

POSTUPCI I METODE STABILIZACIJE TLA POSTELJICE

3.1. Mehanička stabilizacija

METODE POBOLJŠANJA TLA

3.2. Mehanička stabilizacija posteljice

Mehanička se stabilizacija primjenjuje kod nekoherentnih materijala nepovoljnog (jednolikog) granulometrijskog sastva, koji kao takav nije stabilan. Mehanički stabilizirani materijal tla predstavlja homogenu mješavinu odabranog lokalnog materijala, prirodnu ili pripremljenu mješavinu sastavljenu pretežno od kamena, šljunka ili pijeska i dijela mineralnog veziva (prašinasto-glinovita frakcija). Pri tome krupnija kamena frakcija predstavlja skeletnu (nosivu) komponentu, a sitnozrna prašinasto-glinovita frakcija je tzv. "mehaničko vezivo".

Sa stanovišta moderne struke i prakse, mehanički stabilna mješavina predstavlja svaku kombinaciju lokalnog materijala tla (od stijena do glina), čija mehanička (reološka) svojstva odgovaraju mjestu i funkciji u nekom od slojeva kolničke konstrukcije. Kao takav mehanički stabilizirani materijal, sa gledišta strukturnog (racionalnog) projektiranja, mora biti karakteriziran svojim osnovnim svojstvima (E , ν), odnosno komponente materijala u sastavu mehaničke stabilizacije trebaju u potpunosti biti definirane u skladu sa važećim normama.

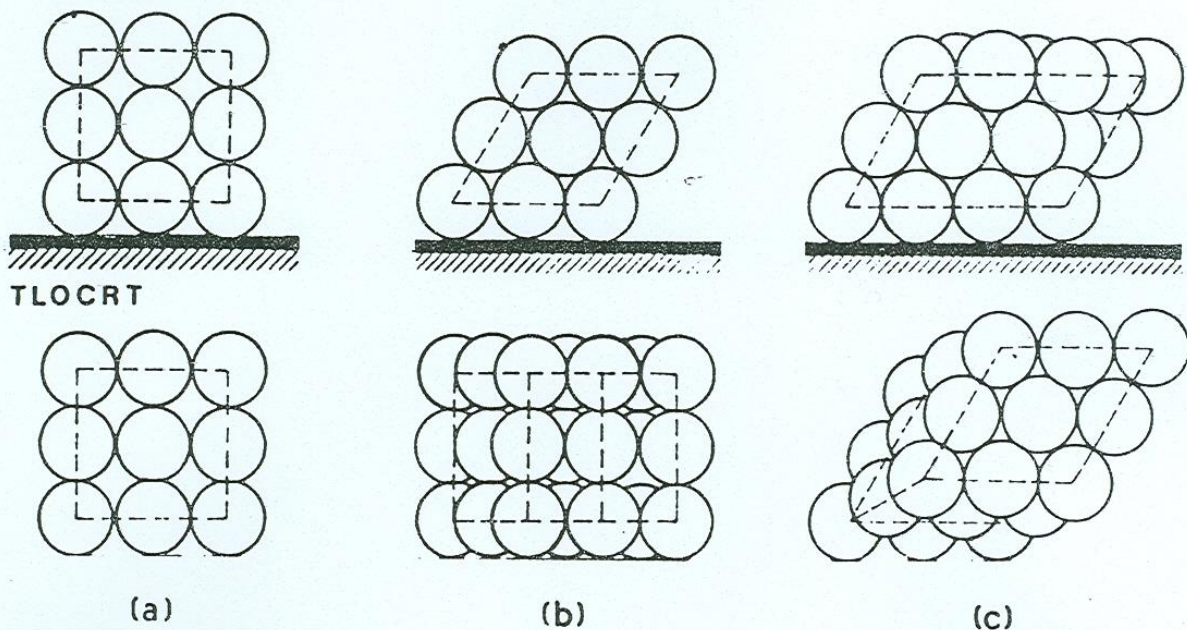
Za ilustraciju sistema mehaničke stabilizacije, na slici je dan šematski prikaz sastavnih dijelova mehanički stabilne mešavine.

Ovako definirana, mehanička stabilizacija, s stanovišta tehnologije izvedbe uključuje faze miješanja i zbijanja, sa ili bez dodatnih intervencija, fizičkih ili kemijskih u svrhu poboljšanja efekata stabiliziranja.

Princip mehaničke stabilizacije

Zamislimo neki idealizirani materijal koji se sastoji od okruglih zrna iste veličine. Taj sistem zrna može zauzeti tri položaja, prikazana na slici.

POGLED



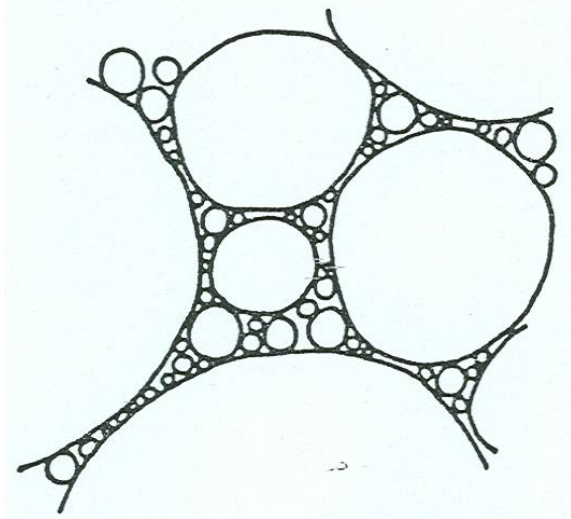
Slika 1. Prikaz položaja koje mogu zauzeti čestice zrna iste veličine

Nalazi li se sistem zrna jednake veličine u položaju prikazanom na slici a sadržaj šupljina između zrna je maksimalan i iznosi približno 50%. U položaju kada je sistem

METODE POBOLJŠANJA TLA

deformiran u ravnini xz, odnosno kada se nalazi u položaju prikazanom na slici b sadržaj šupljina u sistemu se smanjuje. Deformira li se sistem i okomito na ravninu xz, odnosno i u ravnini xy sadržaj šupljina još će se više smanjiti, te dosegnuti minimum. Sa stanovišta stabilnosti lako je uvidjeti da je najnestabilniji sistem prikazan na slici a dok je najstabilniji sistem prikazan na slici c. Prema tome stabilnost zrnatog sistema obrnuto je proporcionalna sadržaju šupljina. Osim toga sistem zrna jednake veličine općenito je nestabilan jer i u najgušćem rasporedu zrna sistem ima velike šupljine, pa je unutarnje trenje malo.

Stabilnost jednolikog zrnatog materijala može se povećati ako mu se doda zrnati materijal drugačijih dimenzija zrna, čime se omogućuje da sitnija zrna mogu doći u šupljine između krupnijih zrna kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Ispuna šupljina sitnozrnatom materijalom (povećanje stabilnosti sustava)

To je ujedno i princip mehaničke stabilizacije materijala. Dakle materijalu nepovoljnog, jednolikog granulometrijskog sastava koji kao takav ne može biti stabilan dodaje se drugačiji, sitniji ili krupniji zrnati materijal čime mu popravljamo granulometrijski sastav. Nakon miješanja takav je materijal neophodno i zbiti čime mu povećavamo gustoću te dobivamo mehanički stabilan sistem s velikim unutarnjim trenjem.

Uvjet mehaničke stabilnosti nekog materijala je kontinuiranost njegove granulometrijske krivulje, što se postiže zadovoljenjem Fullerovog zakona:

$$p = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

gdje je:

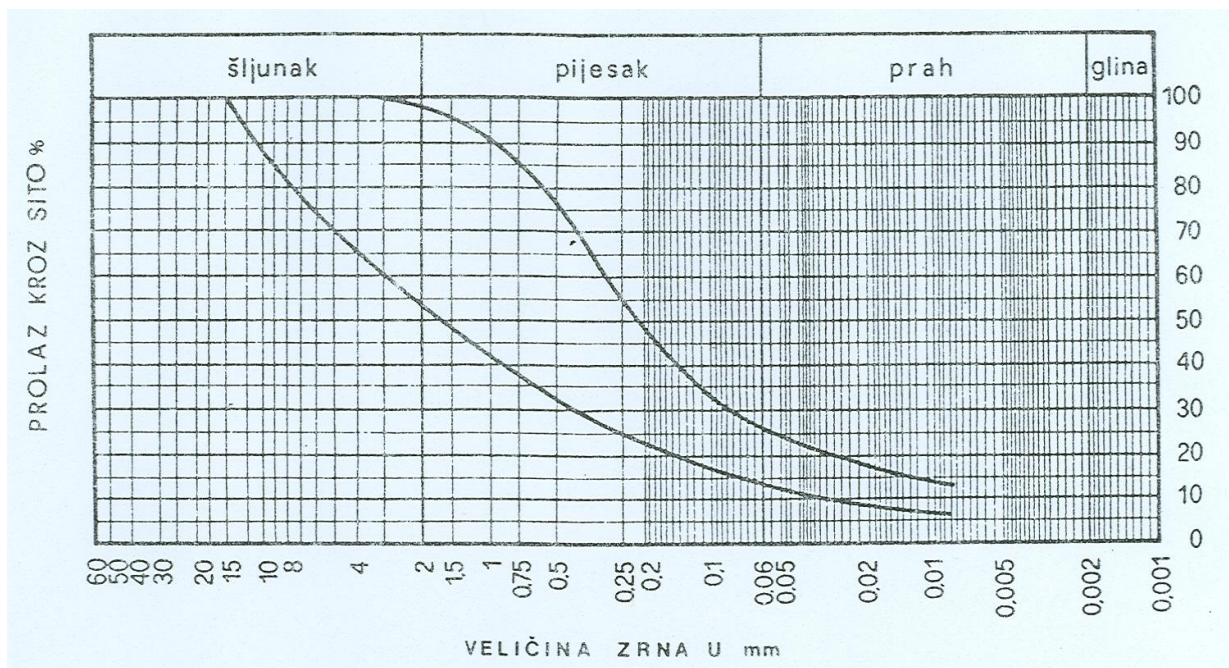
p - postotak zrna koje prolazi kroz sito određene veličine otvora

d - veličina otvora sita

D - promjer najvećeg zrna.

No, praksa je pokazala da dobre rezultate daju i krivulje koje se u određenoj mjeri razlikuju od Fullerove krivulje, odnosno da postoji jedno područje unutar kojega se može kretati granulometrijski sastav materijala za mehaničku stabilizaciju, slika

METODE POBOLJŠANJA TLA



Slika 3. Granične krivulje materijala pogodnog za primjenu mehaničke stabilizacije

Projektiranje sastava mehaničke stabilizacije

Ukoliko je materijal od kojeg treba pripremiti posteljicu nestabilan a u blizini raspoložemo s pogodnim dodatnim materijalom za popravak granulometrijskog sastava osnovnog materijala, dakle ukoliko postoji potreba te pogodni uvjeti za izvedbu mehaničke stabilizacije pristupa se njezinom projektiranju.

Projektom mehaničke stabilizacije potrebno je prije svega odrediti potrebnu količinu dodatnog materijala koji će se pomiješati sa osnovnim nestabilnim materijalom u svrhu popravka njegovog granulometrijskog sastava. Da bi se dobio željeni, odnosno propisani ili specificirani sastav, najčešće je neophodno da se materijali iz različitih pozajmišta miješaju u odgovarajućim omjerima. Pri tome postoje tri preduvjeta koja treba ispuniti, mada su postupci za definiranje rješenja uglavnom isti, odnosno:

- addavanje krupnozrnatog kamenog agregata lokalnom materijalu tla (pijesak/šljunak, drobljen kamen, drobina);
- addavanje sitnozrnog materijala lokalnom krupnozrnom nedovoljno koherentnom tlu (prašinsto-glinovito tlo, kameni prah);
- proporcionisanje mješavina sitnozrnatog i krupnozrnatog materijala za miješanje u centralnom postrojenju (drobljenje, separiranje, miješanje).

Uz pretpostavku da su poznati porijeklo i lokacija odgovarajućih materijala, problem se svodi na određivanje relativnih proporcija po kojima bi se materijali miješali. Početna razmatranja ovog problema treba zasnivati na podacima makroskopske identifikacije granulometrijskog sastava i plastičnih osobina raspoloživog materijala tla.

Često, brzi postupak prosijavanja i nanošenja granulometrijskih krivulja u specificirana granulometrijska područja stabilnih mešavina, može dati prve indicacije o podobnosti ili nepodobnosti originalnog materijala, odnosno koji materijal treba umiješati, ili pak, da li se može ili ne može dobiti projektno rešenje od raspoloživog

METODE POBOLJŠANJA TLA

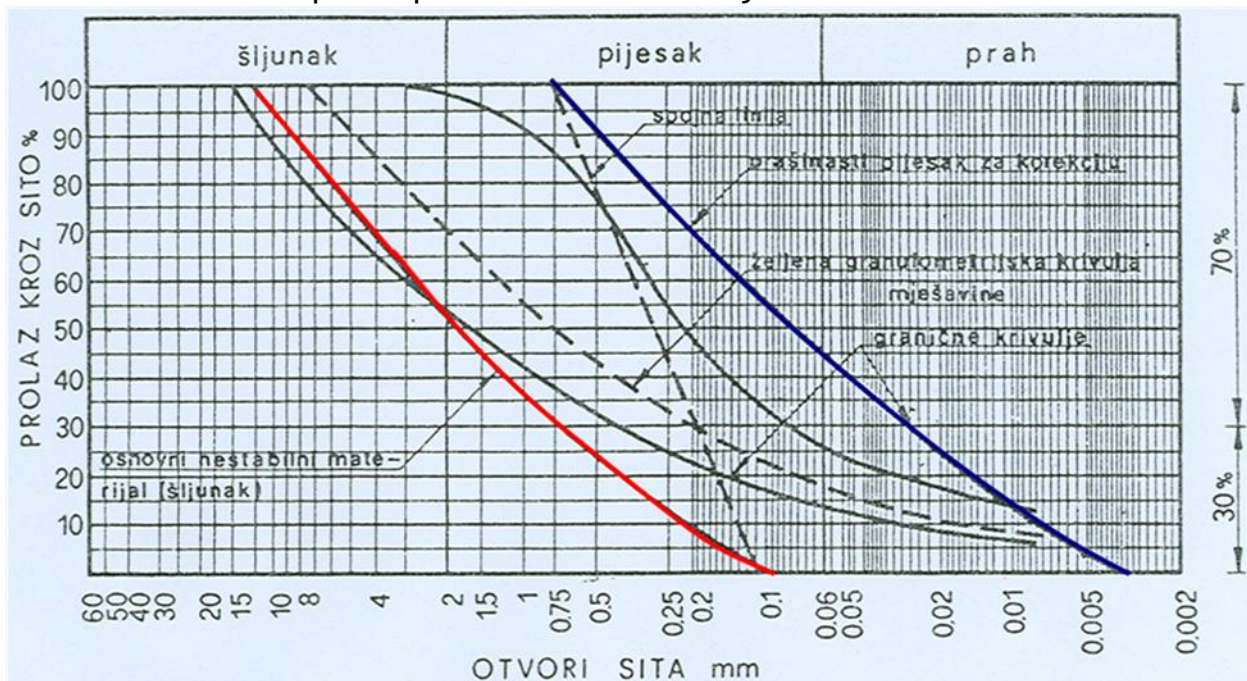
materijala. Odgovarajuća mješavina treba se dobiti sa najmanjim brojem komponentainih materijala. U načelu, što je više materijala u kombinaciji, to je teže kontrolirati uniformnost mješavine.

Relativne proporcije materijala u kojima treba sastaviti mješavinu u načelu se određuju uzastopnim probama i popravcima u laboratoriju, prosijavanjem određenog materijala. Omjeri raznih komponentnih materijala se podešavaju sve dok se ne postigne zahtevana granulacija. Potom se na probnoj mješavini laboratorijski određuju granica tečenja i indeks plastičnosti, koji se upoređuju sa propisanim kriterijima plastičnosti. Ukoliko dobivene vrijednosti zadovoljavaju, probna se mješavina usvaja kao zadovoljavajuća. Ako pak plastične osobine mješavine nisu unutar propisanih granica, postupak se ponavlja sve dok se ne dobije zadovoljavajuća mješavina.

Druga uobičajena metoda, koja se koristi, je izrada probnih mešavina materijala na osnovu njihovih plastičnih karakteristika. Drugim riječima proporcionalno učešće različitih materijala se podešava tako da indeks plastičnosti mješavine bude u dozvoljenim granicama. Zatim, se određuju indeks plastičnosti, granice tečenja i granulacija probne mješavine koji se moraju nalaziti unutar dozvoljenih granica. Ukoliko su odstupanja od traženih vrijednosti takva da se mješavina ne može prihvatiti postupak se ponavlja s novom mešavinom, koja se sastavlja koristeći iskustvo prethodnih proba, a sve dok se mješavina ne uskladi sa specifikacijama.

Određivanje sastava mješavine prema kriteriju pretpostavljenog granulometrijskog sastava

Sastavljanje mješavine zrnatih materijala prema kriteriju pretpostavljenog granulometrijskog sastava moguće je provesti na nekoliko načina, no najčešće se određuje grafički. U nastavku će detaljnije biti razložena dva načina, metoda Rotfuscha te metoda prema priručniku američke vojske.



Slika 4. Sastavljanje mješavine zrnatih materijala po metodi Rotfuscha

METODE POBOLJŠANJA TLA

Osnovni ulazni parametri za projektiranje mehaničke stabilizacije prema kriteriju pretpostavljenog granulometrijskog sastava su:

- granulometrijski sastav osnovnog materijala i
- granulometrijski sastav dodatnog materijala

koji se određuju u laboratoriju.

Na slici je prikazan primjer određivanja dodataka sitnijeg materijala, u ovom slučaju pijeska, nestabilnom šljunku jednolike veličine zrna, prema metodi Rotfuscha.

Postupak kombiniranja dva materijala u svrhu dobivanja mješavine propisanog granulometrijskog sastava prema metodi US Corps of Engineers opisan je na slijedećem primjeru.

U tablici 1 dane su karakteristike granulometrijskog sastava dva materijala. Materijal "A" je tlo posteljice, dok je "B" zrnati kameni materijal iz obližnjeg pozajmišta. U tablici su dane i granice "stabilne mehaničke mješavine", kao i probna mješavina materijala "A" i "B".

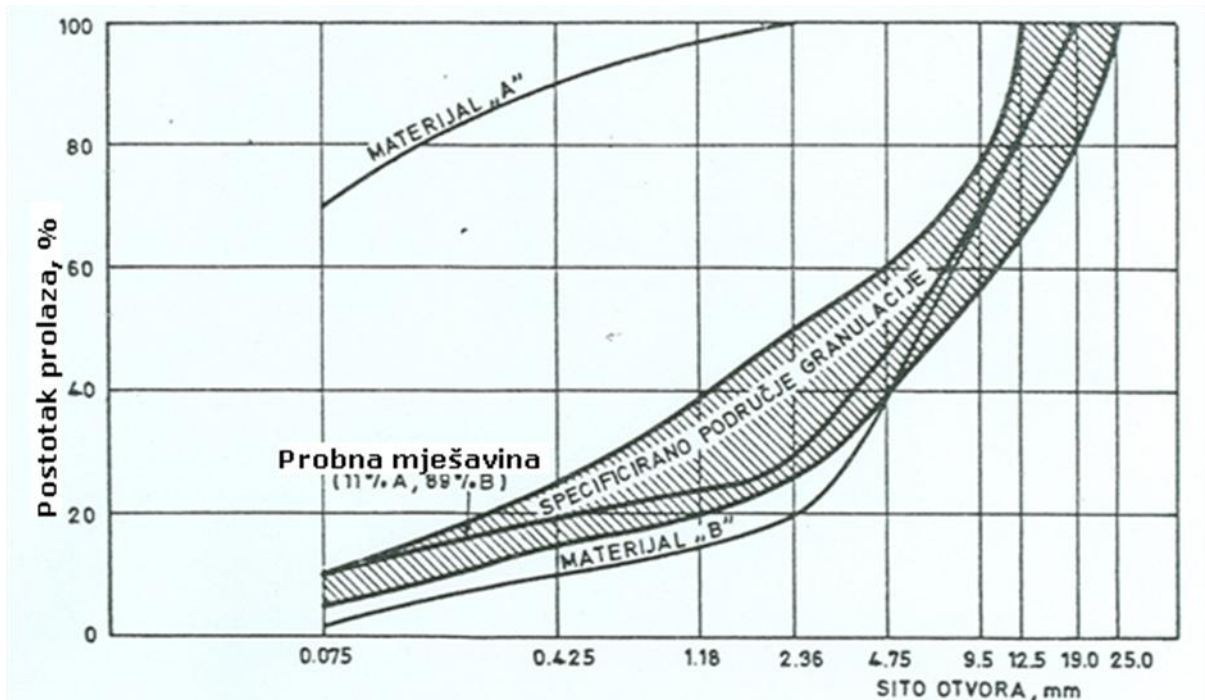
Na dijagramu, na slici 5, dane su granulometrijske krivulje materijala A i B i granično područje stabilne mešavine. Proučavajući ove krivulje na dijagramu, uočava se da je frakcija materijala "B" (krupnija od 4,75 mm) unutar specificiranih granica, dok su frakcije sitnije od 2,36, 0,425 i 0,075 mm nedovoljne. Međutim, dodatkom materijala "A", granulometrijski sastav materijala "B" može se popraviti na način da odgovora zahtijevanom granulometrijskom sastavu. Mogućnost miješanja ovih materijala, s ciljem dobivanja željene granulometrije materijala i odnos miješanja dva materijala, najbolje se može odrediti grafičkom metodom, koja je u nastavku detaljno opisana.

Tablica 1. Karakteristike granulometrijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala

Sito otvora	Postotak prolaza - maseni %			
	Materijal "A"	Materijal "B"	Specificirane granice stabilne mješavine	Probna mješavina 11 % materijal "A" 89 % materijal "B"
50 mm	-	-	100	100
19 mm	-	100	80-100	100
12,5 mm	-	80	65-100	82
4,75 mm	-	40	40-60	47
2,36 mm	100	20	25-50	29
0,425 mm	91	10	15-25	19
0,075 mm	70	2	5-10	10

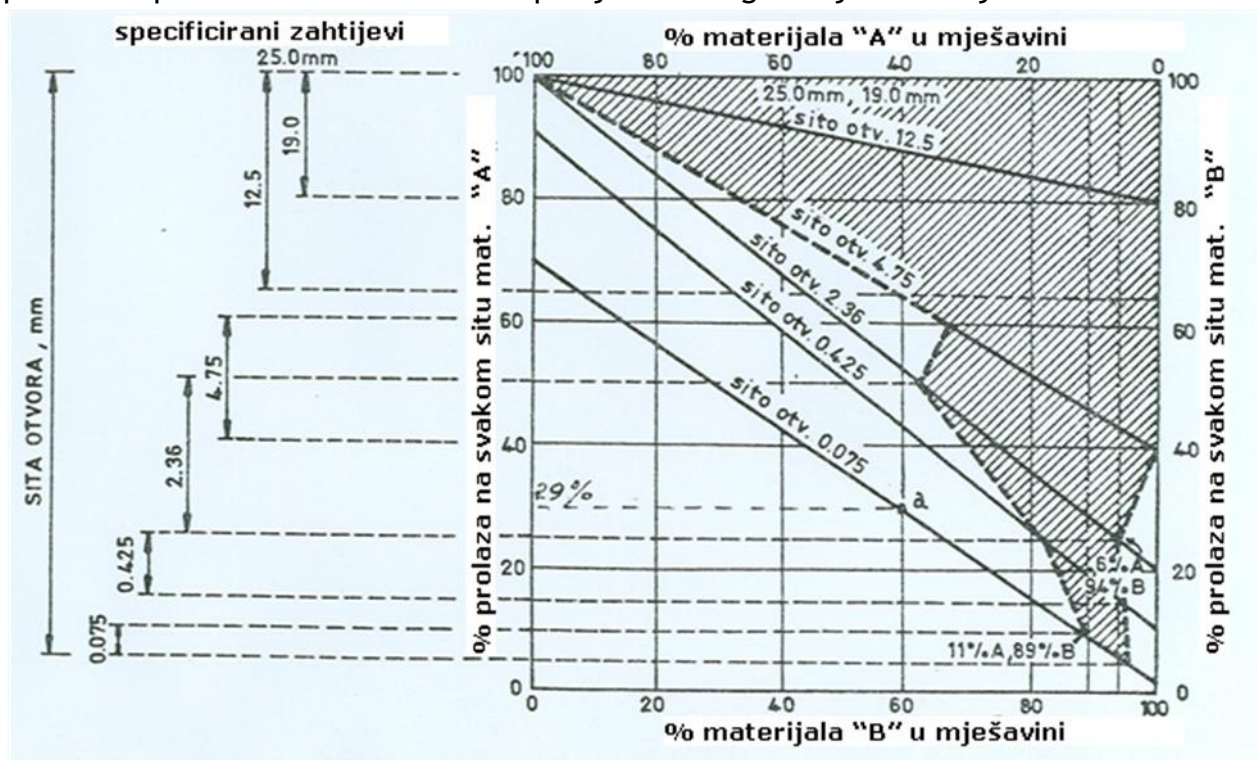
Prema ovoj grafičkoj metodi, prvi korak je da se u grafikon, s milimetarskom podjelom unese postotak granulometrijskog sastava za materijal "A" na obje ordinate. Ove ordinate su podijeljene na postotke, kao što je prikazano na grafikonu, slika 19. Postotak materijala "A" ili "B" u mešavini iskazani su na donjoj, odnosno gornjoj apscisi dijagrama. Dalje, postotci materijala "A" ili "B" koji prolaze kroz isto sito spajaju se pravocrtno. Ordinata svake tačke na svakoj liniji otvora sita predstavljati će postotak izmiješanog materijala koji prolazi kroz to sito. Odnosi dva materijala označeni su na gornjoj i donjoj apscisi. Pozivajući se na dijagram na slici 6, ako je mješavina sastavljena od 40% materijala "A" i 60% materijala "B", količina mješavine koja prolazi kroz sito otvora 0,075 mm biti će 29%. Ovaj postotak je predstavljen ordinatom točke (a) na grafikonu.

METODE POBOLJŠANJA TLA



Slika 5. Prikaz graničnih granulometrijskih krivulja te granulometrijskih krivulja osnovnog i dodanog materijala

Specificirane granice mehanički stabilne mješavine prikazane su na grafikonu s lijeve strane (slika 19). Horizontalne linije su ucrtane iz raspoloživih gornjih i donjih postotaka prolaza kroz svako sito do presjeka sa odgovarajućom linijom otvora sita.



Slika 6. Grafička metoda određivanja sastava mješavine, US Corps of Engineers

METODE POBOLJŠANJA TLA

Presječne točke označavaju granične proporcije materijala "A" i "B", koje mogu biti primjenjene a da specificirani zahtjevi budu ispunjeni. Na primer, specifikacije dopuštaju 5% do 10% materijala sitnijeg od 0,075 mm. U tom slučaju najprije se povlači horizontalna linija kod 5% na vertikalnoj skali, zatim druga kod 10%. Ove dvije horizontalne linije sijeku liniju sita 0,075 u dvije točke. Jedna točka reprezentira mješavinu od 4,5% materijala "A" i 95,5% materijala "B", druga pak, daje mešavinu od 11% materijala "A" i 89% materijala "B". Vidi se da će u pogledu zahtjeva za materijal sitniji od 0,075 mm svaka mešavina u kojoj materijal "A" varira od 4,5 do 11%, a materijal "B" od 95,5 do 89% biti zadovoljavajuća.

Kada su određene ekstremne proporcije materijala za sve otvore sita, tačke koje reprezentiraju ove odnose se spajaju isprekidanim linijama, a površina ograničena isprekidanim linijama se označi primjerice kao na grafikonu, slika 6. Svaka vertikalna linija koja presjeca sve linije sita (otvora) i leži unutar označene površine predstavljaće prihvatljivu mješavinu. Ukoliko se, međutim, nijedna vertikalna linija ne može ucrtati u označenu površinu, ova dva materijala ne mogu se kombinirati unutar specificiranog područja granulacije stabilne mešavine.

Pozivajući se na grafikon na slici 19 može se videti da je povlačenje vertikalnih linija unutar označene površine ograničeno sa dvije točke. Jedna od ovih točaka se nalazi na liniji sita otvora 0,075 mm i predstavlja najveći dopušteni udio materijala "A" (11%) ili najmanji dopušteni udio materijala "B" (89%). Druga točka se nalazi na liniji sita otvora 2,36 mm i predstavlja najmanji dozvoljeni udio materijala "A" (6%) ili najveći dopušteni udio materijala "B" (94%). Stoga bi sa svim udjelima materijala unutar ovih granica bilo moguće dobiti mješavinu koja odgovara traženim zahtijevima. U tablici 1 dane su karakteristike granulometrijskog sastava probne mešavine koja je sastavljena od 11% materijala "A" i 89% materijala "B". Može se konstatirati da je granulacija probne mešavine unutar traženih granica.

Opisanu metodu moguće je primjeniti i kad se želi mješati više od dva materijala. U tom slučaju, prvo se mora odabrati najbolja kombinacija od dva materijala. Odabrana mešavina se tada smatra novim materijalom koji se zatim kombinira sa trećim na isti način. Analognim postupkom lista kombiniranja materijala može se i povećati.

Određivanje sastava mješavine prema kriteriju pretpostavljene plastičnosti

Kada osnovni zrnati kameni materijal nema dovoljno sitnozrne frakcije kao mehaničkog veziva, odnosno kada nije u stanju da samostalno osigurati potrebnu koheziju, njemu se dodaje prašinasto-glinovito (mehaničko) vezivo u odgovarajućoj proporciji. Približno, količina potrebnog sitnozrnog (vezivog) materijala može se lako odrediti grafičkom metodom pri čemu se ravna linija usvaja kao odnos između indeksa plastičnosti i postotka dodanog sitnozrnog koherentnog tla.

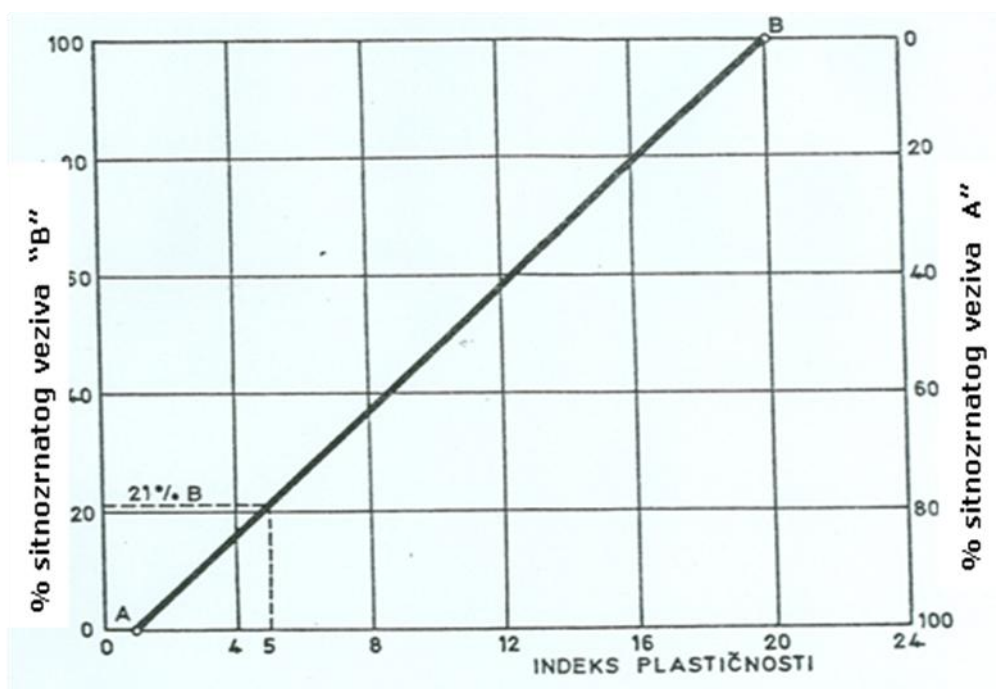
Za ilustraciju primjene ove metode, pretpostavimo da osnovni lokalni materijal "A" ima svega 10% prolaza kroz sito otvora 0,425 mm i indeks plastičnosti 1. Ovaj materijal potrebno je mješati sa koherentnim materijalom "B" koji 100% prolazi kroz sito 0,425 mm i ima indeks plastičnosti 20. Zahtev u pogledu plastičnosti je da indeks plastičnosti bude 5.

Kako je prikazano na slici 7, postotak sitnozrnatog materijala „A” (prolaz 0,425 mm) i postotak materijala "B" nanosi se na ordinate, a indeks plastičnosti na apscise. Točka "A" predstavlja indeks plastičnosti materijala "A", a točka "B" indeks plastičnosti

METODE POBOLJŠANJA TLA

materijala "B". Linija, koja spaja ove dvije točke predstavlja indeks plastičnosti za svaku kombinaciju ova dva "sitnozrna" materijala. Za željeni indeks plastičnosti od 5 treba povući vertikalnu liniju sa apscise sa $I_p = 5$ do presjeka sa linijom AB i dobiti će se ordinata koja daje zahtijevani postotak sitnozrnog materijala (<0,425) od materijala "A" i "B". Konkretno, u ovom primjeru dobija se 21% sitnih frakcija od "B", a 79% sitnih frakcija od materijala "A". Drugim rečima, 100 kg sitnozrnog tla (veziva) koje ima indeks plastičnosti 5 treba sadržavati 79 kg sitnozrnatog materijala tla "A" i 21 kg materijala "B". Kako svega 10% materijala "A" prolazi kroz sito 0,425 mm, zahtijevana količina da se dobije 79 kg sitnog materijala (mehaničkog veziva) biti će:

$$79 \times 100 / 10 = 790 \text{ kg}$$



Slika 7. Određivanje sastava mješavine prema kriteriju pretpostavljene plastičnosti

Kako 100% materijala "B" prolazi kroz sito 0,425 mm, količina potrebna za 21 kg sitnozrnog veziva je:

$$21 \times 100 / 100 = 21 \text{ kg}$$

Proizlazi da kombinacija od 790 kg materijala „A” i 21 kg materijala „B” može osigurati zahtijevani indeks plastičnosti od 5. Iskazano u postotcima biti će:

- materijal "A" = $790 \times 100 / 811 = 97,4\%$
- materijal "B" = $21 \times 100 / 811 = 2,6\%$

Ovi postotci za materijale "A" i "B" mogu se dobiti i računskim putem koristeći sledeće izraze:

$$X = 100 S_2 (I_p - I_{p2}) / [S_2 (I_p - I_{p2}) - S_1 (I_p - I_{p1})]$$
$$Y = 100 - X$$

gde je:

- X - postotak materijala "A" u konačnoj mješavini;
- Y - postotak materijala "B" u konačnoj mješavini;

METODE POBOLJŠANJA TLA

I_p - zahtijevani indeks plastičnosti za sitnozrni materijal (<0,425 mm) u konačnoj mješavini;

I_{p1} - indeks plastičnosti sitnozrnog materijala (vezivo) u materijalu "A";

I_{p2} - indeks plastičnosti sitnozrnog materijala u materijalu "B";

S_1 - postotak mehaničkog veziva u materijalu "A";

S_2 - postotak mehaničkog veziva u materijalu "B".

Uzimajući u račun podatke iz prethodnog primera, tj. $I_p=5$; $I_{p1}=20$; $S_1=10\%$; i $S_2=100\%$ dobiva se:

$$X = 100 \times 100 (5 - 20) / [100 (5 - 20) - 10 \times (5 - 1)] = 97,4\%$$

$$Y = 100 - 97,4 = 2,6$$

Izrada mehaničke stabilizacije

Mehanička stabilizacija tla ispod kolničke konstrukcije može u obzir doći u slučajevima nestabilnog, nekoherentnog jednozrnatog tla, najčešće pijeska ali i koherentnog tla.

Najjednostavniji postupak i određeni primjer izrade mehaničke stabilizacije je takozvano "šlemanje". Na gradilištima se dosta često primjenjuje kao nužna mjera u slučajevima kada se površina nestabilnog, živog zrnatog kamenog materijala ne da zbiti ili ne može ostati stabilizirana pod prometom. U takvim se slučajevima površina takvog materijala posipa pijeskom, ostrim drobljenim kamenim materijalom ili sličnim materijalom i uvalja. Na taj se način stvarno stabilizira samo plitka zona sloja, koja ipak na neki način osigurava kompaktnost materijala koji se nalazi ispod nje.

Kod prave mehaničke stabilizacije potrebno je međutim potpuno miješanje osnovnog i dodatnog materijala u sloju određene debljine, primjerice 20 cm.

Pri tome je potrebno na temelju prethodnih ispitivanja na temelju granulometrijskih sastava odrediti optimalan sastav komponentnih materijala tj. potrebna količina u kilogramima po jedinici površine za određenu debljinu sloja, dodatnog materijala, krupnijeg ili sitnijeg od osnovnog materijala.

Isto tako određuju se Proctorovi elementi mješavine (optimalna vlažnost, maksimalna suha prostorna masa) pomoću Proctorovog pokusa.

Redovito se primjenjuje tehnologija izrade na licu mjesta koja obuhvaća:

- pripremu, planiranje osnovnog materijala kojega se želi mehanički stabilizirati,
- navoženje sloja dodatnog materijala jednolične debljine,
- mješanje koje se obavlja rotofrezerima
- reguliranje vlažnosti tako da bude u optimalnim granicama
- zbijanje sloja vibracijskim sredstvima za zbijanje
- kontrolu zbijenosti.

Zbijenost se kontrolira pomoću usporedbe stvarne suhe prostorne mase određene primjerice volumetrom i maksimalne suhe prostorne mase određene Proctorovim pokusom (stupanj zbijenosti).