

ODRAZ MINERALNE SESTAVE ZEMLJIN NA NJIHOVE GEOMEHANSKE LASTNOSTI

POVZETEK: Poznavanje mineralne sestave preiskovanih vzorcev lahko v veliki meri pripomore k pravilni interpretaciji in ne nazadnje preveri ugotovljenih geomehanskih lastnosti vezljivih zemljin. Vendar pa se le v posameznih, redkih primerih poleg geomehanskih vršijo tudi mineraloške analize, zato se določanje lastnosti zemljin v odvisnosti od lastnosti mineralov v sestavi, v praksi praviloma ne izvaja. Prav gotovo veliko oviro predstavlja zahtevnost določitve mineralne sestave najmanjših zrn (< 2 μm), ki pa so v zemljinah odločujoči za njihove lastnosti, še bolj problematična pa je njihova kvantitativna analiza. Težava je tudi v tem, da geomehanske lastnosti posameznih čistih mineralov niso povsem preiskane, še manj njihove zmesi. Znano je, da se lastnosti zemljin ne spreminjajo sorazmerno s količinami posameznih mineralov, pač pa že najmanjši dodatki posameznih lahko povzročijo bistvene spremembe. Zato so interpretacije odseva mineralne sestave zemljin na njihove geomehanske lastnosti bolj posamezni poizkusi kot ustaljena praksa. Tak poizkus je opisan v prispevku in obsega prikaz vpliva posameznih mineralov na plastičnost zemljin, vrednosti aktivnosti in volumske deformacije po preplavitvi.

REFLECTION OF MINERAL COMPOSITION OF SOILS TO THEIR GEOMECHANICS PROPERTIES

SUMMARY: Knowledge of the mineral composition of investigated samples may be useful for correct interpretation and verification of established geomechanics properties of cohesive soils. There are many reasons that determination of soil properties in dependence of mineral composition properties is made very rare. One of them is difficult determination of mineral composition of the smallest grains that are deciding factor for soils properties. Their quantitative analysis is even more problematic. Another problem is that the physical mechanical properties of pure clay minerals and their mixtures are not known completely and that the properties of soils do not change always in proportion to quantity of individual minerals. The influence of the clay minerals in soils to their consistency limits, activity and volume change after wetting is shown in the paper.

UVOD

V okviru geomehanskih raziskav sivice za potrebe gradnje HE Moste, so se vršile tudi mineraloške analize posameznih vzorcev zemljin. Znano je, da poznavanje mineralne sestave preiskovanih vzorcev lahko v veliki meri pripomore k pravilni interpretaciji in preveri ugotovljenih geomehanskih lastnosti vezljivih zemljin.

Iskanje povezave med mineralno sestavo in fizikalno mehanskimi lastnostmi zemljin se lahko izvede le, če so poznane tako geomehanske lastnosti čistih mineralov kot njihovih zmesi. Medtem ko so prve vsaj delno preiskane, o različnih mineralnih zmesih ni dosti znanega. To je tudi razlog, da smo v opisanem primeru ugotavljali le odraz kvalitativne in kvantitativne mineralne sestave vzorcev na njihove fizikalno mehanske lastnosti.

Geomehanske preiskave so bile izvedene v laboratoriju podjetja Geoinženiring d.o.o. Ljubljana, mineraloške analize pa na GZS v Ljubljani.

V prispevku so obravnavani vzorci zemljin, na katerih so bile, poleg mineralne sestave, določene vrednosti Atterbergovih konsistenčnih mej in zrnivosti ter preiskane volumske deformacije po preplavitvi.

REZULTATI GEOMEHANSKIH PREISKAV

Preiskovani vzorci pripadajo sivici z območja gradnje HE Moste. Njihove oznake in geomehanske lastnosti, obravnavane v prispevku, so podane na preglednici 1.

Preglednica 1. Seznam preiskanih vzorcev zemljin in njihove geomehanske lastnosti

Št. vzorca	Oznaka vrtine	Srednja globina	w	w _p	w _L	I _p	zrna < 2 μm	ΔV/V	A
		m	%	%	%	%	%	%	
1	PO-2	14,3	17,8	22,5	49,6	27,1	62,58	12,2	0,43
2	PO-1	12,9	18,8	23,2	45,0	21,8	48,02	11,8	0,45
3	PO-3	13,1	15,4	17,9	46,5	28,6	53,98	19,7	0,53
4	PO-4	30,5	9,4	20,4	41,4	21,0	38,70	20,1	0,54
5	PO-4	20,2	20,9	17,5	40,8	23,3	42,70	10,5	0,55
6	V-3	8,4	10,2	23,1	37,1	14,0	20,70	13,3	0,68
7	STR II-6	9,8	9,3	20,7	40,5	19,8	28,87	23,0	0,69
8	STR II-3	11,8	7,9	21,5	40,0	18,5	25,38	6,9	0,73
9	STR II-6	5,8	8,8	21,2	40,7	19,5	25,72	18,1	0,75
10	STR II-5	7,8	8,6	17,5	34,4	16,9	18,14	24,5	0,93
11	STR II-4	5,4	9,9	18,0	38,7	20,7	18,38	21,0	0,99
12	V-4	11,5	9,7	21,2	37,0	15,8	15,91	24,8	1,13
13	STR II-1	9,6	7,8	18,9	40,1	21,2	17,63	19,0	1,20

Preiskovani vzorci imajo naravno vlažnost, z izjemo vzorca št. 5, nižjo od meje plastičnosti, vrednosti se gibljejo med $w = 7,8\%$ in $20,9\%$. Njihova plastičnost, izražena kot indeks plastičnosti, se spreminja med $I_p = 14,0\%$ in $28,6\%$, največja zrna v zemljinah dosegajo velikost $400\ \mu\text{m}$, vsebnost glinaste frakcije pa se giblje med $15,9\%$ in $62,6\%$. Aktivnost zemljin je v razponu $A = 0,43$ do $1,20$. Merjene volumske deformacije po preplavitvi vzorcev so velikosti med $\Delta V/V = 10,5\%$ in $24,8\%$.

REZULTATI MINERALOŠKIH PREISKAV

Mineraloške analize so se vršile na vprašenih vzorcih, iz katerih je vidna sestava celotne zemljine, vendar v njej niso natančno razmejene vrste glinenih mineralov, pač pa le njihov odstotni delež. Slednji so bili določeni iz predhodno ustrezno obdelane glinene frakcije (zrna < $2\ \mu\text{m}$) na usmerjenih preparatih.

Določitev mineralne sestave na vprašenih vzorcih je pokazala, da se v vseh zemljinah pojavljajo kremen, kalcit, dolomit, muskovit, glinenci (plagioklazi, mikroklin) in pirit (slednji povsod razen v

vzorcih št. 11 in 13) ter kot predstavniki glinenih mineralov ilit, klorit in glineni minerali z zmesno strukturo tipa ilit/montmorilonit in klorit/montmorilonit. Anhidrit se pojavlja le v dveh vzorcih št. 7 in 9. Mineraloška analiza glinaste frakcije je pokazala prisotnost illita, klorita in zmesnih mineralov tipa ilit/montmorilonit in klorit/montmorilonit v vseh vzorcih, ter pojave Ca montmorilonita v vzorcih št. 1 do 5, 8 in 9. Zastopanost posameznih mineralov v zemljinah je za vprašene vzorce prikazana v absolutnih količinah, izraženih v odstotkih medtem, ko se vsebnost glinenih mineralov nanaša le na določeno zrnovitost v zemljini. Pri slednjih zato ni mogoče te vrednosti privzeti kot absolutne v celotni zemljini, podaja pa količinska razmerja med posameznimi minerali analizirane frakcije. Mineralna sestava celotnih analiziranih vzorcev je prikazana v preglednici 2, preglednica 3 pa podaja sestavo glinenih mineralov v frakciji zrn < 2 µm.

Preglednica 2. Mineralna sestava vprašenih vzorcev v odstotkih

Št.vz.	I/M+ Rx1	Klo+ Rx2	KLO	KRE	PLA	MIK	ROG	KAL	DOL	ANH	PIR
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	30	12	0	34	6	0	1	12	5	0	1
2	38	19	0	24	8	0	0	7	3	0	1
3	27	12	0	42	6	0	0	5	7	0	1
4	33	10	0	31	7	0	0	16	2	0	1
5	31	12	0	36	10	0	0	8	3	0	1
6	29	0	5	42	7	0	0	12	4	0	1
7	29	6	0	37	9	3	0	7	2	6	1
8	23	9	0	33	12	0	0	17	4	0	2
9	30	9	0	36	10	0	0	6	4	4	1
10	26	7	0	46	10	0	0	8	2	0	1
11	29	7	0	45	12	0	0	3	4	0	0
12	31	0	10	38	14	0	0	6	0	0	1
13	24	6	0	48	13	0	0	6	3	0	0

LEGENDA

I/M	ilit/muskovit	ROG	rogovača
Rx1	glineni mineral z zmesno strukturo (GMZS) tipa ilit/montmorilonit	MIK	mikroklin
Rx2	glineni mineral z zmesno strukturo (GMZS) tipa klorit/montmorilonit	KAL	kalcit
KLO	klorit	DOL	dolomit
KRE	kremen	ANH	anhidrit
PLA	plagioklazi	PIR	pirit

Preglednica 3. Mineralna sestava glinene frakcije na orientiranih vzorcih

Mineralna sestava glinene frakcije GMZS tipa ilit/montmorilonit s slojno ureditvijo R1 in R0										
Št.vz.		11 86% I	12 82% I	13 75-70% I	14 65% I	15 49% I	16 42% I	17 27% I	18 15-10% I	
	IL	∑ I1	∑ I2	∑ I3	∑ I4	∑ I5	∑ I6	∑ I7	∑ I8	Ca M
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	24	13	0	0	0	9	0	0	0	9
2	14	0	0	9	0	0	7	0	0	6
3	21	0	0	8	0	0	0	0	6	10
4	11	0	7	0	6	0	0	5	0	5
5	8	0	6	0	4	0	0	3	0	9
6	8	0	0	5	0	0	0	0	0	0
		11 84% I	12 78-75% I	13 65% I	14 60% I	15 55% I	16 35% I	17 27% I	18 23% I	
7	8	0	7	0	0	6	5	0	6	0
8	7	0	6	0	5	0	4	0	0	2
9	3	3	0	2	2	0	0	2	0	6
10	6	0	0	3	0	0	0	0	2	0
11	6	0	4	0	0	0	0	0	4	0
12	7	0	4	0	0	0	0	0	0	0
13	4	0	0	3	0	0	0	0	1	0

Mineralna sestava glinene frakcije GMZS tipa klorit/montmorilonit s slojno ureditvijo R1 in R0				
	KLO	KI 1 (70% KI)	KI 2 (63-61% KI)	KI 3 (58% KI)
1	5	3	2	0
2	10	0	1	0
3	5	2	1	0
4	2	1	1	0
5	8	0	3	2
6	5	0	0	0
	KLO	KI 1 (82% KI)	KI 2 (70-68% KI)	KI 3 (62% KI)
7	2	0	1	1
8	1	0	0	1
9	5	0	3	0
10	3	3	0	1
11	2	1	1	0
12	5	0	0	0
13	4	3	0	3

ODRAZ MINERALNE SESTAVE ZEMLJIN NA GEOMEHANSKE LASTNOSTI

Atterbergove konsistenčne meje

Znano je, da je plastičnost zemljin odvisna od kapilarnih sil, oblike zrn in predvsem adsorpcijske sposobnosti prisotnih mineralov. Slednjo lastnost imajo le glineni minerali v zemljinah kar pomeni, da prisotnost kremenca, karbonatov, muskovita, glincev, pirita in anhidrita v preiskanih zemljinah ne vpliva na vrednosti konsistenčnih meja po Atterbergu. Določajo jih ilit, Ca montmorilonit, klorit ter glineni minerali z zmesno strukturo.

Pri interpretaciji odvisnosti konsistenčnih mej od mineralne sestave, je potrebno poznati te lastnosti za posamezne čiste minerale in tudi njihove zmesi. Medtem ko podatki za prve obstajajo vsaj v majhnem obsegu, je proučevanje plastičnosti zemljin za različne mineralne zmesi zelo skromno. V preglednici 4 so tako podane vrednosti konsistenčnih mej in indeksov plastičnosti predvsem za čiste glinene minerale ter zmesi Ca montmorilonita z ilitom. Prikazane vrednosti so povzete po White-u^(W), 1955 in Grim-u^(G), 1950.

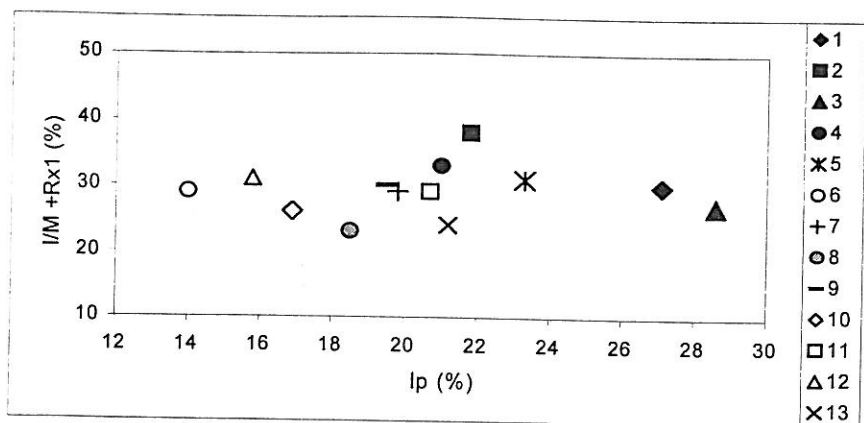
Preglednica 4. Vrednosti konsistenčnih mej po Atterbergu

Mineral	w _p (%)	w _L (%)	I _p (%)
ilit	25 ^(G) , 36 ^(W)	36 ^(G) , 69 ^(W)	11 ^(G) , 33 ^(W)
Ca montmorilonit	63 ^(W)	177 ^(W)	114 ^(W)
Klorit	merjene vrednosti ne obstajajo, na osnovi kristalne zgradbe je pričakovati nekoliko nižje vrednosti od ilita		
GMZS- ilit / 5 % montmorilonit	42 ^(W)	100 ^(W)	58 ^(W)
GMZS- montmorilonit / 25 % ilit	79 ^(W)	123 ^(W)	44 ^(W)

Glineni minerali so prisotni v vseh analiziranih zemljinah v le nekoliko različnih medsebojnih količinskih razmerjih. V celotnih vzorcih je delež glinenih mineralov 30 % do 57 %, delež tistih, ki pretežno določajo vrednosti konsistenčnih mej pa 24 % do 38 % (preglednica 2). Kot slednji veljajo predvsem ilit, montmorilonit in njune zmesi (Rx1). Klorit je manj plastičen, prisotnost montmorilonita v zmesi s kloritom (Rx2) pa je minimalna tako, da delež teh zrn, ki so sicer manjša od 0,002 mm, ne vpliva na rezultate preiskav plastičnosti.

Vpliv posameznih mineralov na vrednosti Atterbergovih mej je viden v primeru prikaza vrednosti indeksov plastičnosti v odvisnosti od deleža plastičnih mineralov glinene frakcije zemljine. Slika 1, na kateri je podan ta odnos, jasno kaže naraščanje indeksa plastičnosti pri zemljinah, ki vsebujejo samostojen Ca montmorilonit (vzorci 1-5, 8, 9) in sicer v sorazmerju z njegovo količinsko zastopanostjo. Tudi pri preostalih vzorcih, ki vsebujejo montmorilonit le v zmesi z ilitom, velja približno

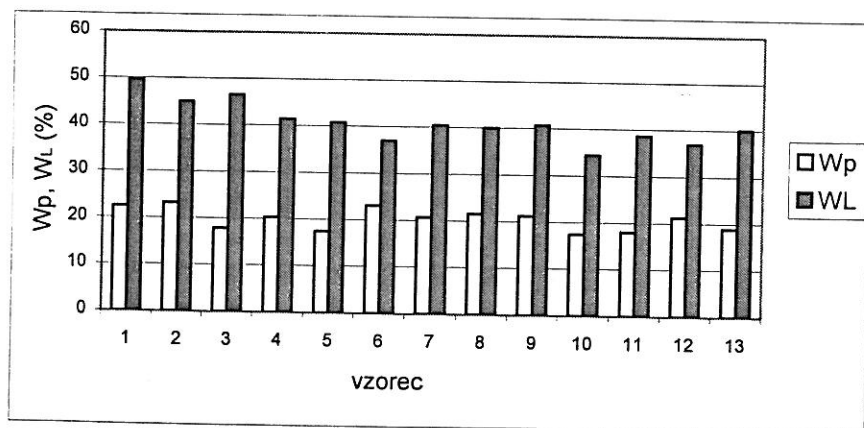
enak odnos. Tako izkazujeta najnižjo plastičnost zemljini (vzorec 6 in 12) s približno 1 % montmorilonita v mineralih zmesne strukture.



Slika 1. Razmerje med indeksom plastičnosti in količino glinenih zrn

Iz navedenega je razvidno, da vrednosti konsistenčnih mej preiskanih vzorcev primarno pogojuje Ca montmorilonit v odvisnosti od količine in oblike nastopanja, manj pomembna je v tem primeru tako skupna količina glinenih mineralov kot količina zrn $< 2 \mu\text{m}$. Že zelo majhen delež tega minerala opazno spremeni vrednosti konsistenčnih mej, zanimivo pa je, da s povečanjem njegove količine, indeks plastičnosti ne raste sorazmerno, pač pa počasneje.

Na prisotnost Ca montmorilonita v vzorcih pa ne kažejo samo slednje ugotovitve, pač pa tudi razmerja med mejami židkosti in plastičnosti posameznih vzorcev. Iz slike 2 je razvidno, da se meje plastičnosti za vse preiskane zemljine gibljejo v ozkem območju med vrednostmi $w_p = 17,5 \%$ in $23,2 \%$ medtem, ko se kažejo pri mejah židkosti veliko večje razlike ($w_L = 34,4 \%$ in $49,6 \%$). Na tak način se pri posameznih vzorcih indeksi plastičnosti povečajo predvsem zaradi zvišanja vrednosti mej židkosti, kar pa je značilno prav za montmorilonite. V primeru preiskanih zemljin je ta pojav jasno izražen pri vzorcih št. 1-5, v katerih nastopa samostojen Ca montmorilonit.



Slika 2. Razmerje med w_L in w_p vzorcev

Aktivnost zemljin

Aktivnosti preiskanih vzorcev se gibljejo med vrednostmi $A = 0,43$ in $A = 1,2$ (preglednica 1). Po Skemptonu se te zemljine uvrščajo med neaktivne in normalne.

Zanimivo je, da se najnižje vrednosti aktivnosti kažejo pri zemljinah z višjimi vrednostmi indeksov plastičnosti in višje pri tistih z nižjimi vrednostmi indeksov plastičnosti. Tako velike razlike so posledica predvsem razlik v količini zrn $< 2 \mu\text{m}$ in ne razlik pri vrednostih indeksov plastičnosti. Slednji se namreč tudi v zemljinah z manj glinaste frakcije, zaradi prisotnosti Ca montmorilonita povečajo. Pri tem je potrebno upoštevati dejstvo, da zelo malo Ca-montmorilonita že opazno poveča indeks plastičnosti (predvsem w_L) medtem, ko pri večjih količinah tega minerala, plastičnost narašča počasneje. To je tudi razlog, da med vrednostmi indeksov plastičnosti in odstotki zrn $< 2 \mu\text{m}$ v posameznih vzorcih ni sorazmerja.

Opisan pojav je razlog, da se kot neaktivne pojavljajo zemljine, ki so glede na mineralno sestavo bolj problematične (vzorci 1-5 in 9) kot tiste z večjimi vrednostmi aktivnosti, zato v tem primeru ta parameter ne označuje dejanskih lastnosti zemljin.

Nabrekanje zemljin

Velikost nabrekanja drobno zrnatih zemljin, ki se pojavi kot posledica razbremenitve ali dodatka vode, je odvisna od sestave zemljin in vplivov okolja. Sestava vključuje vrsto in količino posameznih mineralov in adsorbiranih kationov, obliko, velikost ter razporeditev posameznih zrn ter kemično sestavo porne vode. Okolje določa količino vlage v zemljinah, gostoto, strukturo, mejne pritiske, temperaturo in količino razpoložljive vode.

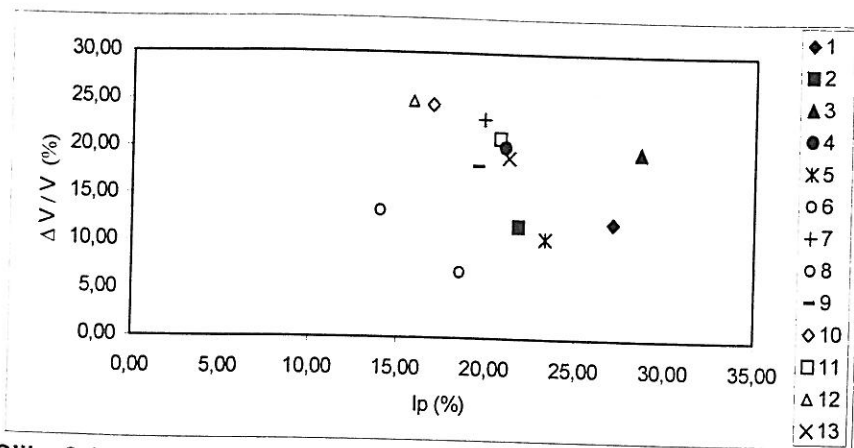
Nabrekanje kot posledica dodatka vode je pri glinah odvisno predvsem od vrste mineralov. Znano je, da se pri mineralih montmorilonitne skupine spremembe volumna pojavijo zaradi vrivanja vode med pakete, ki so zaradi izomorfnega nadomeščanja silicijevega in aluminijevega kationa v tetraedrskih in oktaederskih plasteh rahlo negativno nabiti. Pri tem se paketi med seboj oddaljijo, kristalna mreža se raztegne. Sposobnost nabrekanja je pri montmorilonitih odvisna predvsem od vrste izmenjalnih kationov, ki se prav tako namestijo v medpaketni prostor in bolj ali manj trdno povezujejo pakete med seboj. Sposobnost nabrekanja pada z naraščanjem valentnosti izmenjalnega kationa. Opisan pojav ni značilen za glinene minerale ilitne, kaolinitne in kloritne skupine, kjer so paketi trdneje povezani med seboj. Za vse glinene delce pa velja, da so nekoliko negativno nabiti, zato lahko adsorbirajo tekočine, ki imajo sposobnost polarizacije. Tako sposobnost ima voda. Okoli glinenih delcev se tako orientirano razvrstijo molekule vode. Debelina vodnega filma je odvisna od vrste glinenih mineralov, skupna količina adsorbirane vode v zemljini pa od deleža glinenih mineralov, velikosti zrn in njihove specifične površine.

Volumske deformacije preiskovanih vzorcev po nasičenju z vodo, so bile merjene v edometrih pri minimalnih osnih napetostih (2,4 – 4,0 kPa). Rezultati, izraženi kot količniki med spremembami volumnov po nasičenju z vodo in volumni vzorcev ob začetku preiskav, so pokazali vrednosti med $\Delta V/V = 10,5 \%$ in $24,8 \%$.

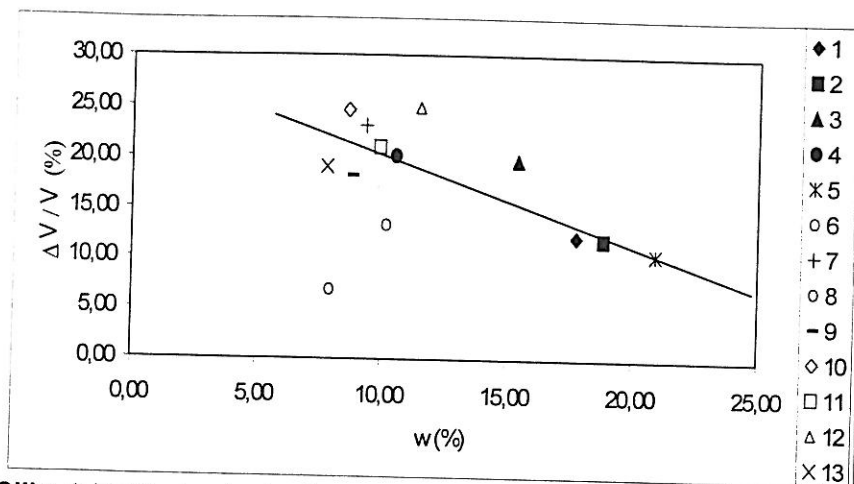
Glede na mineralno sestavo vzorcev bi pričakovali, da bo nabrekanje največje pri tistih vzorcih, ki vsebujejo povečane količine Ca montmorilonita in večji delež glinenih zrn, kar se odraža v višjem indeksu plastičnosti. Vendar primerjava slednjega z volumskimi deformacijami ne pokaže nobene logične odvisnosti kar pomeni, da vrsta in količina različnih glinenih mineralov v tem primeru ni odločujoča za velikost nabrekanja (slika 3).

Večja odvisnost se pokaže pri primerjanju deformacij in relativne vlažnosti zemljin. V tem primeru je nabrekanje praviloma večje pri vzorcih z manjšo začetno količino vode. Vendar je iz slike 4 razvidno, da je ta odvisnost le približna in pri vzorcih z oznakami 6 in 8 ter 3 in 12 nikakor ne velja.

Iz podanih ugotovitev je torej vidno, da vrsta in količina glinenih mineralov, ki se odražajo v indeksu plastičnosti, v tem primeru ne pogojujejo velikosti nabrekanja, prav tako pa tudi količina začetne vlage kaže to odvisnost le približno. Razlog je potrebno ponovno iskati v mineralni sestavi, tokrat med neglinenimi minerali. Slednji sicer nimajo adsorpcijske sposobnosti, lahko pa spremenijo količino adsorbirane vode v zemljini s tem, da nastopajo kot vezivo med glinenimi delci. Na tak način zmanjšajo specifično površino zrn, ki je odločilna pri količini adsorbirane vode. Iz preglednice 2 je razvidno, da se pri posameznih vzorcih (npr. št. 6 in 8), ki izrazito odstopajo od linearnega razmerja med začetno vlago in velikostjo nabrekanja (slika 4), pojavlja povečana količina karbonatnih mineralov (kalcič, dolomit) in prav ti najverjetneje tvorijo omenjeno cementacijo zrn.

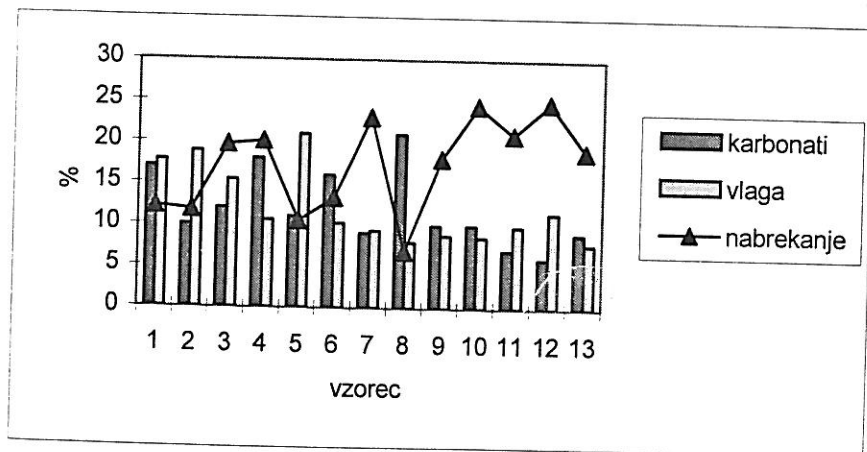


Slika 3: Velikost nabrekanja v odvisnosti od indeksa plastičnosti zemljin



Slika 4: Velikost nabrekanja v odvisnosti od začetne vlage zemljin

V primeru prikaza velikosti nabrekanja v odvisnosti od količine začetne vlage in dodatno količine karbonatov, postanejo dobljeni rezultati veliko bolj logični, iz njih pa je mogoče sklepati tudi na ponašanje ostalih zemljin, na katerih volumske deformacije niso bile merjene. Odvisnost omenjenih parametrov prikazuje slika 5.



Slika 5: Velikost deformacij v razmerju s količino začetne vlage in deležem karbonatov v vzorcih

ZAKLJUČEK

Znano je, da so geomehanske lastnosti zemljin primarno odvisne od mineralne sestave v povezavi z vplivi, ki jih pogojuje okolje. Zaradi tega se pri gradnji vseh zahtevnejših objektov priporočajo tudi mineraloške preiskave zemljin. Vendar samo rezultati teh preiskav ne povedo veliko, če ne poznamo lastnosti posameznih mineralov, možnih oblik nastopanja in predvsem njihovega medsebojnega vpliva. Zaradi zelo skopih raziskav, ki so se vršile na tem področju in še manj praktično obdelanih primerov, je povezovanje omenjenih podatkov zelo težavno.

V primeru preiskanih zemljin, je pri hitrem pregledu rezultatov mineraloških in geomehanskih preiskav, težko zaslediti logično odvisnost. Sestavi zemljin še najbolj sledijo podatki konsistenčnih mej, v katerih se odraža tako odstotek glinaste frakcije kot vrste in količine vsebujočih mineralov. Pri primerjanju vrednosti aktivnosti zemljin in mineralne sestave se pojavijo rezultati, ki niso skladni s pričakovanimi. Kot bolj aktivne se kažejo zemljine z manjšo količino visoko plastičnih mineralov. Razlog je v tem, da že zelo majhne količine Ca montmorilonita zelo povečajo vrednosti indeksov plastičnosti, medtem ko to razmerje pri večjih količinah ne velja.

V primeru ocene možnosti nabrekanja, izdelani na osnovi mineraloških analiz, bi bili pozorni na zemljine z večjo količino Ca montmorilonita in zrn $< 2 \mu\text{m}$, vendar pa rezultati meritev kažejo nasprotno. V tem primeru sta odločujoča količina karbonatnih mineralov in začetna količina vode v zemljinah.

Podane ugotovitve kažejo, da je pri interpretaciji rezultatov geomehanskih raziskav, poleg ostalih dejavnikov zelo pomembno tudi poznavanje mineralne sestave. V številnih primerih je mogoče le na tak način razumeti in celovito oceniti merjene geomehanske lastnosti.

LITERATURA

- Brown, G. (1972). The X ray identification and crystal structures of clay minerals. Jarrold and Sons, 544 p., London
- Grim, R. E. (1962). Applied clay mineralogy. Mineralogical Society, Spottiswode Ballantine Ltd., 495 p., London
- Kezdi, A. (1980). Soil testing, Vol.2, Elsevier Scientific Publ. Comp., 258 p., Budapest
- Lambe, T. W., Martin, R. T. (1955). Composition and engineering properties of soils, (III), Proc. U.S. Highway Research Board, 34, 576-590, New York
- Mielenz, R. C., King, M. E. (1955). Physical – chemical properties and engineering performance of clays. Calif. Div. Mines Bull. 169, 196 – 254, Los Angeles
- Mitchell, J. K. (1992). Fundamentals of soil behaviour. John Wiley and Sons, 437 p., New York
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, 549 p., New York
- White, W.A. (1949). Atterberg plastic limits of clay minerals. Am. Mineralogist, 34, 508-512, New York