



Sveučilište u Zagrebu
**RUDARSKO
GEOLOŠKO
NAFTNI FAKULTET**

POBOLJŠANJE SVOJSTAVA TLA I STIJENA

Interna skripta

Prof.dr. Biljana Kovačević Zelić

Zagreb, 2006.

Podjela poglavlja

1. UVOD
2. ISTRAŽNI RADOVI
3. PODJELA METODA POBOLJŠANJA SVOJSTAVA
4. MEHANIČKO POBOLJŠANJE
5. HIDRAULIČKO POBOLJŠANJE
6. POBOLJŠANJE PRETHODNIM OPTEREĆENJEM

1. UVOD

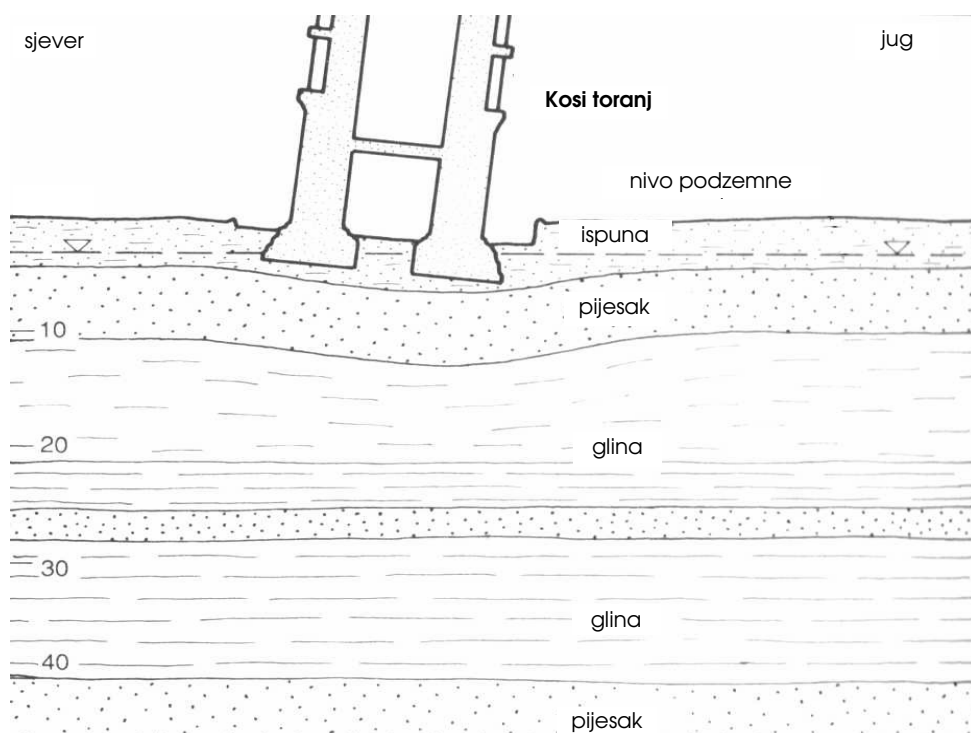
Pod pojmom poboljšanje svojstava tla i stijena (*eng. ground improvement, engineering treatment, ground modifications*) obuhvaćene su razne tehnike koje se provode radi poboljšanja geotehničkih osobina kako bi se omogućila izgradnja različitih objekata. Obzirom da su tzv. 'dobre' lokacije za izgradnju već iskorištene, javila se potreba za korištenjem lokacija koje nisu povoljne a to je potaknulo i razvoj metoda poboljšanja svojstava tla i stijena. Pri izgradnji objekata na nepovoljnim lokacijama najčešće nailazimo na probleme vezane uz nedovoljnu čvrstoću, te kao posljedicu toga nedopušteno velike deformacije ili lom materijala, te probleme koji nastaju zbog prisutnosti vode u tlu (hidraulički slom, bujajuća i kolapsibilna tla). Tipičan i opće poznat primjer izgradnje na nepovoljnoj lokaciji je kosi toranj u Pisi (slika 1.1a). Na slici 1.1. b) pokazan je razvoj slijeganja s vremenom. Tehnikama poboljšanja tla i stijena upravo se nastoji povećati njihovu čvrstoću ili umanjiti tj. eliminirati nepovoljan utjecaj vode.

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 RPV) dok se u drugom slučaju efekti zadržavaju kroz dulji vremenski period (npr. injektiranje, armiranje, dinamičko zbijanje).

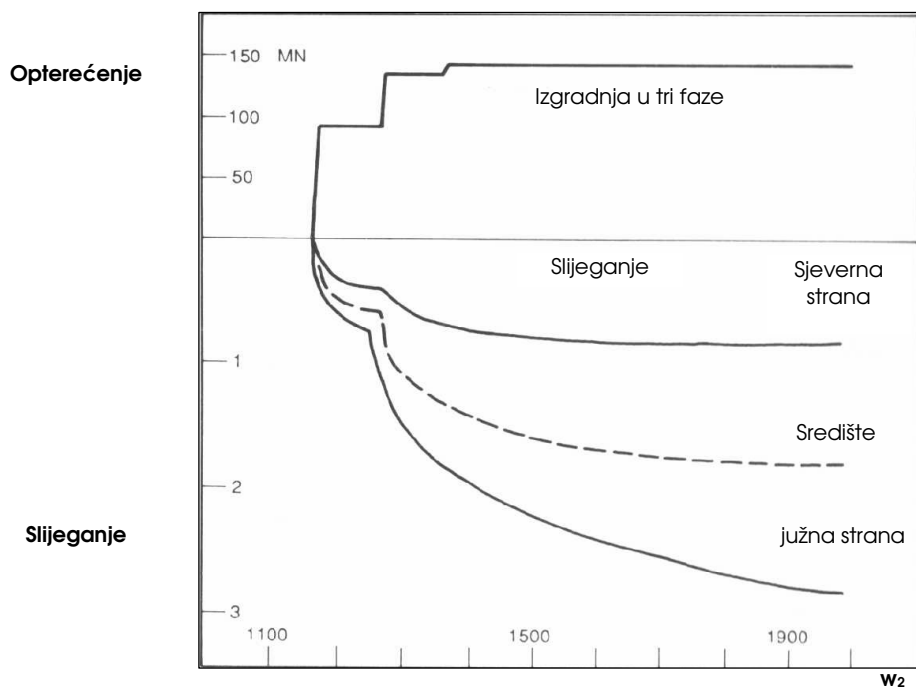
Osnovni koncepti poboljšanja svojstava tla su: dreniranje, zbijanje (povećanje gustoće), cementiranje (povezivanje čestica npr. kod injektiranja), armiranje (geosintetici, sidra), sušenje, promjene temperature.

Metode i tehnike poboljšanja naglašenije su se razvile u prošlom stoljeću, ne samo zbog potrebe gradnje na 'lošim tlima', nego i zbog pojave uređaja i strojeva koji su omogućili postizanje boljih efekata (npr. vibro-zbijanje) ili zbog pojave sasvim novih tehnika (npr. mlazno injektiranje, čavlane tlo). Tehnike poboljšanja stalno se razvijaju, a među najnovije ubrajaju se: armirano i čavlane tlo, te upotreba geosintetičkih materijala.

Namjera je ove skripte dati pregled i osnovne značajke odabranih tehnika poboljšanja, te odgovoriti na pitanje u kojim uvjetima i vrstama materijala se pojedine tehnike poboljšanja mogu uspješno primjenjivati, te kako se raznim mjernim metodama može provjeriti efikasnost pojedine metode (monitoring – promatranje).



a) Geotehnički profil terena



b) Porast opterećenja i slijeganje u tlu kao posljedica izgradnje u fazama

Slika 1.1. Kosi toranj u Pisi

2. ISTRAŽNI RADOVI

Primjeni bilo koje tehnike poboljšanja svojstava tla i stijena moraju prethoditi istražni radovi kako bi se utvrdile vrste i položaj različitih materijala, kao i njihova svojstva.

Istražnim radovima u konačnici se dobiva odgovarajući geološki profil i geotehnički model, u kojem su materijali razvrstani prema nekom klasifikacijskom sustavu (npr. jedinstvena ili USCS klasifikacija) te su istaknute njihova bitna svojstva. Najčešće se rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja dokumentiraju u **geomehaničkom elaboratu**. Za svaku se sondu, osim opisa i tablica izvodi tzv. **sondažni profil** (slika 2.1) gdje su rezultati pregledno prikazani. Na temelju sondažnih profila izrađuje se **geotehnički profil** (slika 2.2) gdje se dvodimenzionalno prikazuje raspodjela slojeva, razina podzemne vode, odabrana svojstva materijala relevantna za određenu vrstu problema itd.

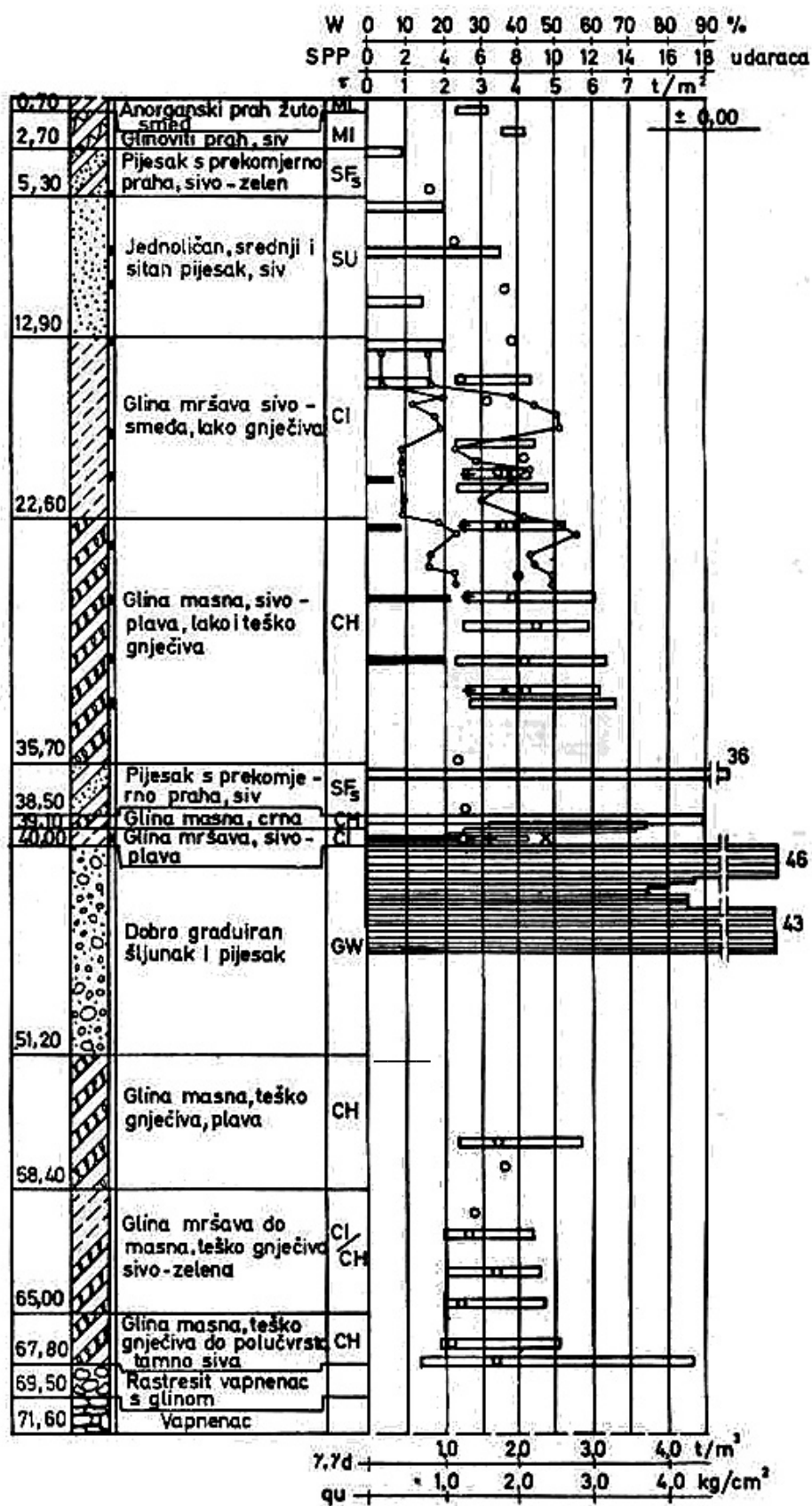
Opseg istražnih radova ovisi o geološkim uvjetima te namjeni i značaju objekta u izgradnji. Npr. istražni radovi većeg su opsega u slučaju izgradnje brane nego temelja, ne samo zbog veličine objekta nego i mogućih posljedica u slučaju rušenja objekta. Kako bi se mogla procijeniti uspješnost primjene određene tehnike poboljšanja, neka istraživanja koja su prethodila primjeni tehnike moraju se ponoviti i nakon završetka.

Osim in-situ ispitivanja, često je potrebno provesti i laboratorijske pokuse na uzorcima. Rezultati takvih pokusa koriste se prilikom odabira tehnike poboljšanja, kao i za potrebe projektiranja pojedinih rješenja. Npr. rezultati edometarskog pokusa koriste se za planiranje i projektiranje tehnike prethodnog opterećenja tla.

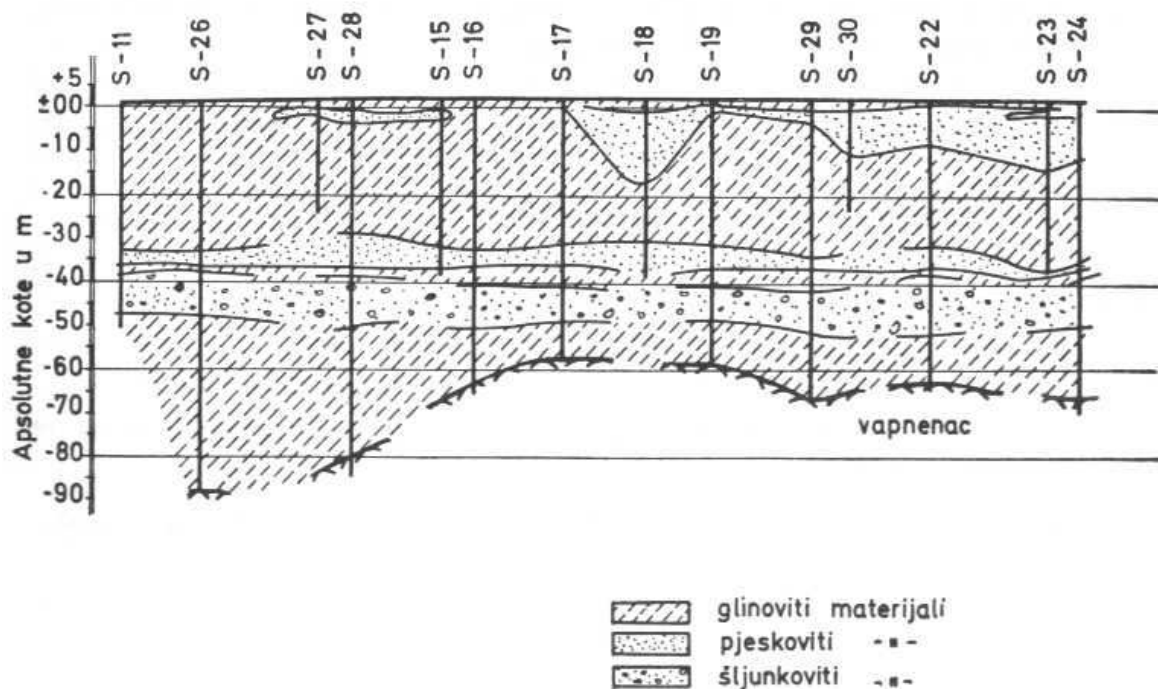
Pored toga, često se u tijeku izgradnje koriste tehnike opažanja, kako bi se pratila uspješnost pojedine metode ili omogućile eventualno potrebne izmjene. Npr. kod metode predopterećenja prati se slijeganje.

Nakon završetka može se pratiti uspješnost pojedine metode, kao npr.:

-  terensko ispitivanje vodopropusnosti kao kriterij za ocjenu uspješnosti injektiranja,
-  ispitivanje tlačnim jastukom kod dinamičkog zbijanja,
-  SPT ili CPT kod vibroflotacije,
-  seizmička ispitivanja.



Slika 2.1. Sondažni profil.



Slika 2.2. Geotehnički profil.

3. PODJELA METODA POBOLJŠANJA SVOJSTAVA

Metode i tehnike poboljšanja svojstava tla i stijena mogu se općenito svrstati u četiri skupine:

- ✚ Mehaničko poboljšanje
 - Tehnike plitkog zbijanja
 - Tehnike dubokog zbijanja
 - Hidromehaničko zbijanje
- ✚ Hidrauličko poboljšanje
 - Površinsko odvodnjavanje
 - Drenaža
- ✚ Fizičko i kemijsko poboljšanje
 - Stabilizacija uz upotrebu smjesa
 - Injektiranje
 - Tehnike smrzavanja
- ✚ Poboljšanje upotrebom dodataka
 - Armirano tlo
 - Upotreba geosintetika

4. MEHANIČKO POBOLJŠANJE

Mehaničkog poboljšanja odnosi se na povećanje gustoće djelovanjem neke vanjske sile. Najčešće govorimo o metodama zbijanja pri čemu osim metoda površinskog zbijanja postoje i metode dubokog zbijanja.

Mehaničkim zbijanjem postiže se sljedeće:

- ✚ povećanje posmične čvrstoće,
- ✚ povećanje nosivosti,
- ✚ poboljšanje stabilnosti kosina,
- ✚ smanjenje stišljivosti i slijeganja,
- ✚ smanjenje propusnosti,
- ✚ smanjenje potencijala likvefakcije,
- ✚ kontrola bujanja.

Metode zbijanja primjenjuju se pri izgradnji cesta, zračnih luka, marina, brana, nasipa, te za pripremu temeljnog tla, zasipa iza potpornih konstrukcija i sl.

Pri planiranju zbijanja potrebno je sljedeće:

- ✚ Definirati uvjete ugradnje: vlažnost i gustoću tla, debljinu slojeva i sl.,
- ✚ Odabrati odgovarajuću mehanizaciju: ježevi, vibracijski ježevi, valjci,
- ✚ Definirati postupak zbijanja: broj prijelaza, raspored zbijanja,
- ✚ Definirati postupke kontrole kvalitete: vrsta i broj pokusa.

4.1. Laboratorijski pokusi zbijanja

Laboratorijskim pokusima zbijanja simuliraju se uvjeti terenskog zbijanja, a rezultati koriste za optimizaciju i kontrolu terenske ugradnje. Najčešće se provode standardni i modificirani pokus zbijanja (tzv. Proctorov pokus).

Iskustvo je pokazalo da se materijal različito zbija za razne vlažnosti i energije zbijanja. Energija zbijanja trebala bi odgovarati energiji ugradnje kod primjene raznih vrsta valjaka (ježeva) na terenu. R. R. Proctor je standardizirao postupak ugradnje uzoraka u laboratoriju koji je približno odgovarao (prema iskustvu) tadašnjim strojevima (krajem tridesetih godina prošlog stoljeća). Strojevi su se kasnije povećali pa je standardizirana i jedna veća energija zbijanja (slika 4.1).

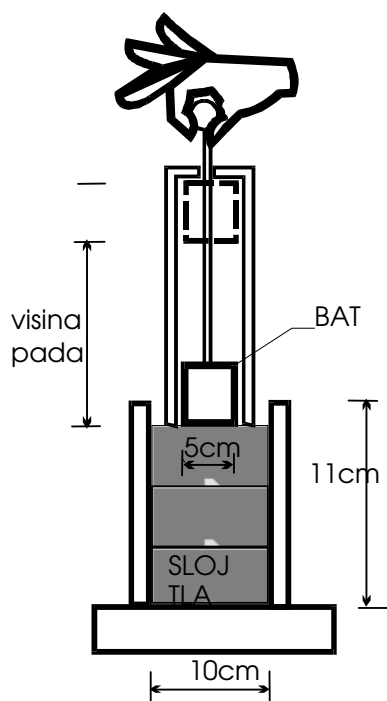
Uspješnost zbijanja zavisna je o:

1. gustoći suhog tla,
2. vlažnosti,
3. energiji zbijanja, i
4. vrsti tla (granulometrijski sastav, postotak glinovitih čestica).

Energija zbijanja je mjera mehaničke energije prenesene na tlo.

Pokus se provodi tako da se pripremi po 5 uzoraka od istog materijala, ali različite vlažnosti (približno 2% razlike). Uzorci se zbijaju u standardiziranom kalupu sa zadanom energijom zbijanja; materijal mora potpuno ispuniti kalup, a višak se ukloni pomoću noža; mjerenjem mase materijala prije i nakon sušenja mogu se tako odrediti gustoće vlažnog i suhog tla (ρ_d) koje odgovaraju različitim vlažnostima.

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$



	STANDARDNI PROCTOR	MODIFICIRANI PROCTOR
TEŽINA BATA (N)	25	45
VISINA PADA (cm)	30,4	42,5
BROJ UDARACA	3*25 slojeva	5*25
ENERGIJA ZBIJANJA (kJ/m³)	610	2750

Slika 4.1-1. Skica Proctorovog uređaja.

Budući da materijal pri zbijanju uvijek ima određenu vlažnost, zbijanjem se zapravo "istjeruje" zrak iz pora. Odnos zapreminske suhe težine tla, vlažnosti i stupnja zasićenosti (S_r) možemo dobiti iz poznatih formula:

$$\rho = (1 - n)\rho_s + nS_r\rho_w$$

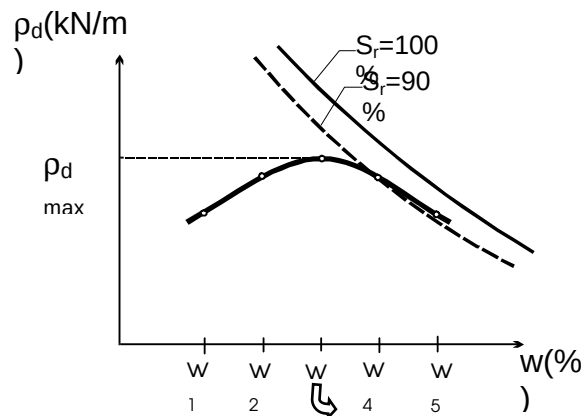
$$\rho_d = (1 - n)\rho_s \Rightarrow n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{nS_r\rho_w}{\rho_d} \Rightarrow \rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s w}{\rho_w S_r}} = \frac{\rho_w S_r}{w + \frac{\rho_w}{\rho_s} S_r}$$

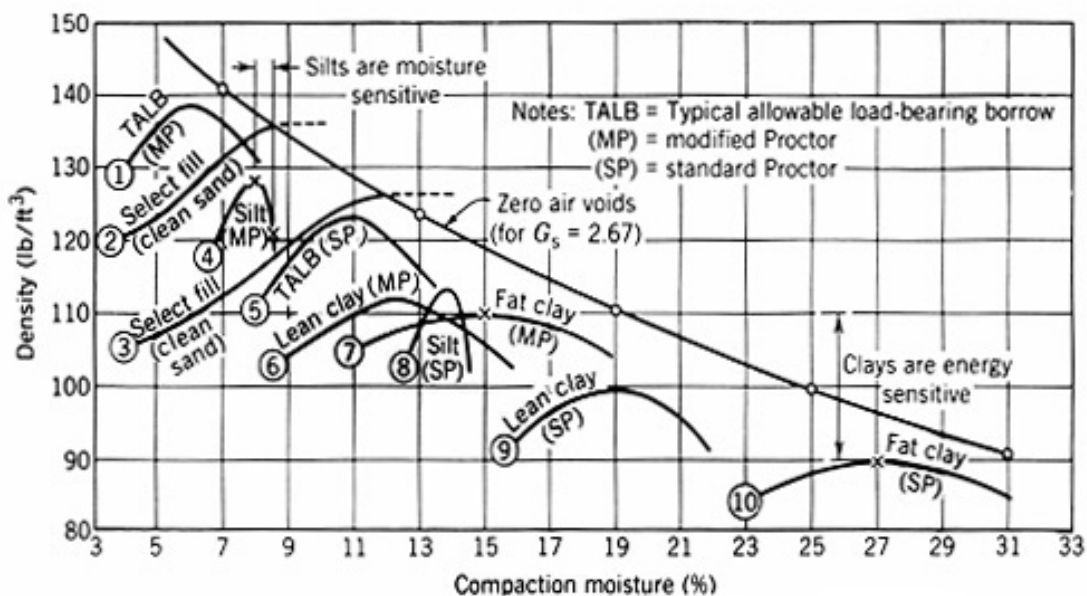
U dijagramu vlažnosti i gustoće suhog tla, preko ove formule se dobije familija hiperbola u kojima se kao parametar pojavljuje stupanj zasićenosti uzorka.

Vlažnost koja odgovara maksimalnoj gustoći suhog tla naziva se optimalnom (slika 4.2) i pri toj vlažnosti treba ugrađivati takav materijal u nasip. Uglavnom

se dozvoljava da vlažnost pri ugradnji varira, ali tako da ρ_{dMAX} ne odstupa za više od 5%.



Slika 4.1-2. Prikaz odnosa vlažnosti i gustoće suhog tla u pokusu zbijanja.



(1) i (5) dobro građirani krupnozrnati materijal sa dosta prašinasto-glinovitih čestica, (2) i (3) čisti pijesak, (4) i (8) prah, (6) i (9) niskoplastična "mršava" glina, (7) i (10) viskoplasična "masna" glina

Slika 4.1-3. Prikaz odnosa vlažnosti i gustoće suhog tla za razne materijale.

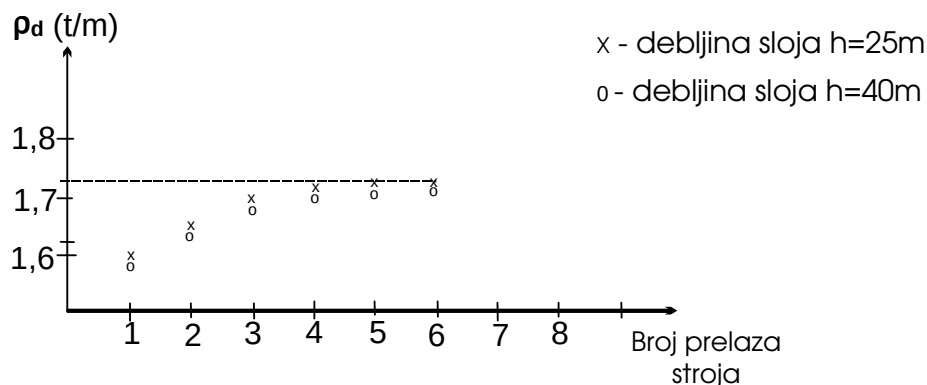
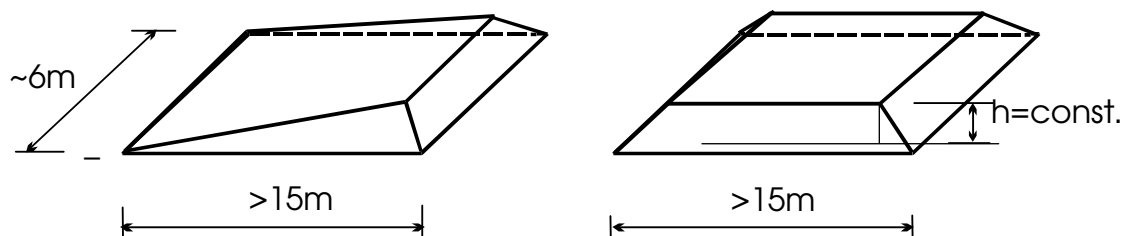
Iz gornjeg se dijagrama može zaključiti:

- najbolje se može zbiti granulirani materijal s ispunom od sitnih čestica; uopće, dobro građirani materijali mogu postići veću zbijenost od jednoliko građiranih (struktura betona),
- krupnozrnati materijali bez sitnih čestica su dobro propusni, pa kod većih vlažnosti nema promjene gustoće jer višak vode brzo izlazi iz tla,
- prašinski materijali su znatno osjetljiviji na promjenu vlažnosti od glinovitih i daju se bolje zbiti,

- čiste su gline jako osjetljive na energiju zbijanja, a relativno neosjetljive na promjenu vlažnosti.
- karakteristični oblik Proctorove krivulje pojavljuje se uglavnom samo kod koherentnih materijala i mješavina koherentnih i nekoherentnih materijala.

4.1.1. Probno polje

Kod većih se radova tehnologija pripremanja zemljanih materijala ispituje na probnom polju. Podloga probnog polja mora biti poravnata i uvaljana. Primjenjuje se ista tehnologija razastiranja i zbijanja kakva će se kasnije koristiti kod masovnih radova. Materijal se nanosi u slojevima, razastire dozerom, a zbijaju ježevima ili valjcima. Duljina probnog polja mora biti najmanje 15.0 m. Materijal se ugrađuje pri optimalnoj vlažnosti. Mjeri se promjena gustoće tla s promjenom prijelaza stroja za zbijanje.



Slika 4.1-4. Prikaz ispitivanja na probnom polju.

Rezultati Proctorovog pokusa i probnih polja služe za određivanje tehničkih uvjeta za ugrađivanje zemljanih materijala koji trebaju sadržavati:

- vrstu materijala,
- granulometrijski sastav (gornja i donja granica),
- donju i gornju granicu vlažnosti te najmanju dozvoljenu zapreminsku težinu ugrađenog materijala,
- najveću dopuštenu debljinu sloja pri zbijanju,
- osnovne osobine sredstava za zbijanje,
- minimalni broj prelazaka stroja za zbijanje.

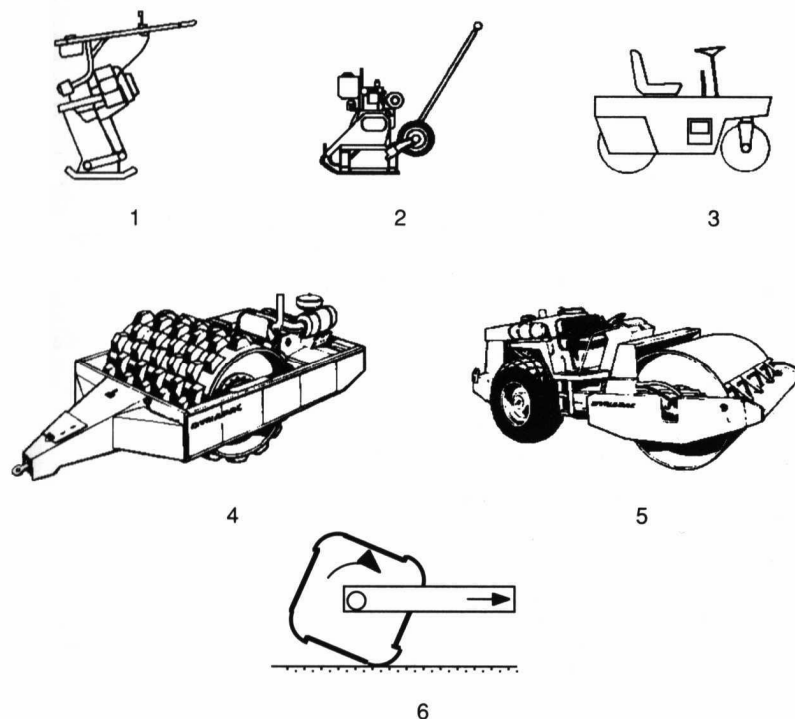
Zbijanjem treba postići 95 do 98% maksimalne gustoće dobivene Proctorovim pokusom.

Tablica 4.1-1. Preporuke za odabir stroja za zbijanje prema vrsti materijala.

VRSTA STROJA	MASA STROJA (t)	VRSTA ZEMLJANOG MATERIJALA	DEBLJINE SLOJA (cm)
GLATKI VALJCI	1 do 18,0	kamena podloga, drobljenac, zaglađivanje površina	15 do 45
JEŽEVI bodlje 15-20cm	3,0 do 20,0	koherentni materijali	15 do 25
VALJCI S GUMENIM KOTAČIMA	8,0 do 50,0	koherentni i nekoherentni materijali	20 do 50
VIBRACIJSKI GLATKI VALJCI	1,0 do 15,0	nekoherentni materijali i nasipi od krupnog drobljenca	60 do 2000
VIBRACIJSKI JEŽEVI	5,0 do 15,0	sitnozrni materijali i koherentni materijali	do 50

4.2. Plitko (površinsko) zbijanje

Plitko ili površinsko zbijanje jedna je od najstarijih metoda poboljšanja svojstava tla. Obzirom na dugu primjenu ove metode postoji veliki raspon mehanizacije (valjci, ježevi), koja se razlikuje po veličini, obliku i načinu rada. Ovisno o načinu rada stroja zbijanje može biti statičko ili dinamičko.



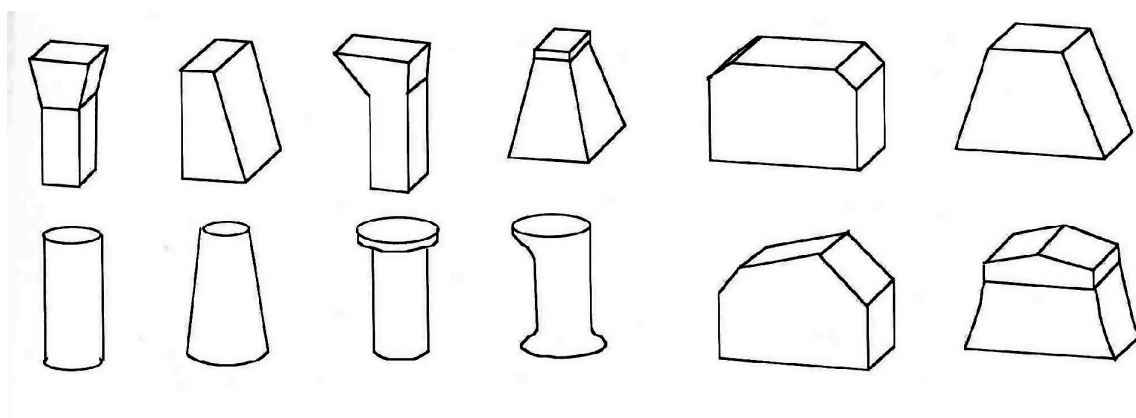
1-vibro-nabijač, 2-vibro-ploča, 3-valjak na gumenim kotačima, 4-vibracijski jež, 5-vibracijski glatki valjak, 6-udarni valjak

Slika 4.2-1. Strojevi za plitko zbijanje.

Na slici 4.2-1 pokazani su strojevi za zbijanje, čije su karakteristike navedene u tablici 4.2-1. Na slici 4.2-2 pokazani su detaljnije različiti oblici zuba kod ježeva, koji se koriste za razne vrste tla. Što je tlo mekše i vlažnije, to kontaktna površina zuba mora biti veća za postizanje optimalnih učinaka zbijanja.

Tablica 4.2-1. Karakteristike strojeva za plitko zbijanje.

Oznaka	Masa (t)	Max. radna brzina (km/h)	Frekvencija vibriranja (Hz)	Debljina sloja (m)	Broj prijelaza
1	0,3-0,1	-	7-10	0,2-0,15	2-4
2	0,06-0,8	1	10-80	0,15-0,5	2-4
3	0,6-2	2-4	25-70	0,3-0,5	4-6
4	6-15	8-10	25-30	0,3-1,5	4-6
5	6-15	6-13	25-40	0,3-1,5	4-6
6	7	10-14	-	0,5-3	do 30



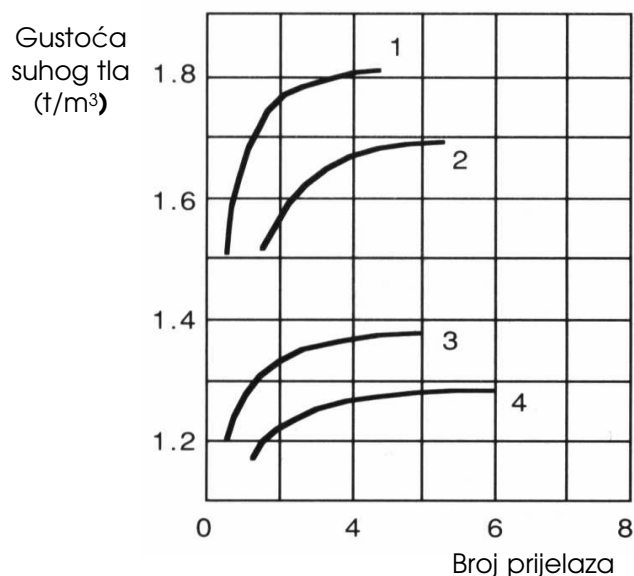
Slika 4.2-2. Oblici zuba na ježevima za zbijanje.

4.2.1. Postupak zbijanja

Za provođenje terenskog zbijanja potrebno je definirati sljedeće:

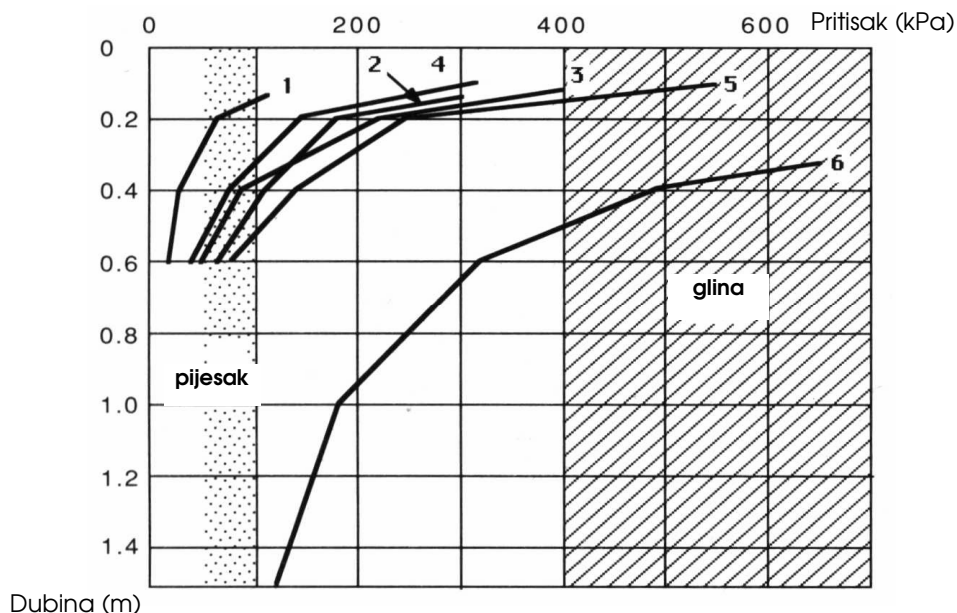
- ✧ broj prijelaza,
- ✧ debljinu slojeva, i
- ✧ frekvenciju (učestalost) za vibracijsko zbijanje.

Obično se koristi 4-6 prijelaza kod dinamičkog zbijanja te 4-8 prijelaza kod statičkog zbijanja. Slika 4.2.1-1 pokazuje odnos gustoće suhog tla i broja prijelaza za dvije vrste tla pri upotrebi različitih strojeva za zbijanje. Optimalni broj prijelaza s ekonomskog i tehničkog stajališta je na dijagramu pokazan točkom maksimalne zakrivljenosti.



Slika 4.2.1-1. Ovisnost gustoće tla o broju prijelaza stroja za zbijanje.

Debljina slojeva obrnuto je proporcionalna pritisku zbijanja, što je određeno vrstom tla. Kod dinamičkog zbijanja obično se primjenjuju pritisci od 50 – 100 kPa za pjeskovita, te 400 – 700 kPa za glinovita tla. Raspodjela pritiska po dubini za razne strojeve pokazana je na slici 4.2.1-2.

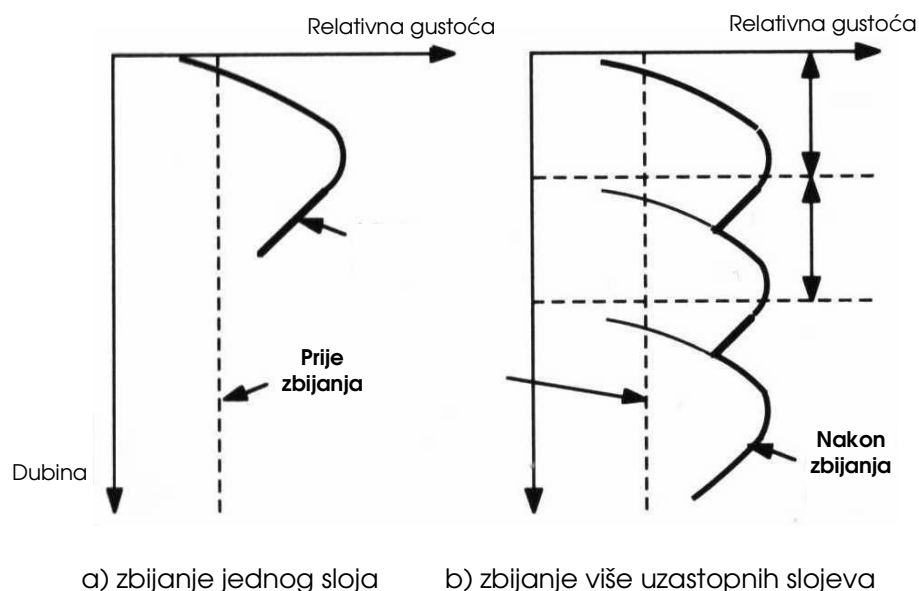


LEGENDA:

1-vibro-ploča 135 kg, 2 -vibro ploča 400 kg, 3 -vibro nabijač 60 kg, 4 -vibracijski valjak 1400 kg, 5 -vibracijski valjak 3300 kg, 6 -vibracijski valjak 13000 kg

Slika 4.2.1-2. Raspodjela dinamičkih pritiska u tlu za vrijeme zbijanja.

Frekvencija vibriranja za teške valjke obično je 25 – 30 ciklusa u sekundi (Hz). Stupanj zasićenosti tla također ima utjecaja na učinke zbijanja. Nekoherentna tla lakše se zbijaju u potpuno zasićenom ili potpuno suhom stanju, nego u djelomično zasićenom stanju. Također, kod nekoherentnih tala slabiji učinci postižu se u površinskom dijelu (slika 4.2.1-3). Gline i prašinate gline jako su osjetljive na sadržaj vode pri ugradnji (Proctorov pokus).



Slika 4.2.1-3. Gustoća pijeska prije i poslije zbijanja.

Naputak za odabir odgovarajuće mehanizacije ovisno o vrsti tla i namjeni pokazan je u tablici 4.2.1-1.

Tablica 4.2.1-1: Izbor opreme za zbijanje.

Oznaka	Vrsta tla	Vrsta stroja	Optimalni sadržaj vode (%)	
			Terenski	Lab. ispitivanja
1	SC	8 t - vibro	14,6	16,2
2	SC	1,5 t - statički	16,5	16,2
3	CH	10 t – ježevi	27	24,3
4	CH	1,2 t - statički	31	24,3

4.3. Duboko zbijanje

Duboko zbijanje primjenjuje se u slučaju kada postoje naslage nekoherentnog materijala znatne debljine. Svrha ovog postupka je eliminacija velikih slijevanja, bilo da se radi o totalnim ili diferencijalnim slijevanjima, kao i sprječavanje pojave likvefakcije.

Duboko zbijanje postiže se primjenom jedne od sljedećih metoda:

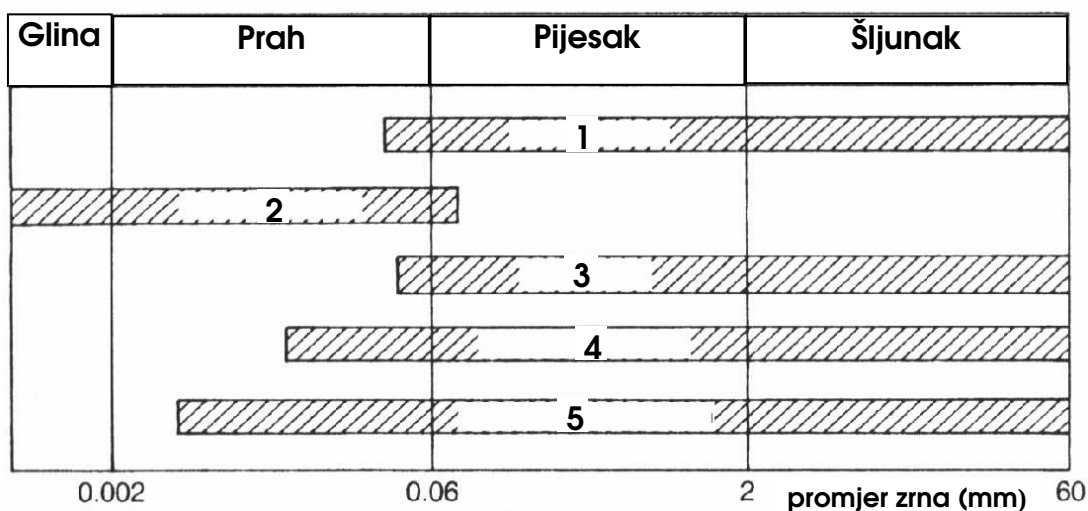
- ✚ prethodno opterećenje (*eng. precompresion*),
- ✚ primjena eksploziva,
- ✚ dinamička konsolidacija (*eng. heavy tamping*),
- ✚ vibracijsko zbijanje,
- ✚ kompaksijsko injektiranje (*eng. compacting grouting*).

Uspješnost primjene ovih metoda ovisi o:

- ✚ vrsti tla (granulometrijski sastav, postotak sitnih čestica),
- ✚ stupnju zasićenosti i RPV,
- ✚ početnoj gustoći tla,
- ✚ in-situ stanju naprezanja,
- ✚ strukturi tla.

Mogućnosti primjene metoda dubokog zbijanja ovisno o vrsti tla pokazana je slikom 4.3-1.

1



1-Vibracijska flotacija, 2-Kameni stupci, 3-Eksploziv, 4-Zbijeni piloti,
5- Dinamičko zbijanje

Slika 4.3-1: Primjenjivost metoda dubokog zbijanja u raznim vrstama tla.

Princip ili mehanizam djelovanja kod nekoherentnih tala je razbijanje početne strukture kako bi se tlo naknadno dovelo u zbijenije stanje. Kod koherentnih materijala to se postiže induciranom likvefakcijom, kada se zbog kratkotrajnog povećanja pornih pritisaka uz pomoć dinamičkih opterećenja,

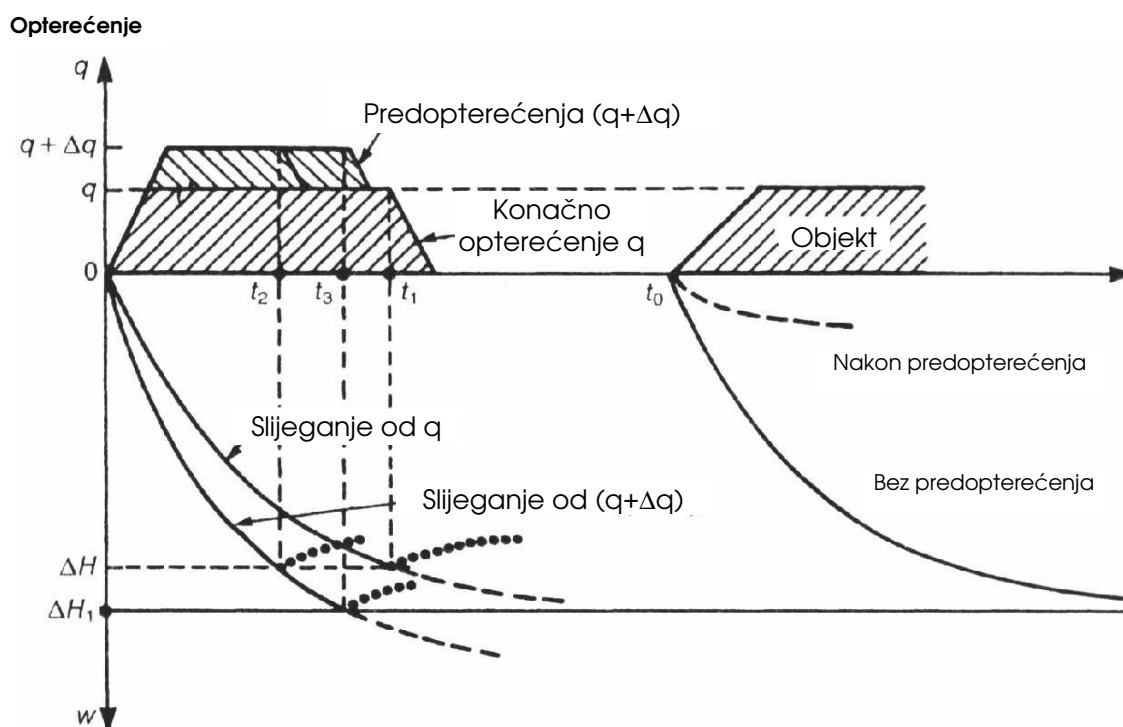
također postiže smanjenje čvrstoće i lom materijala, te naknadno postizanje stabilnog stanja. Kod djelomično zasićenih materijala, zbijanje se postiže kolapsom početne strukture i izlaskom plina (zraka) iz pora.

Slijeganje uslijed primjene navedenih metoda uglavnom se ostvaruje do kraja postupka zbijanja, a kontrolira se pokusima: CPT, SPT i presiometar.

Dubinsko zbijanje prethodnim opterećenjem pripada dominantno skupini hidrauličkih metoda poboljšanja svojstava tla, pa je u ovom poglavlju samo ukratko opisano. Vibracijsko zbijanje uz uporabu aditiva zapravo pripada u metode kompakcijskog injektiranja pa će biti opisano u zasebnom poglavlju.

4.3.1. Prethodno opterećenje

Prethodnim opterećenjem (predopterećenje ili sniženje RPV) postiže se konsolidiranje tla prije izgradnje nekog objekta, čime se smanjuje slijeganje koje će se ostvariti nakon izgradnje (slika 4.3.1-1). Primjenjuje se uglavnom u koherentnim tlima, obzirom da je njihov proces konsolidacije dugotrajan. Može se ubrzati izgradnjom raznih drenažnih sustava. Obzirom da je uspjeh ove metode zavisn najviše o hidrauličkim svojstvima tla, ova metoda pripada više skupini hidrauličkih metoda, pa će detaljnije razmotriti u



Slika 4.3.1-1. Vremenski razvoj slijeganja uslijed prethodnog opterećenja.

Konsolidacija i slijeganje terena uzrokuje se nanošenjem vanjskog dodatnog opterećenja (izgradnjom nasipa odgovarajuće visine) ili snižavanjem RPV.

Vanjsko opterećenje ostavlja se u periodu od nekoliko mjeseci do nekoliko godina, ovisno o učincima koji se žele postići. Ono može biti jednako opterećenju budućeg objekta (q) ili čak veće od konačnog opterećenja ($q + \Delta q$), kako bi se proces konsolidacije dodatno ubrzao. To opterećenje uklanja se nakon što se ostvari određeno slijeganje materijala. Nakon što se tlo rastereti, objekti koji će biti sagrađeni na toj lokaciji uzrokovat će manja slijeganja, jer se dio deformacija ostvario prethodnim opterećenjem.

4.3.2. Primjena eksploziva

Eksplozivi se mogu primijeniti na površini terena ili češće u bušotinama, čime se postiže slom u rahlim materijalima te njihovo preslagivanje u gušće (zbijanje) strukture. Zbijanje tla upotrebom eksploziva često predstavlja brzo i isplativo rješenje.

Općenito, procedura zbijanja sastoji se od sljedećih faza:

-  bušenje,
-  punjenje bušotina eksplozivom,
-  zapunjavanje bušotina,
-  detoniranje po određenom rasporedu paljenja.

Ova metoda daje dobre rezultate u saturiranim, čistim pijescima. Uspješnost metode zavisi o sposobnosti dinamičkih valova da slome početnu strukturu tla, te izazovu likvefakciju i preraspodjelu u gušću strukturu. Iz toga slijedi, da su veća punjenja potrebna ukoliko se postupak provodi u boljim pijescima (veće početne relativne gustoće, D_r) ili je potrebno postići zbijanje do većih dubina.

Obično je potrebno metodu ispitati na probnim poljima prije primjene, jer nema općenito prihvaćenog teorijskog modela. Neka ranija istraživanja daju općenite naputke:

1. potrebno punjenje: 1 – 12 kg,
2. dubina paljenja: $> \frac{1}{4}$ dubine do dna sloja koji se zbija; uobičajeno je $\frac{1}{2} - \frac{3}{4}$ dubine,
3. razmak bušotina: 5 – 15 m,
4. broj uzastopnih postupaka: 1 – 5, uobičajeno 2 – 3, u razmaku od nekoliko sati ili dana,
5. ukupne količine eksploziva: 8 – 150 g/m³, uobičajeno 10 – 30 g/m³,
6. slijeganje na površini terena: 2 – 10 % debljine sloja.

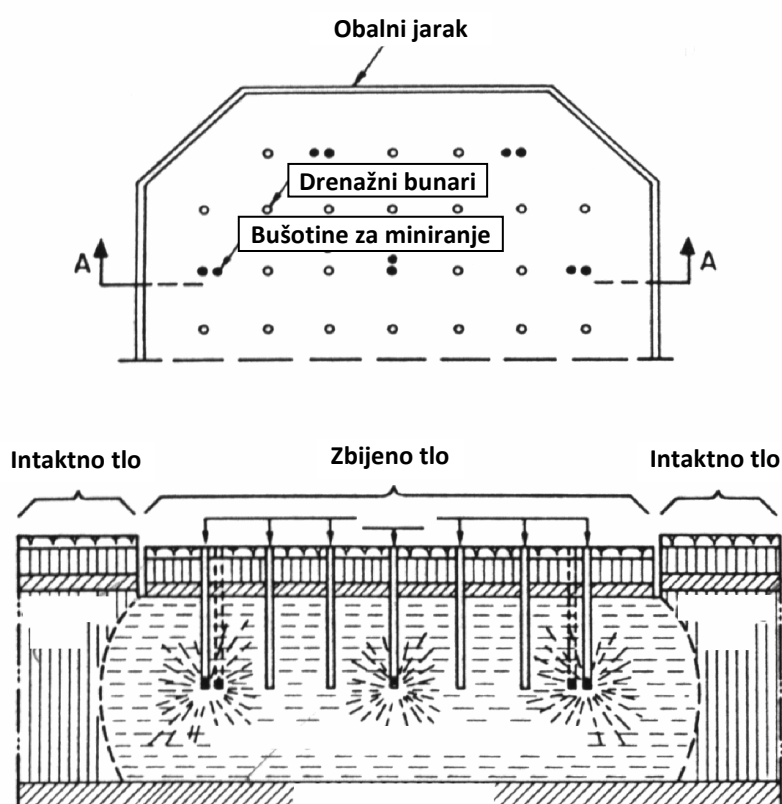
Maksimalna dubina do koje se ova metoda može primijeniti nije poznata, no zadovoljavajući rezultati postizani su i na dubinama većim od 30 m. Slijeganje na površini terena dobiva se praktično odmah nakon miniranja, no zapaženo je da se promjene svojstava (mjerene penetracijskim pokusima, npr. D_r) zapažaju tek nakon određenog vremena (nekoliko tjedana), što se objašnjava očvršćavanjem materijala (aging, healing) i postizanjem stabilnog

stanja u novom složaju čestica (strukтури). ukoliko se postupak ponavlja nekoliko puta, u svakom narednom koraku slijezanja su sve manja nego u prethodnom koraku.

Bitno je napomenuti, da se bitno lošiji rezultati postižu ukoliko je dio pora tla ispunjen zrakom, jer dolazi do prigušenja pritiska od P-valova. Osim toga, metoda nije primjenjiva za prvih nekoliko metara pri površini terena. često se također dešava da nakon početnog zgušnjavanja medija slijedi razrahljenje. U nehomogenim medijima, zone materijala dobrih osobina mogu izgubiti poželjna svojstva koja su prethodno imala, no ukoliko se na većem području postiže prosječno poboljšanje svojstava, onda je i to prihvatljivo.

Postojali su pokušaji primjene ove metode s površine terena, no rezultati nisu bili zadovoljavajući zbog gubitka energije i nedostatka uklještenja.

Tehnika hidro-miniranja uspješno se primjenjuje za zbijanje lesnih naslaga. Postupak je pokazan na slici 4.3.2-1, a provodi se tako da se po obodu najprije napravi jarak širine 0,2 – 0,4 m i dubine od nekoliko metara. Zatim se kroz bušotine razmaknute nekoliko metara utiskuje voda nekoliko dana tj. dok vlažnost tla ne postane veća od granice tečenja. nakon toga se izvodi miniranje.



Slika 4.3.2-1. Zbijanje tla uz primjenu eksploziva- hidrominiranje.

4.3.3. Dinamička konsolidacija

Ovo je metoda kod koje se teški maljevi spuštaju s velike visine uzrokujući zbijanje tla. Uobičajene su sljedeće veličine:

- ✧ masa malja do 170 t,
- ✧ visina pada do 22 m,
- ✧ efekt zbijanja dubine do 40 m,
- ✧ razmak do 14 m.

Dinamička konsolidacija je proces u kojem se povećava gustoća materijala koji je potpuno saturiran a uzrokovana je trenutnim opterećenjem koje uzrokuje posmične deformacije, kratkotrajno visoke porne pritiske (koji mogu uzrokovati i likvefakciju), te konsolidaciju.

Ova se metoda može koristiti između ostalog i na starim odlagalištima, ukoliko se namjerava načiniti prenamjena korištenja prostora.

Dubina do koje se ostvaruju efekti zbijanja procjenjuje se prema izrazu:

$$D = 0,5 \cdot \sqrt{W \cdot H}$$

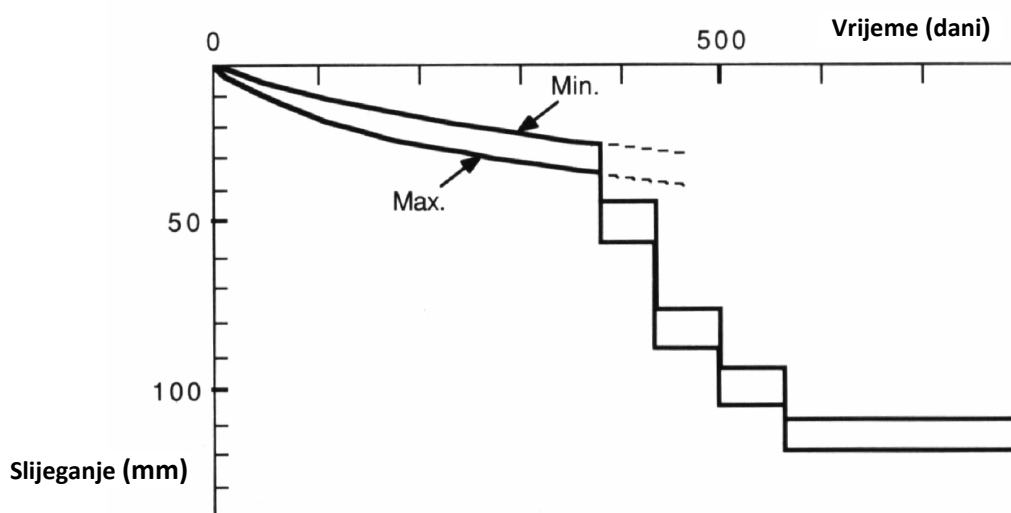
gdje je:

D – dubina, (m),

W – masa malja, (t),

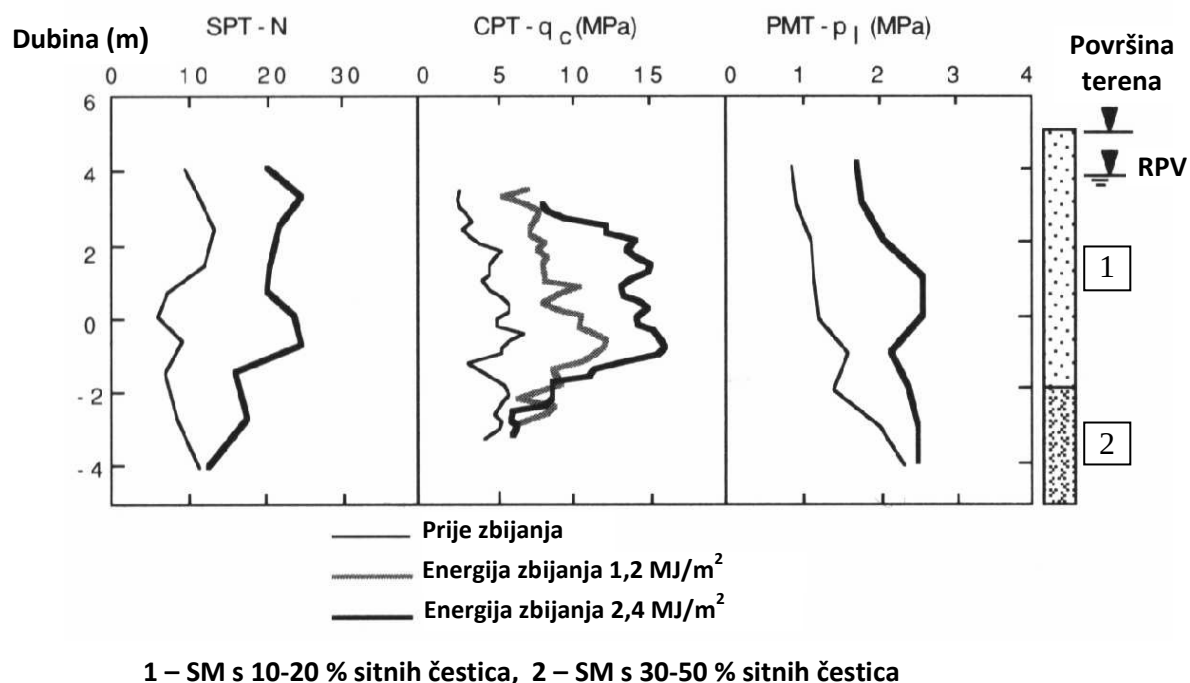
H – visina pada, (m),

Dinamička konsolidacija može biti potpomognuta dodatnim statičkim opterećenjem i vertikalnom drenažom. Slijeganje dobiveno kombinacijom statičkog opterećenja i dinamičkog zbijanja (vertikalni skokovi na krivulji) pokazano je na slici 4.3.3-1.



Slika 4.3.3-1 Vremenski razvoj slijeganja kod dinamičke konsolidacije.

Kontrola uspješnosti ove metode provodi se uglavnom pomoću SPT, CPT, dilatometrima, presiometrima. Primjer poboljšanje nekih parametara dinamičkim zbijanjem pokazan je na slici 4.3.3-2.



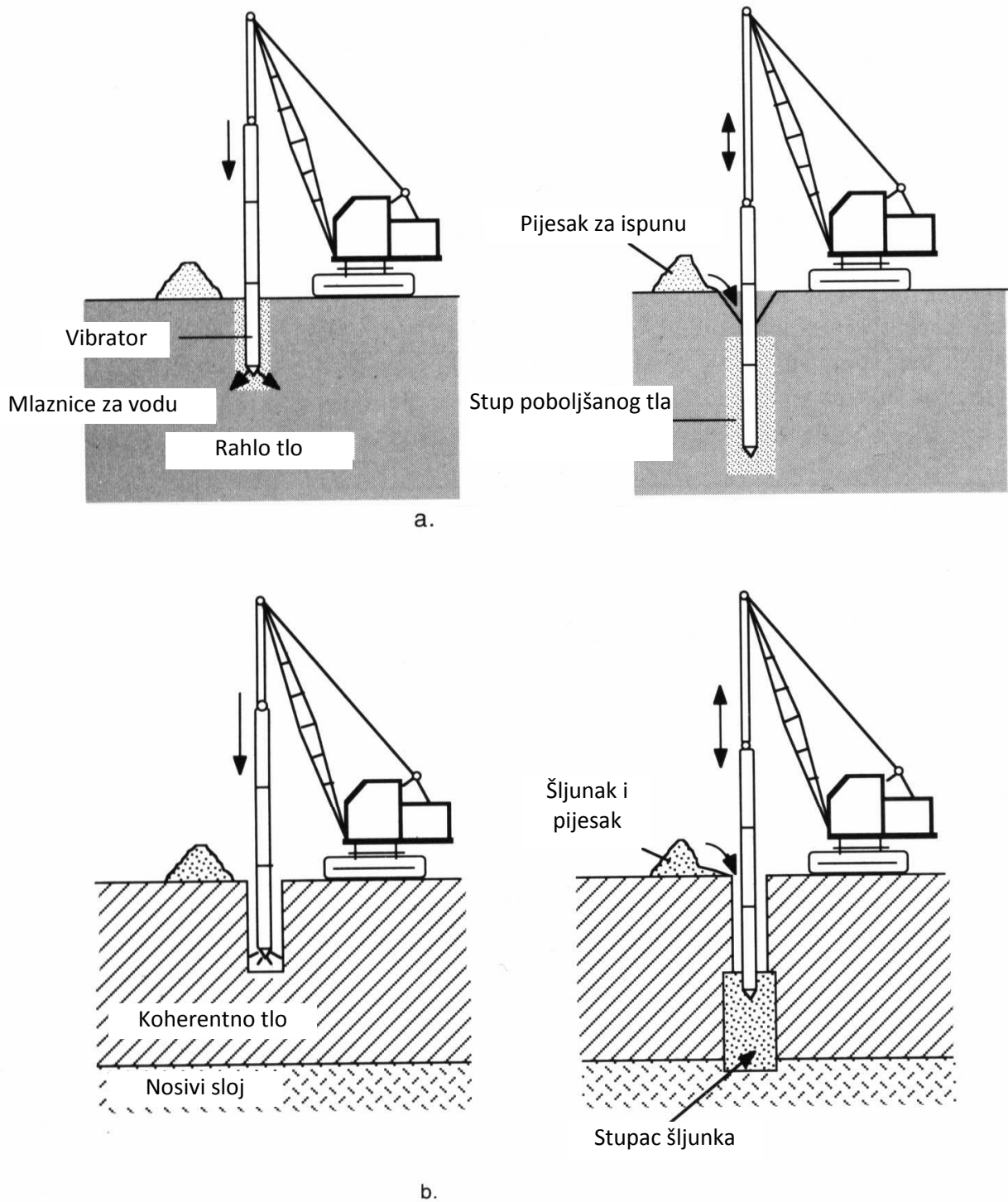
Slika 4.3.3-2 Učinci dinamičke konsolidacije na neka svojstva tla.

4.3.4. Vibracijsko zbijanje

Uređaji za vibracijsko zbijanje koriste se od 30-tih godina prošlog stoljeća. Vibracije se odvijaju uglavnom u vertikalnom smjeru, ali mogu i u horizontalnom smjeru (tzv. vibro-flotacija). Dubina do koje se primjenjuje je do 35 m.

Brzina penetriranja ovisi o vrsti tla, težini vibracijskog uređaja i parametrima vibriranja. Penetracija može biti potpomognuta vodom ili zrakom pod pritiskom. Uobičajeno dubinski vibrator ima dužinu od 3 – 5 m te masu od 2 t.

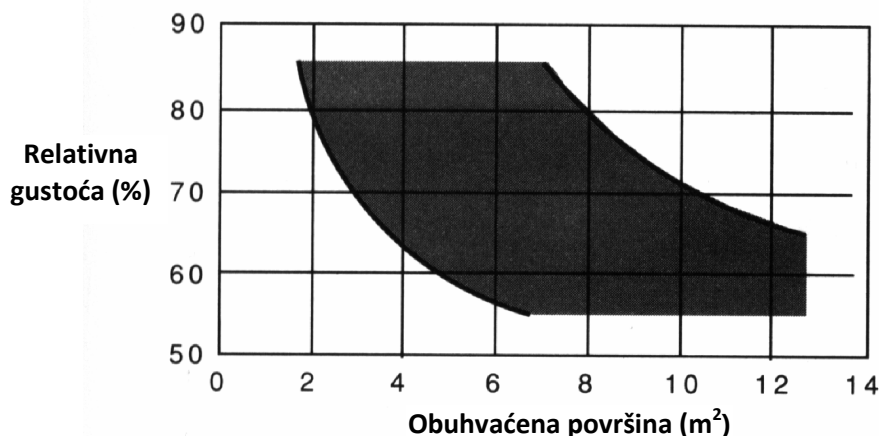
Najbolji rezultati postižu se u rahlim pijescima ($\text{SPT} = 5 - 10$). Metoda nije primjenjiva u glinama. Krater koji nastaje na površini terena kao posljedica dubinskog zbijanja ispunjava se pijeskom ili mješavinom pijeska i šljunka (slika 4.3.4-1). Ovisno o razmaku bušotina mogu se postići relativne gustoće do 85% (slika 4.3.4-2).



a) Vibracijsko zbijanje

b) Vibracijsko zbijanje sa zamjenom materijal

Slika 4.3.4-1. Metode dubokog zbijanja.



Slika 4.3.4-2. Ovisnost postignute relativne gustoće o rasporedu bušotina.

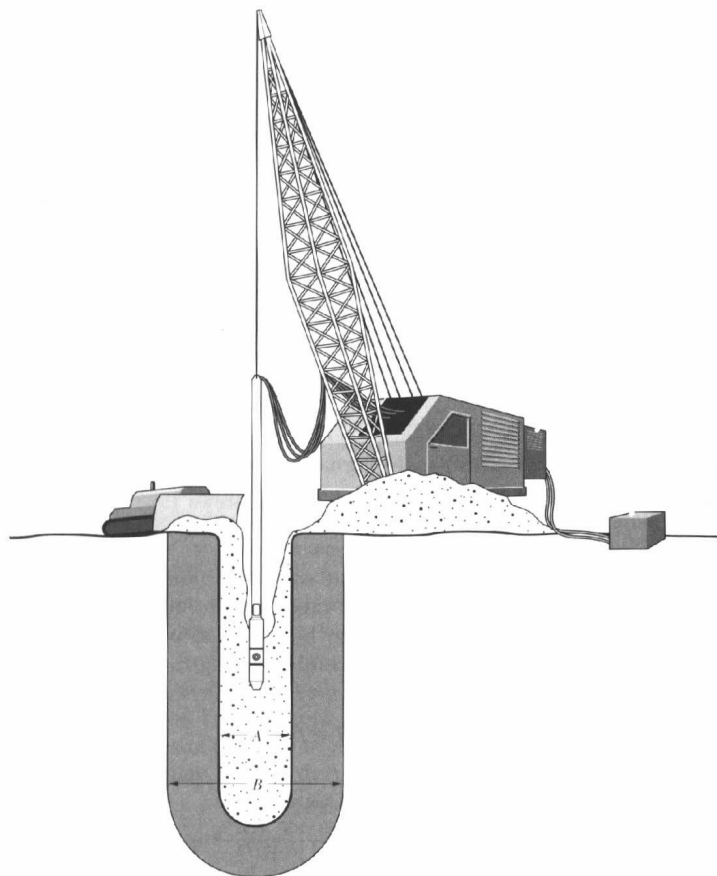
Vibracijsko zbijanje sa zamjenom materijala (*eng. vibro-replacement*) primjenjuje se u koherentnim tlima, gdje se vibratorom stvori najprije cilindrična rupa koja se naknadno ispunjava krupno-znatim materijalom (npr. šljunak ili drobljeni kamen). Zbijanje se može poboljšati upotrebom vode ili zraka pod pritiskom koji se kroz cijev utiskuje, uzrokujući lom i istiskivanje prirodnog materijala koji se nadomješta materijalom koji se utiskuje kroz cijev. Ova metoda najbolje rezultate daje u koherentnim tlima čija je nedrenirana posmična čvrstoća $S_u = 20 - 60$ kPa. Za ostale vrste tla uspješnost ovih dviju metoda pokazana je tablicom 4.3.4-1.

Tablica 4.3.4-1. Primjenjivost metoda dubokg zbijanja u nekim materijalima.

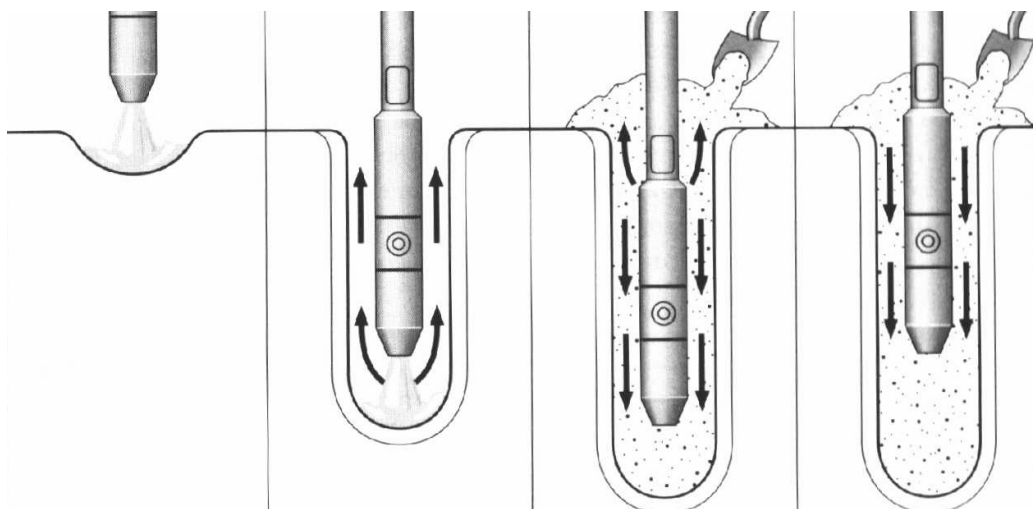
Vrsta tla	Vibro-zbijanje	Vibro-zbijanje sa zamjenom materijala
pijesak	vrlo dobro	ne primjenjuje se
prašnasti pijesak	dobro	vrlo dobro
prah	slabo	dobro
glina	ne primjenjuje se	dobro
rudnički mulj	dobro	vrlo dobro
otpad	ne primjenjuje se	ne primjenjuje se

Vibroflotacija se uglavnom primjenjuje u nekoherentnim tlima. Osnovna oprema potrebna za vibroflotaciju pokazana je na slici 4.3.4-3. Utiskivanje probe potpomognuto je horizontalnim vibracijama i vodom pod pritiskom. Nakon što se dosegne željena dubina, proba se podiže prema gore uz istovremeno ispunjavanje bušotine materijalom s površine (npr. šljunak) koji se također zbija horizontalnim vibracijama probe. U konačnici dobiva se pilot od krupnozrnog materijala te zona zbijenog prirodnog tla oko njega (slika 4.3.4-4).

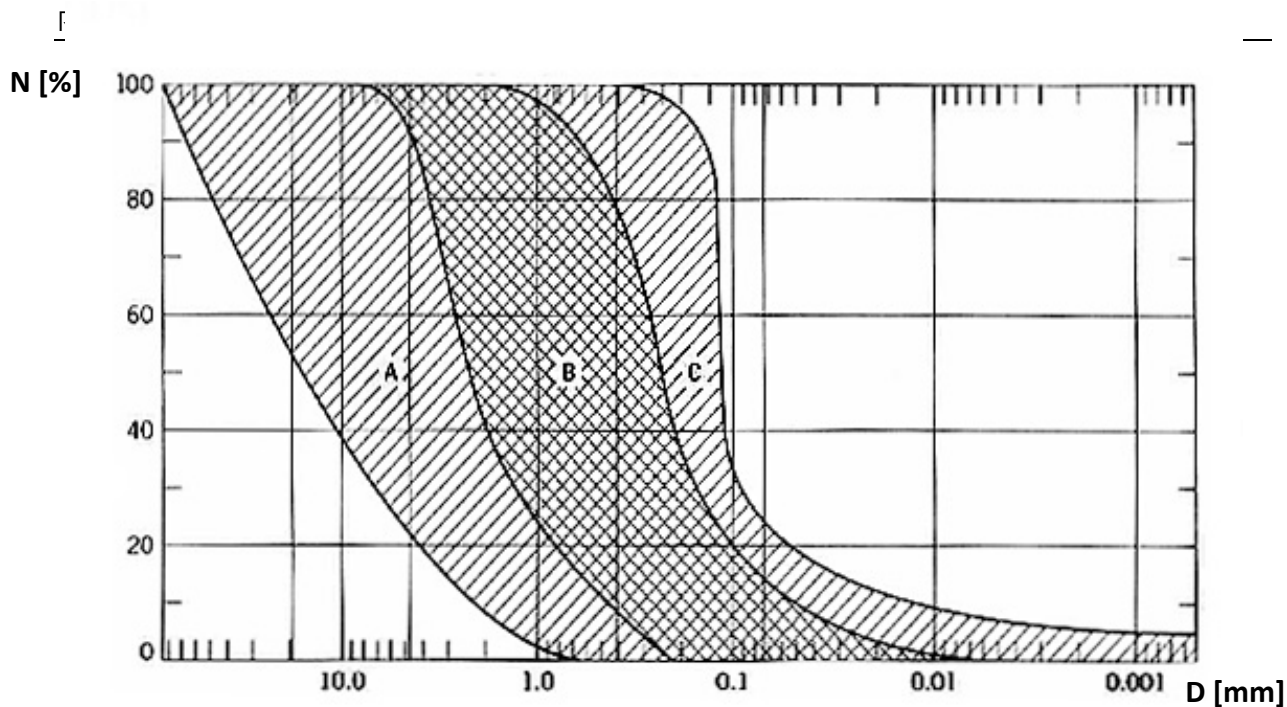
Najbolji rezultati postižu se u rahlim pijescima, naročito ispod RPV. U granulometrijskom dijagramu (slika 4.3.4-5) zona A predstavlja materijale u kojima se postižu najbolji rezultati, dok su materijali u zonama A i C manje poželjni. U zoni C teže se postižu dobri efekti zbijanja, a u zoni A su materijali kod kojih je brzina prodiranja mala a mogu se očekivati i problemi u provođenju radova zbog velikih čestica.



Slika 4.3.4-3. Oprema za vibro-flotaciju.

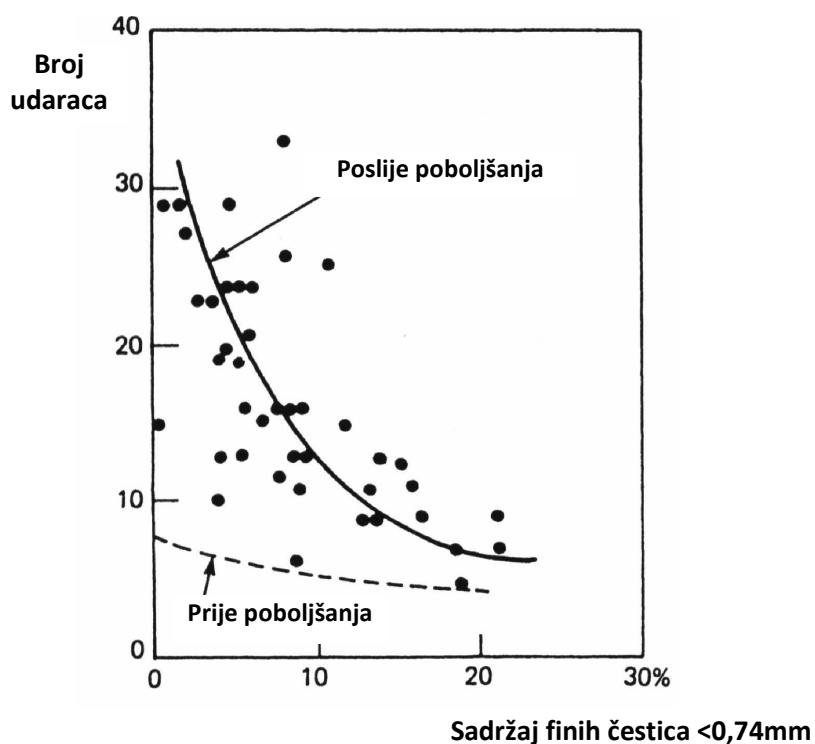


Slika 4.3.4-4. Proces zbijanja kod vibro-flotacije.



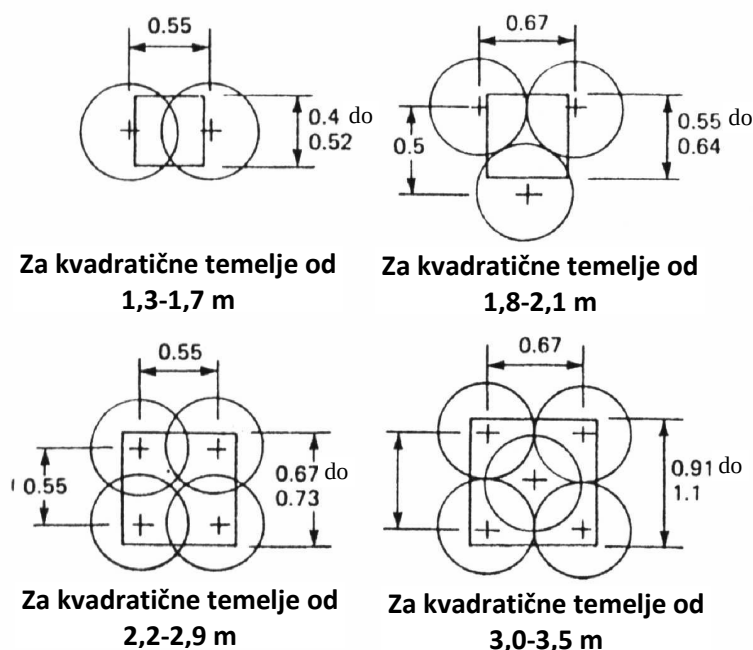
Slika 4.3.4-5. Primjenjivost vibro-flotacije prema granulometrijskom sastavu tla.

Uspješnost zbijanja ovisna je o sadržaju finih čestica (promjer < 0,074 mm) a pokazana je na slici 4.3.4-6.



Slika 4.3.4-6 Utjecaj sadržaja finih čestica na rezultate SPP-a.

Tipični rasporedi bušotina pokazani su na slici 4.3.4-7.



Slika 4.3.4-7. Raspored zbijanja kod vibro-flotacije.

4.3.5. Kompakcijsko zbijanje

Kompakcijsko injektiranje je jedna od metoda mehaničkog poboljšanja tla dubokim zbijanjem. Koristi se kao metoda za poboljšanje svojstva tla, odnosno povećanje gustoće i nosivosti tla zbijanjem. Ideja metode zasniva se na utiskivanju injekcijske smjese pod velikim pritiskom u tlo, kako bi se ojačale oslabljene formacije rahlog tla, te je za takav proces povezivanja čestica tla namijenjen termin "Compaction grouting", odnosno u prijevodu "Kompakcijsko injektiranje". Američko društvo građevinskih inženjera je 1980. godine dalo definiciju za kompakcijsko injektiranje:

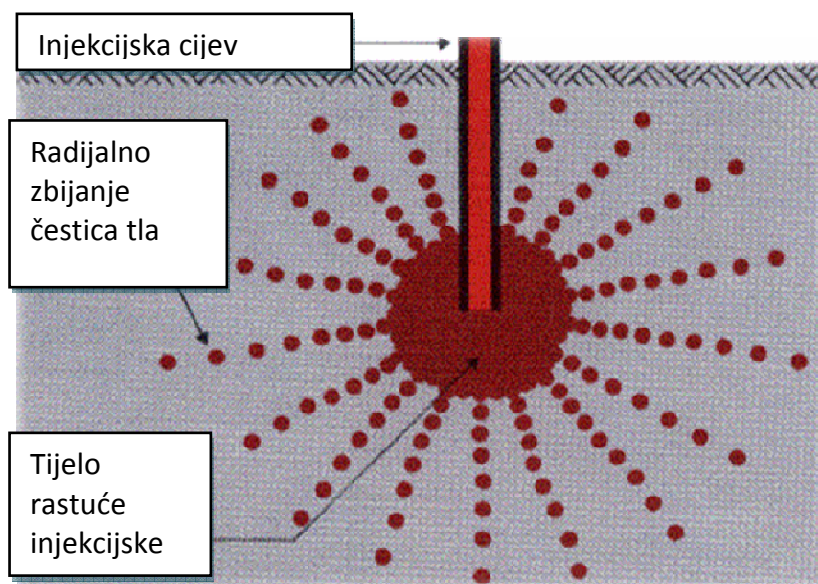
"Kompakcijsko injektiranje – injektiranje cementnom smjesom za slijeganja manja od 25 mm. Za dobro cementirano tlo potrebna je određena količina praha radi plastifikacije materijala, odnosno odgovarajuće količine pijeska radi razvijanja unutrašnjeg trenja. Cementna smjesa ne ulazi u pore tla, već se formira kao homogena masa, kojom možemo kontrolirano zbijati rahla tla, koristiti je za kontrolirano izdizanje objekata ili koristiti je za oboje".

Istraživanje i primjena kompakcijskog injektiranja počela je ranih 50-ih godina prošlog stoljeća u SAD-u, te se na početku obično koristila kao pomoćna tehnika već postojećim metodama za poboljšanje svojstava tla. Kasnijih godina, metoda se pokazala vrlo dobrom i kod primjene u urbanim sredinama prilikom tunelogradnje u mekim tlima. Početkom 80-ih kompakcijsko injektiranje se koristilo kao tehnika za poboljšanje terena prije

izgradnje novih objekata, te je korištena zajedno s dinamičkim dubokim zbijanjem prilikom poboljšanja tla ispod jedne elektrane.

Općenito gledajući, metodu kompakcijskog injektiranja koristimo u uvjetima kod kojih je došlo do slabljenja tla bilo zbog djelovanja čovjeka ili zbog prirodnih procesa u zemlji, odnosno pojava urušavanja u tlu. Također se može primijeniti kao ojačanje postojećih temelja nekog objekta, za izravnavanje i izdizanje slegnutih terena pod opterećenjem, pripremu terena za gradnju budućih objekata i sl.

Primarni cilj kompakcijskog injektiranja jest zbijanje, odnosno povećanje gustoće i čvrstoće oslabljenih formacija tla. Takav efekt se postiže cilindričnim utiskivanjem injekcijske smjese kroz injekcijske cijevi, uslijed čega dolazi do širenja injekcijske smjese i zbijanja okolnog tla. Tijelo koje se formira kompakcijskim injektiranjem je uglavnom kuglastog oblika promjera oko 1 m ili više ovisno o uvjetima u tlu (Slika 4.3.5-1). Prilikom utiskivanja injekcijske smjese u tlo, formirano tijelo se radijalno širi što izaziva i plastične deformacije u zonama kontakta injekcijske smjese i okolnog tla, dok se u zonama udaljenijim od tog kontakta čestice tla zbijaju, tj. povećava im se gustoća, te su u tom području deformacije više elastične nego plastične.

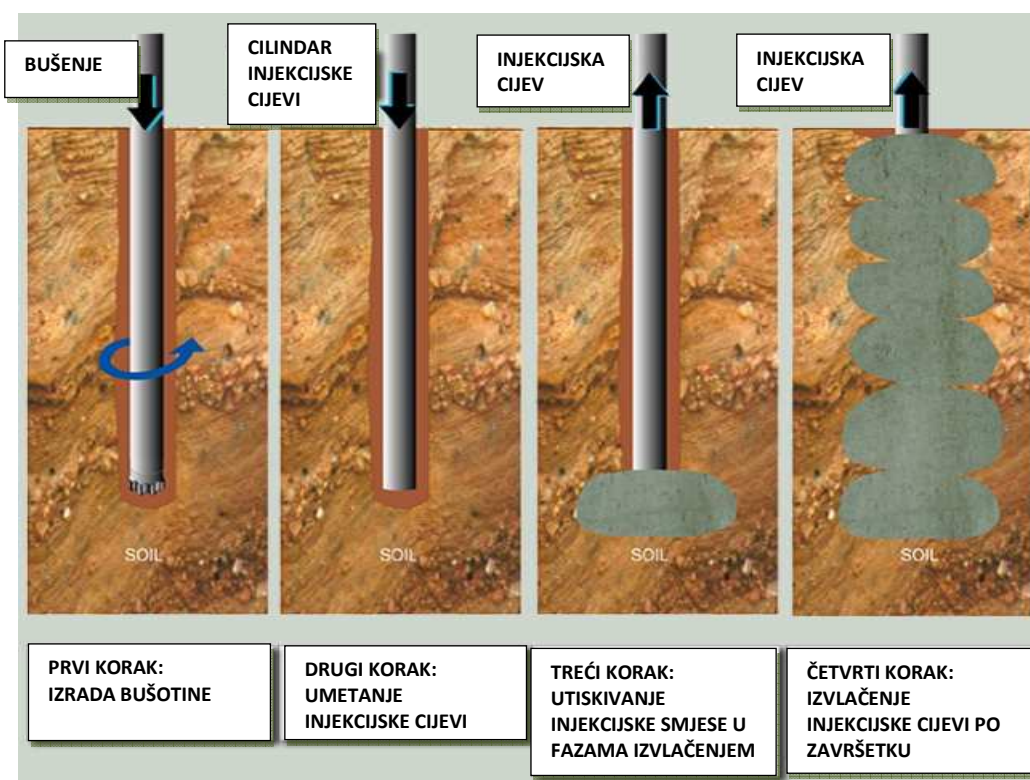


Slika 4.3.5-1. Tijelo formirano kompakcijskim injektiranjem.

Ovisno o redoslijedu injektiranja, utiskivanje injekcijske smjese se može vršiti na dva načina. Jedan način je injektiranje od vrha prema dnu, a drugi od dna prema vrhu injekcijske cijevi. Injektiranje od dna prema vrhu, odnosno izvlačenjem cijevi prema površini je najčešće korišten način injektiranja, jer se pokazao kao jeftiniji i efikasniji od suprotnog načina injektiranja, utiskivanjem injekcijske smjese od vrha prema dnu. Proces injektiranja jedne bušotine izvodi se u četiri koraka:

1. Izrada bušotine namijenjene za kompakcijsko injektiranje
2. Umetanje injekcijske cijevi u bušotinu
3. Utiskivanje injekcijske smjese u fazama
4. Izvlačenje injekcijske cijevi nakon injektiranja

Prije samog injektiranja, izbuši se bušotina određene dužine u koju se naknadno umeće injekcijska cijev. Zatim slijedi utiskivanje injekcijske smjese u fazama npr. počevši od dna bušotine prema vrhu. Nakon završetka prethodne faze injektiranja, cijev se izvlači prema gore za određenu dužinu te slijedi sljedeća faza utiskivanja injekcijske smjese. Zadnja faza injektiranja je pri samoj površini terena, nakon čega slijedi izvlačenje injekcijske cijevi iz bušotine čime završava proces injektiranja jedne bušotine (Slika 4.3.5-2).



Slika 4.3.5-2. Proces injektiranja jedne bušotine izvlačenjem injekcijske cijevi od dna prema površini.

Injekcijska smjesa se utiskuje cilindrično kroz injekcijske cijevi unutarnjeg promjera minimalno 5 cm, dok debljina cijevi može biti po želji. Kako je redoslijed injektiranja bitan za pojedinu bušotinu, tako je raspored bušotina i razmak između injekcijskih cijevi od iznimne važnosti za čitav projekt kompakcijskog injektiranja. Raspored i razmak između injekcijskih cijevi određen je projektnim rješenjem, prema kojem određivanje tih parametara uvjetuju karakteristike tla, potrebna učinkovitost i ekonomska isplativost.

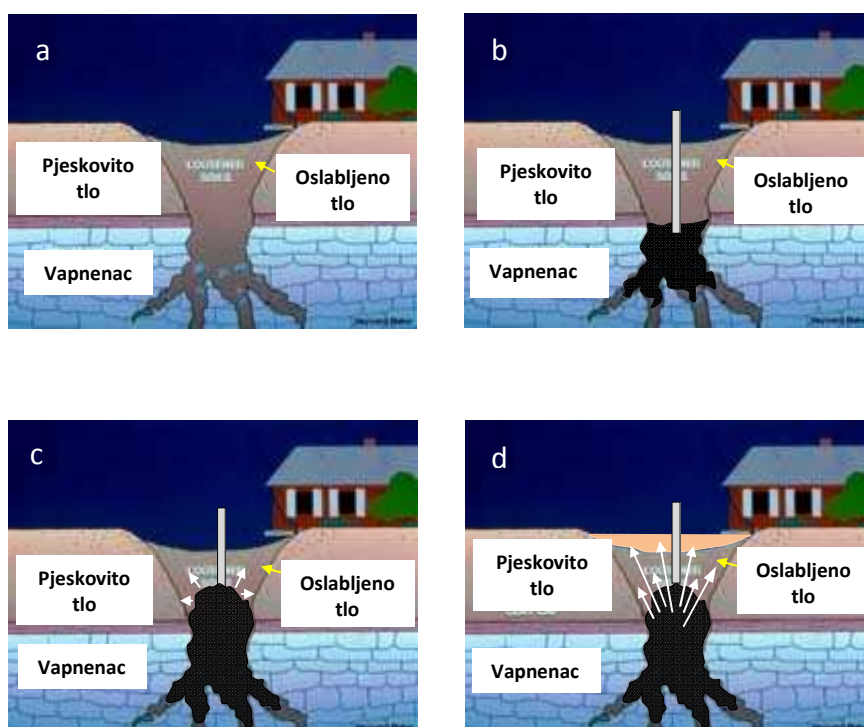
Također je bitna i instalacija injekcijskih cijevi u bušotinu, kako ne bi došlo do neželjenih problema unutar bušotine tokom injektiranja. Iz tog razloga se cijevi

pojedine bušotine spojene čeličnim navojima te moraju biti dobro priliječljene uz tlo, kako bi se uslijed jakog pritiska tokom injektiranja, izbjegli problemi poput curenja i odbacivanja injekcijske smjese.

4.3.5.1. Primjena kompakcijskog injektiranja

Primjena metode kompakcijskog injektiranja je raznolika, iako je svrha u svakoj primjeni jednaka, koristi se u raznim situacijama. Općenito gledajući kompakcijsko injektiranje se koristi radi poboljšanja svojstva tla kod kojih je došlo do slabljenja bilo zbog čovjekovog djelovanja (geotehnički, građevinski, rudarski zahvati i sl.) ili zbog prirodnih procesa u tlu. Tako primjenu ove metode možemo podijeliti na primarnu i sekundarnu primjenu. Pod primarnom primjenom kompakcijskog injektiranja podrazumijevaju se situacije kod:

- oslabljenja i propadanja (organsko raspadanje) prirodnih uvjeta u tlu
- oslabljenje tla i pojave pukotina radi loše ugradnje
- oslabljenja tla nastala iskapanjem u blizini
- oslabljenja tla nastalo i uzrokovano pojavom urušavanja
- oslabljenja tla nastalo odvodnjavanjem
- oslabljenje tla nastalo i uzrokovano kvarovima na infrastrukturi (npr. vodovi).



Slika 4.3.5.1-1. Prikaz izdizanja i poravnavanja površine nadsloja iznad urušenog tla kompakcijskim injektiranjem.

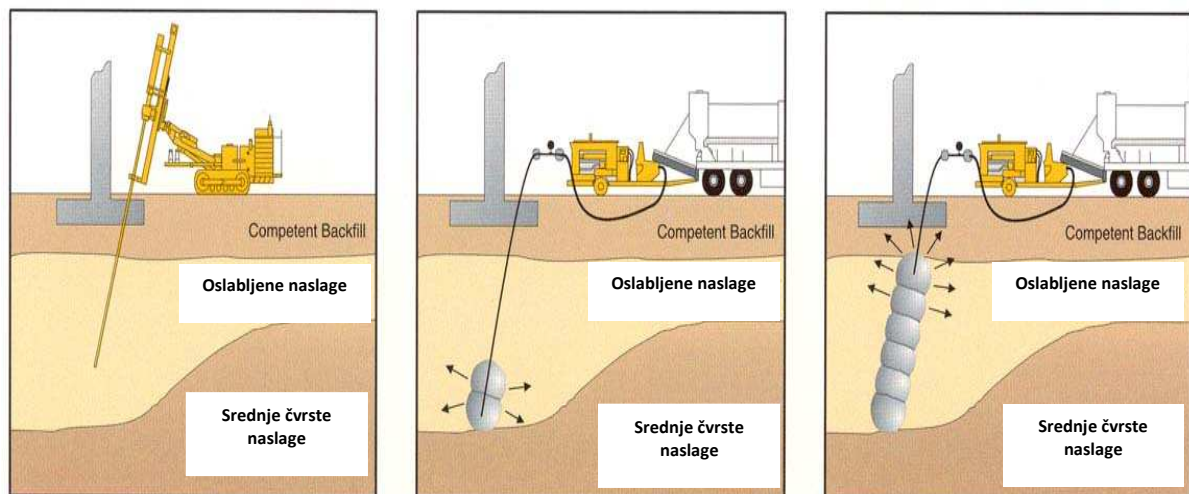
Na slici 4.3.5.1-1. se može vidjeti primjena kompaksijskog injektiranja u situaciji kojoj je došlo do urušavanja tla. Utiskivanjem injekcijske smjese u tlo, postiže se izdizanje terena i izravnavanje površine. Opis slike:

- prikaz urušenog tla
- utiskivanje injekcijske smjese u tlo
- zbijanje nadsloja kompacijskim injektiranjem
- izdizanje i poravnanje površine nadsloja

Kompaksijsko injektiranje, kao oblik sekundarne primjene, može se koristiti i kod izravnavanja slegnutih terena ispod građevina, kao priprema budućeg gradilišta, odnosno poboljšanje svojstava tla prije gradnje novih objekata (kao konstrukcijski element), kao potpora već postojećim temeljima (Slika 4.3.5.1-2) i sl. Primjena kompaksijskog injektiranja u svrhu pripreme terena gradilišta koristi se isključivo u uvjetima u kojima je svaka druga metoda ekonomski neisplativa.

Okolnosti kod kojih se kompaksijsko injektiranje može upotrijebiti kao priprema gradilišta za gradnju novih objekata su:

- prisutnost tankih i dubokih "problematičnih zona" koje bi mogle izazvati velika slijeganja tijekom novih opterećenja ili budućih seizmičkih aktivnosti
- prisutnost oslabljenog nadsloja u jako promjenjivim vapnenačkim naslagama, gdje duboko temljenje u zdravoj stijeni nije ekonomski isplativo



Slika 4.3.5.1-2. Ojačanje tla ispod postojećih temelja objekta i faze injektiranja.

Vrste i svojstva tla pogodna za primjenu kompaksijskog injektiranja:

Vrste tla u kojima se postižu dobri efekti primjenom kompaksijskog injektiranja dijele se na 5 kategorija:

Rahla krupnozrnata tla iznad i ispod razine podzemne vode

Tla okarakterizirana ovom kategorijom su najpogodnija za uporabu kompakcijskog injektiranja. U ovakvim tlima se obično javljaju pijesci ili šljunci sa sadržajem praha i nekih glina. Broj udaraca, dobiveni SPT pokusima, obično se kreću između 0 do 15 ili 20. Kompakcijsko injektiranje se u ovim tlima izvodi bez obzira na postojeću gustoću i postojanje ili ne postojanje opterećenja.

Meka nesaturirana sitnozrnata tla

U ovim tlima se najvećim djelom javljaju mulj i/ili prah, te se kompakcijsko injektiranje može primijeniti samo u slučaju da su tla nesaturirana. Zahvati u debelim saturiranim slojevima gline i praha mogu biti i dodatni problem, odnosno dodatno ubrzati slijeganje, te se u takvim tlima ne bi smijelo izvoditi kompakcijsko injektiranje. Vrijednosti N – broja udaraca za meka nesaturirana sitnozrnata tla, dobivene SPT pokusima, obično se kreću između 0 i 10.

Kolapsibilna tla

Kompakcijsko injektiranje se uspješno primjenjuje i u naslagama prapora i lesa nastalim nanosima vjetra u suhim područjima. Problem kod ove kategorije može biti saturacija tla izazvana loše izvedenim drenežnim sustavom na nekom određenom području.

Porozna tla

Popunjavanje pora unutar tla ili stijena kompakcijskim injektiranjem je efikasnije od zapunjavanja pora žitkim smjesama. Injekcijske smjese utisnute kompakcijskim injektiranjem lakše je kontrolirati, te se smjese neće dodatno proširivati. Iz tih razloga se kompakcijsko 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 suhi ili saturirani prah, glina ili organsko tlo (treset), no debljine naslaga ne bi smjele manje od 2 m te se slojevi trebaju nalaziti 2 m ispod opterećenja izazvanog objektima na površini.

4.3.5.2. Projektiranje i kontrola kvalitete

Parametri projektiranja

Prije same izvedbe kompakcijskog injektiranja, potrebno je izvesti istražne radove na terenu kojima ispitujeemo i utvrđujemo značajke tla i stijena, vrstu

materijala, njihov položaj i fizičko - mehanička svojstva. Istražni radovi provedeni na terenu i u laboratoriju, prikazuju se geološkim i geotehničkim profilom, koji je nužno potreban za određivanje optimalnih parametara budućih zahvata, kao što je kompakcijsko injektiranje. Kao i u svim sličnim projektnim rješenjima, određivanje parametara uvjetuju, osim karakteristika podzemlja, i ekonomska isplativost zahvata.

Parametri koji se uzimaju u obzir pri projektiranju zahvata kompakcijskim injektiranjem:

a) Razmak između injekcijskih cijevi

- razmak među cijevima se kreće obično između 1 i 5 m ovisno o uvjetima u tlu
- manji razmak služi za postizanje veće kompaktnosti blizu površine terena, te gdje je debljina nadsloja manjih dimenzija, razmaci su obično između 1,5 do 2,10 m
- veći razmak se koristi kod većih debljina nadsloja (10 m), te gdje su uvjeti tla dobri što ne zahtjeva veliko poboljšanje tla, razmaci su obično između 2,40 do 3,0 m

b) Redosljed injektiranja

- prvi i najčešće korišten način injektiranja jest od dna prema vrhu izvlačenjem injekcijske cijevi
- drugi način je utiskivanje injekcijske smjese počevši od vrha prema dnu bušotine

c) Pritisak tokom injektiranja

- pumpe koje se koriste za kompakcijsko injektiranje trebaju omogućiti pritiske injektiranja i do 110 kN/cm^2

d) Brzina injektiranja

- manje bilance injektiranja u iznosu od 0,15 do 0,3 m^3/min koriste se za injektiranje oslabljenih dreniranih tala blizu površine
- srednje vrijednosti u razmaku od 0,3 do 1,2 m^3/min koriste se u uvjetima slobodnog dreniranja i u suhim tlima
- veće se vrijednosti od 1,2 do 4,0 m^3/min koriste se mekim raspucalim formacijama sa čvrstom krovinom

e) Volumen injekcijske smjese

- volumen smjese mora biti određen s obzirom na postizanje željenog efekta, ne smije se dogoditi pretjerano izdizanje terena
- povećanje volumena je moguće ukoliko se ne primijete željeni rezultati, tj. nedovoljno izdizanje terena

- smanjenje volumena primjenjuje se ukoliko je uočeno izdizanje već u ranim fazama injektiranja
- volumen se određuje prema razmaku između injekcijskih cijevi unutar mreže bušotina i prema dužini faza injektiranja unutar bušotine

f) Izdizanje

- prije injektiranja treba postaviti granice izdizanja površine terena odnosno objekata na površini
- izdizanja se prate geodetski na površini, te je potrebno pratiti i najmanja izdizanja u višestrukim fazama injektiranja
- kao dobar kriterij izdizanja smatraju se vrijednosti od 1,77 cm za ukupno izdizanje, te 0,25 cm za izdizanje pojedine faze injektiranja

g) Injekcijska smjesa

- materijal kompakcijske smjese bi trebao sadržati dovoljno finih čestica radi plastifikacije smjese, te dovoljno zrnatih materijala radi poboljšanja unutarnjeg trenja
- komponente injekcijske smjese su obično pijesak/pjeskovito tlo, te razne primjesama, kao što su cement, lebdeći pepeo, bentonit, krupni agregat
- glavna komponenta injekcijske smjese je pijesak odnosno pjeskovito tlo koji se koristi sam ili u kombinaciji s cementom kao primjesom
- ukoliko je prirodni i dobro graduiran pijesak teško dostupan, može se koristiti i umjetno proizveden materijal u kombinaciji s lako dostupnim materijalima
- cement se koristi kao primjesa radi povećanja čvrstoće injekcijske smjese
- lebdeći pepeo se koristi također kao primjesa kako bi se dobila odgovarajuća finoća smjese ili kao zamjena za cement
- udio bentonita u smjesi je svedena na minimum, pretjerana uporaba bentonita uzrokuje ponašanje smjese kao konzistente masti
- šljunak i ostali krupni agregat sa malim zrnima valutičastog oblika (veličine ispod 1,7 cm) se također mogu koristiti kao primjesa u injekcijskim smjesama

4.4. Kontrola zbijanja

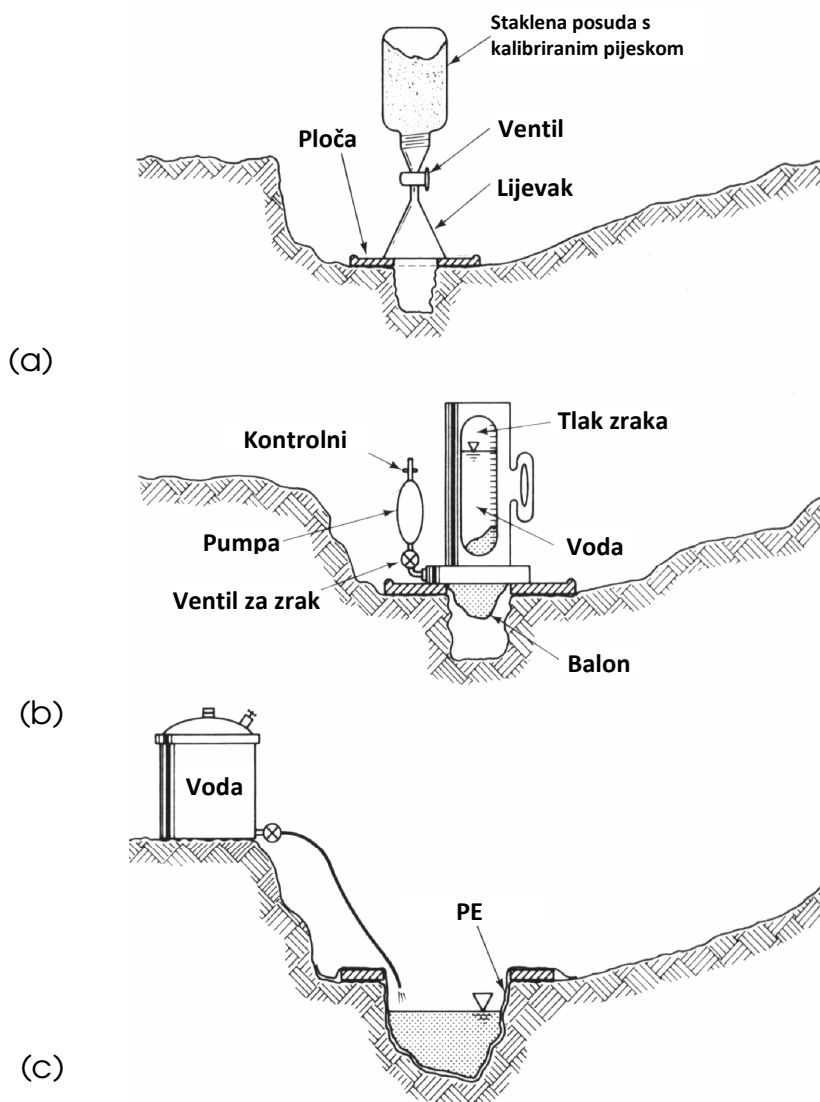
Postoji niz raznih metoda pogodnih za provjeravanje efekata zbijanja tla, no općenito se one dijele na dvije skupine:

- ✚ metode koje se provode s površine terena, i
- ✚ metode koje se provode na većim dubinama.

Obično se mjere samo neke osobine tla, kao npr. vlažnost i gustoća, ili neki indeksni pokazatelji (CPT, SPT) te se na temelju njih procjenjuje čvrstoća ili deformabilnost pomoću raznih korelacija ili empirijskih izraza.

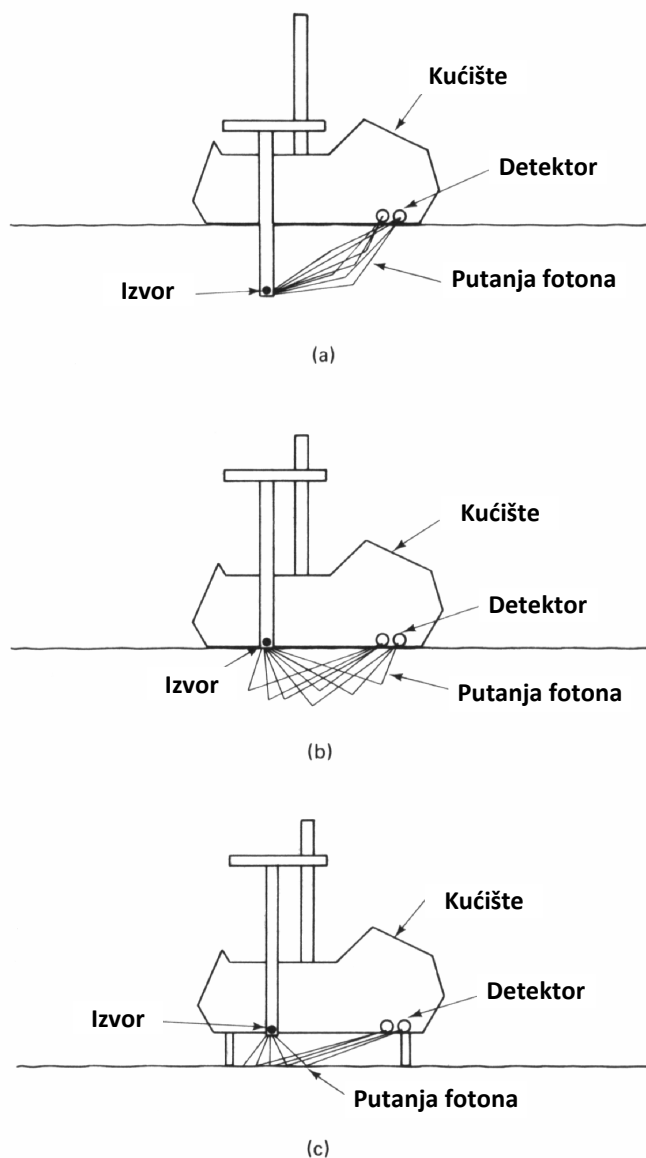
4.4.1. Metode za kontrolu uspješnosti plitkog zbijanja

Obično se gustoća i vlažnost zbijenog tla mjeri terenskim ispitivanjima. Gustoća se može mjeriti primjenom cilindra s kalibriranim pijeskom (*eng. sand cone test*), ili balonom s vodom ili pomoću vode i nepropusne membrane u tlu (slika 4.4.1-1 a, b, c).



Slika 4.4.1-1. Terensko mjerenje gustoće tla.

Nuklearnim denzimetrom može se mjeriti gustoća i prirodna vlažnost tla (slika 4.4.1-2). Metoda je pouzdana i brza, no samo adekvatno obučeno osoblje može provoditi ovo ispitivanje, zbog izlaganja radioaktivnom zračenju. Osim toga koriste se osobni dozimetri kako bi se kontrolirala izloženost zračenju svakog pojedinca.



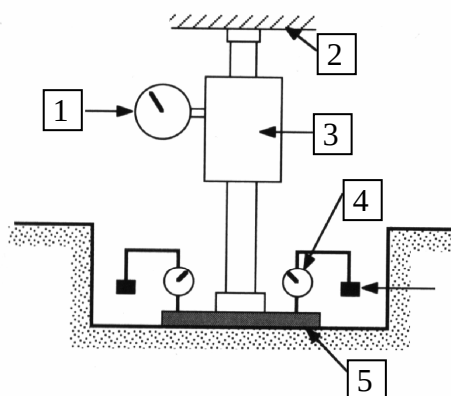
Slika 4.4.1-2. Mjerenje nuklearnim denzimetrom.

Unutar uređaja nalazi se radioaktivni izvor (npr. Cs-137) koji emitira gama-zrake. Zrake se emitiraju ili s površine terena (slika 4.4.1-2 b) ili s male dubine (slika 4.4.1-2 a), te se mjeri broj protona koji se vraćaju u uređaj. Absorpcija gama-zračenja zavisi uglavnom o gustoći medija i njegovom sastavu, pa se stoga mora kalibrirati uređaj odgovarajućim materijalom.

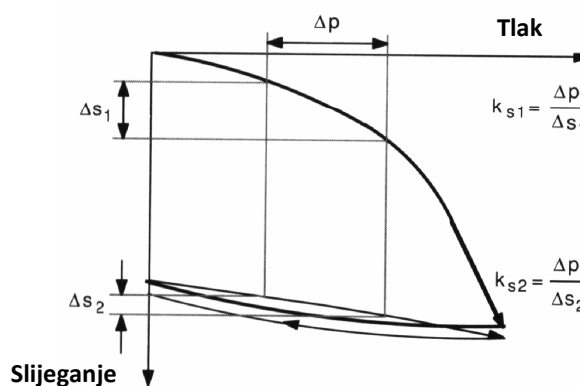
Za mjerenje vlažnosti koristi se izvor neutrona (npr. Am 241: Be). Neutroni bivaju usporeni pri nailasku na vodik, pa se na temelju broja usporenih neutrona procjenjuje vlažnost medija.

Pokus kružnom pločom daje podatke o krutosti i čvrstoći tla, a najviše se koristi u cestogradnji. Prednosti ovog pokusa su da se rezultati dobivaju vrlo brzo, te da je pogodan za razne vrste materijala. Princip i rezultat mjerenja pokazani su na slici 4.4.1-3.

(a) Shematski prikaz uređaja



(b) Rezultati mjerenja



LEGENDA: 1 - manometar, 2 - oslonac, 3 - klip, 4 - mjerenje deformacije, 5 - ploča

Slika 4.4.1-3. Pokus kružnom pločom.

Nagib krivulje zove se koeficijent reakcije podloge:

$$k_s = \frac{\Delta p}{\Delta s} \quad \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right]$$

Uz korištenje teorije elastičnosti, modul elastičnosti E može se dobiti iz poznate relacije:

$$s = \frac{I \cdot p \cdot D \cdot (1 - \nu^2) \cdot \alpha_c}{E}$$

gdje je:

p – primijenjeno naprezanje (pritisak),
 D – promjer kružne ploče,
 ν – Poissonov koeficijent,
 l – faktor oblika,
 α_c – faktor korekcije.

Faktor l ovisi o obliku temelja i njegovoj krutosti (npr. za kružni temelj iznosi $l=0,79(\pi/4)$). Koeficijent α_c ovisi o dubini ukapanja, pa je tako za $D=0$, $\alpha_c=1$.

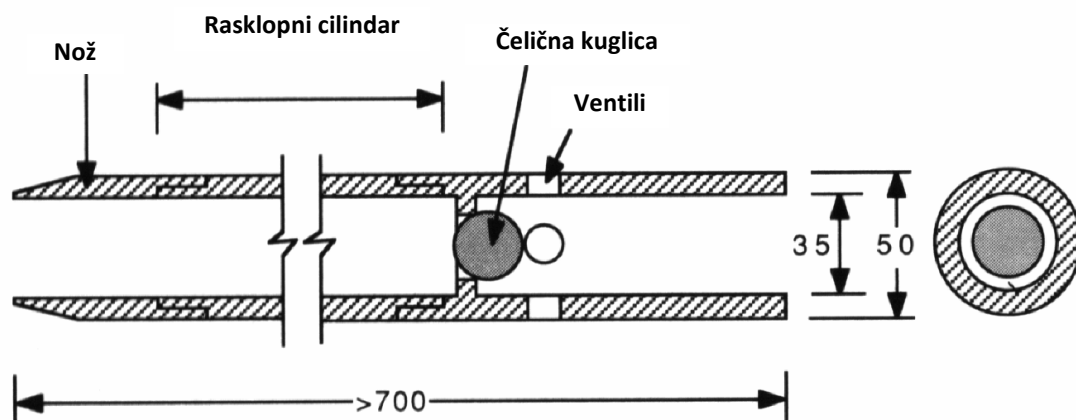
4.4.2. Metode za kontrolu uspješnosti dubokog zbijanja

Uspješnost dubokog zbijanja relativno lako se određuje već tijekom rada mjerenjem slijeganja ili utroška materijala za ispunu. Najčešće se uspješnost kontrolira pomoću: CPT, SPT, presiometrom i dilatometrom. Brzina seizmičkih valova prije i poslije zbijanja također se može koristiti, kako za određivanje poboljšanja svojstava tako i za određivanje volumena poboljšanog tla.

Dinamički standardni penetracijski pokus SPT (mjerenje broja udaraca) i statički CPT pokus (mjerenje otpora prodiranju šiljka) koriste se najčešće. Danas se preferira CPR pokus jer daje kontinuirani zapis po dubini, a može se mjeriti ne samo otpor prodiranju šiljka, nego i otpor po plaštu kao i porni pritisci. Na temelju SPT i CPT mogu se procijeniti druga svojstva: relativna gustoća, čvrstoća i deformabilnost iz korelacijskih veza.

SPP - pokus

Obzirom da se pokazalo da o relativnoj gustoći ovisi kut trenja pijeska, Terzaghi i Peck su dali ovisnost relativne gustoće o broju udaraca kako je pokazano u tablici 4.4.2-1.

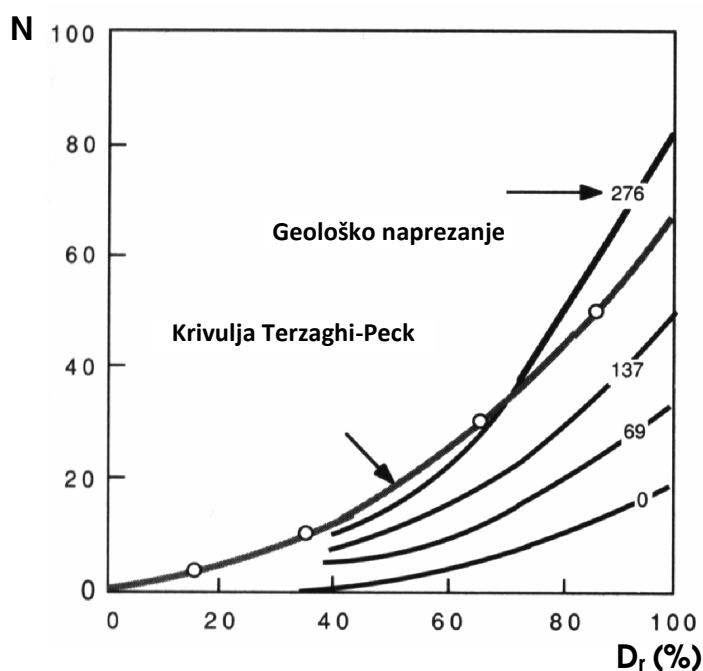


Slika 4.4.2-1. Cilindar za SPP.

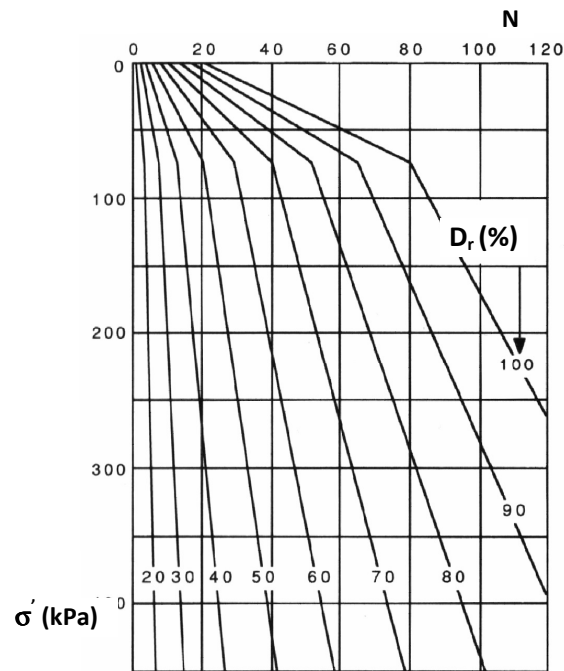
Tablica 4.4.2-1.

N – broj udaraca	Relativna gustoća
0 – 4	vrlo rahlo
4 – 10	rahlo
10 – 30	srednje zbijeno
30 – 50	zbijeno
> 50	vrlo zbijeno

Gibbs i Holtz (1957) su pokazali da rezultati penetracijskog pokusa ovise i o veličini in-situ naprezanja (slika 4.4.2-2) za pijeske. Bazaraa je 1967. dao nešto drugačiju ovisnost navedenih veličina (slika 4.4.2-3) tj. manje vrijednosti relativne gustoće za iste uvjete, a kao posljedicu toga manju čvrstoću i veću deformabilnost. Mišljenje je da se ovisnost koju su dali Gibbs i Holtz može primijeniti za normalno konsolidirana tla dok su rezultati Bazaraa primjenjivi za prekonsolidirana tla.



4.4.2-2. Ovisnost broja udaraca N o relativnoj gustoći i geološkom naprezanju.

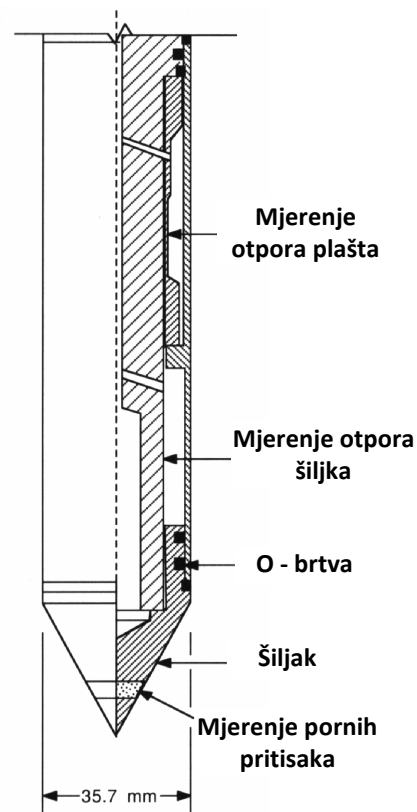


4.4.2-3. Ovisnost broja udaraca N o relativnoj gustoći i geološkom naprezanju.

CPT – pokus

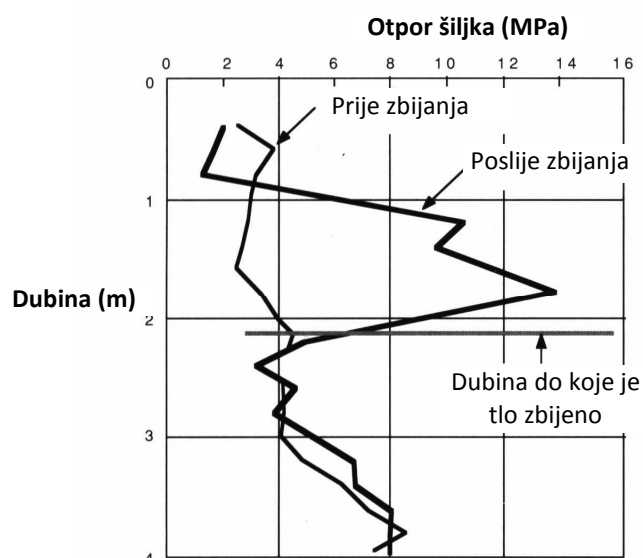
Za procjenu uspješnosti zbijanja koristi se otpor na vrhu, a također i sljedeći omjer:

$$F_R = \frac{\text{otpor na plaštu}}{\text{otpor na vrhu}}$$

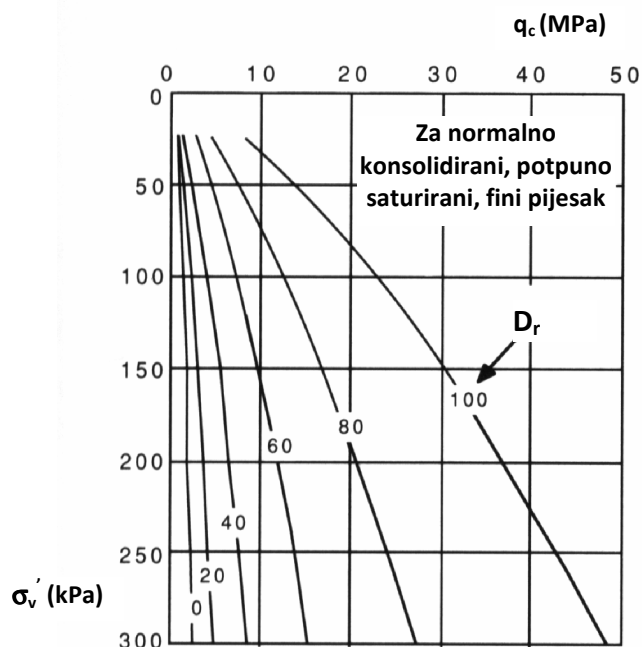


Slika 4.4.2-4. Cilindar za CPT.

Korištenjem CPT-a dobiva se kontinuirani zapis (slika 4.4.2-4) te se lako može odrediti dubina do koje su postignuti efekti zbijanja.



Slika 4.4.2-5. Utjecaj zbijanja postignut valjkom u finom pijesku.

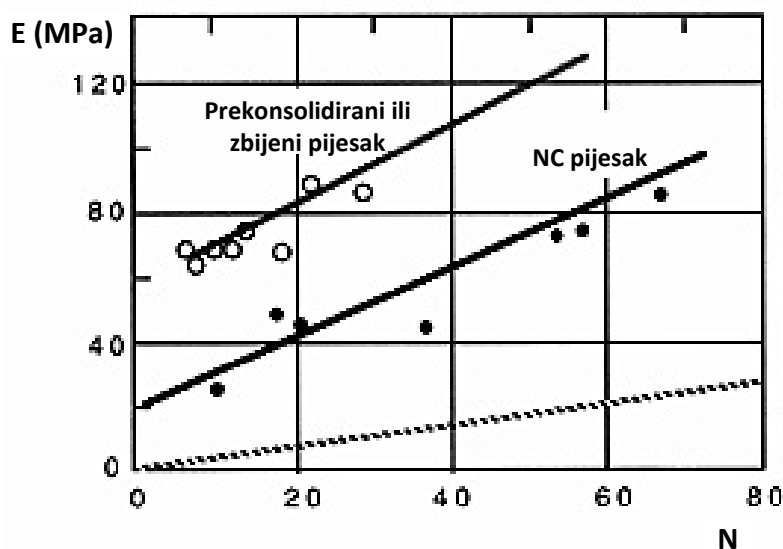


Slika 4.4.2-6. Odnos otpora šiljka i zbijenosti pijeska.

Na slici 4.4.2-6 pokazana je ovisnost relativne gustoće o otporu na vrhu, q_c , u zavisnosti od in-situ naprezanja.

Procjena kompresibilnosti na temelju penetracijskih pokusa

D'Appolonia (1970) daje korelaciju između modula elastičnosti, E i broja udaraca iz SPT-a (slika 4.4.2-7), na temelju opažanih slijeganja temelja.



Slika 4.4.2-7. Odnos modula elastičnosti i SPP-broja udaraca.

Ako se slijeganje procjenjuje (Parry, 1977) iz relacije:

$$s = \frac{0,3 \cdot q \cdot B}{N}$$

gdje je:

s – slijeganje (mm),
 B – širina temelja (m),
 q – opterećenja (kPa),
 N – broj udaraca,

onda se odgovarajući modul elastičnosti dobiva:

$$E = 2,8 \cdot N, \text{ (MPa).}$$

Schmertmann (1978) daje ovisnost modula elastičnosti NC pijeska o otporu na vrhu CPT-a:

$$E = 2,5 \cdot q_c \quad \text{za } L/B = 1 - 2$$

$$E = 3,5 \cdot q_c \quad \text{za } L/B > 10$$

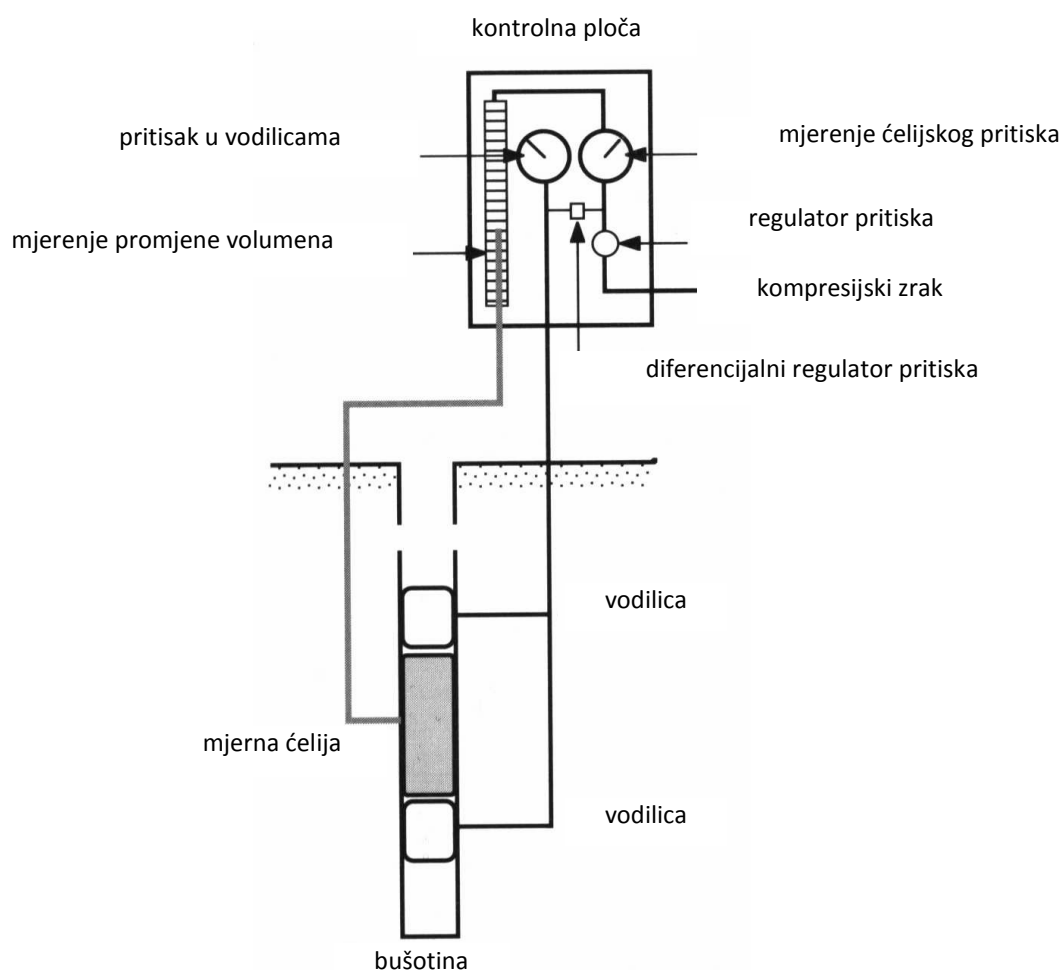
gdje je:

L – duljina temelja,
B – širina temelja.

Presiometar

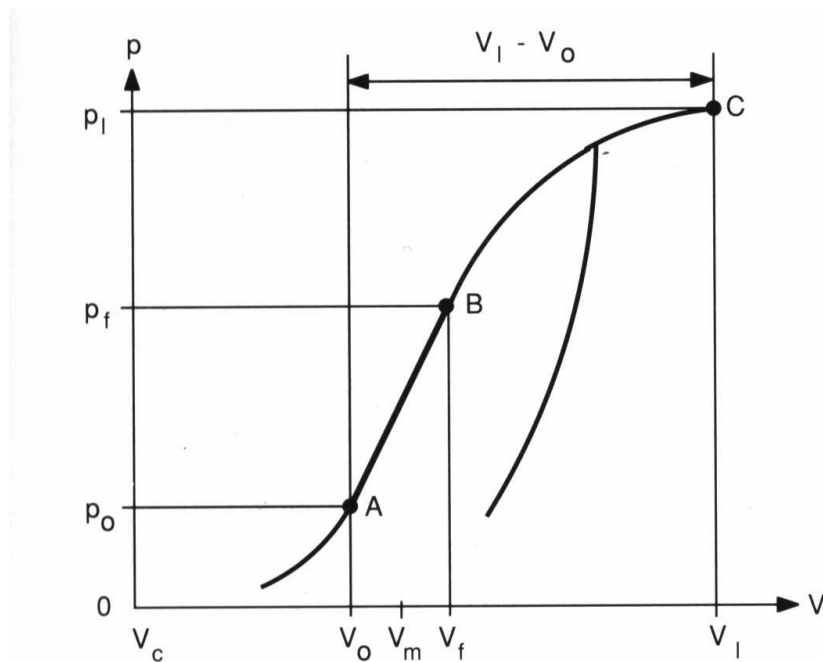
Pokus se provodi u bušotini tako da se nanosi tlačno opterećenje a mjere se deformacije. Analizom rezultata mogu se dobiti podaci o čvrstoći i deformabilnosti tla te o in-situ stanju naprezanja.

Danas se uglavnom koristi Menard-ov presiometar (slika 4.4.2-8).



Slika 4.4.2-8. Menard-ov presiometar

Tipični izgled dobivenih rezultata pokazan je na slici 4.4.2-9.



p – tlak na tlo, V – volumen vode u sustavu za mjerenje, V_c – volumen mjerne ćelije, AB – elastično područje, V_0 – početni volumen u bušotini, p_0 – tlak na početku elastičnog područja, jednak je in-situ naprezanju, V_f – volumen na kraju elastičnog područja, p_f – tlak puzanja, V_m – volumen na sredini elastičnog područja, C – slom tla, p_l – granični tlak pri slomu tla.

Slika 4.4.2-9. Presiometarska krivulja

Modul elastičnosti dobiva se iz relacije:

$$E = (1 + \nu) \cdot 2 \cdot V_m \cdot \frac{p_f - p_0}{V_f - V_0} = K_e \cdot \frac{p_f - p_0}{V_f - V_0}$$

gdje je:

ν – Poissonov koeficijent (1/3 preporuka Mennard),
 K_e – konstanta opreme.

Dilatometar

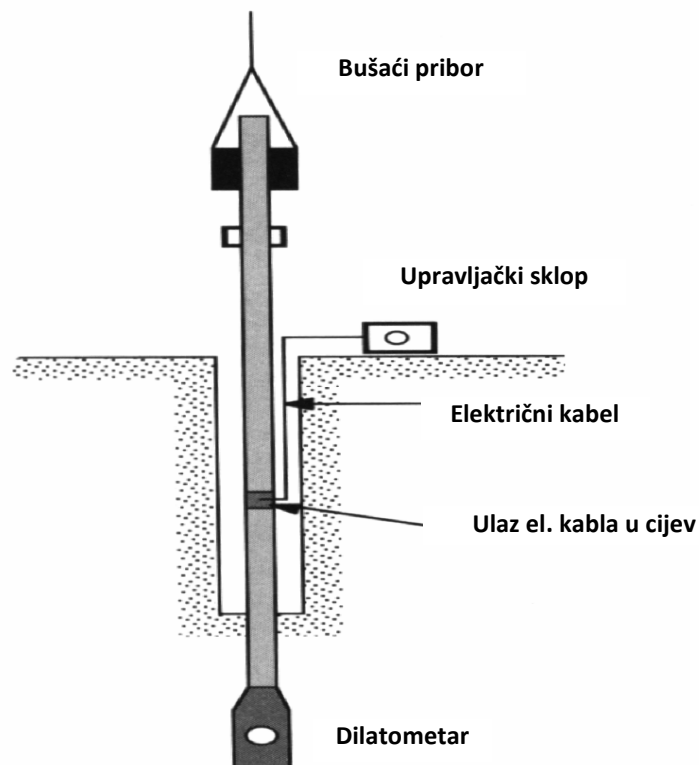
Ovaj uređaj razvijen je u Italiji te je poznat pod nazivom Marchetti-jev dilatometar (slika 4.4.2-9). Sastoji se od čeličnog noža debljine 14 mm, koji s jedne strane u sredini ima ekspanzivnu membranu promjera $D=60$ mm. Uređaj se utiskuje u tlo na dnu bušotine brzinom 20 – 40 mm/s. Nakon toga nameće se tlak u membranu, te se bilježi početni tlak p_0 i tlak p_1 pri pomaku središta membrane za $s_0=1$ mm.

Modul elastičnosti dobiva se iz izraza:

$$E_D = \frac{E}{1-\nu} = \frac{2 \cdot D}{s_0} \cdot \Delta p$$

tj. uz $D=60$ mm i $s_0=1$ mm dobiva se:

$$E_D = 32,2 \cdot \Delta p$$



Slika 4.4.2-9. Marchetti-jev dilatometar.

Seizmička ispitivanja

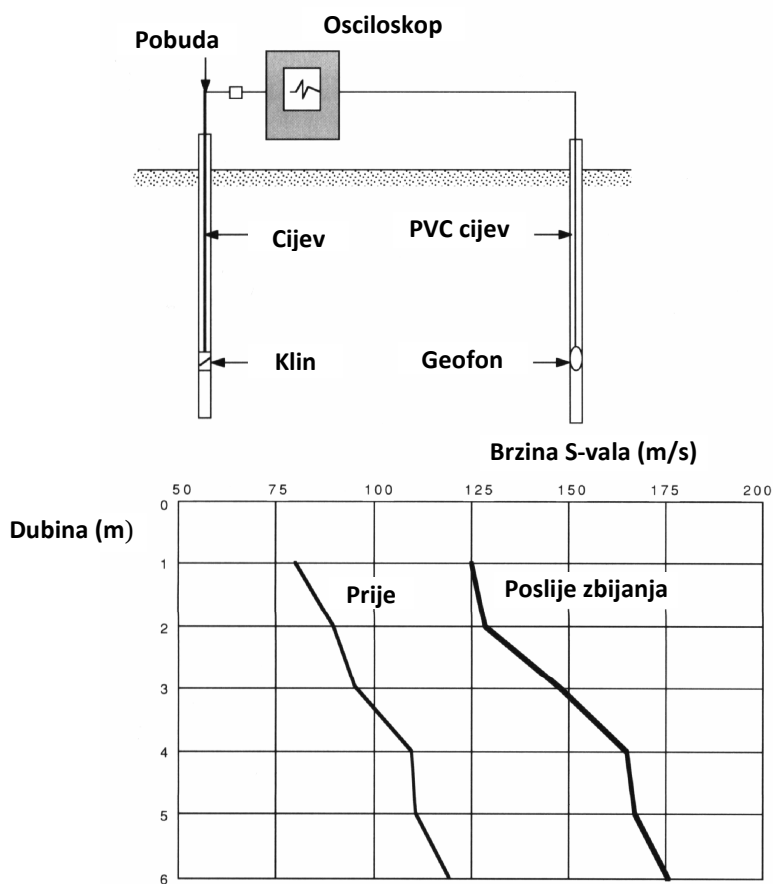
Brzina širenja seizmičkih valova može također ukazati na uspješnost zbijanja tla. Koristi se mjerenje u bušotinama (slika 4.4.2-10).

Modul smicanja u zavisnosti od brzine S-vala C_s i gustoće materijala definiran je relacijom:

$$G_{\max} = C_s^2 \cdot \gamma$$

Uz pretpostavljenu vrijednost Poissonovog koeficijenta od 0,3, ostale konstante elastičnosti dobivaju se iz izraza:

$$M = 3,5 \cdot G = 1,34 \cdot E$$



Slika 4.4.2-10. Seizmičko ispitivanje.

Tipični rezultati prije i poslije zbijanja pijeska pokazani su također na slici 4.4.2-10.

5. HIDRAULIČKO POBOLJŠANJE

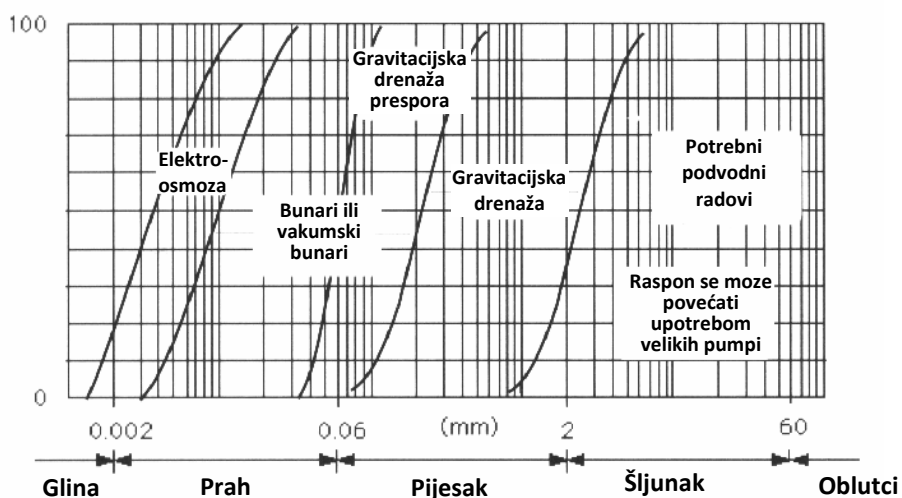
Poznato je da voda ima značajan utjecaj na stabilnost raznih građevina načinjenih u tlu ili od tla. Promjene porinih pritisaka uzrokuju promjenu efektivnih naprezanja u tlu, te kao posljedicu toga promjenu čvrstoće i stabilnosti. Metodama hidrauličkog poboljšanja obuhvaća se snižavanje RPV, preusmjeravanje toka vode ili smanjenje vlažnosti materijala. U krupnozrnatim materijalima snižavanje RPV postiže se gravitacijskom drenažom uz korištenje drenažnih jama, kanala i bunara. U sitnozrnatim tlima gravitacijska drenaža je prespora i neefikasna, pa se kombinira snižavanje RPV s prethodnom konsolidacijom uzrokovanom opterećenjem ili elektroosmozom. U novije vrijeme dreniranje se provodi i upotrebom geotekstila i drugih geosintetika. Osim tradicionalno prihvaćenih metoda dreniranja, za kontrolu utjecaja vode koriste se i drugi inženjerski zahvati kao npr. dijafragme, zagatne stijene, geomembrane.

Dreniranje se provodi radi:

- ✚ omogućavanja izrade objekata (temelj, brana, tunel) u suhom prostoru,
- ✚ stabilizaciju prirodnih i umjetnih kosina,
- ✚ smanjenje pritisaka na potporne konstrukcije,
- ✚ smanjenja stišljivosti tala,
- ✚ povećanja nosivosti temelja,
- ✚ sprečavanja likvefakcije,
- ✚ sprečavanja erozije (piping),
- ✚ sprečavanja ili umanjivanja utjecaja smrzavanja tla.

Treba voditi računa da li će sniženje RPV uzrokovati slijeganja koja su možda nepoželjna za okolne objekte.

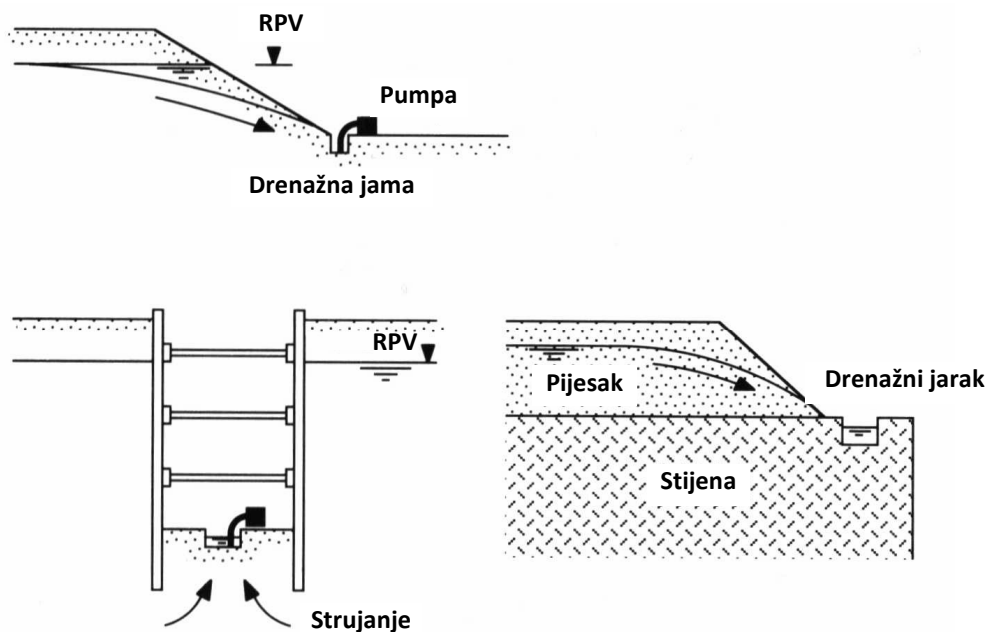
Primjenjivost nekih metoda hidrauličkog poboljšanja ovisi o vrsti tla tj. njegovom granulometrijskom sastavu (slika 5.1).



Slika 5.1. Primjenjivost metoda hidrauličkog poboljšanja.

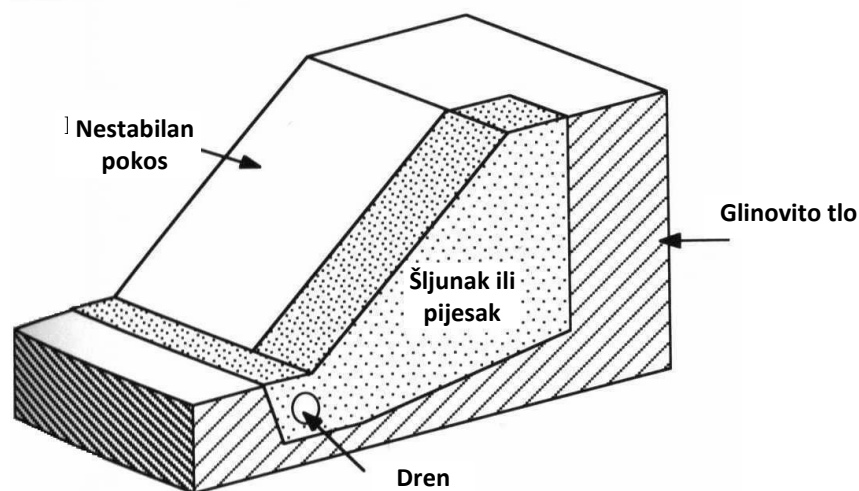
5.1. Drenažni jame i kanali

Snižavanje RPV pomoću kanala i drenažnih jama pokazano je na slici 5.1-1. To je najjednostavniji i najjeftiniji način dreniranja. Primjenjiv je u plićim iskopima načinjenim u dobro građuranim tlima i stijenama, te u slučaju da se ispod propusnog tla nalazi sloj nepropusnog materijala. Kod poduprtih iskopa treba paziti da ne dođe do pojave hidrauličkog sloma tla.



Slika 5.1-1. Drenažne jame i kanali.

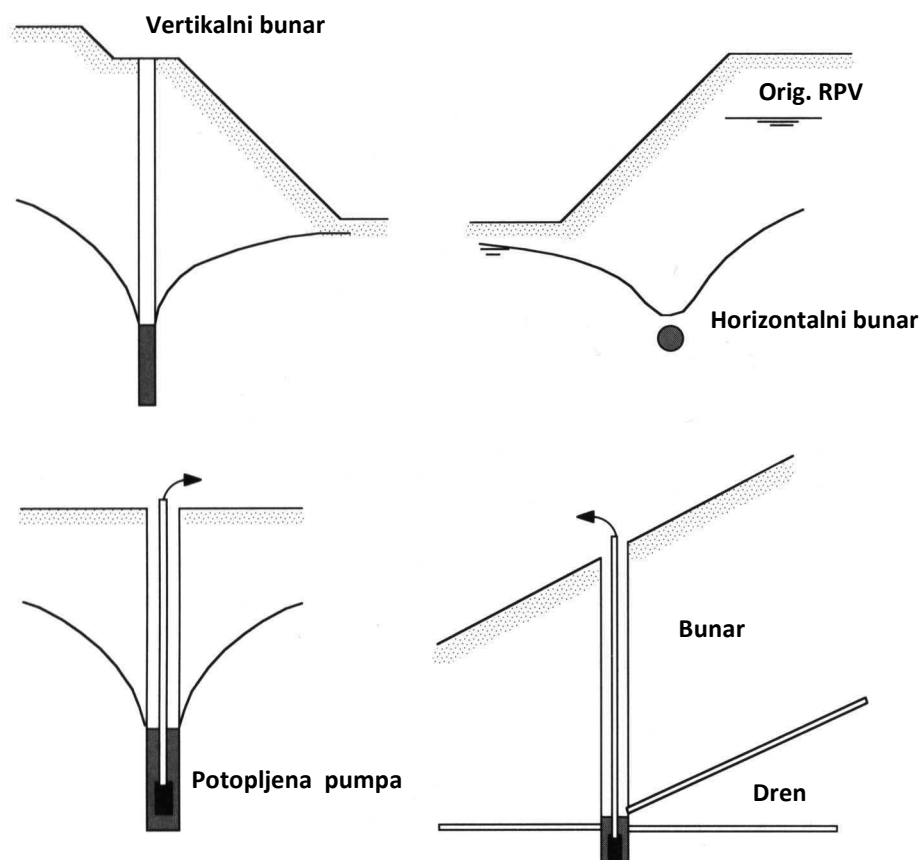
Snižavanje RPV u kosinama koje su načinjene u glinama može se ostvariti izgradnjom drena u nožici i vertikalnih drenažnih usjeka (slika 5.1-2).



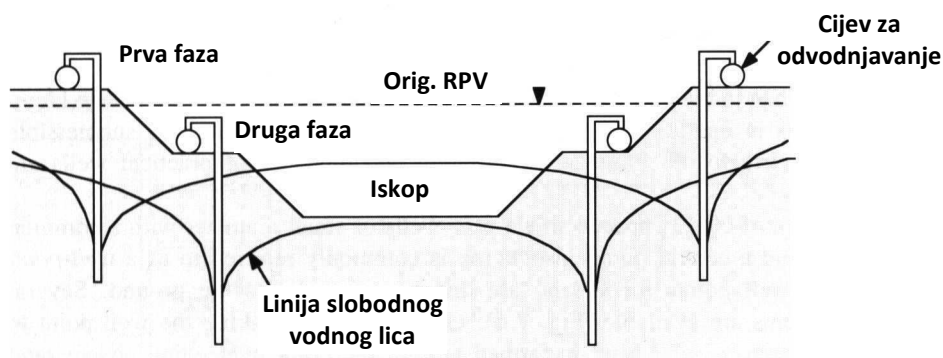
Slika 5.1-2. Dreniranje kosine.

5.2. Gravitacijski i vakuum bunari

Upotreba gravitacijskih bunara pokazana je na slici 5.2-1. Pumpanjem vode iz drenažne bušotine postiže se snižavanje RPV u njenoj okolini. Obično se linija slobodnog vodnog lica spušta najmanje 0,5 m ispod kote iskopa u šljuncima i krupnim pijescima odnosno više od 0,7 m u sitnim pijescima. Spuštanje linije slobodnog vodnog lica može se obaviti i u nekoliko faza kako je pokazano na slici 5.2-2.

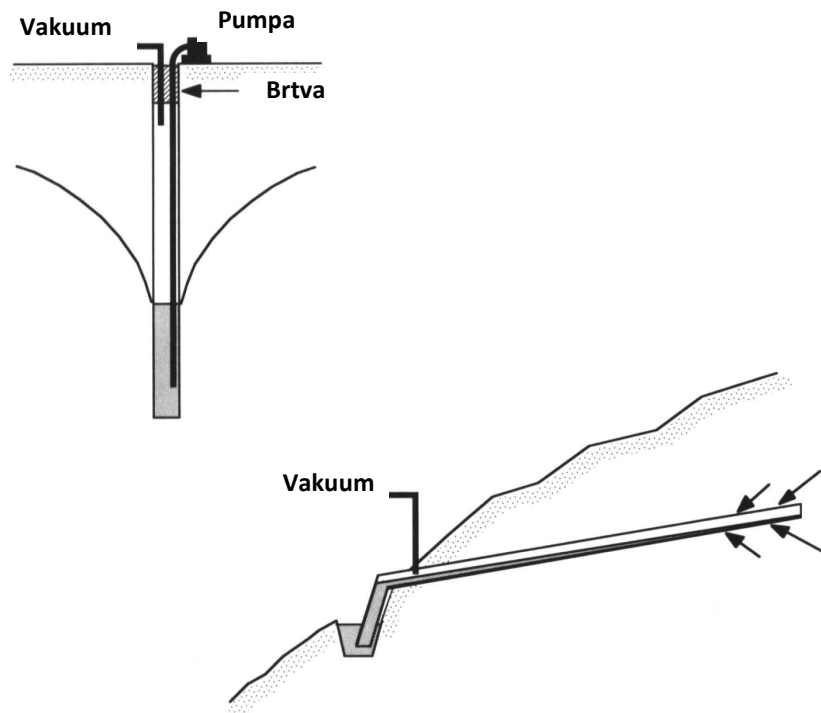


Slika 5.2-1. Vrste bunara.



Slika 5.2-2. Spuštanje RPV u nekoliko faza.

U finim pijescima i prahovima ($k = 10^{-4} - 10^{-6}$ m/s) crpljenje vode može biti otežano zbog kapilarnih sila. U tom se slučaju gravitacijski tok vode poboljšava korištenjem vakuum-bunara (slika 5.2-3). Vakuum-bunari moraju se postaviti vrlo blizu udaljeni jedan od drugoga 1 – 2,5 m, s razmakom između redova od 15 – 20 m. Bunari mogu biti vertikalno ili koso položeni.



Slika 5.2-3. Vakuum-bunari.

5.3. Geostatska naprezanja i porni pritisci

Treba se podsjetiti na princip efektivnih naprezanja, kako bi se izveli zaključci o učinku dreniranja tla:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5.1)$$

Efektivna naprezanja naročito su važna za proračune stabilnosti. Posmična čvrstoća materijala ovisi o efektivnim napreznjima, pa ukoliko dolazi do povećanja pornih pritisaka bez povećanja totalnih naprezanja, zbog dodatnih opterećenja ili toka vode u tlu, čvrstoća će se smanjiti, barem neko vrijeme. U tom slučaju dreniranje će imati pozitivan utjecaj. No, uslijed dreniranja tla, može doći do slijeganja tla, pa to može imati negativan utjecaj na susjedne objekte.

5.4. Količina vode koja se može izdrenirati

Omjer između količine vode koja se može gravitacijski izdrenirati iz elementa tla prema njegovom ukupnom volumenu zove se koeficijent skladištenja ili specifično otpuštanje. Raspon tipičnih vrijednosti koeficijenta skladištenja za pijesak i šljunak su 0,2 – 0,3.

Količina vode koja se zadrži u elementu tla naziva se specifična retencija.

5.5. Određivanje koeficijenta propusnosti

Količina vode koja se može izdrenirati iz elementa tla ovisi o koeficijentu propusnosti. U tlima s koeficijentom propusnosti 0,0001 – 0,01 m/s (šljunci, pijesci) postižu se najbolji učinci dreniranja. Pouzdano poznavanje koeficijenta propusnosti bitno je za projektiranje drenažnih bunara i odabir pumpi za crpljenje vode.

Svojstva tla koja značajno utječu na njegovu propusnost su:

- ✧ veličina zrne,
- ✧ koeficijent pora,
- ✧ mineraloški sastav,
- ✧ struktura, i
- ✧ stupanj zasićenosti.

Za krupnozrnata tla propusnost je bitno određena koeficijentom pora, dok je kod sitnozrnatih tala značaj mineraloškog sastava i strukture naglašeniji.

Obzirom da nije jednostavno dobiti reprezentativne uzorke nekoherentnih tala, preporučuje se terensko određivanje njihove propusnosti. U nedostatku takvih podataka, mogu se koristiti empirijske formule, temeljene na analizi granulometrijskog sastava tla.

Tako je poznat izraz kojeg je dao Hazen (1892):

$$k = 100 \cdot D_{10}^2 \quad [\text{cm/s}] \quad (5.2)$$

Općenitije, navedeni izraz koristi se u sljedećem obliku:

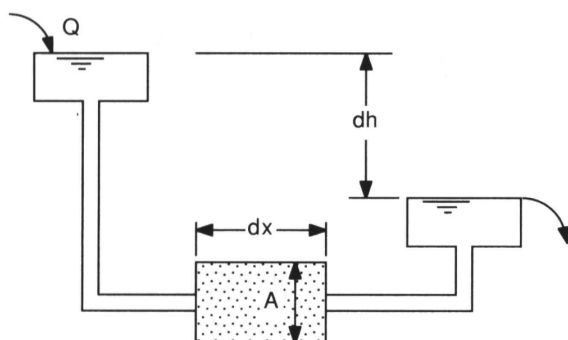
$$k = C \cdot D_{10}^2 \quad [\text{cm/s}] \quad (5.3)$$

gdje konstanta C ovisi o koeficijentu jednoličnosti, C_u , kako je pokazano u Tablici 5.5-1 (Beyer).

Tablica 5.5-1.

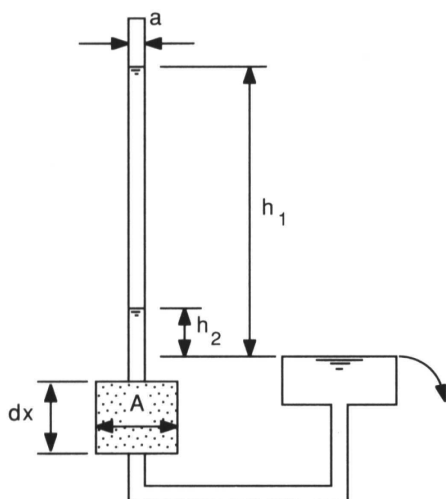
$C_u = D_{60}/D_{10}$	C
1-1,9	110
2-2,9	100
3-4,9	90
5-9,9	80
10-19,9	70
>20	60

U laboratoriju se propusnost određuje pokusima s konstantnom (slika 5.5-1) ili promjenjivom razlikom potencijala (slika 5.5.2) tj. korištenjem izraza 5.4 i 5.5.



$$k = \frac{Q \cdot dx}{A \cdot dh} \quad (5.4)$$

Slika 5.5-1. Mjerenje propusnosti s konstantnom razlikom potencijala.



$$k = \frac{a \cdot dx}{A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (5.5)$$

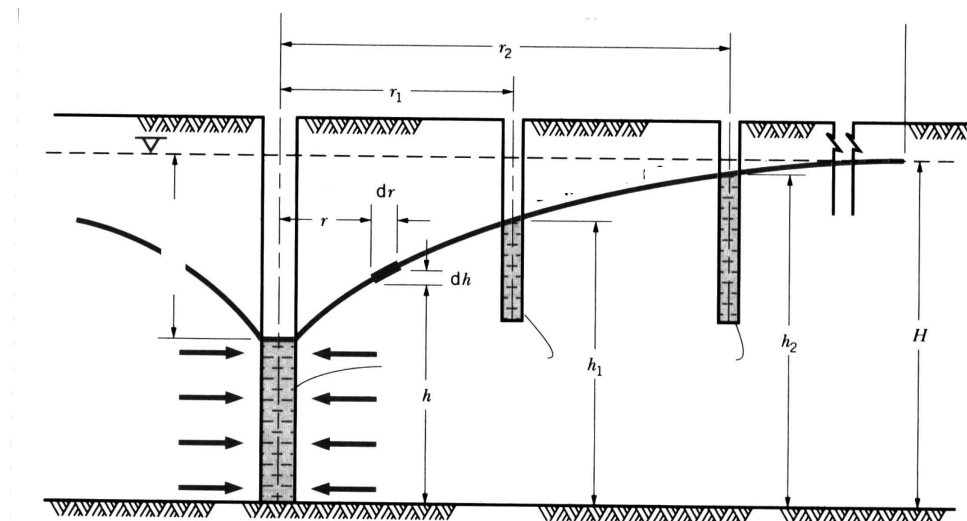
Slika 5.5-2 Mjerenje propusnosti s promjenjivom razlikom potencijala.

Terenski se propusnost određuje pokusnim crpljenjem iz bunara (slika 5.5.3). Potrebno je načiniti jedan bunar za crpljenje vode i barem dvije bušotine za određivanje piezometarskog potencijala. Za otvoreni vodonosnik koeficijent propusnosti određuje se iz izraza:

$$k = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (5.6)$$

Za zatvoreni (arteški) vodonosnik debljine m , koeficijent propusnosti određuje se iz izraza:

$$k = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot (h_2 - h_1)} \quad (5.7)$$



Slika 5.5.3. Terensko mjerenje propusnosti.

5.6. Određivanje kapaciteta bunara

Količina vode, Q_i , koja se može ispumpati iz bunara radiusa r , računa se prema izrazu:

$$Q_i = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_w \cdot k \cdot i_e,$$

gdje je:

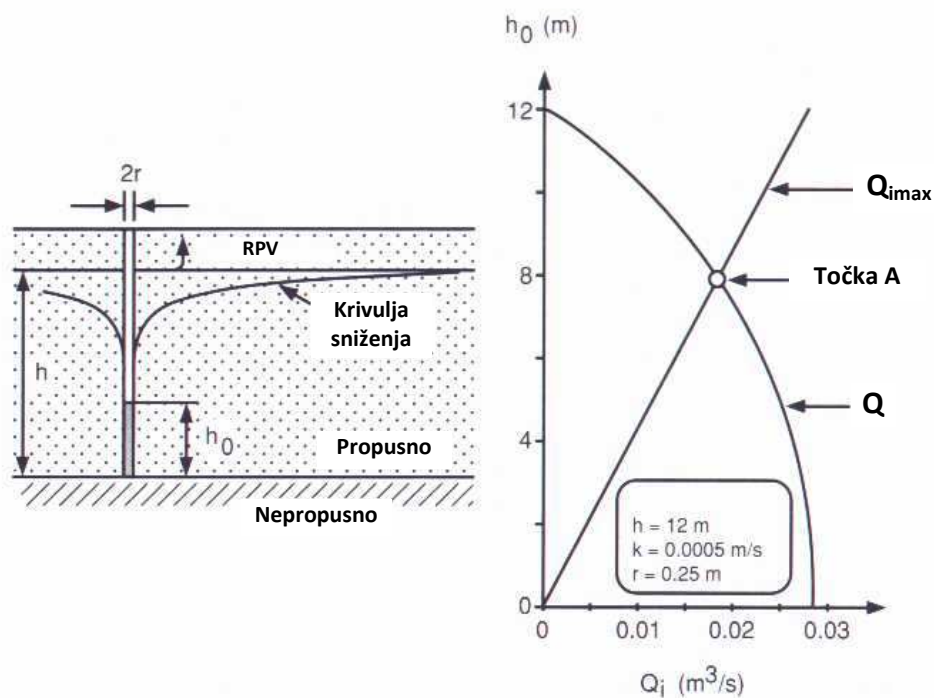
$h_w = h_0$ (slika 5.6-1),

i_e – prosječni ulazni gradijent.

Prema empirijskom izrazu (Sichardt), ulazni gradijent ne bi smio biti veći od:

$$i_{e \max} = \frac{1}{15\sqrt{k}},$$

gdje je k koeficijent propusnosti izražen u m/s.



Slika 5.6.1. Kapacitet bunara.

Prema tome, granični kapacitet pojedinačnog bunara iznosi:

$$Q_i = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_0 \cdot \frac{\sqrt{k}}{15},$$

Količina vode Q_i , prema Dupui-Thiem-ovoj metodi, dobiva se iz izraza:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (h^2 - h_w^2)}{\ln(L/r)}$$

Ako nacrtamo dijagram ovisnosti $Q_{i\max}$ o h_0 , dobiva se pravac, dok je u istom dijagramu Q predstavljen parabolom. Na presjecištu pravca i parabole (točka A) dobivaju se sljedeći podaci: poželjni minimalni nivo vode u bunaru, $h_{0\min}$, i optimalna količina crpljenja, Q_{opt} , pojedinog bunara.

5.7. Određivanje geometrijskih veličina bunara

Pod geometrijskim veličinama podrazumijevaju se promjer, dubina i razmak bunara. Za njihovo određivanje postoji niz iskustvenih podataka. Neke od njih treba uzimati s oprezom obzirom da su nastale zbog drugačijih potreba kao npr. crpljene pitke ili industrijske vode, a ne za privremeno snižavanje RPV. Osim toga, tehnologija bušenja i crpljenja stalno se usavršava. Iskustvene relacije vezane su također uz određene geografske i geološke uvjete.

Općenito govoreći, korištenjem površinskih pumpi može se voda ispušćavati do maksimalno 8 m dubine. Razmak između bunara ne bi trebao biti manji od 3 – 4 m za bunare promjera 150 mm, odnosno 5 – 6 m za bunare promjera 350 mm. Ukoliko treba brzo sniziti RPV razmak između bunara može se smanjiti na puno manje vrijednosti (do 0,2 m za šljunke i 1,5 m za fine pijeske).

Ako se koriste potopljene pumpe u dubokim bunarima, promjer i dubina odabiru se prema karakteristikama pumpe.

5.8 Postupak projektiranja bunara

Ovim postupkom definira se zahtijevana brzina pumpanja i broj bunara potrebnih da bi se postiglo poželjno sniženje RPV ispod kote iskopa. Postupak se provodi u nekoliko koraka:

Korak 1: *Gruba procjena ukupne količine vode koju treba iscrpiti.*

Prava površina iskopa zamjenjuje se kružnom iste veličine, te se koristi relacija:

$$Q_{tot} = \frac{\pi \cdot k \cdot (h^2 - y^2)}{\ln(L/a)}.$$

Veličine h , y i k određuju se iz dimenzija akvifera, zahtijevanog sniženja RPV i vrste tla. Pri tome je a radius zamjenjujuće kružne površine. On se za pravokutni iskop dimenzija $x \times y$ određuje prema:

$$a = \sqrt{\frac{x \cdot y}{\pi}}.$$

$$L = C \cdot (h - h_w) \sqrt{k} = C \cdot s \cdot \sqrt{k}.$$

$C=3000$ za bunare.

Grubo se L za razne vrste tla može procijeniti prema (Kezdi i Marko, 1969):

krupni šljunak i obluci $L = 500$ m,

krupni šljunak	$L = 100 - 150 \text{ m},$
srednji šljunak	$L = 50 \text{ m},$
pijesak	$L = 33 \text{ m},$
fini pijesak	$L = 5 - 10 \text{ m}.$

Da bi se mogao procijeniti L , mora se pretpostaviti h_0 . On se provjerava u koraku 3, te se po potrebi postupak ponavlja.

Korak 2: *Potrebni broj bunara.*

$$n = \frac{Q_{tot}}{Q_{max}}$$

Korak 3: *Provjera pretpostavljenog h_0 .*

$$Q_{tot} = \frac{\pi \cdot k \cdot (h^2 - h_0^2)}{\ln L - (1/n) \cdot \ln(x_1 \cdot x_1 \cdots x_n)}.$$

Iz ove se jednadžbe odredi h_0 , te se ponovno računaju L i Q . Koraci 1 – 3 ponavljaju se dok se ne dobije zadovoljavajuća podudarnost pretpostavljene i dobivene vrijednosti za h_0 .

Korak 4: *Povratak na originalni iskop.*

Potrebno je rasporediti n bunara po obodu iskopa. Provjeriti RPV na obodu i u sredini iskopa korištenjem izraza:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (h^2 - y^2)}{\ln L - (1/n) \cdot \ln(x_1 \cdot x_1 \cdots x_n)}.$$

Ukoliko je RPV prevelika, potrebno je povećati količinu crpljenja. Proračun se u tom slučaju ponavlja za manji h_0 i veći broj bunara.

Kapacitet pumpe procjenjuje se iz izraza:

$$N = \frac{Q \cdot h}{40} \quad (\text{kW}),$$

ako je Q u (l/s), a h u (m).

Slijeganje susjednih objekata procjenjuje se iz izraza:

$$s = \frac{H}{1+e} \cdot C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v0}},$$

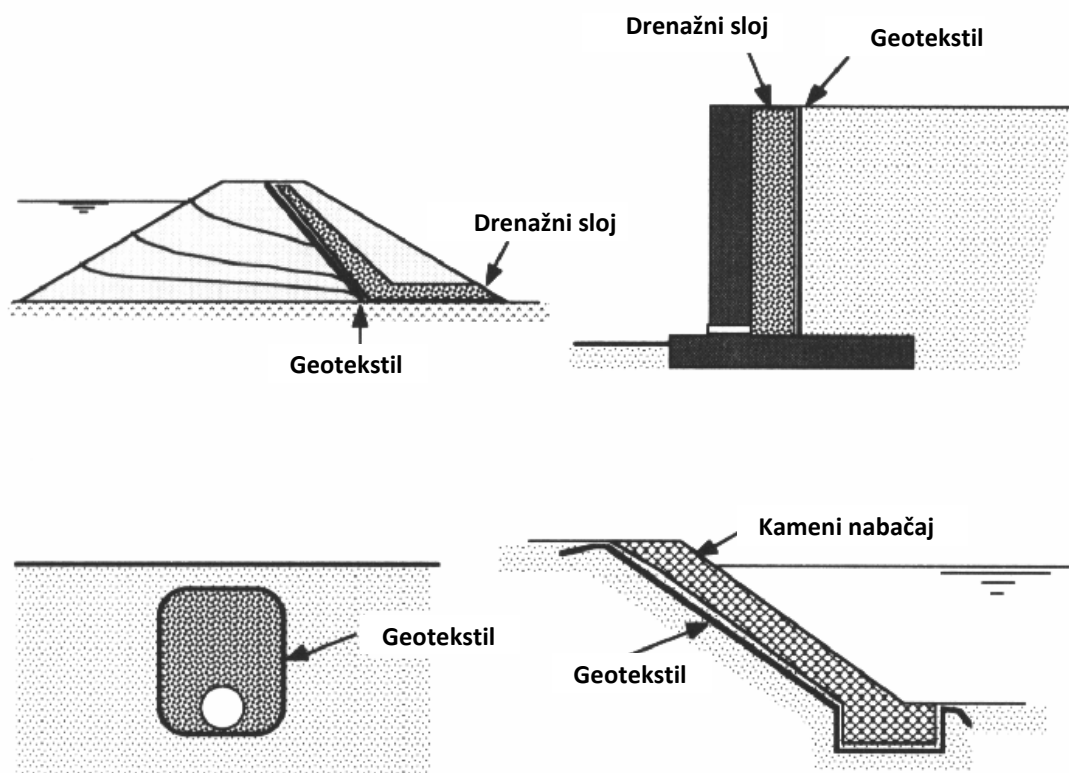
$$\Delta\sigma = \Delta h \cdot \gamma_w,$$

gdje je H debljina konsolidirajućeg sloja, s početnim koeficijentom pora e i indeksom kompresije C_c .

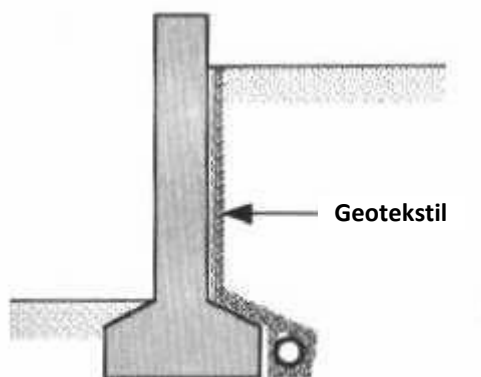
ukoliko je konsolidirajući sloj male propusnosti i velike debljine, njegova konsolidacija može biti vrlo spora tako da privremeno sniženje RPV ne mora nužno uzrokovati slijeganje susjednih objekata. Ukoliko procijenjena slijeganja mogu uzrokovati štetu na susjednim objektima, može se nametnuti potreba izgradnje vertikalne zagatne stijene kako se ne bi RPV značajno mijenjala u podzemlju tih objekata.

5.9 Dreniranje upotrebom geosintetika

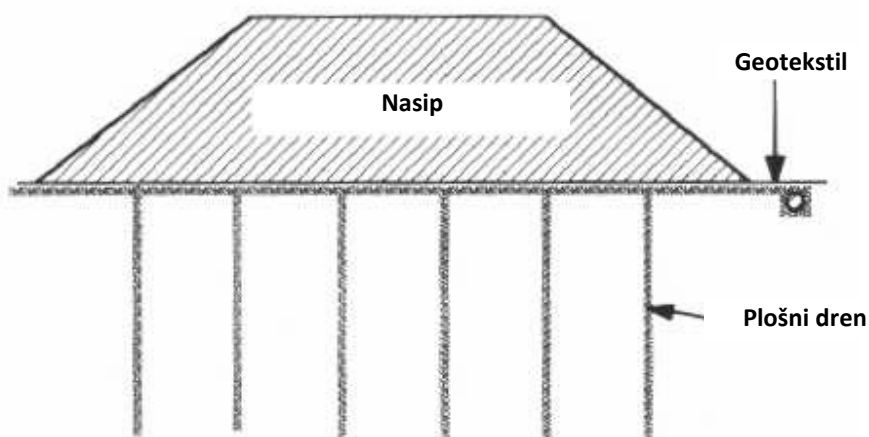
Neke vrste geosintetika (geotekstili, geokompoziti) koriste se za dreniranje. Na slikama # pokazani su neki primjeri njihove upotrebe.



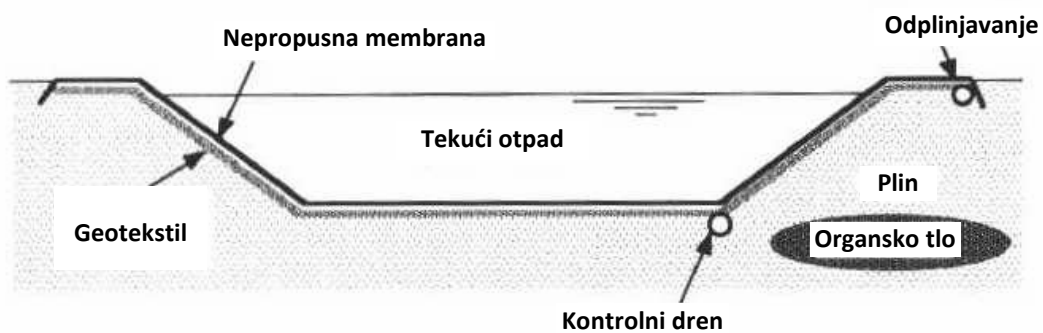
Slika 5.9.1. Upotreba geosintetika kao filtera.



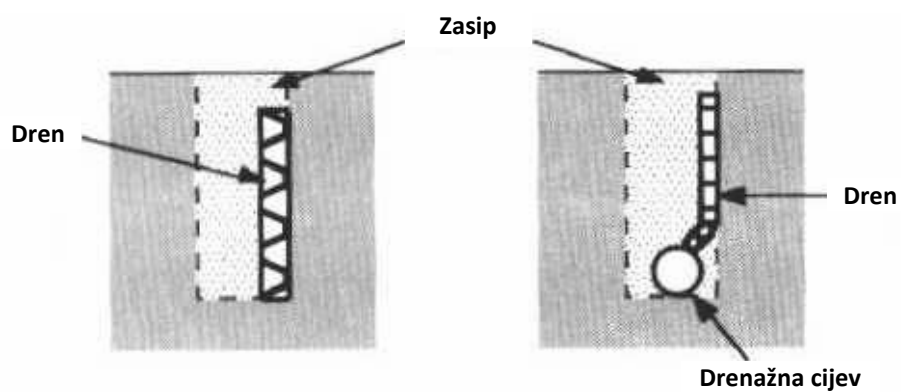
Slika 5.9.2. Vertikalna drenaža.



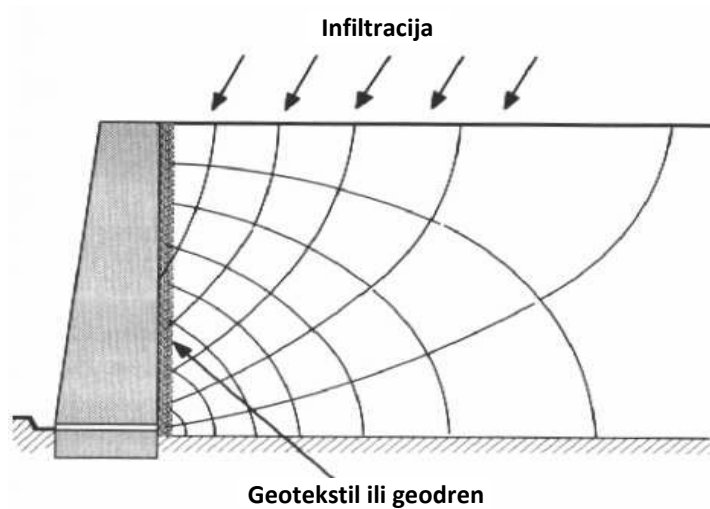
Slika 5.9.3. Horizontalno i vertikalno dreniranje nasipa.



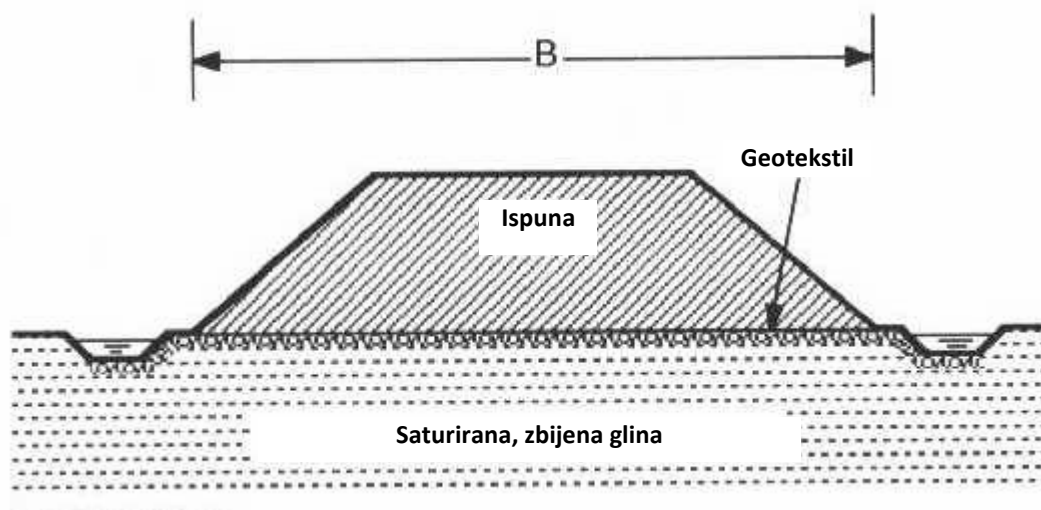
Slika 5.9.4. Geotekstil za zaštitu geomembrane.



Slika 5.9.5. Izvedba drenažnih jaraka.



Slika 5.9.6. Drenaža iza potpornog zida.



Slika 5.9.7. Drenaža zasipa

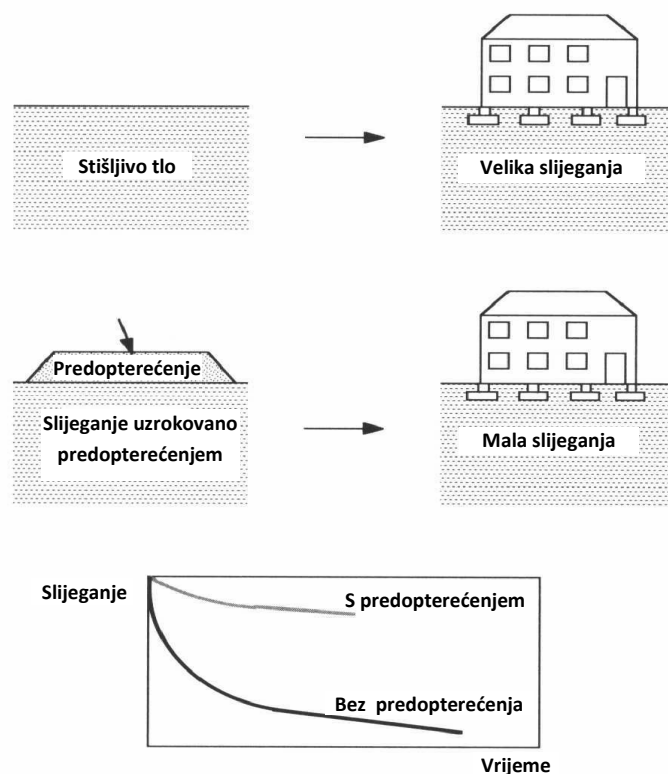
6. POBOLJŠANJE PRETHODNIM OPTEREĆENJEM

Poboljšanje tla prethodnim opterećenjem je jedna od najstarijih i najčešće korištenih metoda poboljšanja. Predopterećenjem se povećava nosivost i smanjuje stišljivost mekih tala. Kod nekoherentnih tala predopterećenje uzrokuje povećanje gustoće, dok kod koherentnih tala uzrokuje prethodnu konsolidaciju. Postiže se izgradnjom nasipa koje predstavlja privremeno opterećenje na mjestu buduće izgradnje. Prethodno opterećenje može biti jednako ili čak veće od onog kojeg će uzrokovati planirani objekt. Isti učinci mogu se osim prethodnim opterećenjem postići i snižavanjem RPV. Proces se dodatno može ubrzati izgradnjom vertikalnih drenova i horizontalnih drenažnih tepiha. Efekti predopterećenja mogući su samo u slučaju kada je ono veće od naprezanja prethodne konsolidacije. Za ubrzavanje procesa konsolidacije može se koristiti i predopterećenje vakuumom, te elektro-osmoza.

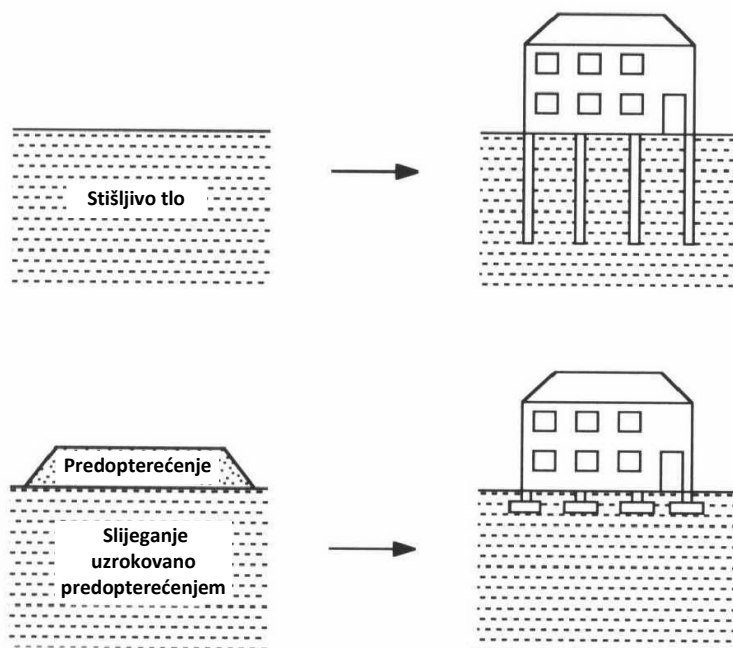
Iako je metoda primjenjiva u svim vrstama tla, najbolji rezultati postižu se u mekom, koherentnom tlu, stišljivom prahu, organskim glinama i tresetu.

Ova se metoda koristi prilikom izgradnje zgrada, nasipa, prometnica i drugih objekata sa svrhom poboljšanja temeljnog tla.

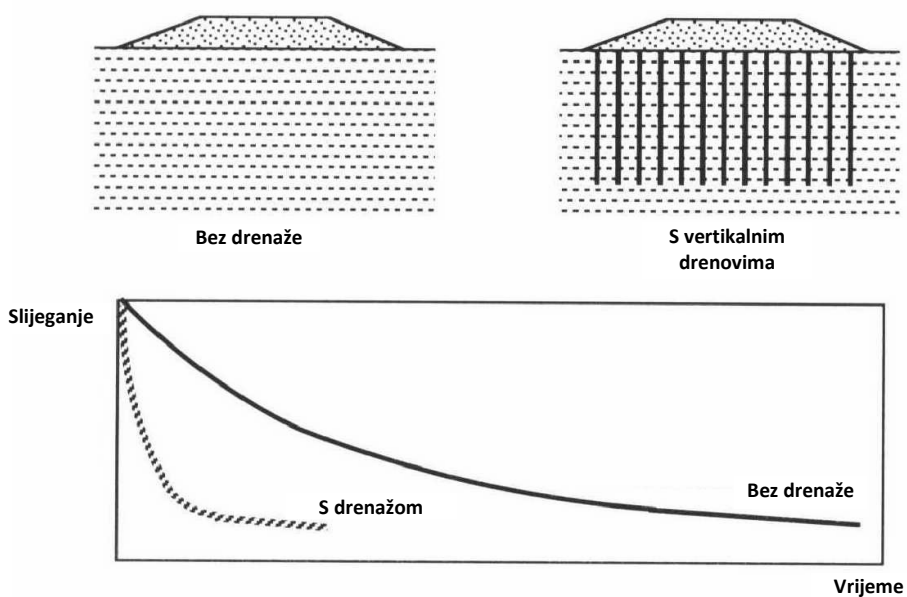
Vertikalnim drenovima ne postiže se samo ubrzanje konsolidacije, nego i povećanje čvrstoće mekih tala. Također, ugradnja vertikalnih drenova neće povećati konačnu veličinu slijeganja, nego samo ubrzati taj proces.



(a) smanjenje slijeganja



(b) smanjenje troškova temeljenja

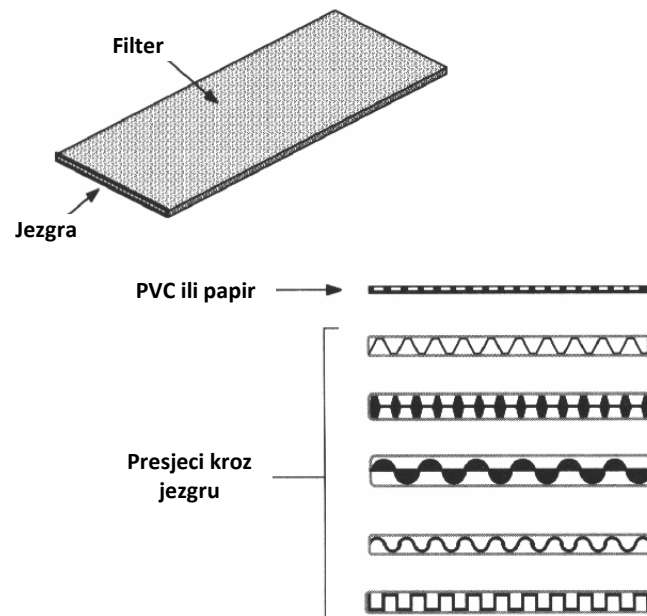


(c) ubrzavanje konsolidacije

Slika 6.1 Utjecaj predopterećenja.

Vertikalni drenovi mogu biti izgrađeni ili kao cilindrični drenovi od krupnozrnatog materijala (najčešće pijesak) ili kao geosintetički drenovi. Cilindrični drenovi obično imaju promjer od 200 - 450 mm, a postavljaju se na

udaljenosti 1,5 - 6 m. Geosintetički drenovi uglavnom su plošni iako postoje i plastične cijevi kružnog presjeka (slika 6.2).



Slika 6.2. Oblici trakastih geosintetičkih drenova.

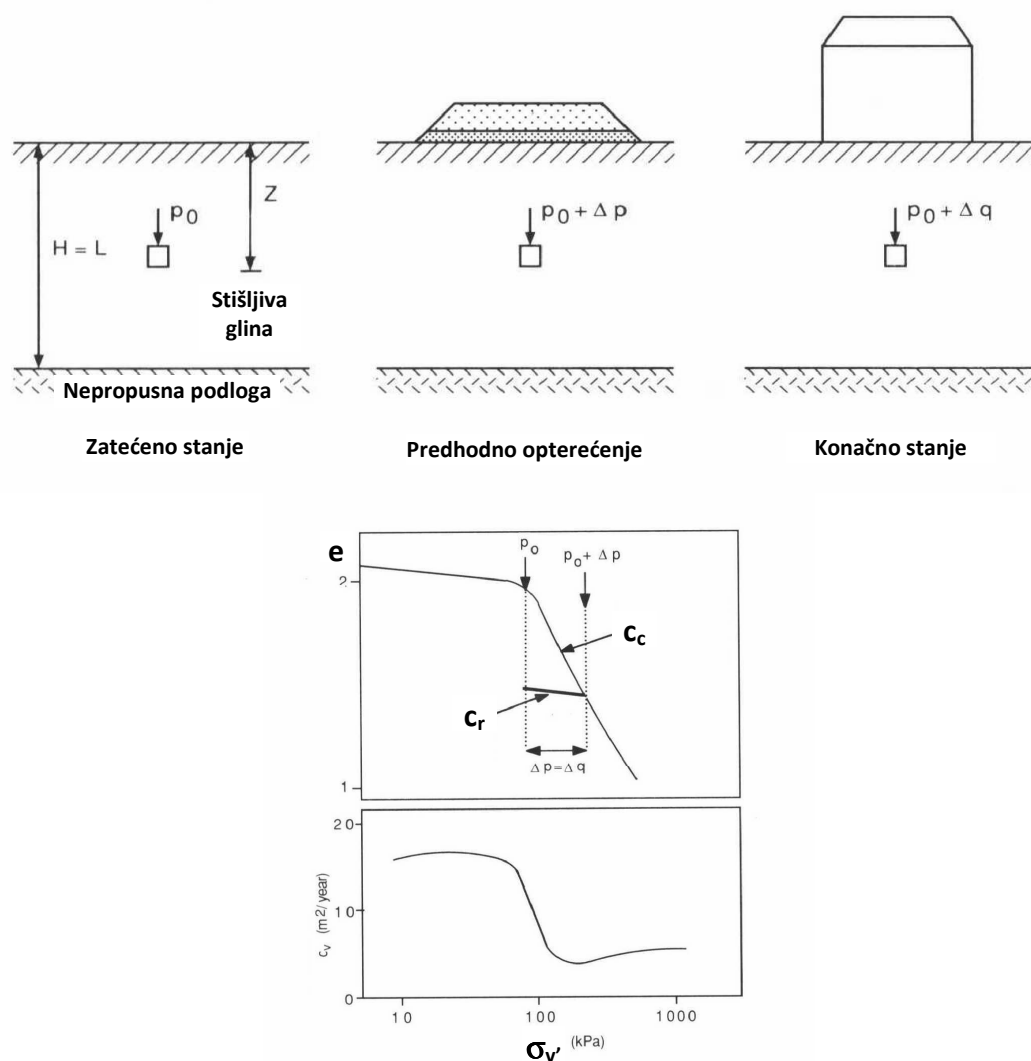
Prednosti upotrebe sintetičkih drenova su:

- ✧ jednostavna i brza ugradnja
- ✧ jednostavno se skladište i transportiraju
- ✧ strojevi za ugradnju su lakši
- ✧ povoljna cijena.

Pri projektiranju ovakvih zahvata potrebno je odrediti iznos i potrebno vrijeme trajanja dodatnog opterećenja

6.1. Prethodno opterećenje bez vertikalnih drenova

Najjednostavnija primjena metode prethodnog opterećenja sastoji se od nekoliko faza. Nakon nanošenja prethodnog opterećenja jednakog opterećenju od planiranog objekta, čeka se završetak konsolidacije (tj. oko 90%). Nakon toga, uklanja se navedeno opterećenje i započinje izgradnja objekta (slika 6.3). Na dijagramu $e - \log p$ uočavaju se promjene koje će u tlu izazvati prethodno opterećenje.



Slika 6.1-1. Utjecaj prethodnog opterećenja na koeficijent konsolidacije.

Slijeganje uslijed prethodnog opterećenja računa se iz izraza:

$$s_{po} = \frac{H}{1 + e_0} C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

gdje su:

s_{po} - slijeganje uslijed prethodnog opterećenja

H - debljina konsolidirajućeg sloja

e_0 - početni koeficijent pora

C_c - modul kompresije

p_0 - početno vertikalno naprezanje

Δp - dodatno naprezanje uslijed predopterećenja.

Nakon uklanjanja prethodnog opterećenja i izgradnje objekta, slijeganje uzrokovano objektom znatno je manje i iznosi:

$$s_o = \frac{H}{1 + e_0} C_r \log \frac{p_0 + \Delta q}{p_0}$$

gdje su:

s_o - slijeganje uslijed opterećenja od objekta

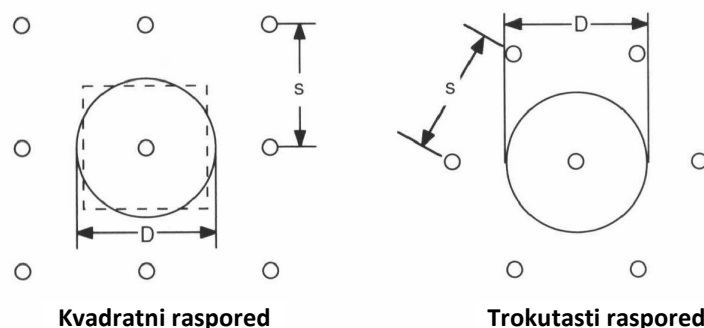
C_r - modul rempresije

Δq - dodatno naprezanje od objekta.

Za uspješno provođenje ove metode, osim poznavanja naprezanja prethodne konsolidacije, potrebno je znati i nosivost temeljnog tla, kako ne bi dodatnim opterećenjem izazvali pojavu sloma u tlu.

6.2. Prethodno opterećenje potpomognuto vertikalnim drenovima

Proces slijeganja tla uslijed vertikalnog dodatnog opterećenja može se ubrzati izgradnjom vertikalnih drenova. Pri tome se proračuni provode uz korištenje tzv. Renduliceve teorije radijalne konsolidacije (Hausmann, 1990). Vertikalni drenovi mogu se rasporediti na razne načine, a na slici 6.4. pokazana su dva najčešće korištena rasporeda.



Slika 6.2-2. prostorni raspored drenova.

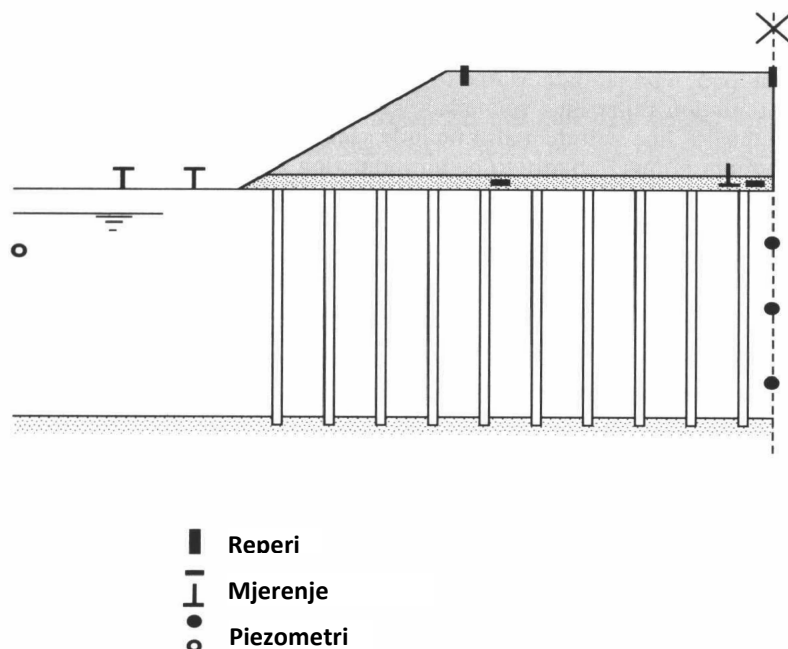
6.3. Određivanje projektnih parametara

Projektiranje poboljšanja prethodnim opterećenjem zahtijeva detaljna terenska ispitivanja bušenjem i penetracijskim pokusima, te uzorkovanje tla i laboratorijska ispitivanja. Posebno treba poznavati sljedeće:

- ✧ slojevitost tj. prisutnost jače propusnih proslojaka
- ✧ uvjete dreniranja (jednostrano - dvostrano)
- ✧ propusnost i stišljivost u horizontalnom i vertikalnom smjeru
- ✧ čvrstoću i deformabilnost tla.

6.4. Kontrola uspješnosti metodom predopterećenja

Kako bismo utvrdili uspješnost ove metode poboljšanja tla obično se prate slijeganje nasipa i temeljnog tla te piezometarski nivo vode (slika 6.5). Slijeganja se opažaju u određenim vremenskim intervalima npr. jednom tjedno ili mjesečno.

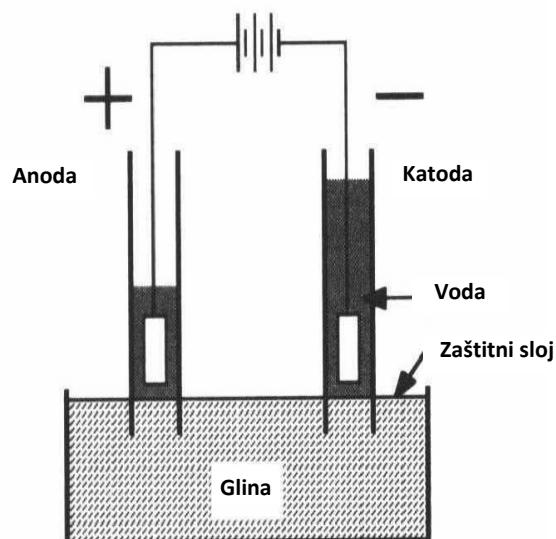


Slika 6.4-1. Kontrolna mjerenja.

6.5. Elektro-osmoza

Elektro-osmoza je još jedna od tehnika kojom se može uspješno odvoditi voda iz tla i uzrokovati prethodno slijeganje. U sitnozrnatim tlima u kojima se stvori električno polje, voda će se pokretati prema katodi. Odvođenje vode iz tla u blizini katode uzrokuje konsolidaciju tla, te kao posljedicu toga povećanje čvrstoće i smanjenje stišljivosti. Metoda se može nadopuniti injektiranjem tla određenim aditivima. Također, kemijske reakcije u blizini elektroda mogu uzrokovati dodatno povećanje čvrstoće. Ova metoda može se prema tome svrstati kako u hidrauličke tako i u fizičko-kemijske metode poboljšanja.

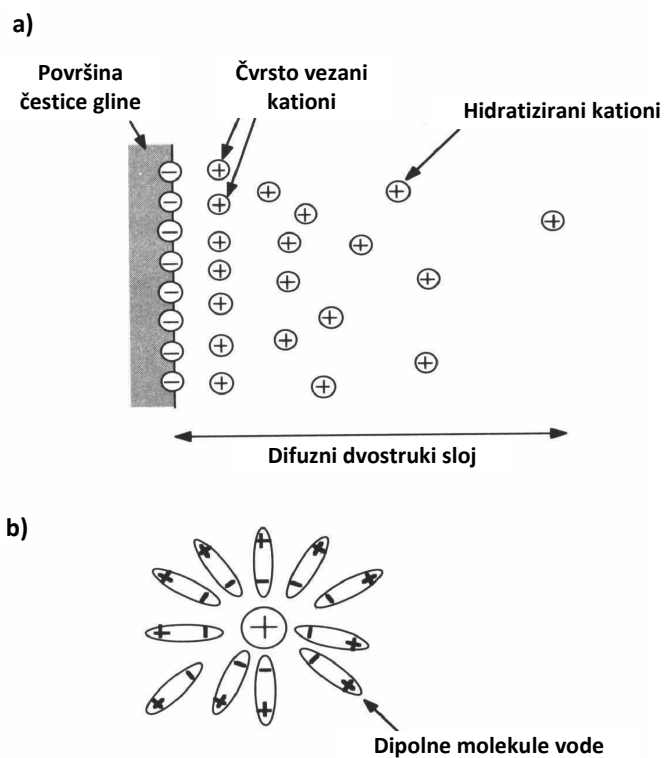
Metodu je patentirao Leo Casagrande još 1935. godine u Njemačkoj. No, još ranije Reuss (1809, Rusija) je zamijetio kretanje vode kroz tlo pod utjecajem električnog polja. Njegov pokus pokazan je na slici 6.5-1. Dvije staklene cjevčice utisnute su u glinu. Stvaranjem električnog potencijala u glini, primjećeno je kretanje vode prema katodi, gdje se razina vode podigla u cjevčici. Objašnjenje ove pojave nalazi se u elektrokemijskoj prirodi površine čestica tla i porne vode, a teoretske osnove u teoriji dvostrukog sloja (slika 6.5-2).



Slika 6.5-1. Shematski prikaz Reuss-ovog pokusa.

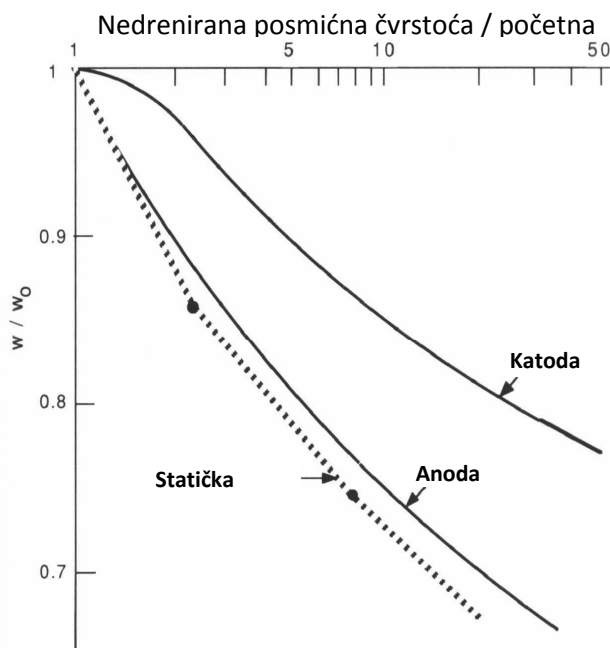
Metoda se uspješno primjenjuje ukoliko su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

1. saturirani prah ili prašnasta glina
2. normalno konsolidirano tlo
3. mala koncentracija elektrolita (soli).



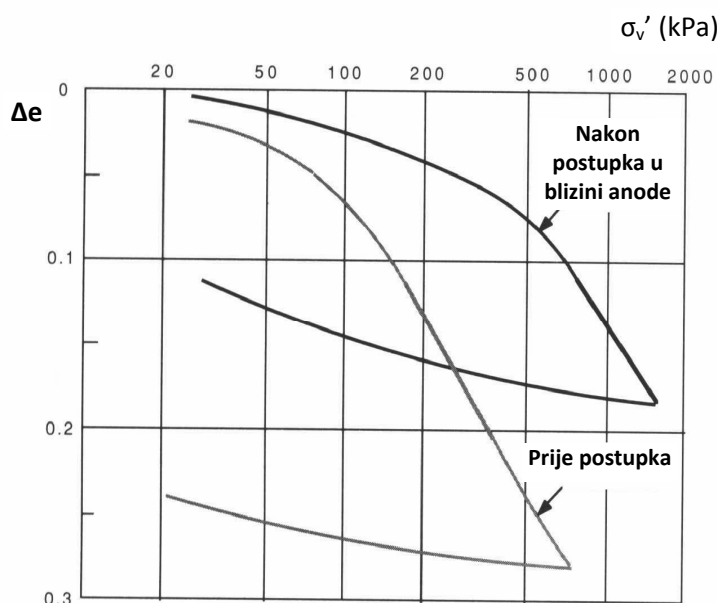
Slika 6.5-2. Električni dvostruki sloj (a) i hidratacija kationa (b).

Slika 6.5-3 pokazuje povećanje nedrenirane posmične čvrstoće uzrokovano statičkom konsolidacijom te elektro-osmozom. Uočava se najveće povećanje čvrstoće uz katodu.



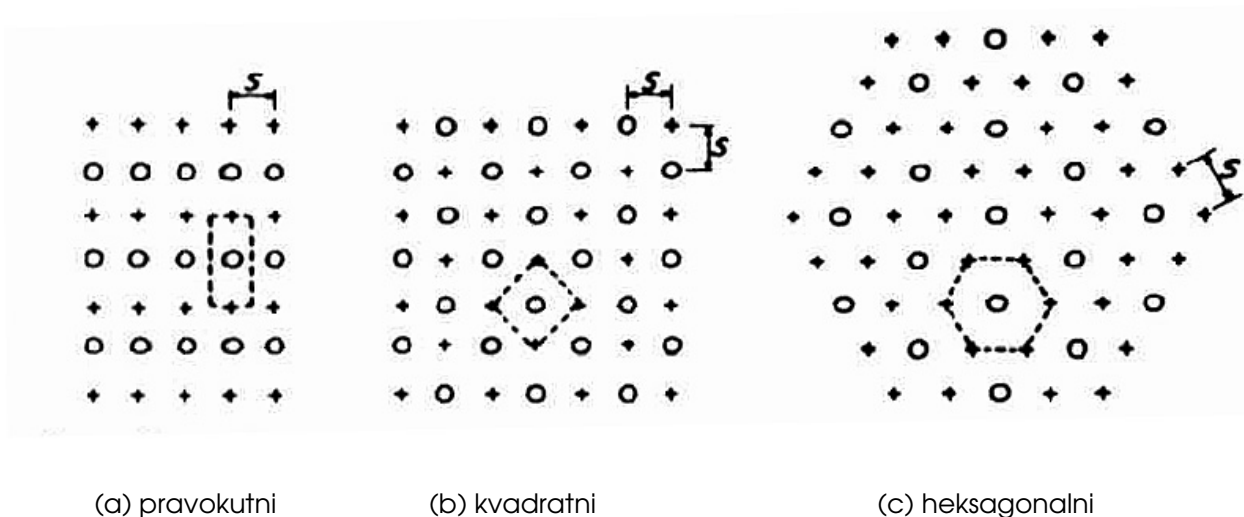
Slika 6.5-3. Odnos vlažnosti i čvrstoće kod elektro-osmoze i statičke konsolidacije.

Na slici 6.5-4 pokazani su rezultati edometarskog pokusa na dva uzorka tla od kojih je prvi u prirodnom stanju, dok je drugi bio podvrgnut elektro-osmozi tijekom 40 sati. Uočava se povećanje krutosti i opterećenja prethodne konsolidacije kao posljedice elektro-osmoze.



Slika 6.5-4. utjecaj elektro-osmoze na konsolidacijske karakteristike.

Prostorno se katode i anode mogu rasporediti na razne načine (slika 6.5-5). Elektrode obično imaju duljinu od 2 - 15 m, a ugrađuju se s razmakom unutar redova od oko 1 m, te razmakom između redova anoda i katoda od 2 - 5 m. Prema nekim istraživanjima najbolji rezultati postižu se uz korištenje heksagonalnog rasporeda elektroda.



Slika 6.5-5. Prostorni raspored elektroda.

Uobičajeni parametri u primjeni su sljedeći:

napon:	50 - 100 V
jakost struje:	20 - 200 A
potrošnja energije:	30 kWh/m

Metoda se obično koristi za rješavanje sljedećih problema:

1. povećanje čvrstoće senzitivnih glina prije iskopa

As - Norveška

Ulazni podaci:

volumen tretiranog tla:	2000 m ³
duljina tretmana:	120 dana
broj elektroda:	186 (Φ 19 mm, duljina 10 m)
razmak redova:	2 m
napon:	40 V

Postignuti efekti:

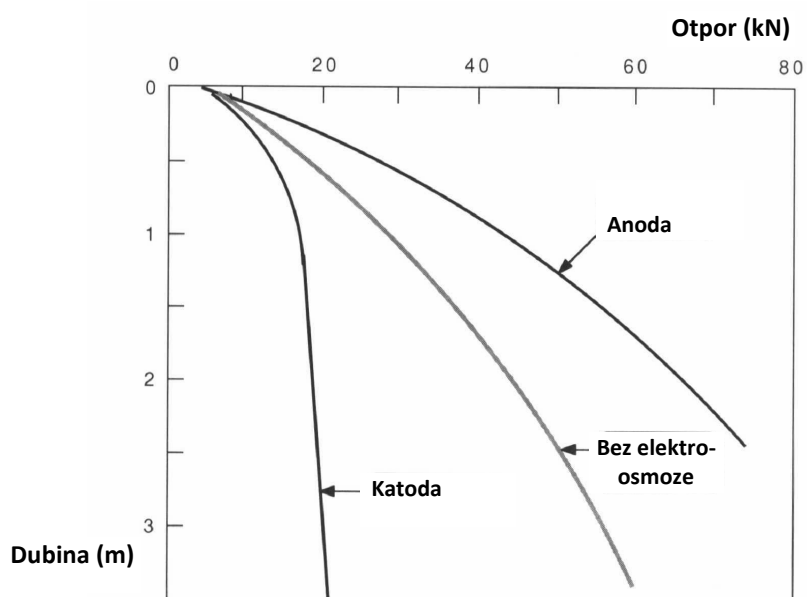
povećanje S_u :	10 → 60 kPa
slijeganje:	500 mm

2. poboljšanje temeljnog tla ispod brane West Branch Dam (H=24 m) - 1967

Ulazni podaci:

volumen tretiranog tla:	580.000 m ³
debljina sloja:	18 m
duljina tretmana:	10 -12 mjeseci
broj elektroda:	990 katoda i 660 anoda (l = 40 m)
razmak redova:	6 m
napon:	100 - 150 V

3. piloti - poboljšanje nosivosti plašta



Slika 6.5-6. Promjena otpor prodiranja šiljka usljed elektro-osmoze.