

Laboratorijski i terenski postupci zbijanja tla

Skočibušić, Stipan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:087514>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Stipan Skočibušić

Laboratorijski i terenski postupci zbijanja tla

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Stipan Skočibušić

Laboratorijski i terenski postupci zbijanja tla

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Stipan Skočibušić

Laboratory and field procedures of soil compaction

MASTER THESIS

Supervisor: Meho Saša Kovačević, PhD

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

Stjepan Ivčić



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:

Stjepan Ivković

SAŽETAK

Tlo se koristi kao građevinski materijal za izgradnju nasutih građevina kao što su nasipi za obranu od poplava, nasipi za ceste i željeznice, aerodromske piste, kolničke konstrukcije i brane za retencije ili akumulacije. Prilikom iskopa, prijevoza i razastiranja tlo u potpunosti gubi svoju prirodnu strukturu i postaje rahlije. Zbijenost je pojam koji je usko vezan s gustoćom, a označava relativni odnos volumena čvrstih čestica u odnosu na volumen tla. Krupnozrna tla lakše se zbijaju vibriranjem, a sitnozrna se lakše zbijaju gnječenjem i nabijanjem. Zemljani materijal ugrađuje se različitim metodama zbijanja koja poboljšavaju određena fizičko-mehanička svojstva tla. Zbijanjem se smanjuje deformabilnost i vodopropusnost, a povećava nosivost i posmična otpornost ugrađenog tla. Prije ugradnje moraju se provjeriti određena svojstva čime se provjerava mogućnost ugradnje tla u nasute građevine, a provjera svojstava tla izvodi se pomoću laboratorijskih ispitivanja kao što su standardni ili modificirani Proctor-ov pokus. Uvjeti ispitivanja na terenu se trebaju prilagoditi uvjetima prethodno dobivenim u laboratoriju. Za površinsko zbijanje koriste se strojevi koji se sastoje od glatkih vibro-valjaka, gumeni valjak s više kotača, vibracijski jež, vibro-ploča, nabijač, reverzibilna ploča i veliki valjak sa stopama. Duboko zbijanje primjenjuje se u slučaju kada postoje slojevi nekoherentnog materijala velike debljine, a metode za dubinsko zbijanje su: vibroflotacija, dinamičko zbijanje i miniranje.

Ključne riječi: zbijanje, Proctor-ov pokus, posmična čvrstoća, propusnost, bubrenje, skupljanje vibroflotacija, dinamičko zbijanje, miniranje

SUMMARY

Soil is used as a construction material for the construction of embankments such as flood defense embankments, road and railway embankments, airport runways, pavement structures and retention or reservoir dams. During excavation, transportation and spreading, the soil completely loses its natural structure and becomes looser. Compaction is a term that is closely related to density, and indicates the relative ratio of the volume of solid particles to the volume of the soil. Coarse-grained soils are easier to compact by vibrating, and fine-grained are easier to compact by kneading and tamping. Earth material is installed using different compaction methods that improve certain physical and mechanical properties of the soil. Compaction reduces deformability and water permeability, and increases the bearing capacity and shear resistance of the embedded soil. Before installation, certain properties must be checked, which verifies the possibility of installing the soil in the embankment buildings, and the verification of the soil properties is carried out using laboratory tests such as the standard or modified Proctor test. The test conditions in the field should be adapted to the conditions previously obtained in the laboratory. For surface compaction, machines consisting of smooth vibro-rollers, multi-wheel rubber roller, vibrating hedgehog, vibro-plate, rammer, reversible plate and large roller with feet are used. Deep compaction is applied when there are layers of incoherent material of great thickness, and the methods for deep compaction are: vibroflotation, dynamic compaction and blasting.

Key words: compaction, Proctor's test, shear strength, permeability, swelling, vibroflotation shrinkage, dynamic compaction, blasting

Sadržaj

1. UVOD.....	3
2. OPĆENITO O ZBIJANJU.....	4
3. PONAŠANJE TLA PRILIKOM ZBIJANJA.....	5
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA.....	9
4.1. Proctorov pokus.....	9
4.2. Modificirani Proctorov pokus.....	11
5. UTJECAJ ZBIJANJA NA FIZIČKO-MEHANIČKE KARAKTERISTIKE TLA.....	16
5.1. Utjecaj na posmičnu čvrstoću tla.....	17
5.2. Utjecaj na strukturu tla.....	21
5.4. Utjecaj na stišljivost tla.....	24
5.5. Utjecaj na potencijal bubrenja i skupljanja.....	25
6. TERENSKA ISPITIVANJA.....	27
6.1. Strojevi za zbijanje.....	28
6.1.1. Glatki vibro-valjak s kotačima.....	30
6.1.2. Pneumatski gumeni valjak s više kotača.....	30
6.1.3. Valjak sa stopama.....	31
6.1.4. Vibracijski valjak.....	31
7. PROBNA POLJA.....	34
8. KONTROLA ZBIJENOSTI.....	35
8.1. Metoda pješčanog konusa - Sand Cone metoda.....	36
8.2. Uređaj s gumenim balonom.....	37
8.3. Nuklearna metoda.....	38
8.4. Proctorova igla ili Proctorov penetrometar.....	39
9. ZBIJANJE DUBLJIH SLOJEVA TLA.....	41
9.1. Vibroflotacija.....	41
9.2. Dinamičko zbijanje.....	44
9.3. Miniranje.....	47
10. ODABIR MATERIJALA ZA OPTIMALNO ZBIJANJE NASUTIH GRAĐEVINA.....	49
11. ZAKLJUČAK.....	52
POPIS LITERATURE.....	53

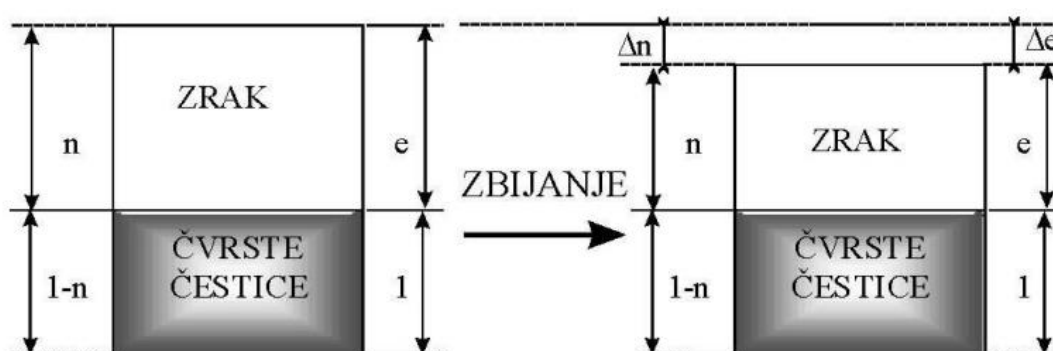
POPIS SLIKA.....	55
POPIS TABLICA.....	57

1. UVOD

Zbijanjem tla smanjuju se šupljine između čestica tla, što dovodi do povećanja gustoće tla. Zbijanje je ključno u građevini jer pruža stabilnu osnovu za izgradnju temeljnih konstrukcija koje mogu podnijeti teške strukture poput zgrada, cesta i mostova, a istovremeno sprječavajući slijeganje ili pomicanje. U građevinarstvu prilikom projektiranja nasipa za ceste i željeznice, zemljanih brana i nasipa za obranu od poplava i mnogih drugih građevinskih objekata, rahla tla moraju se zbiti kako bi se povećala njihova gustoća. Zbijanje tla povećavaju karakteristike čvrstoće tla koji posljedično povećavaju nosivost temeljne konstrukcije koja je na tom tlu konstruirana. Zbijanje tla osigurava stabilnost i trajnost različitih konstrukcija, kontrolu kretanja vode te poboljšanje interakcije između tla i strukture. Zbog svega navedenog važno je znati kako zbijanje utječe na svojstva tla koje se ugrađuje. U ovom diplomskom radu opisano je ponašanje tla prilikom zbijanja i opisan je utjecaj zbijanja na određene fizičko-mehaničke karakteristike tla. Opisane karakteristike uključuju utjecaj na strukturu tla, posmičnu čvrstoću, stišljivost, propusnost te bubrenje i skupljanje. Opisan je odabir materijala za optimalno zbijanje nasutih građevina. Prikazani su laboratorijski i terenski pokusi određivanja zbijenosti tla. Prikazani su terenski postupci za zbijanje tla.

2. OPĆENITO O ZBIJANJU

Zbijanje je zapravo mehanička modifikacija tla koja zgušnjuje tlo djelovanjem vanjskih sila. U klasičnom smislu zbijanje tla znači zgušnjavanje djelomično zasićenog tla smanjenjem volumena pora dok volumen čvrstih čestica i vode ostaje konstantan. Zbijanjem se čestice materijala približavaju jedna drugoj, te se ostvaruju čvršće veze između čestica tla, a to se postiže primjenom određene mehaničke sile koja može bit statičkog ili dinamičkog opterećenja na tlo. Prilikom iskopa, prijevoza i razastiranja tlo u potpunosti gubi svoju prirodnu strukturu i postaje rahlije. Tijekom zbijanja smanjuje mu se količina pora izražena preko koeficijenta pora e kao što je prikazano na slici 1. Stupanj zbijenosti tla mjeri se suhom jediničnom zapreminskom težinom (γ_d) ili suhom gustoćom (ρ_d). [1,2]



Slika 1. Model učinka zbijanja [2]

Geotehnički inženjeri prave jasnu razliku između zbijanja, stabilizacije i konsolidacije. Stabilizacija prilikom npr. projektiranja prometnica odnosi se na poboljšanje svojstava tla dodavanjem veziva i aditiva. A konsolidacija je proces smanjenja volumena terena odstranjivanjem vode iz pora. Zbijanje se može definirati kao uklanjanje zraka iz pora tla. Zbijanje tla je vjerojatno najjeftinija metoda poboljšanja svojstava tla i uobičajena je praksa u svim vrstama građevinskih radova. [2]

Glavni ciljevi zbijanja tla:

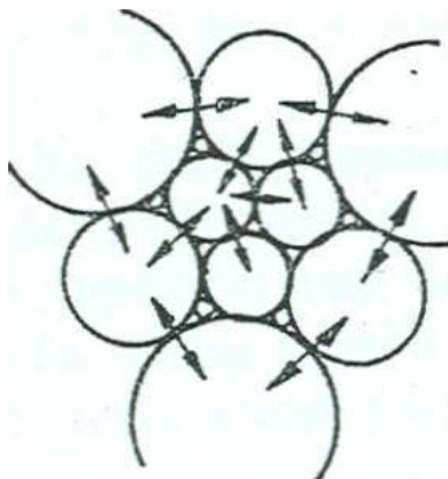
1. Povećanje posmične čvrstoće,
2. Smanjenje stišljivosti na vanjska opterećenja,
3. Smanjenje propusnosti,
4. Kontrola bujanja i skupljanja tla i
5. Produžetak trajnost. [1]

O zbijenosti ovise bitna svojstva za stabilnost pokosa, stišljivost nasipa, vododrživost nasipa, nosivost, za naknadna slijeganja u nasutim građevinama te za potencijalno opasni negativni utjecaj vode ovisno djeluje li stalno ili privremeno na nasipe. Izostanak zbijanja tla

prije izvedbe konstrukcije može dovesti do uniformnog i diferencijalnog slijeganja, pojave dodatnih momenata na krutim spojevima, erozije tla i potencijalnog oštećenja konstrukcije, cijevi i sl. [2,4]

3. PONAŠANJE TLA PRILIKOM ZBIJANJA

Učinak dobiven zbijanjem je zapravo isti za koherentna i nekoherentna tla, a to je da se smanjuje porozitet (e). Zbijanjem tla veze postaju čvršće, a razmak između čestica se smanjuje. Koherentna i nekoherentna tla nemaju iste veze među česticama i čestice se ne ponašaju jednako prilikom zbijanja. Kod koherentnih materijala razmak između čestica tla se smanjuje, a učinak elektrokemijskih sila koje imaju utjecaj na porast kohezije se povećavaju. Kod nekoherentnih materijala uklještenje i dodirne površine među česticama tla se povećavaju (Slika 2.). [5]



Slika 2. Trenje između čestica krupnozrnog tla [7]

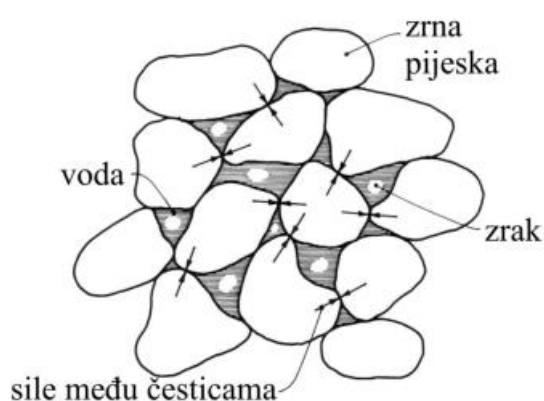
U krupnozrna, nevezana ili nekoherentna tla spadaju tla kao što su pijesak, šljunak i njihove mješavine i prirodne kamene drobine. Na zbijanje krupnozrnog tla najviše utječe:

- ❖ Granulometrijski sastav čestica,
- ❖ Veličina i oblik zrna i
- ❖ Sadržaj vode.

Granulometrijski sastav najvažniji je faktor koji utječe na zbijanje krupnozrnog tla. Prema iskustvu, mješavine tla sa glatkim zaobljenim pojedinačnim zrnima pogodnije su za zbijanje od mješavina tla sa hrapavim i grubim zrnima. Rahlo nekoherentno tlo zbija se vibriranjem. Uslijed vibracija materijal tla, zbog gotovo nestalih unutarnjih sila trenja i djelovanja vlastite težine, počinje se preslagivati na način da manja zrna upadaju u šupljine između krupnijih

čestica formirajući gušću strukturu nekoherentnog tla. Opterećenje se prenosi izravno trenjem sa čestice na česticu. [6]

Krupnozrna tla nemaju sile kohezije, međutim u dobro stupnjevanom tlu kao npr. u čistim pijescima, koji sadrže veliku količinu sitnih čestica javlja se tzv. "prividna kohezija". Prividna kohezija je kapilarna sila među česticama tla i vode u porama koja se javlja u čistim pijescima određene vlažnosti zbog vrlo malih dimenzija pora (Slika 3.). Kapilarne sile povećavaju čvrstoću vlažnom pijesku i drže čestice na okupu kada nema bočnog tlaka. Kapilarne sile djeluju do trenutka prelaska određene granične vlažnosti nakon koje pijesak gubi svoju čvrstoću. [2]

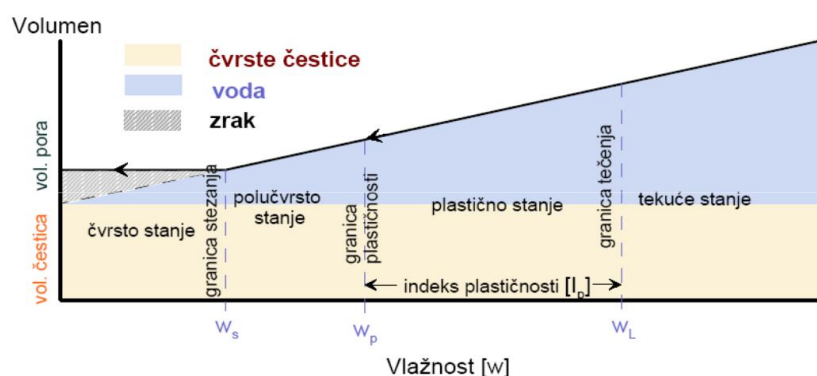


Slika 3. Prividna kohezija vlažnog pijeska [2]

U sitnozrna, vezana ili koherentna tla spadaju gline, prašine, prašinate gline (ilovače), pjeskovite prašine i les, a presudni utjecajni faktori za njihovo zbijanje jesu:

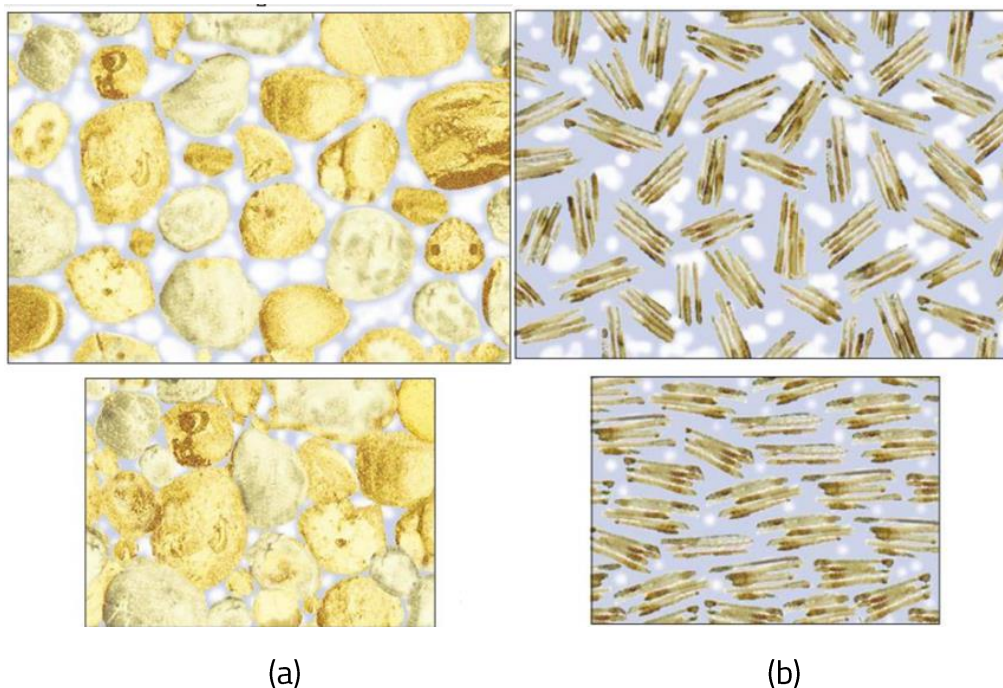
- ❖ Vlažnost,
- ❖ Plastičnost i
- ❖ Sastav zrnaca.

Za sitnozrna tla najbitniji faktor koji utječe na zbijanje je vlažnost. U odnosu na krupnozrna tla ona u jedinici volumena imaju veću sposobnost apsorpiranja vode radi veće specifične površine zrna, a samim time i veću koheziju. Upravo su zbog toga njihova deformabilnost i svojstva zbijanja proporcionalna količini vlažnosti. Porastom vlažnosti sitnozrno tlo mijenja svoja stanja konzistencije. Sitnozrna tla su osjetljivija na zbijanje ako im je indeks plastičnosti niži. Indeks plastičnosti predstavlja razliku granice tečenja i granice plastičnosti. Porastom indeksa plastičnosti smanjuje se apsolutna vrijednost postignute gustoće zbijanja uz jednako utrošenu energiju zbijanja. [6]



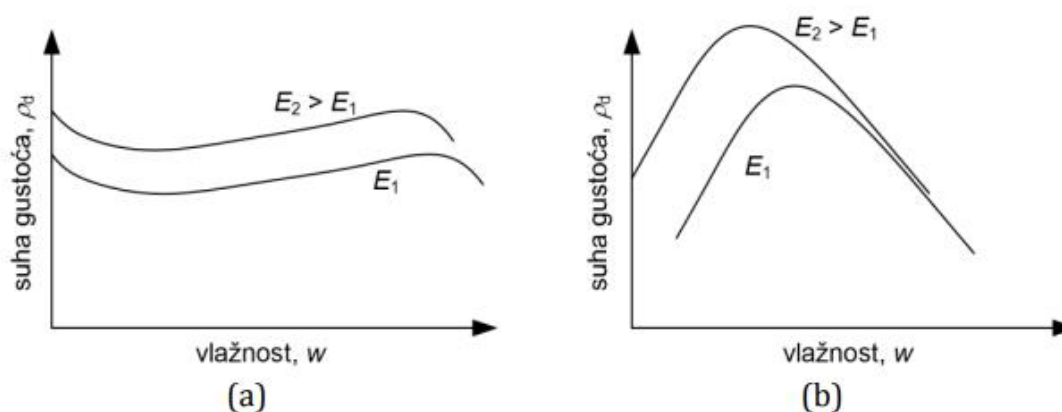
Slika 4. Granice konzistencije [8]

Koherentna tla se ne zbijaju vibriranjem jer se ne može svladati kohezija među česticama tla. Za svladavanje sila kohezije potrebna je dovoljno velika udarna sila stroja za zbijanje odnosno dovoljno velika težina stroja za zbijanje tla. Tlo kao npr. glina sadržava čestice oblika plosnatih listića ili sitnih kuglica (Slika 5.b) formirajući u prirodi lančanu, mrežastu ili pahuljastu strukturu koja amortizira udarce izazvane strojem za zbijanje puno bolje, nego nekoherentna tla. Koherentna tla se mogu zbijati samo kada su relativno suha tj. kad mu je količina vlažnosti niža od granice tečenja. Kod koherentnih materijala posmična sila ovisi o vlažnosti. Povećanjem vlažnosti posmična sila opada, a kod granice tečenja otprilike ima vrijednost blizu nule. Na slici 5. a i b prikazan je učinak zbijanja na raspored čestica krupnozrnog i sitnozrnog tla. [6]



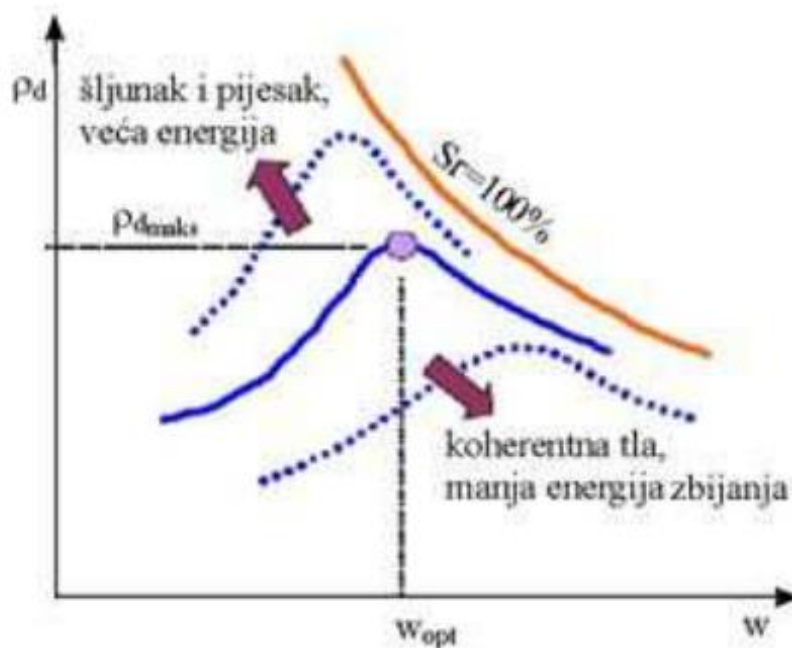
Slika 5. Raspored čestica prije i nakon zbijanja (a) krupnozrnog i (b) sitnozrnog tla [6]

Krivuljama zbijanja na slici 6. prikazan je utjecaj početne vlažnosti na ostvarenu suhu gustoću čistog pijeska pri istoj energiji zbijanja. Slika 6a prikazuje krivulju zbijanja za krupnozrna tla, a 6b za sitnozrna tla. Krivulje se razlikuju jer se krupnozrna tla slabo zbijaju sa nametanjem statičkog opterećenja. Njihovo zbijanje ostvaruje se pomicanjem kontakata između zrna tla. A pomicanje zrna ometaju meniskusi između vode i zraka u porama jer napinju susjedne čestice. Na slici 6a može se uočiti da maksimalni učinak zbijanja dobije iz praktički suhe strukture zrna ili strukture koja je skoro zasićena vodom. Uočava se pad suhe gustoće povećanjem količine vlažnosti. Suha gustoća pada dok se ne dosegne minimum nakon čega se opet povećava sa daljnjim povećanjem vlažnosti. Zbog prividne kohezije razina vlažnosti približava se vrijednosti potpunog zasićenja ali ostaje ispod nje. Iz dijagrama na slici 6a se također može uočiti da prilikom zbijanja promjena količine vlažnosti ima mali utjecaj na čiste pijeske. Povećanjem energije zbijanja povećava se suha gustoća tla. [2,7]



Slika 6. Razlika krivulja zbijanja za (a) krupnozrna i (b) sitnozrna tla [7]

Slika 6b prikazuje zbijanje sitnozrnog tla. Usporedbom sa krivuljom zbijanja krupnozrnog tla uočava se da krivulja zbijanja za sitnozrna tla ima jasno izraženu maksimalnu zbijenost pri određenoj vlažnosti. R. Proctor (1933.) je tu vlažnost nazvao optimalna vlažnost i razvio je uređaj kojim se ispituje utjecaj ta dva parametra. Za energiju zbijanja u laboratoriju izabrao je onu koju je mogao usporediti sa energijom zbijanja koju se mogla unijeti u tlo tadašnjim strojevima i tako je nastao standardni Proctorov pokus. Oko 1950. pokus je poboljšan povećanjem snage i učinka strojeva za zbijanje i ugradnju tla na terenu i nastaje modificirani Proctorov pokus. Detaljniji opis oba pokusa nalazi se kasnije u ovom radu. [2]



Slika 7. Promjena optimalne vlažnosti za različite vrste tla i energije zbijanja [2]

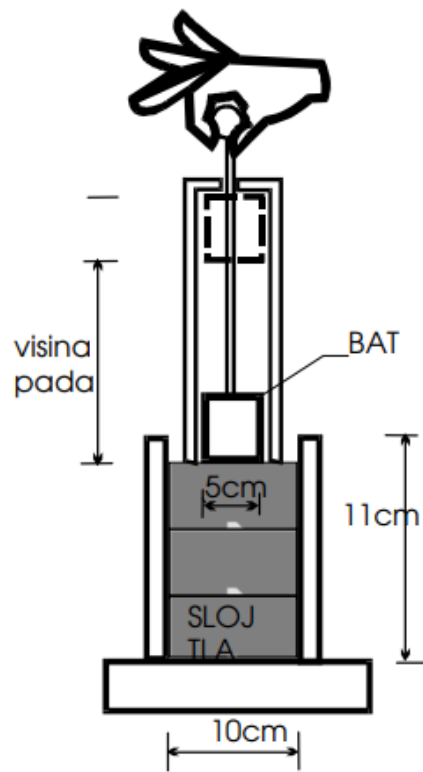
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Cilj laboratorijski ispitivanja je poboljšanje zbijanja tla na terenu. Laboratorijskim ispitivanjem modeliraju se uvjeti sa terenskog zbijanja. Dobiveni rezultati koriste se za kontrolu i optimizaciju terenske ugradnje. Za određivanje karakteristika zbijenosti nekog tla najčešće se provode standardni i modificirani pokus zbijanja odnosno tzv. Proctor-ov pokus nazvanog prema američkom građevinaru R.R. Proctoru koji je standardizirao postupak ugradnje uzorka u laboratoriju. Uspješnost zbijanja ovisi o:

- vlažnosti,
- suhoj gustoći,
- energiji zbijanja, te
- granulometrijskom sastavu i udjelu glinenih čestica. [9]

4.1. Proctorov pokus

Standardni Proctorov pokus provodi se u cilindričnom kalupu promjera 101.6 mm, volumena 944 cm³. Uzorak tla se pripremi pri različitim vlažnostima u 5 uzoraka od istog materijala, te se zatim zbija u tri jednaka sloja. Zbijanje se vrši pomoću slobodno padajućeg čekića, ukupno 25 udaraca za svaki sloj. Čekić ima masu 2.5 kg i pada sa visine od 30.5 cm. Na slici 9. nalazi se prikaz opreme potrebe za provedbu standardnog Proctorovog pokusa. [9]

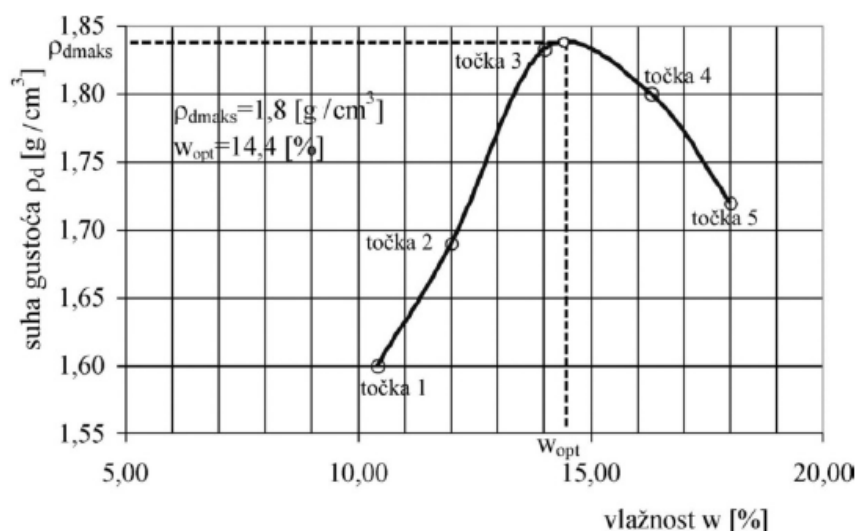


Slika 8. Skica Proctorovog uređaja [9]



Slika 9. Oprema za Proctorov pokus [10]

Očitava se količina vlažnosti svakog zbijenog primjerka i pripadajuća suha gustoća (ρ_d) kao na slici 10. Zbijanje uzorka se ponavlja nekoliko puta sa postepenim povećavanjem vlažnosti tla. Kroz dobivene točke povlači se krivulja sa svojim maksimumom u kojem se očitava vlažnost. Ta vlažnosti je optimalna vlažnost (w_{opt}) i pripadna vrijednost maksimalne suhe gustoće za odabranu energiju zbijanja koja iznosi (ρ_{dmax}). Lijevo od optimalne vlažnosti nalazi se suha strana optimuma, a desno se nalazi vlažna strana optimuma. Na dijagramu ispod prikazan je odnos vlažnosti i suhe zapreminske težine. [9]



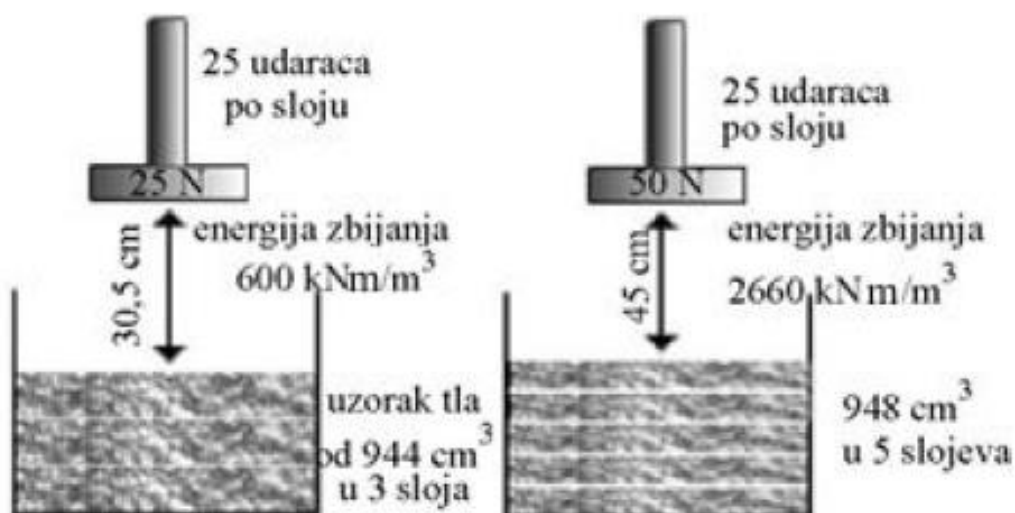
Slika 10. Način određivanja optimalne vlažnosti [2]

4.2. Modificirani Proctorov pokus

Razvojem teških valjaka i njihovom upotrebom za zbijanje polja, standardni Proctorov pokus prerađen je kako bi bolje predstavio uvjete na terenu. Procedura za modificirani Proctorov pokus zbijanja tla je slična standardnom samo je energija zbijanja uzorka 4.5 puta veća kod modificiranog. Težina čekića je 4.5 kg i pušta se da slobodno pada s visine od 45.7 cm. Što rezultira većom maksimalnom suhom gustoćom tla sa manjim optimalnom vlažnošću. Uzorak tla se zbija u 5 slojeva. Osnovne razlike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa prikazane su u tablici 1. [11]

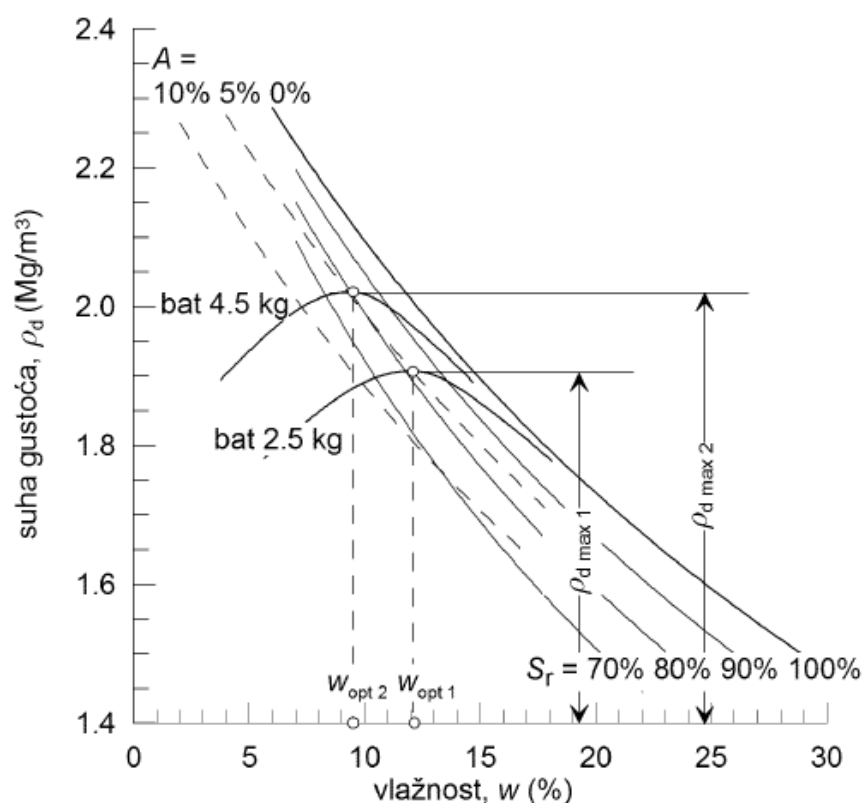
Tablica 1. Razlike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa

	STANDARDNI	MODIFICIRANI
Težina čekića (kg)	2.5	4.5
Visina slobodnog pada (cm)	30.5	45.7
Broj slojeva	3	5
Energija zbijanja (kNm/m^3)	600	2660



Slika 11. Proctorov pokus, lijevo standardni, desno modificirani [2]

Slika 12. prikazuje tipični izgled krivulje zbijanja za standardni i modificirani Proctorov pokus. Dijagram na slici prikazuje utjecaj vlažnosti za postignute suhe gustoće pri zbijanju u standardnom i modificiranom Proctorovom pokusu ispitanom na istom uzorku.



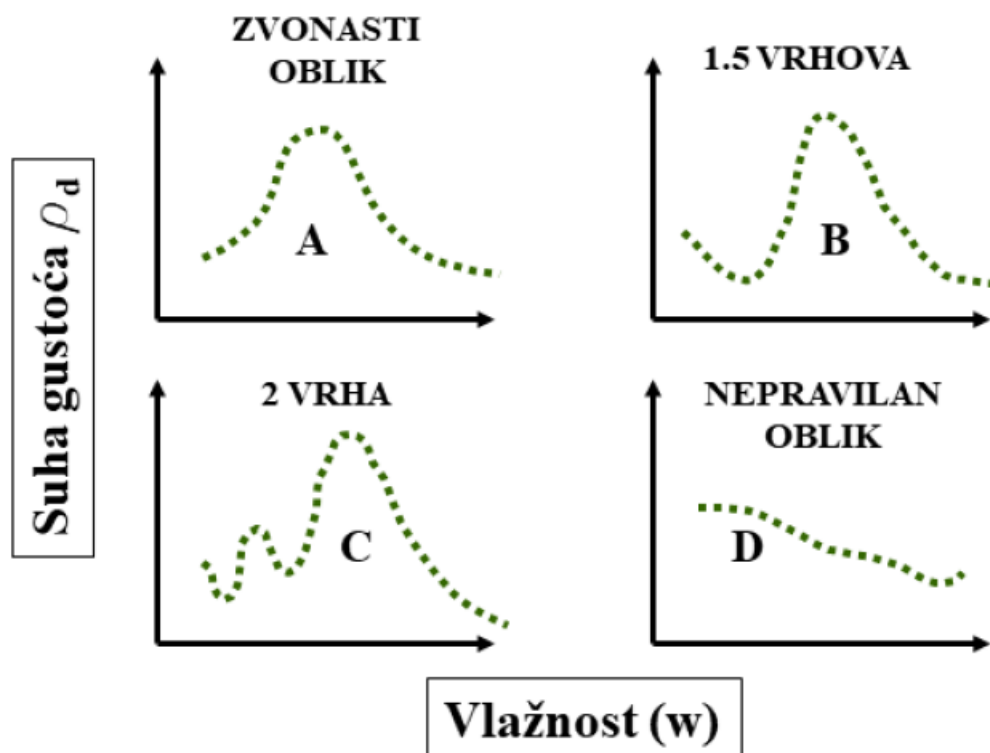
Slika 12. Tipični izgled krivulja zbijanja za standardni i modificirani Proctorov pokus [14]

Pri niskoj razini vlažnosti, tlo je kruto i teško se zbijaju, dobiva se niska razina suhe zapremine težine i velike količine zraka u tlu. Povećanjem količine vlage, oko čestica tla stvaraju se slojevi vode koji omogućuju lakše kretanje čestica u gušću strukturu. Tlo postaje mekše, lakše se obrađuje, povećava mu se suha zapreminska težina i veća količina zraka se oslobađa iz pora od količine vode koja ulazi u pore. Zbog količine vode i zraka u porama tla, čestice ostaju udaljene jedna od druge sa daljnjim zbijanjem. Sa dijagrama na slici 12. može se primijetiti da se par vrijednosti (w_{opt}) i (ρ_{dmax}) nalazi na krivulji koja predstavlja stupanj zasićenosti od oko $S_r=80\%$. Daljnjim povećanjem vlažnosti, nakon doseganja optimalne vlažnosti, zbijenost se asimptotski približava liniji potpunog zasićenja i dolazi do smanjenja suhe zapremine težine. Linija potpunog zasićenja je teoretska linija koja povezuje vlažnost i suhu zapreminsku težinu kada su sve pore ispunjene vodom ($S_r=100\%$). Ona nikada neće biti dosegnuta jer je nemoguće da sav zrak zbijanjem izađe iz pora. Udaljenost krivulje potpunog zasićenja i vlažne strane krivulje zbijanja je zapravo zarobljen zrak u porama. [12]

Zbog kapilarne napetosti za pijeske je tipično da sa porastom vlažnosti suha zapreminska težina se prvo smanjuje nakon čega dosegne svoju maksimalnu vrijednost daljnjim povećanjem vlažnosti. Pri nižim razinama vlažnosti voda sadržana u porama ima sposobnost preorijentirati čestice tla u gušću strukturu. Suedkamp i Lee (1972.) proveli su istraživanje u kojem su promatrali krivulje zbijanja za 35 vrsta tala, te su uočili da postoje 4 različite vrste krivulje zbijanja koje ovise o indeksu plastičnosti (Slika 13). [13]

Tablica 2. Tipovi krivulja zbijanja [14]

Tip krivulje	INDEKS PLASTIČNOSTI
A	30-70
B	<30
C	<30 i >70
D	>70

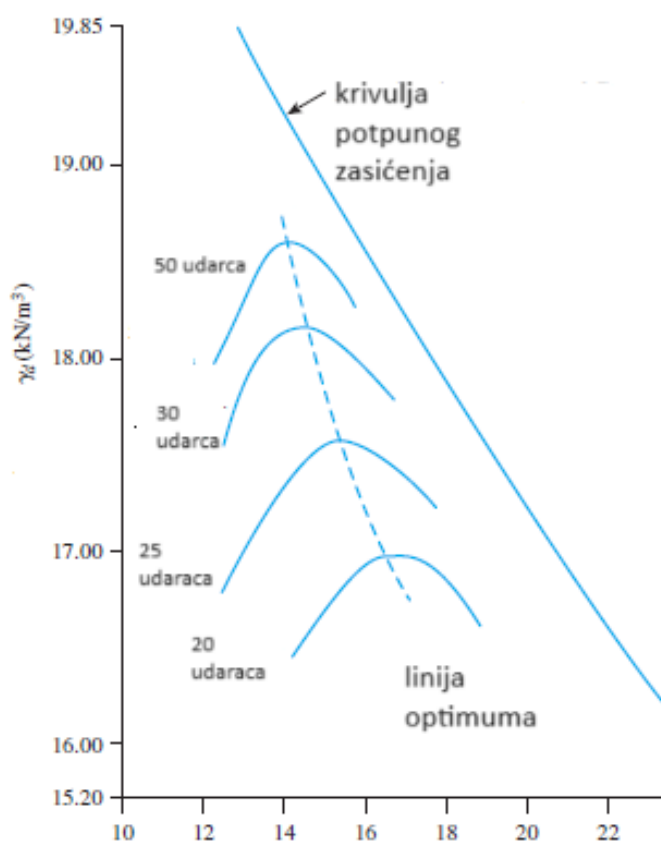


Slika 13. Četiri različite vrste krivulja zbijanja [15]

Promjenom vrijednosti energije zbijanja mijenja se i krivulja zbijanja. Energija zbijanja za standardni Proctorov pokus opisana je formulom:

$$E = \frac{\left(\frac{\text{broj udaraca za}}{\text{svaki sloj}}\right) \cdot \left(\frac{\text{broj}}{\text{slojeva}}\right) \cdot (\text{težina}) \cdot \left(\frac{\text{visina}}{\text{pada}}\right)}{\text{volumen kalupa}}$$

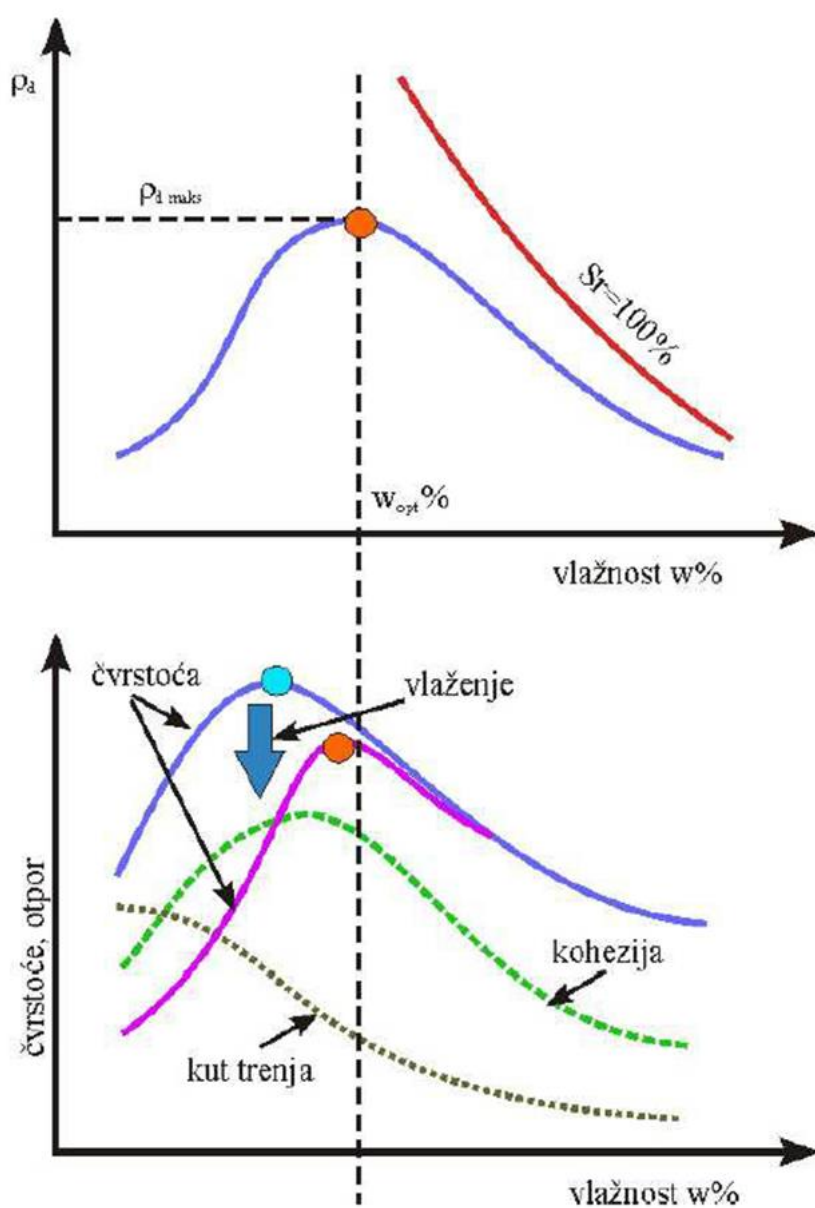
Energija zbijanja proporcionalna je suhoj zapremskoj težini, pa porastom energije zbijanja raste i maksimalna suha zapremska težina. Ova se činjenica može dokazati na slici ispod gdje su prikazane 4 krivulje zbijanja za pjeskovitu glinu. Isto tako porastom energije zbijanja smanjuje se i razina vlažnosti tla. Prethodne tvrdnje vrijede za sve vrste tla. [12]



Slika 14. Utjecaj energije zbijanja na pjeskovitu glinu [13]

5. UTJECAJ ZBIJANJA NA FIZIČKO-MEHANIČKE KARAKTERISTIKE TLA

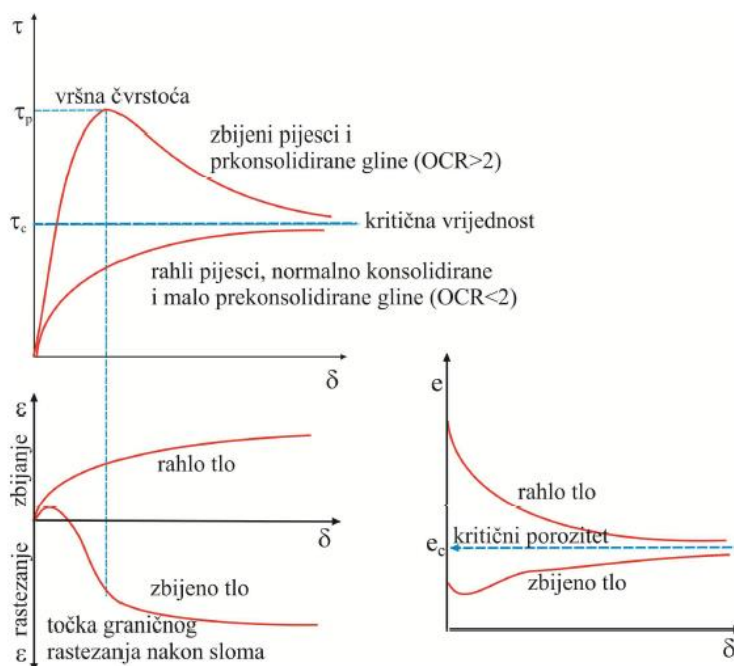
Tijekom projektiranja nasutih građevina izvršava se nekoliko proračuna fizičko-mehaničkih svojstava ugrađenog gradiva koji su nužni za njihovu stabilnost i sigurnost. Ta fizičko-mehanička svojstva mogu se programirati na način da se propiše određena zbijenost. Na slici 15. prikazano je da zbijenost utječe na čvrstoću i otpor materijala ugrađenog u nasute građevine zbijanjem. Tlo manje vlažnosti bolje se zbija uz korištenje veće energije zbijanja, ali se dovodi u pitanje ekonomičnost projekta. Prilikom projektiranja nasutih građevina potrebno je uzeti u obzir sigurnost, kakvoću i troškove projekta. [2]



Slika 15. Utjecaj zbijanja istovrsnog tla pri različitim vlažnostima, na čvrstoću i otpore ugrađenog tla [2]

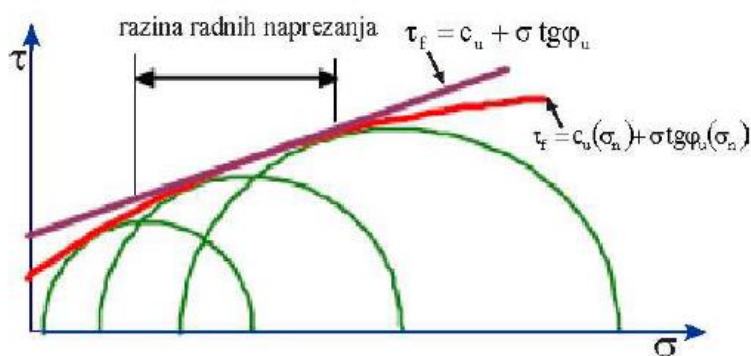
5.1. Utjecaj na posmičnu čvrstoću tla

Tlo nakon iskopavanja potpuno gubi svoju prirodnu strukturu, a zbijanjem nasutog gradiva struktura se vraća. Utjecaj zbijanja na promjenu posmične čvrstoće prikazano je ispitivanjima iz teorijske mehanike tla na slici 16. Dijagrami pokazuju zbijanje rahlog (rahli pijesci i normalno konsolidirane gline) i zbijenog tla (zbijeni pijesci i prekonsolidirane gline). [2]



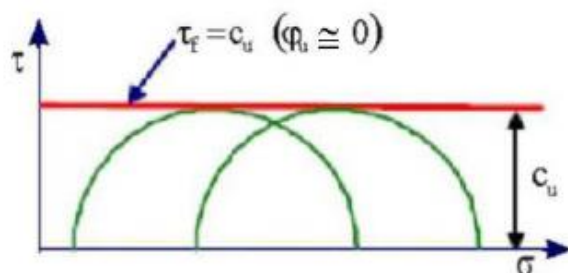
Slika 16. Ponašanje zbijenog i rahlog tla prilikom smicanja s prikazom promjene koeficijenta pora i promjene volumena [2]

Kod zbijanja nekoherentnog tla razlikuju se analize nezasićenog tla od potpuno zasićenog tla. U nezasićenim tlima ovojnice Mohrovih kružnica su zakrivljene. Što znači da se posmična čvrstoća mijenja od točke do točke ovisno o promjeni razine napreznja (σ_n), a njezin numerički prikaz vrijednosti je jednadžba pravca. Jednadžba pravca vrijedi samo u diskretnim točkama radnog napreznja zbog promjene zasićenosti uslijed smanjenja poroziteta. Opisani učinak zbijanja na posmičnu čvrstoću nezasićenog tla prikazan je na slici 17. Parametri čvrstoće uzimaju se u rasponu očekivanih radnih napreznja označenih na slici. [2]



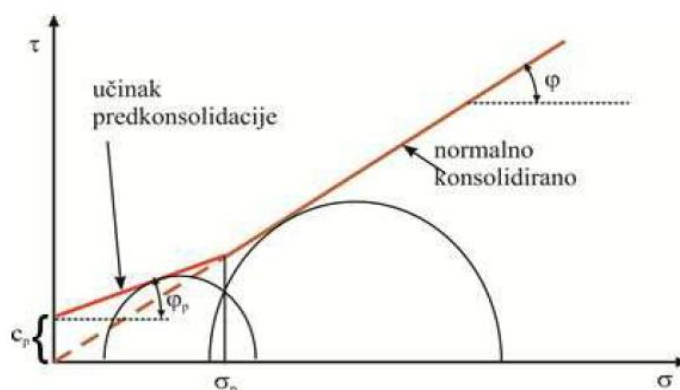
Slika 17. Rezultati odnosa napreznja u konsolidiranom nedreniranom troosnom pokusu (CU) za nezasićeno tlo [2]

Potpuno zasićeno tlo u nedreniranom pokusu ponaša se kao na slici 18. gdje je nedrenirana čvrstoća (τ_f) jednaka nedreniranoj koheziji (c_u), a kut unutarnjeg trenja (φ_u) je približno jednak nuli. Kohezija ovisi o porozitetu u određenim uvjetima taloženja. [2]



Slika 18. Troosni nekonsolidirani, nedrenirani pokus potpuno zasićenog [2]

Rezultati troosnog ispitivanja posmične čvrstoće prikazani su na slici 19. gdje Mohrove kružnice pokazuju da posmična čvrstoća pri normalnim napreznjima manjim od tlaka prekonsolidacije (σ_p) ima veću čvrstoću nego normalno konsolidirano tlo. Ta čvrstoća nastaje jačanjem elektrokemijskih veza radi veće blizine čestica i djelovanjem kapilarne sile u porama nakon rasterećenja. Prilikom dodira sa vodom ovaj utjecaj može nestati pa to treba uzeti u obzir kod odabira parametara posmične čvrstoće. [2]

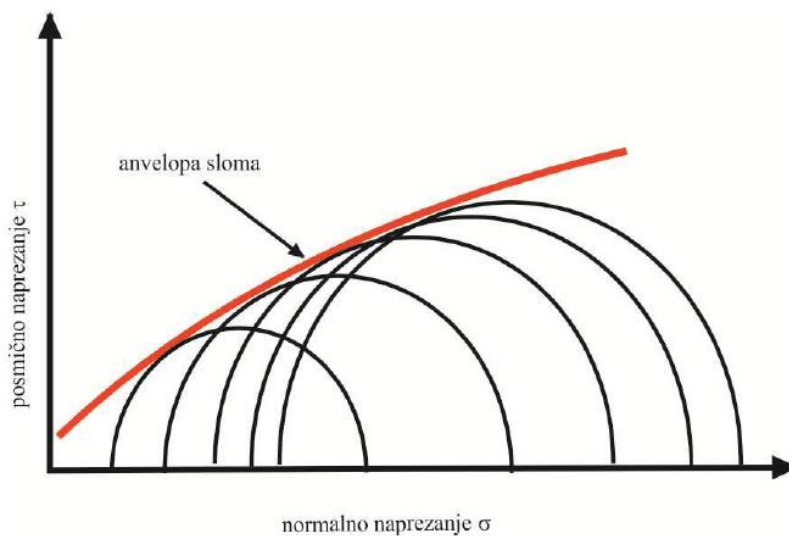


Slika 19. Učinak zbijanja na posmičnu čvrstoću za tlo ugrađeno u nasip [2]

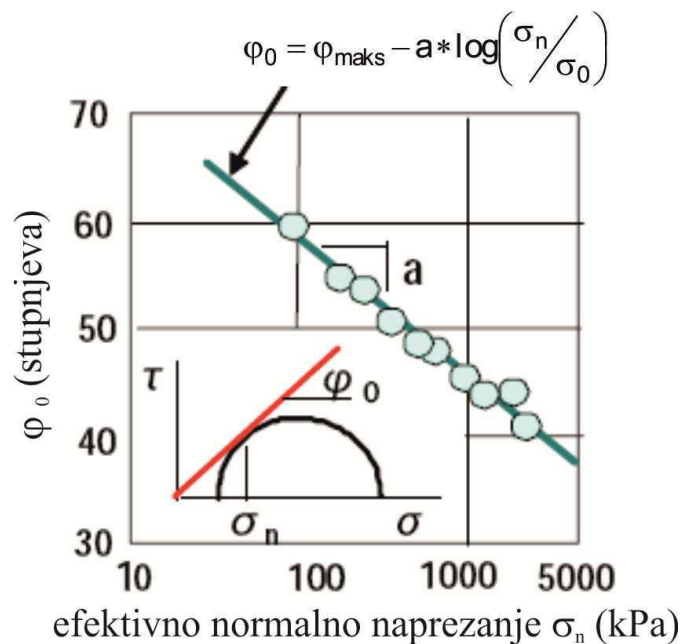
Kod zbijanja nekoherentnog tla i drobine najnovija istraživanja pokazala su veliko povećanje čvrstoće na mjestima vrlo visokih tlakova kad je spriječeno bočno širenje. U praktičnoj primjeni pri projektiranju se umjesto izraza za anvelopu sloma koriste dvije vrste izraza za posmičnu čvrstoću. Prvi izraz je istog oblika kao i izraz lijevo samo sadrži promjenjivu vrijednost kuta trenja (φ_0). Oznaka a predstavlja vrijednost kuta trenja izraženog preko nagiba tangente na anvelopu sloma sa slike 20. za određenu razinu normalnog napreznja. [2]

$$\tau_f = (\sigma - u) \operatorname{tg}(\varphi')$$

$$\varphi_0 = \varphi_{max} - a \cdot \log\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0}\right)$$



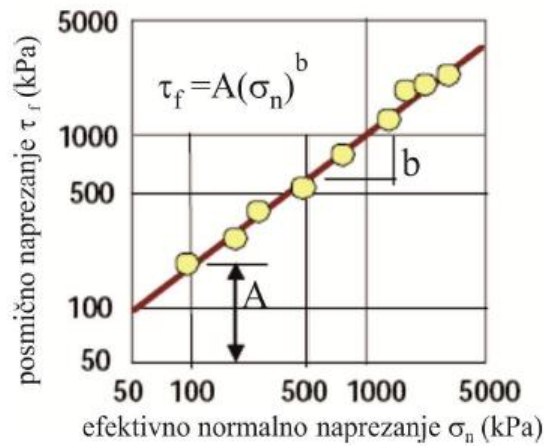
Slika 20. Rezultati troosnog smicanja nekoherentnog tla [2]



Slika 21. Promjena vrijednosti kuta trenja φ_0 ovisno o razini napreznja pri troosnom smicanju nekoherentnog gradiva [2]

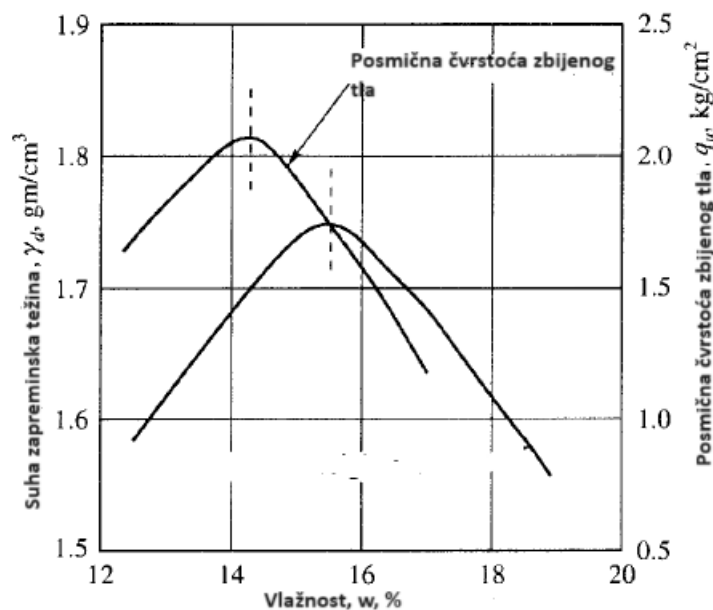
Drugi izraz za posmičnu čvrstoću je eksponencijalan u odnosu na razinu efektivnog normalnog naprezanja. Parametri A i b za kameni agregat iznosi $A=[0,9-1,9]$ i $b=[0,75-0,98]$.

$$\tau_f = A(\sigma_n)^b$$



Slika 22. Prikaz rezultata smicanja kamenih agregata [2]

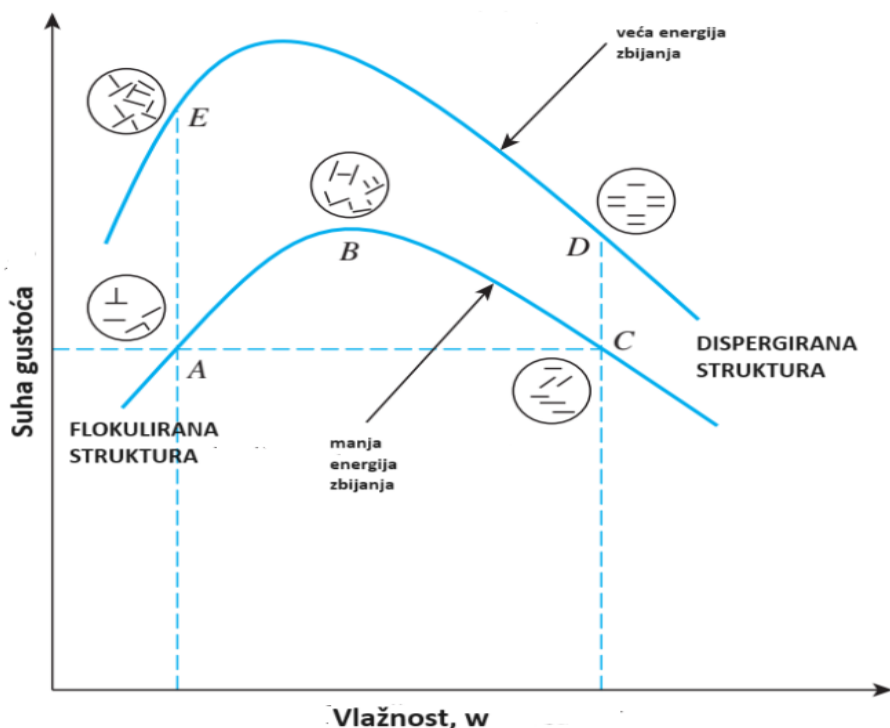
Sa primjenom veće količine zbijanja tla povećavaju se vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja, a samim time povećava se i njegova posmična čvrstoća. Slika 23. prikazuje odnos posmične čvrstoće i količine vlažnosti tla za pjeskovito glinasto tlo i na njoj je prikazano da se najveća vrijednost posmične čvrstoće tla ostvaruje pri količini vlažnosti manjoj od optimalne vlažnosti za najveću vrijednost suhe zapremine težine. [12]



Slika 23. Krivulja posmične čvrstoće i zbijanja [12]

5.2. Utjecaj na strukturu tla

Razna istraživanja su pokazala da zbijanjem sitnozrnog tla, ovisno da li je količina vlažnosti manja ili veća od optimalne, uzrokuje da čvrste čestice tla zauzmu različitu strukturu. Struktura tla je zapravo opis rasporeda čestica tla i sila između susjednih čestica. Učinak zbijanja varira ovisno o vrsti tla koja se zbijaju. Slika 24. prikazuje utjecaj zbijanja na strukturu gline. Ako se glina zbijaju sa vlažnosti na suhoj strani optimuma pri nižim razinama vlažnosti, odbojne sile između čestica su manje nego privlačne, pa stoga čestice se raspršuju i zauzimaju flokuliranu strukturu (točka A). Ovakva vrsta strukture nastaje jer pri niskoj razini vlažnosti stvaraju se difuzni dvostruki slojevi iona oko čestica gline pa je odbijanje između čestica smanjeno što rezultira nasumičnu orijentaciju čestica i manje vrijednosti suhe zapremine težine. Kada se količina vlažnosti poveća, kao što je naznačeno točkom B, difuzni dvostruki slojevi iona oko čestica gline se šire što uzrokuje povećanje odbojnih sila među česticama. Time se čestice raspršuju i dopušta se raspored čestica na uredniji način sa manjim stupnjem flokulacije i većom vrijednosti suhe zapremine težine. Sa danjim povećanjem vlažnosti još više se povećavaju sile odbijanja među česticama, a čestice zauzimaju sve više paralelnu tj. dispegiranu orijentaciju (točka C), ali im se gustoća smanjuje. Na slici 24. prikazane su dvije krivulje sa različitim energijama zbijanja. Uspoređujući točke A i E možemo utvrditi da pri određenoj vlažnosti veća energija zbijanja daje paralelniju strukturu čestica gline, što daje dispegiranu strukturu. [12,13]

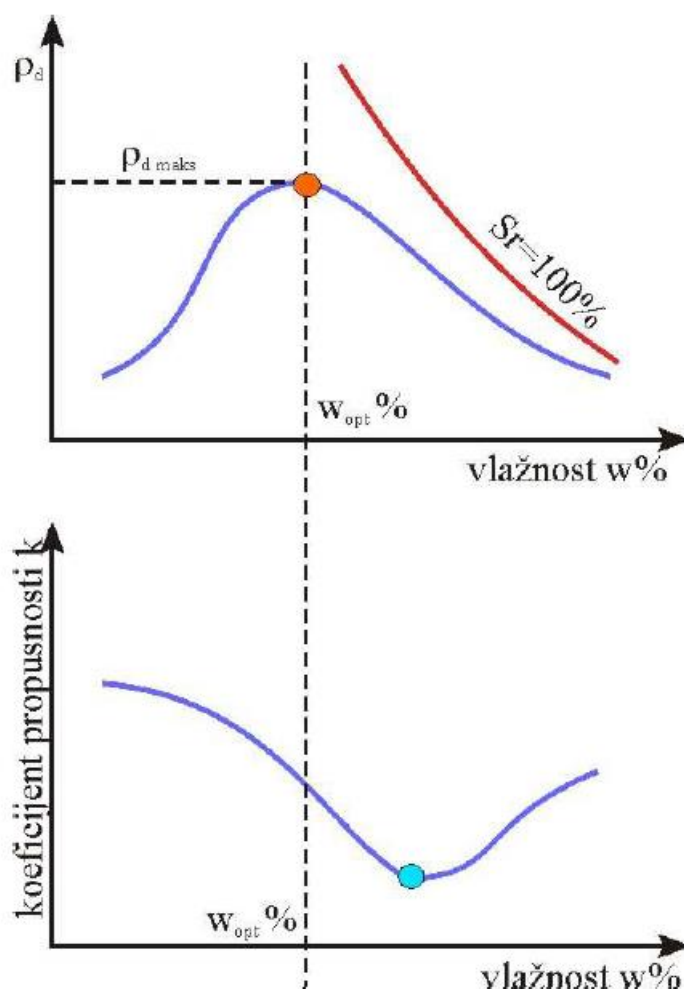


Slika 24. Utjecaj zbijanja na strukturu gline [13]

Dispergirana struktura ima manju čvrstoću, krutost i vodopropusnost od flokulirane strukture, ali je ponašanje duktilno za razliku od flokulirane strukture kod koje je mehaničko ponašanje kruto. Zbijanje tla kada je količina vlažnosti manja od optimalne može biti problematično bez obzira što tlo pri nižoj razini vlažnosti ima veću čvrstoću. Prilikom zasićenja tla vodom koje se događa pri potapanju, tlo gubi visoki kapilarni tlak, čvrstoća opada, a struktura tla se jednim djelom urušava uzrokujući dodatna slijeganja. Zato se prilikom projektiranja nasutih građevina kao npr. brana i nasipa traži da ugradnja sitnozrnog tla bude nešto vlažnija od optimalne razine jer je poželjnije duktilno ponašanje materijala od krutog i veća vodopropusnost od manje. [11]

5.3. Utjecaj na propusnost tla

Na propusnost tla utječu iduće karakteristike tla: oblik i veličina čestice, porozitet, struktura tla i stupanj saturacije. Kako propusnost ovisi o zbijenosti prikazano je na slici 25. Usporedbom uzorka tla sa istim omjerom pora, pokazano je da uzorak sa flokuliranom strukturom će imati najveću propusnost, a onaj uzorak u raspršenom stanju će imati minimalnu propusnost. Tla zbijana na suhoj strani optimuma će imati veću propusnost u odnosu na tla zbijana na vlažnoj strani optimuma. [2,16]

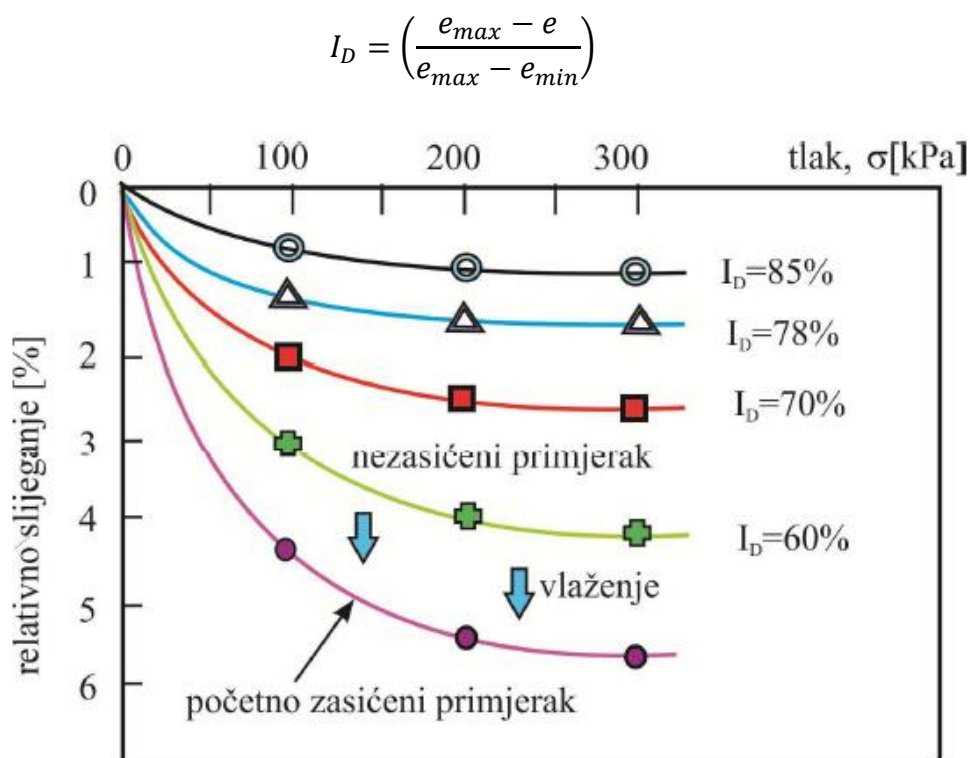


Slika 25. Utjecaj zbijanja na koeficijent propusnosti k [2]

Iz dijagrama je vidljivo da klasično smanjenje propusnosti sa povećanjem vlažnosti na suhoj strani optimuma. Minimalna propusnost je pri vlažnosti malo većoj od optimalne vlažnosti nakon čega propusnost blago raste.

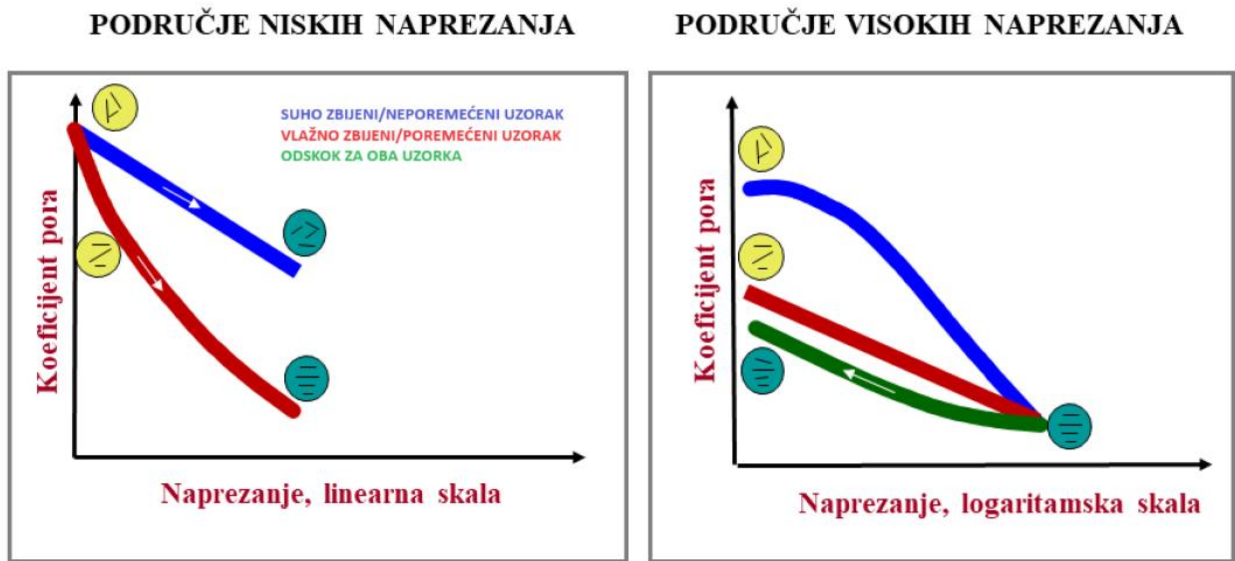
5.4. Utjecaj na stišljivost tla

Stišljivost je smanjenje volumena tla. Smanjenje tla isključivo ovisi o njegovom porozitetu. Kao što je navedeno ranije u ovom radu slijeganje volumena tla tijekom zbijanja nastaje isključivo kao posljedica smanjena pora u tlu jer se smatra da čvrste čestice nisu stlačive. Slika 26. prikazuje kako se pri tlačnom pokusu ponaša uzorak istog tla sa različitim početnim indeksom gustoće (I_D). Slijeganje tla se povećava sa manjim indeksom gustoće. [2]



Slika 26. Slijeganje ovisno o zbijenosti [2]

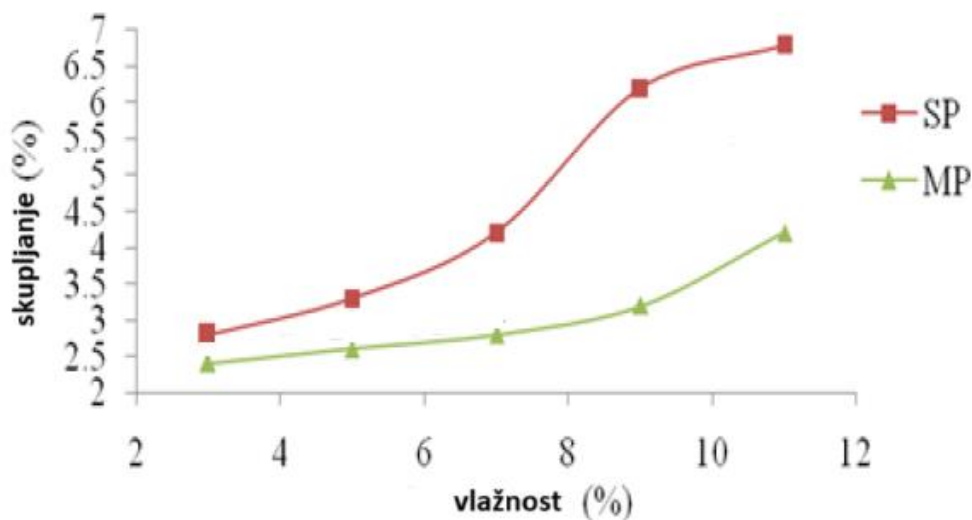
Slika 27. prikazuje dva uzorka zasićene gline sa istom gustoćom. Jedan uzorak zbijan je na suhoj strani, a drugi na vlažnoj strani optimuma. Sa slike vidimo da je pri visokim naprezanjima uzorak stišljiviji zbijanjem na suhoj strani optimuma od uzorka zbijenog na vlažnoj. A kod niskih naprezanja situacija je obrnuta, stišljiviji će biti uzorak zbijan na vlažnoj strani u odnosu na onog zbijanog na suhoj strani optimuma. [15]



Slika 27. Utjecaj zbijanja na stišljivost [15]

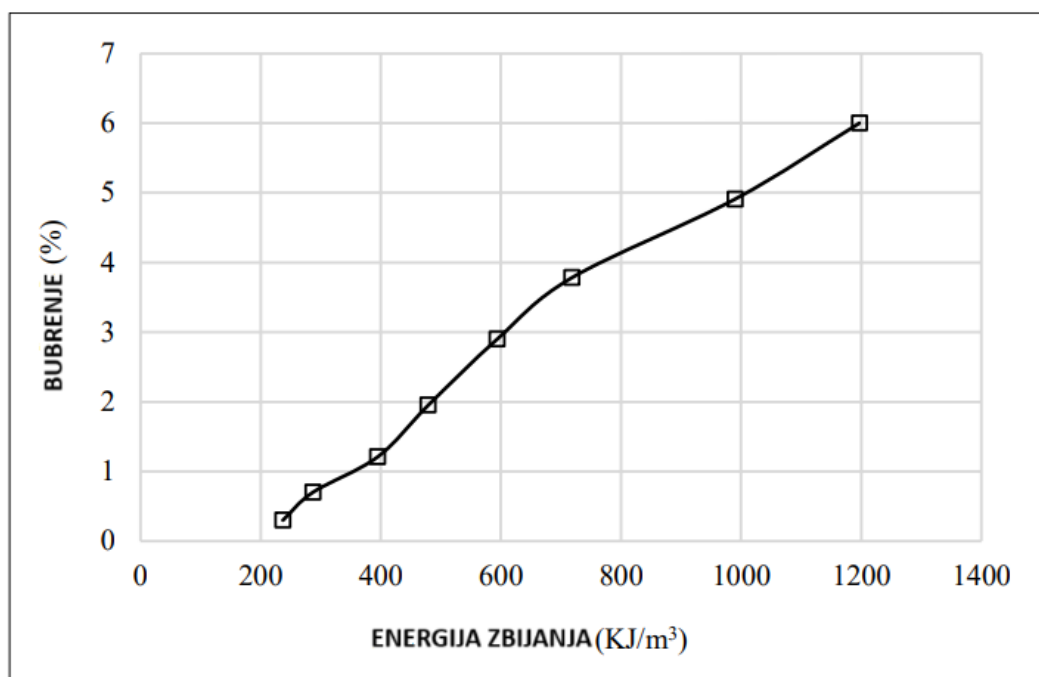
5.5. Utjecaj na potencijal bubrenja i skupljanja

Skupljanje je uglavnom uzrokovano gubitkom vode isparavanjem. Isparavanje se širi dublje u tlo zbog čega se dehidrirani površinski sloj tla skuplja. Rezultati istraživanja provedenih u Maleziji (2016.) pokazali su da tla zbijena korištenjem veće energije zbijanja pokazuju niže vrijednosti volumnog skupljanja zbog bližeg pakiranja čestica tla kao rezultata veće energije. Slično tome volumno skupljanje je veće za uzorke zbijane na vlažnoj strani optimuma. Raspon skupljanja u odnosu na količinu vlažnosti za standardni (SP) i modificirani (MP) Proctorov pokus prikazan je na dijagramu na slici 28. [17]



Slika 28. Dijagram skupljanja i vlažnosti [17]

Slika 29. prikazuje varijaciju postotka bubrenja s povećanjem energije zbijanja. Istraživanje je provedeno na uzorku bentonite gline zbog njegovog značajnog odgovora na različite uvjete vlage i energije zbijanja. Iz dijagrama uočava se povećanje potencijala bubrenja s povećanjem energije zbijanja. Kada se energija zbijanja povećala sa 237 KJ/m³ na 1197 KJ/m³, postotak bubrenja povećao se sa 0,3% na 6%. Zbijanje tla na suhoj strani od optimuma smanjuje propusnost tla, što rezultira povećanjem potencijala bubrenja. Također kada je tlo zbijeno na suhoj strani optimuma, privlačne sile među česticama su visoke i struktura tla je flokulirana i ona pruža veću otpornost na kompresiju od dispergne strukture. [18]



Slika 29. Dijagram energije zbijanja i potencijala bubrenja [18]

Tablica 3. Rekapitulacija utjecaja zbijanja na svojstva tla

KARAKTERISTIKE	SUHA STRANA	VLAŽNA STRANA
STRUKTURA	FLOKULIRANA	DISPERGIRANA
POSMIČNA ČVRSTOĆA	VEĆA	MANJA
STIŠLJIVOST	PRI VEĆIM NAPREZANJIMA	PRI MANJIM NAPREZANJIMA
PROPUSNOST	PROPUSNIJE	MANJE PROPUSNO
BUBRENJE/SKUPLJANJE	VEĆE BUBRENJE	VEĆE SKUPLJANJE

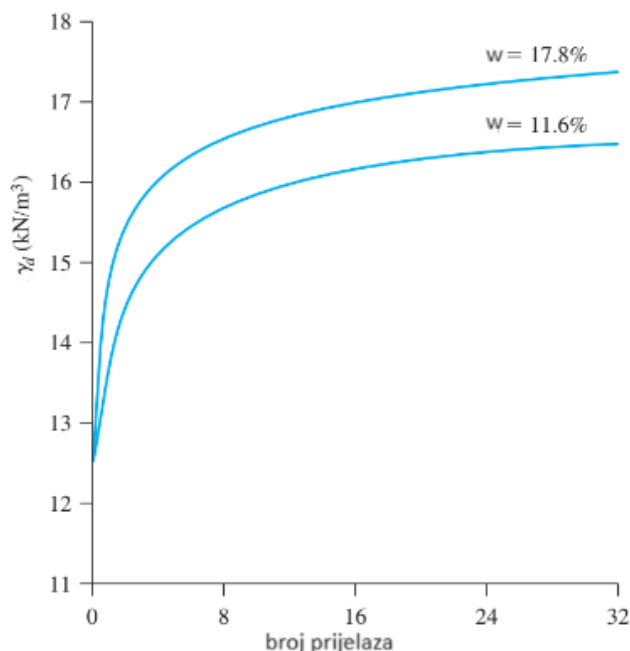
6. TERENSKA ISPITIVANJA

Zahtijevana zbijenost temeljnih slojeva cesta i nasipa može se postići mehaničkim sredstvima. Uvjeti ispitivanja na terenu se trebaju prilagoditi uvjetima prethodno dobivenim u laboratoriju. Postoje dva glavna čimbenika koja su nužna za postizanje što uspješnijeg zbijanja na terenu. Prvi čimbenik je prilagodba prirodne vlažnosti tla kako bi zbijanje na terenu bilo što učinkovitije, a drugi je osiguranje opreme za zbijanje prikladne za rad na gradilištu. Oprema koja se inače koristi za zbijanje sastoji se od glatkih vibro-valjaka, gumeni valjak s više kotača, vibracijski jež, vibro-ploča, nabijač, reverzibilna ploča i veliki valjak sa stopama. [12]

Za provedbu terenskog zbijanja potrebno je odrediti:

- debljinu slojeva,
- broj prijelaza,
- frekvenciju vibracijskog zbijanja.

Debljina slojeva obrnuto je proporcionalna pritisku zbijanja i ona ovisi o tipu tla koje se zbija. Pritisak nanesen na površini terena opada sa dubinom što rezultira smanjenjem stupnja zbijenosti tla. Koristi se 4 do 6 prijelaza za dinamičko, odnosno 4 do 8 prijelaza za statičko zbijanje. Dijagram na slici ispod pokazuje ovisnost suhe zapremine težine o broju prijelaza valjka. [9,13]



Slika 30. Ovisnost suhe zapremine težine o broju prijelaza valjka za zbijanje [13]

Iz slike 30. vidimo da se suha zapreminska težina povećava sa povećanjem broja prijelaza valjka do određene točke nakon čega postaje približno konstantna. Frekvencija zbijanja kreće se u granicama od 25 do 30 Hz za teške valjke. Učinak zbijenosti ovisi o stupnju zasićenosti tla. Nekoherentna tla se lakše zbijaju u potpuno suhom ili potpuno zasićenom stanju. Odabir odgovarajuće mehanizacije za zbijanje tla ovisi o namjeni i vrsti tla. [9]

6.1. Strojevi za zbijanje

Strojevi zbijaju tlo udarcima, vibriranjem, pritiscima, gnječenjem u veličini i omjeru ovisno o težini i izvedbi pojedinog stroja. Na slici 31. prikazana je primjenjivost strojeva u donosu na granulometrijski sastav tla koje treba zbiti. Krupnozrna i propusna tla kao što su šljunci i pijesci bolje se zbijaju gumeni valjci i vibro-valjci koji u tlu izazivaju vibracije uz manje posmične deformacije. Dok će se sitnozrna i slabo propusna tla bolje zbiti valjcima sa stopama i ježevima koji u tlu izazivaju gnječenje ili velike posmične deformacije. Učinak valjaka sa stopama veći je na dnu stope koja je utonula u tlo, nego pri samoj površini tla, a učinak glatkih valjaka opada sa povećanjem dubine. Jež i valjak sa stopama zbijaju od dubljih zona gdje se prema površini. Uski prostori uz betonske građevine zbijaju se žabama, vibropločama ili ručnim nabijačima. Nekoliko strojeva za zbijanje opisani su u nastavku. [7]



Slika 31. Prilagodna strojeva za zbijanje vrsti tla [2]



vibro-ploča *



nabijač



reversibilna ploča



valjak sa stopama



glatki vibro-valjak



veliki valjak sa stopama



gumeni valjak s više kotača



jež

Slika 32. Strojevi za zbijanje krupnozrnog tla (lijevo) i sitnozrnog tla (desno) [7]

6.1.1. Glatki vibro-valjak s kotačima

Sastoji se od šupljih čeličnih valjaka čija masa se može povećati dodavanjem vode ili pijeska. Postoje dva tipa glatkih vibro-valjaka. Prvi ima dva velika valjka, jedan iza, a drugi sličan ali manji ispred i koristi se za zbijanje temeljnih slojeva. Drugi ima pojedinačne velike valjke sprijeda i straga i koristi se za zbijanje smjesa za popločavanje. Glatki valjci pružaju 100% pokrivenost ispod kotača valjka, s pritiskom na tlo od 310 do 380 kN/m². [12,13,19]



Slika 33. Glatki vibro-valjak [12]

6.1.2. Pneumatski gumeni valjak s više kotača

Pneumatski valjci su u mnogo aspekata bolji od glatkih vibro-valjaka. Pružaju veće pritiske sa nekoliko redova blisko raspoređenih guma (četiri do šest u nizu). Pružaju pokrivenost od 70 do 80% ispod valjka, a kontaktni pritisak iznosi od 600 do 700 kN/m². Koriste se za zbijanje pjeskovitog i glinastog tla kombinacijom gnječenja i pritiska. [13]

6.1.3. Valjak sa stopama

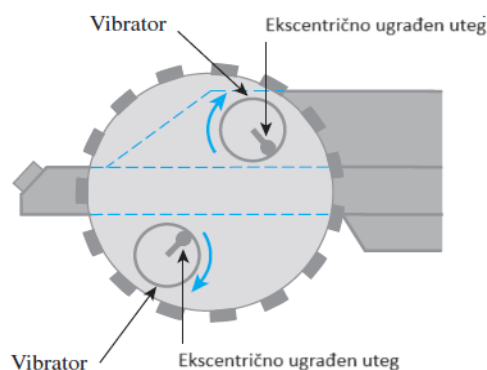
Ovakva vrsta stroja sastoji se od čeličnih šupljih valjaka s veliki brojem ispupčenja ili lopaticama koje izlaze prema van. Djelovanje lopatica uzrokuje značajno miješanje tla, povećavajući homogenost tla uz istovremeno razbijanje fragmenata krutog materijala. Valjak sa stopama je najučinkovitiji prilikom zbijanja glinastih tala sa kontaktnim pritiskom ispod valjka koji iznosi od 1400 do 7000 kN/m². [13,19]



Slika 34. Valjak sa stopama [12]

6.1.4. Vibracijski valjak

Sastoji se od čelične zakrivljene ploče na koju je ugrađen vibrator i učinkoviti su kod zbijanja zrnatog tla. Vibracija se proizvodi pomoću ekscentrično ugrađenog utega na rotirajućoj osovini. Slika 35. prikazuje princip rada vibracijskog valjka sa navedenim utezima. Vibrator može biti ugrađen na kotače glatkog vibro-valjka, pneumatske gumeni valjak ili na veliki valjak sa stopama (Slika 36.). [13,19]



Slika 35. Princip rada vibracijskog valjka [13]

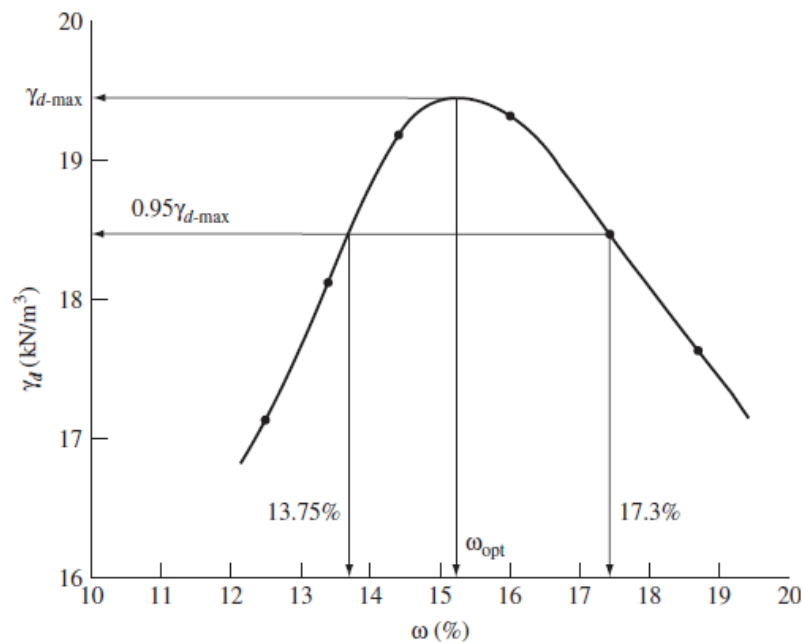


Slika 36. Vibrator na glatkom vibro-valjku [12]

Izvođač prilikom radova na terenu iz krivulje zbijanja iščitava maksimalnu vrijednost suhe zapremine težine te pripadnu optimalnu vlažnost tj. relativnu zbijenost (R). Relativna zbijenost definirana je formulom:

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(teren)}}{\gamma_{d(max-lab)}} \cdot 100$$

gdje je $\gamma_{d(teren)}$ suha zapreminska težina zbijenog tla na terenu, a $\gamma_{d(max-lab)}$ je maksimalna suha zapreminska težina dobivena standardnim ili modificiranim Proctorovim pokusom. Potrebno je naglasiti pomoću koje od ta dva pokusa je dobivena relativna zbijenost. Potrebna relativna zbijenost koju izvođač mora postići na terenu mora biti od 90 do 95 % maksimalne suhe zapremine težine određene u laboratoriju. Jako je skupo i teško postići da je suha zapreminska težina na terenu jednaka maksimalnoj suhoj zapreminskoj težini u laboratoriju i nije dovoljno odrediti samo odgovarajuću relativnu zbijenost nego se za nju mora odrediti odgovarajuća količina vlažnosti. Krivulja zbijanja ima oblik zvona i zbog toga može imati dvije različite vrijednosti vlažnosti za istu suhu zapreminsku težinu. Slika 37. pokazuje da za vlažnost $w=13.75\%$ ili $w=17.3\%$ dobije se vrijednost suhe zapremine težine $\gamma_d = 18.5 \text{ kN/m}^3$ i relativna zbijenost $R=95\%$. [5]



Slika 37. Dijagram [5]

Za zbijanje zrnatih tala koristi se relativna potrebna relativna gustoća D_r ili potrebna relativna zbijenost. Relativna gustoća definirana je formulom:

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{d(teren)} - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}} \right) \left(\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_{d(min)}} \right)$$

Usporedbom sa formulom za određivanje relativne zbijenosti R dobije se:

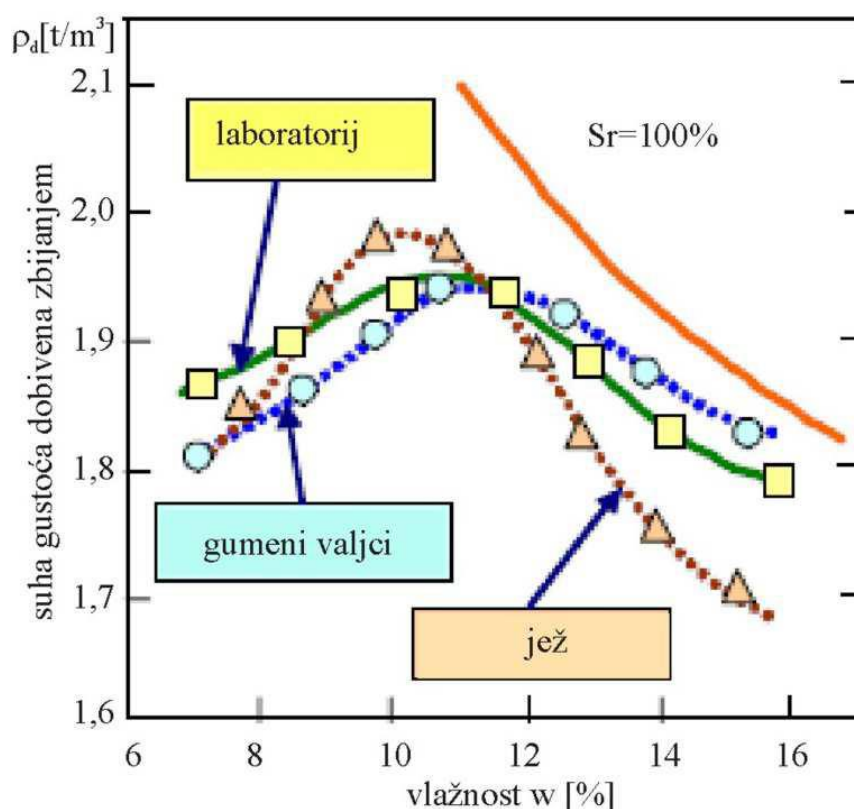
$$R = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)} ; \text{ gdje je } R_0 = \frac{\gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)}}$$

Znanstvenici Lee i Singh (1971.) na temelju promatranja 47 vrsta tla osmislili su korelaciju između relativne zbijenosti R i relativne gustoće D_r za granulirana tla:

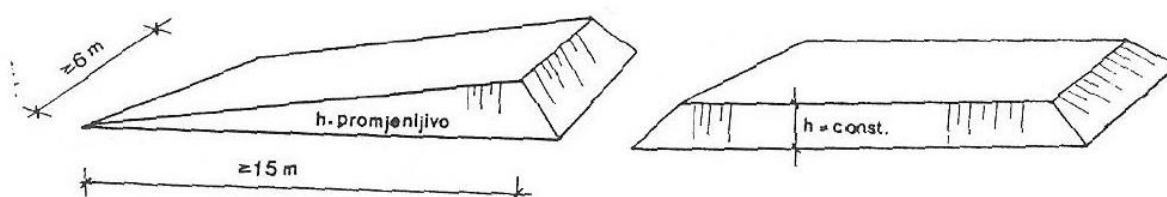
$$R = 80 + 0.2D_r$$

7. PROBNA POLJA

Rezultati zbijanja na terenu uspoređuju se sa rezultatima Proctorovog pokusa kao što je prikazano na slici 39. Radi nepostojanja direktne veze između energije zbijanja u Proctorovu pokusu i broja prolaska stroja za zbijanje za odabir optimalne mehanizacije koriste se tzv. probna polja (Slika 38.). Rezultati Proctorovog pokusa i probnih polja koriste se za određivanje tehničkih karakteristika za ugradnju zemljanog materijala. Tehničke karakteristike trebaju sadržavati vrstu materijala, granulometrijski sastav, donju i gornju granicu vlažnosti, minimalno dozvoljenu zapreminsku težinu ugrađenog materijala, potreban broj prelaza stroja za zbijanje, maksimalnu dopuštenu debljinu sloja pri zbijanju i osnovne osobine sredstava za zbijanje. Potrebno je postići 90-95 % maksimalne gustoće dobivene Proctorovim pokusom. [2,9]

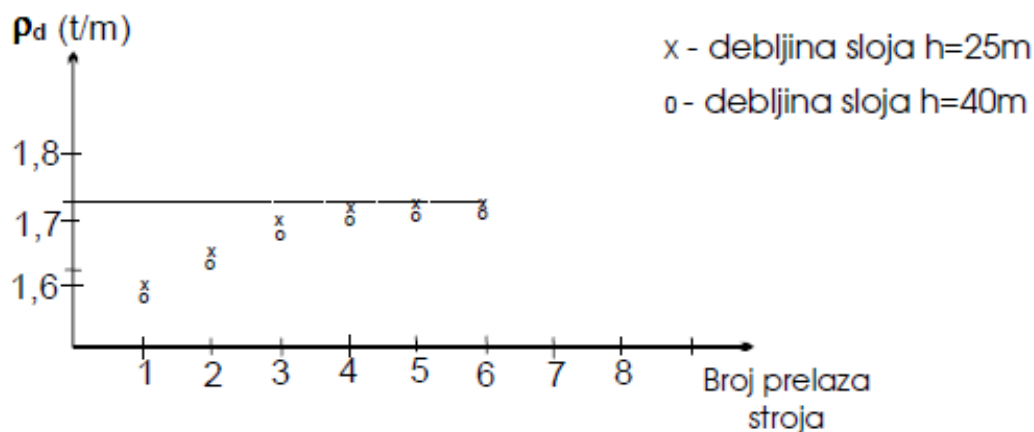


Slika 38. Usporedba rezultata zbijanja u laboratoriju i na terenu ježem i gumenim valjcima za istu vrstu tla [2]



Slika 39. Probno polje [10]

Za izvedbu probnog polja koristi se ista tehnologija zbijanja i razastiranja koja će se kasnije koristiti za zemljane radove. Podloga probnog pola mora biti ravna i uvaljana, materijal se nanosi u slojevima, razastire se dozerom, a zbjija se valjcima ili ježevima. [9]



Slika 40. Prikaz ispitivanja na probnom polju [9]

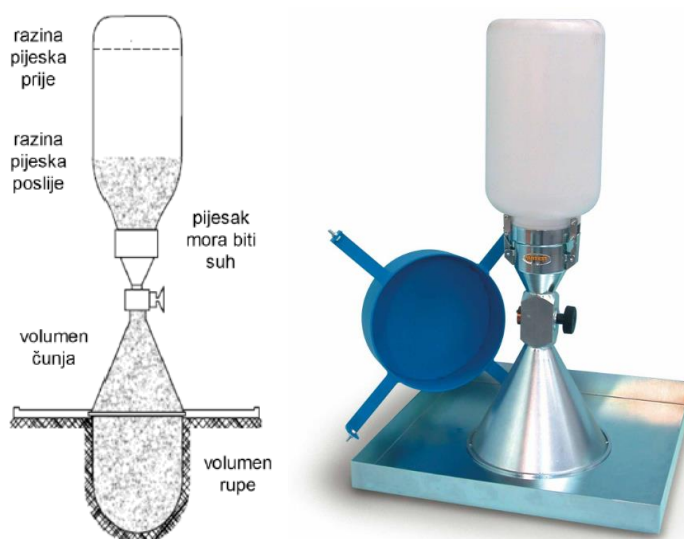
8. KONTROLA ZBIJENOSTI

Zbijenost tla na terenu mora biti takva da se dobije željena razina suhe zapreminske težine sa optimalnom razinom vlažnosti. Kvaliteta zbijenosti polja provjerava se na svakih 1000 m² do 2000 m² površine netom zbijenog tla mjerenjem in-situ suhe zapreminske težine i vlažnosti zbijenog tla. Ukoliko tražena zbijenost nije postignuta nastavlja se zbijanje tla dodatnim prijelazima strojeva. Terenski uređaji i metode za kontrolu zbijenosti ugrađenog tla na terenu jesu:

1. Metoda pješčanog konusa (eng. Sand Cone Method),
2. Uređaj s gumenim balonom (eng. Rubber balloon method),
3. Nuklearna metoda (eng. Nuclear method) i
4. Proctorova igla ili Proctorov penetrometar (eng. Proctor Needle Method) [12]

8.1. Metoda pješčanog konusa - Sand Cone metoda

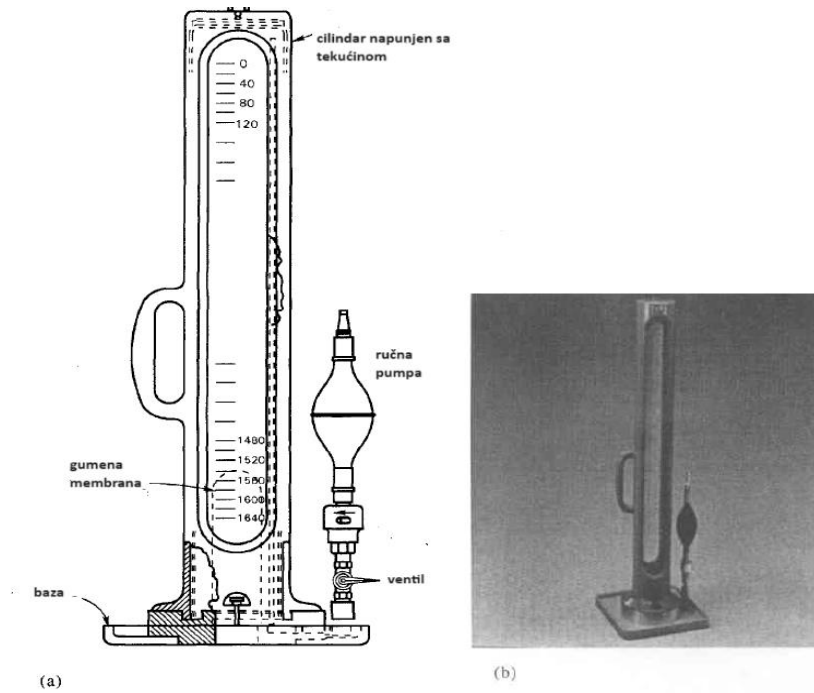
Metoda pješčanog konusa relativno je jednostavna i jeftina u usporedbi sa drugim metodama i upravo je to razlog zašto se vrlo često koristi u izgradnji nasipa za ceste, nasipa, temelja i zatrpavanja potpornih zidova. Uređaj za provedbu pokusa sastoji se od staklene ili plastične posude sa metalnim konusom koji je pričvršćen za njega. Slika 41. prikazuje posudu u kojoj se nalazi jednoliko graduiran suhi pijesak poznate gustoće i uređaj s pješčanim konusom. Za primjenu uređaja s pješčanim konusom potrebno je iskopati malu rupu promjera 10 cm u zbijenom tlu. Dubina rupe treba biti približna debljini zbijenog sloja. Iskopano tlo se izvaže i odredi se njegova vlažnost. Pijesak se ubacuje u iskopanu rupu otvaranjem ventila sve dok se rupa i konus ispod ventila ne budu potpuno ispunjeni pijeskom. Nakon toga ventil se zatvara. Preko količine pijeska koji je ušao u rupu i konusa uređaja na vrhu rupe ispod ventila odredi se volumen rupe. Preko tako izmjenog volumena i težine iskopanog tla odredi se njegova gustoća. Iz izmjerene vlažnosti iskopanog tla dobije se tražena suha gustoća. [7,12]



Slika 41. Uređaj s pješčanim konusom: shematski dijagram(lijevo) [11] i uređaj(desno) [20]

8.2. Uređaj s gumenim balonom

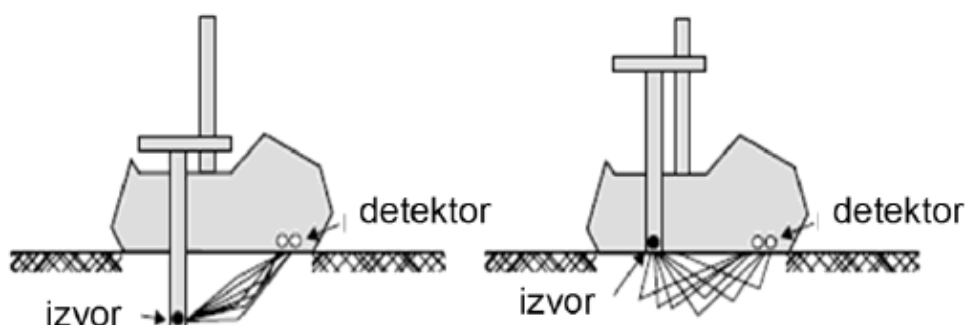
Primjena uređaja s gumenim balonom je vrlo slična načinu korištenja uređaja s pješčanim konusom. Volumen iskopane rupe u tlu određuje se pomoću kalibriranog cilindra napunjenog sa vodom ili uljem za punjenje gumenog balona koji se pritisne za stijenke rupe. Membrane se pomiču kako bi ispunile rupu. Volumen se iščitava direktno na cilindru. Slika 42. prikazuje opremu. [12]



Slika 42. Uređaj s gumenim balonom a) shematska skica uređaja b) fotografija uređaja [9]

8.3. Nuklearna metoda

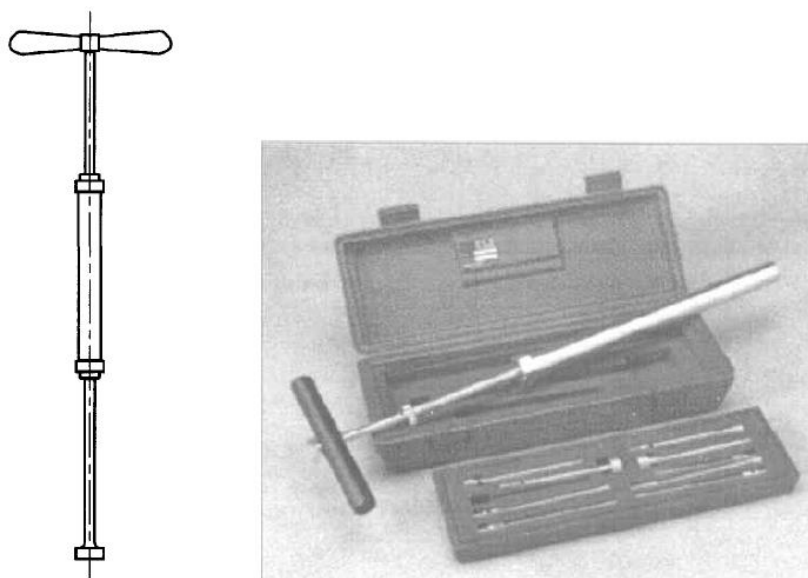
Nuklearni densimetar je suvremeni instrument za brzo i precizno mjerenje količine vlage i gustoće tla (Slika 43.). Mjerenja densimetrom ne oštećuju materijal i ne zahtijevaju fizičku ili kemijsku obradu materijala koji se mjeri. Densimetar može mjeriti u izbušenim rupama ili na površini terena. Vrlo je lak za korištenje, jedan operater je dovoljan za dobivanje trenutne i točne in-situ gustoće i količine vlage na terenu. To je glavna prednost ovakvog uređaja. Nuklearni densimetar sastoji se od dva osnovna elementa: radioaktivni izvor (radioaktivni cezij) i detektor radioaktivnog zračenja. Radioaktivni izvor može se postaviti na površinu zbijenog terena ili se ugradi u izbušene rupe. Gustoća se odredi mjerenjem intenziteta gama zraka kroz tlo, a emisija zračenja koju prikuplja detektor obrnuto je proporcionalna gustoći tla. Densimetar prije korištenja mora bit podešen prema poznatoj gustoći na istoj vrsti tla. Pri određivanju vlažnosti koristi se jaki neutronske izvor. Emisija neutrona odbija se od čestice vode te njih prikuplja detektor zračenja, a odbijanje je veće što je veća količina vlažnosti tla. Odbijanje također treba podesiti prema tlu poznate vlažnosti. Prisutnost organskog tla i velikih kamenja u tlu uvelike utječe na pouzdanost pokusa. [7,12]



Slika 43. Nuklearni densimetar [7]

8.4. Proctorova igla ili Proctorov penetrometar

Metoda Proctorove igle razvijena je za određivanje čvrstoće uzorka sitnozrnog tla, za brzu provjeru zbijenosti ugrađenog sloja tla na terenu i za brzo određivanje količine vlage u tlu, a sastoji se od igle pričvršćene na klip s oprugom i šipke koja je kalibrirana za očitavanje otpora prodiranja igle. Čvrstoća se dobiva zabijanjem uređaja u uzorka tla određene vlažnosti nakon zbijanja te se na taj se način dobije veza vlažnosti i otpora tj. čvrstoće pri utiskivanju Proctorove igle. Otpor se mjeri u kg/cm^2 . Na igli se nalazi niz nosivi točkica tj. iglica pomoću kojih se može mjeriti širok raspon otpora prodiranja. Raspored iglica je raspoređen kako slijedi: 6,45; 4,84; 3,22; 2,15; 1,29; 0,65; 0,32; 0,22 i 0,16, i one se postavljaju na vrh šipke. Na šipki se nalazi kalibrirana opruga pomoću koje se očitava sila potrebna da se igla utisne na dubinu od minimalno 8 cm brzinom od 1,7 cm/sec. Postupak se ponavlja minimalno tri puta, a za vrijednost sile uzima se prosjek iz tri mjerenja. Otpornost prodiranju i čvrstoća tla dobiva se na način da se izračunata prosječna sila podijeli s poznatom površinom korištene igle, a rezultati pokusa prikazuju se krivuljom veze vlažnosti i čvrstoće. Za definiranje krivulje potrebno je imati minimalno tri mjerenja s različitim vlažnostima. Nakon kalibracije na uzorku sa optimalnom vlažnošću ispitanom u laboratoriju, koristi se za brzo provjeru zbijenosti ugrađenog sloja tla na terenu, a rezultat se dobiva odmah i nije potrebno čekati rezultate iz laboratorija za nastavak rada. [12,21]



Slika 44. Proctorova igla (lijevo) i Proctorov penetrometar set (desno) [12]

Ova metoda je dosta brza i pouzdana prilikom ispitivanja sitnozrnih kohezivnih tala, međutim prisutnost šljunka i sitnog kamenja uvelike smanjuje pouzdanost metode. Također metoda nije baš precizna u pijesku bez kohezije. [12]



Slika 45. Položaj ispitivača i posude tijekom pokusa Proctorovom iglom [21]

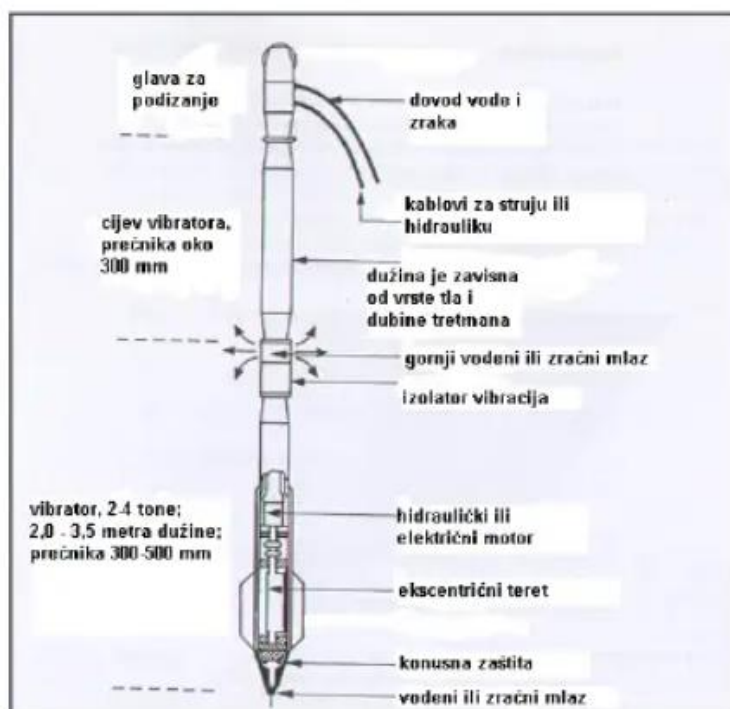
9. ZBIJANJE DUBLJIH SLOJEVA TLA

Nekoliko metoda zbijanja specijalno je razvijeno za dubinsko zbijanje i koriste se prilikom zbijanja velikih površina terena. Među njima su:

1. vibroflotacija,
2. dinamičko zbijanje i
3. miniranje. [12]

Metode su pobliže objašnjene u sljedećim odjeljcima.

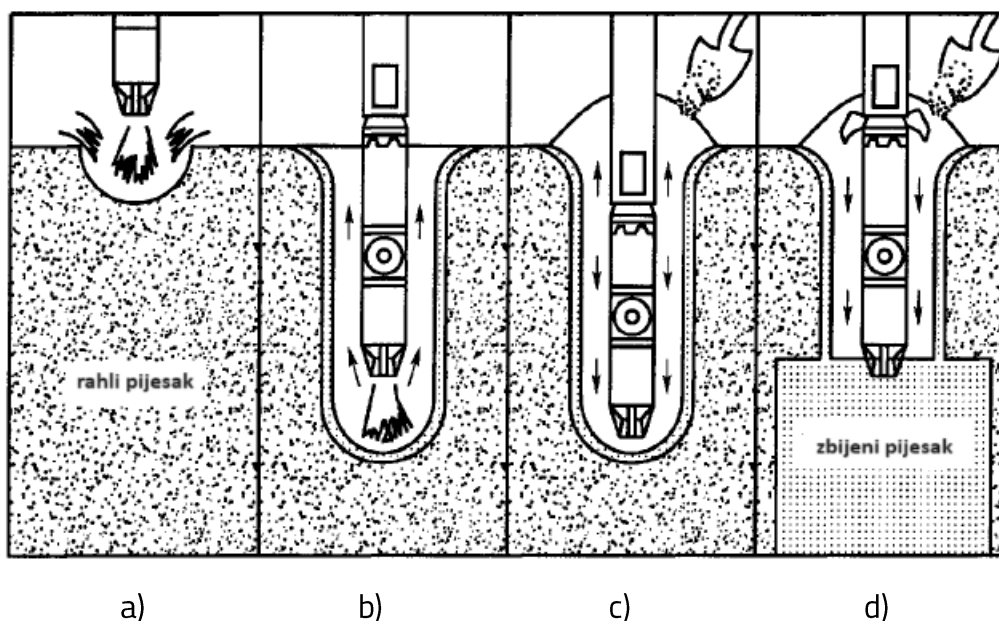
9.1. Vibroflotacija



Slika 46. Vibrator za vibroflotaciju [22]

Vibroflotacija je tehnika koja se koristi isključivo za zbijanje debelih slojeva zrnatog tla na način da se u tlo ubaci dubinski vibrator (vibroflot, dužine oko 2 m). Vibroflot se sastoji od glave za podizanje, vibrirajuće jedinice i dovodne cijevi (Slika 46.). Postoji nekoliko vrsta vibratorske opreme koji se razlikuju ovisno o njihovoj amplitudi koja iznosi od 5-10 mm. Dubinski vibratori imaju amplitudu do 23 mm. [22]

Vibroflot je učvršćen na cilindričnu cijev, kojom se upravlja sa samohodnim kranom, te sadrži vodene mlaznice na dnu i vrhu za izlaz vode pod pritiskom kojim se naizmjenično razlavljuje tlo i zbijaju ubačeni materijal. Uređaj unutar sebe ima ekscentrični teret kojim se izaziva centrifugalna sila, što omogućuje horizontalno vibriranje. Zbijanje vibroflotom u fazama prikazano je na slici 48. [22]



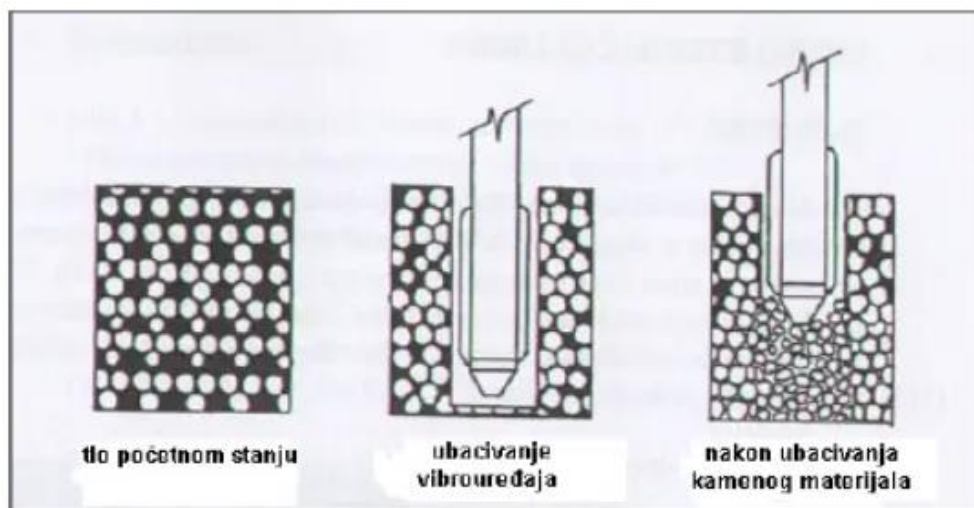
Slika 47. Faze zbijanja vibroflotacijom [12]

Vibroflot se utiskuje u tlo uz pomoć donjih mlaznica vode pod pritiskom od 350 do 400 kN/m² uzorkujući privremenu likvefakciju gornjeg sloja tla (Slika 47.a). Vodeni mlaz stvara povoljne uvijete za sve dublje prodiranje vibroflota u materijal (Slika 47.b). Nakon što vibrator dosegne projektiranu dubinu, pritisak vode prebacuje se sa donjih na gornje mlaznice, a rupa oko vibratora se zatrpava sa odgovarajućim rastresitim materijalom (npr. pijesak, šljunak)(Slika 47.c). Kako tlo oko vibratora postaje sve gušće energija potrebna za rad vibroflota se povećava što se očituje na mjerачu tlaka. Kada na mjerачu nema povećanja energije znači da je tlo postiglo svoje najgušće stanje sa korištenom opremom (Slika 47.d). Zatim se vibroflot izvlači u malim koracima od oko 0,3 m tijekom koji se okolni materijal dodatno zbjija vibriranjem i stvara se kompaktni stup tla. Za što bolji učinak zbijanja u svakom koraku tijekom izvlačenja potrebno je vibroflot zadržati neko vrijeme prije nastavka izvlačenja. Prosječno vrijeme potrebno za zbijanje tlo do 10 m dubine iznosi otprilike 30 minuta. [23]

Vibrirajuća jedinica izaziva horizontalne vibracije svladavajući trenje među česticama te se tlo na taj način sliježe u tlo veće relativne gustoće. Ova metoda efikasna je za povećanje gustoće naslaga pijeska za dubine do 30 m. Zbijanje se vrši na razmacima od 2 m kako bi se osiguralo 70 % relativne gustoće na cijelom području. Razmaci mogu biti veći ako se zbjija krupni pijesak. Vibroflotacija primjenjuje se za smanjenje rizika od likvefakcije u slušaju potresa gdje se dostižu dubine do 30 m, a ponekad i do 50 m. [12,22]

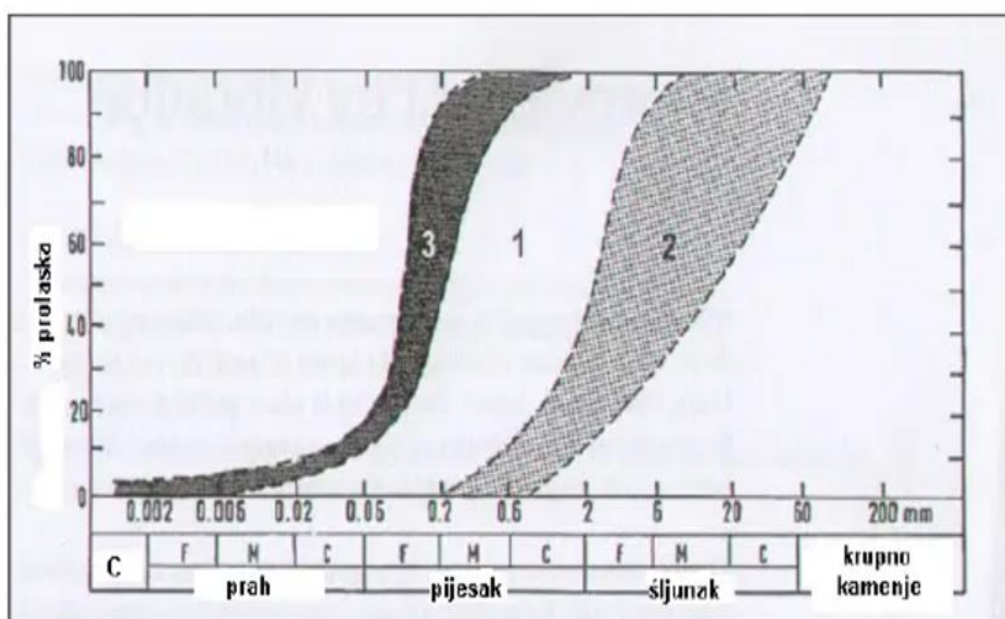
Kod korištenja vibroflotacije za zbijanje tj. zamjenu mekog kohezivnog tla i organskog tla sa šljunkom kao materijalom za zatrpavanje, dobiva se zgusnuti kameni stup koji učinkovito

učvršćuje mekše materijale i služi kao nosivi pilot za temelje. U početku cijelo opterećenje preuzimaju stupovi, a nakon nekog vremena stupovi se šire i potiskuju okolnu masu tla. Kapacitet nosivosti kamenog stupa u toj fazi ovisi o krutosti koju pruža okolno tlo. [12]



Slika 48. Princip izrade vibro-kamenih stupova [22]

Pogodnost tla za vibrozbijanje prikazan je na slici na dijagramu ispod. U dijagramu na slici 50. prikazano je da ZONA 1 odnosno rahli pijesci su najpovoljniji za zbijanje vibroflotacijom. Zatim ZONA 2 koja predstavlja zbijeni pijesak i šljunak. ZONA 3 je najteže tlo za zbijanje jer ima malu brzinu prolaska čestica. Glina i organski materijal smanjuju efikasnost vibroflota. [22]



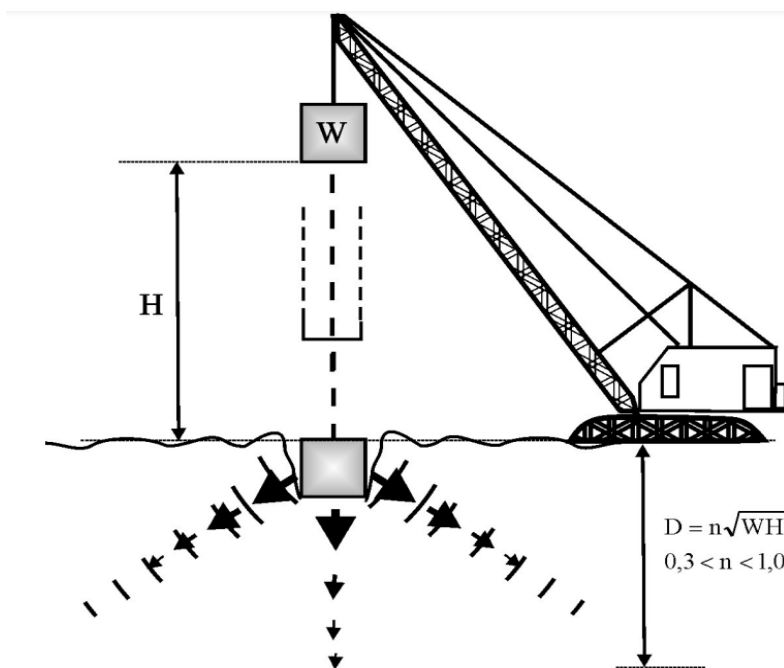
Slika 49. Pogodnosti tla za vibrozbijanje [22]

9.2. Dinamičko zbijanje

Dinamičko zbijanje jedno je od najjednostavnijih metoda zbijanja rastresitog tla. Ovaj proces prvenstveno se sastoji od ispuštanja utega velike težine nekoliko puta na tlo u redovitim intervalima. Uteg može biti blok od betona ili čelika. Težina utega varira u rasponu od 80 do 360 kN, a neki mogu biti teški i do 500 kN. Uteg se diže na visinu od 7.5 do najviše 50 m pomoću dizalice s koje se ispušta da slobodno pada na površinu tla gdje ostavlja velike kraterе za sobom (Slika 50.). Valovi naprezanja koji nastaju padom utega uzrokuju preslagivanje čestica u gušći položaj. Proces se zatim ponavlja ili na istoj lokaciji ili uzastopno na drugim dijelovima područja koje treba zbiti. Kada je izvršen potreban broj ponavljanja po cijeloj površini smatra se da je zbijanje pod dubini završeno. Ovom metodom najveća dubina poboljšanja predviđena je u gornje dvije trećine, a sa povećanjem dubine razina poboljšanja opada. Međutim tlo blizu površine terena je u prilično poremećenom stanju i ono se mora izravnati i zbiti koristeći prikladniju opremu za zbijanje površinskih slojeva. Postignuti stupanj zbijenosti na određenoj lokaciji ovisi o težini utega, visini na koju se uteg diže i razmaku lokacija na koju se ispušta uteg. Za procjenu potrebne energije dinamičkog zbijanja koristi se Menardova formula:

$$D \cong n \cdot \sqrt{WH}$$

Gdje je W je masa utega u tonama, H je visina pada utega u metrima, a n je iskustveno od 0,3-1. Dubina utjecaja D prikazana je na slici 51.[12]



Slika 50. Učinak zbijanja [24]

Kao što je već spomenuto, nakon udaraca utega od površinu tla na tlu ostaju krateri koji mogu biti duboki i do 2 m (Slika 51.). Oni se moraju zatrpati i zbiti na traženu mjeru kako je definirano u projektu. Zatrpavanje se može izvesti nasipavanjem nekoherentnog materijala uz razgrtanje ili zbijanje okolnog tla u rupe. Zbijanje se vrši valjcima, vibrovaljcima ili drugim strojevima za površinskog zbijanje. [21]



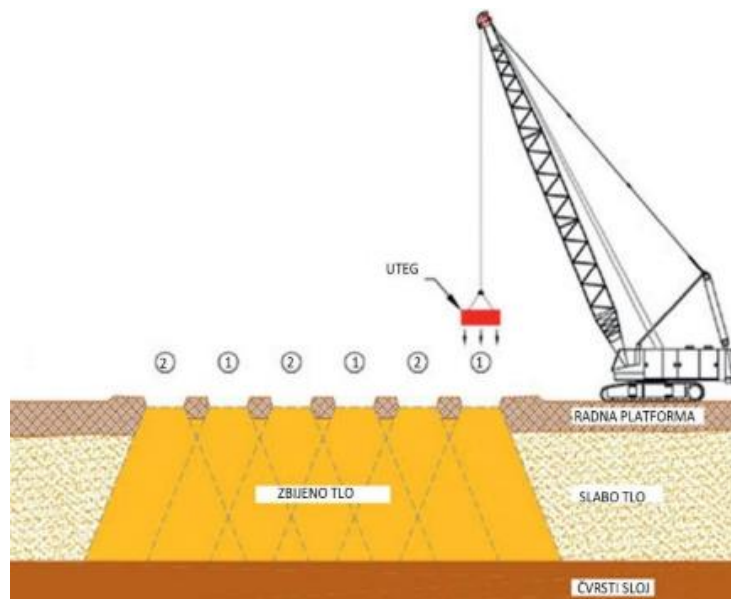
Slika 51. Krater nakon dinamičkog zbijanja [13]

Dinamičko zbijanje pretežno se koristi za zbijanje starih hidrauličkih nasipa, prašinih pijesaka u obalnim i aluvijalnim naslagama, prašinih glina, odlagališta jalovine i komunalnog otpada. Također je učinkovita kada postoji sumnja da se u podzemlju nalaze kaverne, ponori ili vrtače. Najbolje rezultate metodom dinamičkog zbijanja dobiju se kada tlo ima visoku vodopropusnost, nisku zasićenost i kad je dobro isušeno. Jer pri visokim razinama podzemne vode u dohvat utjecaja udara potrebno je paziti na disipaciju pornih tlakova koji se pojavljuju prilikom pada utega. Metoda nije pogodna za zasićena glinasta tla. Na slici ispod prikazan je prostorni raspored dinamičke stabilizacije tla.[21]

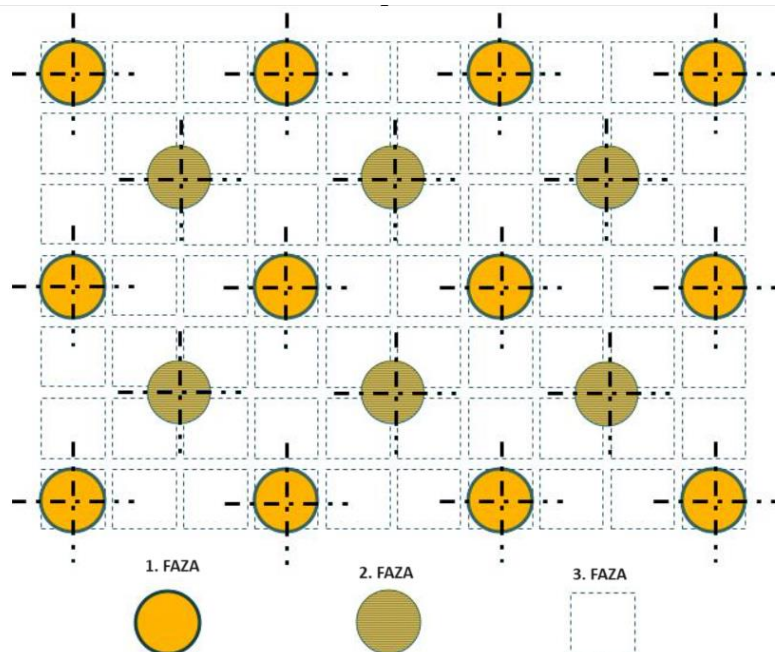


Slika 52. Primjer izvedenog dinamičkog zbijanja u prostoru [25]

Dinamičko zbijanje izvodi se u pravokutnom ili trokutastom uzorku najčešće u dvije faze, premda postoje i slučajevi kada može postojati i treća faza. U prvoj fazi zbijaju je duboki slojevi tla. Druga faza odnosi se na zbijanje srednje dubokih slojeva, a u trećoj fazi se poravnavaju i zbijaju površinski slojevi tla. Primarne lokacije pada utega raspoređene su u mrežu od 3,10 do 6,20 metra. Razmak između točaka udara ovisi o položaju razine podzemne vode, propusnosti tla i dubini stišljivog sloja. Širi razmak mreže koristi se za zbijanje dubljih slojeva, a manji razmak mreže koristi se za zbijanje plićih slojeva tla (Slika 53.). [25,26]



Slika 53. Primjer rastera za dinamičko zbijanje [25]



Slika 54. Faze dinamičkog zbijanja [26]

9.3. Miniranje

Miniranje je brza i isplativa metoda koja je poznata dugi niz godina i uspješno se koristi u mnogim projektima diljem svijeta za povećanje gustoće rahlog i nekoherentnog tla primjenom eksploziva na površini terena ili češće u bušotinama. Proces započinje sa izvedbom bušotina u tlu u koje se ugradi eksploziv, nakon čega se bušotina prekrije određenom količinom šljunka na način da nakon eksplozije šljunak utone u novostvoreni prostor. Deponiranje se vrši po određenom rasporedu paljenja. Eksplozijom se događa slom u rahlim materijalima i njihovo preslagivanje u zbijeniju strukturu. [13,25]

Metoda daje dobre rezultate u saturiranim čistim pijescima gdje dinamički valovi lome početnu strukturu tla izazivajući likvefakciju i preraspodjelu u gušću strukturu. Ako se radi o zbijanju o boljim pijescima tj. sa pijescima sa većom početnom relativnom gustoćom (D_r) potrebna su veća punjenja ili je potrebno zbijanje na do većih dubina. Na temelju ranijih istraživanja pri ojačanju tla miniranjem predložene su slijedeće preporuke:

- 1) Potrebno je punjenje od 1 do 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) raster bušotina je od 5 do 15 m,
- 4) broj serija: obično od 1 do 5 serija u jednom nizu, a 2 do 3 u razmaku od nekoliko sati ili dana,
- 5) ukupne količine eksploziva: 8 – 150 g/m³, uobičajeno 10 – 30 g/m³,
- 6) slijeganje: 2 – 10 % debljine sloja. [9]

Iskustvo pokazuje da su ponovljene eksplozije malih punjenja učinkovitije od jednog velikog punjenja za postizanje željenog rezultata. Bočni razmak bušotina varira od oko 3 do 9 metara, a eksploziv se postavlja na dubinu od oko dvije trećine debljine sloja tla koji se želi zbiti. Eksplozijom se pobuđuju potresni valovi unutar same mase tla i oni izazivaju flotaciju čestica. Obično je potrebno 3 do 5 uspješnih detonacija za postizanje željene zbijenosti. Prema postojećim podacima učinak miniranja na površini sličan je učinku dinamičkog zbijanja, gdje 1 kg eksploziva odgovara energiji udarca utega mase 5 tona koji slobodno pada s visine od 100 m. [13,24]

Maksimalna dubina primjene miniranja nije određena, ali je metoda korištena i na dubinama većim od 30 metara sa zadovoljavajućim rezultatima. Nakon miniranja slijeganje na površini terena se zapažaju odmah, a promjena svojstva se zapaža tek nekoliko tjedana nakon detonacije. Takva pojava nastaje očvršćivanjem materijala i postizanjem stabilnog stanja u novoj strukturi čestica. Sa daljnjim detonacijama slijeganja na površini su sve manja. [9]



Slika 55. Ukopani eksploziv [25]



Slika 56. Učinak miniranja na površini [24]

10. ODABIR MATERIJALA ZA OPTIMALNO ZBIJANJE NASUTIH GRAĐEVINA

Projektom nasutih građevina treba predvidjeti uvjete koje je potrebno zadovoljiti, te njihovu kontrolu. Odabirom tih uvjeta traži se balans između troškova i kvalitete izvedbe, pa ako se traži veća zbijenost tla, skuplji su terenski radovi na zbijanju. Projektirana zbijenost obično se iskazuje preko relativne zbijenosti (C_R) i odgovarajuće količine vlažnosti, pri čemu treba označiti tip i standard pokusa za maksimalnu suhu gustoću na koju se odnosi parametar relativne zbijenosti. Pripremljenim uzorcima u laboratoriju se prema tom kriteriju određuju mehanička svojstva tla, ponajprije čvrstoća, krutost i vodopropusnost, a preko tih svojstava se dokazuje pouzdanost projektom definirane konstrukcije nasute građevine s obzirom na moguća granična stanja. Tijekom izvedbe nasutih konstrukcija ne izvode se masovne kontrole projektiranih mehaničkih karakteristika tla jer se pretpostavlja da tlo koje je ugrađeno pri projektiranoj vlažnosti i zbijenosti ima takva svojstva. Upravo zato je nužno da zbijenost i vlažnost odgovaraju traženim vrijednostima definiranim projektom. Tablica 4. prikazuje neke standardne veličine zbijenosti, količine vlažnosti, odgovarajući strojevi za zbijanje, te preporučljive visine slojeva koji se zbijaju. [7]

Tablica 4. Uobičajeni kriteriji zbijanja nasipa [2]

karakteristika		krupnozrna tla	sitnozrna tla
relativna zbijenost C_R (%) prema modificiranom Proctorovom pokusu	granično moguće zbijanje	98 % ($I_D \sim 90$ %)	96 % - 97 %
	granica mogućeg zbijanja bez posebnih problema	95 %	95 %
	nasipanje suho bez zbijanja	88 % - 91 %	-
	nasipanje vlažno bez zbijanja	80 % - 85 %	-
	potrebno za većinu nasipa (za brane se često traže nešto veće vrijednosti)	90 % - 92 %	93 %
	potrebno za prevenciju likvefakcije	95 % ($I_D \sim 70 - 75$ %)	-
obično dopustivi raspon vlažnosti oko optimalne		-	± 2 % (< ± 1.5 % teško postići)
kontrola zbijenosti		suha gustoća	suha gustoća i vlažnost
utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja		mali	veliki
utjecaj strukture tla nakon zbijanja na čvrstoću, krutost i vodo-propusnost		mali	veliki
strojno zbijanje		glatki vibro-valjci	valjci sa stopama ili ježevi (bolje, ali skuplje)
„ručno“ zbijanje		vibro-ploče, reverzibilne ploče	nabijači
tipične visine nasipanja slojeva (okvirni rasponi, ovisi o vrsti i težini stroja, broju „prelaza“, amplitudi i frekvenciji vibracija)	dobro zbijanje, uobičajeno	15 - 30 cm	15-20 cm
	dobro zbijanje, vrlo teški strojevi	do 60 cm (do 150 cm za kameni nasip)	do 30 cm
	srednje zbijanje	-	do 45 cm
	ručno zbijanje	15 cm	15 cm
	dozvoljena veličina najvećeg zrna	1/3 visine sloja	

Tablica 5. prikazuje kriteriji zbijanja nasipa Hrvatskih cesta i Hrvatskih autocesta (OTU 2001). Kriteriji iz tablice koriste se za kontrolu zbijanja ili preko relativne zbijenosti obzirom na maksimalnu zbijenost na standardnom Proctorovom pokusu ili prema postignutoj krutosti iz ispitivanja probnom pločom. [7]

Tablica 5. Kriteriji zbijanja nasipa prema OTU (2001) [7]

Karakterisitka	zemljani materijali (gline, prašine, glinoviti pijesci i slični materijali osjetljivi na prisutnost vode)	miješani materijali (glinoviti šljunci, zaglinjene kamene drobine, trošne stijene-škriljci, lapor, flišni materijali i slično - manje osjetljivi na djelovanje vode)	kameni materijali (materijal dobiven miniranjem stijene, kamena drobina i šljunci)
visina sloja za zbijanje (cm)	30-50	30-60	50-100
strojevi za zbijanje	ježevi, glatki valjci na kotačima s gumama, vibro ploče	valjci	vibro valjci, vibro nabijači, kompaktori
granulacija, $U =$ d_{60}/d_{10}	veći od 9	veći od 9	veći od 4
najveće zrno	-	-	½ debljine sloja, ne veće od 40 cm
sadržaj organskih tvari	do 6 %	-	-
najveća optimalna vlažnost (po standardnom Proctorovom pokusu)	manja od 25 %	-	-
najmanja suha gustoća	naspi do 3 m: veća od 1.5 Mg/m ³ naspi viši od 3 m: veća od 1.55 Mg/m ³	-	-
najviša granica tečenja	65 %	-	-
najviši indeks plastičnosti	30 %	-	-
najveće bubrenje pod vodom nakon 4 dana	4 %	-	-
raspon vlažnosti oko optimalne (po standardnom Proctorovom pokusu)	±2 %	-	-
najmanja relativna zbijenost (C_R) u odnosu na standardni Proctorov pokus ili slijedeće	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %
ili najmanji edometerski modul određen probom pločom promjera 30 cm	donji dio nasipa: 20 MPa gornjih 2 m nasipa: 25 MPa	donji dio nasipa: 35 MPa gornjih 2 m nasipa: 40 MPa	donji dio nasipa: 40 MPa gornjih 2 m nasipa: 40 MPa
kontrolna ispitivanja	na svakih 2 000 m ² površine ugrađenog sloja		

Tehnički se svako tlo može ugraditi u nasip, nemogućnost zadovoljenja projektiranih kriterija čine neka tla pogodnija za ugradnju u nasip u određenim okolnostima od drugih. Odabir materijala za ugradnju ovisi o udaljenosti i raspoloživosti materijala od mjesta iskopa, količini materijala i drugim ekonomskim i tehnološkim okolnostima. Potrebno je odgovarajućim analizama u projektu dokazati da je materijal predviđen za ugradnju u nasip zadovoljava predviđene karakteristike upotrijebljene kod dokazivanja pouzdanosti buduće građevine uzimajući u obzir granična stanja. Karta relativnih pogodnosti pojedinih vrsta, prikazana na tablici 6., koristi se prilikom izbora raspoloživih vrsta tla kod izgradnje neke građevine. Podaci iz tablice su okvirni pokazatelji koji se moraju potvrditi za svaki pojedini slučaj ispitivanja. [7]

Tablica 6. Karta relativne inženjerske uporabivosti pojedinih vrsta tla za nasipanje i zbijanje [7]

Simbol		Vrsta tla ** erozija kritična *** promjena volumena kritična - neprimjereno	Relativna pogodnost (1 = najbolje, 14 = najlošije)										
			Nasute brane		Kanali		Temelji		Prometnice				
			Homogeni nasip	Jezgra	Potporne zone	Otpornost na eroziju	Zbijena zemljana obloga	Procjeđivanje bitno	Procjeđivanje nije bitno	Nasipi		Površinski sloj	
										Moguće smrzavanje	Nije moguće smrzavanje		
Šljunci	GW	Dobro graduirani šljunak, malo sitnih čestica	-	-	1	1	-	-	1	1	1	3	
	GP	Slabo graduiran šljunak, malo sitnih čestica	-	-	2	2	-	-	3	3	3	-	
	GM	Prašinasti šljunak	2	4	-	4	4	1	4	4	9	5	
	GC	Zaglinjeni šljunak	1	1	-	3	1	2	6	5	5	1	
Pijesci	SW	Dobro graduirani pijesak, malo sitnih čestica	-	-	3	6	-	-	2	2	2	4	
	SP	Slabo graduirani pijesak, malo sitnih čestica	-	-	4	7	-	-	5	6	4	-	
	SM	Prašinasti pijesak	4	5	-	8	5**	3	7	6	10	6	
	SC	Zaglinjeni pijesak	3	2	-	5	2	4	8	7	6	2	
Sitnozrna tla	Mršava	ML	Nisko plastične prašine	6	6	-	-	6**	6	9	10	11	-
		CL	Neorganske nisko plastične gline	5	3	-	9	3	5	10	9	7	7
		OL	Organska tla niske plastičnosti	8	8	-	-	7	7	11	11	12	-
	Masna	MH	Visoko plastične prašine	9	9	-	-	-	8	12	12	13	-
		CH	Visoko plastične gline	7	7	-	10	8***	9	13	13	8	-
		OH	Organska tla visoke plastičnosti	10	10	-	-	-	10	14	14	14	-

11. ZAKLJUČAK

Zbijanje tla je neizostavan dio svakog projektiranja nasutih građevina. Izostanak zbijanja tla može dovesti do uniformnog i diferencijalnog slijeganja i erozije tla. Prilikom iskopa, prijevoza i razastiranja, tlo u potpunosti gubi svoju prirodnu strukturu i postaje rahlije, a zbijanjem se čestice materijala približavaju jedna drugoj, te se ostvaruju čvršće veze između čestica tla. Zbijanje utječe na fizičko-mehaničke karakteristike tla. Tla zbijana na suhoj strani optimuma će imati veću propusnost u odnosu na tla zbijana na vlažnoj strani optimuma. Ako se tlo zbjija sa vlažnosti na suhoj strani optimuma pri nižim razinama vlažnosti tlo zauzima flokuliranu strukturu, a zbijanjem na vlažnoj strani vlažnosti pri većim količinama vlažnosti tlo će imati dispegiranu strukturu. Pri visokim napreznjima uzorak je stišljiviji zbijanjem na suhoj strani optimuma od uzorka zbijenog na vlažnoj. A kod niskih napreznja situacija je obrnuta, stišljiviji će biti uzorak zbijan na vlažnoj strani u odnosu na onog zbijanog na suhoj strani optimuma. Bubrenje je veće kod tala zbijanih na suhoj strani optimalne linije jer apsorbiraju vodu zbog nedostatka vlažnosti. Skupljanje je karakteristična pojava za tla zbijana na vlažnoj strani optimuma. Najveća vrijednost posmične čvrstoće tla ostvaruje pri količini vlažnosti manjoj od optimalne vlažnosti za najveću vrijednost suhe zapremine težine. Zbijanje se ispituje laboratorijskim i terenskim ispitivanjima. Za određivanje karakteristika zbijenosti nekog tla najčešće se provode standardni i modificirani Proctorov pokus zbijanja. Uvjeti ispitivanja na terenu se trebaju prilagoditi uvjetima prethodno dobivenim u laboratoriju. Površinsko zbijanje tla vrši se sa odgovarajućom mehanizacijom za zbijanje koja se sastoji od se od glatkih vibro-valjaka, gumeni valjak s više kotača, vibracijski jež, vibro-ploča, nabijač, reverzibilna ploča i veliki valjak sa stopama. Za zbijanje dubljih slojeva tla koriste se vibroflotacija, dinamičko zbijanje i miniranje. Terenski uređaji i metode za kontrolu zbijenosti ugrađenog tla na terenu jesu: metoda pješčanog konusa, uređaj s gumenim balonom, nuklearna metoda i Proctorova igla. Odabir materijala za ugradnju ovisi o udaljenosti i raspoloživosti materijala od mjesta iskopa, količini materijala i drugim ekonomskim i tehnološkim okolnostima. Potrebno je odgovarajućim analizama u projektu dokazati da je materijal predviđen za ugradnju u nasip zadovoljava predviđene karakteristike upotrijebljene kod dokazivanja pouzdanosti buduće građevine uzimajući u obzir granična stanja.

POPIS LITERATURE

- [1] Hausman M.R. *Engineering principles of ground modification* 3rd edition McGraw-Hill Publishing Company; 1990.
- [2] Roje-Bonacci T. *Nasute građevine* Sveučilište u Splitu Fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije Split; 2015.
- [3] Budhu M. *Soil Mechanics and Foundations* 3rd edition JOHN WILEY & SONS, INC.; 2011.
- [4] GharPedia *Soil Compaction: Ground Improvement Method*
Dostupno: <https://gharpedia.com/blog/soil-compaction-ground-improvement-method/>
[Pristupljeno: 15. srpanj 2024.].
- [5] Helwany S. *Applied Soil Mechanics* John Wiley & Sons Inc; 2007.
- [6] *METODE POBOLJŠANJA TLA: Stabilizacija zbijanjem*, Zagreb, Građevinski Fakultet
- [7] Nasipi i brane, Predavanja za studente I. godine diplomskog studija Geotehnika, Građevinski Fakultet, Zagreb
- [8] *Geotehnički laboratorij* Predavanja za studente II. godine diplomskog studija Geotehnika
- [9] Kovačević Zelić B. *Poboljšanje svojstava tla i stijena*, interna skripta, Rudarsko geološko-naftni fakultet, Zagreb; 2006.
- [10] Bačić M. Nasipi i Kosine Predavanja za studente I. godine diplomskog studija Geotehnika, Zagreb, Građevinski Fakultet; 2023.
- [11] Gilson Company Inc. *Proctor Compaction Test: A Basic Guide*.
Dostupno: <https://www.globalgilson.com/blog/proctor-compaction-test-a-basic-guide#mod>
[Pristupljeno: 16. srpanj 2024.].
- [12] Murthy V.N.S. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Marcel Dekker Inc
- [13] Das, B. M., & Sobhan, K.: *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). SI. 2013.
- [14] Khalid R. Mahmood *Soil Compaction* University of Anbar College of Engineering Iraq-Ramadi; 2023.

- [15] Kovačević M., Librić L. *Primijenjena Mehanika Tla* Predavanja za studente I. godine diplomskog studija Geotehnika, 2022.
- [16] Lambe T. W., Whitman R. V. *Soil Mechanics* John Wiley & Sons Inc; 1979.
- [17] Kundri A.M., Muhammed A.S., Abah G. *EFFECT OF COMPACTIVE EFFORTS ON DESICCATION – INDUCED VOLUMETRIC SHRINKAGE STRAIN OF SOME COMPACTED TROPICAL SOILS* Malaysian Journal of Civil Engineering; 2016.
- [18] Hussain S. *Effect of Compaction Energy on Engineering Properties of Expansive Soil* Civil Engineering Journal; 2017.
- [19] Craig R.F. *Craig's Soil Mechanics* 7. izd. SPON Press; 2004.
- [20] Matel *Sand density cone apparatus*
Dostupno: <https://www.matest.com/en/product/s231-kit-sand-density-cone-apparatus-dia-12>
[Pristupljeno: 24. srpanj 2024.].
- [21] Hrvatska znanstvena bibliografija, institut Ruđer Bošković
- [22] *Ojačanje tla i stijena: Vibroflotacija*.
Dostupno: https://www.scribd.com/document/394785090/Oja%C4%8Danje-tla-i-stijena-VIBROflotacija?doc_id=394785090&order=641098770
[Pristupljeno: 31. srpanj 2024.].
- [23] Bhandari R.K.M. *Deep compaction of ground by vibroflotation*, Geotechnical Engineering Vol. 9.; 1978.
- [24] Roje-Bonacci T. *Duboko temeljenje i Poboljšanje svojstava temeljnog tla* Sveučilište u Splitu Fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije Split; 2010.
- [25] Kovačević M., Librić L. *Ojačanje tla i stijena* Predavanja za studente II. godine diplomskog studija Geotehnika, 2024.
- [26] Geotech *Dinamičko zbijanje tla* Dostupno: <https://www.geotech.hr/dinamicko-zbijanje-tla/>
[Pristupljeno: 2. kolovoz 2024.].

POPIS SLIKA

Slika 1. Model učinka zbijanja [2].....	4
Slika 2. Trenje između čestica krupnozrnog tla [7].....	5
Slika 3. Prividna kohezija vlažnog pijeska [2].....	6
Slika 4. Granice konzistencije [8].....	7
Slika 5. Raspored čestica prije i nakon zbijanja (a) krupnozrnog i (b) sitnozrnog tla [6].....	7
Slika 6. Razlika krivulja zbijanja za (a) krupnozrna i (b) sitnozrna tla [7].....	8
Slika 7. Promjena optimalne vlažnosti za različite vrste tla i energije zbijanja [2].....	9
Slika 8. Skica Proctorovog uređaja [9].....	10
Slika 9. Oprema za Proctorov pokus [10].....	10
Slika 10. Način određivanja optimalne vlažnosti [2].....	11
Slika 11. Proctorov pokus, lijevo standardni, desno modificirani [2].....	12
Slika 12. Tipični izgled krivulja zbijanja za standardni i modificirani Proctorov pokus [14].	13
Slika 13. Četiri različite vrste krivulja zbijanja [15].....	14
Slika 14. Utjecaj energije zbijanja na pjeskovitu glinu [13].....	15
Slika 15. Utjecaj zbijanja istovrsnog tla pri različitim vlažnostima, na čvrstoću i otpore ugrađenog tla [2].....	16
Slika 16. Ponašanje zbijenog i rahlog tla prilikom smicanja s prikazom promjene koeficijenta pora i promjene volumena [2].....	17
Slika 17. Rezultati odnosa naprezanja u konsolidiranom nedreniranom troosnom pokusu (CU) za nezasićeno tlo [2].....	18
Slika 18. Troosni nekonsolidirani, nedrenirani pokus potpuno zasićenog [2].....	18
Slika 19. Učinak zbijanja na posmičnu čvrstoću za tlo ugrađeno u nasip [2].....	18
Slika 20. Rezultati troosnog smicanja nekoherentnog tla [2].....	19
Slika 21. Promjena vrijednosti kuta trenja ϕ ovisno o razini naprezanja pri troosnom smicanju nekoherentnog gradiva [2].....	19
Slika 22. Prikaz rezultata smicanja kamenih agregata [2].....	20
Slika 23. Krivulja posmične čvrstoće i zbijanja [12].....	20
Slika 24. Utjecaj zbijanja na strukturu gline [13].....	21
Slika 25. Utjecaj zbijanja na koeficijent propusnosti k [2].....	23
Slika 26. Slijeganje ovisno o zbijenosti [2].....	24
Slika 27. Utjecaj zbijanja na stišljivost [15].....	25
Slika 28. Dijagram skupljanja i vlažnosti [17].....	25
Slika 29. Dijagram energije zbijanja i potencijala bubrenja [18].....	26

Slika 30. Ovisnost suhe zapreminske težine o broju prijelaza valjka za zbijanje [13].....	27
Slika 31. Prilagodna strojeva za zbijanje vrsti tla [2]	28
Slika 32. Strojevi za zbijanje krupnozrnog tla (lijevo) i sitnozrnog tla (desno) [7]	29
Slika 33. Glatki vibro-valjak [12]	30
Slika 34. Valjak sa stopama [12].....	31
Slika 35. Princip rada vibracijskog valjka [13].....	31
Slika 36. Vibrator na glatkom vibro-valjku [12]	32
Slika 37. Dijagram [5].....	33
Slika 38. Usporedba rezultata zbijanja u laboratoriju i na terenu ježem i gumenim valjcima za istu vrstu tla [2].....	34
Slika 39. Probno polje [10].....	34
Slika 40. Prikaz ispitivanja na probnom polju [9].....	35
Slika 41. Uređaj s pješčanim konusom: shematski dijagram(lijevo) [11] i uređaj(desno) [20]	36
Slika 42. Uređaj s gumenim balonom a) shematska skica uređaja b) fotografija uređaja [9]	37
Slika 43. Nuklearni densimetar [7]	38
Slika 44. Proctorova igla (lijevo) i Proctorov penetrometar set (desno) [12].....	39
Slika 45. Položaj ispitivača i posude tijekom pokusa Proctorovom iglom [21].....	40
Slika 46. Vibrator za vibroflotaciju [22]	41
Slika 47. Faze zbijanja vibroflotacijom [12].....	42
Slika 48. Princip izrade vibro-kamenih stupova [22].....	43
Slika 49. Pogodnosti tla za vibrozbijanje [22].....	43
Slika 50. Učinak zbijanja [24]	44
Slika 51. Krater nakon dinamičkog zbijanja [13].....	45
Slika 52. Primjer izvedenog dinamičkog zbijanja u prostoru [25]	45
Slika 53. Primjer rastera za dinamičko zbijanje [25].....	46
Slika 54. Faze dinamičkog zbijanja [26].....	46
Slika 55. Ukopani eksploziv [25]	48
Slika 56. Učinak miniranja na površini [24]	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa	12
Tablica 2. Tipovi krivulja zbijanja [14].....	14
Tablica 3. Rekapitulacija utjecaja zbijanja na svojstva tla.....	26
Tablica 4. Uobičajeni kriteriji zbijanja nasipa [2].....	49
Tablica 5. Kriteriji zbijanja nasipa prema OTU (2001) [7].....	50
Tablica 6. Karta relativne inženjerske uporabivosti pojedinih vrsta tla za nasipanje i zbijanje [7]	51