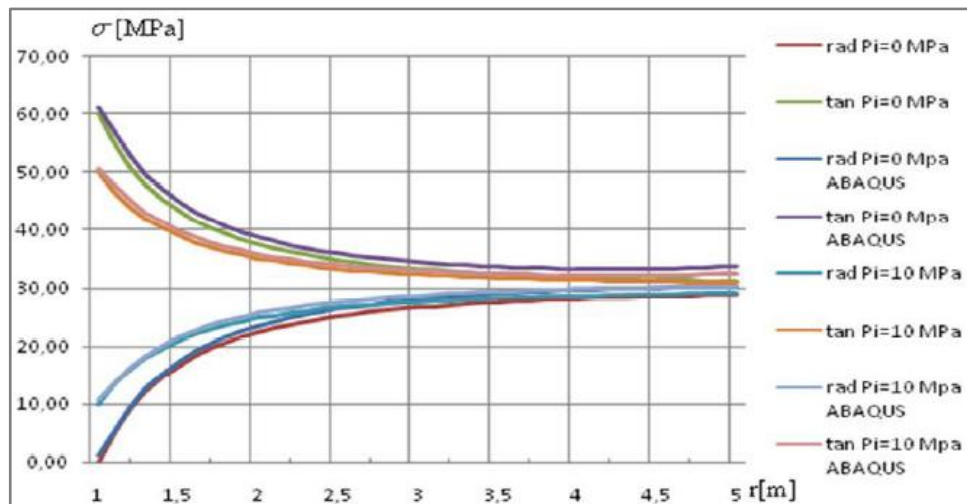
Kiršove jednačine za elastičnu sredinu izloženu hidrostatičkom pritisku:

$$\sigma_r = P_o - (P_o - P_i) \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = P_o + (P_o - P_i) \frac{a^2}{r^2}$$

Na dijagramu, sl. 87, predstavljena je promena radijalnog i tangencijalnog napona u zavisnosti od rastojanja od konture iskopa za ugao 90° .

Posmatraju se slučajevi bez i sa unutrašnjim pritiskom od 10 MPa.

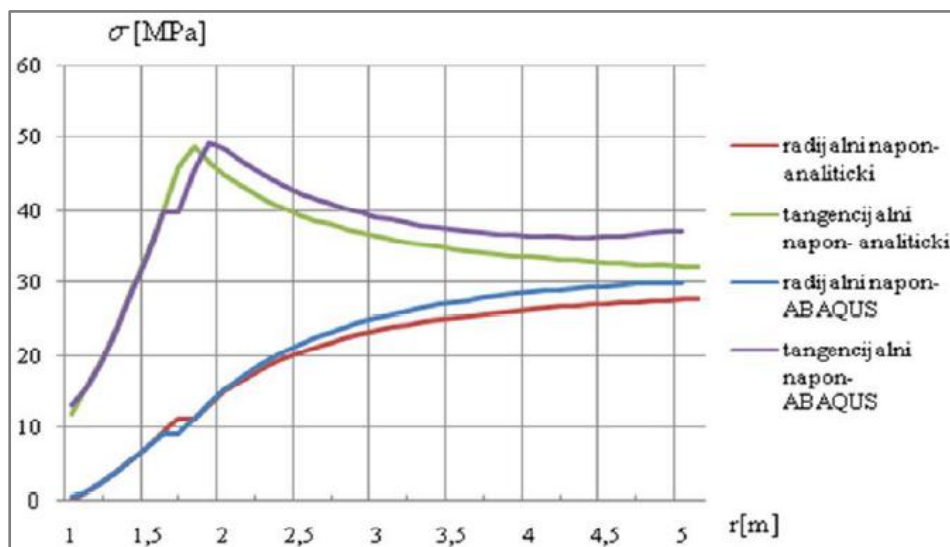


Sl. 87:- Radijalni i tangencijalni napon oko otvora ($\Theta=90^\circ$)

Na sledećem primeru se prikazuje raspored napona oko iskopa za slučaj *kada je stenska masa definisana Mohr-Kulonovim kriterijumom čvrstoće*. Svi ulazni podaci su isti kao i u prethodnom primeru s tim da ovde treba jos definisati:

- ugao unutrašnjeg trenja $\varphi=30^\circ$
- kohezija $c = 3,45 \text{ MPa}$

Treba napomenuti da se u *ABAQUS-u* upotrebljava drugačiji konačni element (*CPE4R*) nego u prethodnom primeru. U ovom primeru se samo pokazuju naponi oko iskopa bez unošenja pritiska po konturi iskopa $P_i = 0 \text{ MPa}$.



Sl.88:- Radijalni i tangencijalni napon oko otvora-bez injektiranja ($\theta=90^\circ$)

Iz datog primera vidi se dobro slaganje rezultata koji su dobijeni analitički sa rezultatima dobijenim u programu *ABAQUS*.

Vrednost radijusa u kome je formirana plasticna zona na prethodnom primeru iznosi $1,73 \text{ m}$, a određena je na osnovu sledećeg obrasca:

$$R_o = a \cdot \left(\frac{2}{K_P + 1} \cdot \frac{P_o + \frac{q}{K_P - 1}}{P_i + \frac{q}{K_P - 1}} \right)^{\frac{1}{K_P - 1}} = 1.73 \text{ m}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

gde je:

$$q = 2 \cdot c \cdot \tan(45 + \varphi / 2)$$

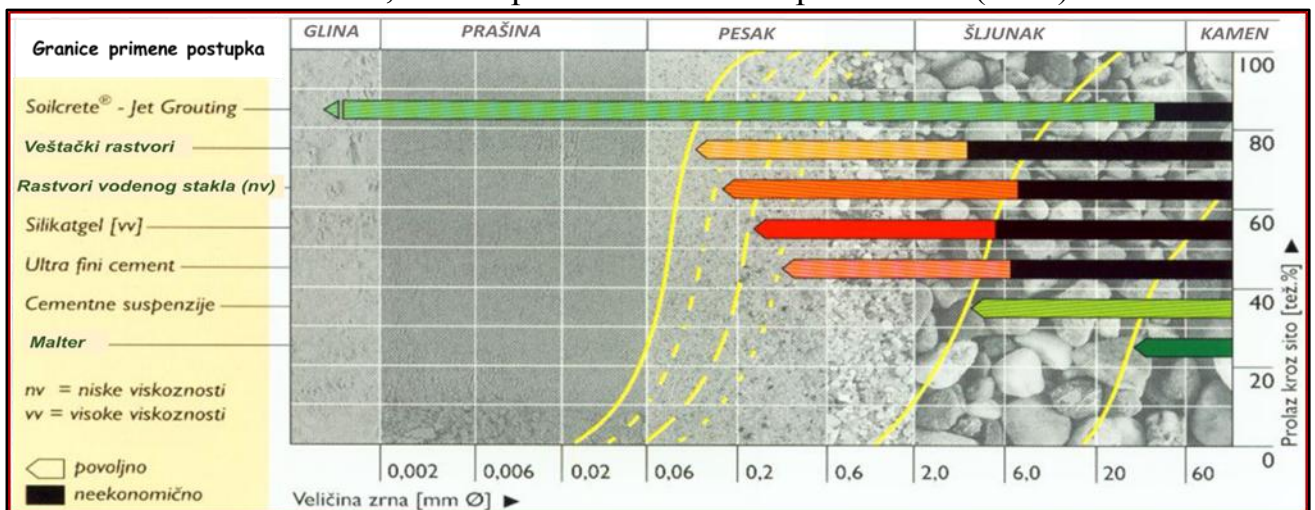
Postupak injektiranja se vrši u zoni koja je oslobođena od prirodnih napona. Pošto se naponsko injektiranje sprovodi u radijalno raspoređenim bušotinama, onda se oko iskopa formira prsten koji ima poboljšane mehaničke osobine (*soilcrete*), "**soil-crete**" - mešavina tla i cementa.

Pored navedenih uticaja injektiranja prikazanih na prethodnim dijagramima (*bez detaljnijih analiza*), injekcioni pritisci koji se unose u stensku masu izazivaju i sledeće promene:

- stenska masa se konsoliduje i povećava se modul deformacije,
- smanjuje se heterogenost i anizotropija i
- ujednačuje se prostorno stanje napona i smanjuje vodopropustljivost stenske mase.

Mlazno injektiranje, *engl. jet grouting - Soilcrete* postupak mlaznog injektiranja određena zapremina tla pretvara se u zemljani malter pri čemu se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza injektirane tečnosti. Istovremeno se čestice tla mešaju sa cementnom suspenzijom i zapunjuju zahvaćeni prostor. Višak nastale mešavine izlazi uz zidove bušotine na površinu. Prečnik razarajućeg delovanja mlaza u tlu kreće se do 2,5 m u zavisnosti od vrste tla, načina izvođenja i primenjenoj tečnosti.

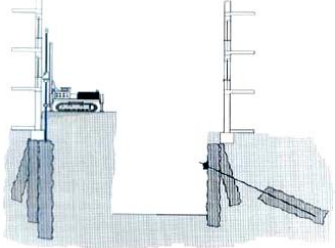
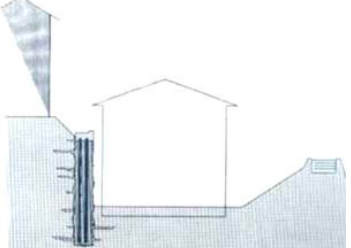
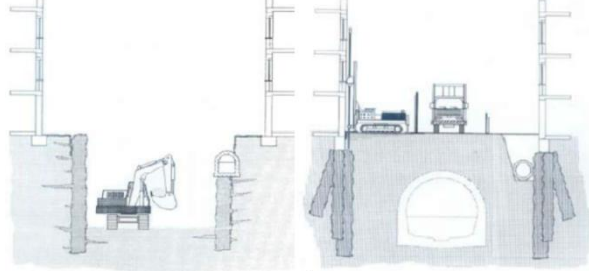
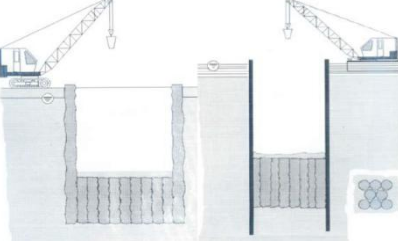
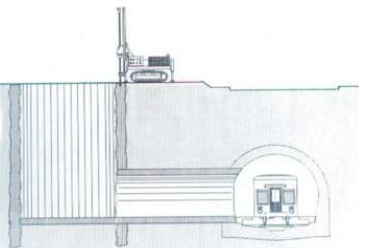
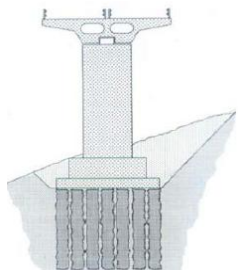
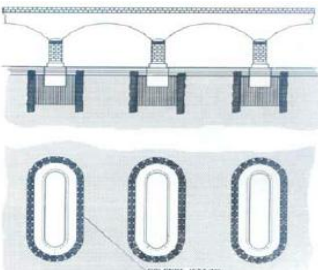
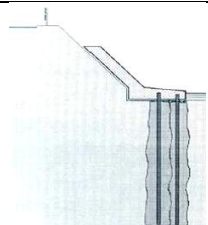
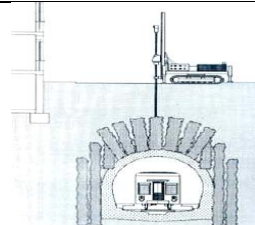
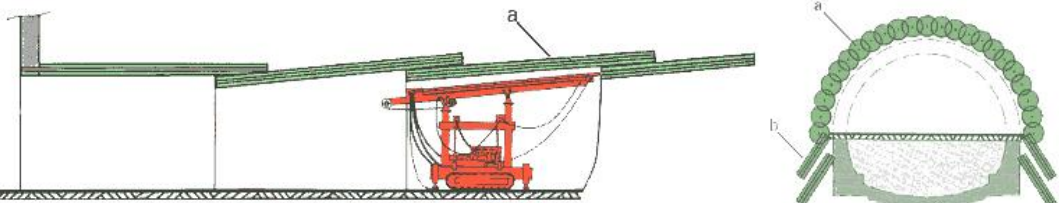
"**Soilcrete**"-mešavina tla i cementa se s obzirom na ojačanje i zaptivanje tla uspešno primenjuje u svim vrstama tla, uključujući i glinu i organske slojeve. Soilcrete se može koristiti i u stenovitom tlu, kao na primer u mekanim peščarcima (sl.89).



Sl.89:- Područje primene *Soilcrete* postupka mlaznog injektiranja

Iz navedenih primera može se zaključiti da se naponska slika stenske mase koja je injektirana može veoma jednostavno analizirati kao ravan problem, uz napomenu da ovde nije uzeta u obzir vremenska komponenta. Dijagrama koji su dobijeni analitičkim i numeričkim postupcima za injektiranu zonu plastičnosti su isti, razlika je samo u brojnim vrednostima. Ovo ukazuje da se dvodimenzionalni model mora uzimati sa oprezom jer je postupak injektiranja složen postupak koji zahteva trodimenzionalnu analizu i uvođenje vremenske zavisnosti.

Tabela 10 - Neke od mogućnosti mlaznog - "jet grouting" injektiranja

| NEKE OD MOGUĆNOSTI MLAZNOG - "JET GROUTING" INJEKTIRANJA | |
|--|--|
|  |  |
| <i>Osiguranje dubokog iskopa koji štiti iskop u blizini objekta</i> | <i>Armirana dijafragma u blizini postojećih objekata</i> |
|  | |
| <i>Osiguranje iskopa zemlje za potrebe izvođenja podzemne željeznice</i> | |
|  |  |
| <i>Osiguranje iskopa od vode za izvođenje šahti i vodonepropusnih zavesa od šipova - zaštita od vode</i> | <i>Konsolidacija zidova šahte kao zaštita iskop stuba</i> |
|  |  |
| <i>Ojačanje tla plitko temeljenog mosta - viadukta šipovima</i> | <i>Konsolidacija stubova mosta injektiranim šipovima</i> |
|  |  |
| <i>Vodootporna dijafragm kao zaštita rečnog nasipa</i> | <i>Konsolidacija iskopa za tunelsa oblogom od šipova</i> |
|  | |
| <i>Progresivno obezbeđenje svoda tunela u nekoherentnom tlu i izvedba tunela-vertikalnim, kosim i horizontalnim bušotinama</i> | |

1.1.8. Injeksione mase

Osnovni faktori koji se moraju poznavati pre donošenja odluke za izvođenje injekcionih radova i odluke o primeni konkretne metode injektiranja su:

Geološki faktori, pri čemu se mora poznavati vrsta stene, uslojenost i tektonika užeg i šireg područja;

Petrografski faktori, pri čemu se mora poznavati sastav i struktura stene, hemijske osobine stene te sistem pukotina i mikropukotina;

Hidrogeološki faktori, pri čemu se mora poznavati karakter nadzemne i podzemne vode, njeno kretanje i hemijski sastav;

Tehnički faktori, pri čemu se moraju poznavati tehničke karakteristike objekta, njegova namena i uslove koji se moraju postići injektiranjem;

Faktori injektiranja, moraju se definisati sledeći osnovni uslovi:

1. **Gustina bušotina** (razmak između bušotina u jednom redu i razmak između redova),
2. **Dubina i nagib bušotina**,
3. **Injekciona smesa**,
4. **Sistem i redosled injektiranja**,
5. **Pritisak injektiranja i**
6. **Kontrola uspeha izvedenog injektiranja**.

Tek pošto smo upoznali prva četiri faktora, može se pristupiti određivanju petog faktora - **pritisak injektiranja**.

Elementi petog faktora su međusobno direktno zavisni i ne mogu se pojedinačno određivati, jer jedan od elemenata bitno utiče na svaki sledeći element.

Kod svakog injekcionog zahvata u terenu, uvek se postavlja pitanje *maksimalno dozvoljenog pritiska injektiranja*. Ovaj odgovor nije jednostavan i lak jer ne postoje apsolutna pravila, budući da je stena glavni faktor koji utiče na određivanje injekcionog pritiska.

Pritisak kod injektiranja ima višestruku funkciju:

- da svlada hidrauličke otpore u cevovodima i tlu;
- da neznatnom deformacijom tla poveća propusnost radi što boljeg toka injekcione smese kroz pore i pukotine;
- da izazove kretanje injekcione smese u tlu unutar predviđenog radijusa oko injekcione bušotine;
- da se u tlu iscedi višak vode iz injekcione smese u najsitnije pore i pukotine.

Pritisak kod injektiranja kreće se u veoma širokim granicama i zavisi od:

- debljine (težine) nadsloja i
- čvrstoće i homogenosti stene.

Definitivni matematički odnos za proračun pritiska injektiranja ne postoji.

Kod malih pritisaka postoji opasnost da se ne zainjektira određeni radijus oko injekcione bušotine te da se injekciona smesa ne oslobodi viška vode i tako ne postigne odgovarajuću čvrstoću.

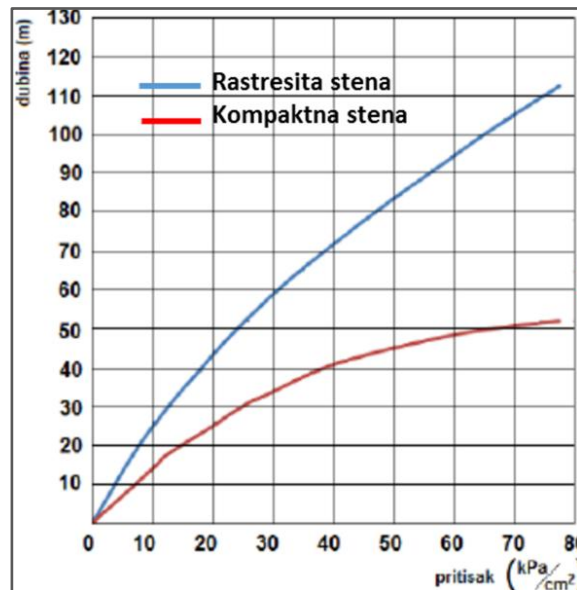
Kod velikih pritisaka može se izazvati raslojavanje i lom stene oko bušotine, nepotrebno povećati utrošci injekcione smese, a može doći i do uzdignuća površine tla.

Po pravilu su u homogenoj, makar i raspucaloj steni, povoljniji veći pritisci, jer osiguravaju bolju vezu preko pukotinskog sistema sa sledećim bušotinama i povećavaju čvrstoću ugrađenoj injektiranoj masi.

Manji pritisci primenjuju se u plićim etažama, posebno kod horizontalno uslojenih stena (npr. škriljaca) gde postoji opasnost od uzdizanja tla.

Pritisak injektiranja treba, prema tome, prvenstveno prilagoditi osobinama stena, odnosno tlu koje se injektira.

Sa dubinom injektiranja pritisak se obično povećava, a granice povećanja obično se kreću od 0,50 do 1,10 at/m (sl. 90) i zavise od težine nadsloja na injektiranoj bušotini.



Sl.90:- Orijentacioni pritisak injektiranja za različite dubine

Pritisak kod injektiranja meri se manometrom. Ako pritisak postepeno raste, znači da se sastavni delovi u injekcionoj smesi normalno talože u pukotinama i da se voda postepeno odvaja. Međutim, ako dođe do naglog porasta pritiska injektiranja, to može značiti:

- ⇒ da je teren nepropustan,
- ⇒ da teren više ne prima injekcionu smesu, tj. da je već zapunjen,
- ⇒ da su začepljeni cjevovodi kojima se provodi injekciona smesa i
- ⇒ da merni instrumenti ne pokazuju ispravan pritisak, tj. da su oštećeni usled rada.

Naprotiv, kod naglog pada pritiska, uzroci mogu biti:

- ⇒ otvaranje većih šupljina u terenu,
- ⇒ izbijanje injekcione smese na površinu,
- ⇒ otvaranje novih komunikacija injekcionoj smesi usled raslojavanja (deformacija terena) i
- ⇒ da merni instrumenti ne pokazuju ispravan pritisak, tj. da su oštećeni usled rada.

U svim slučajevima, a zavisno od uzroka promene pritiska za vreme injektiranja (osim kvara na instalacijama i mernim instrumentima), prelazi se pri injektiranju na:

- ⇒ gušće smese,
- ⇒ smanjenje pritiska injektiranja i
- ⇒ prekid rada na određeno vreme da bi se ubrizgana injekciona smesa u podzemlju vezala.

Radius prodiranja ubrizgane injekcione smese u tlo zavisi od:

- ⇒ *visine pritiska injektiranja,*
- ⇒ *viskoziteta smese,*
- ⇒ *dimenzija pukotina ili pora i*
- ⇒ *trajanja injektiranja.*

Vreme trajanja injektiranja, pri izvođenju radova na etažama ili bušotinama zavisi od, kod cementnih suspenzija, vremena početka vezivanja injekcione smese (2 do 4 sata), a kod hemijskih injekcija početka koagulacije. Završetak injektiranja na određenoj dubini (etaži) bušotine izražava se utrošcima injekcione smese u litrima pod propisanim zavisnim pritiskom kroz određeno vreme.

Kako bi injekcione smese mogle biti ugrađene i odgovarale svojoj nameni, moraju zadovoljiti određene uslove i imati određene karakteristike. Opsežna laboratorijska ispitivanja injekcionih smesa sa različitim razmerama osnovnih komponenata, pružaju mogućnost izbora najpovoljnije smese.

Svakoj injekcionoj smesi treba definisati osnovne tehničke karakteristike:

- ⇒ **Viskozitet** - svojstvo tekućina da stvaraju neki otpor protiv međusobnog pomicanja dva susedna sloja (unutrašnje trenje). Razlikujemo *dinamički i statički* viskozitet, tj. *protočni*, koji nam je potreban da bismo saznali kakvi će se otpori javljati kod kretanja injekcione smese i *statički*, koji nam pokazuje kada će suspenzija početi prelaziti u gel;
- ⇒ **Čvrstoća** - od koje u najvećoj meri zavisi poboljšanje mehaničkih karakteristika stenskog masiva u koji je ubrizgana;
- ⇒ **Sedimentaciona zapremina** - iz suspenzije koja se ubrizgava u tlo najpre se talože krupne, a zatim sve sitnije čestice, dok na kraju na površini ne ostane bistra voda. Zapreminu tih istaloženih čestica u određenom vremenskom periodu nazivamo sedimentaciona zapremina. Voda koja se izdvoji u tom vremenskom periodu nazivamo *dekantaciona zapremina*;
- ⇒ **Otpornost na eroziju** - je veoma važna karakteristika injekcione smese. Ta otpornost, kako na mehaničko delovanje, tako i na hemijsko, osnovni je preduslov za uspeh injektiranja i za postizanje traženih poboljšanja nosivosti terena i smanjenja vodopropusnosti sa stalnim karakterom.

1.1.8.1. Vrste injekcionih smesa

Injekcione smese mogu biti suspenzije, emulzije ili rastvori.

Injekcione mase se u stanju tečnog fluida, što manjeg viskoziteta, injektiraju u teren pod određenim pritiskom. Prema vrstama i sadržaju mogu biti:

- ***suspenzije,***
- ***emulzije i***
- ***rastvori (koloidni, pravi).***

Suspenzija je mešavina čestica nekog materijala i tečnosti, s tim da nije došlo do otapanja čvrstih čestica materijala. Kod injekcionih smesa najčešća suspenzija je cementno mleko (cement + voda). Suspenzije kod kojih su čvrste čestice tako sitne da

ne dolazi do njihovog taloženja, već lebde u vodi, zovu se koloidne suspenzije. Kod injektiranja uopšte, dobijamo suspenzije razmuljivanjem u vodi.

Suspenzije se spravljaју na bazi mešavina: vode, cementa, gline, peska ili agregata. Suspenzije s obzirom na vrstu stabilizatora mogu biti:

- suspenzije cementa,
- suspenzije cementa i peska,
- suspenzije cementa i bentonita,
- suspenzije cementa i gline,
- suspenzije cementa, bentonita i peska i
- suspenzije cementa, gline i peska.

Umesto peska mogu biti i drugi dodaci, npr. kameno brašno, piljevina i slično, ali se ti dodaci veoma retko upotrebljavaju.

| MATERIJALI KOJI SE UPOTREBLJAVAJU ZA INJEKTIRANJE | |
|--|----------------------|
| - Cement | i voda |
| - Cement, | kameno brašno i voda |
| - Cement, | gline i voda |
| - Cementna | gline, pesak i voda |
| - Asfalt | |
| - Gline | i voda |
| - Hemikalije | |

| DODACI | |
|--|---|
| Uobičajeni dodaci korišćeni sa cementnim malterima | |
| 1. Calcium chloride |] |
| 2. Sodium hydroxide |]-----for accelerating setting time |
| 3. Sodium silicate |] za ubrzavanje vremena postavljanja |
| 4. Gypsum |] |
| 5. Lime sugar |]-----for retarding setting time |
| 6. Sodium tannate |] za usporavanje vremena postavljanja |
| 7. Fine bentonite |] |
| | for reducing cost of grout and |
| 8. Clay |] reduces strength of grout |
| 9. Ground shale |]----- za smanjenje troškova |
| 10. Rock flour |] injektiranja i smanjenje čvrstoće injektiranja |

Svi ovi materijali suspendovani u vodi, postižu manje ili više stabilne suspenzije. Da bi se postigla bolja pojedina fizičko-mehanička i reološka svojstva suspenzija i ispune u tlu, injektibilnost, dirigovalo vreme vezivanja, dodaju im se razni dodaci (aditivi). Ti aditivi mogu biti: *ubrzivači, usporivači, emulgatori, stabilizatori, plastifikatori, plastifikatori aeranti, dodaci za povećanje čvrstoće i dr.* Dodaju se u malim količinama. Veoma su skupi.

U izvesnim specijalnim slučajevima koriste se bitumeni ili bitumenske emulzije.

Ove injekcione mase su vrlo osetljive i zahtevaju specijalnu opremu, obučeni kadar i posebne mere higijensko-tehničke zaštite.

Za injektiranje granularnih sredina, gde se, iz više razloga, ne mogu primeniti klasične injekcione mase, koriste se hemijske injekcione mase koje predstavljaju koloidne

rastvore (*prečnik čestica 10^{-5} - 10^{-7} cm*) i organske smole koje su pravi rastvori (*prečnik čestica manji od 10^{-7} cm*). Ove mase su i 3-5 puta skuplje od klasičnih pa se zbog toga koriste samo u onim slučajevima kad se drukčije ne mogu postići traženi efekti. Primenjuju se prvenstveno u prašinstim peskovima i peskovima, lesu ili čvrstim stenskim masama sa pukotinama čiji je zev manji od 1 mm.

Suspenzije se primenjuju u slučajevima rastresitih stijena većih poroznosti i većih vodopropusnosti, gdje je koeficijent vodopropusnosti veći od 10^1 cm/s. U izuzetnim slučajevima moguće je suspenziju primeniti i do koeficijenta vodopropusnosti 10^{-1} cm/s, ali to samo onda ako su primenjene suspenzije vrlo fine bentonitne gline stabilizovane hemikalijama. Područje primene takvih stabilizovanih bentonitnih suspenzija završava u srednje krupnim pescima.

Organske smole mogu biti: tečni monomeri koji sa reaktivom formiraju čvrsti gel i prekondenzovani polimeri koji formiraju plastične mase velike čvrstoće.

Emulzija je mešavina dveju tečnosti. Kod injekcionih radova tečnost u kojoj se emulguje je voda. Emulzije se upotrebljavaju u tehnici bušenja kod isplaka, a u injekcionom radu kod primene bitumenskih injekcija.

Emulziona injekciona smesa, uopšte, smanjuje koeficijent vodopropusnosti, ali ne povećavaju čvrstoću tla, zato je njihova primena vrlo mala u odnosu na suspenzije. Neki primeri emulzija: bitumen, gumeni lateks u vodi, crnogorične smole u alkalijama idr.

Rastvori su mešavine dveju tečnosti ili soli, gde se jedna potpuno rastvori (otopi) u drugoj. Kod hemijskih injekcija upotrebljavamo rastvore i to najčešće rastvore silikata:

➤ *hemijske injekcije uz upotrebu vodenog stakla:*

- sistem sa trenutnom koagulacijom i
- sistem sa tempiranom koagulacijom

➤ *bez upotrebe vodenog stakla:*

- soli Sb, As, Bi, Su, Fe koje se talože u tlu na osnovu hidrolize
- silicijumov ili titanov hlorid u organskom rastvoru.

Rastvori, uopšte, imaju primenu veću od primene emulzija, ali manju od primene suspenzija.

Organski polimeri:

- *akrilamidne smole*
- *epoxidne smole*
- *karbomidne smole*

Za stabilizaciju finih pukotina u steni, finog peska i mulja sa koeficijentom propusnosti manjim od $k = 1 \times 10^{-1}$ cm/s, najčešće se primenjuju silikatne injekcije i organski polimeri. Međutim, zbog male brzine vode uz sitna zrnca tla, područje primene tih sistema, čak i u slučajevima kad je njihova viskoznost praktički jednaka onoj kod vode, ograničeno je koeficijentom propusnosti $k = 5 \times 10^{-5}$ cm/s. U slučajevima potrebe stabilizacije tla koeficijenta propusnosti manjeg od $k = 5 \times 10^{-5}$ cm/s, primenjuje se metoda elektroosmozskog odvodnjavanja, odnosno elektrohemijske stabilizacije tla.

Danas postoji veoma veliki izbor injekcionih smesa pa je osnovno umeće injektiranja u odabiranju odgovarajuće injekcione smese koja će se najbolje prilagoditi traženim rezultatima, a da se ne naruši ekonomičnost rada i zahvata.

Injekcione smese mogu se podeliti u tri osnovne grupe i organske smole:

⇒ **nestabilne smese** - suspenzije cementa u vodi (po potrebi sa dodatkom peska)

⇒ **stabilne smese** - smesa vode, cementa i koloidne gline (po potrebi sa dodatkom peska)

⇒ **hemijski proizvodi** - vodeno staklo sa dodatkom za stvaranje gela

⇒ **organske smole**

Nestabilne smese su one koje se upotrebljavaju za injektiranje pukotina. Kod tih smesa čestice se vremenom talože na dno kad dođe do mirovanja suspenzije. U početku primene takvih suspenzija upotrebljavale su se često retke suspenzije, čak do odnosa cementa i vode 1:50, danas se ta razmera kreće u granicama od 1:4 do 1:0,7.

Kod nestabilnih smesa pritisak injektiranja igra važnu ulogu, jer upravo pritisak može otvoriti pukotine i pospešiti, do određene mere, uspeh injektiranja. Nestabilne smese, osim u iznimnim slučajevima, ne upotrebljavaju se za injektiranje peska i šljunka. Ako su zrna peska manja od 1mm, cement ne može prodreti u međušupljine. Ukoliko su zrna veća, cement iz cementne suspenzije se brzo taloži pa se dobija veoma mali radijus delovanja injekcione smese.

Stabilne smese su, zahvaljujući odsustvu sedimentacije za vreme injektiranja, pravi fluidi koji se mogu ubrizgavati sve dok početak vezivanja cementa u smesu ne utiče na naglo povećanje injekcionog pritiska. Kod injektiranja sa stabilnim smesama, preporučljivo je unapred odrediti količinu injekcione smese po etaži ili bušotini.

Pritisak injektiranja zavisi od propusnosti stene ili veličine pukotine, viskoznosti smese i predviđenom utrošku. Međutim, ako je pritisak injektiranja preveliki, dolazi do raslojavanja - veštačkih pukotina - i to prvo u normalnom smeru, a zatim u horizontalnom.

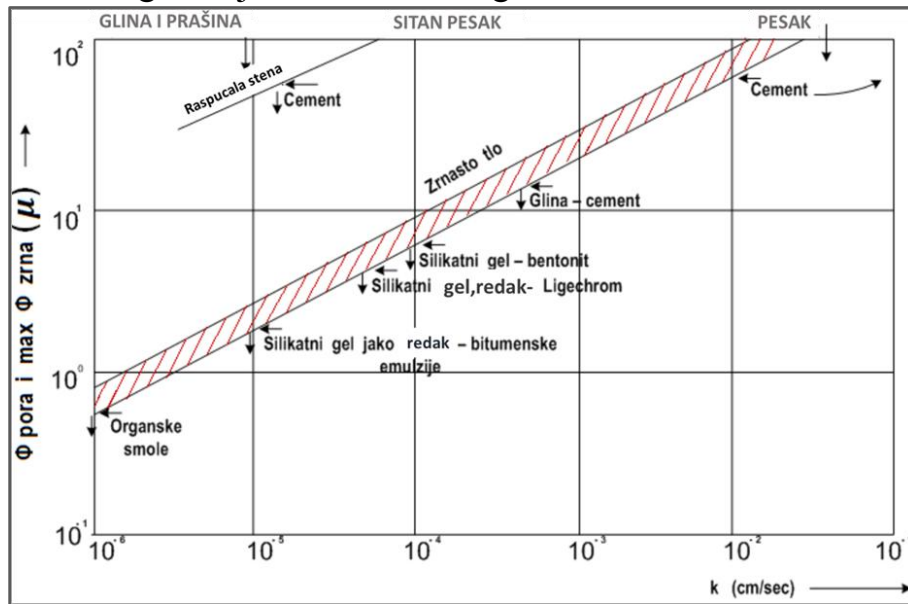
Stabilnim smesama mogu se ekonomično injektirati peskovi, aluvijalni nanosi i veće pukotine.

Aktivirana glina predstavlja prelaz između stabilnih smesa i hemijskih injekcija, jer postupak osigurava deflokulaciju gline. Ukoliko ne dođe do deflokulacije gline, aktivirane gline su sličnije i bliže glineno-cementnim smesama nego hemijskim.

Hemijske injekcije se već dugo vremena upotrebljavaju, a naročito silikatne injekcije. Do 1940. godine, silikatne injekcije bile su jedine injekcione smese za injektiranje aluvijalnih nanosa. Kod prvih uspešnih postupaka odvojeno se injektirao silikat i reaktiv. Prvo se injektirao silikat, a potom reaktiv i tako postizalo trenutno stvaranje gela. Ovaj je postupak zahtevao mali razmak između bušotina i redova (veliku gustoću bušotina) od 0,30 m do najviše 1,00 m. Trenutno stvaranje gela uslovljava mali radijus delovanja injekcione smese.

Unazad više od 20 godina, a posebno u zadnjih par godina, razvijeni su postupci koji omogućavaju stvaranje gela istovremenim injektiranjem silikata i reaktiva. Usprkos svojim veoma povoljnim karakteristikama, silikatne injekcije, po svojoj fluidnosti, nisu slične vodi. Mešanjem silikata i reaktiva povećava se viskoznost mešavine. Osim toga, silikatni rastvori sadrže koloidne čestice koje, ma koliko bilo male, sprečavaju prodiranje tih čestica u izrazito sitnozrne terene.

Organske smole imaju viskoznost od 1,5 do 4 puta veću od vode, te su stalne do polimerizacije. Radi toga može se reći da se skoro sve sredine kroz kojih prolazi voda, mogu injektirati odgovarajućim vrstama organskih smola.



Sl. 91:- Prodiranje smese u tlo prema propusnosti i sastava tla

Za potrebe injektiranja koriste se razne mašine i uređaji raznih proizvođača - injeksione platforme sa kompletnom opremom, npr.:

- injektor,
- mešalica za injeksione mase,
- pumpa za injektiranje sa kompletnom opremom snage 22 kW, maks. kapaciteta 200 l/min i radnog pritiska do 100 bara, itd.



Sl.92:- Injekciona platforma - pumpa za injektiranje sa pratećom opremom istatičko ojačanje zidova izvedeno mlaznim betonom

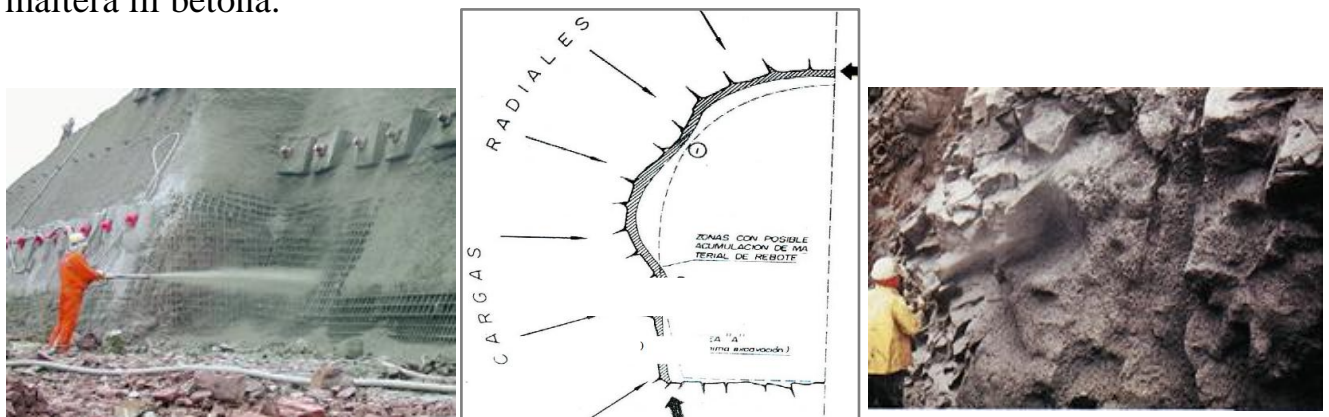
1.2. Torkretiranje

Torkretiranje je geotehnička metoda poboljšanja svojstava terena koja se izvodi tako što se površine stabilizuju nabačenim špic betonom-torkretom. Površine mogu biti prirodne kosine ili iskopi u terenu:

- zaseci;*
- useci;*
- podzemni iskopi.*

Torkret predstavlja mešavinu: vode, cementa i peska ili agregata. Nabacuje se u slojevima

Po definiciji, mlazni beton je beton transportovan pomoću vazduha pod pritiskom sa velikom brzinom. Torkret beton izumio je američki arhitekta *Carl Ethan Akeley* 1910. godine. Akeley je imao ideju da razvije "cementi pištolj" koji omogućava raspršivanje maltera ili betona.



Sl.93:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona

Torkret beton (*Shotcrete*) uglavnom se koristi u podzemnim građevinskim projektima (putno-železnički tunel, hidroelektrane, rudnici, parkinzi, podzemna železnica, metro, skladišta itd.). Uz to, torkret je ekonomičan alat za izvođenje radova na stabilnosti nagiba, bazena, plovnih puteva, popravka betona, unutrašnje obloge i arhitektonskih građevina. Ukupna količina torkret betona u svetu koja se godišnje primenjuje je više od 12 miliona kubnih metara.

Dakle, pod torkretiranjem podrazumeva se postupak nabacivanja betona na jednostranu oplatu ili na neki zid, površinu ranije izbetonirane konstrukcije, površinu stene (u useku, tunelu i slično), putem komprimovanog vazduha. Često se, umesto pojma "torkret", koriste i nazivi "prskani" ili "mlazni beton", dok su u engleskom govornom području u upotrebi termini "shotcrete" ili "sprayed concrete". Pod ovim terminima često se istovremeno podrazumevaju konstruktivni materijal, proces i oprema za nanošenje torkreta. Mada relativno skup, postupak torkretiranja dosta se široko primenjuje, pošto se ovako ugrađen beton odlikuje visokim fizičko-mehaničkim svojstvima (zapreminskom masom, čvrstoćom, athezijom za podlogu, vodonepropustljivošću, otpornošću na dejstvo mraza), kao i zadovoljavajućom trajnošću.

Prskani beton ili *torkret-beton* (ime dobio po proizvođaču pumpi *Torkret; eng. shotcrete*), postavlja se na željeno mesto pomoću kompresovanog vazduha. Torkret-beton se često koristi prilikom betoniranja kosih/vertikalnih zemljanih ili kamenih površina, pošto eliminiše potrebu za oplatom. Ponekad se koristi za ojačavanje stene, prilikom gradnje tunela, zaštite saobraćajnica od odrona i sl.

Torkretiranje - postupak kojim se nanosi sloj špric-betona ili cementnog maltera na sveže otkrivene zidove podzemnih prostorija ili kosina i predstavlja jednu vrstu podgrade ili obloge podzemne prostorije, odnosno zaseka ili useka. Pored podgrađivanja, odnosno oblaganja prostorije postižu se i efekti očvršćavanja stenske mase i njene izolacije od spoljašnjih uticaja - atmosferilija. Ovi postupci primenjuju se samo u terenima izgrađenim od ispucalih čvrstih stenskih masa.

Torkret predstavlja mešavinu: vode, cementa i peska ili agregata. Nabacuje se u slojevima, a nakon očvršćavanja njime se ostvaruje bolja stabilnost izdvojenih blokova stenske mase po konturi iskopa, sprečavaju se uvećani dotoci vode i znato se smanjuju naročito uticaji atmosferilija na površine otvorenih kosina. Na površine iskopa može biti prethodno ugrađena odgovarajuća žičana mreža, preko koje se nabacuje torkret. Žičana mreža služi kao armatura.



Sl.94:- Šematski prikaz sastava prskanog (mlaznog) betona

Torkret najčešće ima zadatak da osigura privremenu stabilnost iskopa ili kosine. U nekim slučajevima debljina torkreta je tolika da on preuzima i ulogu trajne podgrade iskopa.

➤ Dve su osnovne tehnike ugradnje mlaznog (torkret) betona:

1.2.1. Suvi postupak - suva mešavina cementa i agregata dovodi se na mlaznicu vazдушnim transportom gde joj se dodaju voda i aditivi.

- Suva mešavina sastavljena od agregata i cementa ubacuje se u mešalicu odakle se komprimovanim vazduhom transportuje kroz gumeno crevo do mlaznice za nabacivanje
- Kod same mlaznice posebnim crevom dovodi se voda i aditivi i dodaju se suvoj smesi u određenoj srazmeri, nakon čega se jak mlaz mlaznog betona usmeri na planiranu površinu.

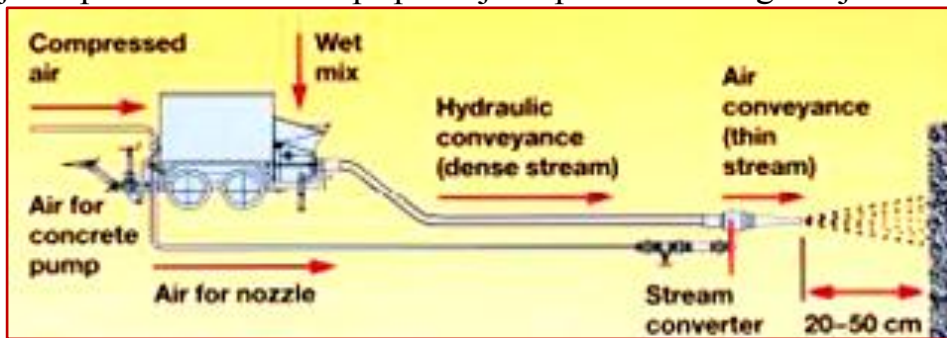


Sl.95:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona - suvi postupak

1.2.2. Mokri postupak

- U uređaj se doziraju i mešaju cement, agregat, voda i aditivi ili se stavlja već pripremljen beton u fabrici betona, željenog vodocemntnog faktora i gumenim cevima

dovodi na mlaznicu vazдушnim transportom ili pumpama za beton, a zatim se vrši nabacivanje na podložni beton ili pripremljenu površinu za ugradnju.



Sl.96:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona - mokri postupak

Nanošenje torkreta - postupak kojim se nanosi sloj špric-betona ili cementnog maltera na sveže otkrivene zidove podzemnih prostorija ili kosina može biti ručno i mašinsko.



Sl.97:- Ručno i mašinsko nanošenje mlaznog betona

Dakle, generalno, postoje dva postupka nanošenja torkreta na podlogu: *suvi i mokri*. Kod suvog postupka, do uređaja za nabacivanje - torkretnog topa, dovodi se suva mešavina agregata i cementa pod pritiskom, pa se tek neposredno pred nabacivanje na podlogu ova mešavina meša sa vodom. Pri tome, obično se koristi sitniji agregat ($D \leq 8$ mm), a korišćeni vodocementni faktor kreće se u granicama 0,32-0,37. Optimalna debljina sloja nabačenog betona iznosi 25-30 mm. U slučaju mokrog postupka, sve komponente betonske mešavine istovremeno se mešaju, a zatim se potiskuju kroz naročite cevi do mlaznice iz koje bivaju izbačeni brzinom od oko 120 m/s. Pri ovom postupku mogu se koristiti i agregati većih prečnika ($D \leq 25$ mm), uz manji utrošak cementa u odnosu na suvi postupak. Takođe, primenom ovakve tehnologije omogućeno je nabacivanje slojeva betona veće debljine, koja može da iznosi 50-70 mm.

Za obe metode mogu biti dodati aditivi aksceleratori i vlakna kao armatura - česta je upotreba silicijumske prašine i vlakana.

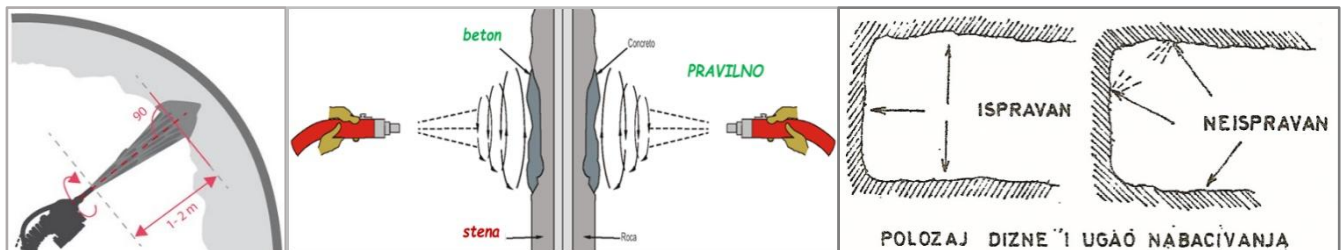
U poslednje vreme, sve češće se primenjuju tzv. mikroarmirani torkret betoni (FRS – *Fiber Reinforced Shotcrete*). Razlika u odnosu na standardni torkret beton (armiran klasičnom - čeličnom armaturom u vidu mreže), je u tome što FRS beton sadrži armaturu u obliku čeličnih ili sintetičkih vlakana. Tokom nanošenja torkreta na podlogu velikom brzinom, vlakna se uniformno raspoređuju u masi betona, čime se dobija homogenija struktura kompozita u vidu prostorne matrice armirane trodimenzionalnom mikroarmaturom. Vlakna u značajnoj meri mogu da poboljšaju svojstva betona, a pre svega u domenu povećanja zateznih čvrstoća (pri aksijalnom zatezanju, savijanju i cepanju), zatim poboljšanja statičke i udarne žilavosti, kao i kontrole propagacije prslina

usled skupljanja. Vlakna, takođe, povećavaju atheziju (prianjanje) betona za podlogu, vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza i otpornost pri požarnom opterećenju.

U oblasti geotehničkih melioracija, koristi se: kao zaštitni sloj od atmosferskih uticaja, kao čvrsta betonska masa koja povezuje blokove ispucalih stenskih masa na kosinama ili u podzemnim iskopima, za zatvaranje pojedinih šupljina u stenskoj masi, u pojedinim slučajevima se izvodi kao zamena za trajnu oblogu iskopa.

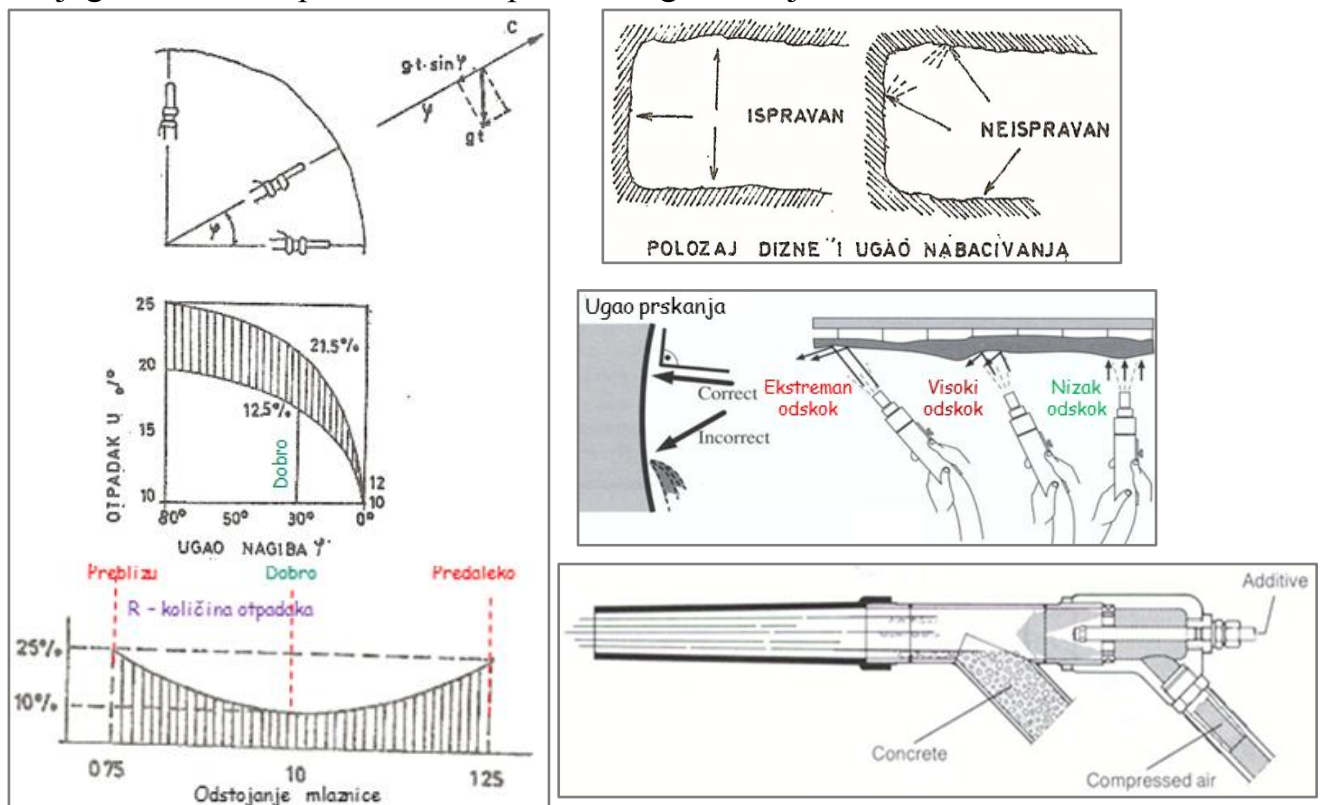
U cilju smanjivanja odskoka (tzv. "rebound" efekat), obezbeđenja neophodne tiksotropnosti mešavine i boljeg slepljivanja mase za površinu na koju se nabacuje, torkret-beton često se spravlja i sa određenim specifičnim hemijskim dodacima, kao i sa mikroarmaturom (najčešće čelična ili sintetička vlakna).

Ubrzani priraštaj čvrstoće kod torkret-betona, njegova sposobnost da se lako nanosi na nepravilne površine bez potrebe za postavljanjem oplata, kao i sposobnost da obezbedi dodatnu fleksibilnost stenskoj masi, čine ovaj postupak idealnim za primenu u podzemnim radovima, kao i u oblasti sanacija.

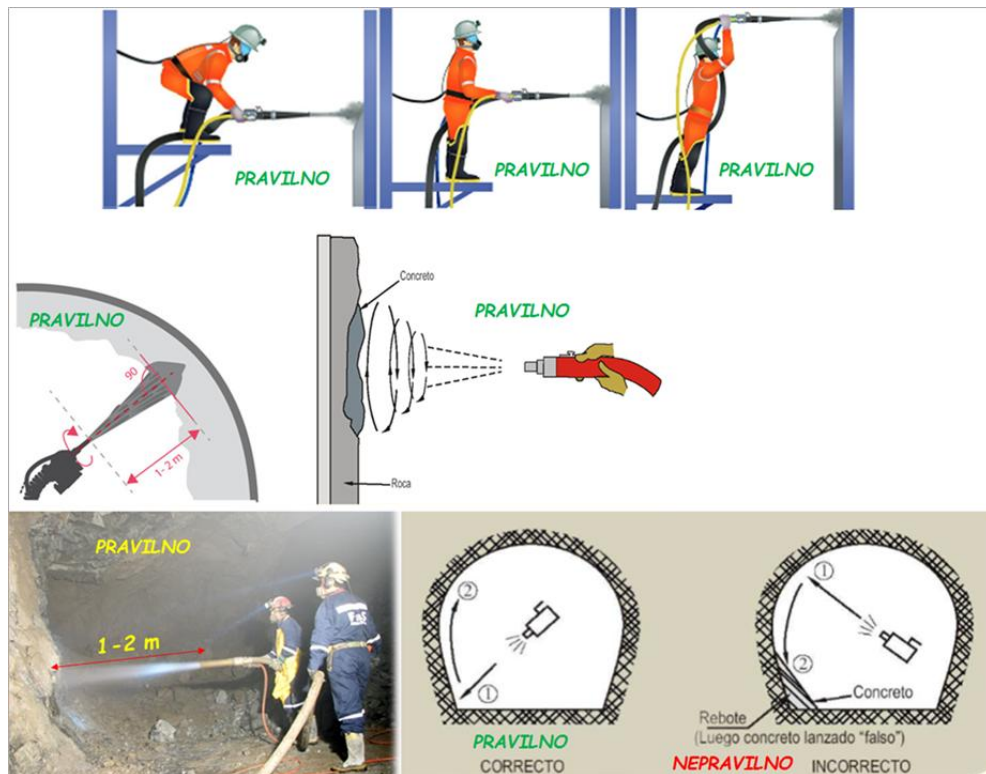


Sl.98:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona - mokri postupak

Vrlo je važno pravilno i ekonomičnije ugraditi prskani (mlazni beton - torkret). Najvažnije je pravilno usmeriti mlaznicu prema mestu ugradnje. Na prikazanim slikama i dijagramu vidi se pravilno ili nepravilno ugrađivanje torkret betona.



Sl.99:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona - mokri postupak



Sl.100:- Šematski prikaz ugradnje mlaznog betona - mokri postupak

Ime *Gunita* se često koristi za torkret, ali je pravilno samo kad se odnosi na suvo-mešani i nekada je to bilo zaštićeno ime. Ovaj tip betona je sposoban da razvije visoku čvrstoću samo par sati nakon postavljanja. Ova osobina ima prednosti kao što je brzo uklanjanje oplate i nastavak gradnje, popravka puteva koji mogu da se puste u promet samo nekoliko časova kasnije...

Mlazni beton(torkeret): može se koristiti u kombinaciji sa sidrima (kao u tunelima); nanosi se špricanjem preko usidrene mreže, ili se koristi beton sa čeličnim vlaknima dužine 50 mm, koja betonu daju zateznu čvrstoću.

Često se u građevinskoj praksi pojavljuju zahtevi za betoniranje pojedinih konstruktivnih elemenata u koje se, zbog određenih zahteva, ne može ugraditi beton uobičajenih osobina, odnosno uobičajenih postupaka ugradnje. Nekada je to u pitanju položaj konstruktivnog elementa, zahtev za ojačanjem konstrukcije, brzina očvršćavanja, sanacija dela ili konstrukcije u celini i tome slično. Potrebne karakteristike svežeg mlaznog betona za uspešno betoniranje bi bile: *ugradivost, obradivost, odsustvo segregacije, smanjenje odskoka pri nanošenju, zahtev za prirastom početnih čvrstoća, ostvarenje projektovanih karakteristika očvrstlog betona i posebnih svojstava*. Pravim odgovorom na postavljene zahteve pokazao se mlazni beton.

1.2.3. Torkret uređaji - mašine

Torkret mašine, (*engl. plastering machines*), grupa raznovrsnih srazmerno manjih građevinskih mašina i slične tehnološke opreme za proizvodnju (*mešanje sastava*), transport (*guranje kroz cevi*) i ugradnju (*nabacivanje*) svih vrsta maltera, podloga i ostalih slojevitih konstrukcija od sitnozrnih ili mlaznih betona. Obuhvataju postolje na točkovima sa delovima gde se vrši prihvat i mešanje (*mešalica*) zatim guranje (*vijčana ili klipna pumpa za sitnozrni beton*) mešavine kroz cevi do mesta ugradnje. Na kraju

cevi nalazi se posebna mlaznica za nabacivanje betona (*maltera*). Transport mešavine može biti takođe pomoću komprimovanog vazduha. Pogon ove oprema može biti na električni ili vazdušni pogon. Savremeni sistemi ove opreme obuhvataju pokretne silose sa pripadajućim pumpama za guranje mešavine kroz cevi. Mikserima doprema se suva mešavina koja se na gradilištu pre ugradnje meša sa vodom. Posebni oblik mešalica za izvođenje obloga od mlaznog betona u tunelogradnji su tzv. „*torkret mašine*“ (engl. *concrete spraying machines*). Savremeni tzv. mokri postupak izvođenja mlaznog betona izvodi se pomoću samohodnih torkret aparata na kamionskom podvozu. Ova oprema obuhvata i u svim smerovima pokretni i okretni lomljivi krak koji nosi mlaznicu za nabacivanje betona.



Sl.101:- Neke od torkret mašina



Sl.102:- Ugradnja torkreta

Kako je rečeno, tehnologija mlaznog torkretiranja pojavila se u svetu sedamdesetih godina, a u Evropi počela se koristiti od 1976. godine. U SAD-u se počela primenjivati od 1979. godine s tim da je u prvih šest godina imala samo pet (5) primena.

U bivšoj Jugoslaviji tehnologija mlaznog injektiranja počela se primenjivati od 1973-4. godine. Prva primena bila je od strane Vojnograđevinske Direkcije Beograd, VP 4479, na podzemnim objektima za komandovanje, zaštitu i skladištenje raznih uređaja i sredstava za vojne potrebe. Od 1975. nadalje, Vojno-građevinske ustanove (npr. VGU Split - VP 4416) u okviru Direkcije za investicione radove, Beograd - VP 4479, (DIR), izvele su preko 260.000 m² površine pod torkret betonom sa aditivima ili bez aditiva.

Kao inženjer u Direkciji za investicione radove, Beograd, Balkanska 53, VP 4479 - odeljenje VGU Split - VP 4416, direktno sam projektovao i rukovodio ugradnjom na oko 60.000 m² torkreta, oko 25.000 ankeri i preko 15.000 m² betonskih obloga tunela. Većina ovih površina je na saobraćajnicama, najčešće useci i tuneli, ali i na podzemnim objektima tipa „Strela“, „Jastog“, „KM“... najčešće uz primenu klinastih i ekspanzionih ankeri a nešto manje perfo ankeri i geotehničkih sidara.

Vrlo važno:

Mlazni beton se ne ugrađuje ukoliko se ugradnja ne može završiti u roku od 90 minuta od vremena mešanja. Vremenski raspon biće što kraći, naročito u razdoblju visokih temperatura vazduha i velike vlažnosti. Vreme mešanja je najmanje 3 minuta.

1.3. Zamrzavanje tla

Termička stabilizacija

- **Zagrevanje tla** - porastom temperature povećava se sleganje gline pod datim opterećenjem. Nakon hlađenja dolazi do termalne prekonsolidacije gline.

- **Zamrzavanje tla** - metod veštačkog zamrzavanja koristi se za privremeno ojačanje tla kod podzemnih iskopa. Može se primeniti na sve tipove tla.

Zamrzavanje tla je građevinska tehnika koja se koristi u izgradnji vertikalnih okana, niskopa i tunela koja pruža privremenu podršku tlu i kontrolu podzemnih voda kadadruga konvencionalne metode kao što je odstranjivanje vode, podgrada i injektiranje ili mešanje tla to nije izvodljivo.

Zamrzavanje tla je upotreba rashladnog sredstva za pretvaranje in-situ porne vode u led. Led tada deluje kao cement ili lepilo, povezujući zajedno susedne čestice tla ili blokove stena kako bi povećao njihovu kombinovanu snagu i učinio ih nepropusnim.

Istorija tehnike zamrzavanja tla

Metodu veštačkog zamrzavanja tla otkrio je nemački naučnik *F. Hermann Poetsch* 1883. godine. Prvi put je upotrebljen u Americi u kompaniji *Chapin Mine in Iron Mountain*, gde je zamrzavanje izvršeno do dubine od 100 stopa - 30,48 m.

Međutim, osnovna primena ostaje pružanje podrške nadzemnim vodama i iskopima za potapanje okana. Zapravo za duboke objekte još uvek nije utvrđena bolja metoda.

Uslovi u kojima je zamrzavanje tla najefikasnije

- Tlo na kojem je propusnost bušenja, mlaznog injektiranja, iskopavanja ili drugih vertikalnih alata za rezanje ograničena.
- Ispunjeno tlo i tla koja sadrže veštačke prepreke.
- Netaknuto tlo koje sadrži kamenje, gromade ili nepravilan spoj tlo/stena.
- Tlo koje je poremećeno zbog nestabilnih uslova ili dotoka vode.

Principi zamrzavanja tla

Glavni princip ove metode je pretvaranje vode u led metodama spoljnog zamrzavanja kako bi se stvorila vodena zaptivka i ojačalo tlo. Efikasnost zamrzavanja zavisi od prisustva vode za stvaranje leda, cementiranja čestica i povećanja čvrstoće tla na ekvivalent mekih ili srednje tvrdih stena.

Ako u tlu nema dovoljno količine vode da bi se sve zamrznulo, tada može biti potrebno osigurati dodatnu vodu kako bi se pore potpuno začepile. Ova metoda je veoma efikasna na mestima na kojima je tlo sastavljeno od mulja. Druge metode injektiranja se ne mogu preduzeti zbog vrlo finih pora.

Čvrstoća koju je tlo postiglo nakon instalisanja ove metode zavisi od temperature smrzavanja, sadržaja vlage i prirode tla. Nakon završetka početnog zamrzavanja i postavljanja zamrznute barijere, potrebni rashladni kapacitet znatno se smanjuje za održavanje zamrznute barijere.

Kada se podzemna voda transformiše u led, dolazi do širenja koje je zanemarivo, uočeno je širenje od oko 9% što ne predstavlja ozbiljan pritisak ili naponi na tlo.

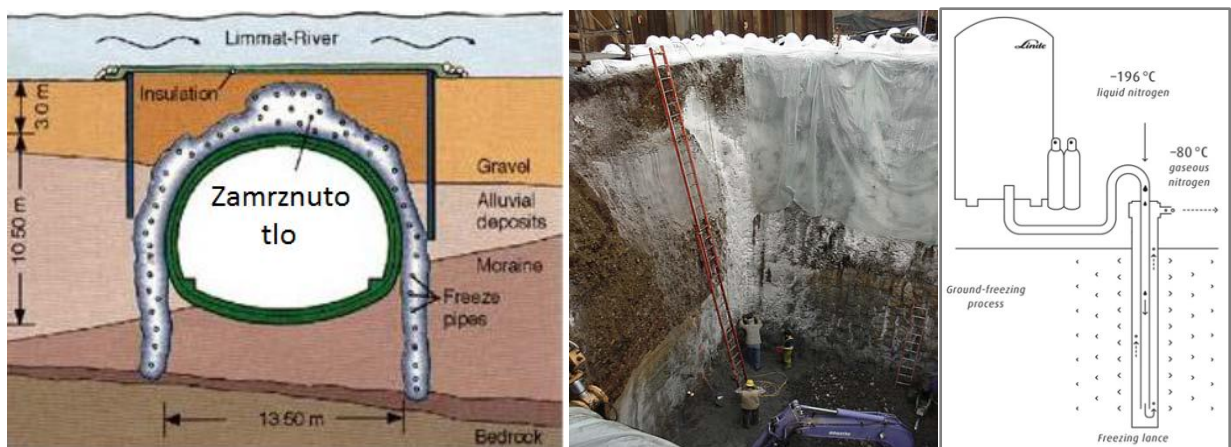
Kako je ovo veštačka metoda hlađenja, može sevršitizamrzavanje bilo koje vrste tla koja pruža veliku sigurnost u odnosu na različite metode injektiranja.

Kao i u svim tehnikama obrade tla, potrebna je odgovarajuća istraživanja na mestu kako bi se odabrao najbolji sistem i projektovao odgovarajući niz cevi za zamrzavanje i odabralo postrojenje odgovarajuće snage.

Jednom kada započne proces zamrzavanja, potrebno je nadzirati kako bi se osiguralo formiranje pregradnog zida i proverilo kada je zamrzavanje završeno. Za vreme procesa bušenja ugrađuju se cevi za praćenje temperature i za merenje temperature tla.

Zamrzavanje tla (terena) primenjuje se kod vodom zasićenih rastresitih stenskih masa, a naročito fino-zrnih peskova koji se, u tom slučaju, mogu ponašati kao tečljiva sredina. Postupak se sastoji u veštačkom snižavanju temperature u cilju zamrzavanja podzemne vode koja ispunjava međuzrnske pore. Na taj način sredina postaje čvrsta sve dok temperatura ne dostigne tačku topljenja leda.

Zamrzavanje se primenjuje kao *privremena* mera poboljšanja svojstava tla (terena).



Sl.103:- Šematski prikaz metode direktnog zamrzavanja tla

Dakle, zamrzavanje tla je tehnika privremenog ojačanja tla stvaranjem ledene strukture tla u tlu. Koncept je pretvaranje čiste vode u led. Zamrzavanje se dobija cirkulacijom tečnog azota ili sonih rastvora u zatvorenim cevima postavljenim u tlo, ili kombinacijom obe metode. Zamrznuto tlo može se koristiti za stvaranje čvrstih, otpornih na opterećenje i vodonepropusnih građevina za radove tuneliranja, ukrasnih prolaza između tunela, iskopa jama i okana i probijanja ili spašavanja TBM-a.

Ova metoda je vrlo razvijena u zemljama koje obiluju peščanim tlima, gde se pokazala vrlo efikasna. Zamrzavanje se vrši oko građevinske jame ili samo sa jedne njene strane kao bi se dobila vodonepropusna pregrada.

1.3.1. Metode zamrzavanja tla

Postoje dve različite metode zamrzavanja koje se mogu koristiti za zamrzavanje tla:

- ⇒ **Direktna metoda** je zamrzavanje tečnim azotom (LN₂). Ova metoda traje kratko vreme zamrzavanja, ali ima velike troškove za energiju i održavanje.
- ⇒ **Indirektna metoda** je zamrzavanje tečnim rastvorom soli, što nudi niske troškove energije i održavanja. Za zamrzavanje tla potrebno je oko 20 do 30 dana - ali ova metoda je pogodna i za utvrđene prostore. Takozvana mešovita metoda kombinacija je zamrzavanja tečnim azotom i sonim rastvorom.

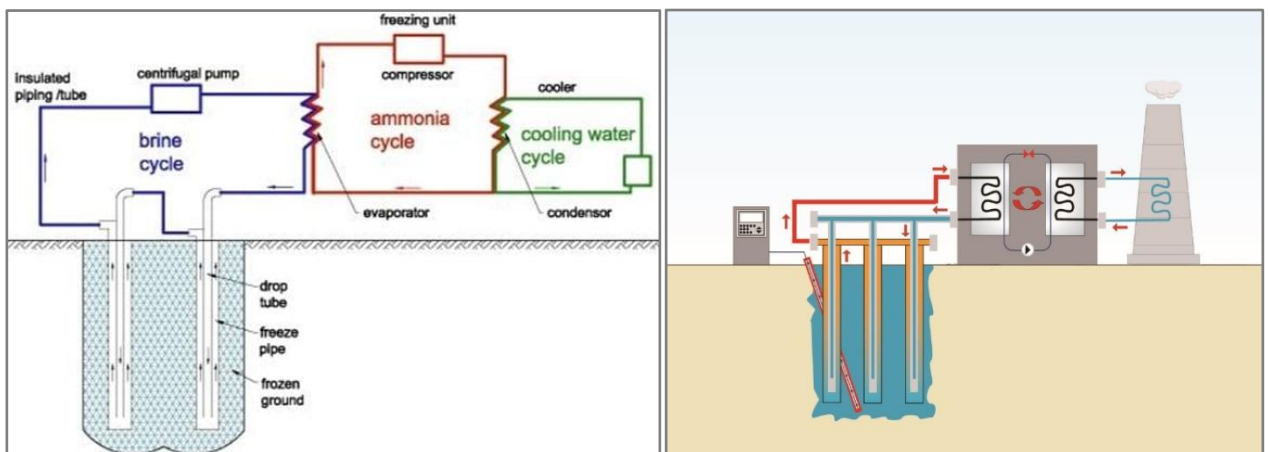
Brzina zamrzavanja tla sa LN_2 mnogo je brža nego kod drugih metoda, ali tečni azot je skup. Metoda je posebno pogodna za kratak period smrzavanja do oko 3 nedelje.

Može se koristiti zajedno sa ostalim procesima sa istim nizom cevi za zamrzavanje i mrežom izolovanih razvodnih cevi, u kojima se tečni azot prvo koristi za brzo uspostavljanje zamrzavanja, a zatim redovnim hlađenjem kako bi se održalo stanje dok se radovi izvode.

Ovo može biti od pomoći kada prirodni tok podzemne vode otežava početno zamrzavanje.

⇒ **Indirektna metoda - zamrzavanje sonim rastvorom**

U takozvanoj indirektnoj metodi soni rastvor (oko 30% rastvora kalcijum hlorida u vodi) hladi se električnim rashladnim uređajem na temperaturama od -35 °- 40 °C i cirkuliše se u metalnim cevima postavljenim u tlo (*cevi za zamrzavanje*), nakon čega se vraća u rashladnu jedinicu koja se hladi. U ovom slučaju treba oko 20 do 30 dana za zamrzavanje tela tla prečnika oko 1 metar. Takođe u ovom slučaju cirkulacioni sistem mora biti zatvoren, važno je izbeći propuštanje sonog rastvora u zemlju. Sistem tačaka za merenje temperature omogućava praćenje procesa zamrzavanja. Naslici 106je prikazan šematski prikaz metode indirektnog zamrzavanja tla.



Sl.106:-Šematski prikaz metode indirektnog zamrzavanja tla

⇒ **Mešovita metoda**

Takozvana mešovita metoda koristi tečni azot za fazu zamrzavanja i soni rastvor za fazu održavanja. To štedi vreme za fazu zamrzavanja u odnosu na metodu sonog rastvora. S druge strane, može biti prilično skupo jer zahteva ugradnju zasebnog distribucionog sistema i za fiziološki rastvor i za tečni azot i upotrebu bakrenih cevi unutar čeličnih cevi za zamrzavanje.

Nakon faze zamrzavanja azota, temperatura bakrenih cevi treba biti iznad -35 °C da bi tečni soni krug cirkulisao, jer bi u protivnom soni rastvor mogao smrznuti u cevi.

1.3.2. Primena tehnike zamrzavanja tla

- metoda zamrzavanja tla pogodna je za fino-zrno tlo, ne previše sitna.
- to je spor, ekspanzivan metod i zahteva cirkulaciju gasa amonijaka ili tsl.
- upotrebljava se za stabilizaciju iskopa, za sprečavanje potapanja rudarskih okana, za oporavak neoštećenog tla granuliranih slojeva,
- upotrebljava se kao privremena podloga,
- privremena podrška za iskop,

- sprečavanje priliva - dotoka podzemne vode u iskopano područje,
- privremena stabilizacija nagiba i
- privremena zagađenja toksičnim/opasnim otpadom.

Veštačkim snižavanjem temperature zamrzava se pora voda međuzrnskih pora i time se postiže:

- smanjenje propusnosti tla i
- povećanje čvrstoće tla.

Faktori od kojih zavisi zamrzavanje tla su:

- *Geološki i hidrogeološki uslovi terena,*
- *Vrsta tla,*
- *Toplotna provodljivost tla - toplotna svojstva,*
- *Sadržaj vlage - Voda - NPV, temperatura i brzina, saturiranost,*
- *Kohezija i*
- *Temperatura vazduha.*

Pitanja zamrzavanja tla su:

- *toplotna analiza,*
- *geometrija rashladnog sistema,*
- *toplotna svojstva tla i stena,*
- *stope zamrzavanja,*
- *energetske potrebe,*
- *analiza distribucionog sistema rashladnog sredstva.*

Najvažnija je količina vode koju treba zamrznuti.

- *Provodljivost čestica tla i sadržaj vode utiču na preteranu toplotnu provodljivost tla. Zato što čestice gline imaju veću izolacionu vrednost od čestica mulja ili peska i budući da glinena tla obično zadržavaju više vlage od mulja i peska.*

Ostali faktori:

Postoje i drugi faktori koji utiču na dubinu zamrzavanja. Izolacioni učinak snega zaslužuje posebnu pažnju. Pokazano je da svako stopa neporemećnog snega smanjuje dubinu zamrzavanja tla pri približno istoj količini. Tu su i meteorološki faktori kao što su:

- *Temperatura vazduha (verovatno najznačajnija)*
- *Sunce*
- *Padavine*
- *Brzina vetra*

Metode zamrzavanja tla

Zamrzavanje tla odvija se u dve faze:

- ⇒ **Aktivno zamrzavanje**- stvaranje ledenog zida određene debljine pri čemu postrojenje za hlađenje radi velikim kapacitetom.
- ⇒ **Pasivno zamrzavanje**- sprečavanje otapanja i održavanje postignute debljine zida.

1- Hidrogeologija i priroda zamrznutog tla

Hidrogeološki faktori bitni za procenu karakteristika zamrzavanja:

- *NPV - nivo podzemne vode,*
- *Salinitet (mineralizacija) i onečišćenost podzemne vode,*
- *Podinski sloj iskopa i*
- *Brzina toka vode (gradijent toka).*

Čvrstoća i ponašanje zamrznutog tla

Čvrstoća na dugotrajno opterećenje i pritisno-zatezne karakteristike zamrznutog tla zavise od osobina:

- leđa,
- tla i
- opterećenja.

Karakteristike leđa

- Sadržaj leđa
- Orijehtacija kristala leđa s obzirom na primenjene napone
- Temperatura leđa

2 - Vrsta tla -karakteristike tla

Lomna čvrstoća čestica tla zavisi od:

- granulometrijskog sastava tla,
- gustine tla,
- poroziteta i
- strukture tla.

3 - Toplotna provodljivost tla - toplotna svojstva,

4 - Kohezija zavisi od:

- međumolekularnim privlačnim silama između čestica tla i
- stepena cementacije.

Tabela - Projekat standardne čvrstoće zamrznutog tla

| Tlo | Temperatura zamrzavanja (-10°C) | | | Temperatura zamrzavanja (-20°C) | | |
|-------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | Neograničena čvrstoća na pritisak | Čvrstoća na savijanje | Čvrstoća na smicanje | Neograničena čvrstoća na pritisak | Čvrstoća na savijanje | Čvrstoća na smicanje |
| Glina | 2-4 | 1.5-2 | 1.5-2 | 4.5-6 | 2-3 | 2-3 |
| Pesak | 4-7 | 2-3 | 2-3.5 | 6-10 | 3-4.5 | 3-5 |

Dakle, očvršćavanje i zaptivanje je svakodnevni posao u građevinskoj industriji. U izvesnim uslovima, zamrzavanje tla tečnim azotom je najbolje rešenje u poređenju sa tradicionalnim metodama za tretiranje tla.

1.3.3. Načela - principi:

⇒ **Pretvaranje vode u tlu u čvrsti ledeni zid, koji je potpuno nepropustan.**

- Priliv vode može da izazove ogromne probleme u iskopima i tunelima tako da je najbolji način, da se dotok vode zaustavi, je da se ona zamrzne.
- Zamrznuto tlo je dva puta (duplo) jače od betona i u suštini nepropusno.

Svrha (namena):

- privremena stabilizacija nagiba
- privremena podrška za iskop
- privremeno podupiranje
- stabilizacija zemljanih iskopa tunela
- sanacija - zamrzavanje klizišta
- stabilizacija velikih rudarskih okana

⇒ Formiranje zamrznute zemljane barijere regulisano je toplotnim i hidrauličnim svojstvima svakog sloja. Tipično, stena i grubozrna tla zamrzavaju se brže od glina i muljeva.

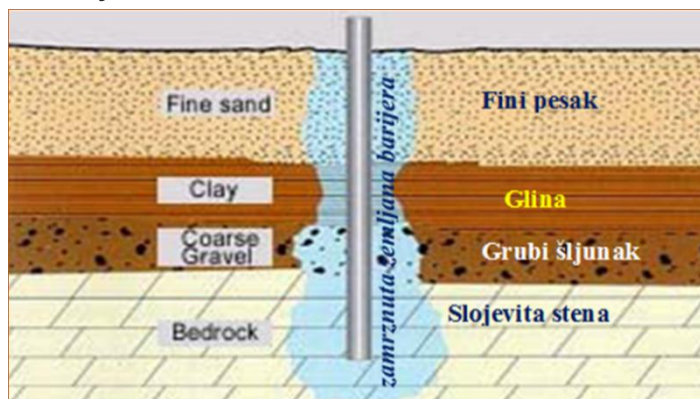
1.3.4. Projektovanje zamrzavanja

Prilikom projektovanja zamrzavanja bilo u svrhu statičkog temelja i/ili u svrhu zaptivanja mora se uzeti u obzir nekoliko parametara.

U vreme projektovanja sistema zamrzavanja, treba utvrditi toplotne karakteristike tla. Takođe, treba odrediti temperaturu zamrzavanja podzemne vode. Za vreme postupka zamrzavanja potrebno je pažljivo pratiti proces. Temperatura tla između elemenata za zamrzavanje i temperatura rashladnog sredstva treba se odrediti pomoću termoelemenata ili bilo koje druge pogodne metode.

Dva glavna cilja su:

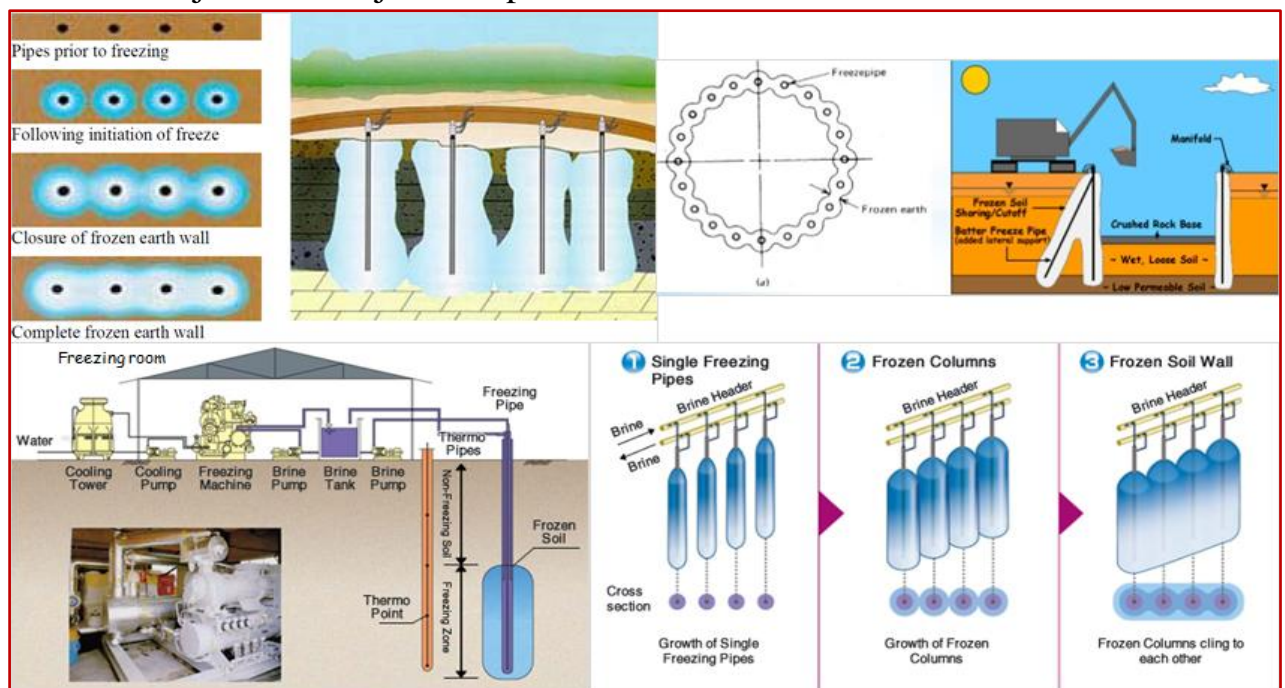
- maksimalna sigurnost
- minimalna potrošnja LN_2 .



Sl.107:- Formiranje zamrznute zemljane barijere u različitim tlima

⇒ Prema slici, zamrznuto tlo prvo se oblikuje u obliku vertikalnih cilindara, okružujući cevi za zamrzavanje.

⇒ Kako se stubovi „cilindri“ postepeno povećavaju, presecaju se, stvarajući kontinuirani zid i, kada je, projektovana debljina konstrukcije postignuta, postrojenje za zamrzavanje radi smanjenim kapacitetom - nivoom.

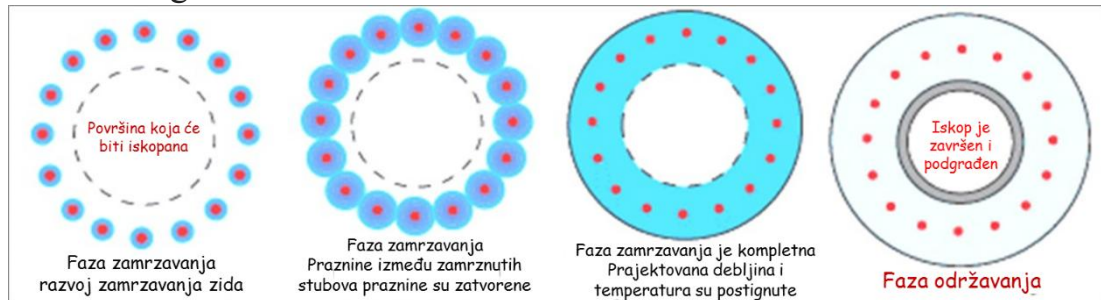


Sl.108:- Kontura rasta zamrznutog tla - koraci zamrzavanja tla - Steps of freezing soil

Posle izvesnog vremena površine koje postaju zamrznute oko cevi za zamrzavanje spajaju se, dodiruju jedna drugu, sjedinjuju i na kraju daju vodonepropusni zid. Za oko jednu nedelju ovaj proces formira zamrznuti zid prečnika od skoro jednog metra.

Ova takozvana faza učvršćivanja normalno traje četiri do sedam dana. Ukupna potrošnja tečnog azota (LN_2) u to vreme je oko 1.500 do 2.500 litara LN_2 za 1m^3 zamrznutog tla. Geološki uslovi (termalni izvori, protok vode, itd) mogu uticati na ovu vrednost.

U fazi održavanja koja sledi, dovod tečnog azota se smanjuje i zapremina zamrznutog tla prestaje da raste i održava se konstantnim. Da se održi 1m^3 zamrznutog tla potrebno je oko 90 litara tečnog azota na dan.



Sl.109:- Šema faza oblikovanja vertikalnih cilindara stvarajući kontinuirani ledeni zid

Kada se zaustavi dovod tečnog azota, sloj inja počinje da se topi i nestaje za nekoliko nedelja.

Karakteristike zamrznutog tla

- Nije moguće predvideti sleganje sa zamrzavanjem i odmrzavanjem u šljunkovitim tlima, dok je za finozrno tlo sleganje predvidljivo.

Prednosti zamrzavanja tla:

- Iskopavanje kroz različite slojeve tla,
- Iskopavanje preko celog čela zrnastog tla,
- Nije ograničeno vrstama - tipovima tla, bez obzira na složene geološke i hidrološke uslove,
- Privremeno podgrađivanje susedne strukture i podrška tokom trajnog podgrađivanja,
- Zamrzavanje ztla nije bučno i nije toksično,
- Metoda smrzavanja je uklonjiva, za razliku od drugih metoda poput injektiranja tla,
- To je efikasna metoda, a značajno povećava čvrstoću tla,
- Čvrstoća zamrzavanja tla može se kontrolisati,
- Oprema se može reciklirati i ponovno upotrebiti,
- Može se koristiti u uskim prostorima,
- U tunelima u kojima se zamrzavanje vrši iz tunela i
- Stabilizacija tla.

Ograničenja:

- Zamrzavanje tla je dugotrajna metoda, a traje nekoliko nedelja zavisno od uslova tla.
- Odvod toplote uzrokuje protok vode u tlu. Količina dozvoljenog protoka zavisiće od korišćenog sistema, na primer, za dvofazno zamrzavanje rastvora koje se koristi.

Dozvoljeni protok je 2 m/dan.

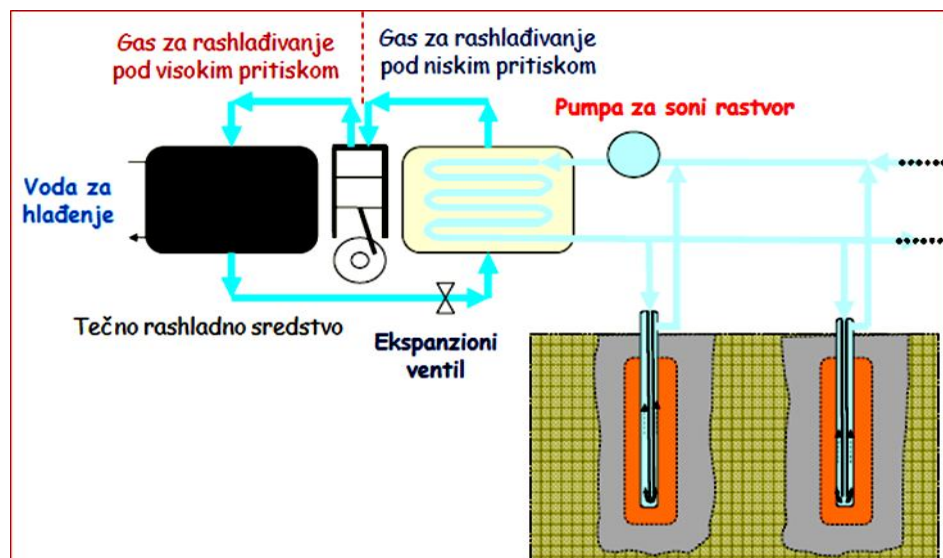
Podnošljiva brzina protoka povećava se na 20 m/litra za direktni postupak upotrebe tečnog azota.

- Bušenje bušotina treba biti tačno kako bi se osiguralo preklapanje između područja zamrzavanja.
- Vrlo skupo.
- Potrebno je stalno nadgledanje.
- Količinska ekspanzija vode tokom smrzavanja, što dovodi do natapanja tla i sleganje pri odmrzavanju.

1.3.5. Oprema za zamrzavanje (Freezing equipments)

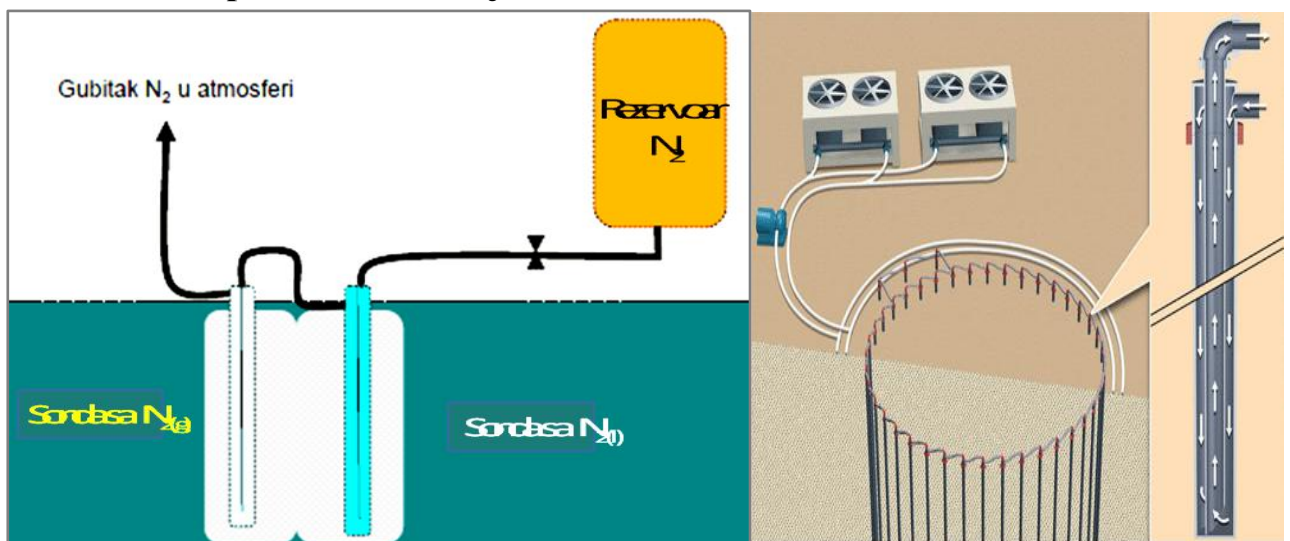
Postrojenja za zamrzavanje tla dele se na:

- postrojenja za hlađenje sa kružnim tokom sekundarnog rashladnog sredstva i
 - sisteme za ekspanziono hlađenje.
- **Postrojenje za hlađenje sa kružnim tokom sekundarnog rashladnog sredstva**
 → Primarno rashladno sredstvo (izvor hlađenja) je amonijak ili freon.
 → Sekundarno rashladno sredstvo je rastvor soli (hlorid kalcijuma, natrijuma, magnezijuma ili litijuma).

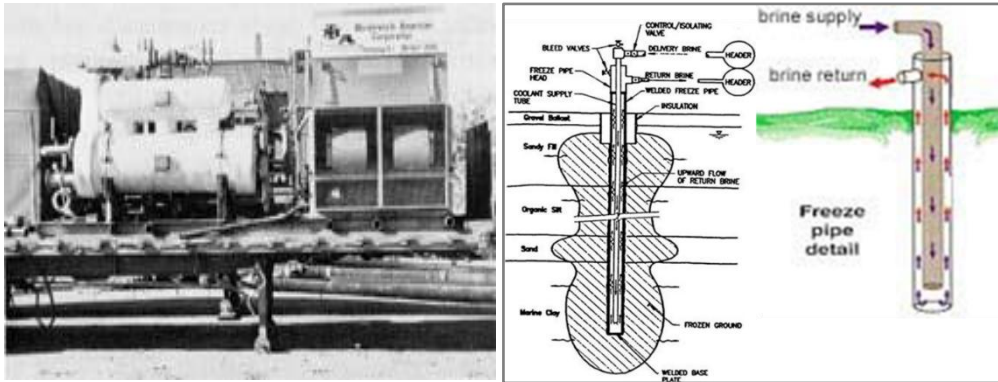


Sl.110:- Postrojenja za hlađenje sa kružnim tokom sekundarnog rashladnog sredstva

- Sistem za ekspanzivno hlađenje:



Sl.111:- Sisteme za ekspanziono hlađenje

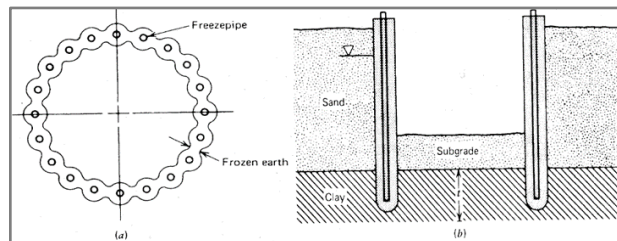


Sl112:-Prenosiva rashladna jedinica od 60 tona sa dva rastvora i presek cevi za zamrzavanje tla koji se koristi u velikim iskopima

PRIMENA:

1.Kružni iskop poduprt zamrznutim zidom:

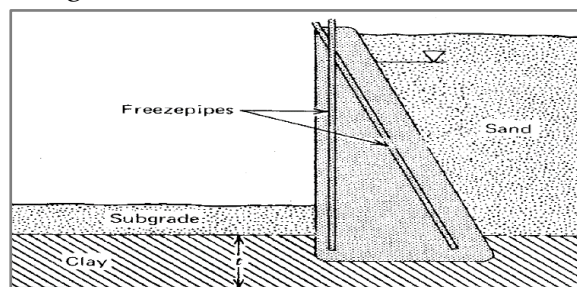
- Zamrzavanjem može se obavljati dvostruka funkcija: prekid dotoka vode i podgrada tla, eliminišući oplatu (oblaganje) i učvršćivanje.
- Prodiranje zamrzavanjem ne razlikuje se lako u propusnosti, efikasnije je od prekida dotoka vode od maltera.



Sl. 113:- Kružni iskop

2.Iskop podržan gravitacionim zidom zamrznutog tla:

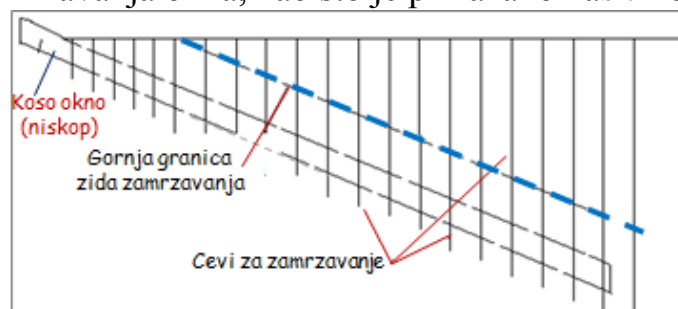
- Kombinacija vertikalnih i nagnutih - kosih cevi za zamrzavanje tipična je za postizanje ilustrovanog oblika.



Sl.114:-Iskop podržan gravitacionim zidom zamrznutog tla

3.Koso okno:

Kad se primenjuje na konstrukciju u nagibu - koso okno, može se usvojiti metoda bušenja za zamrzavanja okna, kao što je prikazano nasl.115.



Sl.115:-Zamrzavanja kosog okna

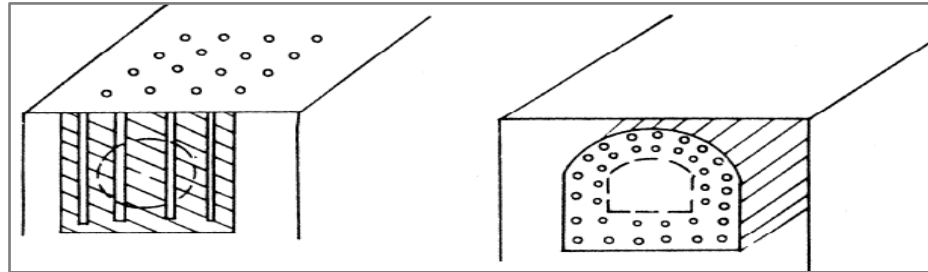
4. Tuneli i podzemne železnice:

Uglavnom se nanose bočno - kanali i sa čela ulaza.

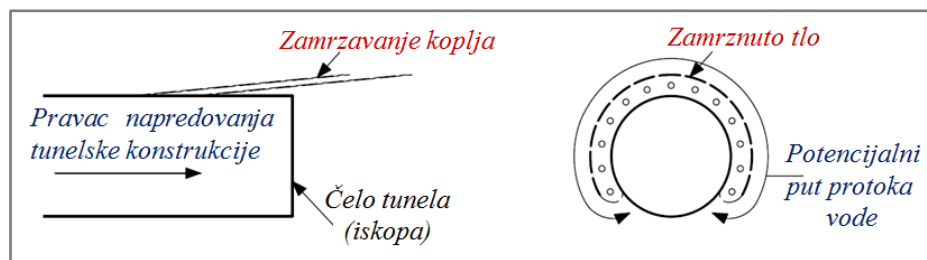
- Dva plana ugradnje:

Prekrivajuće tlo nije predebelo

Debljina prekrivajućeg tla je dovoljna



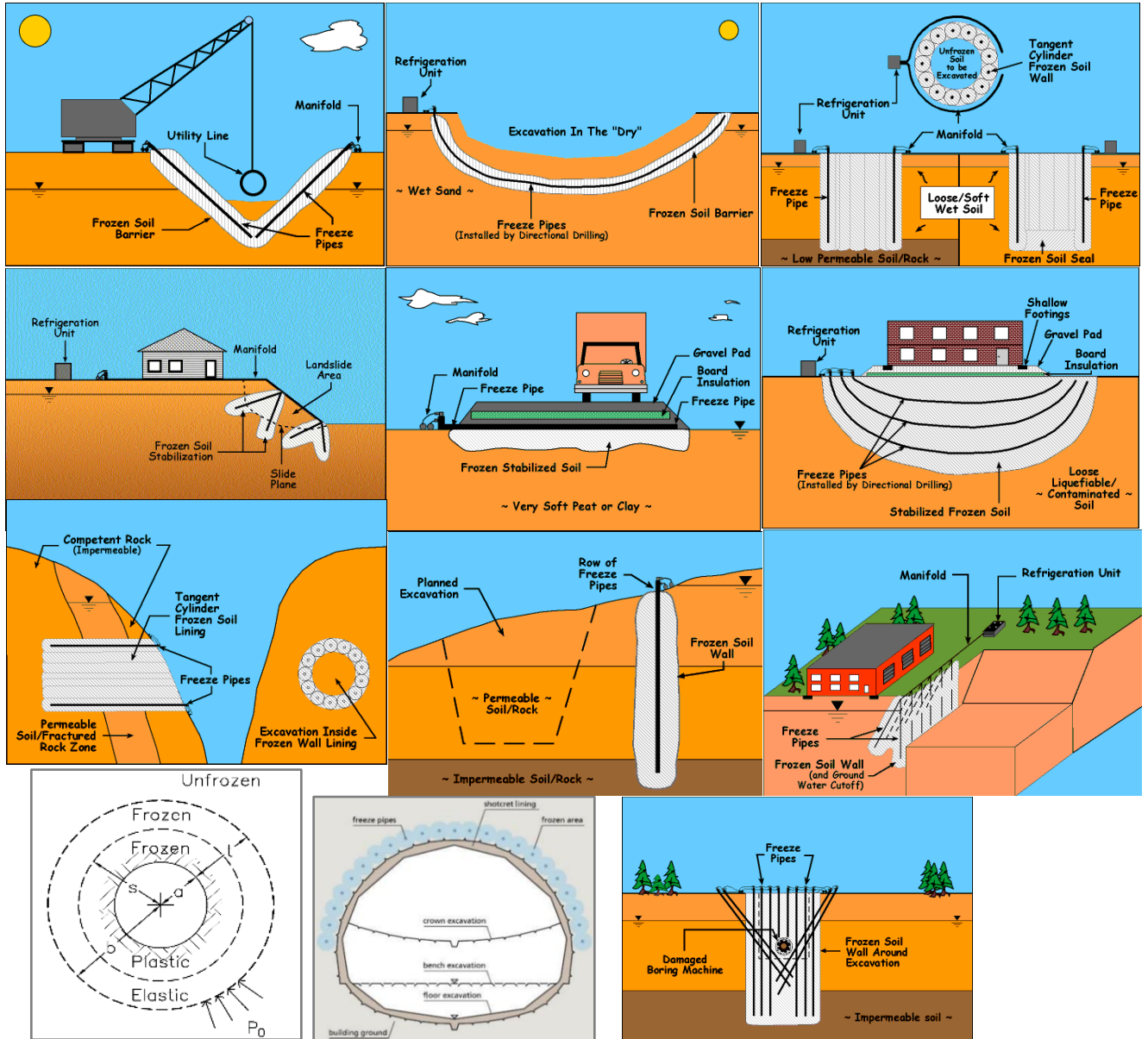
Sl.116:-Zamrzavanja tunela - vertikalni izgled odozdo na dole i horizontalni izgled



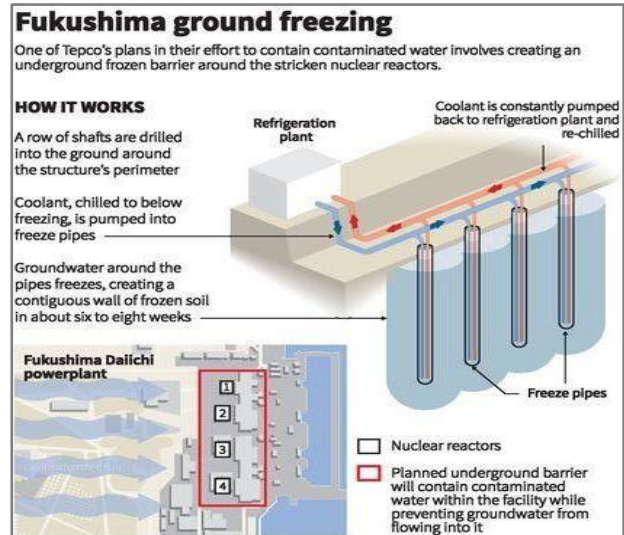
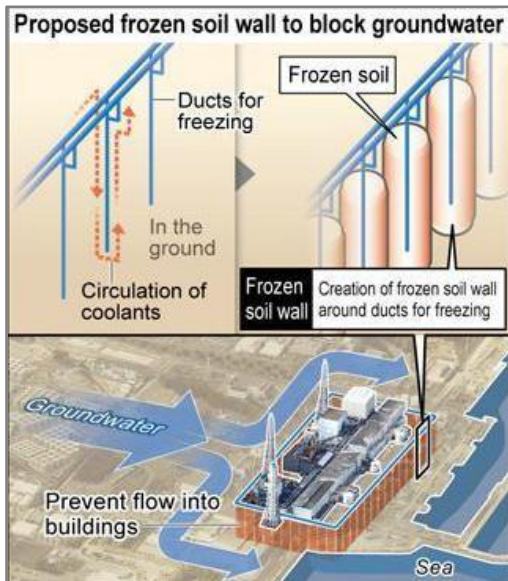
Sl.117:-Zamrzavanja svoda tunela - zamrznuti štit "koplje"

Ovde se koristi zamrzavanje tla u tunelu pod pritiskom gde put protoka vode nije u potpunosti zaustavljen - otvoren je potencijalni put protoka.

Primena (Applications):



Plitak iskop SMALLSITE, Plitak iskop LARGESITE, Duboki iskop, LANDSLIDE STABILIZATION, STABILIZACIJA mekog tla, LIQUEFACTION/CONTAINMENT MITIGATION, TUNNELING, Zamrzavanje tla za iskop tunela, UNDERPINNING EXISTING STRUCTURE



Sl.118:-Zamrzavanje tla u nuklearnoj centrali Fukušima, Japan (GROUND FREEZING AT FUKUSHIMA, JAPAN)

Literatura:

1. Popović, B.: *Tuneli*. IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
2. Lukić D., Pančić A., Vojnić-Purčar M.: *Naponsko injektiranje stenskih masa - analiza naponskog stanja*, 41th International conference Contemporary achievements in civil engineering 24. April 2015. Subotica,
3. Barla, M., Bzowka, J.: *Comparing Numerical Alternatives to Model Jet Grouting in Tunnels*, 2013,
4. *Repository: Excavation Damaged Zones Assessment* : Fracture Systems Ltd., 2011.
5. Kolymbas, D.: *Geotechnik-Tunnelbau und Tunnelmechanik*: Springer, 1999.
6. *ABAQUS: Theory Manual*, Dassault Systemes, 2010.
7. Mahdi, H. M.: *Time-dependent Analysis of Jet-grouted Tunnels in Difficult Ground Conditions*, Dissertation, The University of Texas at Austin, 2013.
8. Muravljov, M.: *Osnovi teorije i tehnologije betona*, Građ. knjiga, Beograd, 1991.
9. Tschegg, E.K., *New Equipment for Fracture Tests on Concrete*, Materialprüfung 33, No. 11- 12, München, 1991, str. 338 - 342.
10. Zakić D., *Eksperimentalno istraživanje parametara duktilnosti kod betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima*, Savremeno graditeljstvo, godina III, br.07-2011, str.24-37, UDK 624.012.45.04, ISSN 1986-5759.
11. Balaguru P.N., Shah S.P.: *Fiber Reinforced Cement Composites*, Mc Graw-Hill, New York, 1992.
12. Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A.: *Relevantne statičke i dinamičke metode za ocenu žilavosti mikroarmiranih betona*, Građevinski materijali i konstrukcije br.1/2011, str. 3-27, ISSN 0543-0798, UDK: 624.012.45; 666.982.2; 620.178.2=861.
13. *European specification for sprayed concrete*, EFNARC, Surray, UK, 1996.
14. *Product data sheet "Sikafiber T-60"*, Sika, 2009.
15. M.P. Moseley & K. Kirsch: *Ground Improvement (second edition)*, Taylor & Francis 2004.
16. Bell, F.G.: *Engineering treatment of soils*, E & FN Spon 1993.
17. Bell, F.G.: *Engineering treatment of soils*, E&FN Spon, London, 2000.
18. P. Purushothama Raj: *Ground Improvement techniques*, Laxmi Publications 1999.
19. Biljana Kovačević-Zelić: *Poboljšanje svojstava tla i stijena*, Rudarsko Geološko Naftni fakultet u Zagrebu, interna skripta 2006.
20. James D. Hussin: *The Foundation Engineering Handbook*, CRC Press 2006.
21. Moseley, M.P. (Ed.): *Ground improvement*, Chapman & Hall, London, 1996.
22. Hausman, M.R.: *Engineering principles of ground modification*, McGraw-Hill, New York, 1990.
23. Mitchel, J.K.: *Soil Improvement - State-of-the-Art-Report*, X ICSMFE, Stockholm, p.509-575, 1982.
24. E. Hoek, E.T. Brown: *Underground excavations in rock*, Inst. Min. and Metall., London, 1980.
25. Koerner, R.M.: *Designing with geosynthetics - 4th ed.*, Prentice-Hall Int., New Jersey, 1998.
26. A.Q. Khan: *Ground improvement using vacuum preloading together with prefabricated vertical drains*, dissertation; University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
27. J. Chu, S. Yan: *Vacuum preloading techniques- recent developments and applications*, Geo Congress, 2008.
28. Stapelfeldt, T.: "Preloading and vertical drains." *Electronic publication*, http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Pohja/Prel_oading_and_vertical_drains.pdf, 2006.
29. B. Tarawneh, M. Matraji: *Poboljšanje tla pomoću brzog udarnog zbijanja: studija slučaja u Dubaiju; stručni rad*; časopis Građevinar; 2014.
30. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-08)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 473 pp.
31. ACI Committee 506, "Guide to Shotcrete (ACI 506R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 40 pp.
32. 12. Winter Quarter 2007. Professor Kamran M. Nemati CM 420 *Temporary structures Lesson 7: Construction Dewatering and Ground Freezing* .
33. Addo, K. O. & Robertson, P. K. (1992), Shear-wave velocity measurement of soil using Rayleigh waves. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 29, No. 4, 558-568.
34. Bell, A.L. 1993. *Jet Grouting, Ground Improvement* edited by M.P. Moseley, Blackie Academic &

- Professional, Boca Raton, FL, pp. 149 - 174.
35. *Burke, G.K., Koelling, M.A. 1995.* Special Application for Jet Grouting: Underpinning, Excavation support and Groundwater Control, Proceedings of Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, B.C., pp. 90-97.
 36. *Haskell N. A., 1953,* The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 43, pp 17-34
 37. *Hiltunen, D. R. & Gucunski, N. (1994),* Annotated bibliography on SASW. In: Geophysical characterisation of sites (R. D. Woods ed.), Volume prepared by ISSMFE Technical Committee # 10 for XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India. Balkema, Rotterdam. 27-34.
 38. *Lindenberg, Luger, Quelerij, Verruijt,* Balkema, Rotterdam, 2: 817- 822.
 39. *Nazarian, S. & Stokoe, K. H. (1983),* Use of spectral analysis of surface waves for determination of moduli and thicknesses of pavement systems, Transp Resh Rec, No. 954.
 40. *Nazarian, S. (1984),* In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement Systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method. Dissertation, The University of Texas at Austin, 453 pp.
 41. *Thomson W. T., 1950,* Transmission of elastic waves through a strati
 42. *Shibazaki, M., Ohta, S. 1982,* A Unique Underpinning of Soil Solidification Utilizing Super - High Pressure Liquid Jet, Proceedings of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, New Orleans, pp. 680 - 693.
 43. *Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A. & Roësset, J. M. (1994),* Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Geophysical characterization of sites (R. D. Woods ed.), Volume prepared by ISSMFE Technical Committee # 10 for XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India. Balkema, Rotterdam. 15-25.
 44. *Szavits-Nossan, A., Mavar, R., Kovačević, M. S., (1998),* Experience gained in testing pavements by spectral analysis of surface waves, First International Conference on Site Characterisation, ISC'98, 19-22 April 1998, Atlanta, Georgia, USA. Vol. 1, 521-524.
 45. *M.P.Moseley & K.Kirsch: Ground Improvement(second edition),* Taylor & Francis 2004.
 46. *Brady, B.H.G., Brown, E.T., [1985]: Rock Mechanics for Underground Mining,* George Allen and Unwin (Publishers) Ltd., 260-291.
 47. *Winter Quarter 2007. Professor Kamran M. Nemati CM 420 Temporary structures Lesson 7: Construction Dewatering and Ground Freezing .*
 48. *Borkenstein; Jordan; Schäfers (1991)* Construction of a shallow tunnel under protection of a frozen soil structure, Fahrlach Tunnel at Mannheim.Proc.6th Int.Symp. on Ground Freezing, Beijing, China.
 49. *F.G.Bell: Engineering Treatment of Soils, Published by E & FN Spon in 1993. This edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2005.*
 50. *Stanković, M.: Hidrotehnički radovi. Udžbenik za SVŠ i VA, VIZ, Beograd, 1979.*
 51. *Stanković, M.: Projekat zaštite kosnina useka objekata "torkret" betonom. VP 4416 Split, 1980.*
 52. *Stanković, M.: Izrada tunela "Greda" primenom eksploziva. Naše građevinarstvo, br.35,1981;587-594*
 53. *Stanković, M.: Tehnologija iskopa podzemnih objekata tipa "Jastog", VP 4416 Split, 198, 1984 i 1986.*
 54. *Stanković, M.: Uloga ankera u podzemnim radovima. VP 4416 Split, 1985.*
 55. *Stanković, M.: Zaštita kosina saobraćajnica savremenim materijalima. Put i životna sredina, II jugoslovenski naučno-stručni skup, Žabljak '98.*
 56. *Stanković, M.: Arhivski projekat kao osnova efikasnog i racionalnog građenja i održavanja saobraćajnica, Magistarska teza, Beograd, 1994, 1-206;*
 57. *Stanković, M.: Osnove geologije, inženjerske geologije i mehanike tla, I deo - osnove geologije. e-book, https://www.researchgate.net/Mirko_Stankovic/ ili [academia.edu](https://www.academia.edu)*
 58. *Stanković, M.: Geloški procesi u zemljinoj kori i na površini - geological processes in the earth crust and surface. e-book, https://www.researchgate.net/Mirko_Stankovic/, ili [academia.edu](https://www.academia.edu)*
 59. *Stanković, M.: Primena plastičnih materijala (geosintetika) u izgradnji i održavanju saobraćajnica i drugih objekata (Plastic materials (geosynthetics) use in roads construction and maintenance and other objects) https://www.researchgate.net/Mirko_Stankovic/ ili [academia.edu](https://www.academia.edu)*