

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Prometna smer

Kandidat:

**Franci Starbek**

# **Vpliv apna na volumsko stabilnost zemljin v spodnjem ustroju cest**

**Diplomska naloga št.: 2998**

**Mentor:**  
prof. dr. Bojan Majes

**Somentor:**  
viš. pred. dr. Ana Petkovšek

Ljubljana, 29. 2. 2008

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **FRANCI STARBEK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
»**VPLIV APNA NA VOLUMSKO STABILNOST ZEMLJIN V SPODNJEM USTROJU  
CEST**«.

Podpisani: Franci STARBEK

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 11.02.08

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 624.131:625.731:691.55(043.2)

**Avtor:** Franci Starbek

**Mentor:** prof. dr. Bojan Majes

**Somentorica:** viš. pred. dr. Ana Petkovšek

**Naslov:** Vpliv apna na volumsko stabilnost zemljin v spodnjem ustroju cest

**Obseg in oprema:** 66 str., 8 pregl., 35 sl., 6 en.

**Ključne besede:** apno, adsorpcija, apnena stabilizacija, glina, nabreklijive zemljine sadra, sukcijska

### **Izvleček:**

Gline imajo zaradi volumske neobstoynosti zelo omejeno uporabnost. Uporabne so le, če jih predhodno poboljšamo (modificiramo) ali kemično stabiliziramo z anorganskimi vezivi. Če so v glini prisotni sulfati, izničijo pozitiven učinek stabilizacije. V tem diplomskem delu smo raziskovali, kakšni so vplivi dodajanja apna in sadre na poboljšanje volumske obstojnosti nabreklijivih glin iz področja severovzhodne Slovenije. Osnovni zemljini s tremi različnimi izhodiščnimi vlagami (16, 18 in 24 %), smo dodali 4 % apna, oz. 10 % sadre glede na suho maso zemljine in tako pripravili preizkušance glina+apno oz glina+apno+sadra. V različnih časovnih obdobjih (1, 4, 7 in 28 dni) smo na osnovni zemljini in preizkušancih določili max.prostorninsko gostoto in optimalno vlago po Proctorju, konsistenčne meje po Atterbergu, linearno nabrekanje z edometriko raziskavo, enosno tlačno trdnost in sukcijsko s potenciometrom WP4-T. Analiza je pokazala, da se ob dodatku apna glini zmanjša indeks plastičnosti, kar poveča njeno vgradljivost, izboljša se tudi njena uporabnost, saj se občutno zmanjšajo nabrekalne deformacije. Dodatek sadre zmesi glina+apno znatno povečuje nabrekalne deformacije in manjša pozitiven učinek apna. Ključna ugotovitev v diplomskem delu je, da je potrebno zmes apno+glina vgraditi na mokri strani Proctorjeve krivulje. S tem zagotovimo ustrezne pogoje za kemično reakcijo in posledično izboljšanje enosne tlačne trdnosti, ki se povečuje s časom ter manjšo volumsko občutljivost zmesi.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

- UDC:** 624.131:625.731:691.55(043.2)
- Author:** Franci Starbek
- Supervisor:** prof. dr. Bojan Majes
- Co supervisor:** dr. Ana Petkovšek
- Title:** Lime influence on volume stability of soils in lower structure of roads
- Notes:** 66 p., 8 tab., 35 fig., 6 eq.
- Key words:** adsorption, clay, gypsum, lime, lime stabilization, suction, swelling soils

### **Abstract:**

Due to their volume instability, use of clays is limited. They can be used only when they are precursively modified or chemically stabilized using inorganic binders. Presence of sulphates in clays diversifies positive effect of stabilization. The goal of our work was to research the effects lime and gypsum have on improvement of volume stability on swelling clays in the northeast of Slovenia. 4 % of lime or 10 % of gypsum (% on the dry mass), were added to basic soil having three different moisture contents (16, 18 and 21 %), consequently getting two different samples clay+lime and clay+lime+gypsum. In periods of 1, 4, 7 and 28 days maximum volume density and samples according to Proctor were defined. We also defined the consistency limits according to Atterberg, linear swelling using edometer cells compressive strength of compacted mixtures and soil suction with potentiometer WP4-T. Analysis has shown that adding lime to clay reduces plasticity index and swelling deformations and thus increases its use in road construction. Adding gypsum to clay+lime mixture considerably increases swelling deformations and reduces positive effect of lime. Our key finding is that it is of crucial importance to construct clay+lime mixture on the wet side of the Proctor curve, and thus assure equal conditions for chemical reactions and improve compressive strength that increases with time.

## **ZAHVALA**

Iskrena hvala somentorici Ani Petkovšek in mentorju Bojanu Majes za vso pomoč, zaupanje, potrpežljivost in nasvete.

Zahvaljujem se tudi vsem na Katedri za mahaniko tal, ki so mi kakor koli olajšali delo v laboratoriju. Hvala tako za vašo strokovno pomoč, kot za spodbudne in prijazne besede.

Zahvala pa gre tudi mojim staršem, Tereziji in Ladotu Starbek ki sta mi omogočila študij. Hvala za spodbudo, podporo in pomoč tako v dobrih kot slabih trenutkih študentskega življenja.

Največja zahvala pa gre moji Simonci, ki mi je stala ob strani, mi pomagala in me bodrila vse do zagovora diplomskega dela.

## KAZALO VSEBINE

	str.	
<b>1</b>	<b>UVOD</b>	1
<b>2</b>	<b>KRATEK PREGLED ZGODOVINE RABE APNENE STABILIZACIJE V SLOVENIJI</b>	4
<b>2.1</b>	<b>Uvod</b>	4
<b>2.2</b>	<b>Zgodovina rabe apnene stabilizacije v Sloveniji</b>	6
<b>3</b>	<b>STABILIZACIJA IN MODIFIKACIJA (POBOLJŠANJE)</b>	8
<b>3.1</b>	<b>Uvod</b>	8
<b>3.2</b>	<b>Zemljine za stabiliziranje in modificiranje (poboljšanje)</b>	10
<b>3.2.1</b>	<b>Uvod</b>	10
<b>3.2.2</b>	<b>Stabiliziranje in modificiranje koherentnih zemljin</b>	10
<b>3.2.2.1</b>	<b>Glinena zemljina</b>	12
<b>3.2.3</b>	<b>Stabiliziranje in modificiranje nekoherentnih in mešanih zemljin</b>	14
<b>3.3</b>	<b>Predhodne raziskave zemljine za oceno možnosti rabe kemične stabilizacije</b>	14
<b>3.3.1</b>	<b>Osnovne raziskave</b>	14
<b>3.3.1.1</b>	<b>Granulacijska analiza zemljine</b>	15
<b>3.3.1.2</b>	<b>Konsistenčne meje</b>	15
<b>3.3.1.3</b>	<b>Gostota in optimalna vlažnost zemljine</b>	15

	str.	
<b>3.3.1.4</b>	<b>Humozne in organske primesi v zemljini</b>	16
<b>3.3.1.5</b>	<b>Vsebnost sulfatov</b>	16
<b>3.3.1.6</b>	<b>Posebne raziskave, če je to potrebno</b>	17
<b>3.4</b>	<b>Veziva za stabiliziranje in modificiranje</b>	17
<b>3.4.1</b>	<b>Uvod</b>	17
<b>3.4.2</b>	<b>Apno</b>	18
<b>3.4.2.1</b>	<b>Žgano apno (živo apno)</b>	19
<b>3.4.2.2</b>	<b>Hidrirano apno</b>	20
<b>3.4.2.3</b>	<b>Gašeno apno ali apneno mleko (apnena brozga)</b>	20
<b>3.5</b>	<b>Teoretske osnove apnene modifikacije in stabilizacije</b>	21
<b>3.5.1</b>	<b>Teoretske osnove</b>	21
<b>3.5.2</b>	<b>Apnena modifikacija in stabilizacija – odločitev za rabo</b>	23
<b>3.5.3</b>	<b>Določitev optimalne količine apna</b>	25
<b>3.5.3.1</b>	<b>Eades in Grim-mov pH test</b>	25
<b>3.5.3.2</b>	<b>Ugotavljanje tlačne trdnosti stabilizirane zemljine</b>	26
<b>3.6</b>	<b>Postopek izvedbe</b>	26
<b>3.6.1</b>	<b>Postopek gradnje z mešanjem na mestu "mix in place" (J.H. Smith 1996)</b>	27
<b>3.6.1.1</b>	<b>Priprava planuma zemljine</b>	27
<b>3.6.1.2</b>	<b>Nasutje apna</b>	27



	str.	
<b>3.6.1.3</b>	<b>Prvo mešanje in drobljenje osnovnega materiala</b>	28
<b>3.6.1.4</b>	<b>Dodajanje vode</b>	29
<b>3.6.1.5</b>	<b>Rezanje in lahka zgostitev</b>	29
<b>3.6.1.6</b>	<b>Obdobje zorenja</b>	30
<b>3.6.1.7</b>	<b>Ponovno mešanje in končna prilagoditev vlažnosti</b>	30
<b>3.6.1.8</b>	<b>Zgoščevanje in planiranje</b>	31
<b>3.6.1.9</b>	<b>Negovanje in zaščita</b>	31
<b>3.7</b>	<b>Raziskave stabilizirane zemljine</b>	31
<b>4</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL - MATERIALI IN METODE</b>	33
<b>4.1</b>	<b>Uvod</b>	33
<b>4.2</b>	<b>Izvor materiala v raziskavi</b>	33
<b>4.3</b>	<b>Priprava zemljine za raziskavo</b>	34
<b>4.3.1</b>	<b>Priprava preizkušancev glina za določitev optimalne vlage</b>	34
<b>4.3.2</b>	<b>Priprava zmesi glina+apno</b>	35
<b>4.3.3</b>	<b>Priprava zmesi glina+apno+sadra</b>	35
<b>4.4</b>	<b>Raziskave</b>	35
<b>4.4.1</b>	<b>Določanje vlažnosti v laboratoriju</b>	35
<b>4.4.2</b>	<b>Prostorninska gostota po Proctorju</b>	35
<b>4.4.3</b>	<b>Atterbergove meje plastičnosti</b>	36

	str.	
<b>4.4.4</b>	<b>Raziskave volumske obstojnosti</b>	37
<b>4.4.5</b>	<b>Raziskava enoosne tlačne trdnosti</b>	37
<b>4.4.6</b>	<b>Meritve sukcije</b>	38
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL – REZULTATI PREISKAV</b>	40
<b>5.1</b>	<b>Uvod</b>	40
<b>5.2</b>	<b>Atterbergove meje plastičnosti</b>	40
<b>5.3</b>	<b>Določanje tlačne trdnosti in optimalne gostote po Proctorjevi metodi, za glino in preizkušance glina+apno in glina+apno+sadra</b>	43
<b>5.4</b>	<b>Spremljanje spreminjanja vsebnosti vlage v preizkušancih glede na njihovo začetno vlažnost</b>	44
<b>5.5</b>	<b>Spremljanje deformacij v preizkušancih glede na njihovo začetno vsebnost vlage</b>	46
<b>5.6</b>	<b>Spremljanje enoosne tlačne trdnosti v preizkušancih glede na njihovo začetno vsebnost vlage</b>	48
<b>5.7</b>	<b>Razvoj deformacij preizkušancev glede na njihovo začetno vlago</b>	50
<b>5.8</b>	<b>Retencijske krivulje in sukcija</b>	52
<b>6</b>	<b>RAZPRAVA IN SKLEPI</b>	54
<b>6.1</b>	<b>Uvod</b>	54
<b>6.2</b>	<b>Vpliv dodatka veziv na maksimalno suho gostoto in optimalno vlago</b>	54
<b>6.3</b>	<b>Vpliv dodatka veziv na konsistenčne meje</b>	54

	str.	
<b>6.4</b>	<b>Vpliv veziv na spremembe vlage, glede na izhodiščno vsebnost vlage</b>	55
<b>6.5</b>	<b>Vpliv veziv na nabrekanje preizkušancev, pri znani začetni vsebnosti vlage</b>	56
<b>6.6</b>	<b>Vpliv veziv na enosno tlačno trdnost preizkušancev, pri znani začetni vsebnosti vlage</b>	57
<b>6.7</b>	<b>Vpliv začetne vlage na nabrekljivost preizkušancev</b>	58
<b>6.8</b>	<b>Retencijske krivulje</b>	59
<b>6.9</b>	<b>Sklepi</b>	60
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	61
	<b>VIRI</b>	63
	<b>Ostali viri</b>	65

## KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 3.1: Klasifikacija zemljina po ASSHTO.	11
Preglednica 3.2: Značilnosti izmenjevalcev v tleh (Stritar, 1973).	13
Preglednica 3.3: Način stabiliziranja glede na vrsto zemljine.	18
Preglednica 3.4: Vpliv hidroksilnih in vodikovih ionov na lastnosti tal (Stritar, 1973).	21
Preglednica 5.1: Rezultati Proctorjeve raziskave.	43
Preglednica 6.1: Atterbergove meje plastičnosti preiskovanih zmesi.	55
Preglednica 6.2: Deformacija v odvisnosti od preizkušanca in začetne vlažnosti.	57
Preglednica 6.3: Enoosna tlačna trdnost preizkušancev in njim pripadajoča vlaga.	58

## KAZALO SLIK

	str.
Slika 1.1: Slovenski avtocestni križ (Vir: Motorevija ).	1
Slika 1.2: Geološka karta slovenije (Vir: Geološki zavod Slovenije).	2
Slika 1.3: Poškodba novozgrajenega vozišča avtoceste (foto. A. Petkovšek).	3
Slika 1.4: Poškodbe na površinskih odvodnikih zaradi nabrekanja podlage (foto. A. Petkovšek).	3
Slika 2.1: Prerez ustroja ceste glede na vrsto stabilizacije.	4
Slika 2.2: Utrditev sodobnega vozišča glede na vrsto stabilizacije.	4
Slika 2.3: Gradnja po principu apnenih kolov.	5
Slika 2.4: Stabilizacija z apnenimi koli.	5
Slika 3.1: Tvorba obroča vode okoli zrna gline.	10
Slika 3.2: Poškodba prometnice zaradi nabrekanja.	10
Slika 3.3: Tetraedrska plast v strukturi mineralov glin (Petkovšek, 2006, cit. po Mitchell, 1993).	12
Slika 3.4: Oktaedrska plast v strukturi mineralov glin (Petkovšek, 2006, cit. po Mitchell, 1993).	13
Slika 3.5: Krog preobrazbe apna (prirejeno po Žarnič, 2003).	19
Slika 3.6: Pucolanska reakcija (Petkovšek, 2006).	23
Slika 3.7: Določitev potrebne količine apna za stabilizacijo po Eades-Grimovem testu.	25

	str.
Slika 3.8: Določitev potrebne količine apna za stabilizacijo po postopku enoosne tlačne trdnosti.	26
Slika 3.9: Posipanje zemljine z apnom.	28
Slika 3.10: Postopek mešanja zemljine z apnom z mešalnikom = "freza".	29
Slika 5.1: Določitev vrste zemljine glede na njene konsistenčne meje.	41
Slika 5.2: Konsistenčne meje preizkušanca glina+apno.	42
Slika 5.3: Konsistenčne meje preizkušanca glina+apno+sadra.	42
Slika 5.4: Maksimalna suha gostota preiskovane glinice po Proctorjevi metodi in njena tlačna trdnost.	43
Slika 5.5: Optimalna suha gostota preiskovane glinice in preizkušancev glina+apno ter glina+apno+sadra.	44
Slika 5.6: Spremljanje vsebnosti vlage v preizkušancih glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	45
Slika 5.7: Spremljanje vsebnosti vlage v preizkušancih glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	46
Slika 5.8: Spremljanje deformacije preizkušanca glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	47
Slika 5.9: Spremljanje deformacije preizkušanca glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	48
Slika 5.10: Spremljanje enoosne tlačne trdnosti preizkušanca glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	49
Slika 5.11: Spremljanje enoosne tlačne trdnosti preizkušanca glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.	49

	str.
Slika 5.12: Razvoj deformacij preizkušanca glina+apno in preizkušanca gline glede na začetne vsebnosti vlage.	51
Slika 5.13: Razvoj deformacij preizkušanca glina+apno+sadra in preizkušanca gline glede na začetne vsebnosti vlage.	51
Slika 5.14: Retencijska krivulja osnovne gline.	52
Slika 5.15: Retencijska krivulja zmesi glina+apno v odvisnosti od časa vezanja.	53
Slika 5.16: Retencijska krivulja zmesi glina+apno+sadra v odvisnosti od časa vezanja.	53
Slika 6.1: Naraščanje vlage zemljine tekom edometriške raziskave preizkušancev glina+apno.	59

## SLOVAR MANJ ZNANIH IZRAZOV IN TUJK

- ⇒ adsorpcija vode  
*vezanje vode na površino zrna zemljine*
- ⇒ adsorpcijski obroč  
*hidratizirano zrno gline oz. zrno obdano s plastjo vodnih molekul*
- ⇒ apnena stabilizacija  
*kemično stabiliziranje oz. utrjevanje temeljnijih tal z apnom*
- ⇒ ettringit  
*mineral zemljine, ki nastane kot posledica kemične reakcije med apnom, glineno zemljino in sadro*
- ⇒ kation  
*ion s pozitivno nebitim električnim nabojem (npr.  $K^+$  in  $Mg^{2+}$ )*
- ⇒ kationska izmenjava  
*pojav v glinah, ko se kationi vezani v kristalno mrežo zamenjajo s katoni iz raztopine*
- ⇒ nabrekalnim potencial  
*zmožnost zemljine vezave vode*
- ⇒ nabrekalna deformacija  
*fizikalne spremembe zemljine, ki so posledica vezave vode*
- ⇒ polarna molekula  
*molekula s pozitivno in negativnim nabojem (npr. molekula vode)*
- ⇒ potencimeter  
*naprava, ki meri sukcijsko na principu rosišča*



- ⇒ pucolanska reakcija  
*kemična reakcija med zemljino in vezivom (npr. apno), kjer se tvori cementni material*
  
- ⇒ sadra  
*mineral zemeljske skorje, ki vsebuje žveplo*
  
- ⇒ sukcija  
*podtlak vode v zemljini*
  
- ⇒ sulfati  
*nevtralne soli, ki nastanejo ob vezanju vode na žvepleno kislino (vsebuje kemijski element žveplo)*
  
- ⇒ thaumasit  
*mineral zemljine, ki nastane kot posledica kemične reakcije med apnom, glineno zemljino in sadro*
  
- ⇒ valence ionov  
*število elektronov na zunanji lupini iona, ki se lahko od iona odcepijo ali tvorijo ionsko oz. kovalentno vez (npr.  $Fe^{3+}$  ima tri elektrone na zunanji lupini  $Na^+$  pa le enega)*

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

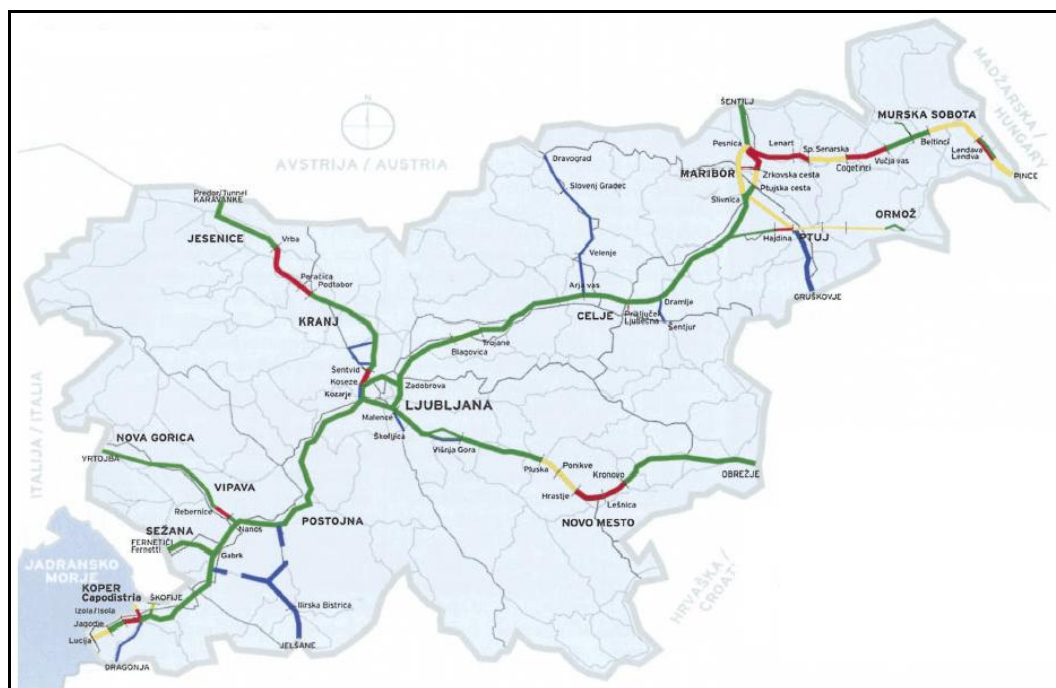
AC klas.	klasifikacija zemljine po Arthur Cassagrande
CBR	California bearing ratio ( <i>Kalifornijski nosilnostni kvocient</i> )
EF pepel	elektrofilterski pepel
MCHW	manual of contract documents for highway works ( <i>priročnik pogodbene dokumentacije za avtocestna dela</i> )
Pripad.	pripadajoča
PTP	posebni tehnični pogoji
TE	termoelektrarna
TSC	tehnične specifikacije za javne ceste
USCS	unified soil classification system ( <i>enotni sistem klasifikacije tal</i> )
ipd.	in podobno
itd.	in tako dalje
oz.	oziroma
A	prerez
$E_{vd}$	modul elastičnosti
$I_p$	indeks plastičnosti
MPa	megapascal
P	sila
$S_r$	zasičenost
$V_0$	začetni volumen
$W_s$	teža suhega materiala

$W_w$	teža mokrega materiala
$\Delta h$	sprememba višine
$\Delta V$	sprememba volumna
$h_0$	začetna višina
kPa	kilopascal
$m^3$	kubični meter
me	miliiekvivalent oz. količina ionov, ki se menjajo v tekočem stanju
$q_m$	tlačna trdnost namočenega preizkušanca
$q_s$	tlačna trdnost suhega preizkušanca
$q_u$	enoosna tlačna trdnost
s	sekunda
t	tona
w	vlaga
$w_L$	meja židkosti
$w_{opt}$	optimalna vlaga
$w_p$	meja plastičnosti
$\varepsilon$	deformacije
$\varepsilon_{lin}$	linearna deformacija
$\sigma$	napetost
$\rho_{d\ max}$	maksimalna suha gostota
$\emptyset$	premer

## 1 UVOD

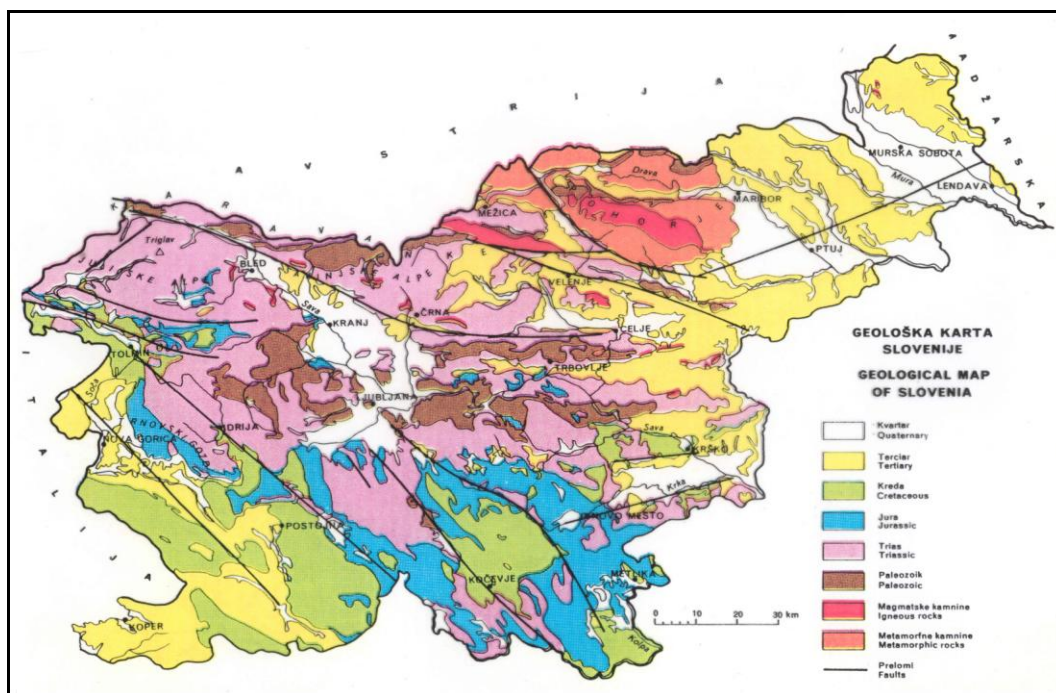
Cestni transport je najpomembnejša oblika transporta v Evropi in je glavno gonilo njenega socialnega in ekonomskega razvoja. Za gradnjo, vzdrževanje in obnovo cest se v Evropi letno porabi več milijard evrov. Zahteve investitorjev in uporabnikov po kakovosti materialov in vozišč so iz leta v leto višje. Hkrati pa se omejuje raba surovin visoke, zanesljive in znane kakovosti in čedalje bolj spodbuja raba lokalno dostopnih materialov mejne kakovosti ter recikliranih odpadkov in drugih sekundarnih surovin.

Z izgradnjo osnovnega slovenskega avtocestnega križa, ki se pravkar končuje, se je tudi Slovenija vključila v sodobne evropske prometne tokove (slika 1.1).



Slika 1.1: Slovenski avtocestni križ (Vir: Motorevija ).

Zaradi zelo raznolike geološke zgradbe in klimatskih razmer so materiali za gradnjo cest in postopki gradenj v različnih delih Slovenije zelo različni (slika 1.2).



Slika 1.2: Geološka karta slovenije (Vir: Geološki zavod Slovenije).

Za avtocestne odseke na vzhodu Slovenije – še zlasti med Mariborom in Vučjo vasjo na območju Slovenskih gorc - je značilno, da potekajo po ozemlju, zgrajenem iz sedimentov terciarne starosti (slika 1.2). Ti sedimenti so zgrajeni iz nepravilnega zaporedja plasti in leč, v katerih se menjavajo glin, melji in peski. Posebej neugodne so visokoplastične, prekonsolidirane glin, ki imajo na nekaterih odsekih meje židkosti tudi  $w_L > 100\%$  in izredno močno nabrekajo. Temeljna tla vozišč, oblikovanih v teh glinah, se na sezonsko pogojene vremenske spremembe odzivajo z reverzibilnimi procesi večanja volumna ali nabrekanja v času padavin, oz. z zmanjševanjem volumna ali krčenjem v času suše. V času nabrekanja zemljinska plast izgublja nosilnost (CBR) in togost ( $E_{vd}$ ), večja pa se ji deformabilnost. Te spremembe neposredno vplivajo na nosilnost in trajnost vozišča in so pogost vzrok prezgodnjih porušitev. Tovrstne poškodbe vozišč, ki so podobne poškodbam, nastalim ob zmrzali, se odražajo tudi na stabilnosti cevni vodov in vseh oblik površinskega odvodnjevanja (slika 1.3, slika 1.4).



Slika 1.3: Poškodba novozgrajenega vozišča avtoceste (foto. A. Petkovšek).



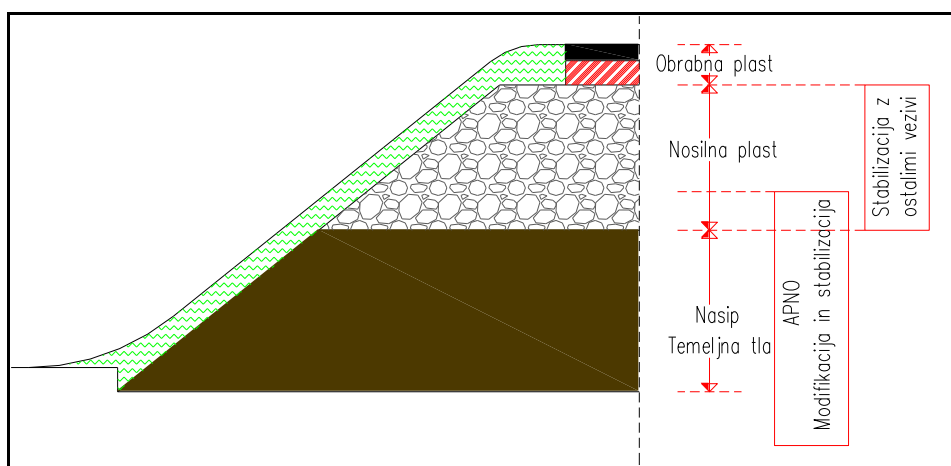
Slika 1.4: Poškodbe na površinskih odvodnikih zaradi nabrekanja podlage (foto. A. Petkovšek).

Gline, izkopane na vkopanih odsekih bodočih avtocest na področju Slovenskih goric, so zaradi volumske neobstoynosti uporabne le, če jih predhodno poboljšamo (modificiramo) ali kemično stabiliziramo z anorganskimi vezivi. V svoji diplomski nalogi sem raziskoval, kakšni so vplivi dodajanja apna in sadre na poboljšanje volumske obstoynosti nabreklijivih glin s področja Slovenskih goric.

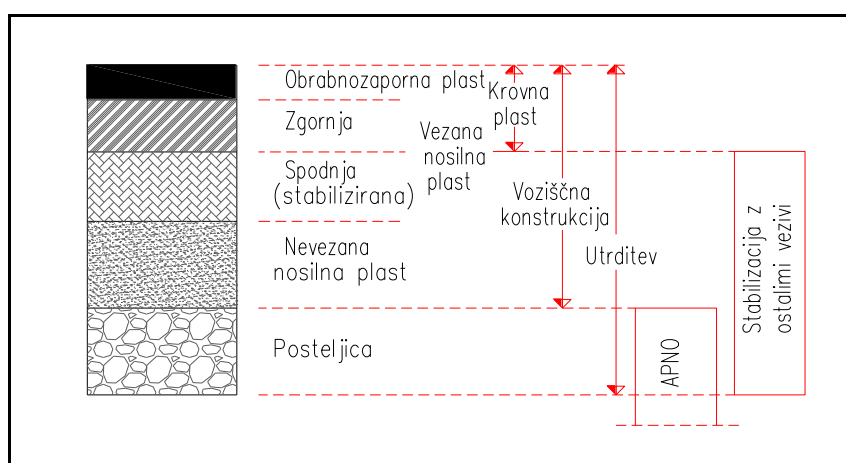
## 2 KRATEK PREGLED ZGODOVINE RABE APNE NE STABILIZACIJE V SLOVENIJI

### 2.1 Uvod

Kemična stabilizacija zemljin z apnom je star postopek, saj so ga uporabljale že stare civilizacije. Danes je apnena stabilizacija v uporabi v vseh razvitih državah. Z njo se utrjujejo temeljna tla, stabilizirajo se zemljine za nasipe, v aridnih klimah brez zmrzali pa z apnom stabilizirana plast prevzema tudi vlogo spodnje nosilne plasti, ki je v naših klimatskih razmerah vselej iz kamenega agregata (slika 2.1 in 2.2).

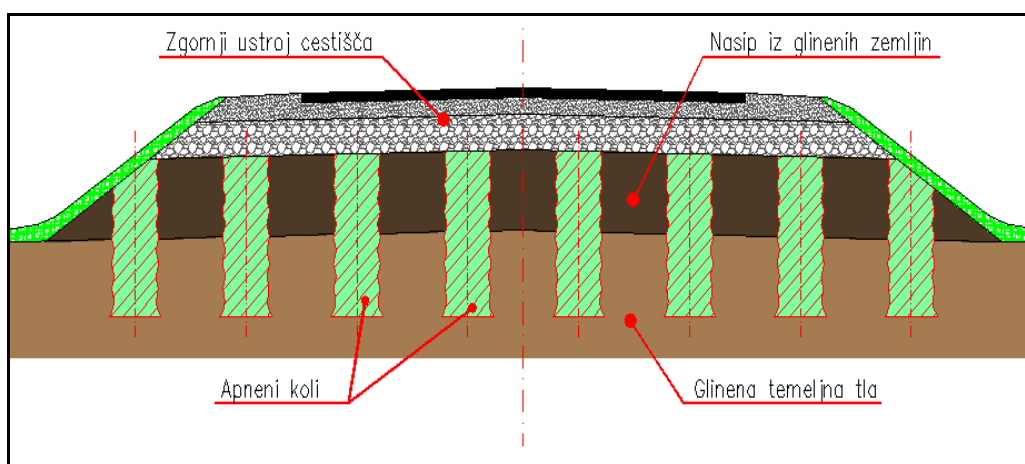


Slika 2.1: Prerez ustroja ceste glede na vrsto stabilizacije.



Slika 2.2: Utrditev sodobnega vozišča glede na vrsto stabilizacije.

Posebna oblika rabe apna je v cestogradnji tudi gradnja po principu apnenih kolov, ki se uporablja za sanacijo starih nasipov iz glin ali za globoko poboljšanje mehkih tal iz gline (slika 2.3, slika 2.4). Apno se uporablja samostojno ali v kombinaciji z drugimi vezivi, kot so elektrofitrski pepel, mlete žindre, sadre in drugi aktivni ali inertni prahovi. Pri nas so bili prvi poskusi rabe apnenih kolov izvedeni na južni ljubljanski obvoznici leta 1983. Zaradi previsoke vlage barjanskih glin je ekonomska analiza pokazala, da gradnja z apnenimi koli ni ekonomsko zanimiva.



Slika 2.3: Gradnja po principu apnenih kolov.



Slika 2.4: Stabilizacija z apnenimi koli.



## 2.2 Zgodovina rabe apnene stabilizacije v Sloveniji

V Sloveniji smo se v večji meri srečali s potrebo po stabiliziranju glin pri gradnji prometnih povezav v okolici Celja in Slovenskih Konjic pred več kot 30 leti. Po letu 1980 je raba apna za stabilizacijo v slovenski cestogradnji močno zamrla, ponovno pa je oživila z gradnjo slovensko madžarske železniške povezave med Puconci in Hodošem v letih 1998 – 2000. V navedenih primerih se je apno uporabljalo predvsem za stabiliziranje zemljin, ki zaradi prevelike naravne vlage niso bile primerne za utrjevanje (zgoščanje). Zaradi rabe apna za stabiliziranje mokrih zemljin so stare tehnične specifikacije za rabo apna temeljile predvsem na dokazovanju dosežene trdnosti, ne pa tudi volumske obstojnosti.

Pri gradnji slovensko madžarske železniške povezave med Puconci in Hodošem v letih 1998 – 2000 so bila geotehnična opozorila o nujnosti rabe apnene stabilizacije na posameznih odsekih podcenjena predvsem zaradi neznanja in neustrezne opremljenosti izvajalcev del na več kot 20 km dolgem odseku nove proge. Že po prvi zimi so se na nasipih, ki bi morali biti stabilizirani, pojavile zelo hude poškodbe. Stabilizacija z apnom se ni izvedla, ker so bile med gradnjo dosežene minimalne togosti in vgradljivosti plasti tudi brez uporabe apna. Na srečo pa so bile te poškodbe dobra šola za načrtovalce avtoceste, ki so apneno stabilizacijo vgradili v tehnološke projekte kot obvezni sestavni del gradnje v primerih, če se uporabljajo zemljine iz vkopov na trasi.

Pri gradnji avtocestnega križa se je apnena stabilizacija pričela množično uporabljati na odseku med Vučjo vasjo in Beltinci po letu 2003 za stabilizacijo volumsko neobstoječih glin ter za stabiliziranje kraških visoko plastičnih glin na Dolenjskem. Z apnom stabilizirani nasipi so se v manjši meri gradili že prej tudi na odseku Lukovica – Šentjakob, kjer so se stabilizirale mastne gline iz vkopa Krtina pri Domžalah.

Že leta 2003 so se pri Vučji vasi pokazale poškodbe v obliki razpok in deformacij na manj kot 6 mesecev starem vozišču, zgrajenem na nasipu iz glin, stabiliziranih z apnom. Naknadno je bilo ugotovljeno, da so poškodbe predvsem posledica prehitre gradnje in prenizke vlage gline pri izvajanju kemične stabilizacije (Petkovšek, 2006).

Analize vzrokov poškodb so pokazale (Petkovšek, 2006), da je treba pri izdelavi receptur za kemično stabilizacijo upoštevati tudi druge vidike kemičnih in mineraloških sprememb in ne

le vidik doseganja ustrezne trdnosti, kot je to določeno s sedaj veljavnimi tehničnimi specifikacijami (PTP, 1989).

Glavna pomanjkljivost, ki je bila ugotovljena pri analizi vzroka poškodb na nasipu pri Vučji vasi je v resnici prehitra gradnja. V kolikor bi z apnom stabilizirani nasipi obležali preko zime, bi se proces ekvilibracije vlage izvedel pred polaganjem cementne stabilizacije in asfaltne plasti. Na ta način bi se nevtralizirali tudi negativni vplivi prenizke vlage in premajhnega vlaženja plasti med grednjo. Ker je bila asfaltna plast položena takoj po dokončanju nasipa in v času hude suše, so se takoj po nastopu jesenskih padavin, zaradi nabrekalnih deformacij v glini pojavile tudi deformacije na asfaltu.

### 3 STABILIZACIJA IN MODIFIKACIJA (POBOLJŠANJE)

#### 3.1 Uvod

Z ozirom na napetosti in sile, ki nastopajo v voziščni konstrukciji, mora biti zagotovljena kvalitetna kontinuiteta posameznih plasti in ustrezna nosilnost od raščenih tal do zaključne obrabno zaporne plasti. Kadar samo s postopki mehanske stabilizacije ne moremo doseči zadovoljive togosti, deformabilnosti in nosilnosti plasti, uporabimo postopek kemične stabilizacije.

Za stabilizacijo zemljin v temeljnih tleh in v spodnjem cestnem ustroju do nivoja planuma posteljice se največ uporabljajo anorganska veziva, kot so apno, cement, elektrofilterski pepel, sadre ter mešanice le teh. V nekaterih primerih se uporabljajo tudi drugačna veziva - npr. "ionski stabilizatorji". Ti se v Sloveniji ne uporabljajo predvsem zaradi njihove okoljske oporečnosti. Ionski stabilizatorji so tekočine z izrazito kislom naravo ( $\text{pH} < 3$ ), ki vsebujejo pozitivno nabite organske ali anorganske skupine (katione), katerih afiniteta do negativno nabite površine glinenega zrna je večja od afinitete zrna za vodo. Ko se pozitivno nabiti ion iz ionskega stabilizatorja "prilepi" na negativno nabito zrno iz glin, le ta izgubi svoj negativni naboj in s tem tudi sposobnost nadaljne adsorpcije vode.

Pri uporabi veziv za poboljšanje lastnosti naravnih zemljin poznamo dva procesa

- ⇒ proces modifikacije ali poboljšanja in
- ⇒ proces stabilizacije.

Pri procesu modifikacije se z dodatkom veziva izboljšajo pogoji vgrajevanja ter zmanjša občutljivost zemljine na volumnske spremembe.

Pri procesu stabilizacije je glavni namen usmerjen v doseganje ustrezne trdnosti in odpornosti na zunanje vplive, npr. na zmrzal.

Stabiliziranje zemljin je mogoče uporabiti za

- ⇒ izboljšanje temeljnih tal in utrditev nasipov – izboljša se lahko vgradljivost, odpornost na zmrzal, stabilnost...ipd.,
- ⇒ izdelavo spodnje nosilne plasti voziščne konstrukcije,
- ⇒ sanacijo starih deformiranih nasipov in
- ⇒ za varovanje brežin.

Za doseganje želene kvalitete stabilizacijskih zmesi je treba upoštevati predvsem naslednje:

- ⇒ lastnosti zemljine, ki se stabilizira,
- ⇒ pravilno izbiro in dodatek veziv pred mešanjem,
- ⇒ potrebno vlago za zgostitev stabilizacijskih zmesi,
- ⇒ homogenost stabilizacijskih zmesi in
- ⇒ potrebno nego.

Pri vseh načinih stabiliziranja je najprej potrebno zemljino homogenizirati, premešati z vezivom in ustrezno navlažiti.

Med različnimi postopki priprave in izdelave plasti se najpogosteje uporabljajo:

- ⇒ mehanično stabiliziranje, kadar vlaga in homogenost materiala omogočata doseganje ustrezne trdnosti,
- ⇒ stabiliziranje z anorganskimi vezivi, kot so živo in hidratizirano apno, cement in pucolani,
- ⇒ stabiliziranje z organskimi vezivi, predvsem bitumni,
- ⇒ termična stabilizacija,
- ⇒ elektrokemična utrditev in
- ⇒ kombinacije zgoraj navedenih načinov.

Termična in elektrotermična utrditev se v običajnih gradnjah cest ne uporabljata.

## 3.2 Zemljine za stabiliziranje in modificiranje (poboljšanje)

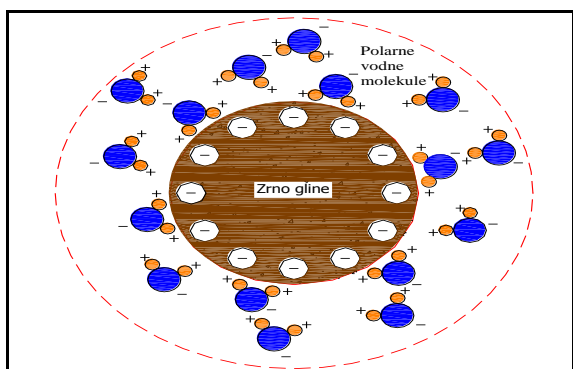
### 3.2.1 Uvod

Za stabiliziranje in modificiranje se lahko uporabljajo skoraj vse zemljine. Izjema so le šote in zelo organske glinice med nekoherentnimi zemljinami pa debelo zrnate in mešane zemljine z zelo debelimi zrni. Za stabiliziranje niso primerne tudi zemljine z visokimi vsebnostmi soli.

Drobnozrnate zemljine – glinice in melje – stabiliziramo zato, da povečamo njihovo volumsko stabilnost in poboljšamo vgradljivost. Debelozrnate zemljine pa stabiliziramo zato, da povečamo trdnost (nosilnost) in zmanjšamo deformabilnost plasti.

### 3.2.2 Stabiliziranje in modificiranje koherentnih zemljin

Koherentne zemljine (preglednica 3.1) so sestavljene iz zelo drobnih zrn, pri katerih je razmerje med površino zrna in njegovo prostornino zelo veliko. Na njihovo obnašanje vpliva naboj na površini zrn ter njihova specifična površina. Naboj na površini zrna je odvisen od kemične in mineralne sestave glinice in od lastnosti porne raztopine. Zemljine z velikim negativnim nabojem na površini imajo visoko sposobnost adsorpcije vode. Ker je voda izrazito polarna molekula, se pozitivno nabiti del molekule prilepi na negativno nabito zrno glinice in tako na njej ustvari obroč adsorpcijske vode. Zaradi naraščajoče debeline obroča vode (slika 3.1) se zmanjša površina stika med sosednjimi zrn, zaradi česar se zmanjša trdnost zemljine, večja pa se njen volumen. Proces je reverzibilen. V času suše se obroč adsorbirane vode tanjša, zato se zemljina krči. V času padavin se obroč vode debeli, zato zemljina nabreka. Značilne poškodbe prometnic zaradi nabrekanja so prikazane na sliki 3.2.



Slika 3.1: Tvorba obroča vode okoli zrna glinice.



Slika 3.2: Poškodba prometnice zaradi nabrekanja.

Preglednica 3.1: Klasifikacija zemljina po ASSHTO.

Osnovna klasifikacija	Zrnat material delež zrn skozi sito 0.075 mm ≤ 35%							Meljasto glinen material delež zrn skozi sito 0.075 mm > 35%			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Skupina materiala	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
<b>Sejalna analiza - % prehoda skozi sito</b>											
2.00 mm	50 max	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Velikost por 0.425 mm	30 max	50 max	51 max	---	---	---	---	---	---	---	---
0.075 mm	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
<b>Značilnosti materiala – prehod skozi sito 0.425 mm</b>											
Meja židkosti	---	---	---	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks plastičnosti	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min <sup>a</sup>
<b>Običajen tip zemljine</b>	Prod in pesek		Fini pesek	meljast ali glinast droben pesek				Meljasta zemljina		Glinena zemljina	
<b>Splošna ocena za podlago</b>	Odličen do dober							Sprejemljiv do slab			

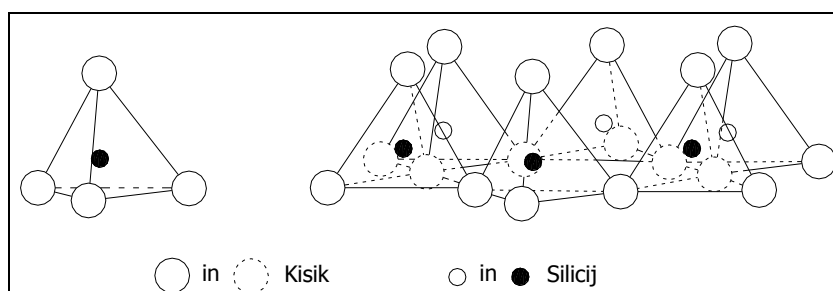
Zemljini v podlagi vozišča je zato potrebno preprečiti možnost povečevanja ali zmanjševanja vsebnosti vlage, da bi ohranili zahtevano kohezijo, oz. trdnost. Pri stabilizaciji koherentnih tal je treba upoštevati, da je pogosto potrebna razmeroma velika količina veziva za utrditev materiala. Čeprav so posamezna zrna med seboj sprijeta v kosme, je njihova poroznost razmeroma velika. Dodano vezivo poveča posamezne kosme, preostalo pa ponikne v pore in s tem deloma poveže tudi posamezna zrna. Za modifikacijo in stabilizacijo glin se največ uporablja apno.

### 3.2.2.1 Glinena zemljina

Glinena zemljina je mešanica različnih mineralov, med katerimi so glineni minerali tisti, ki ji dajejo značaj. Po enotnem klasifikacijskem sistemu USCS je glina vsaka zemljina z več kot 50 % utežnim deležem zrn velikosti pod 0,074 mm, če se nahaja v AC diagramu nad A-premico.

Glineno zemljino sestavljajo minerali glin, oksidi železa, aluminija, mangana in drugih elementov, ki dajejo zemljinam plastični značaj. Zemljine s približno 15 % vsebnostjo mineralov glin že imajo glineni značaj. Nasprotno pa minerali, kot so kalcit ali kremen, tudi če so zelo fino zrnati, zemljini znižujejo plastičnost in ji dajejo značaj melja.

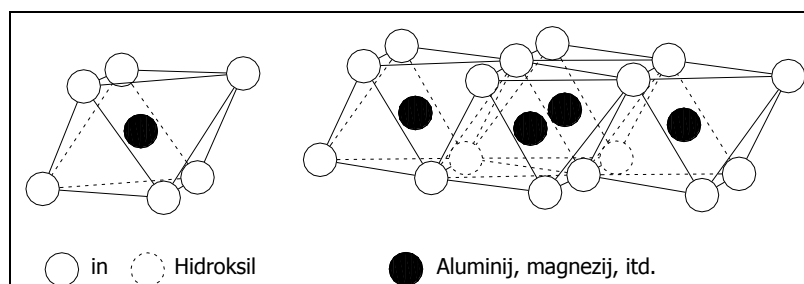
Osnovna gradbena struktura mineralov glin sta silicijev tetraeder in aluminijev ali magnezijev oktaeder, ki se med seboj povezujeta preko kisikovega mostu ( - O - ) v dvo-, tro- in štiri-plastne minerale glin (slika 3.3 in 3.4).



Slika 3.3: Tetraedrska plast v strukturi mineralov glin (Petkovšek, 2006, cit. po Mitchell, 1993).

Silicijev tetraeder pomeni, da je vsak silicijev  $\text{Si}^{4+}$  kation v središču tetraedra obdan s štirimi kisikovimi ioni.

Aluminijev oktaeder pomeni, da je centralni kation obdan še s šestimi kisikovimi ioni  $\text{O}^{2-}$ . V nekaterih mineralih je  $\text{Al}^{3+}$  nadomeščen delno z magnezijevimi ali drugim  $^{2+}$  in  $^{3+}$  nabitimi kationi.



Slika 3.4: Oktaedrska plast v strukturi mineralov glin (Petkovšek, 2006, cit. po Mitchell, 1993).

Lastnostni gline so odvisne od specifične površine zrn (preglednica 3.2). Veliko večino razlik med lastnostmi različnih glin, na primer indeksom plastičnosti, kationsko izmenjalno kapaciteto, navidezno kohezijo, specifičnim zadrževanjem vode, adsorpcijsko sposobnostjo in nabrekalnim potencialom lahko pojasnimo in povežemo s specifično površino zrn (Petkovšek 2006).

Preglednica 3.2: Značilnosti izmenjevalcev v tleh (Stritar, 1973).

Izmenjevalec	Izmenjalna kapaciteta me /100 g materiala	Specifična površina m <sup>2</sup> /g
Organska snov	200 – 400	500 – 800
Minerali glin:		
vermiculit	100 – 150	600 – 800
montmorillonit	80 – 150	600 – 800
illit	10 – 40	65 – 100
korit	10 – 40	25 – 40
kaolinit	3 – 15	7 – 30
Oksidi in hidroksidi	2 – 6	100 – 800

me = miliekvivalent, oz. količina ionov, ki se menjajo v tekočem stanju 1me = 1 mg H<sup>+</sup>

Zrna gline so v naravi vedno hidratizirana. To pomeni, da so obdana s plastjo vodnih mulekul, ki jih imenujemo adsorpcijski obroč. Omenili smo že, da so molekule vode polarne molekule, kar pomeni, da imajo pozitivno in negativno nabit pol. V zemljini se vežejo med seboj, hkrati pa tudi na površino glinenega delca, ki ga lahko obravnavamo kot negativno kondenzatorsko ploščo, ob kateri se vodne molekule orientirano usmerijo s svojimi pozitivnimi poli.



Izmenljivi kationi, ki se nahajajo ob negativno nabiti površini glinenih delcev, lahko hidratizirajo ter tako ustvarijo ravnotežje za tvorbo plašča.

### **3.2.3 Stabiliziranje in modificiranje nekoherentnih in mešanih zemljin**

Nekoherentne zemljine so sestavljene iz posameznih zrn pogosto zelo velikega granulacijskega območja; od peska do grušča in krogel. Ta zrna so električno inertna in za vodo nepriljubna. V njih prevladujejo primarni minerali (predvsem kremen, glinenci, kalcit, dolomit) ali odlomki primarnih magmatskih, metamorfnih in sedimentnih kamnin.

Debela zrna se usedajo pod prevladujočim vplivom težnostnih sil v razmeroma gosti strukturi posameznih zrn. Trenja med stičnimi ploskvami zrn narekujejo po eni strani način razporejanja napetosti v tleh, po drugi strani pa odpor zemljine na zunanje obremenitve (Petkovšek, 2006, cit. po Šuklje, 1967).

V naravi se najbolj pogosto pojavljajo mešani materiali. Gre za mešanico koherentnih in nekoherentnih materialov.

### **3.3 Predhodne raziskave zemljine za oceno možnosti rabe kemične stabilizacije**

Najprej moramo temeljito preučiti zemljino, ki jo želimo stabilizirati. Ugotoviti moramo njene fizikalne, mehanske in kemične lastnosti, saj le te ključno vplivajo na potek in učinke stabilizacije.

#### **3.3.1 Osnovne raziskave**

Osnovne raziskave obsegajo določitev naslednjih parametrov:

- ⇒ naravno vlažnost
- ⇒ zrnavost,
- ⇒ gostota v naravnem stanju
- ⇒ maksimalna gostota in optimalna vlaga po Proctorju,
- ⇒ Atterbergove meje plastičnosti in vsebnost organskih snovi ter
- ⇒ vsebnost različnih soli, če obstaja utemeljeni sum, da so v zemljini prisotni sulfati, sulfidi, kloridi,...ipd.

### 3.3.1.1 Granulacijska analiza zemljine

Granulacijska analiza je takoj za določitvijo naravne vlage prvi indikator, ki nam pokaže, ali je zemljina primerna za stabiliziranje z vezivom. Z njo se ugotovi utežni delež posameznih frakcij v materialu. Na osnovi tega je mogoče klasificirati material in približno oceniti tudi druge mehanske in fizikalne lastnosti.

Granulacija materiala se določi s:

sejalno analizo,  
sedimentacijsko analizo ali  
s kombinirano sejalno in sedimentacijsko analizo.

### 3.3.1.2 Konsistenčne meje

Konsistenčne meje materiala predstavljajo tisto absolutno vsebnost vode v materialu, pri kateri koherentni material preide iz plastičnega v tekoče stanje (meja židkosti  $w_L$ ) ali v poltrdo stanje (meja plastičnosti  $w_p$ ).

Merilo za razvrščanje materialov v plastičnem območju glede na njihove lastnosti je indeks plastičnosti ( $I_p$ ), ki je tudi merilo za kohezijo in velikostni red sprememb prostornine materiala.

$I_p$  = indeks plastičnosti

$w_L$  = meja židkosti

$w_p$  = meja plastičnosti

$$I_p = w_L - w_p \quad (1)$$

### 3.3.1.3 Gostota in optimalna vlažnost zemljine

Gostoto in njej pripadajočo vlago se določa po osnovnem ali modificiranem Proctorjevem postopku. Razlika med njima je v velikosti kolupa in delom, ki je vloženo za zgostitev enega preizkušanca.

Pri zemljinah se jemlje optimalni odstotek vlage pri največji suhi gostoti, pri zemljinah, ki imajo bolj ravno Proctorjevo krivuljo, pa pri gostoti s 5 % z zrakom zapolnjenih por (Design manual..., 2000). Izbrati moramo vedno tisto vrednost, pri kateri je odstotek vlage večji. Tako

bomo določili optimalno vlago z mokre strani Proctorjeve krivulje in si zagotovili primerno gostoto.

#### **3.3.1.4 Humozne in organske primesi v zemljini**

Vsebnost organskih primesi je pomembna, ker se z večanjem njihovega deleža v materialu zmanjšuje nosilnost. Zaradi njihovega preperevanja se materialu povečuje poroznost. Organska snov se določa po Abrams-Harderjevi metodi s 3 % raztopino natrijevega hidroksida, po metodi žarenja ali z analitskimi kemičnimi metodami.

J.H.Smith (1996) navaja, da je zgornja dopustna meja organskih snovi v tleh 2 %, razen če je kljub temu zadoščeno kriteriju nosilnosti in obstojnosti zmesi. Sherwood (1993) pa trdi, da bolj kot količina, na postopek stabilizacije vpliva vrsta organskih snovi. Za stabilne organske zemljine (npr. OL, OH) je značilno, da je organska snov zelo fino razpršena v zemljini in ima, podobno kot nabreklijive zemljine, zelo veliko specifično površino in kationsko izmenjalno kapaciteto. Negativni vpliv organskih snovi se v redkih primerih premešča z uporabo dvojne doze veziv, praviloma pa se v takih primerih raje izognemo stabilizaciji in iščemo druge možne utrditve.

#### **3.3.1.5 Vsebnost sulfatov**

Vsebnost sulfatov v zemljini je zelo pomembna, saj imajo sulfati lahko ključno vlogo pri volumenski stabilnosti stabiliziranih zemljin. Če so vključeni v okolju ali jih vanj vnaša kak drug medij, na primer voda, se pri reakciji stabilizacije z anorganskimi vezivi tvorita nezaželjena minerala ettringit in thaumasit, ki podobno kot v betonu povzročata velike volumske deformacije.

Poseben vidik negativnih vplivov soli predstavljajo prezasičene raztopine. Iz prezasičene porne raztopine se pri spremembi temperature ali tlaka izločajo soli, ki imajo visok, kristalizacijski tlak in lahko izničijo vpliv stabilizacijskega sredstva.

### **3.3.1.6 Posebne raziskave, če je to potrebno**

Med posebne raziskave sodijo, npr. mineraloška analiza, analiza pornih vod in raziskava volumenske obstojnosti zemljine. Praviloma se te raziskave izvajajo takrat, kadar se na določenem ozemlju prvič srečujemo z določeno vrstno zemljine ali s kemično problematičnimi pornimi raztopinami.

## **3.4 Veživa za stabiliziranje in modificiranje**

### **3.4.1 Uvod**

Pri vgradnji naravnih zemljin v voziščne konstrukcije se te lako predhodno poboljša in stabilizira z uporabo anorganskih ali organskih veziv. Ta omogočajo, da se pri gradnji uporabljajo tudi zemljine, ki po osnovnih karakteristikah za to niso primerne.

Veživo med seboj poveže zrna zemljine in s tem poveča strižno trdnost, oz. nosilnost. Deloma se poveča tudi odpornost na vremenske vplive; npr. vodo in zmrzal, predvsem pa se zemljini zagotovi volumensko stabilnost. Stabilizacija z veživi je edina realistična možnost za obladovanje volumenske stabilnosti plasti, zgrajenih iz nabreklijivih zemljin (Petkovšek, 2006).

Za stabiliziranje zemljin (preglednica 3.3) se uporabljajo predvsem anorganska veživa:

- ⇒ cement
  - portland cement
  - metalurški cement
  - sulfatno odporni cement
  - aluminatni cement
- ⇒ apno
  - žgano apno
  - hidratizirano apno
- ⇒ pucolani
  - naravni – vulkanski pepel
  - umetni – mikrosilika prah, elektrofilterski pepel

Organska veziva so težko hlapljivi, temno obarvani in topljivi ogljikovidiki z visoko molekularno gostoto. Najpogosteje se uporablja bitumensko vezivo, ki je dobro lepljivo. Zanj je značilno, da ohranja elastičnost stabilizirane zemljine ter povečuje njeno odpornost proti staranju.

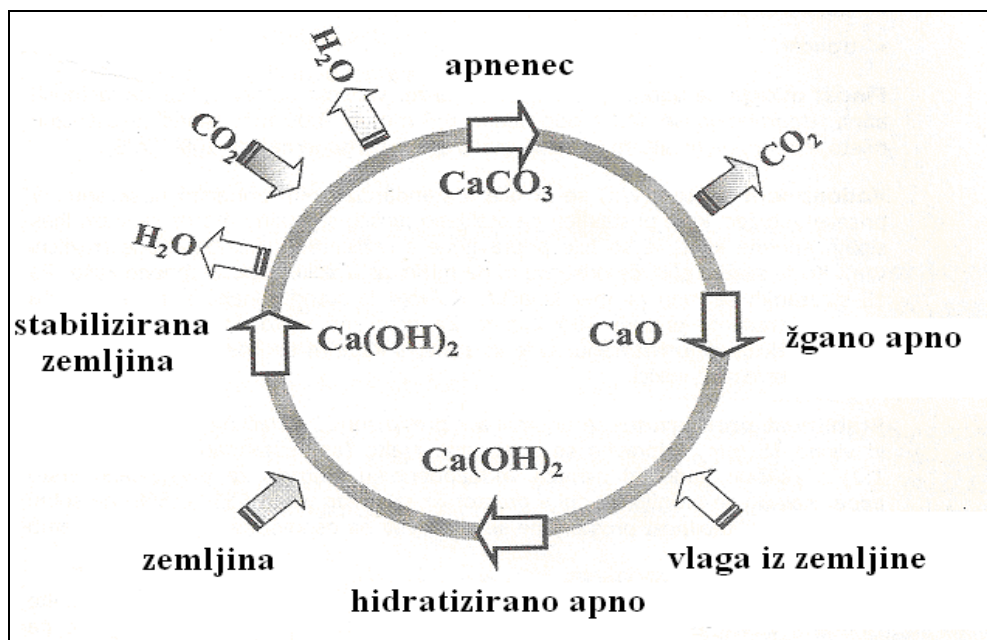
Preglednica 3.3: Način stabiliziranja glede na vrsto zemljine.

Vrsta materiala	Simbolna oznaka	Skupina materiala	Priporočeno vezivo
Dobro graduiran prod ali prodnata peščena mešanica, malo ali nič drobnih delcev	GW	A-1-a	Cement + EF pepel
Slabo graduiran prod ali prodnato peščena mešanica, malo ali nič drobnih delcev	GP	A-1-a	
Meljast prod, prodno-peščeno-meljasta mešanica	GM	A-1-b	Cement + EF pepel
Glinast prod, prodno-peščeno-glinasta mešanica	GC	A-1-b	
Dobro graduiran pesek ali prodnat pesek, malo ali nič drobnih delcev	SW	A-1-b	Cement + EF pepel
Slabo graduiran pesek ali prodnat pesek, malo ali nič drobnih delcev	SP	A-1-b A-3	
Meljast pesek, peščeno meljasta mešanica	SM	A-2-4 A-2-5	Apno (Stabilizacija in Modifikacija)
Glinast pesek, peščeno glinasta mešanica	SC	A-2-6 A-2-7	
Anorganski melj in droben pesek, meljast ali glinast droben pesek ali glinast melj z majhno plastičnostjo	ML	A-4	Apno (Stabilizacija in Modifikacija)
Anorganska glina z nizko do srednjo plastičnostjo; peščena, meljasta in pusta glina	CL	A-6	
Organski melj in organska meljasta glina z nizko plastičnostjo	OL	A-4	Apno (Stabilizacija in Modifikacija)
Anorganski melj, sljuda ali droben diatomejski pesek ali meljasta zemljina, plastičen melj,	MH	A-5	
Anorganska glina z visoko plastičnostjo, mastna glina	CH	A-7-6	Apno (Stabilizacija in Modifikacija)
Organska glina s srednjo do visoko plastičnostjo, organski melj	OH	A-7-5	
Šota in ostale organske zemljine	Pt	A-8	Apno (Stabilizacija in Modifikacija)

### 3.4.2 Apno

Apno je eno najstarejših veziv, saj so ga uporabljali že Egipčani pred več kot 5000 leti. Pretežno vsebuje kalcijev oksid CaO, v manjših količinah pa tudi magnezijev oksid MgO (Žarnič, 2003). Kot vezivo je primerno za stabilizacijo drobnozrnatih in srednjezrnatih plastičnih zemljin, ki se dajo homogeno predrobiti in premešati. Uporaba apna je primerna za

zemljine, ki so prevlažne za neposredno vgradnjo. Uporablja se tudi pri visokoplastičnih zemljinah za znižanje plastičnosti; pri tem se zmanjša deformabilnost ter pospeši konsolidacija.



Slika 3.5: Krog preobrazbe apna (prirejeno po Žarnič, 2003).

### 3.4.2.1 Žgano apno (živo apno)

Je po kemijski sestavi kalcijev oksid  $\text{CaO}$ . To je bela, jedka, trdna, kristalna snov, ki nastane pri žganju apnenca v peči pri temperaturi  $950^\circ\text{C}$ . Pri žganju na tako visoki temperaturi se iz apnenca izloči ogljikov dioksid. Ta kemična reakcija, ki se uporablja za pridobivanje žganega apna, je bila ena prvih kemičnih reakcij, ki jih je odkril človek.

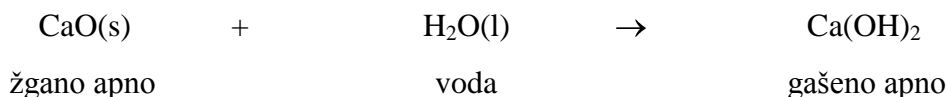
Kot komercialen produkt žgano apno pogosto vsebuje še magnezijev oksid, silicijev oksid in manjše količine aluminijevega in železovega oksida.

Žgano apno se uporablja pri stabilizaciji mokrih zemljin (slika 3.5), saj zaradi hidratacije apna odvzame zemljini do 33 % vlage. Obenem se pri reakciji hidratacije tvori toplota, ki povzroči izhlapevanje vode in s tem dodatno izsuševanje zemljine.

Pri izvajanju stabilizacije zemljin se žgano apno redkeje uporablja zaradi varovanja okolja in varstva pri delu.

### 3.4.2.2 Hidrirano apno

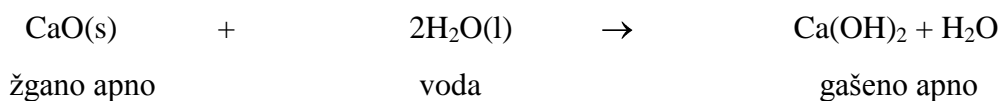
Hidrirano apno je kalcijev hidroksid  $\text{Ca(OH)}_2$ . Je brezbarven ali bel prašek, ki ga pridobivamo z gašenjem žganega apna s teoretično potrebno količino vode, ki je približno 33 odstotkov mase živega apna (Žarnič, 2003).



Hidrirano apno se uporablja pri manj mokrih zemljinah, ki jim ni potrebno predhodno odvzeti vlage (slika 3.5).

### 3.4.2.3 Gašeno apno ali apneno mleko (apnena brozga)

Je enako hidriranemu apnu, le da se pri gašenju uporablja večja količina vode.



Žgano apno ima v primerjavi s hidratiziranim vrsto prednosti:

- ⇒ ima večjo vsebnost apna ( $\text{CaO}$ ), saj je 3 % dodatek žganega apna ekvivalenten 4 % hidratiziranega,
- ⇒ je gostejše, zato so potrebna manjša skladišča za shranjevanje,
- ⇒ se manj praši kot hidratizirano apno,
- ⇒ povzroči veliko zmanjšanje vlažnosti zaradi hidratacije in evaporacije, kar koristi mokrim zemljinam ter
- ⇒ generira toploto, ki pospeši sušenje zemljine in pridobivanje trdnosti.

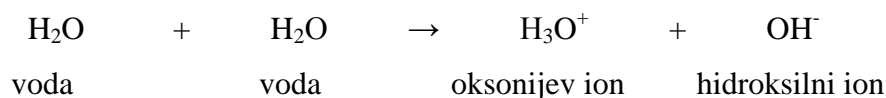
### 3.5 Teoretske osnove apnene modifikacije in stabilizacije

#### 3.5.1 Teoretske osnove

Reakcija tal je ena bistvenih lastnosti tal, ki vpliva na fizikalno kemične procese v tleh. Reakcijo talne raztopine določa koncentracija disociiranih vodikovih ionov, izražena s pH-vrednostjo.

$$pH = - \log [H^+] \quad (2)$$

Voda disociira na vodikove in hidroksilne ione. V vodi in vodnih raztopinah obstaja ravnotežje (Stritar, 1973)



V raztopini je torej zmnožek koncentracije vodikovih in hidroksilnih ionov konstanten. Če se poveča v raztopini delež vodikovih ionov, tla postanejo kislja, če pa se poveča delež hidroksilnih ionov, postaja okolje vse bolj bazično (preglednica 3.4).

Preglednica 3.4: Vpliv hidroksilnih in vodikovih ionov na lastnosti tal (Stritar, 1973).

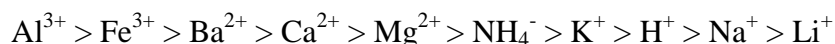
Lastnosti tal	Koncentracija vodikovih ionov		pH
Nevtralna tla	$[H^+] = [OH^-]$	$[H^+] = 10^{-7} \text{ mol/l}$	pH = 7
Kislja tla	$[H^+] > [OH^-]$	$[H^+] > 10^{-7} \text{ mol/l}$	pH > 7
Bazična tla	$[H^+] < [OH^-]$	$[H^+] < 10^{-7} \text{ mol/l}$	pH < 7

Talni pH je rezultat ravnotežja med talnimi minerali, ioni v talni raztopini in kationske izmenjave med talno raztopino in adsorpcijskim kompleksom (sukcijo).

Gline se nahajajo v kisljih tleh. Površina njenih mineralov ima negativen naboj, kar jim daje sposobnost, da iz kislje talne raztopine lahko nase vežejo pozitivno nabite delce, oz. katione. To pomeni, da se v kisljih tleh na površino mineralov vežejo enovalentni kationi in polarne molekule vode. Okoli mineralov se tvori hidratacijski plašč.



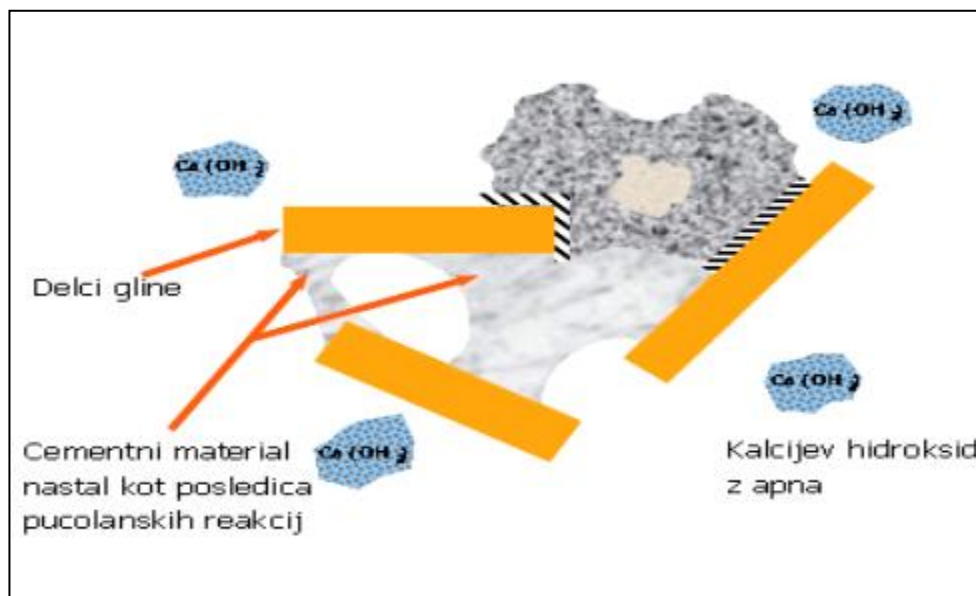
Če želimo kemično stabilizirati glino, ji dodamo hidratizirano apno, kjer dvovalentni kalcij ( $\text{Ca}^{2+}$ ) nadomesti enovalentne katione (npr.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), vezane na površino mineralov glin. Zato hidrationski plašč razpade. Sposobnost ionske izmenjave je odvisna od valence ionov, dosegljivosti, jakosti vezi in velikosti iona v hidratiziranem stanju. Manjši ioni običajno nadomeščajo velike, vendar to ni pravilo (Petkovšek, 2006).



Z dodajanjem apna raztopina prehaja v vse bolj bazično, saj se v njej prične pojavljati presežek hidroksilnih ionov. Ko se pH dvigne nad vrednost  $\text{pH} \geq 12$ , postanejo aluminijevi oktaedri in silicijevi tetraedri topni. Aluminij ( $\text{Al}^{3+}$ ) in silicij ( $\text{Si}^{4+}$ ), vezan v mineralih glin, s kalcijem ( $\text{Ca}^{2+}$ ) tvori kalcijaluminijeve in kalcijasilicijeve hidrate – pucolanska reakcija (slika 3.6). Ti v bazičnem okolju najprej tvorijo gel, sčasoma pa se med njimi tvori vez, ki dovoljuje njihovo kristalizacijo v kalcijasilicijevaluminatni hidrat. S tem se zaključi proces apnene stabilizacije zamljine.

Če so v z apnom stabilizirani glini prisotni še sulfati, se sprožijo dodatni procesi, zaradi katerih prihaja v zemljini do sprememb in tvorbe sekundarnih mineralov ettringita in thaumasita. Zemljini spremenita njeno strukturo, sestavo, trdnost in volumen. Nastaneta kot posledica kemične reakcije med apnom, sulfati, glino in njenimi minerali. Minerala pri svojem nastanku vežeta veliko vode in imata zaradi tega velik nabrekalni potencial.

Podrobna kemična reakcija za tvorbo mineralov je zapletena in odvisna od pH-faktorja zamljine, vira sulfatnega iona, temperature in vode. Ettringit ima obliko podolgovatega-igličastega minerala, ki se pojavlja tam, kjer so vezi med glinenimi delci šibke in napetosti majhne. Ugotavlja se, da se ob padcu temperature na  $15^\circ\text{C}$  pri pH, ki je večji ali enak 10.5 in ko so v tleh prisotni karbonati in silikati, ta prične preoblikovati v mineral thaumasit (Snedker, 1996). Vendar pa so reakcije in tvorba teh mineralov še vedno razmeroma slabo znane in raziskane. Doslej so v literaturi najboljše dokumentirane poškodbe zaradi tvorbe ettringita v glinah, stabiliziranih z apnom, tiste v poročilih iz angleških avtocest. V Sloveniji še nismo zabeležili pojav ettringita v glinah, stabiliziranih z apnom.



Slika 3.6: Pucolanska reakcija (Petkovšek, 2006).

### 3.5.2 Apnena modifikacija in stabilizacija – odločitev za rabo

Apnena modifikacija in stabilizacija sta se uporabljali v gradbeništvu že v času gradnje piramid v Tibetu, ko so jih gradili z zgoščenih mešanic gline in apna. Njene prednosti so v tem, da je možno delati z zemljinami, ki so nam na razpolago na kraju samem. S tem se omeji izkopavanje in nadomeščanje zemljine s primernejšim materialom.

Apnena modifikacija in stabilizacija zemljin naj bi se uporabila:

- ⇒ če so zemljine mokre in plastične, ter kot take neprimerne za mehansko utrjevanje in je potrebno izboljšati obdelovalnost in zgoščevalne lastnosti zemljin,
- ⇒ ko je potrebna večja nosilnost in stabilnost zemljine,
- ⇒ kjer ni mogoče deponirati slabe zemljine v bližnji okolici,
- ⇒ ko so postavljene zahteve, da se do planuma spodnjega ustroja uporabi material neposredno s trase,
- ⇒ kjer so potrebne začasne in transportne poti,
- ⇒ ko je potrebno kemično stabilizirati nevarne materiale ter jih napraviti inertne in
- ⇒ na krajih, ki so bolj izpostavljenimi vremenskim neprilikam (H.M.Greaves, 1996).

Modifikacija in stabilizacija sta soodvisna procesa. Modifikacija je prvi del stabilizacije koherentnih zemljin, ki se zgodi kmalu po dodajanju apna in mešanju - praviloma v prvih 24 urah. Ta reakcija se sproži že pri manjših količinah apna in povzroči poleg sušenja premokrih zemljin (če gre za žgano apno) tudi spremembe osnovnih lastnosti zemljin, jih napravi bolj obdelovalne in jim poveča nosilnost. Dobimo novo zemljino z drugačnimi mehanskimi in kemičnimi lastnostmi. Ne smemo je obravnavati kot samo bolj obdelovalno in bolj nosilno osnovno zemljino (Rogers in Glendinning, 1996), temveč tudi že kot drugačno zemljino.

Pomembnejše spremembe v glineni zemljini pri njeni modifikaciji so:

- ⇒ Zajetno zmanjšanje debeline vodnega filma okoli glinenih zrn, kar povzroči manjšo občutljivost zemljine na dodatno vodo iz okolja.
- ⇒ Tvorjenje večjih glinenih zrn, ki ga povzroči večja medsebojna privlačnost zaradi tanjšega vodnega filma (kosmičenje oz. koagulacija).
- ⇒ Ker med kosmi gline obstaja večji kot notranjega trenja, se s tem poveča tudi strižna trdnost zemljine.
- ⇒ Zemljina po dodatku apna spremeni teksturo in se tako bolj približa zrnatemu materialu. Postane bolj prepustna.
- ⇒ Zvišanje meje plastičnosti, zmanjšanje indeksa plastičnosti, kar vpliva na znižanje plastičnost glin.

Po modifikaciji nastopi proces stabilizacije. Zniža se maksimalna gostota po Proctorju, poviša pa optimalna vlaga, zaradi česar se takoj izboljša vgradljivost. Proces stabilizacije traja več let. V tem času zemljina predvsem pridobiva na strižni trdnosti in odpornosti na vremensko pogojene vplive. Pri stabilizaciji je pomembno, da se zemljina optimalno zgosti pri vlagi, malo višji od optimalne. Tako dosežemo minimalno poroznost in največjo možno gostoto, pri zadostni količini vlage potrebni, da se kemijski procesi lahko razvijejo.

Pri apneni stabilizaciji ne dosežemo končne trdnosti po enem, treh ali osemindvajsetih dneh, saj se trdnost s časom občutno povečuje. Za plasti, ki so grajene s postopkom apnene stabilizacije, je najbolj kritično obdobje med gradnjo in kmalu po njej (Rogers in Glendinning, 1996). Z vidika volumenske stabilnosti pa je najbolj kritično obdobje za

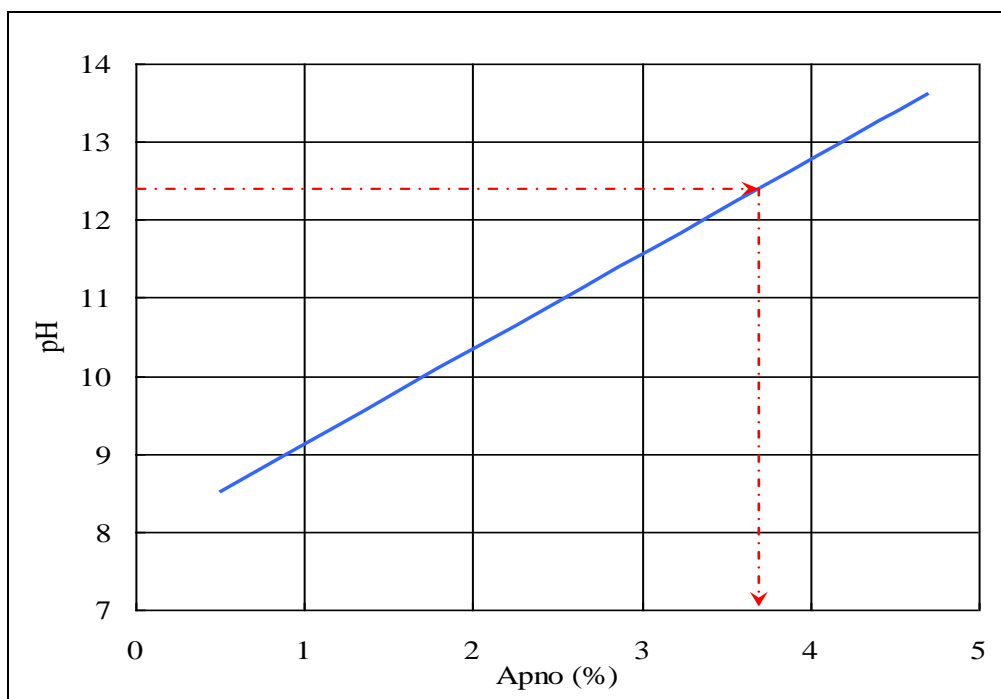
stabilizirano zemljino po prvem daljšem deževju ali po spomladanski odjugi (Petkovšek, 2006), še posebej, če pogoj potrebne minimalne zasičenosti ob vgradnji ni bil izpolnjen.

### 3.5.3 Določitev optimalne količine apna

Potrebno količino veziva se določi v odvisnosti od namena stabilizirane plasti materiala, zahtevanih trdnosti, nadgrajenih plasti voziščne konstrukcije, predvidenih prometnih obremenitev, predvsem pa vrste in lastnosti uporabljenega materiala. Za določitev optimalne količine apna se pretežno uporabljata dve metodi: Eades in Grimov pH test ter postopek določanja tlačne trdnosti.

#### 3.5.3.1 Eades in Grimov pH test

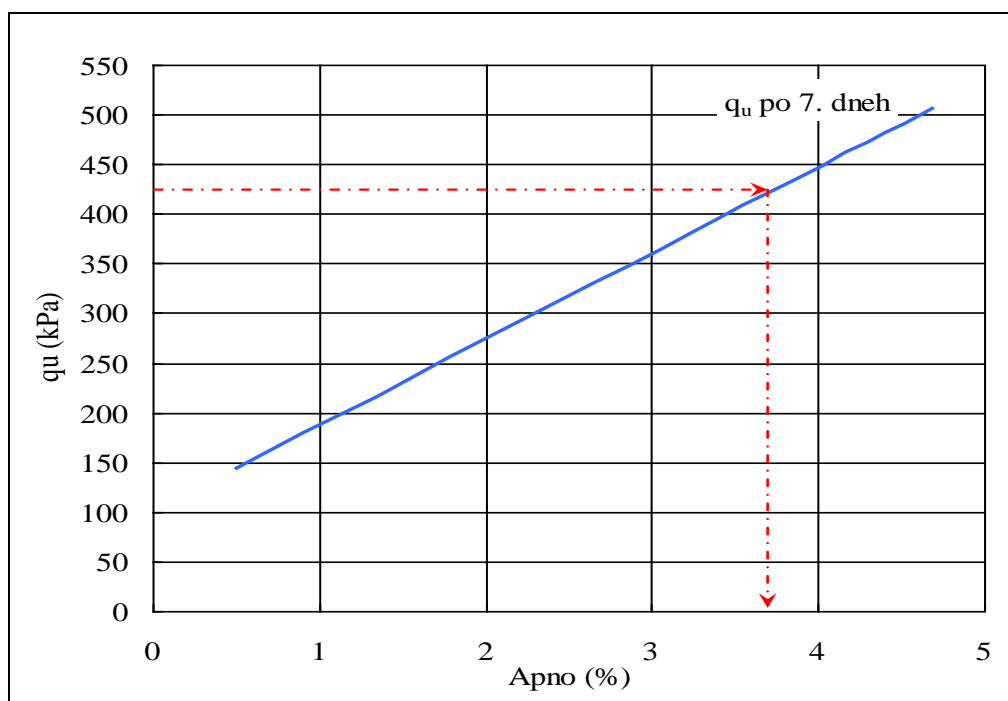
Eades in Grim-mov pH test temelji na predpostavki, da je za popolno modifikacijo in nato stabilizacijo zemljine v njej, potrebno doseči ustrezní pH-faktor. To je med  $\text{pH} = 12.4$  in pH faktorjem apna samega. Po tem testu je optimalna količina apna tista najmanjša količina, ki je še sposobna dvigniti pH mešanice (apno, voda, zemljina-v obliki brozge) na  $\text{pH} = 12.4$ . Ko dosežemo vrednost  $\text{pH} = 12.4$ , upoštevamo najnižjo količino apna, pri kateri je dosežena ta vrednost, ta pa mora biti večja od 2 % (slika 3.7).



Slika 3.7: Določitev potrebne količine apna za stabilizacijo po Eades-Grimovem testu.

### 3.5.3.2 Ugotavljanje tlačne trdnosti stabilizirane zemljine

To je postopek, ki je v veljavi v Sloveniji (PTP, 1989). Pri tej metodi se ugotavlja optimalna količina apna preko določanja tlačne trdnosti nabitih preizkušancev stabilizirane zemljine. Dodatek veziva je enak najmanjši količini, ki po sedmih dneh zagotovi predpisano tlačno trdnost stabilizirane zemljine - npr. 420 kPa (slika 3.8).



Slika 3.8: Določitev potrebne količine apna za stabilizacijo po postopku enoosne tlačne trdnosti.

### 3.6 Postopek izvedbe

V osnovi sta v cestogradnji poznana dva postopka izvedbe, ki se ločita po mestu mešanja veziva z vodo. Prvi se imenuje "mix in place" – v slovenskem prevodu "zmešano na mestu", pri katerem se material ob pomoči stroja premeša z vezivom in vodo na mestu gradnje. Drugi je "mix in plant" - zmešano v stacionarni mešalni napravi. To je postopek, kjer gre material skozi stacionarno mešalno napravo, v kateri se premeša z vezivi in potrebno vodo, ter nato prepelje na mesto vgraditve.

V operativni praksi v tujini se vse več uporablja tudi postopek, ko se izvede posip in mešanje zemljine z apnom na mestu dvzema (v izkopu). Nato se homogenizirana mešanica prepelje na mesto vgradnje, kjer se utrdi in po potrebi dodatno navlaži.

Pri stabiliziranju koherentnih zemljin je bolj primeren postopek "zmešano na mestu" ker je hitrejši in cenejši. Zato se bomo v nadaljevanju osredotočili na ta postopek, ki je sestavljen iz devetih faz.

### **3.6.1 Postopek gradnje z mešanjem na mestu "mix in place" (J.H. Smith 1996)**

Stabilizacija "zmešano na mestu" se lahko izvaja na končni lokaciji plasti, lahko pa tudi na odzemnem mestu. Če se material navaža, ga je mogoče najprej stabilizirati, nato izkopati in prepeljati na mesto nasipa ter vgraditi v samo plast. Ob tem postopku moramo paziti, da se nam material med transportom ne osuši, in da med izkopavanjem ne kopljemo pregloboko, ter tako zajamemo nestabiliziran (neprepariran) material.

#### **3.6.1.1 Priprava planuma zemljine**

Pred stabilizacijo mora biti material primerno zgoščen in poravnan (prilagojen nivoju) na nivoju končne stabilizirane plasti, s toleranco odstopanja  $\pm 20-30$  mm. Z ustrezno pripravo (gostoto, ravnostjo) planuma lahko zagotovimo natančnost globine mešanja, končno globino, skupno trdnost in konsistenco posamezne plasti.

Pri uravnavanju plasti moramo paziti na primerne naklone plasti, ter poskrbeti za primeren sistem odvodnjavanja, ki v primeru dežja zagotavlja, da voda čim hitreje odteče iz preparirane plasti.

Zaradi minimaliziranja motenj pri stabiliziranju najprej napravimo drenažo in odstranimo vse kose zemljine, ki so večji od 125 mm.

#### **3.6.1.2 Nasutje apna**

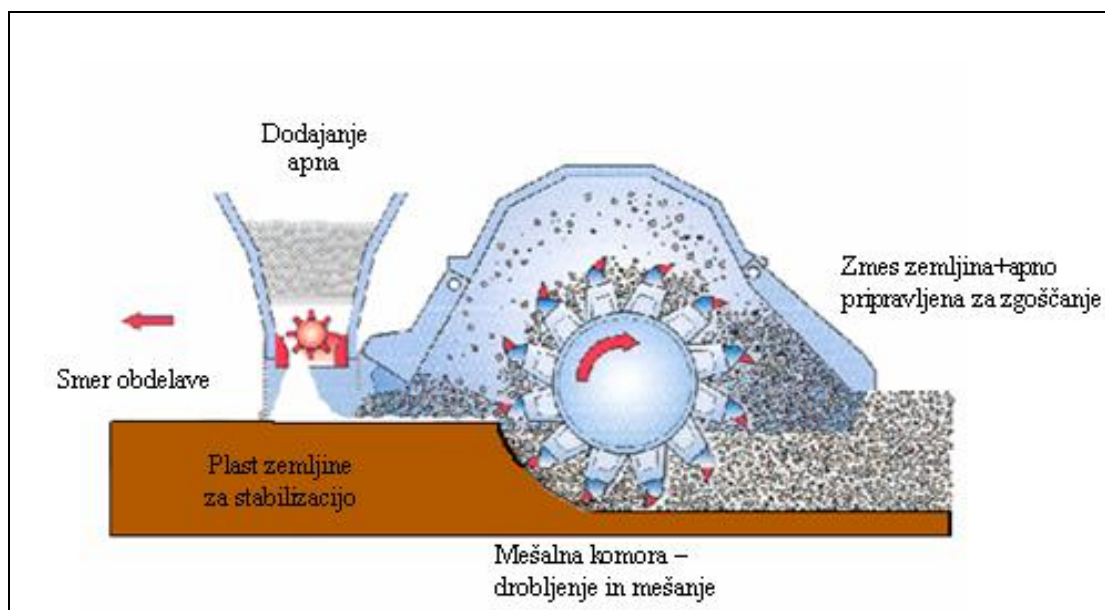
Za nasutje apna (slika 3.9), ki je potrebno za kontinuiteto in kvaliteto stabilizirane plasti, je potreben ustrezen mehanski posipalnik. Posipalnik ima tudi zgornjo omejitev doziranja veziva, tako da je potrebno za večje odstotke veziva pri konstantni debelini nanos in mešanje opraviti z več prehodi posipavanja. Med posipanjem je potrebno paziti na vremenske razmere, predvsem na veter, ki lahko odnese vezivo in s tem povzroči njegovo neenakomerno prisotnost v stabilizirani plasti.



Slika 3.9: Posipanje zemljine z apnom.

### **3.6.1.3 Prvo mešanje in drobljenje osnovnega materiala**

Prvo mešanje se opravlja z mešalnikom do globine, ki sega največ 250 mm do 350 mm; odvisno od možnosti zgoščevanja vmešane plasti. Mešanje se opravlja s prekrivanjem vsaj 150 mm po nivoju in vsaj 20 mm v globino pri mešanju večjega števila plasti. Pri mešalnikih je izredno pomembna nespremenjena globina mešanja, saj ta zagotavlja ustrezno debelino stabilizirane plasti in s tem pravi delež veziva. Druga karakteristika mešalnikov je število in oblika zob. Oblika je odvisna od vrste zemljine, ki jo želimo stabilizirati (koherentne, nekoherentne). Število predstavlja stopnjo drobljenja osnovnega materiala, ki odločilno vpliva na homogenost stabilizirane zmesi (slika 3.10).



Slika 3.10: Postopek mešanja zemljine z apnom z mešalnikom = "freza".

#### 3.6.1.4 Dodajanje vode

Pri prvem mešanju je potrebno dodajati vodo, če je zemljina presuha za hidratizacijo žganega apna. Z dodajanjem moramo poskrbeti za doseg zahtevane vlažnosti, ki zagotavlja primerno vgradljivost in nemoten potek reakcij med zemljino in apnom.

Kjer so potrebne velike količine dodatne vode, jo lahko posujemo direktno po površini in je ne dodajamo pod pokrovom mešalnika. Sodobni mešalniki imajo vgrajen sistem, ki omogoča upravljalcu prilagoditi pritok vode v mešalno posodo, s čimer je omogočeno optimalno doziranje vode. V Ameriki je za stabilizacijo planuma posteljice predpisana obvezna uporaba apnene brozge. Suhega apna se za stabilizacijo planumov posteljice ne sme uporabljati.

#### 3.6.1.5 Rezanje in lahka zgošitev

Po vsakem mešanju se stabilizirana plast poreže na željen profil in rahlo uvalja z gladkim pnevmatičnim ali navadnim valjarjem.



Rahla zgostitev je potrebna, da:

- ⇒ se vzpostavi dober stik med glino in apnom,
- ⇒ se zmanjša izguba vode z izhlapevanjem,
- ⇒ se material obvaruje pred poškodbami dežja in
- ⇒ se zmanjša nevarnost karbonatizacije.

Karbonatizacija se pojavi, ko apno reagira z ogljikovim dioksidom in se spremeni nazaj v apnenec. V tem primeru ga ni dovolj za reakcijo z glino. Ker ostane glina nestabilizirana, je karbonatizirano apno izgubljeno, zato se lahko pojavijo poškodbe zaradi prenizke trdnosti ali nabrekanja.

#### **3.6.1.6 Obdobje zorenja**

Obdobje zorenja je čas med prvim mešanjem z apnom in končno zgostitvijo. Za plasti, stabilizirane z apnom, je to obdobje zorenja pomembno, ker omogoči modifikacijo zemljine. Dolžina tega obdobja ni natanko določena.

Nekatere študije zagovarjajo dolžino od 24 ur pa vse do 96 ur za primer težke gline (Holt in Freer-Hewish, 1996). Mitchell in Hooper (1961) pa v svoji študiji ugotavljata, da obdobje zorenja, dolgo 24 ur, celo poslabša nosilnost in poveča poroznost ter nabrekanje gline, v primerjavi z glinami, ki so bile zgoščene takoj po prvem mešanju. Iz tega lahko sklepamo da je obdobje zorenja pojav, ki potrebuje nadaljnje analize in se razlikuje glede na zemljino, ki jo želimo stabilizirati.

#### **3.6.1.7 Ponovno mešanje in končna prilagoditev vlažnosti**

Po obdobju zorenja napoči čas za ponovno mešanje in končne korekcije vlage v zmesi. Pri tem postopku moramo zagotoviti ustrezno zrnavost (predrobljenost) in njeno optimalno vlažnost, ki nam v nadaljevanju zagotavlja primerno zgostitev stabilizirane plasti.

### **3.6.1.8 Zgoščevanje in planiranje**

Ustrezna zgoščenost plasti zagotavlja obstojnost in željeno nosilnost. To lahko dosežemo s poskusnim poljem, kjer določimo optimalno število prehodov valjarja določene mase, po plasti konstantne debeline za željeno zgoščenost. Po žgoščanju se opravi še končno planiranje stabilizirane plasti, ki zagotavlja ustrezen profil za nadaljevanje gradnje.

### **3.6.1.9 Negovanje in zaščita**

Kot pri vseh mineralnih vezivih je primerna nega ključna za razvoj željene nosilnosti in obstojnosti. Zato moramo zemljino stabilizirati pri ugodnih temperaturah in vzdrževati zadovoljivo vlažnost zmesi. Po MCHW 1991 se apnena stabilizacija lahko izvaja pri temperaturah nad 7°C.

Površinsko izsuševanje pa preprečimo s:

- ⇒ takojšno vgraditvijo naslednega sloja,
- ⇒ pogostim vlaženjem površin stabilizirane plasti in
- ⇒ zaščito plasti z bitumenskim obrizgom.

Promet se po plasti lahko sprostí šele po dveh do treh dneh negovanja ob pogoju, da ima plast dovolj veliko trdnost za prevzem prometne obtežbe. Pri stabiliziranju, oziroma modifikaciji temeljnih tal in pri gradnji nasipov iz stabilizirane zemljine se moramo zavedati, da plast ni namenjena neposrednemu prevzemanju prometne obtežbe in se bo v kratkem času poškodovala, še posebej ob deževnem vremenu. Zato načeloma vožnja po stabiliziranih plasteh ni zaželjena.

## **3.7 Raziskave stabilizirane zemljine**

Stabilizirano zemljino je potrebno tik pred zgostitvijo in po njej kontrolirati, da zagotovimo zveznost in homogenost zgrajene plasti. Po slovenskih tehničnih pogojih (TSC, 1989) za kontrolo kakovosti stabilizirane zemljine predvidene kontrole:

- ⇒ dosežene zgoščenosti ( $D_{PR}$ ; %)
- ⇒ dosežene trdnosti ( $q_u$ ) in
- ⇒ dosežene vremenske obstojnosti  $R(q_m/q_s)$

Danes vemo, da postopki točkovnega izvajanja kontrole kakovosti vgrajevanja zemljin v nasipe in nevezane nosilne plasti ne dajejo zadovoljivega pregleda nad zveznostjo in homogenostjo utrditve.

Izvajati je potrebno kontinuirane meritve, ki jih opravljamo s primerno merilno opremo.

Raziskave, ki jih moramo opraviti na stabilizirani zemljini, so:

⇒ predrobljenost stabilizirane zemljine

Pedrobljenost je pomembna, ker preveliki kosi osnovne zemljine predstavljajo šibka mesta v plasti. Po MCHW 1991 moramo zagotoviti, da je odstotek prehoda skozi sito 28 mm vsaj 95 % in odstotek prehoda skozi sito 5 mm vsaj 30 %.

⇒ gostota in optimalna vlažnost stabilizirane zemljine tik pred zgostitvijo

Primerna vlaga pri zgostitvi plasti je najbolj pomembna karakteristika, saj ta zagotovi primerno zgoščenost in predvsem nemoten potek reakcij, ki jih stabilizacija sproži. Po MCHW 1991 se vlaga giblje med optimalno in vlago pri 5 % poroznosti ( $n_a = 5\%$ , delež z zrakom zapolnjenih por). Vedno moramo paziti, da stabilizirano zemljino zgoščamo na mokri strani Proctorjeve krivulje.

⇒ tlačna trdnost

Tlačna trdnost stabilizirane plasti nas lahko zavede, še posebej, če jo preverjamo v času 4 oz. 7 dni. Suhe glinene zemljine namreč izkazujejo visoko trdnost in togost. Pri stabiliziranju pravih nabreklih zemljin, je poleg nosilnosti izjemnega pomena tudi volumska stabilnost, ki pa ni zagotovljena z visoko nosilnostjo stabilizirane zemljine .

Tlačna trdnost za kemično stabilizirane zemljine mora dosegati 500 kPa za nasipe in 400 kPa za temeljna tla (PTP, 1989). Razmerje tlačnih trdnosti med mokrim in suhim preizkušancem mora biti po sedmih dneh vezanja večje od  $R = 0,7$  (PTP, 1989). Te zahteve so mišljene za stabiliziranje zaključnih planumov (posteljice) in so za nasipe v vseh ozirih prestroge in nepotrebne.

## 4 EKSPERIMENTALNI DEL - MATERIALI IN METODE

### 4.1 Uvod

V tem poglavju so opisani materiali in metode, ki smo jih uporabili v raziskavi. Osnovni material je bila glina, kateri smo dodajali apno in kemično sadro. Raziskave smo opravili po standardiziranih metodah, navedenih v referencah. S raziskavami smo določali:

- ⇒ vlažnost,
- ⇒ max. prostorninsko gostoto in optimalno vlago po Proctorju,
- ⇒ Atterbergove meje plastičnosti,
- ⇒ linearno nabrekanje z edometriko raziskavo v različnih časih vezanja,
- ⇒ enoosno tlačno trdnost v različnih časih vezanja in
- ⇒ sukucijo s potencimetrom WP4-T.

### 4.2 Izvor materiala v raziskavi

Zemljino smo odvzeli na gradbišču pomurskega kraka avtoceste na odseku Cogetinci – Vučja vas, na lokaciji vkopa v P22 iz globine približno 2.5 m s pomočjo bagra. Zemljino smo razdelili na tri dele, težke približno 50 kg in jo shranili v neprodušnih PVC vrečah. S tem smo zemljino zavarovali pred morebitnimi vplivi okolja in ohranili njene prvotne lastnosti do transporta v laboratorij.

Za osnovno vezivo smo uporabili industrijsko hidratizirano apno Kresnice, pakirano po 25 kg. Hidratizirano apno je proizvedeno v skladu s standardom SIST EN 459 1:2001.

Deklarirane lastnosti uporabljenega apna so :

- |                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| ⇒ Nasipna masa                 | ca. 455 kg/m <sup>3</sup> |
| ⇒ Finost mletja                | min. 95% pod 0.09 mm      |
| ⇒ Vsebnost Ca(OH) <sub>2</sub> | min. 92%                  |
| ⇒ Vsebnost CaCO <sub>3</sub>   | max. 9%                   |
| ⇒ MgO                          | max. 0.9%                 |
| ⇒ CO <sub>2</sub>              | max. 4%                   |

V raziskavi smo kot dodatek uporabili tudi kemično sadro  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  z veliko stopnjo čistosti. Sadra je bila pridobljena v odžvepljevalni napravi TE Trbovlje. Pridobivanje sadre poteka tako, da se dimni plini iz kurišča pred izpustom v dimnik vodijo skozi vodno raztopino. Kisla vodna raztopina, ki pri tem nastaja, se nevtralizira s kalcitno moko, pri čemer nastaja sadra.

### **4.3 Priprava zemljine za raziskavo**

Po prevozu zemljine v laboratorij smo tej najprej določili naravno vlažnost ( $w_o = 21,9\%$ ). Nato smo celoten vzorec posušili, predrobili in presejali skozi sito  $\varnothing 20$  mm. Zemljino smo nato še enkrat posušili v peči na  $105^\circ\text{C}$ , da smo si zagotovili suh vzorec.

#### **4.3.1 Priprava preizkušancev gline za določitev optimalne vlage**

Pripravili smo 5 preizkušancev gline po 2 kg. Vsakemu smo dodali različne količine vode, tako da je bila vlaga 16, 20, 24, 27 in 32 %. Po standardnem Proctorjevem postopku smo nato preizkušance nabili in izmerili enoosno tlačno trdnost sveže nabitih preizkušancev pri porušitvi. Preizkušanci so se nato ponovno sušili na  $105^\circ\text{C}$  za določitev njihove suhe mase. S tem smo določili Proctorjevo krivuljo, optimalno vlago, max. gostoto in stopnjo zasičenja. Glede na obliko Proctorjeve krivulje ter potek krivulje v diagramu  $q_u$ - $w$  smo se odločili, da bomo nadaljne raziskave stabilizacijskih zmesi opravljali pri naslednjih izhodiščnih vlagah gline:

$$\Rightarrow w = 16\%$$

$$\Rightarrow w = 18\%$$

$$\Rightarrow w = 24\%$$

Za meritve sukcije smo pripravili 50 g suhega vzorca zemljine. Tega smo najprej predrobili v možnarju, tako da se je v celoti presejal skozi sito velikosti 0,5 mm. Razdelili smo ga na 9 manjših preizkušancev približne mase 5 g. Preizkušanci so se do njihove nadaljne uporabe shranili v eksikatorju. Tik pred meritvijo sukcije smo vzorce navlažili na željeno vlago (5, 7, 8, 17, 18, 19, 23, 25 in 27 % glede na delež suhe mase preizkušanca), jih vgradili v plastično posodico, neprodušno zaprli, ter pustili, da se vlaga enakomerno porazdeli.

#### **4.3.2 Priprava zmesi glina+apno**

Iz zemljine, pripravljene po postopku, opisanem v točki 4.3, smo naredili tri preizkušance suhe mase po 8 kg z različno vsebnostjo vlage (16, 18 in 24 %). Preizkušancem smo nato ročno vmešali apno. Delež apna je bil v vseh zmesih enak. Glede na izkušnje s terena smo se odločili za dodatek 4 m/m %.

#### **4.3.3 Priprava zmesi glina+apno+sadra**

Iz zemljine smo naredili tri preizkušance suhe mase po 8 kg. Preizkušancem smo ročno vmešali 10 % sadre glede na njihovo suho maso. Zmesi zemljina+sadra smo navlažili na vlago (16, 18 in 24 % zmesi). Nato smo homogeni zmesi dodali še 4 % hidratiziranega apna.

### **4.4 Raziskave**

#### **4.4.1 Določanje vlažnosti v laboratoriju**

Vlažnost določamo s sušenjem v sušilniku pri 105°C. Iz preizkušanca zemljine odvezamemo primerno količino materiala, jo stehamo v posodi znane mase in damo sušiti za 24 ur. Po 24 urah preizkušane vzamemo iz sušilnika, ga ohladimo v eksikatorju in stehamo. Iz znane relacije izračunamo vlažnost kot

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad [\%] \quad (3)$$

#### **4.4.2 Prostorninska gostota po Proctorju**

Maksimalna prostorninska gostota po Proctorju je tista gostota, ki se pri preizkusu po Proctorjevemu postopku doseže kot največja še dosegljiva gostota suhega materiala za izbrano energijo nabijanja. Postopek po Proctorju temelji na zgoščevalnem delu, potrebnem za zgostitev določenih značilnih zmesi zrn. Potek določevanja prostorninske gostote  $\rho_{Pr}$  je naslednji.

Preizkušanec zmesi zrn zgoščamo po določenem postopku v jeklenem valju (kalupu z določenim volumnom) z nabijalom, da zagotovimo za določeno prostornino preizkušanca določeno zgoščevalno delo  $A$ , ki mora znašati:

$$A = \frac{m * g * h * n_p * n_n}{V_p} \quad [\text{MNm/m}^3] \quad (4)$$

$m$  = masa nabijala (kg)

$g$  = gravitacijski pospešek ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = višina nabijanja (m)

$n_p$  = število plasti

$n_n$  = število udarcev na plast

$V_p$  = prostornina preizkušanca

$A \sim 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Celotni postopek se sestoji iz več preizkusov, pri katerih ima preizkušanec zmesi zemljine različno vsebnost vode. Kot rezultat raziskave dobimo krivuljo odvisnosti prostorninske gostote suhe zemljine od vsebnosti vode v isti zemljini. Na tej osnovi določimo za preiskovano zmes optimalno vsebnost vode, pri kateri je mogoče doseči največjo prostorninsko gostoto suhe zmesi zemljine.

#### 4.4.3 Atterbergove meje plastičnosti

Meja plastičnosti ( $w_p$ ) se določi v laboratoriju tako, da preizkušanec zemljine, presejane skozi sito 0,5 mm, zgnetemo v plastično kroglo, iz katere nato oblikujemo svaljke, dolge 3 cm in debele 3 mm. Vlažnost zemljine, ki smo ji določili mejo plastičnosti, nato določimo s sušenjem v sušilniku. Izračun vlažnosti poteka na enak način, kot poteka izračun pri določanju naravne vlažnosti zemljine.

Mejo židkosti ( $w_L$ ) določamo tako, da iz preizkušanca zemljine, presejane skozi sito 0,5 mm, in vode zgnetemo homogeno pastozno zmes, ki jo nato preiskujemo s švedskim konusom. Ta poteka tako, da zemljino, pripravljeno pri vlažnosti približno na meji židkosti, vgradimo v posodico standardnih dimenzij in merimo ugrez normiranega konusa v času 5 s. Kadar se

konus ugrezne do globine 20 mm, ima material vlažnost, ki ustreza meji židkosti. Ker je eksperimentalno iskanje meje židkosti na samo enem preizkušancu težavno, se raziskava ponovi 3-4 krat, vsakokrat na preizkušancih z različno vlažnostjo, pri čemer je ugrez konusa med 10 in 25 mm. Rezultate raziskave vnesemo v diagram, ki ima na ordinato nanešeno globino prodiranja konusa, na absciso pa vlažnost. Presečišče ravne črte z absciso, ki odgovarja 20 mm ugreza, odgovarja meji židkosti.

Indeks plastičnosti ( $I_p$ ) dobimo tako da, od meje židkosti odštejemo mejo plastičnosti.

#### 4.4.4 Raziskave volumske obstojnosti

Preizkušanec zemljine, ki smo ga predhodno odvzeli iz narave ali zgostili po Proctorju, cilindrične oblike, premera približno 75 mm in višine 15 do 20 mm, se vstavi v tog kovinski obroč in vgradi v edometerski aparat med dve porozni ploščici. Po vgradnji se preizkušanec zalije z vodo ter spremlja njegove deformacije v rednih časovnih intervalih, sprva večkrat, kasneje pa z vse večjimi časovnimi zamiki. Raziskava se zaključi, ko na preizkušancu ni opaznih nobenih novih deformacij (nabrekanje ali posedanje). Preizkušanec razgradimo in določimo vlago pred začetkom in na koncu raziskave ter pripadajočo gostoto.

Iz končne spremembe višine preizkušanca lahko določimo njegove linearne ali volumenske spremembe pri izbrani obtežbi.

$$\varepsilon_{lin} = \frac{\Delta h}{h_0} * 100 \quad [\%] \quad \text{oz.} \quad \varepsilon_{vol.} = \frac{\Delta V}{V_0} * 100 \quad [\%] \quad (5)$$

#### 4.4.5 Raziskava enoosne tlačne trdnosti

Raziskava enoosne tlačne trdnosti prostih valjastih preizkušancev je posebna oblika nekonsolidirane-nedrenirane raziskave. Raziskavo uporabljamo za ugotavljanje nedrenirane strižne trdnosti kohezivnih zemljin. Valjasti preizkušanci se razmeroma hitro obremenijo v vertikalni smeri, pri čemer je bočna totalna napetost med raziskavo enaka nič. Raziskavo delamo tako, da vertikalno silo povečujemo do porušitve preizkušanca in pri tem merimo vertikalne pomike. Preizkušanci so ponavadi brez poškodb odvzeti iz narave. V našem



primeru pa smo preizkušance zgostili po Proctorjevem postopku in jih neprodušno zaprli v PVC vrečke, kjer smo jih hranili do raziskave.

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ [kPa]} \quad (6)$$

$\sigma$  = porušitvena napetost (kPa), oz enoosna tlačna trdnost

P = vertikalna sila (N)

A = začetni prerez preizkušanca (cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.6 Meritve sukcije

Sukcijo smo merili s pomočjo potencimetra (WP4-T), ki deluje na principu merjenja temperature rosišča na hlajenem ogledalcu. Preden smo preizkušance v zaprtih posodah položili v merilno napravo, smo poskrbeli, da se je njihova temperatura uskladila s temperaturo v merilni napravi. Preizkušanec nato vstavimo v merilno komoro in počakamo, da pride do kalibracije vlage v komori. Pri visokih sukcijah (nad 2 MPa) je dovolj, če se meritve umirijo v logaritemski skali.

Rezultate meritev sukcije lahko podajamo kot točkovne podatke ali na retencijski krivulji. Retencijska krivulja je nezvezna funkcija, s katero so opisane relacije med vlago in napetostjo porne vode v zemljini.

V zasičenih zemljinah ( $S_r = 1$ ) je sukcija enaka 0. Z zniževanjem vlage, oz. stopnje zasičenja, pa sukcija v zemljini narašča. Na splošno velja, da je v rahlih glinenih zemljinah prehod zemljine v zasičeno stanje nekje pri sukcijah med 10 in 33 kPa, na gostih zemljinah pa je to stanje znatno višje in lahko tudi preko 100 kPa.

Na retencijski krivulji so tri značilna območja:

- ⇒ cona rezidualnega zraka; to je cona, ki odgovarja stopnji zasičenja od  $S_r = 1$  do vrednosti, ki odgovarja točki vstopa zraka (air entry value),
- ⇒ cona desaturiranja; to je cona, v kateri zrak vstopa v zemljino in
- ⇒ cona rezidualne vlage; to je cona, v kateri je pora voda prisotna le v izoliranih žepih in ločena z mehurji zraka. Točka rezidualne vlage nastopi pri sukuciji okoli 1500 kPa.

Na vrednost sukucije pri točki vstopa zraka vplivajo različni dejavniki: gostota, način zgoščanja, geološka zgodovina in drugi. Na vrednost sukucije pri točki rezidualne vlage pa vpliva predvsem značaj gline (mineralna sestava), ostali parametri pa nanjo nimajo vpliva.

## **5 EKSPERIMENTALNI DEL – REZULTATI PREISKAV**

### **5.1 Uvod**

Po postopkih, opisanih v točki 3, smo opravili raziskave v obsegu, opisanem v nadaljevanju.

Optimalno vlago in maksimalno gostoto smo opravili na 5 vzorcih: na zemljini, na zmesi zemljine in apna ter na zmesi zemljine, sadre in apna. Skupaj smo določili 3 Proctorjeve krivulje.

Atterbergove meje plastičnosti smo določili naravni zemljini in na obeh mešanicih zemljine z apnom in apnom in sadro po 1, 4, 7 in 28 dneh staranja. Skupaj smo opravili 9 preiskav.

Volumenske spremembe smo spremljali na preizkušancih pri treh različnih stopnjah vlage (16,18 in 24%) po 1, 4 in 28 dneh staranja. Skupaj smo opravili 9 preiskav na preizkušancih z apnom ter 9 preiskav na preizkušancih z apnom in sadro. Posebaj smo preiskali nestabilizirano glino. Skupaj smo pridobili podatke iz 21 preiskav deformabilnosti, izvedenih v edometru.

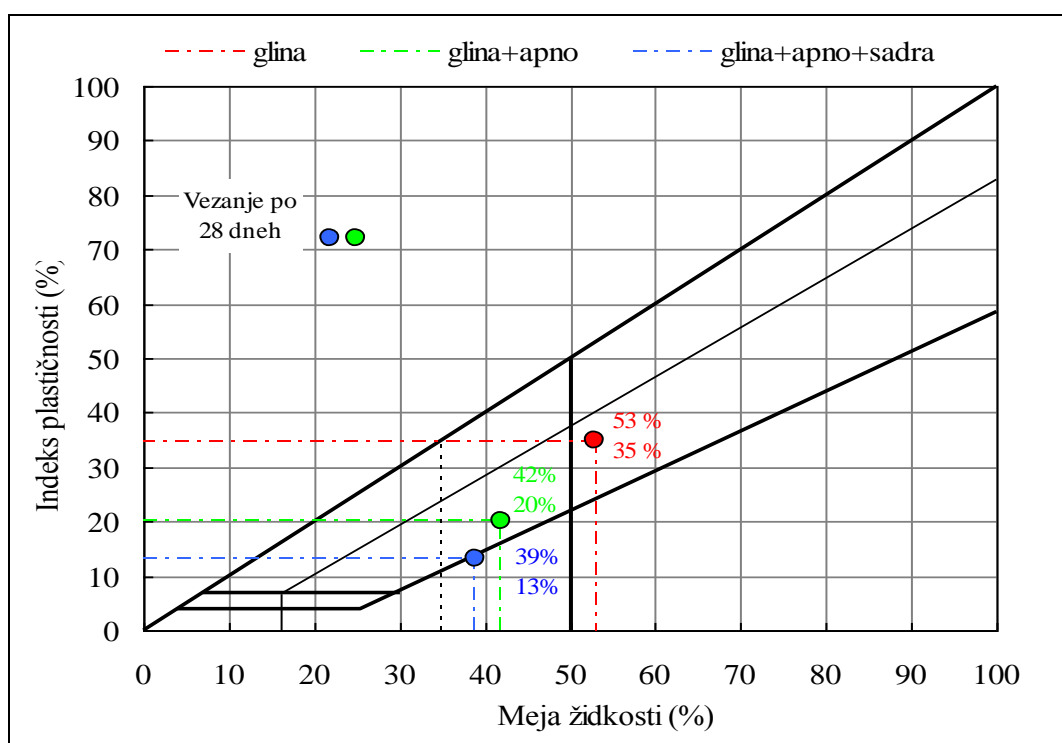
Tlačno trdnost preizkušancev smo spremljali po 1, 4, 7 in 28 dneh. Skupaj smo preiskali 24 stabiliziranih in 5 nestabiliziranih preizkušancev.

Sukcijo smo merili na naravnih in na stabiliziranih zmeseh. Izdelali smo tri nepopolne retencijske krivulje.

V nadaljevanu prikazujemo analize, rezultate ter ključne ugotovitve.

### **5.2 Atterbergove meje plastičnosti**

Preiskovana zemljina spada po AC klasifikaciji zemljin v razred mastne gline (CH), kar kaže slika 5.1. Razvidno je tudi, da se z dodatkom apna in sadre zmanjšata indeks plastičnosti ( $I_p$ ) in meja židkosti ( $w_L$ ) zemljine. S stabilizacijo preide zemljina iz mastne gline (CH) v meljasto glino (CL).

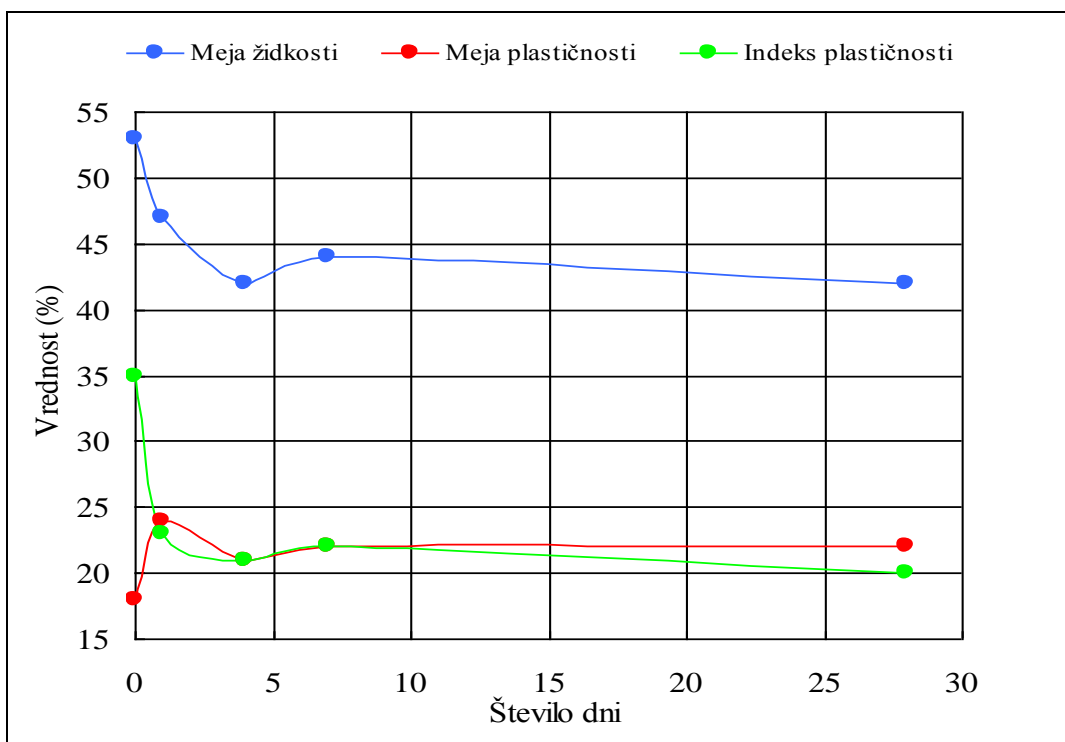


Slika 5.1: Določitev vrste zemljine glede na njene konsistenčne meje.

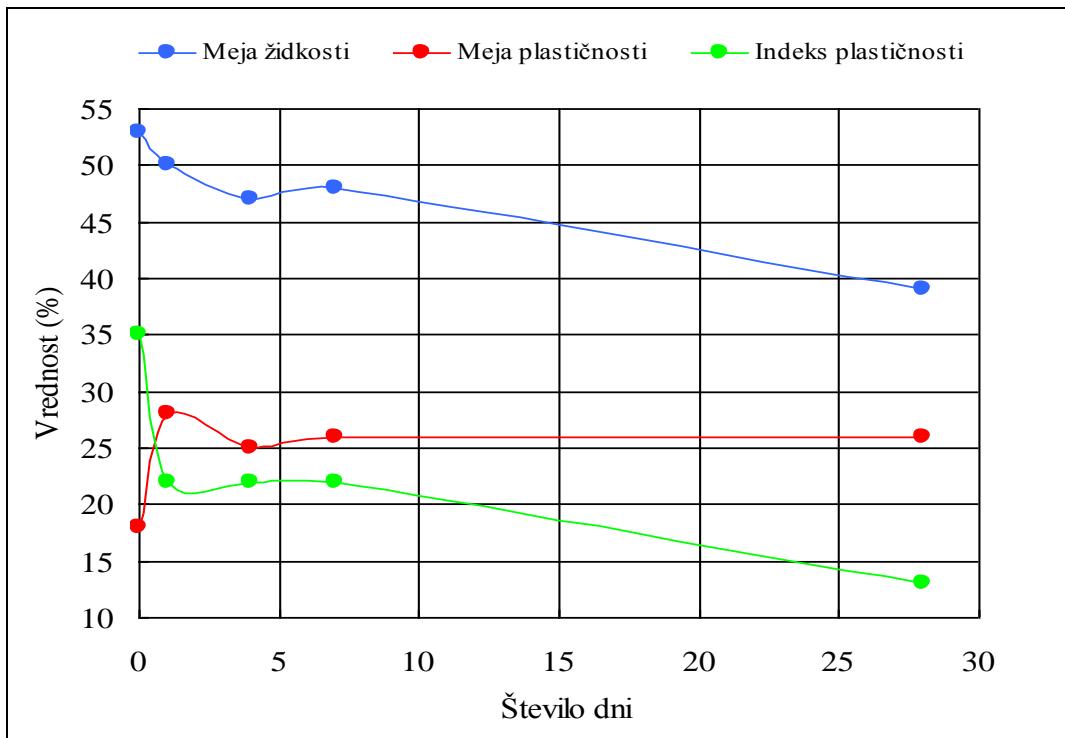
Zaradi kemičnih reakcij v sistemu zemljina-apno se vrednosti meje židkosti in indeksa plastičnosti v preizkušancih glina+apno v prvih dneh znižujeta in dosežeta najnižno vrednost 4. dne (slika 5.2). Sledi ustalitev pri vrednostih, nižjih od osnovnih. Meja plastičnosti prvi dan naraste, nato se ravno tako ustali, vendar pri višjih vrednostih od osnovnih.

S slike 5.3 je razvidno, da v vzrocu glina+apno+sadra padata tako indeks plastičnosti kot meja židkosti. Vrednosti se nahajajo pod osnovnima vrednostima preizkušanca. Nasprotno meja plastičnosti raste in doseže najvišjo vrednost 4. dan, nakar se bistveno ne spreminja več, ampak se ustali pri vrednosti, višji od osnovne.

Če primerjamo naše rezultate z literaturnimi podatki, lahko ugotovimo, da so si v primeru dviga meje plastičnosti ( $w_p$ ) podobni. Povsod je zabeležena njena rast. Pri primerjavi meje židkosti ( $w_L$ ) podatki niso povsem enotni. Literatura navaja, da se meja židkosti v večini primerov ne spremeni. Obstaja pa tudi literatura, ki kaže, da se meja židkosti po dodatku apna zniža, kar se je zgodilo tudi v našem primeru ( $w_L$ )

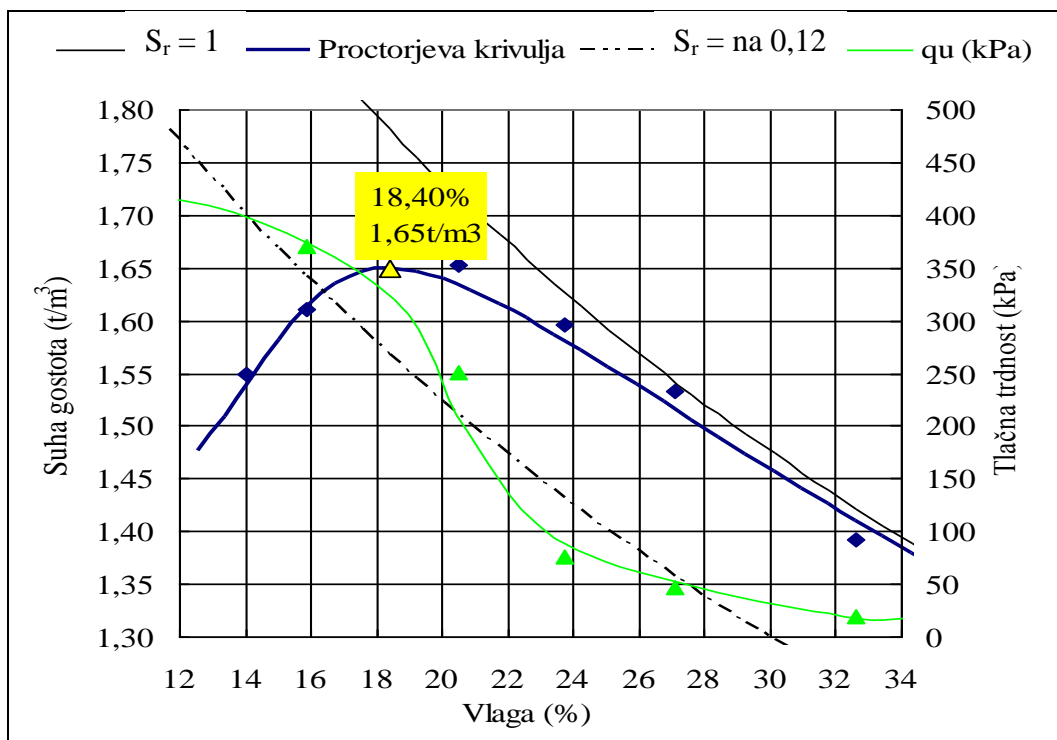


Slika 5.2: Konsistenčne meje preizkušanca glina+apno.



Slika 5.3: Konsistenčne meje preizkušanca glina+apno+sadra.

### 5.3 Določanje tlačne trdnosti in maksimalne gostote po Proctorjevi metodi, za glino in preizkušance glina+apno in glina+apno+sadra



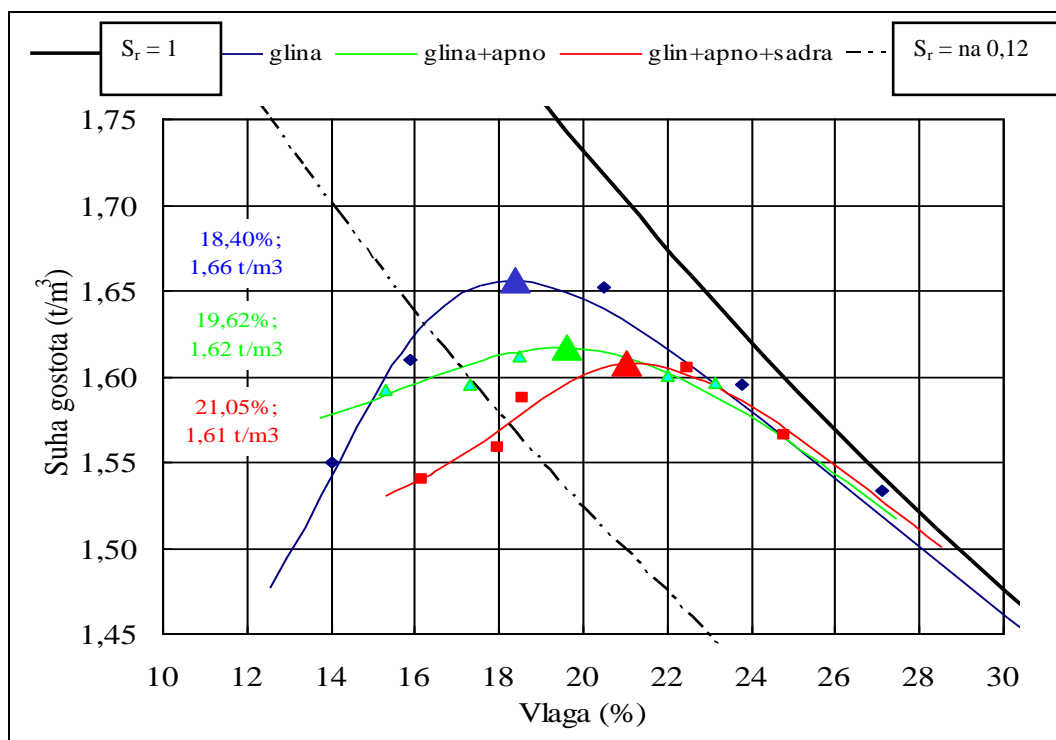
Slika 5.4: Maksimalna suha gostota preiskovane gline po Proctorjevi metodi in njena tlačna trdnost.

Slika 5.4 prikazuje maksimalno gostoto preiskovane gline po Proctorjevi metodi in pripadajočo tlačno trdnost. Pri optimalni vlagi 18,4 % znaša njena maksimalna suha gostota  $1,66 t/m^3$ . Z zmanjšanjem vlage v preiskovani glini se povečuje njena trdnost, ki doseže maksimalno izmerjeno vrednost  $q_u = 370 kPa$  pri 16 % vlagi. Ta je že v območju med mejo krčenja in mejo plastičnosti in je z vidika volumske stabilnosti neugodna.

Preglednica 5.1: Rezultati Proctorjeve raziskave.

	Optimalna vlaga ( $w_{opt}$ ) [%]	Maksimalna gostota ( $\rho_{d max}$ ) [ $t/m^3$ ]
Glina	18,4	1,66
Glina+apno	19,6	1,62
Glina+apno+sadra	21,1	1,61

Z dodajanjem apna, oziroma apna+sadre preiskovani glini se maksimalna suha gostota zmanjšuje (slika 5.5), povečuje pa se delež vlage, pri kateri je ta dosežena. Glina ima največjo suho gostoto pri najnižji vlagi (18,4 %). Preizkušanec z dodatkom apna doseže maksimalno gostoto pri 19,6 % in preizkušanec z dodatkom glin, apna in sadre pri 21,15 % vlage (preglednica 5.1).



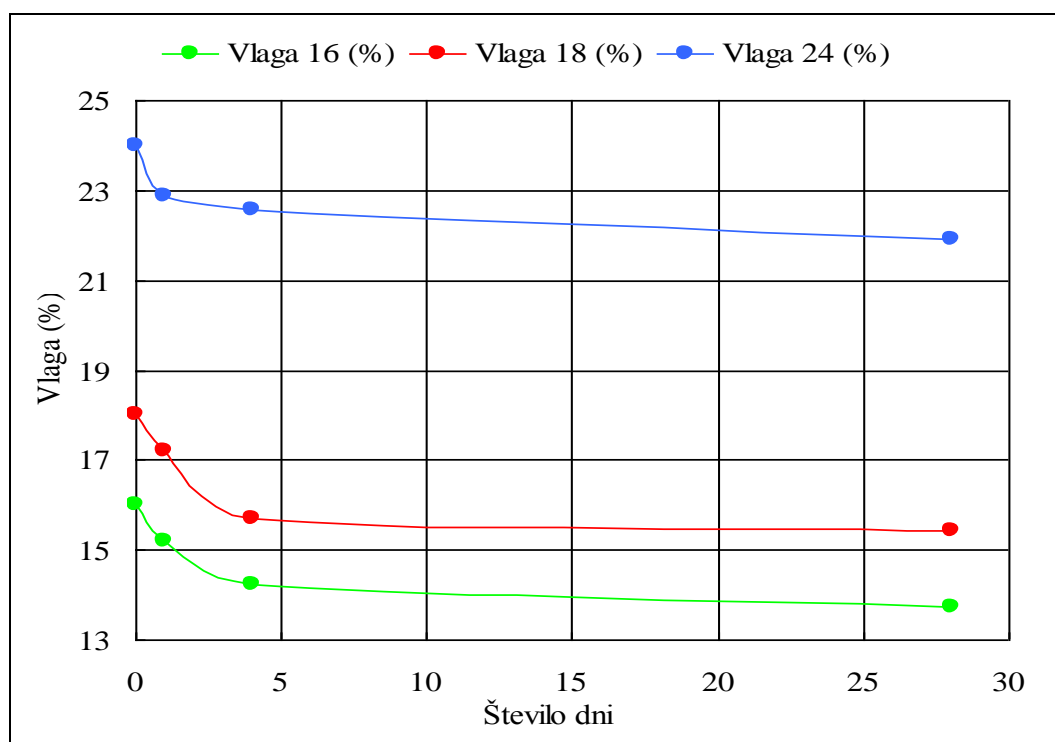
Slika 5.5: Optimalna suha gostota preiskovane glin in preizkušancev glina+apno ter glina+apno+sadra.

#### 5.4 Spremljanje spreminjanja vsebnosti vlage v preizkušancih glede na njihovo začetno vlažnost

Vlaga prikazane na sliki 5.6 so pridobljene pri raziskavah preizkušancev zaprtih v PVC vrečah in negovanih pri sobni temperaturi. Pri preizkušancih glina+apno slika 5.6 kaže, da se pri vseh treh začetnih vsebnostih vlage v preizkušancih (16, 18 in 24 %) ta s časom zmanjšuje, kar je razumljivo. Pri preizkušancih, kjer je začetna vlaga 24 %, je padec zabeležen že prvi dan, nakar se bistveno ne spreminja. Pri drugih dveh vzrocih, kjer je začetna vlaga 16 in 18 %, pa je večji padec v vsebnosti vlage opazen do 4. dne, nato se tudi tu

vrednosti ustalijo. Iz tega lahko sklepamo, da se glavne reakcije med apnom in zemljino, v katerih je udeležena porna voda, razvijejo v prvih 4 dneh vezanja.

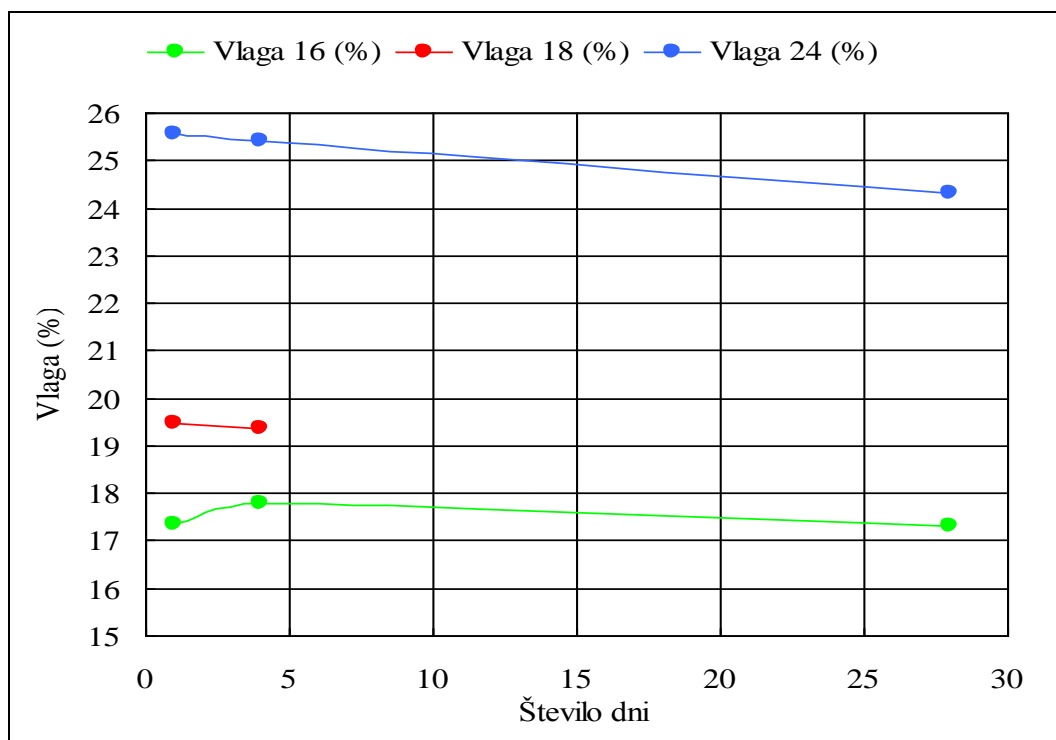
Vrednosti pri času 0 (slika 5.6) so določene glede na izhodiščno vlago zemljine pred dodajanjem apna.



Slika 5.6: Spremljanje vsebnosti vlage v preizkušancih glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.

Na preizkušancih s sadro je pri vseh preizkušancih zabeležena višja vsebnost vlage glede na predvidene začetne vsebnosti. To je lahko posledica sušenja sadre pri prenizki temperaturi, zaradi česar iz nje ni bila odstranjena vsa vlaga. Najvišje vsebnosti vlage so pri vseh preizkušancih glina+apno+sadra (slika 5.7), po prvem (18 in 24 %), oz. četrtem dnevu (16 %). Po prvem dnevu je pri preizkušancih z 24 % začetno vlago opazen padec v vsebnosti vlage. V preizkušancih z 18 % vlage, kjer smo zaradi težav med raziskavo pridobili le vsebnosti vlage v preizkušancih do 4. dneva, se nakazuje podoben trend kot pri preizkušancih z najvišjo začetno vsebnostjo vlage. Pri preizkušancih z 16 % vsebnostjo začetne vlage je opazen padec vlage šele po 4 dnevu.





Slika 5.7: Spremljanje vsebnosti vlage v preizkušancih glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.

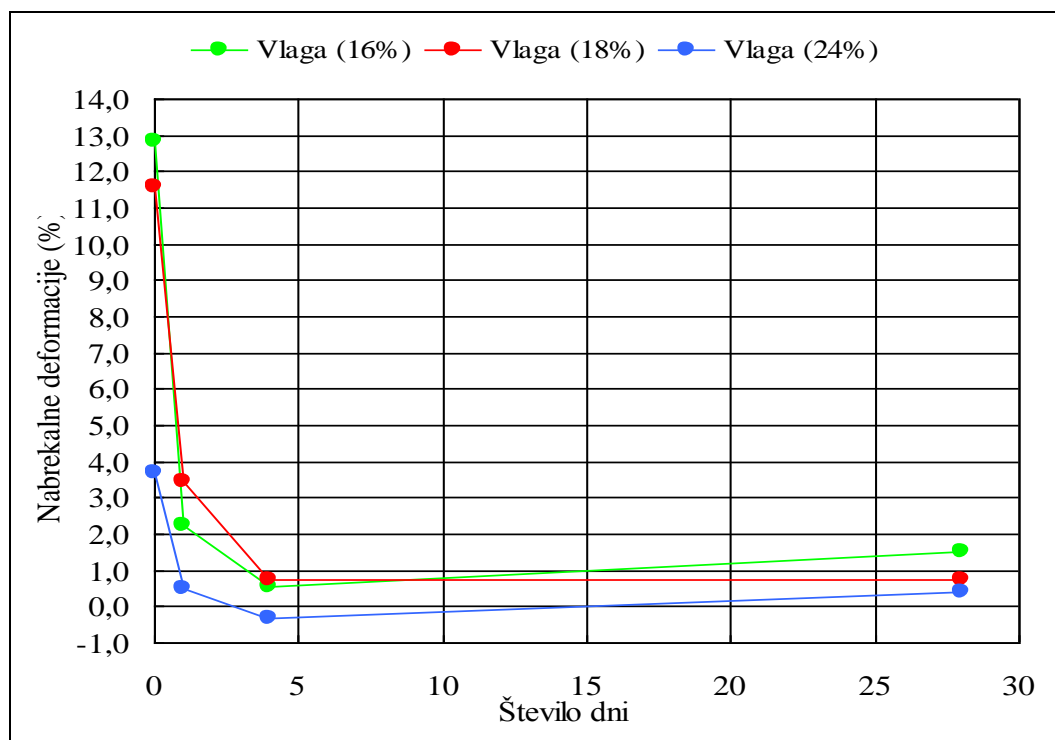
### 5.5 Spremljanje deformacij v preizkušancih glede na njihovo začetno vsebnost vlage

Raziskave nabite naravne glin kažejo, da je linearni dvizek odvisen od začetne količine vlage. Največji je na bolj suhi glini (16 % vlage), najmanjši, a še vedno znaten, pa na glini z vlago 24 %, ki je višja od optimalne. Po dodajanju apna se deformacije glin znatno znižajo in so manjše od 4 %.

S povečevanjem začetne vsebnosti vlage v preizkušancih glina+apno prihaja do zmanjšanja deformacije (slika 5.8). Največje izboljšanje glede na začetno vlago v preizkušancih je zabeleženo takoj po dodajanju veziva. Izboljšanje se nadaljuje še do četrtega dne, nakar se deformacija ustali. Pri nižjih dveh začetnih vsebnostih vlage (16 in 18 %) je padec med prvim in četrtem dnevom izrazitejši kot pri preizkušancih z začetno vsebnostjo vlage 24 %. Medtem ko je pri preizkušancih z 18 % vlage zabeležena po 4. dnevnu stabilnost, se pri ostalih dveh preizkušancih deformacija nekoliko poveča, kar pa je lahko tudi posledica eksperimentalne napake.

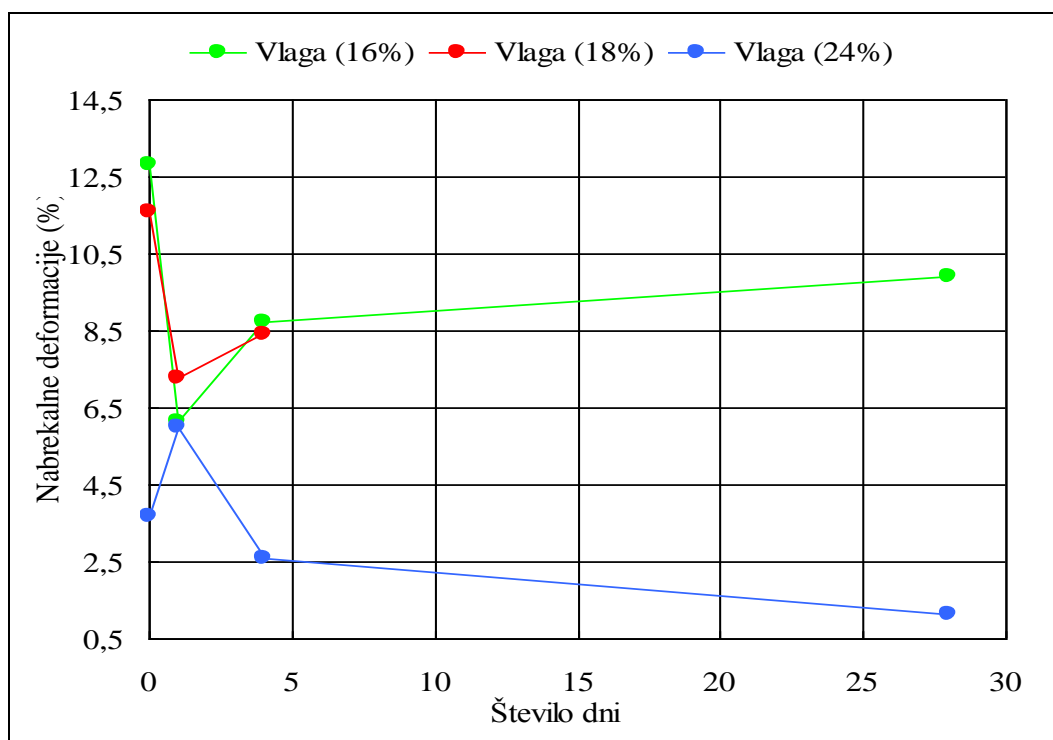
Iz raziskave vidimo, da so se preizkušanci z vlago 18 in 24 % stabilizirali, to pomeni, da so se njihove nabrekalne deformacije ustalile pri vrednosti  $\varepsilon = 1$  %. Tega pa ne moremo trditi za preizkušance, nabite pri vlagi 16 %, ki kažejo težnjo naraščanja deformacij.

Vrednosti pri času 0 (slika 5.9 in 5.10) so določene na nestabilizirani glini.



Slika 5.8: Spremljanje deformacije preizkušanca glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.

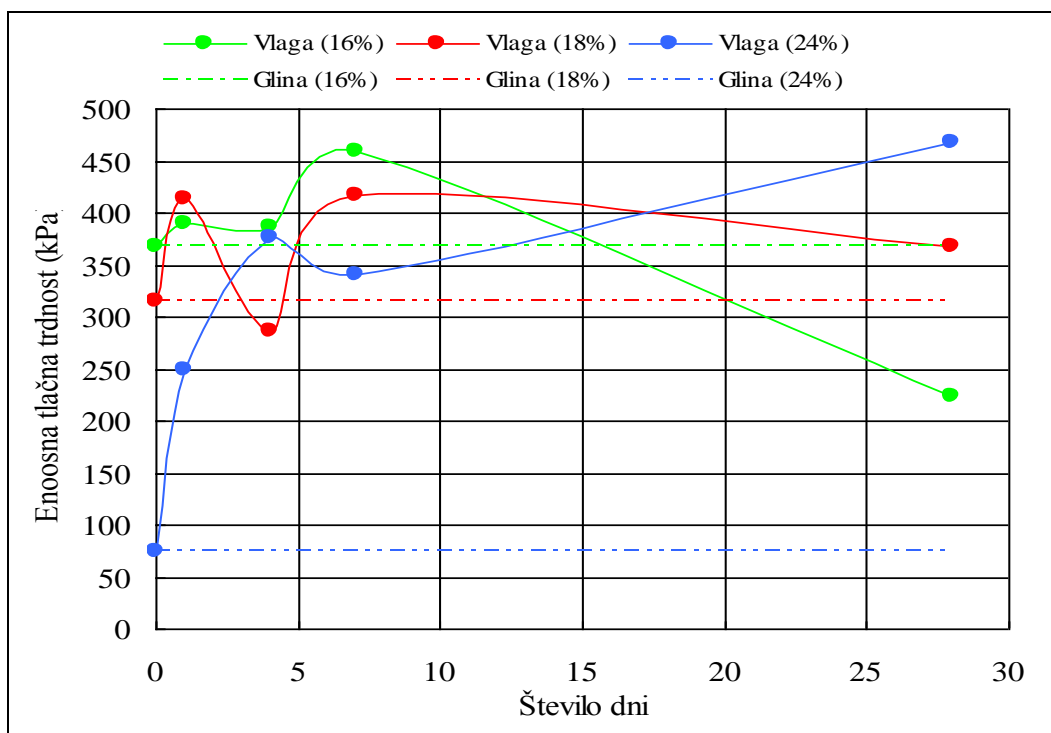
Slika 5.9 prikazuje, da se pri preizkušancih glina+apno+sadra volumska deformacija razlikuje glede na vsebnost začetne vlage preizkušanca. Pri začetni vsebnosti vlage 16 in 18 % je prvi dan zabeleženo znižanje nabrekalne deformacije, nato pa deformacija ponovno naraste, kar je slabo. Pri preizkušancih z večjo vsebnostjo začetne vlage (24 %) deformacija prvi dan naraste, kar pa je verjetno posledica napake ali slabe homogenizacije zmesi, v naslednjih dneh pa se postopoma manjša, kar je ugodno. Zaradi težav med eksperimentom nimamo vrednosti pri 28 dnevnu meritve za preizkušanec z 18 % začetne vlage.



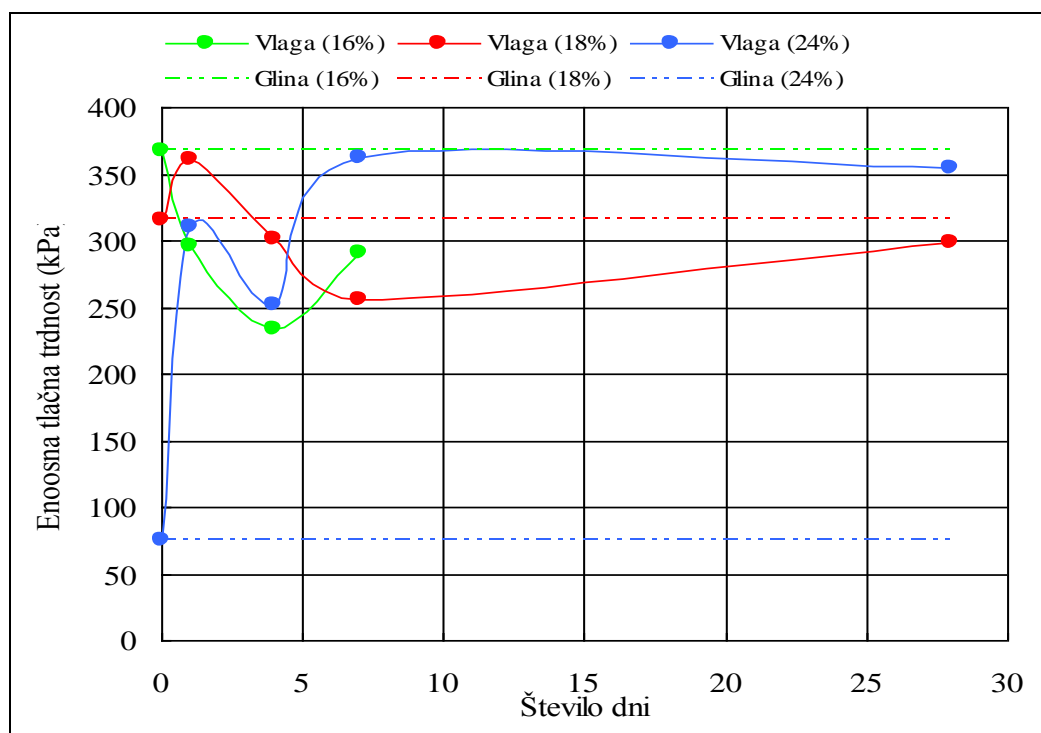
Slika 5.9: Spremljanje deformacije preizkušanca glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.

## 5.6 Spremljanje enoosne tlačne trdnosti v preizkušancih glede na njihovo začetno vsebnost vlage

V preizkušancih glina+apno se enoosna tlačna trdnost po vezanju spreminja glede na začetno vsebnost vlage (slika 5.10). Pri preizkušancih z nižjo začetno vlago (16 in 18 %) je zabeležena največja enoosna tlačna trdnost 7. dan meritev. S staranjem se tlačna trdnost zmanjšuje, bolj pri preizkušancih z manjšo začetno vsebnostjo vlage. Po 28 dneh je enoosna tlačna trdnost preizkušancev s 16 % začetno vlago nižja od trdnosti čiste, nestabilizirane zemljine. Pri preizkušancih z največjo začetno vsebnostjo vlage (24 %) pa enoosna tlačna trdnost zvezno narašča celoten čas staranja. V primerjavi z enoosno tlačno trdnostjo osnovne zemljine je izboljšanje pri teh preizkušancih večkratno.



Slika 5.10: Spremljanje enosne tlačne trdnosti preizkušanca glina+apno glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.



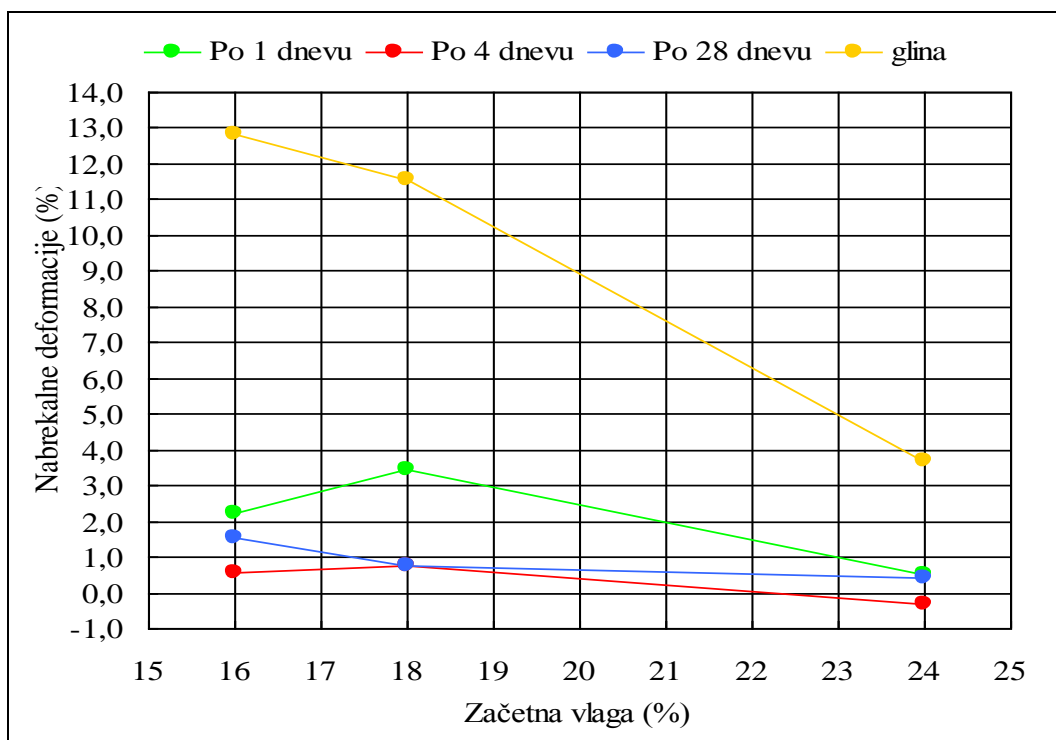
Slika 5.11: Spremljanje enosne tlačne trdnosti preizkušanca glina+apno+sadra glede na začetne vsebnosti vlage preizkušanca.

Slika 5.11 kaže, da se tudi v preizkušancih glina+apno+sadra trdnost najbolj povečuje pri preizkušancih s 24 % začetno vsebnostjo vlage. Največja trdnost je dosežena 7. dan, nakar se ne spreminja več. Celoten čas meritev se vrednosti trdnosti nahajajo visoko nad vrednostmi osnovne zemljine s 24 % začetne vlage. Pri preizkušancih z 18 % začetno vsebnostjo vlage je dosežena največja trdnost hitreje in sicer 1. dan, kjer tudi presega enoosno tlačno trdnost osnovne zemljine z enako vsebnostjo vlage. Sledi rahel padec in nato ponoven dvig trdnosti, vendar se do konca meritev vrednosti nahajajo pod vrednostmi osnovne zemljine. Pri preizkušancih z najmanjšo začetno vsebnostjo vlage (16 %), zaradi težav nimamo podatka za enoosno tlačno trdnost po 28. dneh. Vendar pa začetne vrednosti kažejo podoben trend kot pri preizkušancih z 18 % vsebnostjo vlage, le da se te ves čas nahajajo pod vrednostmi trdnosti, ki jih doseže osnovna zemljina (16 % vlage).

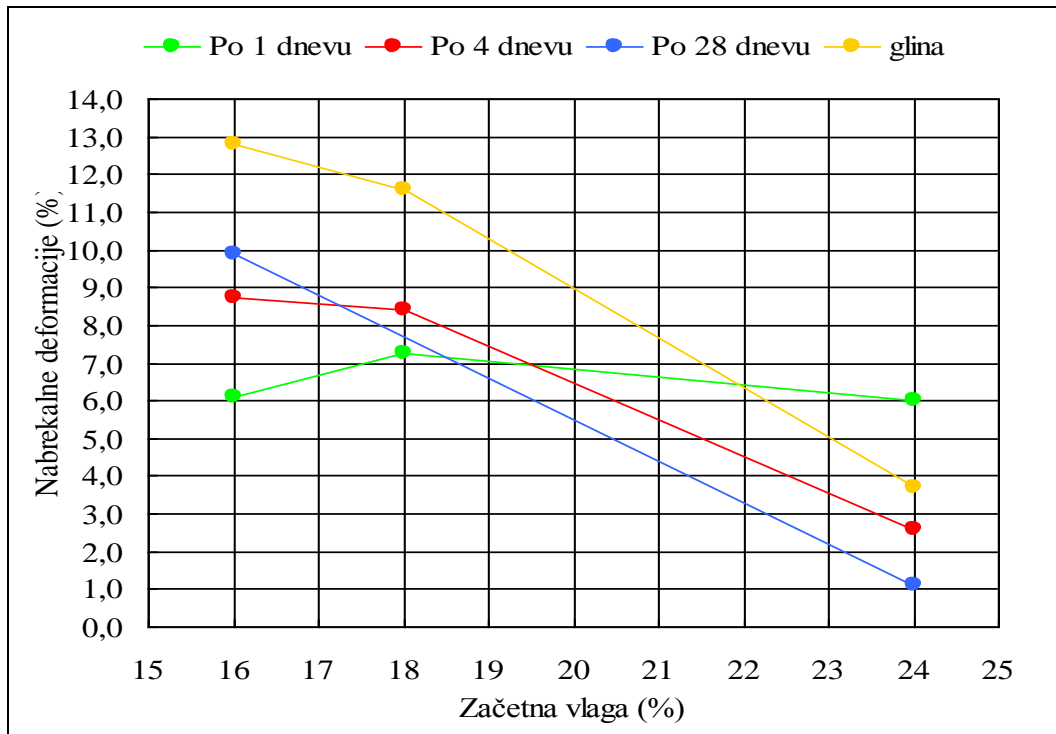
### **5.7 Razvoj deformacij preizkušancev glede na njihovo začetno vlago**

Na sliki 5.12 je prikazan razvoj nabrekalnih deformacij glede na začetno vsebnost vlage v preizkušancih. Najmanjše deformacije so zabeležene na preizkušancih z največjo začetno vlago. Z zmanjšanjem začetne vlage se povečuje nabrekljivost. Največje deformacije so zabeležene pri začetni vlagi 16 %, pri preizkušancih gline in preizkušancih glina+apno po 28 dneh. Prvi in četrti dan pa so zabeležene največje deformacije na preizkušancih glina+apno z 18 % začetno vlago.

Razvoj deformacij pri preizkušancih glina+apno+sadra (slika 5.13) je podoben kot pri preizkušancih glina+apno. Nabrekljivost se zmanjšuje s povečevanjem začetne vlage v preizkušancih in je najmanjša pri 24 % vlažnosti. Izjema so preizkušanci po prvem dnevu, kjer je volumska sprememba najvišja pri začetni vlagi 18 %, pri 16 in 24 % začetni vlagi pa sta skoraj enaki.



Slika 5.12: Razvoj deformacij preizkušanca glina+apno in preizkušanca gline glede na začetne vsebnosti vlage.

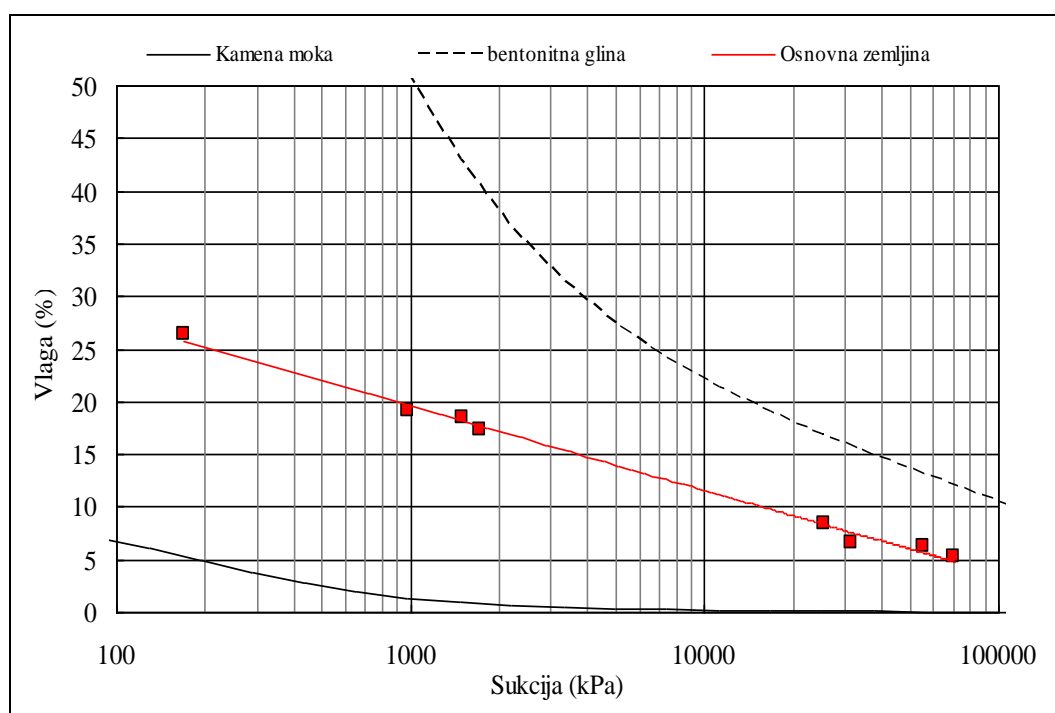


Slika 5.13: Razvoj deformacij preizkušanca glina+apno+sadra in preizkušanca gline glede na začetne vsebnosti vlage.

Iz obeh slik (5.12 in 5.13) lahko vidimo, kako pomembna je začetna vlaga pri načrtovanju modifikacije, oz. stabilizacije nabreklih glin. Ne glede na začetno vlago se nabrekalne deformacije glin po dodajanju apna znižajo za nekajkrat. Vemo, da je pri 24 % vlagi nestabilizirane glin njena tlačna trdnost le 80 kPa (slika 5.4), kar pomeni, da glina ni primerna za mehansko utrjevanje. Kljub temu pa je njen nabrekalni potencial še vedno visok in znaša 4 % (slika 5.12). Po dodatku apna pa se nabrekalne deformacije v zmesi ustalijo pri vrednostih pod 4 % in so pri ustrezno navlaženi glini praktično nične.

## 5.8 Retencijske krivulje in sukucija

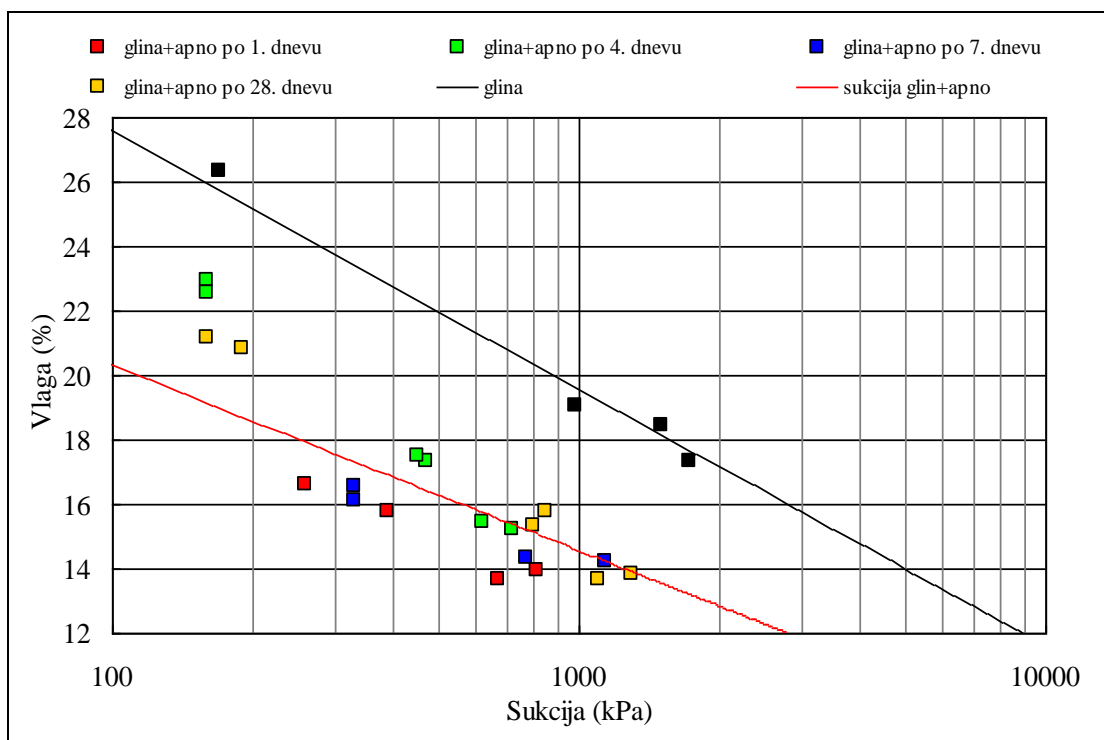
Retencijska krivulja osnovne zemljine (slika 5.14) se nahaja v območju med krivuljo značilno za inertno kameno moko in krivuljo bentonitne glin (Petkovšek, 2006).



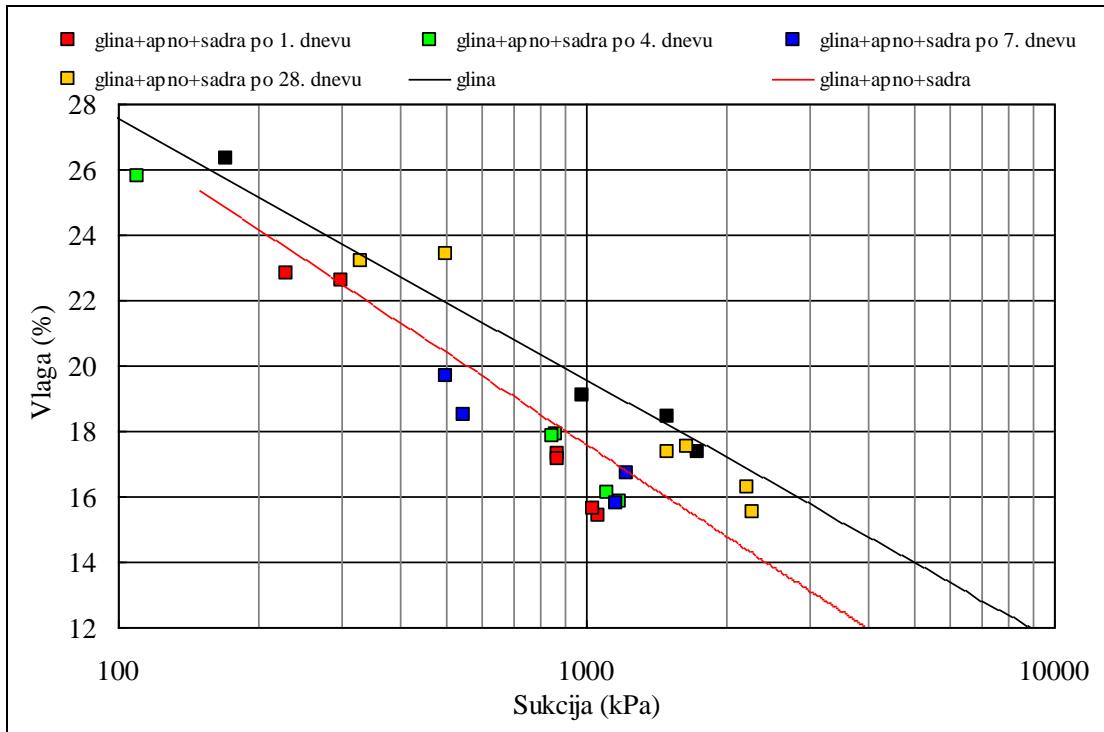
Slika 5.14: Retencijska krivulja osnovne glin.

Retencijska krivulja zmesi glin in apna (slika 5.15) je znatno nižja od retencijske krivulje čiste glin, kar dodatno dokazuje spremembo značaja zmesi.

Pri preizkušancih zmesi glin+apno+sadra (slika 5.16) je sprememba retencijske krivulje znatno manjša od spremembe, ki smo jo zabeležili na zmesi z apnom



Slika 5.15: Retencijska krivulja zmesi glina+apno v odvisnosti od časa vezanja.



Slika 5.16: Retencijska krivulja zmesi glina+apno+sadra v odvisnosti od časa vezanja.



## **6 RAZPRAVA IN SKLEPI**

### **6.1 Uvod**

Kakovost zemeljskih del v cestogradnji in trajnost cest je odvisna od dolgoročnega obnašanja zemljin v cestnem telesu. Posebno pozornost zaslužijo nabreklijive zemljine, oz. glin, predvsem zaradi njihove pestre sestave in nepredvidenega obnašanja v določenem okolju. Pri presoji uporabe takšnih zemljin pri gradnji cest je potrebno te predhodno primerno preiskati. Pri tem je potrebno upoštevati tri glavne vidike; vidik trdnosti, vidik volumske stabilnosti in vidik izvedljivosti. Vidik volumske stabilnosti se je v dosedanji praksi v Sloveniji podcenjeval.

Za zmanjšanje volumske nestabilnosti nabreklijivih zemljin se glineni zemljini običajno dodaja apno.

Če so v zemljini prisotni tudi sulfati, se le ti prioriteto vežejo z apnom in skupaj s silikatnimi minerali tvorijo nova minerala etringit in taumasit, ki izničita ugodne uplive apna na glineno zemljino.

S raziskavami, ki smo jih v tem diplomskem delu opravili, smo dobili boljši vpogled v procese, ki se odvijajo v stabiliziranih nabreklijivih zemljinah.

### **6.2 Vpliv dodatka veziv na maksimalno suho gostoto in optimalno vlago**

Rezultati kažejo, da se z dodajanjem apna oziroma apna+sadra, glini zmanjšuje maksimalna suha gostota ter povečuje optimalna vlaga.

Na ta način se izboljša vgradljivost stabilizacijske zmesi, ki jo lahko vgrajujemo tudi pri višjih vlagah.

### **6.3 Vpliv dodatka veziv na konsistenčne meje**

Rezultati kažejo, da po dodatku veziv meja plastičnosti naraste, meja židkosti pa upade. Zaradi vpliva obeh sprememb se spremeni tudi indeks plastičnosti. Stabilizirana zemljina se pomakne iz območja visokoplastične v območje nizko do srednje plastične zemljine (Preglednica 6.1).

Preglednica 6.1: Atterbergove meje plastičnosti preiskovanih zmesi.

Dnevi	Meja plastičnosti ( $w_p$ )				Meja židkosti ( $w_L$ )				Indeks plastičnosti ( $I_p$ )			
	1	4	7	28	1	4	7	28	1	4	7	28
Glina	18				53				35			
Glina+Apno	24	21	22	22	47	42	44	42	23	21	22	20
Glina+Apno+Sadra	28	25	26	26	50	47	48	39	22	22	22	13

Pri zmesi glina+apno po 7. dneh ni pri nobenem izmed parametrov opaziti večjih sprememb. Pri zmesi glina+apno+sadra ravno tako ni vidnih večjih sprememb pri parametru meja plastičnosti, medtem ko je pri meji židkosti viden nadaljni padec, ki se ne umiri.

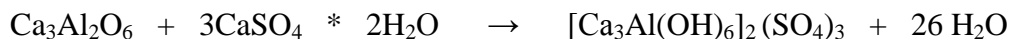
Analiza je pokazala, da so rezultati podobni kot v strokovni literaturi. Žmavc (1970) navaja, da se pri dodatku apna zemljini zviša meja plastičnosti in zniža meja židkosti. Tudi Rogers in Glendinning (1996) ugotavljata, da se zemljini z dodajanjem apna izrazito zviša meja plastičnosti, vendar pa ne ugotovita sprememb v meji židkosti, vendar jo dopuščata. Kakorkoli že, naše analize kažejo pomembne spremembe, ki nastopijo v zemljini po njeni stabilizaciji in modifikaciji.

#### 6.4 Vpliv veziv na spremembe vlage glede na izhodiščno vsebnost vlage

Analiza sprememb vlage glede na izhodiščne vlage je pokazala pri vsaki izmed zmesi povsem različna obnašanja. Pri zmesi glina+apno se vlaga po pričakovanjih prve 4 dni znižuje pri vseh treh začetnih vsebnostih vlage. Po tem dnevu se delež vlage v zmesi ni več spreminjal. Razlika med začetno vsebnostjo vlage in vlago po 4 dnevih je bila večja pri preizkušancih z nižjo začetno vsebnostjo. To je lahko posledica vezave apna, ki v nabrekli zemljini potrebuje za tvorbo vezi z minerali gline vodo (Smith, 1996).

Zmes glina+apno+sadra v analizi pokaže presenetljive rezultate. Pri vseh treh začetnih vlažnostih je prvi dan v preizkušancih opazen porast vlage. Ta pri deležu vlage 16 in 18 % poraste za 1,4 %, pri preizkušancih z največjo začetno vlažnostjo pa za 1,1 %. Po porastu

vlage v preizkušancih ta prične padati proti začetni vlažnosti preizkušancev. Razlog je možno iskati v tvorbi novega minerala etringit.



Ta se tvori v kemični reakciji med apnom, zemljino in sadro (Snadker, 1996). V delu reakcije lahko pride do kratkotrajne sprostitve vezane vode iz zmesi (porast vlage), ki se v nadaljevanju uporabi kot gradbeni element etringita (padec vlage).

Obstaja tudi bolj enostavna razlaga. Določanje vlage v zmesih s sadro je dokaj zahtevno, saj delež kristalne vode, vezane v sadri ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), lahko preide v polhidrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) že pri temperaturah sušenja pod  $40^\circ\text{C}$ . Možno je torej, da je dvig vlage, ki smo jo zabeležili po prvem dnevu, zgolj posledica napake v eksperimentu.

### **6.5 Vpliv veziv na nabrekanje preizkušancev, pri znani začetni vsebnosti vlage**

Nabrekljivost zmesi glina+apno se po dodatku veziv občutno zmanjša. Že prvi dan je opazno znižanje nabrekalnih deformacij glede na osnovni material. Izboljšanje volumske stabilnosti se nadaljuje in se pri vseh preizkušancih ustali pri 1 % nabrekalne deformacije po 28. dneh.

V zmesi glina+apno+sadra je prvi dan pri vseh treh preizkušancih z različno začetno vlažnostjo opazno izboljšanje, ki pa je za kar polovico manjše kot pri preizkušancih z enako vlažnostjo, vendar samo z dodatkom apna. V nadaljnjih dneh se pri preizkušancu z 18 in 16 % vlage stopnja nabrekanja povečuje. Pri preizkušancih z največjim odstotkom vlage (24 %) se nabrekalni potencial izboljšuje celoten čas analize. Razlog je lahko v tem, da v preizkušancih niso bili primerni pogoji, ki bi dovoljevali tvorbo minerala etringit, vendar za takšna sklepanja ni na voljo dovolj podatkov.

Preglednica 6.2: Deformacija v odvisnosti od preizkušanca in začetne vlažnosti.

Preizkušanec	Dnevi	Deformacija (%) glede na začetno vlago preizkušanca			Optimalna vlaga (%)
		16	18	24	
Glina	1, 4, 28	12,82	11,58	24,0	18,40
Glina+apno	1	2,23	3,46	3,69	19,62
	4	0,55	0,74	0,50	
	28	1,53	0,75	-0,34	
Glina+apno+sadra	1	6,12	7,26	0,41	21,05
	4	8,74	8,39	5,99	
	28	9,90	ni podatka	2,58	

### 6.6 Vpliv veziv na enoosno tlačno trdnost preizkušancev pri znani začetni vsebnosti vlage

Enoosna tlačna trdnost se vidno in znatno izboljšuje glede na osnovno zemljino le pri preizkušancu glina+apno z začetno vlago 24 %. Pri isti zmesi z nižjima vsebnostima vlage je povečanje manjše in v času po 7. dnevu pade. Rezultati so zanesljivo posledica premajhne vsebnosti začetne vlage v preizkušancih. Če izvajamo apneno stabilizacijo v presuhi zemljini, kalcijev kation ( $Ca^{2+}$ ) ne more do glinenega zrna, zato glina ostaja aktivna tudi po dodajanju apna. Apno reagira z zrakom in se karbonizira ter s tem izgubi tudi sposobnost naknadnega vezanja (Petkovšek, 2006).

V zmesi, kjer je bila poleg apna dodana tudi sadra, se pri nižjih dveh vsebnostih vlage (16 in 18 %) enoosno tlačna trdnost ne dvigne niti do trdnosti osnovne zemljine (gline). Boljše obnašanje ima preizkušanec z največjo vsebnostjo vlage (24 %), ki doseže največjo enoosno tlačno trdnost 7. dan. V nadaljevanju se ta ne izboljšuje več. Pri obeh preizkušancih (16 in 18 % začetna vlaga) s slabšo trdnostjo je razlog lahko v manjši vsebnosti vlage in posledični karbonizaciji apna.

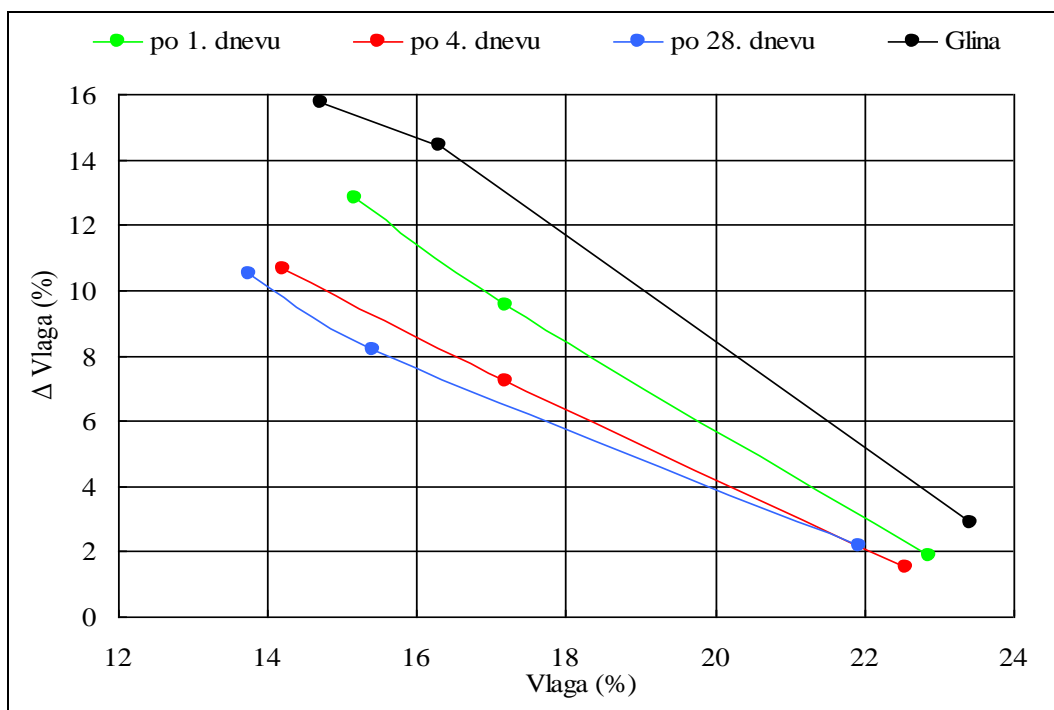
Preglednica 6.3: Enoosna tlačna trdnost preizkušancev in njim pripadajoča vlaga.

Preizkušanec	Dnevi:	16% začetna vlaga		18% začetna vlaga		24% začetna vlaga	
		Pripad. trdnost	Dejanska vlaga	Pripad. trdnost	Dejanska vlaga	Pripad. trdnost	Dejanska vlaga
Glina	1, 4, 7, 28	367,90	16,00	315,18	18,00	75,00	24,00
Glina+Apno	1	390,02	14,77	413,14	17,14	248,66	22,95
	4	387,26	16,36	286,81	17,99	375,81	23,83
	7	458,93	15,48	417,32	17,50	340,31	23,33
	28	223,90	14,63	368,10	16,49	468,07	22,48
Glina+Apno+Sadra	1	296,17	17,45	361,14	17,14	310,63	26,26
	4	233,77	18,70	301,12	19,04	251,79	26,27
	7	290,39	17,83	255,75	19,59	361,82	26,16
	28	0,00	12,41	299,12	13,88	354,10	20,43

### 6.7 Vpliv začetne vlage na nabrekljivost preizkušancev

Na splošno velja, da je nabrekanje prisotno pri nizkih vlagah, nato pa se z naraščanjem vlage v zemljini zmanjšuje in preneha. Razlika med nabrekljivimi in nenabrekljivimi glinami je le v tem, da prve nabrekajo tudi pri relativno visokih vlagah. Preiskovana glina je nabrekala še pri vlagah 24 %, to je pri vlagah, višjih od optimalne ( $w_{opt} + 5\%$ ). Iz raziskave sklepamo, da bi nabrekanje prenehalo šele pri vlagah okoli 26 %, in pripadajoči nedrenirani trdnosti  $< 25$  kPa, kar pomeni nevedljivo zemljino.

Z apnom stabilizirane zemljine so pri enakih vlagah znatno manj občutljive na nabrekanje. Kljub temu pa moramo biti pozorni na velik pomen začetne vlage. Iz diagrama na sliki 6.1 vidimo, kako je pri raziskavi nabrekanja naraščala vlaga zemljine. Vidimo, da je tudi pri z apnom stabilizirani zemljini izhodiščna vlaga ključna za zagotavljanje volumenske stabilnosti in konstantne trdnosti.



Slika 6.1: Naraščanje vlage zemljine tekom edometriške raziskave preizkušancev glina+apno.

## 6.8 Retencijske krivulje

Retencijska krivulja stabilizirane gline se nahaja pod retencijsko krivuljo osnovne zemljine. To kaže na to, da se z dodatkom apna glini odvzame velik del površinskega naboja. Učinek apna je znatno večji od učinka zmesi apna in sadre. Rezultati raziskave, prikazani na slikah 5.15 in 5.16 so obremenjeni z zmotno objektivno napako merjenja. Problem je v tem, da apno obviije posamezne grude gline, ki še lahko ostanejo aktivne. Ker je preizkušanec pri raziskavi sukcije zelo majhen, je vpliv nehomogenosti velik. Vendar pa ugotovljene napake merjenja ne spreminjajo generalne slike, ki dopolnjuje ugotovitve vseh ostalih raziskav.

## 6.9 Sklepi

Glavni namen dodajanja apna zemljini (glini) je izboljšanje njenih mehanskih lastnosti.

Z obsežno raziskavo smo ugotovili, da je pri izvajanju stabilizacije zelo pomembno, da je v zmesi prisotna zadostna količina vode. Ugotovili smo, da so trdnostne lastnosti ter volumska obstojnost najboljša v tistih primerih, ko je bila začetna vlaga višja od optimalne. Kadar v zemljini ni dovolj vlage, se procesi na površini glinenih zrn ne odvijajo v celoti, zato tudi dodatki veziva (apna) niso v celoti izkoriščeni.

Z opravljenimi raziskavami smo ugotovili, da je treba pri izdelavi receptur za uporabo apna pri izboljšanju ali stabiliziranju glin, nujno upoštevati tudi vidik volumske stabilnosti.

Glavni sklepi naših raziskav pa so naslednji:

- ⇒ Z dodatkom apna in sadre glineni zemljini se zmanjša indeks plastičnosti ( $I_p$ ) in meja židkosti ( $w_L$ ). Zemljina preide iz mastne (CH) v meljasto glino (CL).
- ⇒ Pri apneni stabilizaciji moramo vgraditi zmes apno+glina na mokri strani Proctorjeve krivulje, ker s tem zagotovimo boljše pogoje za potek kemične reakcije, kar vpliva na izboljšanje enosne tlačne trdnost in volumske stabilnosti.
- ⇒ Apno v glineni zemljini spremeni značaj zemljine in zmanjša njen nabrekalni potencial.
- ⇒ Apno izboljšuje vgradljivost gline, saj viša njeno optimalno vlago in niža indeks plastičnosti. Te reakcije so znane kot poboljšanje ali modifikacija. Pomembne so predvsem v prevlažnih zemljinah.
- ⇒ Prisotnost sadre v zemljini, kateri je dodano apno, lahko povzroči pri določeni vlažnosti v daljšem časovnem obdobju znatne nabrekalne deformacije zaradi tvorbe novega minerala etringita, vendar pa tega v moji nalogi nismo uspeli direktno dokazati.
- ⇒ Dodatek apna spremeni retencijsko krivuljo osnovne zemljine, s tem ko zmanjša električni naboj na površini zrn.
- ⇒ Prisotnost sadre v zmesi glina+apno močno zmanjša pozitiven učinek apna.

## 7 ZAKLJUČEK

Stabiliziranje koherentnih zemljin sodi med pomembne ukrepe, s katerimi skušamo racionalizirati gradnjo prometnic, hkrati pa zmanjšati obremenitve okolja z navažanjem kamnitih materialov iz stranskih odvezmov.

Pri tem pa moramo poznati temeljne reakcije, ki potekajo med zemljino in apnom. Ker te reakcije vselej potekajo v vodni raztopini, je vlaga zmesi ključni dejavnik pri njenem načrtovanju. Ta pomemben dejavnik pa je bil v preteklosti pogosto prezrt.

V tem diplomskem delu smo se dotaknili vprašanja obdelave materialov, oz. obnašanja nabreklijive zemljine, pri kateri je nabreklijivost posledica vsebnosti nabreklijivih mineralov glin. Ti skupaj z strukturo zemljine, preteklimi napetostnimi stanji in razpoložljivo vodo vplivajo na velikost deformacij. Tem zemljinam lahko z izboljšanjem ali stabilizacijo z apnom že med gradnjo odvezmemo del nabrekalnega potenciala in tako preprečimo, da bi se v dograjenih nasipih volumsko deformirale. Stabiliziranje tako ne pomeni le dodajanja veziva in izbranih frakcij drugih zrn ali sušenja lokalne zemljine, temveč tudi postopke drobljenja, vlaženja in začasnega negovanja izkopanih materialov na novem mestu, da se prilagodijo na nove pogoje pred pričetkom gradnje vozišča.

Strokovna literatura navaja, da je za stabiliziranje koherentnih nabreklijivih zemljin najbolj primerno vezivo apno, ki smo ga uporabili tudi mi. S pomočjo apna se zemljini poveča tehnološka obvladljivost, zmanjša se njena občutljivost na nabrekanje in krčenje, ter poveča njena tlačna trdnost. Analiza nabreklijive zemljine s 4 % dodatkom apna je potrdila že znane zakonitosti. Z nalogo smo pokazali, da je učinkovitost apna močno povezana z deležem vlage v zmesi.

Problem, ki se izpostavi ob uporabi apna v nabreklijivih zemljinah, pa je možna prisotnost sulfatov. Ti povzročajo znatne nabrekalne deformacije zaradi nastajanja škodljivih mineralov etringita in thaumasita. V zemljinah s področja Slovenije sta glavna nosilca sulfatov sadra in anhidrit. Tudi v naši analizi smo skušali preveriti vpliv sulfatov na z apnom stabilizirano zemljino. Kot dodatek smo uprabili kemično sadro in sicer 10 %. Končni vpliv sadre na različne lastnosti stabilizirane zemljine se je v določenih lastnostih bolj močno izrazil, v



drugih pa je bil skoraj neopazen. Vsi končni rezultati nakazujejo, da prisotnost sadre zmanjša ugoden vpliv apna na osnovno zemljino.

V sedanjih slovenskih tehničnih specifikacijah pomen vlage  $v$  z apnom stabiliziranih glinah ni posebej izpostavljen in poudarjen. Naša naloga kaže, da bi morali v zahteve tehničnih pogojev izrecno zapisati določilo, da morajo biti vlage zmesi pri izvajanu kemične stabilizacije vselej najmanj enake ali višje od optimalne vlage, v nobenem primeru pa ne smejo biti nižje.

Določilo, da mora biti vlaga pri vgrajevanju  $w = w_{opt} \pm 2 \%$  je pri obravnavi nabreklih zemljin preohlapno, saj smo dokazali, da gline lahko nabrekajo tudi pri vlagah, ki so 5 % nad optimalno.

## VIRI

Greaves H. M. 1996. An introduction to lime stabilisation. V: Lime stabilisation. London, Thomas Thelford: 5 – 10

Holt C. C., Freer-Hewish R. J. 1996. Lime treatment of capping layers under the current DoT specification for highway works. V: Lime stabilisation. London, Thomas Thelford: 51 – 57

Maček M. 2006. Sukcija zemljin. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tal: str. 51

Michell J.K .in Hooper D.R. 1961. Influence of Time Between Mixing and Compaction on Properties of a Lime-Stabilised Expansive Clay. Highway Research Board 304: 14 – 31

Petkovšek A. 2006. Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v severovzhodni Sloveniji. V: MEGRA 2006, Gornja Radgona, 5 april 2006. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, Združenje asfalterjev Slovenije, Društvo za ceste Maribor. DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 13-35

Petkovšek A. 2006. Vpliv zemljinske sukcije na deformacijske karakteristike zemljin. Doktorsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko ta: str. 1 - 44

Rogers C. D. F., Glendinning S. 1996. Modification of clay soils using lime. V: Lime stabilisation. Thomas Thelford, London 1996: 99 – 111

Sherwood. P. T. 1993. Soil stabilisation with cement and lime. V: Transport research laboratory state of the art review, HMSO, London

Smith J. H. 1996. Construction of lime or lime plus cement stabilised cohesive soils. V: Lime stabilisation. London, Thomas Thelford: 13 – 19

Snedker E. A. 1996. M40 – Lime stabilisation experiences. V: Lime stabilisaton. London, Thomas Thelford: 142 – 153

Stritar A. 1973. Pedologija. 1. izdaja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Agronomski oddelek: 115 str.

Šuklje L. 1967. Mehanika tal. Ljubljana, Univerza: 480 str.

Žarnič R. 2003. Lastnosti gradiv. 1. izdaja. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Žmavc J. 1970. Priročnik za stabiliziranje materialov. 1. izdaja. Ljubljana, Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij: 3 – 55

Design procedures for soil modification or stabilization. 2002.V: Materials and tests division. Indianapolis, oktober 2002. Indiana, Department of transportation Indiana. Geotechnical section: 3 – 12

### **Ostali viri**

Dallas N. L. 2000. Mixture design and testing protocol for lime stabilized soils. Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates: 3: 2 – 8

Jahanshahi. M. 2005 An improvement method for swell problem in sulfate soils that stabilized by lime. American Journal of applied Sciences. 7, 2: 1121 – 1128

Jurjavčič P. 2006. Stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 113

McNally G. H., 1998. Soil and rock construction materials. Stabilization and pavement renovation. 2. izdaja. Australija, University of New South Wales, Department of applied geology: str. 405

Paul F. K. 1984. Soil stabilization for pavements mobilization construction. V. Engineer manual, Washington, D. C., 9. april 1984. Department of the army. 1-1 – B-2

Petkovšek A., Gomes Correia A. 2002. Importance of complementing index tests with mechanical tests for granular materials assessment: A Case Study. V: Bearing capacity of roads, railways and airfields. Lisse, 2002: 1267-1278

Treatment of fill and capping materials using either lime or cement or both. 2000. Design manual for roads and bridges, A government department in Northern Ireland: 4, 6: 1 – 20

Avtocestni križ Slovenije

<http://www.motorevija.si/slike/zemljevid-avtoceste.gif> (5.11.2007)

Klasifikacija zemljina po ASSHTO

[http://en.wikipedia.org/wiki/AASHTO\\_Soil\\_Classification\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/AASHTO_Soil_Classification_System) (5.11.2007)

Koncentracija vodikovih ionov in pH v raztopinah

[http://www.student-info.net/ntf/fgg/baza-student/geol4/17409/datoteke/3\\_ph.pdf](http://www.student-info.net/ntf/fgg/baza-student/geol4/17409/datoteke/3_ph.pdf) (8.10.2007)

Geološka karta Slovenije

<http://www.mszs.si/slo/ministrstvo/publikacije/znanost/mzt/raziskovalec/2000-1-2/images/geolog.jpg> (8.12.2007)