

**POSTUPCI I METODE
STABILIZACIJE TLA POSTELJICE**

Stabilizacija vapnom

4. STABILIZACIJA VAPNOM

Za stabilizaciju vapnom pogodna su prvenstveno koherentna glinovita tla, dok se nekoherentna tla mogu stabilizirati na ovaj način jedino ako sadrže određeni udio gline, no u praksi to rijede dolazi u obzir.

Poznato je da je prirodno glinovito tlo vrlo osjetljivo na promjenu vlažnosti i kod visokih sadržaja vode postaje nepodesno kao građevinski materijal bilo da se radi u njemu ili s njim. Kako su građevinski objekti, posebice prometnice bili često izvođeni u područjima gdje nije bilo pogodnog čvršćeg materijala, ljudi su još od davnina pokušavali nekim postupcima poboljšati glineni materijal, učiniti ga čvršćim i manje podložnim promjenama izazvanim klimatskim okolnostima.

Prva poznata primjena stabilizacije vapnom datira od prije 5000 godina. To su takozvane Shensi piramide na tibetansko-mongolskom platou koje su bile sagrađene od zbijene gline pomiješane s vapnom. I kineski zid između zidova od opeke ima glinenu jezgru stabiliziranu vapnom, a taj su postupak Kinezi upotrebljavali i za izradu cesta i podloga za temelje mostova. Indijci su mješavine gline i vapna upotrebljavali kao mort za zidanje a Rimljani su još prije 2000 godina gradili ceste s vapnom i vulkanskim pepelom. Poznata Via Appia ima tri od četiri sloja kolničke konstrukcije, ukupne debljine 1,2 m stabilizirana vapnom.

Ta se je praksa u mnogim zemljama zadržala do ne tako davnih dana no pisani su podaci rijetki obzirom da su se postupci i recepture prenosili većinom usmenom predajom.

Počeci modernih načina stabilizacije, koji se osnivaju ne samo na iskustvu, nego i na određenim stručnim i znanstvenim osnovama bio je u SAD. Zbog vrlo slabih zemljanih cesta početkom ovog stoljeća, kao i potrebe da se povežu velike udaljenosti u SAD-u se rano počelo proučavati razne mogućnosti poboljšanja svojstava tla, posebice njegove čvrstoće. Tako je 1908-1912. godine Dr. Strahan u Georgiji vršio opažanja i ispitivanja stabilizacije gline pomoću pijeska te postavio osnove takvog načina stabilizacije. Nedugo nakon toga počele su se raditi tzv. „uljane“ ceste, u prvo vrijeme još na osnovi penetracije a zatim i ceste od zemljanih materijala stabilizirane hidrauličnim vezivima, prvenstveno cementom.

Prvi pokusi s vapnom rađeni su 1920. godine u Missouriju i Iowi. Iako su rađene primitivno, iz ranih se izvještaja vidi da su se te ceste dobro držale, da su bile otporne na negativan utjecaj vlage (kiša) te da su oštećenja površine nastala jedino djelovanjem prometa.

Tokom i nakon II svjetskog rata započeo je nagli razvoj postupaka stabilizacije tla vapnom i primjena ovih postupaka kod cesta i aerodroma, posebice u SAD-u. U Europi postupak stabilizacije tla vapnom uvodi se i naglo razvija od 1955. Danas se ovaj način rada primjenjuje širom Europskog kontinenta.

4. Mehanizam stabilizacije tla vapnom

4.1. Struktura gline i reakcije u mješavinama gline i vapna

Kao što je već ranije navedeno za stabilizaciju vapnom nije pogodno svako tlo. U radovima mnogih autora koji su se bavili ovim vidom stabilizacije tla, napominje se da je za stabilizaciju tla vapnom od posebne važnosti frakcija materijala ispod 0,002

METODE POBOLJŠANJA TLA

mm, koja se u geomehanici smatra čistom glinom. Međutim ponašanje te frakcije u dodiru s vodom (plastičnost) znatno se razlikuje kod pojedinih materijala različitog porijekla. Razlog tome nije granulacija, već mineraloški sastav gline.

Prije se smatralo da su gline amorfni materijali kod kojih ne postoji određeni raspored atoma i molekula. Pokušalo ih se upoznati i definirati pomoću kemijske analize, te je kao važna karakteristika u tom smislu postavljen tzv. silikatni modul:

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

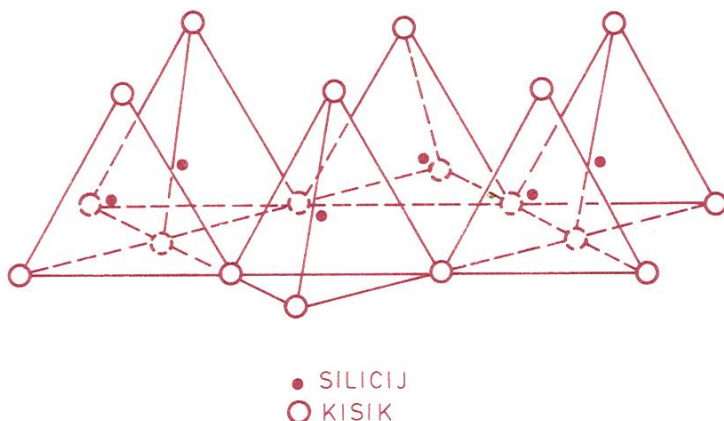
Međutim, usporedba tog modula sa drugim svojstvima glina nije pokazala očekivane zakonitosti.

Istraživanja provedena dvadesetih godina prošlog stoljeća pokazala su da glina ima **kristaliničan sastav**, odnosno da se sastoji od tako zvanih minerala gline. Kod minerala gline postoje dva osnovna bloka građe:

- tetraedarska i
- oktaedarska jedinica.

Osnovne jedinice (tetraedarska ili oktaedarska) vežu se u lance, trake ili listove a od kojih se formiraju palete ili sendviči.

Na slici 1 je prikazana silikatna tetraedarska jedinica koja se sastoji od četiri atoma kisika s pridruženim atomom silicija. Takve tetraedarske jedinice povezuju se horizontalno u lisnatu strukturu.



Slika 1. Međusobno povezane osnovne tetraedarske jedinice

Na slici 2 prikazana je aluminatna oktaedarska jedinica u kojoj je jedan atom aluminija, željeza ili magnezija uložen između šest hidroksida koji imaju oblik oktaedra, opet vezanih u lisnatu strukturu.

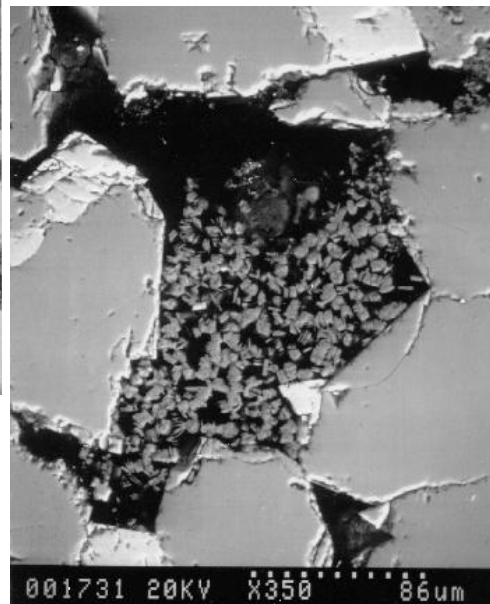


Slika 2. Međusobno povezane osnovne oktaedarske jedinice

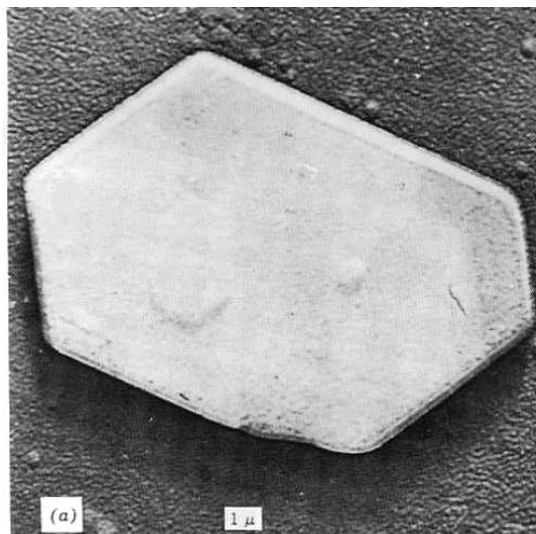
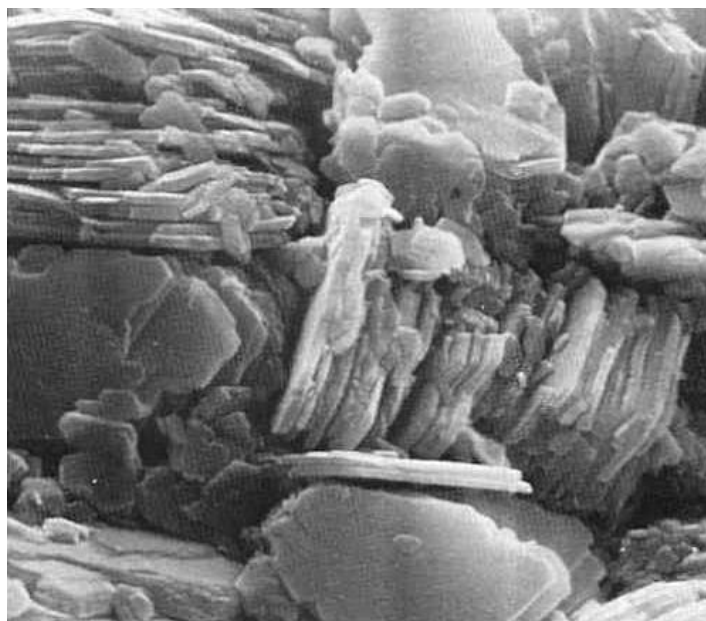
Dva ili više takvih molekularnih listića čine minerale gline, pri čemu razno povezivanje daje i različita svojstva, odnosno vrste glinenih materijala. S inženjerskog stanovišta postoje tri glavne grupe minerala gline, kaolinitni, iliti i montmoriloniti.

Kaolinitni

Kaolinske gline nalaze se u dobro dreniranim tlima, a nastale su u vlažnim klimatskim okolnostima iz raspadnutih kristaliničnih stijena.



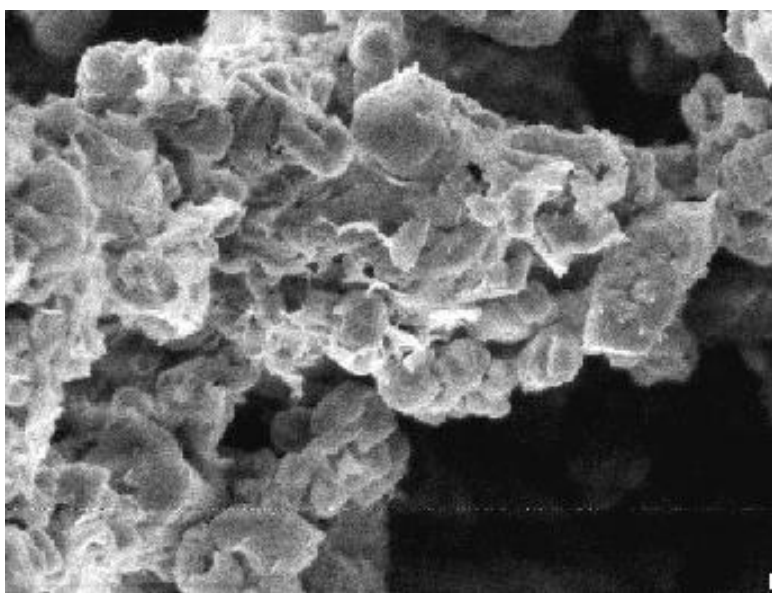
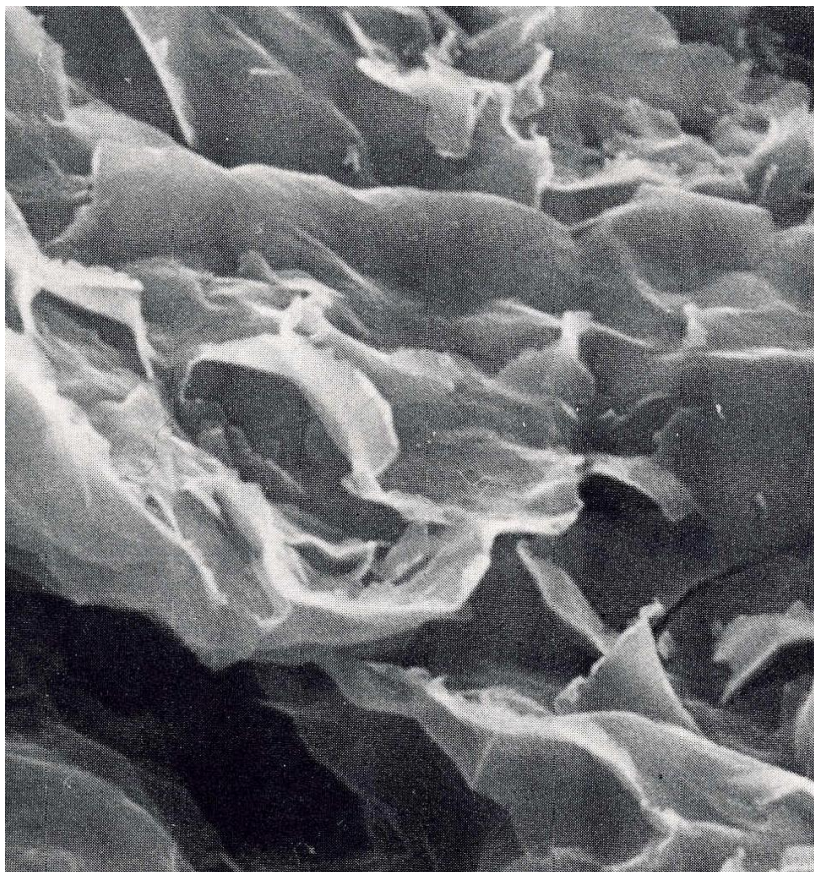
Slika 3. Mikroskopski prikazi kaolinitnih gline



Slika 4. Mikroskopski prikazi kaolinitnih glina - detalji

Montmoriloniti

Montmorilonitne gline karakteristične su za slabo drenirana i organska tla, a nastale su od stijena s visokim sadržajem željeza i magnezija ili od vulkanskog pepela.

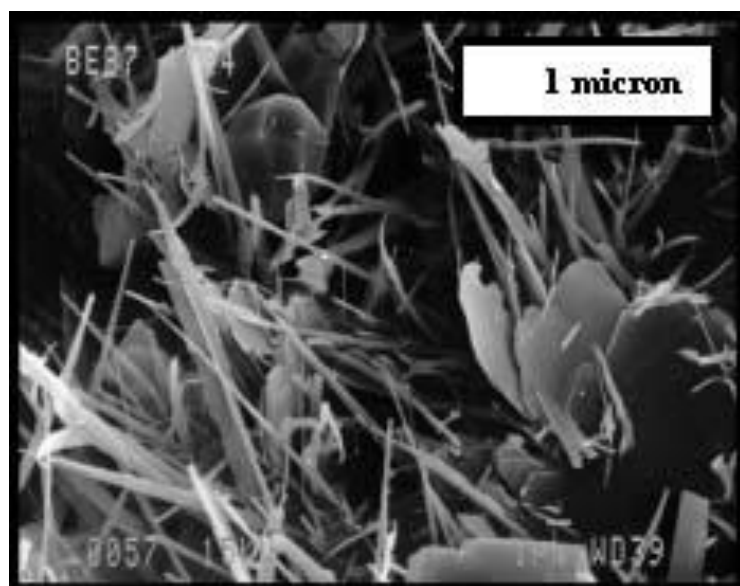


Slika 5. Mikroskopski prikazi montmorilonitnih glina

METODE POBOLJŠANJA TLA

Iliti

Iliti dolaze u tlima nastalim od morskih sedimenata i nekih drugih stijena.



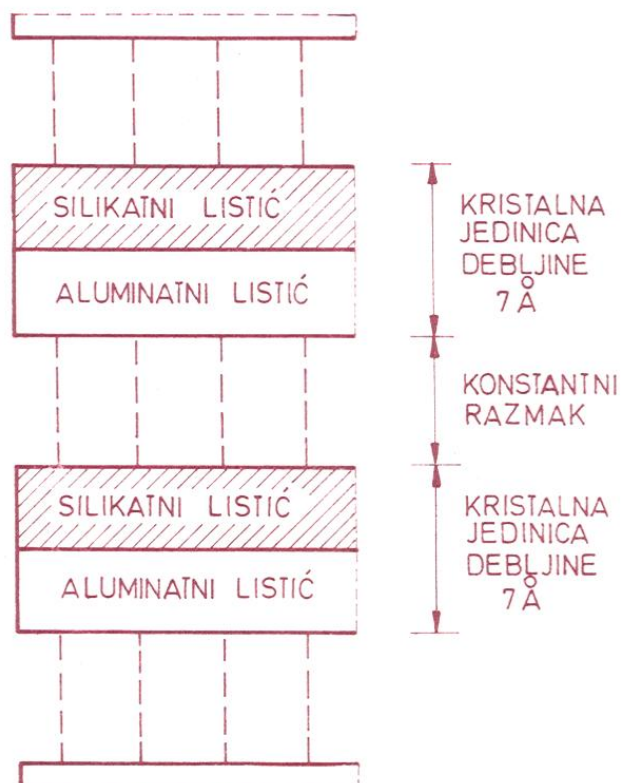
Slika 6. Mikroskopski prikazi ilitnih glina

Na slici 7 prikazana je građa kristala kaolinita. On se sastoji od dva povezana molekularna listića - oktaedarskog i tetraedarskog sloja koji čine jedinstveni listić debljine oko 7 Å. Između elementarnih listića postoje jake vodikove veze, koje mogu

METODE POBOLJŠANJA TLA

spriječiti prodiranje molekula vode i drugih iona, tako da se rešetka ne širi. Sa inženjerskog stanovišta kaolinit je stoga vrlo stabilna glina, relativno male plastičnosti, bubrenja i slično. Doduše površina kaolinita je kao i kod ostalih vrsta glina negativno naelektrizirana, pa privlači vodu ali je to ograničeno samo na vanjske površine.

Količina tako adsorbirane vode, u obliku filma na vanjskim površinama listića, zbog velike specifične površine listića ipak nije zanemariva.

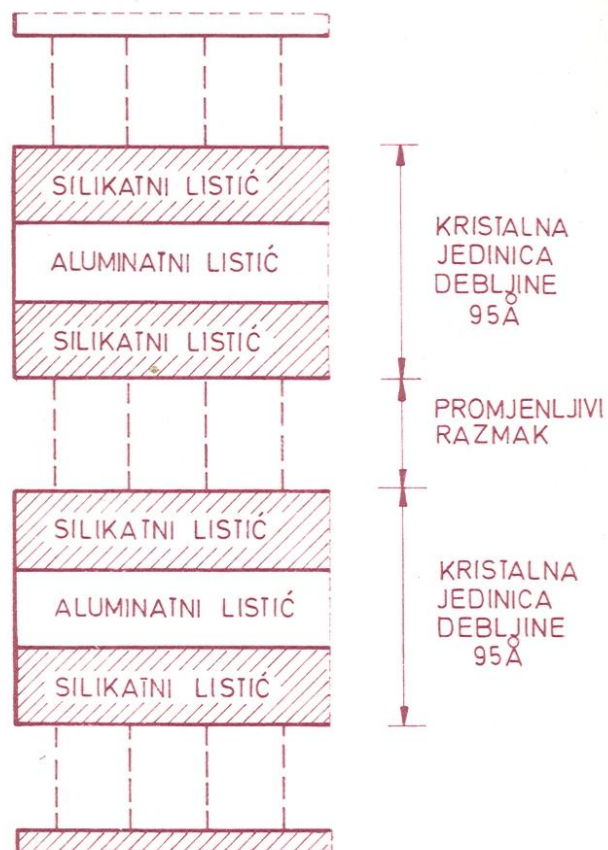


Slika 7. Shematski prikaz strukture minerala gline - kaolinit

Na slici 8 prikazana je struktura kristala montmorilonita. Listići ovog minerala sastavljeni su od tri jedinice, dvije tetraedarske i jedne oktaedarske, a međusobno su povezane unutarnjim elektrostatskim vezama. Za razliku od kaolinita kod montmorilonitnih glina osim vanjskih, zbog slabih elektrostatskih veza između kristalnih jedinica, adsorptivne su i unutrašnje površine što omogućuje ulazak molekula vode između listića i njihovo jako širenje (i do 400 Å). Količina vode koja može ući u strukturu minerala gline zbog slabih elektrostatskih veza između kristalnih jedinica daleko je veća od one koja se u obliku filma može absorbirati na vanjskim površinama. Kod montmorilonitnih glina, u strukturu minerala gline (između kristalnih jedinica) može ući tolika količina vode da se razmak između kristalnih jedinica poveća i do četrdeset puta. Posljedica je vrlo izražena sklonost bubrenju, promjeni

METODE POBOLJŠANJA TLA

konzistentnog stanja gline (visoki stupanja plastičnosti) i ostalim tipičnim karakteristikama glina.



Slika 8. Shematski prikaz strukture minerala gline - montmorilonit

Ilit ima građu sličnu montmorilonitu, ali su veze između kristalnih jedinica nešto jače nego kod njega, tako da se i svojstva ove vrste glina nalaze negdje između svojstava kaolinita i montmorilonita. Tipična svojstva ilitnih glina izraženija su od svojstava kaolinitnih glina dok su manje izražena od svojstava montmorilonitnih glina.

U prethodnom je tekstu navedeno da je negativna naelektriziranost površina glina razlog njihovoj hidrofobnosti. Naime, koloidne frakcije materijala (po teoriji to su čestice koje mogu izvoditi Brownovo gibanje, a veličine su do 1μ) kojih je u sastavu glina znatan udio imaju električne naboje na površini, do kojih dolazi na slijedeći način. Kemijski spojevi, njihovi ioni, atomi i molekule teže da budu kombinirani tako da bude postignut najveći mogući stupanj električne neutralizacije. Ioni, atomi i molekule vežu se najprije u jedinične ćelije, čijim prostornim ponavljanjem nastaju kristali. Unutar strukturalnog rasporeda kristala - kristalne rešetke elektrostatičke veze ili valencije atoma potpuno su uravnotežene, ali u kutevima i površini nisu, pa zato čestice imaju negativni naboj. Takav slučaj je i kod minerala glina. Do negativnog naboja koloida dolazi i iz drugog razloga, takozvane izomorfne substitucije, tj. kada se jedan ion unutar kristalne rešetke zamijeni

METODE POBOLJŠANJA TLA

drugim. To je glavni izvor električnih naboja primjerice kod montmorilonita, gdje substitucija magnezija Mg^{++} za aluminij Al^{+++} rezultira u neuravnoteženoj valencijski. Svojom negativnim nabojem glineni minerali privlače, adsorbiraju, pozitivno nabijene katione, vodik H ili osnovne metale Na, Ca, Mg i K. Molekule vode koje se nalaze u tlu su dipolarne. Koloidne čestice tla adsorbiraju pozitivno nabijene vodikove ione i stvara se adsorbirani vodeni film oko čestica tla. Debljina tog filma ovisi o veličini kationa - što je kation manji adsorptivna mu je sila za molekule vode veća. Radijusi iona kod nekih elemenata bez vodenog filma i s vodenim filmom dani su u tablici 1.

Tablica 1. Radijusi iona nekih elemenata sa i bez vodenog filma

Element	Radijus iona u Å	
	Bez vodenog filma	S vodenim filmom
Litij	0,78	10,03
Natrij	0,98	7,90
Kalij	1,33	5,22
Kalcij	1,06	3,15

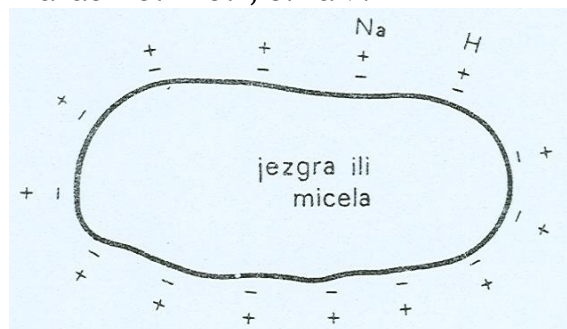
Vidi se da primjerice kationi natrija adsorbiraju znatno deblji film vode nego kationi kalcija, čak 8 puta veći od svog promjera. Debljina filma vode oko raznih kationa varira, međutim u prirodi ne postoje čestice gline bez adsorbiranog filma vode.

Voda adsorbirana uz površinu koloidne čestice ima orjentiranu molekularnu strukturu sličnu strukturi leda, zbog čega su joj i svojstva drugačija od normalne vode. S udaljenošću od površine čestice, karakter vode se mijenja i na određenoj udaljenosti ona dobiva svojstva slobodne vode.

Jasno je da svojstva glinenog tla u velikoj mjeri ovise baš o tom sloju adsorbirane vode oko koloidnih čestica, a koji je opet ovisan o karakteru kationa.

Pojave do kojih dolazi u tlu, dodatkom nekog kemijskog stabilizacijskog sredstva (vapna, cementa ili nekog drugog na tržištu dostupnog materijala za stabilizaciju tla) su složene. Dolazi do promjene naelektriziranosti koloidnih čestica i do određenih kemijskih reakcija. Naime, neki se kationi zamjenjuju određenim kationima druge vrste, što rezultira promijenjenim svojstvima tla.

Zbog neuravnoteženosti elektrostatičkih sila minerali od kojih se sastoje gline, negativno su naelektrizirani. Stanje naelektriziranosti koloidnih čestica gline na jednostavan je način prikazao Helmholtz, slika 9.



Slika 9. Konceptija dvostrukog sloja prema Helmholtzu

METODE POBOLJŠANJA TLA

On je dao koncepciju dvostrukog sloja oko koloidne čestice, slika 9. Po njemu se koloidna čestica gline sastoji od unutarnjeg dijela, čvrste jezgre ili micle obložene slojem negativnih iona. Taj je sloj okružen vanjskim slojem pozitivno nabijenih iona, kationa, koji su s njima u ravnoteži. Veze između ta dva sloja nisu jake, pa ako takva čestica dođe u dodir s kationima druge vrste dolazi do zamjene pojedinih vrsta iona, odnosno dolazi do kationske izmjene, posljedica koje je promjena svojstava glina u velikoj mjeri. Kationska izmjena osnova je kemijske stabilizacije tla.

Mogućnost s kojom se kationi mogu izmjenjivati i adsorbirati naziva se kapacitet kationske izmjene. Izražava se u miliekvivalentima iona koje može adsorbirati 100 mg tla, pri čemu miliekvivalent iznosi 1 mg vodika ili adekvatni iznos bilo kojeg drugog iona, koji se može s njim kombinirati ili ga zamijeniti. Kapacitet kationske izmjene glinenih minerala iznosi:

- za montmorilonit 80 do 100 mg/100 g,
- za ilit 15 do 40 mg/100 g dok je
- za kaolinit 5 do 15 mg/100 g.

Vidi se da je veličina kapaciteta kationske izmjene direktno povezana s plastičnošću, bubrenjem i ostalim svojstvima gline, to jest da je veća kod montmorilonita nego kod kaolinita, dok je ilit u sredini.

Kod stabilizacije tla vapnom dolazi do reakcije između vapna i minerala gline. Vapno se dodaje tlu ili u obliku hidrata Ca(OH)_2 ili živog vapna CaO , koje se gasi vlagom iz tla pri čemu opet nastaje kalcijev hidroksid Ca(OH)_2 .

U tlu kalcijev se hidroksid djelomično disocira u Ca ione i OH ione. Dolazi do kationske izmjene pri kojoj se natrij iz visokoplastičnih glina zamjenjuje kalcijem iz vapna. Na taj se način dobiva kalcijevska glina koja ima znatno manju plastičnost nego natrijska. Vapno ujedno povećava pH vrijednost tla do 12,6 što omogućava potpunu zamjenu kationa i poboljšava topljivost silikata i aluminata koji se nalaze u glini.

Reakcija nastala spomenutom kationskom izmjenom ima vrlo brzi tok, u tlu se tako reći momentalno nakon dodavanja vapna bitno mijenjaju svojstva glina. Poboljšava se obradljivost glinenog tla, mogućnost zbijanja i početna čvrstoća mješavine tlo-vapno. Nakon toga dolazi do dugotrajne reakcije vapna sa aktivnim silikatima i mineralima gline, to jest dolazi do pucolanske reakcije. Silikati se razgrađuju pri čemu nastaje nova kristalna faza - kalcijevi i aluminatni hidrati, koja sljepljuje čestice tla i povećava mu čvrstoću. Iz toga se vidi da vapno nije samostalno vezivo kao što je to primjerice cement, već da vezivo nastaje tek iz produkta reakcije vapna i glinenih komponenata tla. Iz tog je razloga neophodno da tlo bude glinovito, pri čemu velik utjecaj na jakost reakcije ima mineraloški sastav glina.

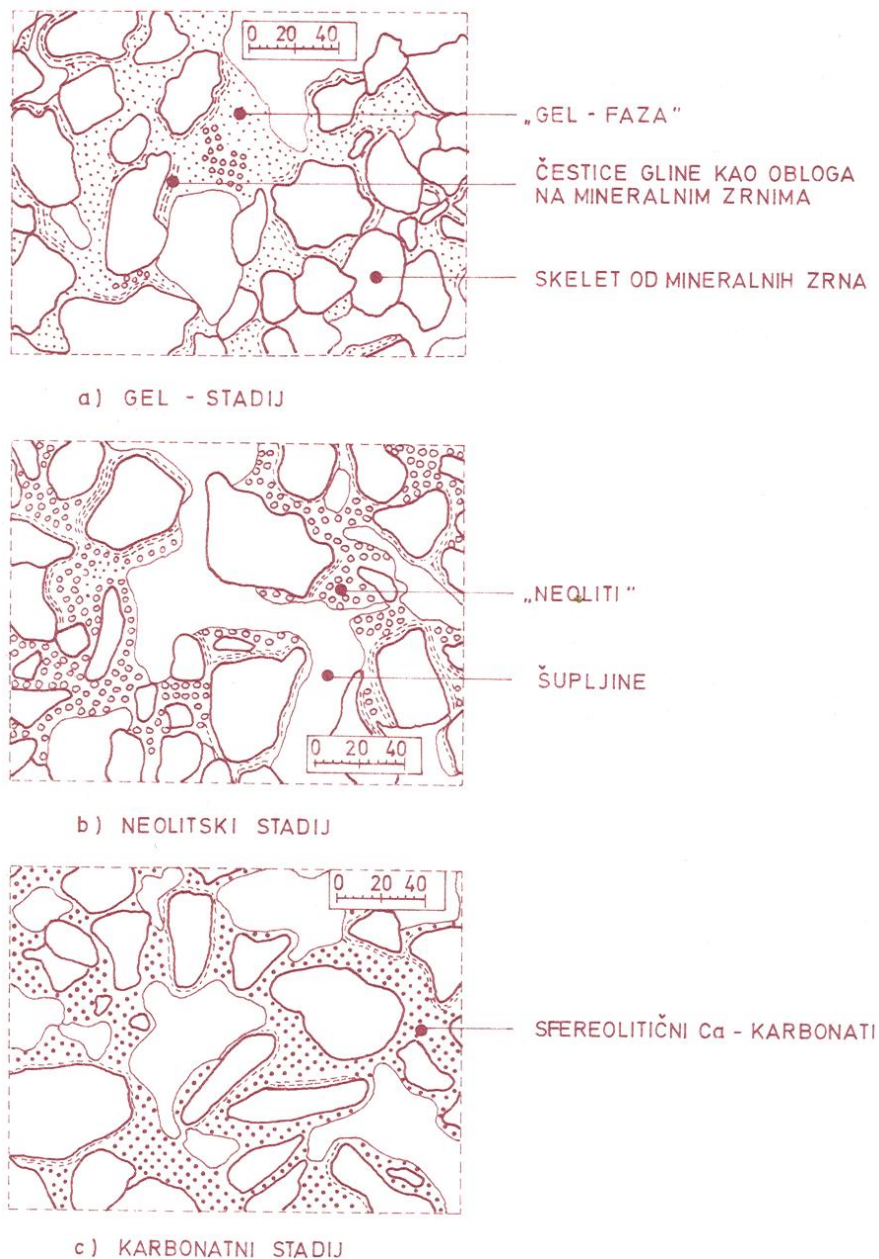
Reakcije koje nastaju u mješavini tlo-vapno, od trenutka mješanja pa do doljeg vremena nakon miješanja detaljno je proučavao i opisao Brand. Služeći se mikroskopskim, rendgenografskim, diferencijalno-termodinamičkim analizama kao i elektronskim mikroskopom utvrdio je da se reakcija odvija u četiri faze:

I. faza

U početnom stadiju nastaje disocijacija dijela dodanog kalcijevog hidrata Ca(OH)_2 u Ca^{++} i OH^- ione, zbog čega minerali gline mijenjaju svoj elektrostatički potencijal i površinske sile. Kalcijev hidroksid, Ca(OH)_2 , prelazi u amorfno stanje i čini prijelaz u

METODE POBOLJŠANJA TLA

slijedeći tako zvani gel stadij. Najsitnije čestice tla aglomeriraju, mijenja se struktura, konzistencija i odnosi vlažnost - zbijenost mješavine tla i vapna.



Slika 10. Faze reakcije u mješavini tlo-vapno po Brandu

II. faza

Gel stadij je najvažniji stadij kod stabilizacije, slika 6. Nastaje gel masa od kalcijско - silikatnih hidrata, koja veže zrna minerala i djelomično ispunjava šupljine između njih. Time se mijenja struktura pora, čime se vjerojatno može objasniti smanjeno upijanje vode i otpornost prema djelovanju vode.

METODE POBOLJŠANJA TLA

Iz gel mase postepeno nastaju mikroskopski kristali - neoliti koji čine tako zvani neolitski stadij.

III. faza

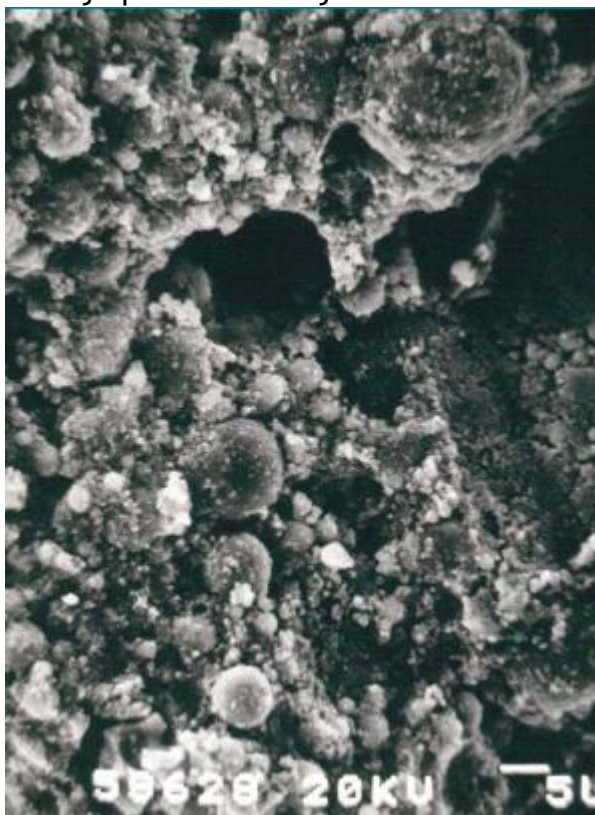
Neolitsko stadij daje materijalu porast čvrstoće u odnosu na gel stadij.

IV. faza

Djelovanjem CO_2 iz zraka nastaje četvrti, karbonatni stadij. U karbonatnom stadiju, dolazi do stvaranja sferolitičnih kalcijevih karbonata, koji čine čvrsti kristalni mort i time doprinose povećanju čvrstoće materijala. S obzirom da je prilikom izgradnje prometnih površina stabilizirani sloj obično pokriven nepropusnim slojevima, ovaj stadij nema veliko značenje za praksu.

Dakle, kao što se vidi iz navedenog kod stabilizacije vapnom radi se o nizu složenih kemijskih procesa koji brzo ili u toku duljeg vremenskog perioda utječu na početne i konačne osobine ovog materijala a o čemu će biti govora kasnije.

No svakako treba napomenuti da u tlu nekada postoje tvari koje štetno utječu na razvoj opisanih reakcija.



Slika 11. Mikroskopski snimak tla u kojem nije došlo do reakcije s vapnom

Tako primjerice sulfati u nekim slučajevima, naročito ako tlo ima visoki stupanj kiselosti (visoki pH), utječu na reakciju gline i vapna, slika . Tla koja sadrže 0,5 do 1,0% sulfatnih iona, nisu pogodna za stabilizaciju vapnom. Količina sulfata koja se može tolerirati naravno ovisi o tipu sulfata i gline.

Jedako tako i organska tla nisu pogodna za stabilizaciju vapnom.

METODE POBOLJŠANJA TLA

4.2. Pogodnost tla za stabilizaciju vapnom

Iz razmatranja u prethodnoj točki vidljivo je da je za stabilizaciju vapnom bitno da tlo sadrži koloidne čestice, odnosno minerale glina kako bi moglo doći do kemijskih reakcija koje daju stabilizacijske efekte. Radi toga se može reći da su za stabilizaciju vapnom pogodne gline srednje do visoke plastičnosti kao i krupnije zrnata nekoherentna tla (šljunkovita i pjskovita) ukoliko sadržavaju dovoljnu količinu glinovitih frakcija.

Ako se radi o niskoplastičnim glinama, prašinama i čistim nekoherentnim materijalima samo vapno nije efikasno ali mu se može dodati neki pucolanski materijal kao što su zgura, leteći pepeo, cement i slično.

Pogodnost tla za stabilizaciju vapnom orijentacijski se može odrediti na temelju granulometrijskog sastava i iz dijagrama prikazanog na slici 25.

Stvarna pogodnost tla za stabilizaciju vapnom može se odrediti jedino laboratorijskim ispitivanjem mješavina tla s vapnom, većinom na temelju određivanja čvrstoće i otpornosti prema vodi. Razlog tome leži u činjenici da na stabilizacijske efekte granulometrijski sastav glina ima mali utjecaj dok je mineraloški sastav gline odlučujući.

U tablici 2 su dane preporuke o vrsti veznog sredstva u odnosu na mineraloški sastav gline.

Tablica 2. Preporuke za odabir vrsti veznog sredstva u odnosu na mineraloški sastav gline

Dominantna mineraloška komponenta	Materijal za stabilizaciju	Razlozi
Alofani	Vapno	Za pucolansku reakciju i zgušnjavanje
Klorit	Cement	Teoretski
Ilit	Cement ili vapno	Za ranu čvrstoću, obradljivost i naknadnu čvrstoću
Kaolinit	Cement ili vapno	Za ranu čvrstoću, obradljivost i naknadnu čvrstoću
Montmorilonit	Vapno	Za obradljivost i ranu čvrstoću

Ova tablica predstavlja prvi aproksimativni vodič za izbor veziva, ukoliko je poznat mineraloški sastav osnovnog materijala.

Dakle može se reći da su s vapnom reaktivna ona tla koja pokazuju signifikantni porast jednoosne čvrstoće ukoliko su obrađena vapnom. No to ne znači da i tla koja nisu reaktivna nisu pogodna za stabilizaciju, jer čvrstoća nije jedino svojstvo koje ima značenja u tom postupku. Ponekada se traže uglavnom samo početni efekti - smanjenje plastičnosti, smanjenje vlažnosti i poboljšanje obradljivosti i ugradljivosti. Ipak čvrstoća je u inženjerskim konstrukcijama važan faktor o kome ovisi postojanost i stabilnost objekata pa o njoj treba voditi računa.

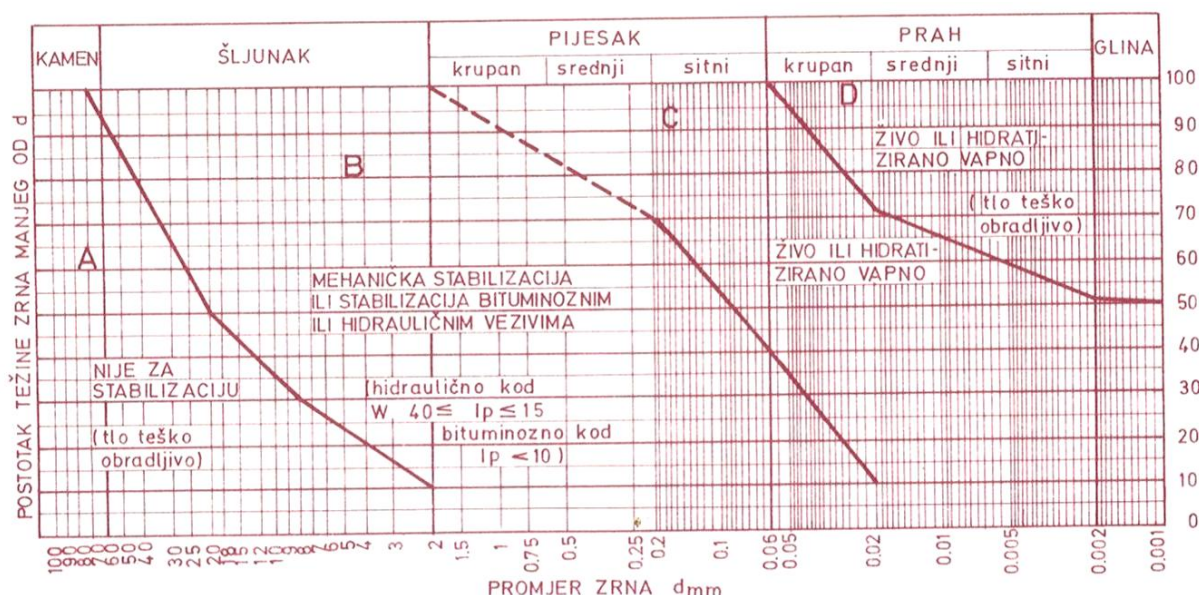
METODE POBOLJŠANJA TLA

Najveća čvrstoća vapnom stabiliziranih mješavina postiže se sa glinovito-pjeskovito-šljunčanim materijalom, gdje se javljaju dva vida čvrstoće, kohezija uslijed pucolanskih reakcija između vapna i minerala gline u glinenim frakcijama mješavine i unutrašnje trenje i ispunjenost u krupnim frakcijama (šljunku).

Da bi se odredilo da li je neko tlo pogodno za stabilizaciju vapnom potrebno je odrediti njegov granulometrijski sastav, granice konzistencije, odnos vlažnosti i zbijenosti po Proctoru i mineraloški sastav. Dakako, ukoliko se sumnja u štetne tvari, potrebno je i njih odrediti.

Iz tih se karakteristika usporedbom s različitim ograničenjima koja daju propisi može orijentaciono odrediti pogodnost materijala za stabilizaciju.

Na slici 12. dan je dijagram iz kojeg se na osnovi granulometrijskog sastava može odrediti pogodnost tla za pojedinačne načine stabilizacije. Interesantno je da su u njemu uključena i praktična ograničenja za rad i to u području vrlo krupnih zrna i vrlo plastičnih glina, jer se takva tla teško mogu strojevima mješati ili sitniti.



Slika 12. Dijagram za orijentacijsko određivanje pogodnosti tla za stabilizaciju vapnom

Naš standard bazira ocjenu pogodnosti tla za stabilizaciju vapnom na A klasifikaciji.

4.3. Vrste vapna koje se primjenjuju kod stabilizacija tla

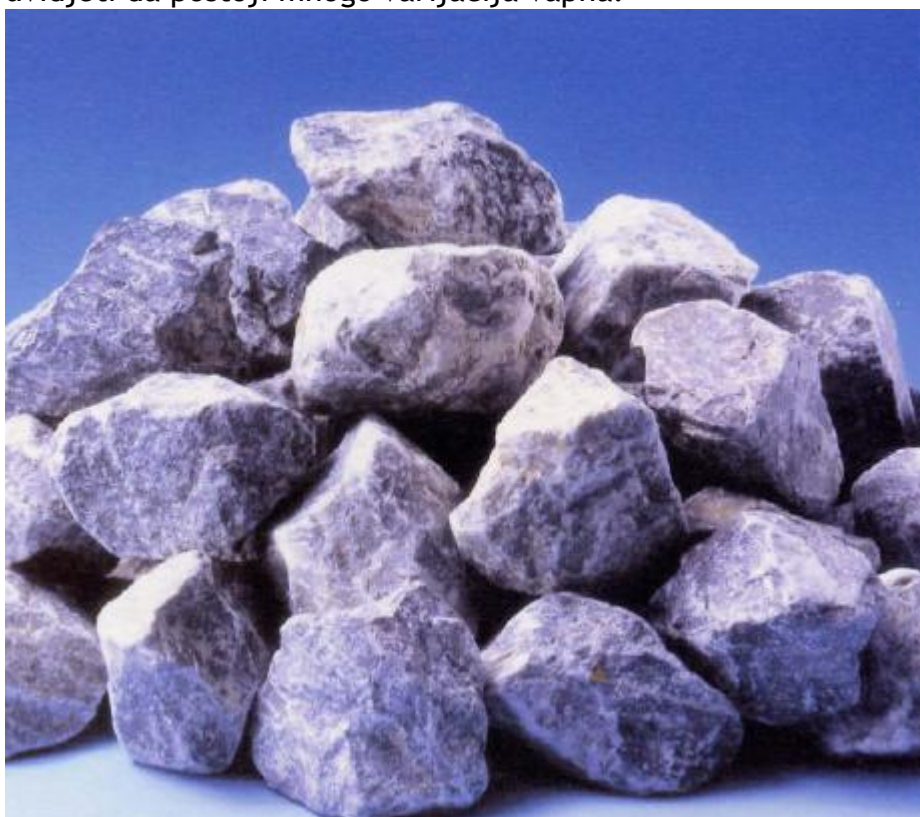
Za stabilizaciju tla upotrebljavaju se različite vrste vapna. O vrsti upotrebljenog vapna ovise karakteristike izvedenih stabilizacija.

Isto tako postoje razlike i u pojedinim produkcijama koje proizlaze iz raznolikosti sirovine i mogućim razlikama u tehnološkom procesu prerade. Ispitivanja su pokazala da različite vrste znatno utječu na svojstva mješavina tlo - vapno.



Slika 13. Mineral kalcijevog karbonata - vapnenca

Striktno definirano vapno je kalcijev oksid (CaO) ali se u praksi tako zovu i oksidi i hidroksidi kalcija i kalcij-magnezija, tj. živo i hidratizirano vapno proizvedeno od vapnenca ili dolomita. S obzirom na određene nečistoće sirovina može se lako uvidjeti da postoji mnogo varijacija vapna.



Slika 13. Vapnenac

METODE POBOLJŠANJA TLA

Vapno proizvedeno od čistog vapnenca CaCO_3 zove se visoko **kalcijско** ili **kalcitno**. Ono proizvedeno od dolomita (CaCO_3 , MgCO_3) naziva se **visokomagnezijsko** ili **dolomitno** vapno. Pri tome kalcitno vapno treba imati do 8% magnezijevog oksida (MgO) dok dolomitna vapna imaju 25 do 45% magnezijevog oksida (MgO).

Postoje tri osnovne vrste vapna:

- živo vapno
- hidratizirano vapno i
- hidraulično vapno.

Živo vapno dobiva se pečenjem kamena u vertikalnim ili položenim rotacionim pećima na temperaturi od oko 900°C . Pri tome nastaje kalcijev oksid (CaO) ili kalcijev i magnezijev oksid ($\text{CaO}+\text{MgO}$). Nakon pečenja dobiveno živo vapno je u komadima veličine tucanika a za primjenu u stabilizaciji ono se melje u prah krupnoće od oko 0,1 mm.

Hidratizirano vapno dobiva se dodavanjem određene količine vode živom vapnu. Za razliku od gašenog vapna gdje se živom vapnu dodaje i više vode nego što je potrebno, tako da se dobije kaša, u procesu hidratacije živom se vapnu dodaje tek toliko vode da se zadovolji afinitet kalcijevog oksida, CaO prema vodi. Radi se tako da se živo vapno melje na granulaciju do 15 mm, a zatim se gasi, pri čemu se ono raspada u sitni prah. Hidratacijom živog kalcitnog vapna dobiva se kalcijev hidroksid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dok se hidratacijom živog dolomitnog vapna dobije dolomitni monohidrat $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{MgO}$. Povećanim pritiskom i duljim zadržavanjem uspjelo se je dobiti hidratizirano vapno oblika $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Mg}(\text{OH})_2$, no ta vrsta vapna nema značenja kod stabilizacije tla.

Kod hidratiziranog je vapna vrlo važno da bude dovoljno sitno, kako bi imalo veliku specifičnu površinu i kako bi moglo brzo i lako stupiti u reakciju s određenim komponentama tla.

Treba napomenuti da se živo vapno u prahu i hidratizirano vapno mogu dodatkom posebnih sredstava učiniti vodoodbojnim. To su tako zvana hidrofobizirana vapna.

Pri stabilizaciji ona pokazuju jaki efekt odbijanja vode i sušenja tla.

Hidraulično vapno također može biti kalcitno ili dolomitno. Dobiva se pečenjem vapnenca ili dolomita koji nisu čisti već sadrže i do 35% gline. Svojstva tog vapna nalaze se između normalnog vapna i portland cementa, tj. ovo vapno ima u sebi pucolanskih komponenti tako da djeluje i kao samostalno vezivo. U našoj se zemlji ova vrsta vapna ne upotrebljava za stabilizaciju tla.

Živo i hidratizirano vapno se po svom djelovanju razlikuju u toliko što kod primjene živog vapna na vlažno tlo dolazi do bržeg isušivanja, s jedne strane zbog vezivanja dijela vode a s druge strane zbog isparavanja, jer se tokom reakcije javlja i toplina. Iz tog je razloga vrlo vlažna tla bolje stabilizirati živim vapnom dok se tla sa sadržajem vode oko optimalne vlažnosti stabiliziraju hidratiziranim vapnom.

Hidraulično se vapno zbog svojih aktivnih pucolanskih komponenti može upotrijebiti za stabilizaciju tala koja sadrže relativno malo minerala gline i kod kojih normalna vapna nisu djelotvorna.

Na kraju ovog razmatranja o vapnima treba reći i da su to lužine koje mogu uzrokovati opekotine na koži onih koji rukuju sa njima. Ovo se naročito odnosi na

METODE POBOLJŠANJA TLA

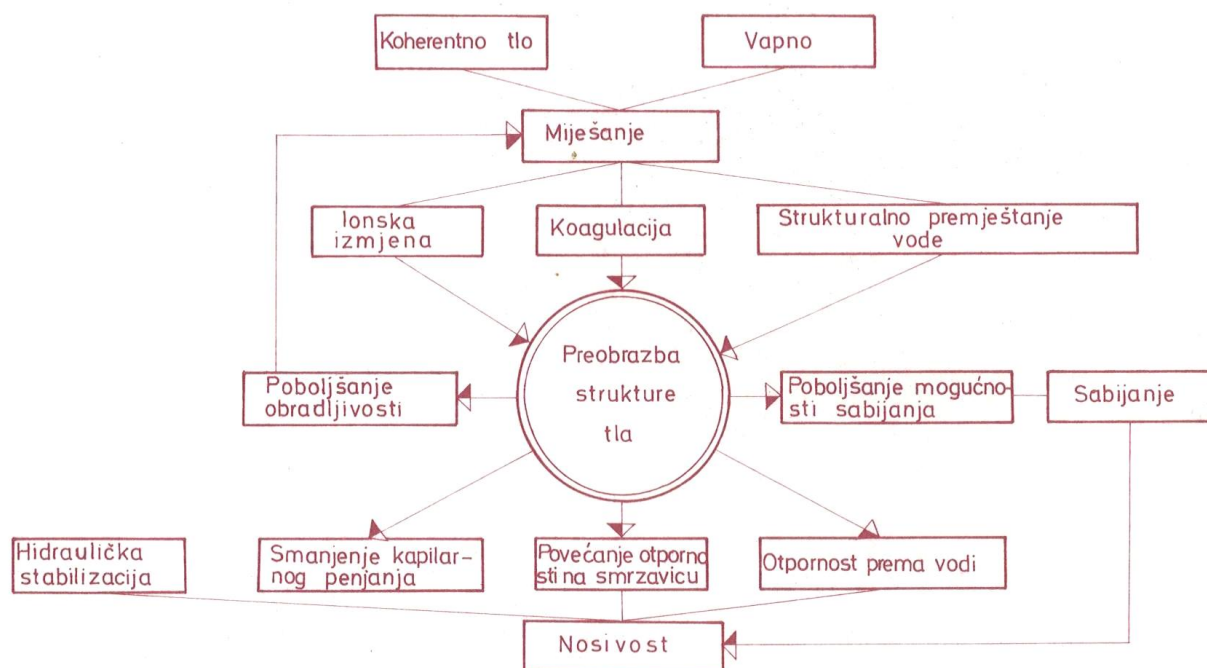
živo vapno. Pri radu s vapnom, stoga treba uvijek predviđati potrebne tehničke i zaštitne mjere kako bi se takvi efekti izbjegli.

4.4. Utjecaj vapna na fizička i geomehnička svojstva stabilizirane mješavine

Kemijske reakcije koje se uz prisustvo vode odvijaju u tlu nakon što mu se doda i rasporedi vapno, a zatim izvrši zbijanje, dovode do izrazitih vrlo uočljivih promjena u strukturi materijala i u njegovim fizikalnim i geomehničkim osobinama.

Glinovito tlo je zbog svojeg koloidno-kristaliničnog sastava i elektrostatičkih odnosa na površini i u unutar rešetki glinenih minerala vrlo osjetljivo na promjene vlažnosti. Ako se suhim glinama, koje su u tom stanju stabilne i čvrste dodaje voda, onda one mjenjaju konzistenciju, postaju polukrute, pa zatim plastične i konačno žitke. To je sve praćeno manjim ili većim promjenama volumena. S povećanjem vlažnosti drastično pada i nosivost, tako da je kod materijala u žitkom konzistentnom stanju gotovo jednaka nuli. Lako je uvidjeti koliko je takav nepostojani materijal nepovoljan u građevinskim konstrukcijama, primjerice u cestama.

Isto tako vlažnost predstavlja veliki problem i kod izvedbe radova jer se ne može postići potrebna zbijenost tj. u dovoljnoj mjeri eliminirati poroznost materijala.



Slika 8. Brandova shema djelovanja vapna na glinovito tlo

Na sve te pojave stabilizacija ima pozitivan učinak. Što više, obradom tla vapnom mogu se upotrebljavati i neka tla koja normalno ne zadovoljavaju kriterije za izvedbu zemljanih radova.

Na Brandovoj shemi, slika 8, pregledno je prikazano djelovanje vapna na tlo. Vidljive su mnogobrojne i značajne promjene.

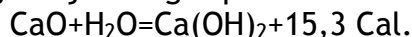
Već prilikom mješanja tla i vapna dolazi do kemijskih procesa i promjene strukture tla (stadij I po Brandu) i te se promjene očituju u ovim osobinama:

METODE POBOLJŠANJA TLA

4.4.1. Prirodni sadržaj vode

Prirodni sadržaj vode se snižava, vrlo intenzivno ukoliko se radi sa živim vapnom. U tom slučaju vlažnost tla se može smanjiti i do 10%.

Kao što je ranije rečeno osim vezivanja dijela vode, dolazi i do isparavanja zbog nastanka topline u procesu gašenja živog vapna:



4.4.2. Granice konzistencije, indeks plastičnosti i indeks konzistencije

Ubrzo nakon mješanja tla s vapnom dolazi do promjene plastičnih karakteristika mješavine. Granica krutosti se povisuje a granica žitkosti ili se snižava ili se povisuje, ali manje od granice krutosti, tako da se indeks plastičnosti u svakom slučaju smanjuje.

Tokom vremena dolazi do daljnjeg smanjenja plastičnosti, indeks plastičnosti se i dalje smanjuje.

Ovakvo ponašanje ima utjecaja i na konzistentno stanje jer se indeks konzistencije znatno povećava, čak i bez većeg isušavanja tla. Ponašanje jednog glinovito prašinastog materijala u pogledu promjene konzistencije prikazano je na slici 9.

4.4.3. Granulometrijski sastav

Struktura tla postaje evidentno krupnozrnatija. Kompletan granulometrijski sastav stabilizacije teško je odrediti u laboratoriju jer dolazi do poteškoća kod areometriranja. U svakom slučaju količina čestica manjih od 0,06 mm u mješavini znatno pada kako s vremenom tako i s količinom dodanog vapna.

4.4.4. Odnos vlažnost zbijenost

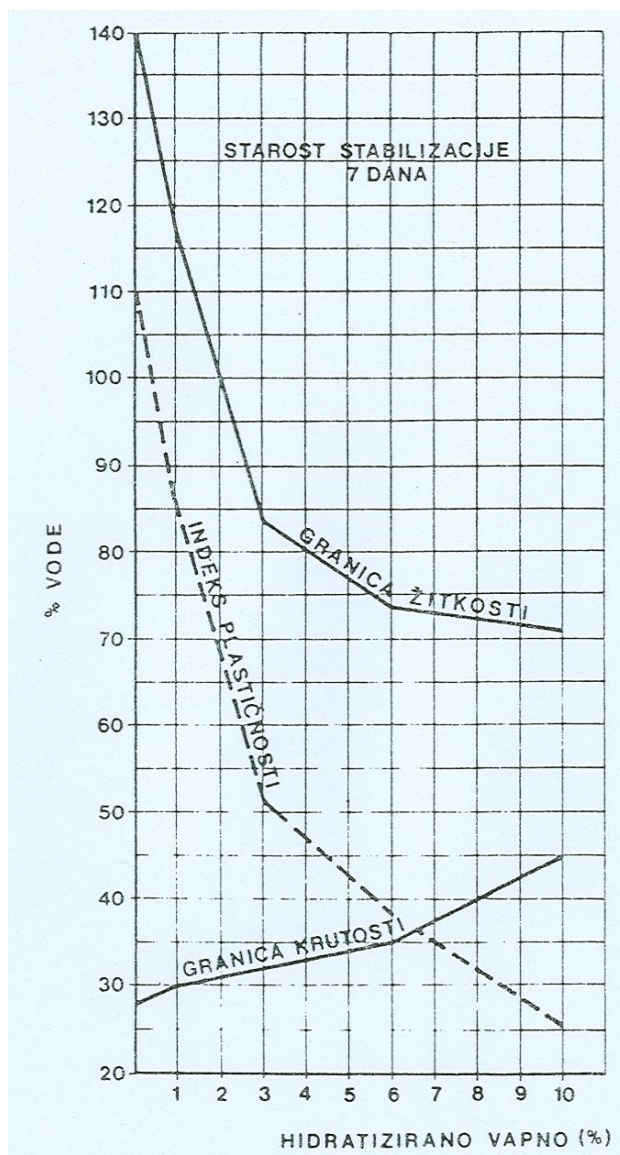
Dodatkom vapna Proctorove krivulje postaju povoljnije u građevinskom smislu. Optimalna vlažnost se povećava a time i moguće područje za ugradnju. Oblik Proctorovih krivulja postaje blaži, što znači da je materijal kod ugradnje manje osjetljiv na varijacije vlažnosti.

Maksimalna suha prostorna masa po Proctoru se snižava, ali to ne smeta, jer procesima vezanja stabilizacija dobiva bolju čvrstoću i nosivost, nego što je to slučaj kod osnovnog glinovitog materijala bez veziva a koji bi imao veću gustoću.

4.4.5. Vodopropusnost

Vodopropusnost vapnom stabiliziranih glinovitih materijala raste u odnosu na isti materijal bez dodatka vapna. To je vjerojatno zbog promjene strukture pora u stabiliziranoj mješavini.

METODE POBOLJŠANJA TLA



Slika 9. Promjena indeksa plastičnosti s povećanjem postotka vapna

4.4.6. Posmična čvrstoća

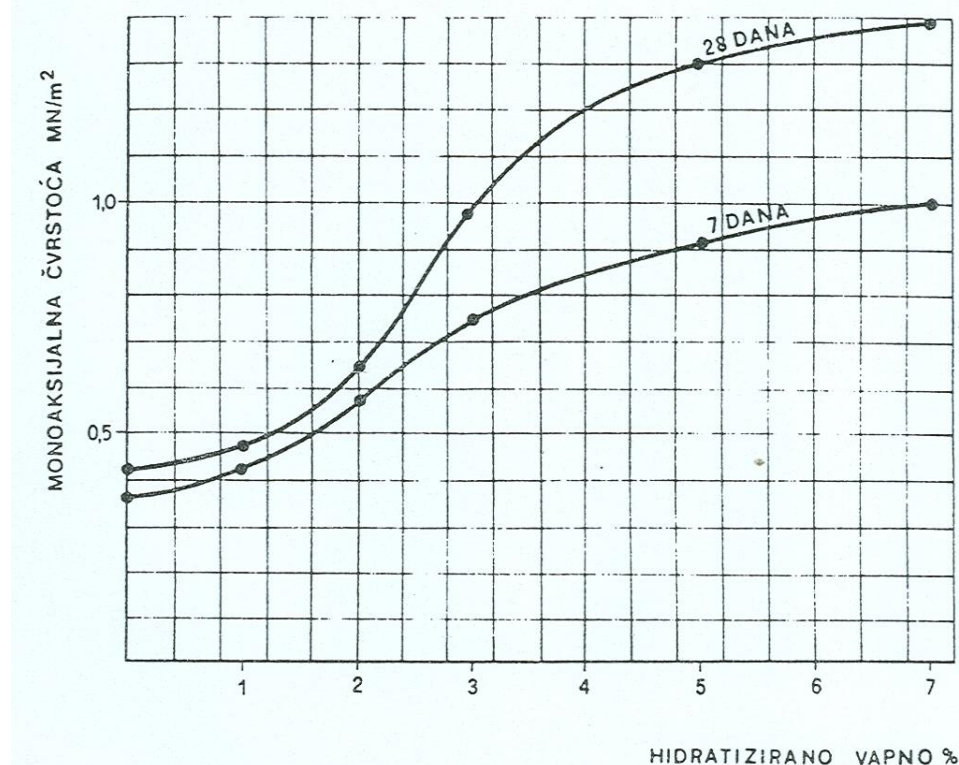
Posmična čvrstoća vapnom stabiliziranom glinovitog materijala raste. Kohezijska komponenta se povećava od veziva koje nastaje pucolanskom reakcijom između vapna i minerala gline a kut trenja se isto povećava od pobojšane granulacije materijla.

Zbog tog svojstva mogu se primjerice nasipi od stabiliziranog materijala izvoditi sa znatno strmijim nagibom nego što bi to bilo moguće kada bi se radili od čistog glinovitog tla.

4.4.7. Jednoosna čvrstoća

METODE POBOLJŠANJA TLA

Jednoosna čvrstoća zbijene mješavine tlo-vapno raste s vremenom pri čemu je obično prvi mjesec prirast čvrstoće veći dok je kasnije usporen. Dugotrajna ispitivanja pokazala su da čvrstoća stabilizacije vremenom neprekidno pomalo raste.



Slika 10. Promjena tlačne čvrstoće uslijed dodatka vapna

Čvrstoća raste i s porastom dodatka vapna, međutim postoji neki sadržaj vapna, nakon kojeg čvrstoća opada ili samo neznatno raste, a koji se može smatrati tehnički ili ekonomski optimalnim. Taj sadržaj može varirati i u odnosu na starost stabilizacije.

U praksi nije uvijek nužno da se ide do onog sadržaja vapna koji daje najpovoljnije mehaničke karakteristike tretiranog tla, nego do onoga koji osigurava minimalne tražene kriterije za određenu svrhu.

Čvrstoća jako varira za različite vrste tla, što je i logično obzirom na njihove različite mineraloške sastave i reaktivnost a znatan utjecaj može imati i vrsta upotrebljenog tla.

Povećana tlačna čvrstoće i nosivost (CBR) omogućuju izradu slabije kolničke konstrukcije a otpornost na vodu omogućuje izradu posteljice koja je otporna na kišu i može relativno dulje vremena biti nezaštićena.

4.4.8. Otpornost na smrzavicu

Apsolutna sigurnost vapnom stabiliziranih materijala na smrzavicu na postoji. To znači, da ukoliko predviđamo da stabilizacija služi kao konstruktivni element gornjeg ustroja prometnice, da moramo posvetiti znatnu pažnju određivanju pravilne mješavine, koja će biti u dovoljnoj mjeri otporna na taj utjecaj. U tom je pogledu vrlo važno da stabilizacija prije izlaganja djelovanju smrzavanja bude dovoljno stara jer tada je vezanje najvećim dijelom završeno i materijal ima veću stabilnost i

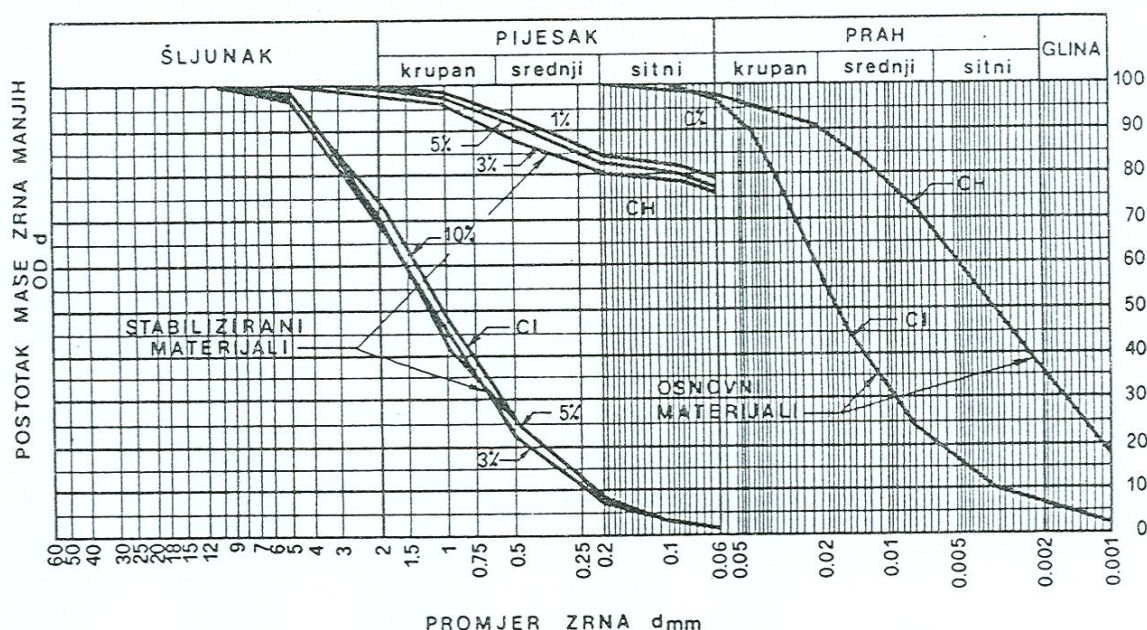
METODE POBOLJŠANJA TLA

otpornost prema smrzavanju. Za postizanje otpornosti prema smrzavici često treba pribjeći i dodavanju određenih količina drugih veziva uz vapno, na primjer cementa, zgure i sličnih materijala to jest izvesti takozvanu kompleksnu stabilizaciju.

Ukoliko se ne radi o konstruktivnom elementu nego se radi o privremenoj građevinskoj mjeri, kojoj je svrha da se primjerice ulakša ugradnja materijala onda otpornost stabilizacije prema smrzavici nije značajna.

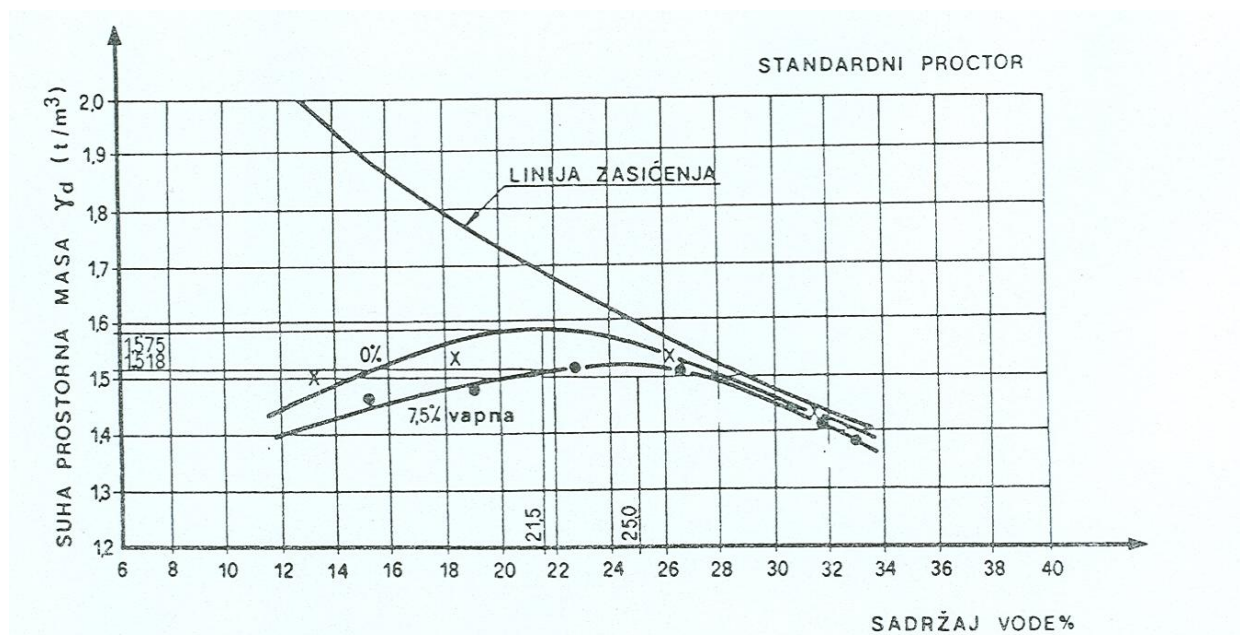
4.4.9. Bubrenje

Bubrenje se smanjuje dok se nosivost izražena indeksom CBR povećava.



Slika 10. Promjena granulometrijskog sastava tla uslijed dodatka vapna

METODE POBOLJŠANJA TLA



Slika 11. Promjena Proctorove krivulje uslijed dodatka vapna

4.5. Određivanje sastava stabilizacijske mješavine

Prije početka rada na stabilizaciji u laboratoriju se određuje prethodni radni sastav (receptura).

Nakon određivanja osnovnih svojstava tla koje se želi stabilizirati (granulometrijski sastav, granice konzistencije, organske tvari, Proctor) pristupa se izradi i ispitivanju mješavina tla s raznim dodacima vapna.

Pored spomenutih svojstava kod mješavina se ispituje tlačna čvrstoća na valjkastim uzorcima $\varnothing 10$ cm visine 11,7 cm ili $\varnothing 15,2$ cm i visine 15,2 cm koji se čuvaju u vlažnom prostoru 7 i 28 dana.

Za posteljicu se traži da minimalna tlačna čvrstoće bude:

- nakon 7 dana 0,4 MN/m²
- nakon 28 dana 0,5 MN/m².

Na osnovi dobivenih rezultata, a osobito uzimajući u obzir kriterije za čvrstoću, bira se mješavina za recepturu. Recepturom se daju ovi podaci:

- potrebna količina vapna u mas.% u odnosu na suhu masu tla,
- optimalna vlažnost mješavine tla i vapna
- maksimalna suha prostorna masa mješavine po Proctoru
- čvrstoća.

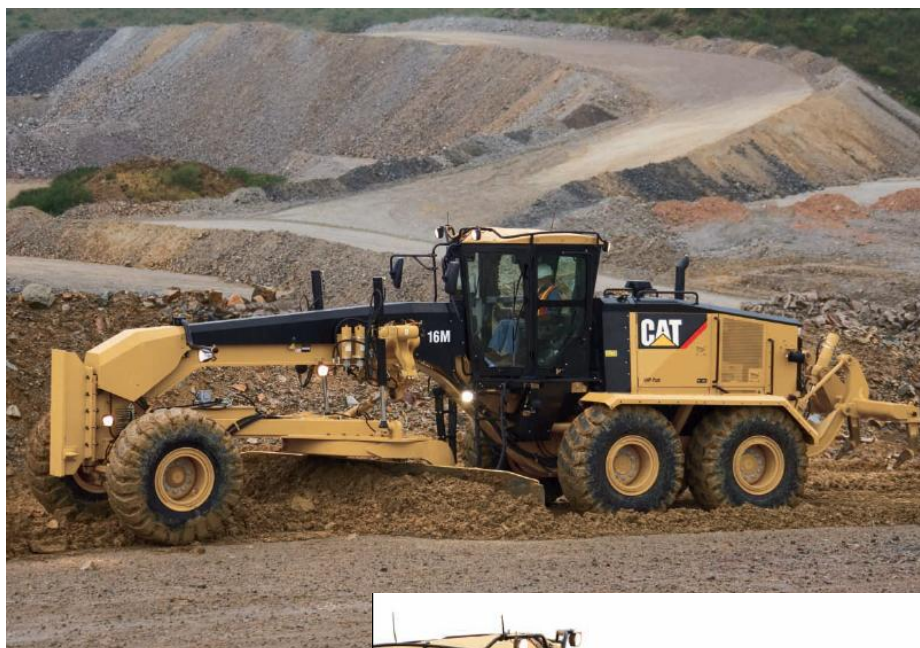
Potrebna količina vapna obično se kreće od 3 do 5% od mase suhog tla, izuzetno do 10% za slučajeve vrlo plastičnog i mokrog tla.

Na sloj glinovitog tla debljine 20 cm razastire se prema tome oko 10 do 15 kg vapna po m².

METODE POBOLJŠANJA TLA

4.6. Izvedba stabilizacije vapnom

Postupak stabilizacije tla vapnom na gradilištu, najkraće opisano se sastoji od homogenog mješanja tla s odgovarajućom količinom vapna pri čemu mješavina u pravilu mora imati optimalnu vlažnost. Mješavina tla i vapna zbije se, zatim do tražene zbijenosti i njeguje određeno vrijeme do postizanja zahtijevanih karakteristika.



Debljina sloja kreće se od 15 do 25 cm, ali je moguće raditi i stabilizirane slojeve debljine do 40 cm.

METODE POBOLJŠANJA TLA

Stabilizacija tla posteljice vapnom radi se postupkom na licu mjesta (**mix in place**). Prije početka stabilizacije površina sloja zemljanog materijala pripremi se prema projektu.

Sloj se zatim razrahljuje pogodnim načinom, pri čemu se završno sitnjenje obavlja rotofrezerima.



METODE POBOLJŠANJA TLA

Dubina usitnjavanja treba biti takva da se nakon miješanja s vezivom i zbijanja dobije sloj projektirane debljine. Na razrahljeni se sloj zatim razastire potrebna količina vapna po jedinici površine. Razastiranje se obavlja mehaničkim sredstvima koja osiguravaju dovoljnu jednoličnost razastiranja.



METODE POBOLJŠANJA TLA



Poslije se rotofrezerima miješa zemljani materijal i vapno sve dotle dok se ne dobije homogena mješavina, što se provjerava prema boji mješavine.

U toku miješanja dodaje se po potrebi određena količina vode kako bi se dobila optimalna vlažnost mješavine, a ako je materijal previše vlažan izlaže se prethodno suncu i vjetru kako bi mu se vlažnost smanjila na potrebnu mjeru.



METODE POBOLJŠANJA TLA



Mješavina se zbija odmah ili nakon nekog vremena, što ovisi o vrsti veziva, a mora biti određeno prethodnim laboratorijskim ispitivanjima ili iskustvom. Zbijanje se obavlja ježevima, valjcima na kotačima s gumama ili glatkim valjcima do potrebne jednolične zbijenosti.

METODE POBOLJŠANJA TLA



METODE POBOLJŠANJA TLA

Prije izrade konstrukcije posteljica traži određeno vrijeme njege (3 do 7 dana) kroz koje se postiže znatan dio stabilizacijskog efekta, a kasnije se svojstva stabiliziranog sloja neprestano i dalje pomalo poboljšavaju.

Njege se obavlja vlaženjem površine pomoću auto-cisterni.



4.7. Kontrola kvalitete izrade

Kontrola kvalitete obuhvaća:

- prethodna ispitivanja
- tekuća ispitivanja u toku rada
- kontrolna ispitivanja u toku rada

Prethodna ispitivanja obuhvaćaju sva prethodna ispitivanja komponenata i mješavina. Prethodni radni sastav prenosi se na gradilišnu mehanizaciju. To konkretno znači da količinu vapna prema recepturi koja se daje kao % u odnosu na suhu masu tla treba preračunati na kg/m^2 površine u odnosu na debljinu sloja predviđenog za stabiliziranje.

Kod važnijih gradilišta u prethodna ispitivanja spada i izrada pokusne dionice na

METODE POBOLJŠANJA TLA

kojoj se isprobava učinak tehnološkog postupka i dokazuje mogućnost postizanja tražene kvalitete.

Tekuća ispitivanja u toku rada obavlja izvođač, a cilj im je da se kontrolira ispravnost postupka i kvaliteta izrade, te pripremi posteljica za kontrolna ispitivanja.

Tekuća ispitivanja obuhvaćaju određivanje ovih najvažnijih karakteristika:

- vlažnosti
- stupnja zbijenosti (traži se 100 % standardnog Proctora) - indeksa CBR
- tlačne čvrstoće
- debljine stabiliziranog sloja
- točnosti poprečnog profila i
- ravnosti (traži se 3 cm mjereno letvom dužine 4 metra)

Kontrolna ispitivanja obavlja investitor, a cilj im je konačna potvrda postignute kvalitete. Obuhvaćaju uglavnom iste karakteristike kao i tekuća ispitivanja, ali im je gustoća manja.

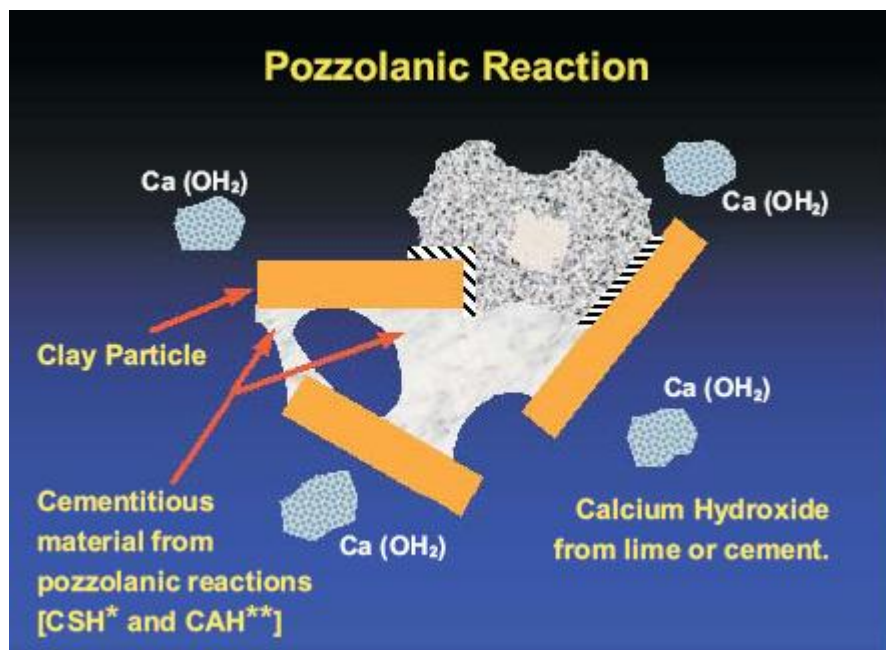
4.8. Uloga stabilizacije tla vapnom u konstrukciji ceste

Stabilizacija tla vapnom nalazi svoju primjenu u ovim elementima ceste:

- podtlu
- nasipima
- posteljici
- konstrukciji kolnika

Podtlo i nasipi stabiliziraju se u slučajevima kada je to tehnički i ekonomski opravdano, a iskustva su pokazala da se dobivaju vrlo dobri efekti kako u pogledu dugotrajne stabilnosti tako i odvijanja radova za vrijeme procesa građenja.

Stabiliziranje posteljice kod slabo nosivih glinovitih materijala (sa CBR<5%) pokazalo se vrlo uspješnim. Debljina tako stabiliziranog tla iznosi 15 do 25 cm. Iskustva su pokazala da takav stabilizirani sloj posteljice nema samo velike tehnološke prednosti u toku izgradnje nego i izvanredno značenje za konstrukciju. Na njemu se sloj mehanički zbijenog znatog kamenog materijala može bolje zbiti čime dobiva veću nosivost pa mu se i debljina može donekle smanjiti.



* $\text{Ca}^{++} + \text{OH}^- + \text{Soluble Clay Silica} \rightarrow \text{Calcium Silicate Hydrate (CSH)}$

** $\text{Ca}^{++} + \text{OH}^- + \text{Soluble Clay Alumina} \rightarrow \text{Calcium Aluminate Hydrate (CAH)}$