

# Međulaboratorijsko usporedbeno ispitivanje indeksnih pokazatelja bentonitnih glina

---

**Demoli, Dino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:212160>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

**MEDULABORATORIJSKO USPOREDBENO ISPITIVANJE INDEKSNIH  
POKAZATELJA BENTONITNIH GLINA**

Diplomski rad

Dino Demoli

R 146

Zagreb, 2017.

ME ULABORATORIJSKO USPOREDBENO ISPITIVANJE INDEKSNIH  
POKAZATELJA BENTONITNIH GLINA

DINO DEMOLI

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sadržaj

U ovom radu opisana je provedba me ulaboratorijska ispitivanja te su usporedno prikazani rezultati ispitivanja indeksnih pokazatelja na uzorcima bentonitne gline sukladno zahtjevima norma u akreditiranom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb d.d. i laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu. Rezultati ispitivanja dobivena u ova dva laboratorija međusobno su uspoređeni te analizirani i uspoređeni s preporučenim vrijednostima glinene komponente za ugradnju u glinene geosintetičke barijere. Ispitivanja su provedena na tri vrste bentonitne gline. Dvije bentonitne gline su bile u formi granula dok je jedna bila u formi praha. Rezultati međulaboratorijskih ispitivanja pokazali su veliku bliskost dobivenih rezultata međulaboratorijske poređbe, dok uspoređuju i rezultate s preporučenim vrijednostima glinene komponente za ugradnju u glinene geosintetičke barijere ne-to ispod ili na granici danih vrijednosti.

ključne riječi: me ulaboratorijska ispitivanja, indeksni pokazatelji, bentonitna glina, glinene geosintetičke barijere

Diplomski rad sadrži: 41 stranica, 21 slika, 10 tablica, 15 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Voditelj: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Pomoć pri izradi: Dr. Sc. Helena Vučković, asistentica

Ocjenjivači: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof. RGNF  
Dr. sc. Felimir Veinović, docent RGNF

Datum obrane: 17. veljače 2017.

INTERLABORATORY COMPARATIVE TESTS OF INDEX INDICATORS FOR  
BENTONITE CLAY

DINO DEMOLI

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Institute of Mining and Geotechnical  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

This paper contains description of the interlaboratory research and the index properties test results of bentonite clay samples gathered in accordance with the requirements of the accredited laboratory of Geokon-Zagreb d.d., and the laboratory of the Faculty of Mining, Geology, and Petroleum Engineering in Zagreb. The results of the research accumulated by the two laboratories mentioned above have been compared, analyzed, and then related to the recommended values for the mineral component of clay geosynthetic barriers. Tests were conducted on three types of bentonite clay. Two types of bentonite clay were in granular form and one was in the powdered form. Test results obtained by two laboratories show a strong closeness between the results of the interlaboratory comparison. However, comparing the results with the recommended values of the clay geosynthetic barriers are somewhat under the limit or at the given value.

Keywords: interlaboratory comparison, index properties, bentonite clay, Clay Geosynthetic Barrier

Thesis contains: 41 pages, 21 figures, 10 tables, 15 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Libery of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Supervisor: PhD Dubravko Domitrovi , Assistant Professor  
Technical support and assistance: PhD. Helena Vu enovi , Assistant

Reviewers: PhD Dubravko Domitrovi , Assistant Professor  
PhD Biljana Kova evi Zeli , Associate Professor  
PhD fielimir Veinovi . Assistant Professor

Date of defense: February 17, 2017.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS KORI <sup>TM</sup> TENIH OZNAKA I SI JEDINICE .....	IV
1 UVOD .....	1
2 ME ULABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	3
3 BENTONITNA GLINA.....	6
3.1. Op enito o bentonitnim glinama .....	6
3.2 Geosinteti ke glinene barijere (GCL).....	8
4. Fizikalna svojstva bentonitne gline.....	11
4.1 Granulometrijski sastav tla.....	11
4.2 Gusto a vrstih estica.....	15
5 INDEKSNI POKAZATELJI BENTONITNE GLINE .....	17
5.1. Granice plasti nosti .....	17
5.3 Indeks slobodnog bubrenja .....	24
5.4 Indeks gubitka fluida .....	27
6 ANALIZA REZULTATA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA .....	30
6.1. Fizikalna svojstva .....	30
6.2 Analiza indeksnih pokazatelja.....	31
7 ZAKLJU AK.....	38
8 LITERATURA .....	40

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Grafički prikaz preciznosti i odstupanja mjerenja .....	4
Slika 3-1. Troslojna građa smektita (Domitrovi 2012) .....	6
Slika 3-2 Primjer ugradnje GCL-a u pokrovni zaštitni sustav odlagališta otpada (Von Maubeuge 2002) .....	8
Slika 3-3 Načini spajanja GCL-a (Domitrovi 2012) .....	9
Slika 4-1 Ispitni uzorci .....	11
Slika 4-2 Granulometrijska krivulja za uzorak 16-002-001 .....	12
Slika 4-3 Granulometrijska krivulja za uzorak 16-003-001 .....	13
Slika 4-4 Granulometrijska krivulja za uzorak 13-001-025 .....	14
Slika 4-5 Pješčana kupelj za provođenje ispitivanja .....	15
Slika 5-1 Casagrandeov uređaj .....	18
Slika 5-2 Mjerenje sposobnosti upijanja u laboratoriju RGN fakulteta .....	20
Slika 5-3 Mjerenje sposobnosti upijanja u laboratoriju Geokon-Zagreb .....	21
Slika 5-4 Indeks slobodnog bubrenja .....	24
Slika 5-5 Uređaj za ispitivanje gubitka fluida (Geomehanički laboratorij RGNF) .....	28
Slika 5-6 Uređaj za ispitivanje gubitka fluida (Geomehanički laboratorij Geokon-Zagreb) .....	28
Slika 6-1 Prikaz rezultata Atterbergovih granica na dijagramu plastičnosti .....	32
Slika 6-2 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 16-002-001 .....	33
Slika 6-3 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 16-003-001 .....	34
Slika 6-4 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 13-001-025 .....	34
Slika 6-5 Rezultati sposobnosti bubrenja .....	36
Slika 6-6 Indeks gubitka fluida .....	37

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Plan provedbe ispitivanja.....	5
Tablica 3-1 Preporu ene vrijednosti bentonitne komponente .....	7
Tablica 4-1 Rezultati sisanja za uzorak 16-002-001 .....	12
Tablica 4-2 Rezultati sisanja za uzorak 16-003-001 .....	13
Tablica 4-3 Rezultati sisanja za uzorak 13-001-025 .....	14
Tablica 4-4 Rezultati ispitivanja gusto e vrstih estica .....	16
Tablica 5-1 Rezultati ispitivanja granica plasti nosti .....	19
Tablica 5-2 Sposobnost upijanja vode (Geomehani ki laboratorij RGNF) .....	22
Tablica 5-4 Rezultati ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja (Geomehani ki laboratorij RGNF).....	25
Tablica 5-5 Rezultati ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja (Geomehani ki laboratorij Geokon-Zagreb).....	26

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICE

Oznaka	Jedinica	Opis
$k$	m/s	- hidrauli ka propusnot
$c_u$	-	- koeficijent zakrivljenosti
$c_e$	-	- koeficijent jednoli nosti
$w_p$	%	- granica plasti nosti
$w_l$	%	- granica te enja
$I_p$	-	- indeks plasti nosti
$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	- gusto a vrstih estica
$m_s$	g	- masa suhog uzorka
$m_{pw,t}$	g	- masa piknometra s vodom



# 1 UVOD

Niska cijena, jednostavna i brzina ugradnje, vrlo niska hidrauli na provodljivost samo su neki od razloga sve veće uporabe glinenih geosintetičkih barijera (eng. Clay Geosynthetic Barriers, skraćeno GBR-C ili Geosynthetic Clay Liner, skraćeno GCL) u raznim područjima graditeljstva i zaštite okoliša odnosno gdje postoji potreba za brtvenim sustavima. Ova umjetno proizvedena hidrauli na barijera sastoji se od sloja bentonitne gline koja se uglavnom nalazi između dva sloja geotekstila. U većini slučajeva geotekstil je nosiva komponenta, dok je bentonitna glina brtvena, nepropusna barijera.

Glavni mehanizam koji osigurava nisku hidrauli nu provodljivost bentonitne gline je svojstvo bubrenja. Bentonitne gline spadaju u skupinu bubrežnih tala, gdje su glavni sastojci minerali glina smektitne skupine pri čemu se dominantno pojavljuje mineral montmorillonit.

Kako je riječ o proizvodu koji ima ulogu kontrole procjevanja tekućina i plinova u sklopu različitih objekata neophodno je dobro poznavati njegova svojstva te je potrebno provoditi detaljne analize kako cjelovitog proizvoda tako i brtvene komponente zasebno. Primjerice, procjedne tekućine iz odlagališta otpada su vrlo toksične i po okolišu često iznimno opasne. Obzirom na mjesto primjene, glinena geosintetička komponenta mora zadovoljiti unaprijed propisane kriterije za ugradnju. Osiguranje kvalitete glinene geosintetičke barijere provodi se propisanim laboratorijskim postupcima. Kontrola kvalitete provodi se tijekom same proizvodnje (MQC ó Manufacturing Quality Control) sukladno zahtjevima norme ASTM D 5889 kao i tijekom ugradnje (CQA ó Construction Quality Control) sukladno zahtjevima norme ASTM D 6495. Navedeni sustav propisuje vrste ispitivanja i njihov minimalni broj u odnosu na količinu proizvoda. Ovisno o vrsti objekta, mjestu ugradnje, vrsti glinene geosintetičke barijere planirani sustav nadzora i kontrole kvalitete može biti zasebno definiran.

U radu su prikazani rezultati ispitivanja metoda koje se ujedno koriste prilikom kontrole kvalitete GCL-a. Ispitivanja su provedena paralelno u Geomehaničkom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb i Geomehaničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. Rezultati ispitivanja dobivena u ova dva laboratorija međusobno su uspoređeni te analizirani i uspoređeni s rezultatima drugih studija.

Ispitivanja su provedena na tri vrste bentonitne gline. Dvije bentonitne gline su bile u formi granula dok je jedna bila u formi praha.

## 2 MEĐULABORATORIJSKA ISPITIVANJA

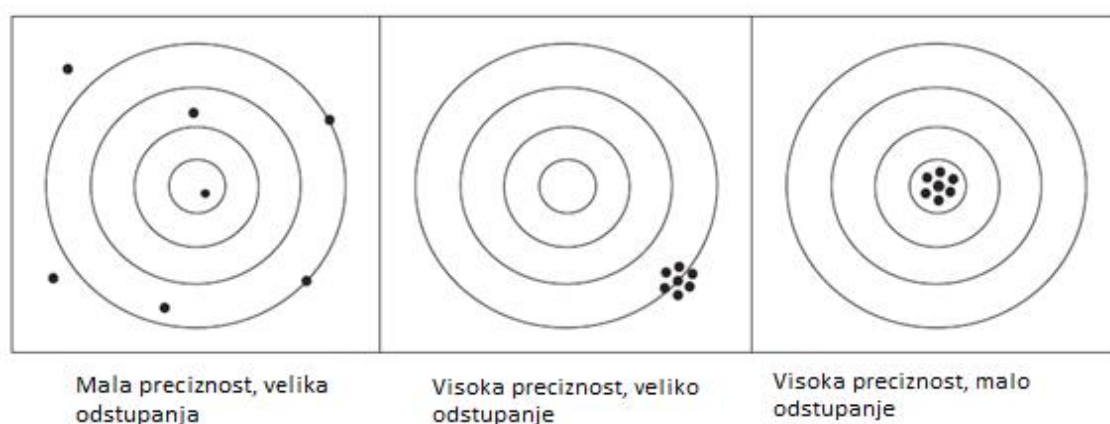
Me ulaboratorijska ispitivanja su laboratorijska ispitivanja koja se provode na istim uzorcima u različitim laboratorijima. Usporedba ovako dobivenih rezultata provodi se kako bi se postigli sljedeći ciljevi:

- Validacija ispitnih postupaka i određivanje nesigurnosti rezultata. Utvrđivanje karakteristike uzorka namijenjenog kao referentni materijal.
- Procjena pouzdanosti rezultata ispitivanja onih laboratorija koji sudjeluju u međulaboratorijskim ispitivanjima.

Organizacija međulaboratorijskih ispitivanja provodi se ovisno o željenim ciljevima. Zahtjevi su propisani međunarodnim standardima (ISO 5725-2, ISO Guide 35, ISO 13528). Svi rezultati su povjerljivi, tako da niti jedan laboratorij ne bi smio imati rezultate drugih. Na temelju individualno dobivenih rezultata laboratoriji odlučuju o mogućim popravnim radnjama kako bi se unaprijedili postupci ispitivanja. ([www.compalab.org](http://www.compalab.org)).

Ispitivanje koje je provedeno na istim uzorcima pri istim okolnostima, ne mora nužno dati iste rezultate. Mnogo različitih faktora, izuzev slučajne varijance navodno identičnog uzorka, utječu na rezultate ispitivanja, uključujući: osoba koja provodi ispitivanje, korištena oprema, kalibracija opreme te laboratorijski uvjeti (temperatura, vlažnost zraka, kakvoća zraka itd.). Varijabilnost između rezultata dobivenih od strane različitih osoba koja provode ispitivanje i različite opreme obično je veća nego kada ista osoba provodi ispitivanje koristeći istu opremu.

Opisni izraz za izražavanje bliskosti dobivenih rezultata stvarnoj vrijednosti ili referentnoj vrijednosti je točnost. ASTM kvantifikaciju uspješnosti neke metode ispitivanja prikazuje pomoću dvije veličine: preciznost i odstupanje, odnosno te su dvije veličine obavezni dio svake ASTM ispitne metode. Odstupanje kvantificira razliku između izmjerene veličine i stvarne vrijednosti, dok je preciznost raspršenosti mjerenja oko prosječne vrijednosti (slika 2-1).



Slika 2-1 Grafički prikaz preciznosti i odstupanja mjerenja

Standardna metoda za određivanje kvalitete ispitivanja prema američkim standardima propisana je normom ASTM E691 *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*. Norma definira minimalne zahtjeve koje je potrebno provesti da bi rezultati dobiveni međulaboratorijskim ispitivanjem bili valjani. Primjerice, kao minimalni broj nezavisnih laboratorija koji moraju sudjelovati navodi se broj šest, te svaki ispitni uzorak treba imati po tri mjerenja. Također, ispitni uzorak treba biti homogeniziran i ispitivan prije distribucije ostalim laboratorijima (Germaine i Germaine 2009).

U ovom radu su prikazana usporedba rezultata ispitivanja bentonitne gline provedenih različitim ispitnim metodama i uzorcima, te je plan ispitivanja prikazan u tablici 2-1. Koristeni su rezultati ispitivanja dva laboratorija, što nije u skladu s normom ASTM E691. Međutim, ovako provedena usporedna ispitivanja poslužit će za procjenu pouzdanosti rezultata ispitivanja ova dva laboratorija, pogotovo uzimajući u obzir da je bentonitna glina,

nestandardan i izuzetno zahtjevan materijal za ispitivanje u geomehani kom laboratoriju (Domitrovi i dr. 2012; Kova evi Zeli i dr. 2007).

Tablica 2-1 Plan provedbe ispitivanja

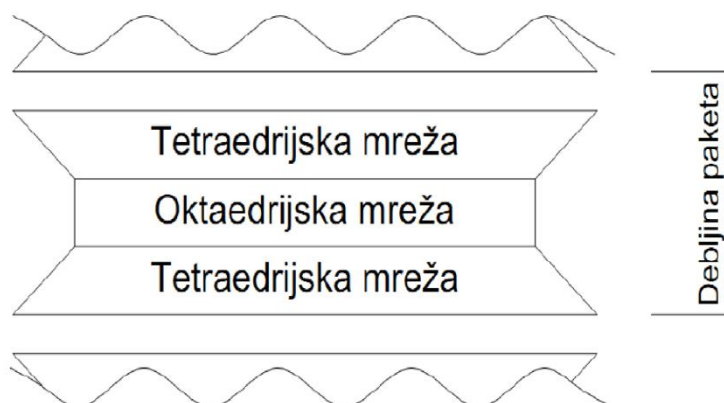
Uzorak		16-002-001		16-003-001		13-001-025	
Laboratorij		RGNF	GZ	RGNF	GZ	RGNF	GZ
Vrsta ispitivanja	Granulometrijski sastav tla	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne
	Gustoća vrstih estica	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da
	Atterbergove granice plastičnosti	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne
	Sposobnost upijanja vode	Da	Da	Da	Da	Da	Da
	Indeks slobodnog bubrenja	Da	Da	Da	Da	Da	Da
	Indeks gubitka fluida	Da	Da	Da	Da	Da	Da

### 3 BENTONITNA GLINA

#### 3.1. Općenito o bentonitnim glinama

Bentonitna glina često se susreće pod nazivom bentonit –to je industrijski pojam. Sastoji se pretežno od minerala montmorillonita. Naziv bentonit dobio je ime po utvrđi Fort Benton u saveznoj državi Wyoming, gdje je prvi put i pronađen. Nastaje alteracijom piroklastičnih stijena. Transformacija iz vulkanskog pepela u bentonit odvija se uglavnom u morskoj i slatkoj vodi. Ako se proces nastajanja bentonita odvijao u slanoj vodi, nastaju natrijski bentoniti, a ako se proces odvijao u slatkoj kalcijski bentoniti.

Mineral montmorillonit spada u smektitnu grupu, te čini uglavnom od 60 do 90% njenog sastava. Montmorillonit kristalizira u monoklinskom sustavu, te u troslojnom paketu (slika 3-1.) dio silicija iz  $\text{SiO}_4$ -tetraedara često je zamijenjen aluminijem, a dio aluminija iz oktaedarskog sloja zamijenjen je  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  itd. (Vrkljan 2011). Osim montmorillonita, u značajnoj količini zastupljeni su plagioklasi, ilit, zeolit, a kao akcesorni minerali služe kvarc, tinjci i klorit. Bentonitna glina se prema dominantnom kemijskom sastavu dijeli u dvije skupine: natrijsku i kalcijsku bentonitnu glinu.



Slika 3-1. Troslojna građa smektita (Domitrovi 2012)

Bentonitne gline danas imaju široku primjenu. Kako se radi o prirodnom materijalu, ne-kodljivom za okoliš – u posljednjih se nekoliko desetljeća a u stalije primjenjuju u sve većim količinama. U primjeni se posebno ističu natrijske bentonitne gline zbog velike

sposobnosti bubrenja. U kontaktu s vodom pa čak i uslijed povećane vlažnosti zraka, natrijske bentonitne gline bubre i do 15 puta u odnosu na dehidratizirano stanje. Bubrenjem se popunjavaju pore osiguravaju i time vrlo malu hidrauličku i plinsku provodljivost odnosno omogućavaju i primjenu bentonitne gline kao brtvene barijere u različitim inženjerskim zahvatima. Zbog navedenih svojstava, bentonitne gline se kao brtvena komponenta upotrebljavaju i u glinenim geosintetičkim barijerama (Domitrović 2012).

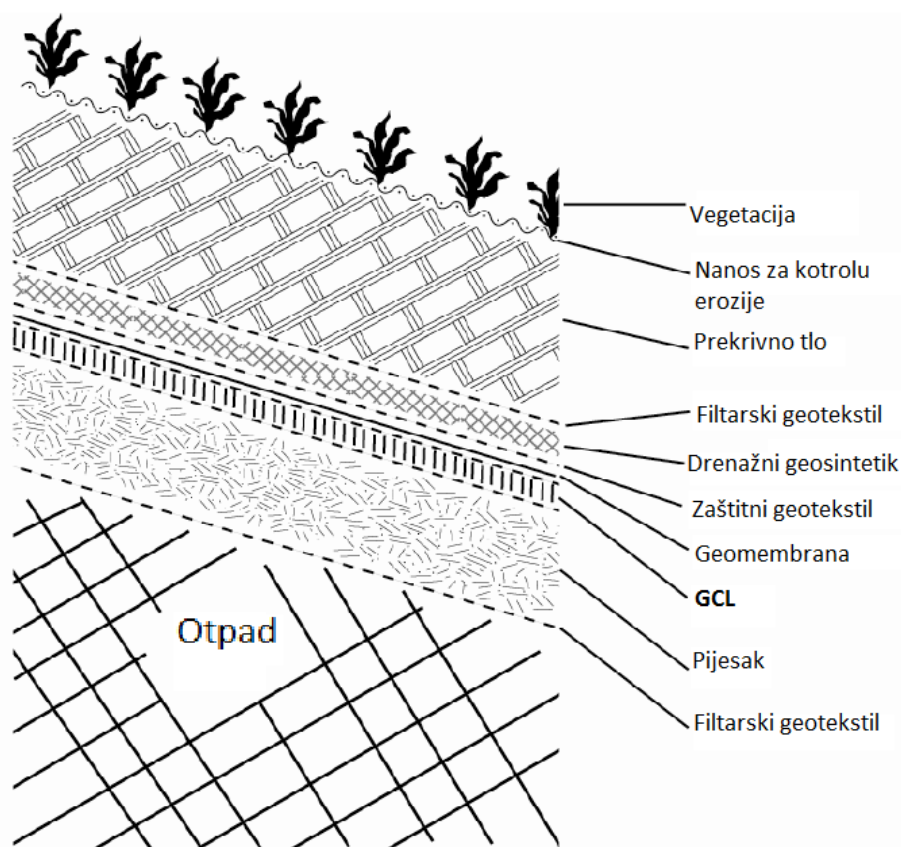
U ovom diplomskom radu, osim provjere pouzdanosti i bliskosti rezultata dvaju laboratorija također je ispitano zadovoljavaju li uzorci preporučene vrijednosti za ugradnju materijala u geosintetičku glinenu barijeru: Pri tome su korištene preporučene vrijednosti prema DGGT (2002) i von Maubeuge (2002) koje su prikazane u tablici 3-1.

Tablica 3-1 Preporučene vrijednosti bentonitne komponente

Vrsta ispitivanja	Norma	Preporučene vrijednosti	
		DGGT 2002	von Maubeuge 2002
Indeks slobodnog bubrenja	ASTM D 5890	>20 ml	>24 ml
Indeks gubitka fluida	ASTM D5891	< 18 ml	< 18 ml
Sposobnost upijanja vode	DIN 18132	× 450%	× 600%
Propusnost	ASTM D 5084	$\bar{O} 10^{-9}$ m/s	$\bar{O} 10^{-9}$ m/s

### 3.2 Geosintetičke glinene barijere (GCL)

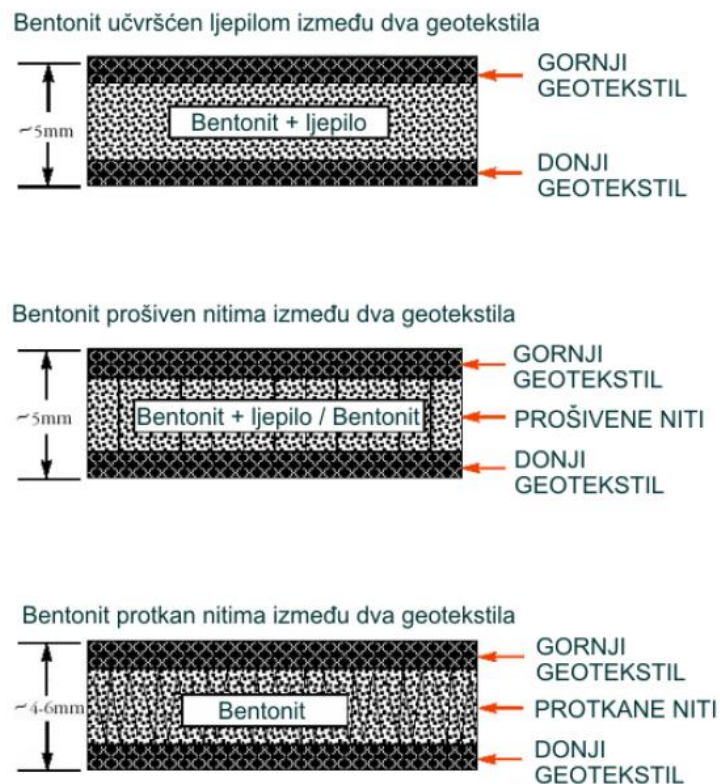
Zadnjih desetljeća, projektanti u geotehnici i zaštiti okoliša pokazuju sve veći interes za korištenjem glinenih geosintetičkih barijera kao alternativa zbijenim glinama, bilo da je riječ o cestogradnji, područjima geotehnike i hidrotehnike, odlagalištima komunalnog otpada itd. Razlog sve veće uporabe geosintetičkih glinenih barijera je u njoj jako niskoj hidrauličkoj propusnosti ( $k < 10^{-10}$  m/s) i niskoj cijeni (Bouazza 2002). Kako bi se zaštiti okoliš (tlo, voda, zrak) od opasnih tvari prisutnih u odlagalištu, ona se danas grade po suvremenim principima koja izmeću u ostaloga uključuju izgradnju pokrovnog i temeljnog zaštitnog sustava odlagališta otpada (slika 3-2). Njihova je svrha sprječavanje dotoka oborinskih i površinskih voda u odlagalište, te otjecanja procjedne tekućine koja u sebi sadrži toksične tvari u temeljno tlo i okoliš (Strgar i dr. 2010).



Slika 3-1 Primjer ugradnje GCL-a u pokrovni zaštitni sustav odlagališta otpada (Von Maubeuge 2002)



Geosinteti ka glinena barijera se sastoji od tankog sloja natrijske ili kalcijske bentonitne gline te slojeva geotekstila odnosno geomembrane. Bentonitna glina ima ulogu nepropusne barijere, dok su slojevi geotekstila nosiva komponenta. Slojevi geotekstila su esto povezani protkanim tekstilnim nitima ili mogu biti pro-iveni pomo u neprekinutih tekstilnih niti raspore enih u paralelne redove (tzv. armirane glinene geosinteti ke barijere). Upotrebljavaju se jo– i nearmirane geosinteti ke glinene barijere gdje je bentonitna glina pomije–ana s ljepilom topivim u vodi te ugra ena izme u dva sloja geotekstila, ali je njegova upotreba ograni ena na ravne terene i kosine malog nagiba (Bouazza 2002). Na slici 3-3 prikazan je na in spajanja GCL-a. Kako bi se pobolj–ala brtvena svojstva glinenih geosinteti kih barijera esto im se dodaje i geomembrana.



Slika 2-3 Na in spajanja GCL-a (Domitrovi 2012)

Zbog brzog razvoja tehnologije i fleksibilnosti proizvodnje, postoje različite vrste glinenih geosinteti kih barijera, odnosno glinene geosinteti ke barijere s različitim svojstvima ovisno o mjestu upotrebe. Primarne razlike izme u pojedinih glinenih

geosinteti kih barijera su u sastavu bentonitne gline (kalcijska ili natrijska) zatim, formi bentonitne gline (prah u odnosu na granule), na inu vezanja geoteksitla (tkani ili netkani) te postupci spajanja GCL-a (Bouazza 2002).

## 4. Fizikalna svojstva bentonitne gline

Detaljan plan istraffivanja prikazan je u tablici 2-1. Istraflivanja su provedena na tri razli ite bentonitne gline (laboratorijske oznake uzoraka: 16-002-001, 16-003-001 i 13-001-025). Pri tome je uzorak laboratorijske oznake 16-003-001 bio u obliku sitnijih granula odnosno praha dok su uzorci 13-001-025 i 16-002-001 bili u obliku krupnijih granula (slika 4-1). Ispitivanja fizikalnih svojstava bentonitne gline provedena su s ciljem karakterizacije uzoraka bentonitne gline te nisu paralelno provedena u oba laboratorija. Od fizikalnih svojstava bentonite gline utvr en je granulometrijski sastav granula u Geomehani kom laboratoriju RGN fakulteta, te gusto a vrstih estica odre ena u Geomehani kom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb.



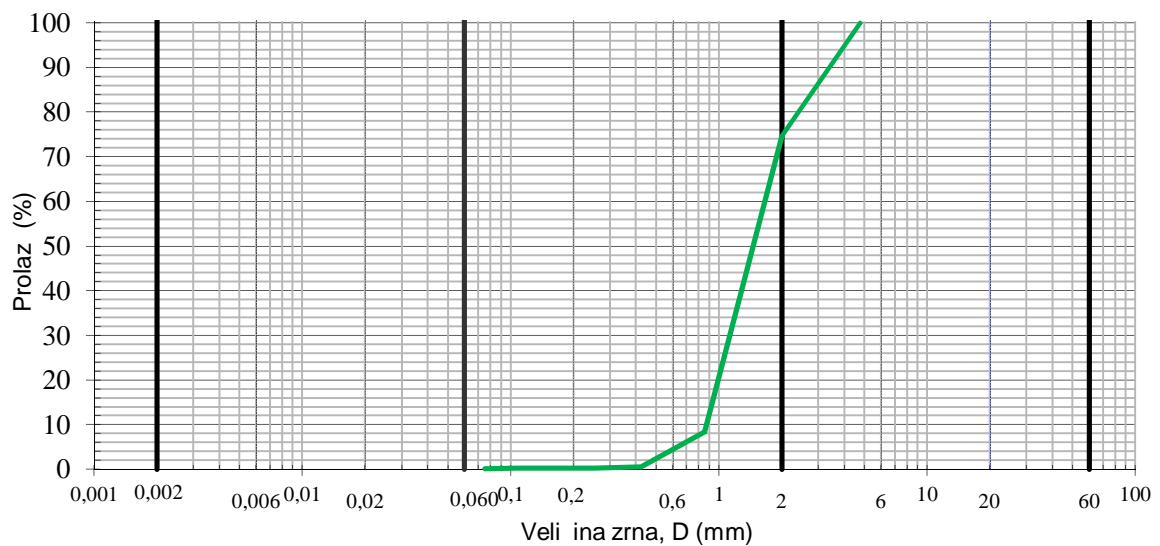
Slika 3-1 Ispitni uzorci

### 4.1 Granulometrijski sastav tla

Ispitivanje granulometrijskog sastava granula bentonitne gline provedeno je sijanjem. Ispitivanje je provedeno sukladno normi CEN ISO/TS 17892. Prvo su odvojeni reprezentativni uzorci te su osu-eni tokom 48 sati na temperaturi od 60°C. Nakon toga izvagane su mase suhих uzoraka koje su zatim prosijane kroz sita definirana navedenom normom. Kao rezultat dobivena je odgovaraju a granulometrijska krivulja, te na temelju nje izra unat koeficijent zakrivljenosti  $c_c$  i koeficijent jednoli nosti  $c_u$ . Tablice 4-1, 4-2, 4-3 prikazuju rezultate sijanja, dok slike 4-2, 4-3, 4-4 prikazuju granulometrijske krivulje.

Tablica 4-1 Rezultati sisanja za uzorak 16-002-001

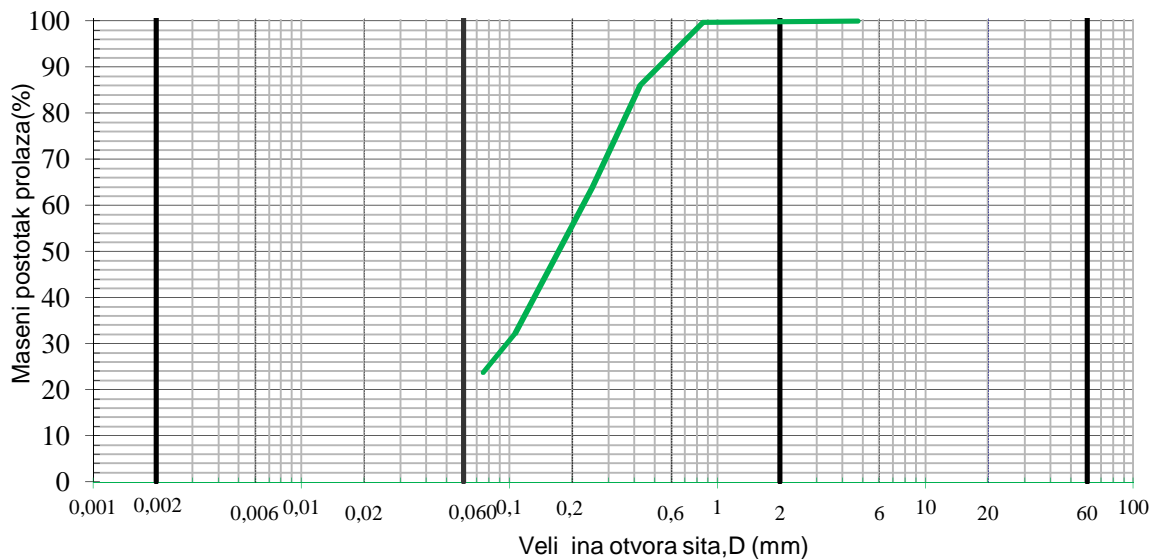
Uzorak	16-002-001		
Masa suhog tla za sisanje (g)	107,09		
Otvor sita (mm)	Masa uzorka na situ (mm)	Postotak ostatka na situ (%)	Kumulativni postotak prolaza (%)
4,75	0,00	0,00	100,00
2,0	26,96	25,18	74,82
0,850	71,24	66,52	8,30
0,425	8,32	7,77	0,53
0,250	0,22	0,21	0,33
0,106	0,05	0,05	0,28
0,075	0,06	0,06	0,22
Dno	0,24	0,22	0,00



Slika 4-2 Granulometrijska krivulja za uzorak 16-002-001

Tablica 4-2 Rezultati sisanja za uzorak 16-003-001

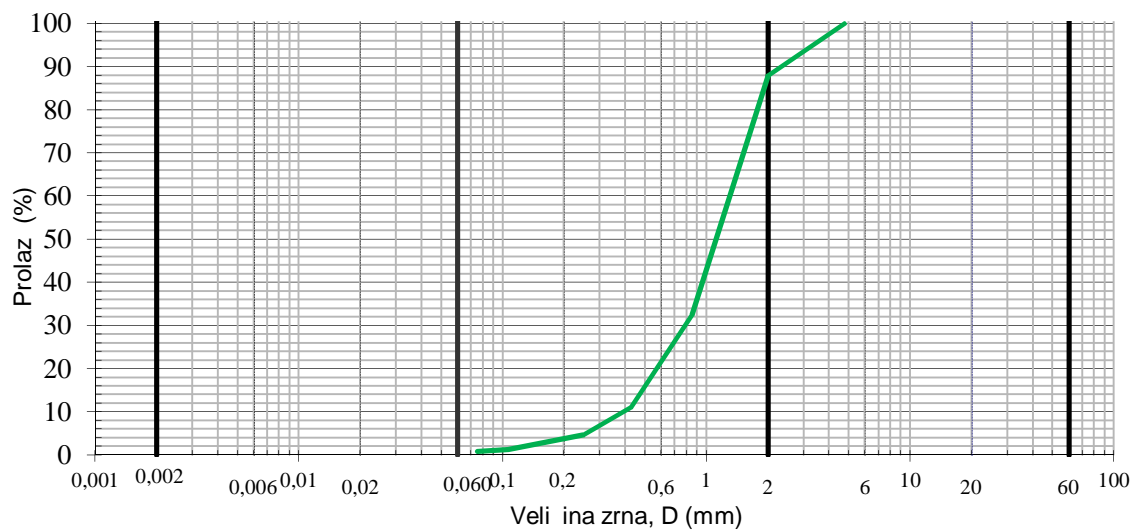
Uzorak	16-003-001		
Masa suhog tla za sisanje (g)	199,54		
Otvor sita (mm)	Masa uzorka na situ (mm)	Postotak ostatka na situ (%)	Kumulativni postotak prolaza (%)
4,75	0,00	0,00	100,00
2,0	0,05	0,04	99,96
0,850	0,18	0,15	99,81
0,425	16,62	13,67	86,14
0,250	26,95	22,17	63,97
0,106	38,71	31,84	32,13
0,075	10,06	8,28	23,85
Dno	29,00	23,85	0,00



Slika 4-3 Granulometrijska krivulja za uzorak 16-003-001

Tablica 4-3 Rezultati sisanja za uzorak 13-001-025

Uzorak	13-001-025		
Masa suhog tla za sisanje (g)	137,18		
Otvor sita (mm)	Masa uzorka na situ (mm)	Postotak ostatka na situ (%)	Kumulativni postotak prolaza (%)
4,75	0,00	0,00	100,00
2,0	16,62	12,12	87,88
0,850	75,95	55,37	32,52
0,425	29,30	21,36	11,16
0,250	8,84	6,44	4,72
0,106	4,65	3,39	1,33
0,075	0,56	0,41	0,92
Dno	1,26	0,92	0,00



Slika 4-4 Granulotrijska krivulja za uzorak 13-001-025

## 4.2 Gustoća čvrstih čestica

Ispitivanje gustoće vrstih čestica tla provedeno je u Geomehaničkom laboratoriju tvrtke Geokon - Zagreb. Postupak ispitivanja je proveden sukladno normi ASTM D854 na sva tri uzorka, po dvije probe. Koristila se metoda grijanja uzorka (eng. *heating method*) u pje-anoj kupelji na piknometrima obujma 250 ml (slika 4-5).



Slika 4-5 Pje-anoj kupelj za provođenje ispitivanja

Prije početka ispitivanja uzorci su osušeni na 60°C tijekom 48 sati. Iako je normom preporučena masa za glinene uzorke 30±5 g, radi izrazitog svojstva bubrenja bentonitne gline uzeta je masa od 11 g koja je dodana u piknometar zajedno s demineraliziranom vodom. Postupak uklanjanja mjehurića zraka iz suspenzije trajao je 4 sata, piknometar je zatim napunjen do vrha demineraliziranom vodom te izvagan. Gustoća vrstih čestica izračunata je prema formuli:

$$\rho_s = \frac{m_{s,d}}{m_{p,w} - m_{p,d}} \cdot \rho_w \quad (4-1)$$

gdje je:  $m_s$  masa suhog uzorka (g),  $\rho_w$  gustoća vode pri određenoj temperaturi (Mg/m<sup>3</sup>),  $m_{p,w}$  masa piknometra napunjen vodom (g),  $m_{p,d}$  masa piknometra s uzorkom i vodom. Tablica 4-4 prikazuje dobivene vrijednosti ispitivanja.

Tablica 4-4 Rezultati ispitivanja gusto e vrstih estica

<b>Laboratorijski broj</b>			<b>16-002-001</b>		
Piknometar broj	Piknometar 1	Piknometar 2			
Masa uzorka (g)	11	11			
Masa piknometra + voda (g)	492,62	492,35			
Masa piknometra + voda + uzorak (g)	499,58	499,34			
Gusto a vrstih estica (Mg/m <sup>3</sup> )	2,72	2,74			
Prosje na gusto a vrstih estica tla (Mg/m <sup>3</sup> )	<b>2,73</b>				
<b>Laboratorijski broj</b>			<b>16-003-001</b>		
Piknometar broj	Piknometar 1	Piknometar 2			
Masa uzorka (g)	11	11			
Masa piknometra + voda (g)	491,89	491,66			
Masa piknometra + voda + uzorak (g)	498,91	498,35			
Gusto a vrstih estica (Mg/m <sup>3</sup> )	2,76	2,77			
Prosje na gusto a vrstih estica tla (Mg/m <sup>3</sup> )	<b>2,77</b>				
<b>Laboratorijski broj</b>			<b>13-001-025</b>		
Piknometar broj	Piknometar 1	Piknometar 2			
Masa uzorka (g)	11	11			
Masa piknometra + voda (g)	492,64	492,35			
Masa piknometra + voda + uzorak (g)	499,80	499,52			
Gusto a vrstih estica (Mg/m <sup>3</sup> )	2,86	2,87			
Prosje na gusto a vrstih estica tla (Mg/m <sup>3</sup> )	<b>2,86</b>				



## 5 INDEKSNI POKAZATELJI BENTONITNE GLINE

Ispitivanja indeksnih pokazatelja tri uzorka bentonitne gline (16-002-001, 16-003-001 i 13-001-025) provedena su sukladno meunarodnim normama u Geomehani kom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu.

### 5.1. Granice plastičnosti

Ispitivanje je provedeno sukladno normi ISO/TS 17892-1. Parametri dobiveni ovom vrstom ispitivanja, odnosno granice plastičnosti i granica tečenja koriste se za klasifikaciju i identifikaciju koherentnih tala. Granica tečenja se određuje pomoću uređaja s pokretnom mjedenom zdjelicom standardiziranog oblika ó tzv. Casagrandeovog aparata (slika 5-1). Pomoću ekscentra na osovini, zdjelica se podiže na visinu od 1 cm s koje slobodno pada na podlogu. Na uzorku se na ini standardizirani flijeb posebnim nožem. Pokretana ručno ili automatski, zdjelica brzinom od 2 udaraca u sekundi udara o podlogu, dok se flijeb ne sastavi na duljini od 12 mm. Broj udaraca ne smije biti manji od 10, niti veći od 50. Ispitivanje se ponavlja na višim uzorcima (4 do 5) istog materijala, a kojima se postepeno dodaje voda (tj. povećava se vlažnost). Za svaki se uzorak odredi vlažnost,  $w$ . Rezultati se unose na dijagram  $w$  (% - lin. mjerilo) i  $N$  (broj udaraca - log mjerilo), interpretira se pravac. Vlažnost koja prema tom pravcu odgovara broju od 25 udaraca je granica tečenja,  $w_L$ .



Slika 5-1 Casagrandeov ure aj

Za odre ivanje granice plasti nosti ne treba poseban aparat. Uzorak se pripremi u mekoplasti nom stanju. Grumeni materijala se valjaju, na neupijaju o j podlozi (primjerice, staklenoj plo i), u valj i e promjera 3 mm. Valj i i bi se, kod te debljine, trebali po eti kidati ili pucati. Ako se to ne doga a, valj i i se ponovno sti– u u grumen i e i pokus se ponavlja. Tim se postupkom uzorku pomalo oduzima voda (smanjuje vlafnost). Valj i e koji su po eli pucati na 3 mm spremamo u zatvorenu posudu, a zatim ih vaflemo i stavljamo su–iti da odredimo vlafnost. Tako dobijemo granicu plasti nosti -  $w_p$ .

U tablici 5-1 prikazane su granice plasti nosti dobivene u Geomehani kom laboratoriju RGN fakulteta.

Tablica 5-1 Rezultati ispitivanja granica plasti nosti

<b>Laboratorijski broj</b>		<b>16-002-001</b>			
Broj uzorka	1	2	3	4	
Vlafnost uzorka (%)	343,8	357,1	361,7	391,3	
Broj udaraca (N)	38	27	23	19	
<b>Granica tečenja <math>W_L</math> (%)</b>	<b>364,5</b>				
Broj uzorka	1	2	3		
Vlafnost uzorka (%)	40,4	42,1	44,7		
<b>Granica plastičnosti <math>W_p</math> (%)</b>	<b>42,4</b>				
<b>Indeks plastičnosti <math>I_p</math></b>	<b>322,1</b>				

<b>Laboratorijski broj</b>		<b>16-003-001</b>			
Broj uzorka	1	2	3	4	
Vlafnost uzorka (%)	331,1	305,4	364,2	366,9	
Broj udaraca (N)	38	31	23	15	
<b>Granica tečenja <math>W_L</math> (%)</b>	<b>347,0</b>				
Broj uzorka	1	2	3		
Vlafnost uzorka (%)	39,9	40,53	40,0		
<b>Granica plastičnosti <math>W_p</math> (%)</b>	<b>40,1</b>				
<b>Indeks plastičnosti <math>I_p</math></b>	<b>306,9</b>				

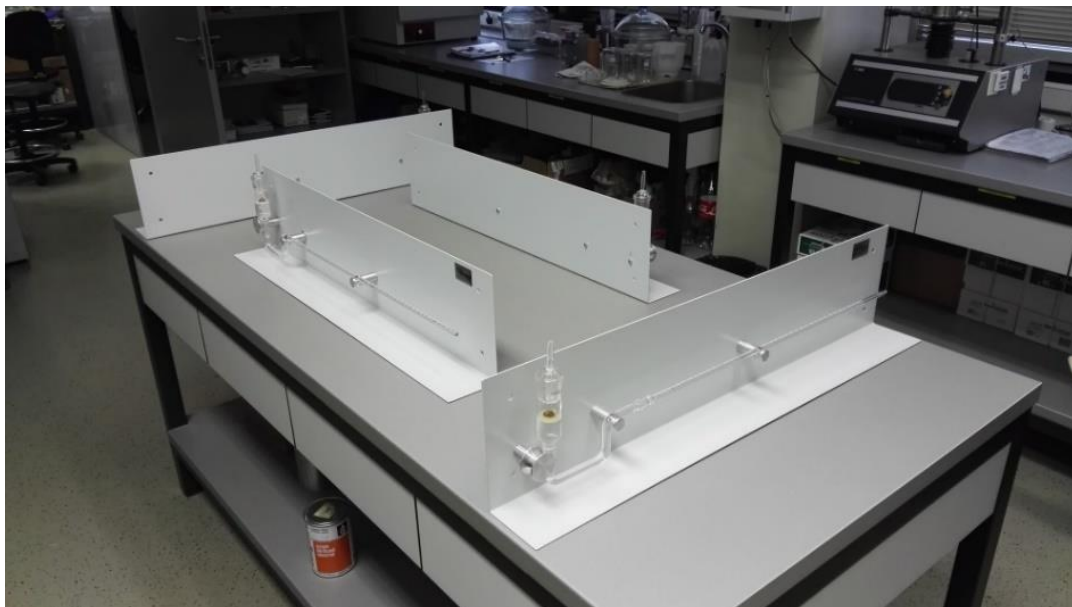
<b>Laboratorijski broj</b>		<b>13-001-025</b>			
Broj uzorka	1	2	3	4	
Vlafnost uzorka (%)	397,1	410,3	414,1	419,6	
Broj udaraca (N)	42	30	18	13	
<b>Granica tečenja <math>W_L</math> (%)</b>	<b>410,5</b>				
Broj uzorka	1	2	3		
Vlafnost uzorka (%)	42,5	40,3	45,6		
<b>Granica plastičnosti <math>W_p</math> (%)</b>	<b>42,8</b>				
<b>Indeks plastičnosti <math>I_p</math></b>	<b>367,7</b>				

## 5.2 Sposobnost upijanja vode

Laboratorijsko ispitivanje sposobnosti upijanje vode izvodi se prema normi DIN 18132. Kapacitet upijanja prvenstveno ovisi o specifičnoj površini estica tla, sadržaju i vrsti glinenih minerala te o njihovoj aktivnosti (von Maubeuge 2004). Postupak ispitivanje se provodi na prethodno usitnjenom uzorku bentonitne gline koji je prosijan kroz sito otvora 70  $\mu\text{m}$  te osušeno na 60°C tijekom 48 sati.

Ispitivanje je započeto tako da je 0,1 g pripremljenog uzorka usipano pomoću staklenog lijevka na staklenu filter pločicu uređaja. Volumen upijanja mjeren je u intervalima od 30 sekundi do 24 sata. Obzirom da dolazi i do isparavanja vode iz uređaja, prilikom mjerenja se koristi i referentni uređaj kojim se mjeri volumen isparene tekućine. Postotak upijene vode definiran je kao odnos mase upijene vode i mase suhog uzorka. Sposobnost upijanja vode predstavlja postotak upijene vode nakon 24 sata (1440 min). Kao ispitna tekućina upotrijebljena je demineralizirana voda.

Ispitivanje je provedeno na sva tri uzorka u oba laboratorija: Geomehanikom laboratoriju RGN fakulteta (slika 5-2) i Geomehanikom laboratoriju tvrtke Geokon (slika 5-3).



Slika 5-2 Mjerenje sposobnosti upijanja u laboratoriju RGN fakulteta



Slika 5-3 Mjerenje sposobnosti upijanja u laboratoriju Geokon-Zagreb

Rezultati dobiveni u Geomehani kom laboratoriju RGN fakulteta prikazani su u tablici (5-2), dok tablica (5-3) prikazuje rezultate dobivene u Geomehani kom laboratoriju Geokon-Zagreb.

Tablica 5-2 Sposobnost upijanja vode (Geomehani ki laboratorij RGNF)

<b>Laboratorijski broj</b>		<b>13-001-025</b>		
Vrijeme o itavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Aparatura br.2 (%)	Aparatura br.3 (%)	Referentna (%)
0,5	140	140	140	0
1	165	175	175	0
2	200	215	215	0
4	245	260	260	0
8	300	320	320	0
15	360	385	390	0
30	450	475	480	0
60	560	595	595	0
120	700	735	740	10
240	840	880	865	50
360	925	965	940	105
1440	1380	1395	1350	495
<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>439,8 %</b>			

<b>Laboratorijski broj</b>		<b>16-002-001</b>		
Vrijeme o itavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Aparatura br.2 (%)	Aparatura br.3 (%)	Referentna (%)
0,5	85	95	140	0
1	110	125	175	0
2	135	156	140	0
4	172	193	173	0
8	215	242	218	0
15	268	295	271	0
30	343	375	345	0
60	440	476	441	0
120	570	615	560	10
240	730	765	730	50
360	840	880	845	105
1440	1422	1460	1402	572
<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>428 %</b>			

<b>Laboratorijski broj</b>		<b>16-003-001</b>		
Vrijeme o itavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Aparatura br.2 (%)	Aparatura br.3 (%)	Referentna (%)
0,5	140	140	140	0
1	165	175	175	0
2	200	215	215	0
4	245	260	260	0
8	300	320	320	0
15	360	385	390	0
30	450	475	480	0
60	560	595	595	0
120	700	735	740	10
240	840	880	865	50
360	925	965	940	105
1440	1380	1395	1350	495
<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>448,3 %</b>			

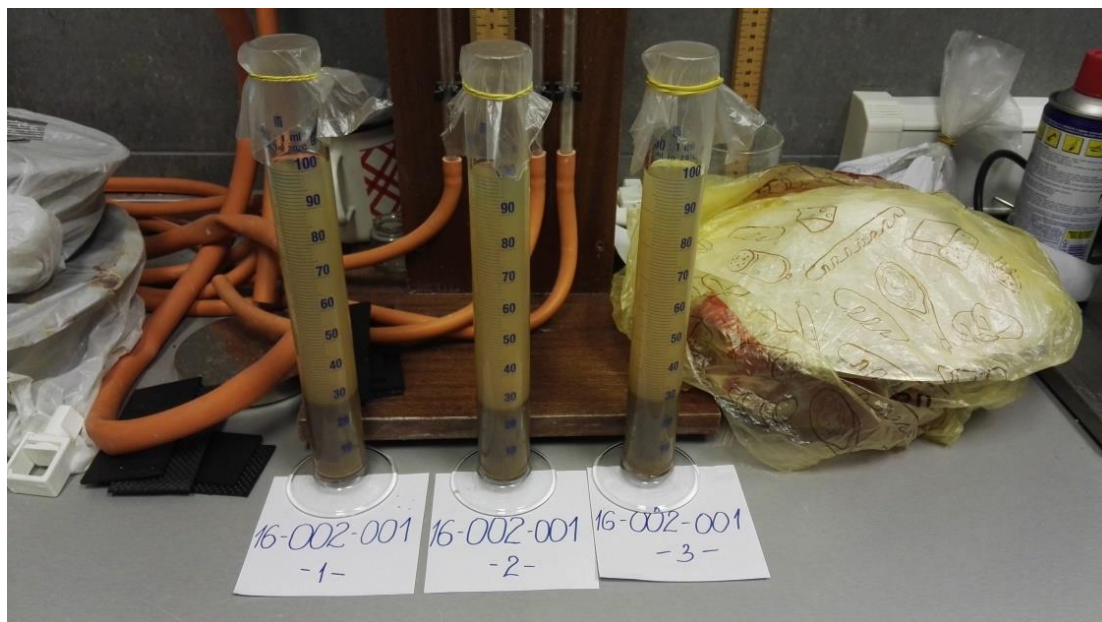
Tablica 5-3 Sposobnost upijanja vode (Geomehanički laboratorij Geokon-Zagreb)

13-001-025			16-002-001			16-003-001		
Vrijeme očitavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Referentna (%)	Vrijeme očitavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Referentna (%)	Vrijeme očitavanja (min)	Aparatura br.1 (%)	Referentna (%)
0,5	110	0	0,5	140	0	0,5	120	0
1	150	0	1	155	0	1	180	0
2	200	0	2	175	0	2	210	0
4	220	0	4	205	0	4	225	0
8	250	0	8	235	0	8	250	0
15	275	0	15	280	0	15	290	0
30	345	5	30	360	10	30	380	0
60	415	40	60	415	50	60	420	50
120	520	70	120	510	60	120	530	70
240	660	120	240	640	120	240	660	130
360	750	150	360	705	125	360	720	135
1440	1350	450	1440	1270	420	1440	1310	440
<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>450 %</b>		<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>425 %</b>		<b>Sposobnost upijanja (%)</b>	<b>435 %</b>	

### 5.3 Indeks slobodnog bubrenja

Indeks slobodnog bubrenja koristi se za ispitivanje svojstava glinenih materijala povezanih s njihovim brtvenim svojstvima te za kontrolu kvalitete proizvodnje glinenih geosintetičkih barijera. Određivanje indeksa slobodnog bubrenja bentonitne gline provedeno je na pripremljenom samljevenom uzorku pri čemu je 100% uzorka prošlo kroz sito veličine otvora 75 μm. Uzorak je pripremljen sušenjem na temperaturi od 60°C tijekom 48 sati. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM D 5890. Ukupna masa uzorka od 2,00 g dodaje se postupno po 0,1 g svakih 10 minuta u menzuru kapaciteta 100 ml ispunjenu demineraliziranom vodom. Nakon što je prošlo ukupno 18 sati od završetka usipavanja očitava se volumen nabubrenog uzorka.

Na slici 5-4 prikazana je aparatura za provođenje ispitivanja. Ispitivanje je provedeno na sva tri uzorka, po tri zasebna mjerenja u Geomehničkom laboratoriju RGN fakulteta i Geomehničkom laboratoriju tvrtke Geokon te su rezultati prikazani u tablici 5-4.



Slika 4-4 Indeks slobodnog bubrenja



Tablica 5-4 Rezultati ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja (Geomehani ki laboratorij RGNF)

<i>Geomehanički laboratorij RGN fakultet</i>			
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>16-002-001</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	22,6	22,6	22,7
pH suspenzije	7,0	7,0	7,0
Volumen bubrenja (mL/2g)	28	27	28
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>27,6</b>		
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>16-003-001</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	23,3	23,3	23,4
pH suspenzije	7,5	7,5	7,5
Volumen bubrenja (mL/2g)	23	23	23
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>23,0</b>		
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>13-001-025</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	23,0	23,0	22,9
pH suspenzije	7,5	7,5	7,5
Volumen bubrenja (mL/2g)	28	28	28
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>28,0</b>		

Tablica 5-5 Rezultati ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja (Geomehani ki laboratorij Geokon-Zagreb)

<b>Geomehanički laboratorij Geokon-Zagreb</b>			
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>16-002-001</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	23,0	23,0	23,0
pH suspenzije	7,6	7,6	7,6
Volumen bubrenja (mL/2g)	28	29	28
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>28,3</b>		
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>16-003-001</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	22,8	22,8	22,9
pH suspenzije	7,5	7,6	7,6
Volumen bubrenja (mL/2g)	24,5	24,5	24,3
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>24,4</b>		
<b>Laboratorijski br.</b>		<b>13-001-025</b>	
Mjerenje	Menzura 1	Menzura 2	Menzura 3
Temperatura suspenzije (°C°)	23,0	23,0	23,0
pH suspenzije	7,5	7,5	7,5
Volumen bubrenja (mL/2g)	28	28,5	28
<b>Prosječni volumen bubrenja (mL/2g)</b>	<b>28,2</b>		

## 5.4 Indeks gubitka fluida

Ispitivanje gubitka fluida se provodi prema normi ASTM D 5891 kojom se omogućuje određivanje gubitka fluida kroz film materijala formiran na filteru papiru iz suspenzije glinovitog tla kako bi se dokazala uporabivost tog tla u svrhu smanjenja propusnosti u geotekničkim glinenim barijerama. (Kovačević i dr. 2007).

Određivanje indeksa gubitka fluida bentonitne gline provedeno je na pripremljenom samljevenom uzorku sa 100% prolaza kroz sito veličine otvora 75  $\mu$ m. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM 5891, što znači da je  $22,5 \pm 0,01$  g pripremljenog uzorka izmiješano sa  $350 \pm 5$  ml demineralizirane vode u menzuri kapaciteta 500 ml. Nakon 16 sati suspenzija je prelivena u cilindar s filteru papirom. Nakon uspostavljanja tlaka u cilindru od približno 700 kPa, započelo se mjerenje vremena i količine tekućine u menzuri. Nakon što je proteklo 7,5 minuta, prva menzura koja se nalazi ispod cilindra se zamjenjuje drugom. U drugoj menzuri sakupljana je tekućina daljnjih 22,5 minute. Volumen gubitka fluida se dobije kao dvostruka vrijednost volumena tekućine očitane u drugoj menzuri. Na slici 5-5 i 5-6 prikazana je aparatura za ispitivanje gubitka fluida, te dobiveni rezultati u tablici 5-5.



Slika 5-5 Ure aj za ispitivanje gubitka fluida (Geomehani ki laboratorij RGNF)



Slika 5-6 Ure aj za ispitivanje gubitka fluida (Geomehani ki laboratorij Geokon-Zagreb)

Tablica 5-5 Rezultati indeksa gubitka fluida

<i>Geomehanički laboratorij RGN fakulteta</i>			
<b>Laboratorijska oznaka</b>	<b>16-002-001</b>	<b>16-003-001</b>	<b>13-001-025</b>
Volumen teku ine nakon 7,5 min (ml)	3	2	3,5
Volumen teku ine nakon 22,5min (ml)	8,5	8,0	8,5
<b>Indeks gubitak fluida (ml)</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<i>Geomehanički laboratorij Geokon</i>			
<b>Laboratorijska oznaka</b>	<b>16-002-001</b>	<b>16-003-001</b>	<b>13-001-025</b>
Volumen teku ine nakon 7,5 min (ml)	6	6	5
Volumen teku ine nakon 22,5min (ml)	8	9	8,2
<b>Indeks gubitak fluida (ml)</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>16,5</b>

## 6 ANALIZA REZULTATA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

### 6.1. Fizikalna svojstva

#### *Granulometrijski sastav*

Na temelju rezultata sisanja provedenog prema normi CEN ISO/TS 17892 može se zaključiti kako je navedeno.

Uzorak broj: **16-002-001**

Uzorak sadrži 25,2% granula odnosno zrna veličine sitnog –ljunka, 74,6% zrna veličine pijeska (71,1% krupnog, 3,4% srednje krupnog te 0,1% sitnog). Zrna veličine prašina i gline sadrži 0,2 %. Prema obliku granulometrijske krivulje izračunati su koeficijenti zakrivljenosti  $C_c=0,98$  i jednolike nosti  $C_u=1,98$ . Prema tome, radi se o jednoliku graduiranom materijalu gdje dominiraju zrna veličine krupnog pijeska.

Uzorak broj: **13-001-025**

Prosijani uzorak bentonitnih granula sadrži 12,1% zrna veličine sitnog –ljunka, 86,9% zrna veličine pijeska, od čega 67,9% krupnog, 16,5% srednje krupnog te 2,6% sitnog pijeska. Prašina i glina zastupljeni su s 0,9%. Koeficijent zakrivljenosti iznosi  $C_c=1,14$  dok je koeficijent jednolike nosti  $C_u=3,61$ . Kao i kod uzoraka 16-002-001, riječ je o jednoliku graduiranom materijalu gdje dominiraju zrna veličine krupnog pijeska.

Uzorak broj: **16-003-001**

Uzorak sadrži neznatan udio zrna veličine sitnog –ljunka (svega 0,4%), 76,2% zrna veličine pijeska (8,2% krupnog pijeska, 38,9% srednje krupnog te 30% sitnog pijeska). Udio zrna veličine prašina i gline iznosi 23,8%. Kao i kod predhodnih uzoraka, riječ je o jednoliku graduiranom materijalu gdje prevladavaju zrna veličine pijeska.

### *Gustoća čvrstih čestica*

Rezultati su dobiveni ispitivanjem provedenim u Geomehani kom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb:

Uzorak:	16-002-001	$\rho_s = 2,73 \text{ Mg/m}^3$
	16-003-001	$\rho_s = 2,77 \text{ Mg/m}^3$
	13-001-025	$\rho_s = 2,86 \text{ Mg/m}^3$

Rezultati ukazuju da se gusto e vrstih estica ispitivanih uzoraka u odre enoj mjeri razlikuju. Uzorci 16-002-001 i 16-003-001 se razlikuju za svega  $0,04 \text{ Mg/m}^3$ . Razmatraju i rezultate od ostalih studija, primjerice za Volclay (Domitrovi 2012)  $\rho_s = 2,70 \text{ Mg/m}^3$ , bentonitne gline iz studije (Andali i dr. 2012)  $\rho_s = 2,75 \text{ Mg/m}^3$  dobiveni rezultati su bliski s rezultatima dobivenim na uzorcima 16-002-001 i 16-003-001.

Znatnije odstupanje vrijednosti gusto e vrstih estica primije eno je na uzorku 13-025-001. Nije poznat razlog ovom odstupanju uzorka 13-001-025 me utim treba navesti da su sva tri uzorka bentonitne gline razli itog porijekla. Pretpostavlja se da bi ispitivanja mineralo-kog i kemijskog sastava dala detaljniju sliku o ovom uzorku.

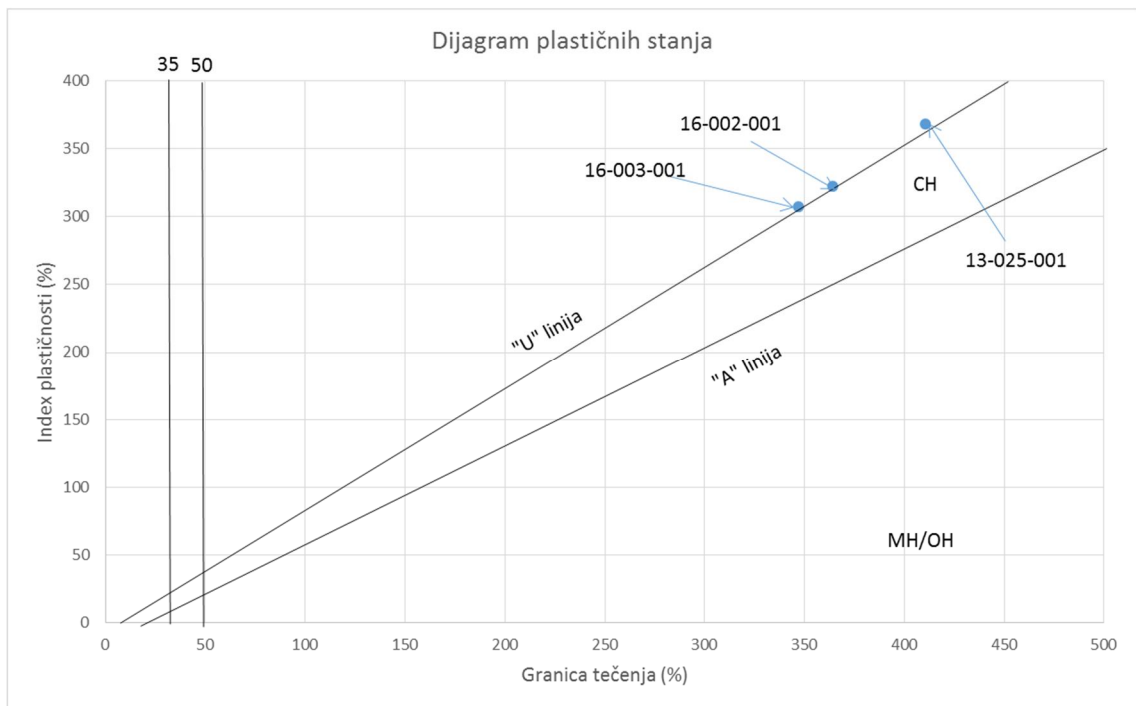
## **6.2 Analiza indeksnih pokazatelja**

### *Atterbergove granice*

Ispitivanje je provedeno sukladno normi ISO/TS 17892 u Geomehani kom laboratoriju RGN fakulteta. U tablici 5-1 prikazanje su vrijednosti indeksa plasti nosti i granice te enja.

Uzorak:	16-002-001	Granica te enja $W_L=364,5 \%$ . Indeks plasti nosti $I_p=322,1 \%$
	16-003-001	Granica te enja $W_L=347,0 \%$ . Indeks plasti nosti $I_p=306,9 \%$
	13-001-025	Granica te enja $W_L=410,5 \%$ . Indeks plasti nosti $I_p=367,7 \%$

Rezultati ispitivanja prikazani su na dijagramu plasti nosti (slika 6-1).



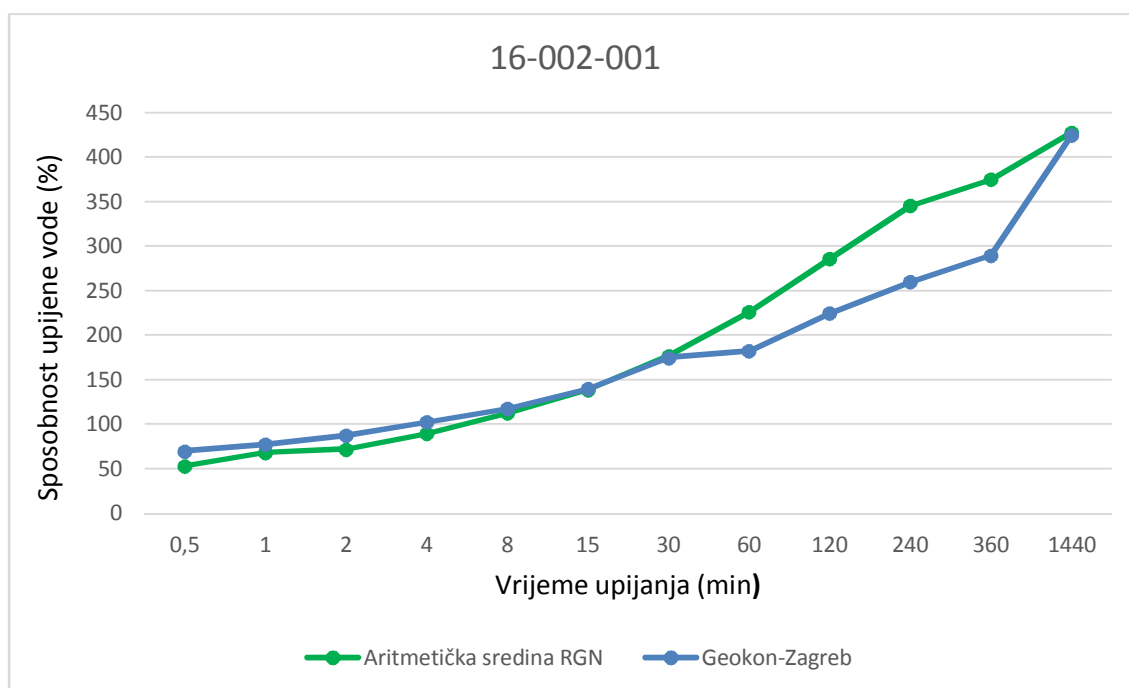
Slika 6-1 Prikaz rezultata Attebergovih granica na dijagramu plasti nosti

Svi ispitani uzorci se na temelju dobivenih rezultata i na temelju klasifikacijskog dijagrama klasificiraju kao bentonitna glina visoke plasti nosti, klasifikacijske oznake CH.

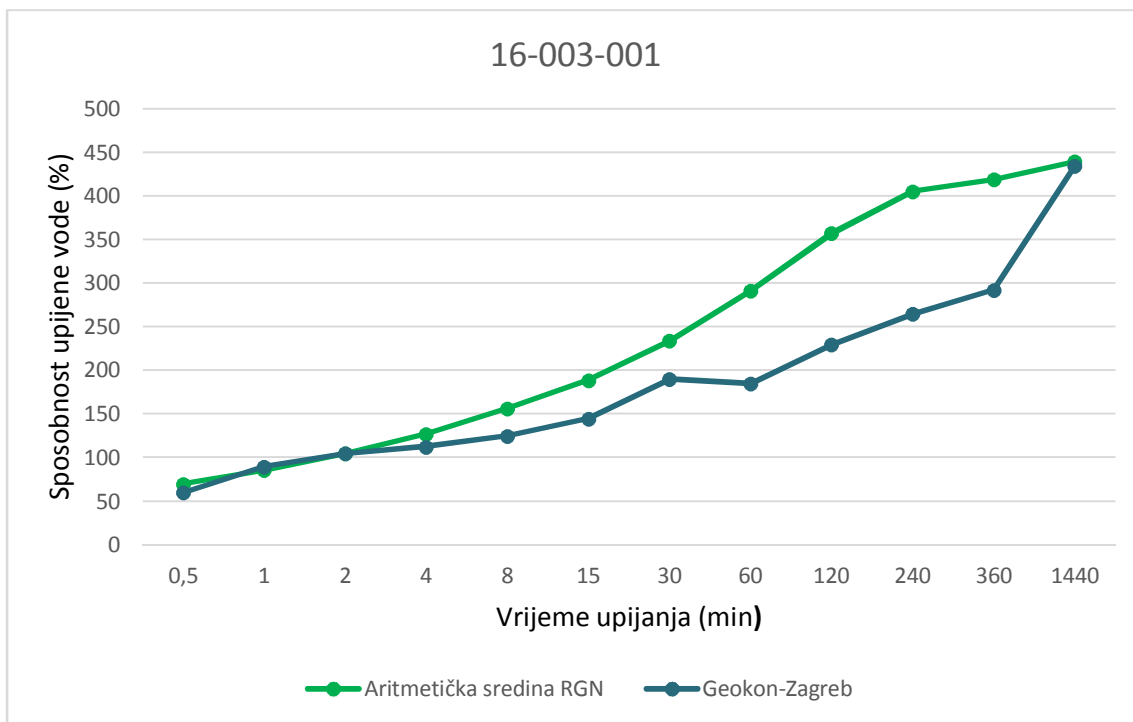


## Sposobnost upijanja vode

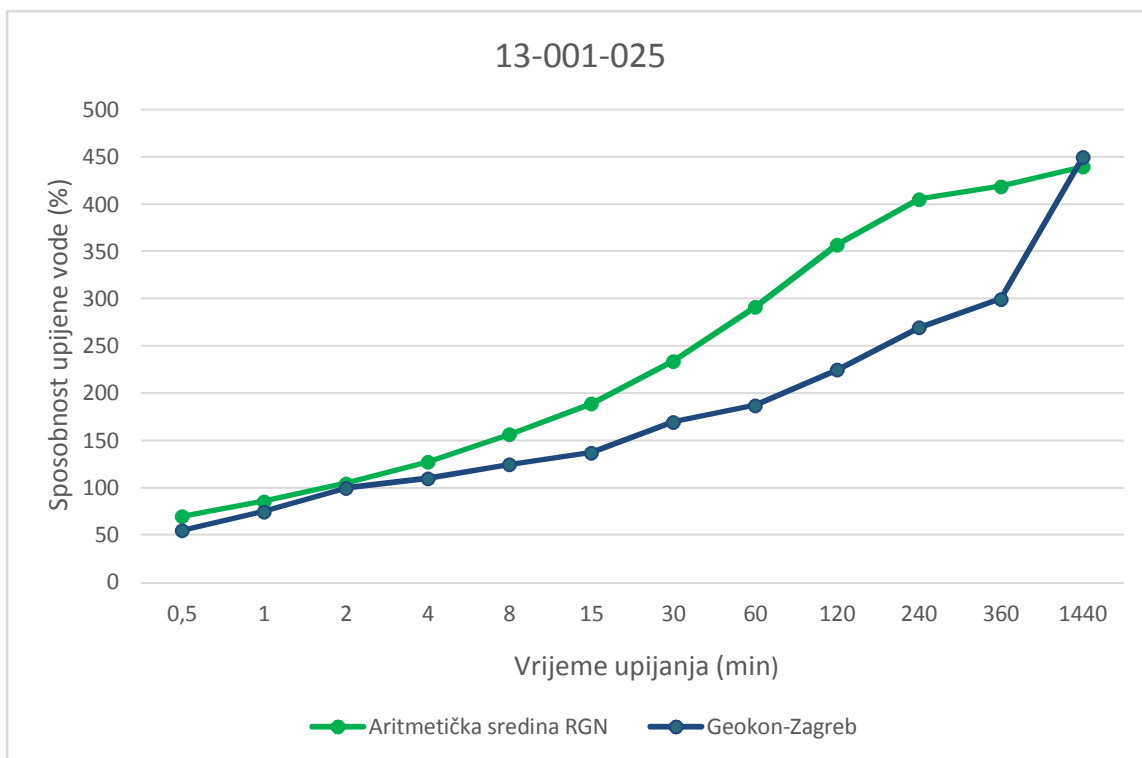
Laboratorijsko ispitivanje kapaciteta upijanje vode izvodi se prema normi DIN 18132, te je provedeno me ulaboratorijsko usporedno ispitivanje. U laboratoriju RGN fakulteta za svaki su uzorak napravljena tri mjerenja, dok je u laboratoriju Geokon-Zagreb napravljeno jedno mjerenje radi manjka opreme. Za svaki uzorak izra unata je srednja vrijednost upijanja te prikazana na dijagramu zajedno s rezultatom dobivenim u laboratoriju Geokon-Zagreb (slika 6-2, 6-3, 6-4).



Slika 5-2 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 16-002-001



Slika 6-3 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 16-003-001



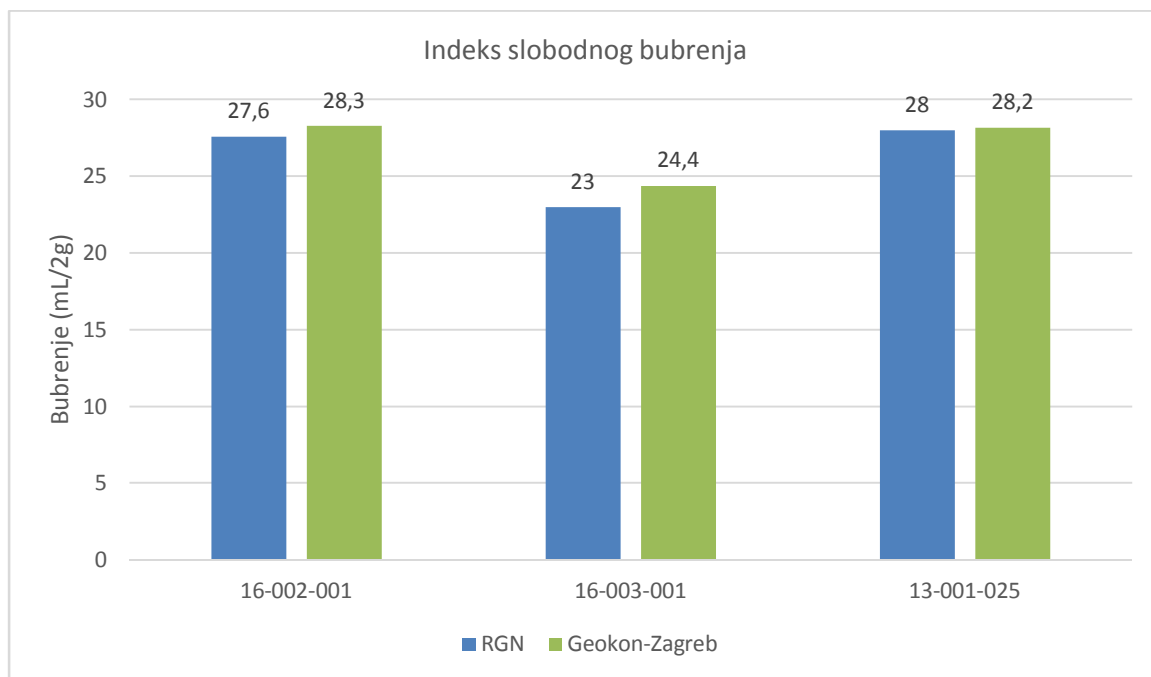
Slika 6-4 Rezultati sposobnosti upijanja za uzorak 13-001-025

Uspoređujući i rezultate dobivene me ulaboratorijskim usporednim ispitivanjima, krajnje dobivene vrijednosti su bliske. Međutim, interpretacijom krivulja dobivenih rezultata uočava se širak raspon. Kod uzorka 16-002-001 ono nastaje nakon 30 minuta mjerenja upijanja, dok za uzorke 16-003-001 i 13-001-025 već nakon 4 minute.

Prema minimalnoj dopuštenoj vrijednosti za ugradnju bentonitne gline u geosintetičke glinene barijere koja iznosi 450% prema DGGT-u te strožem kriteriju danom od von Maubeuge s iznosom od 600% , jedino se rezultat uzorka 13-001-025 (450%) dobio u Geokon-Zagreb nalazi na granici.

### Indeks slobodnog bubrenja

Ispitivanje slobodnog bubrenja provodi se prema normi ASTM D 5890, te je provedeno me ulaboratorijsko ispitivanje na sva tri zadana uzorka. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 6-5.



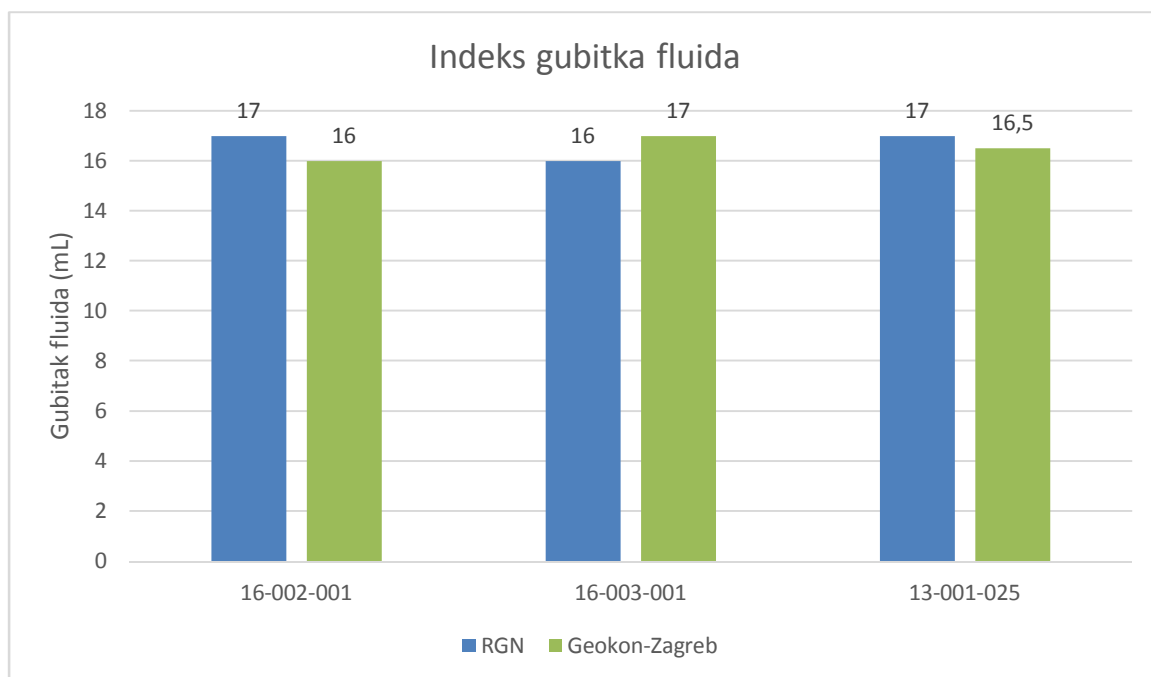
Slika 6-5 Rezultata sposobnosti bubrenja

Analiziraju i dobivene rezultate indeksa slobodnog bubrenja me ulaboratorijskim ispitivanjem uo ava se bliskost dobivenih vrijednosti kod uzorka 16-002-001 i 13-001-25 dok je razlika kod uzorka 16-003-001 ne-to iznad 5%.

Uspore uju i dobivene rezultate s rezultatima drugih studija, primjerice Volclay bentonitne (Domitrovi 2012) gdje je dobivena vrijednost slobodnog bubrenja 31,0 mL/2g, te gline kori-tene u ispitivanju pogodnosti za ugradnju u geosinteti ke glinene barijere (Strgar i dr 2010) s vrijedno- u od 30,0 mL/2, rezultati poprimaju manje vrijednosti, osobito uzorak 16-003-001 koji je na granici mogu nosti uporabe za glinene geosinteti ke barijere od 24 mL (von Maubeuge 2002). Preostala dva uzorka imaju znatno vi-e vrijednosti od potrebnih (tablica 3-1).

## Indeks gubitka fluida

Ispitivanje indeksa gubitka fluida se provodi prema normi ASTM D 5891, te je provedeno me ulaboratorijsko usporedno ispitivanje za sva tri ispitna uzorka. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 6-6.



Slika 6-6 Indeks gubitka fluida

Iz slike 6-6 primje uje se bliskost rezultata dobiveni u geomehani kom laboratoriju RGN fakulteta i laboratorija Geokon-Zagreb. Dobiveni rezultati zadovoljavaju preporu ene vrijednosti dane u tablici 3-1 (<18ml).

## 7 ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana su istraživanja provedena na tri različita uzorka bentonitne gline. Dva uzorka su bila u formi granula dok je jedan bio u formi sitnih granula odnosno praha. Rezultati istraživanja poslužili su u dvije svrhe: provjera točnosti, odnosno preciznosti rezultata provedenim me ulaboratorijskim ispitivanjem te usporedba dobivenih rezultata s preporučenim vrijednostima za ugradnju materijala u geosintetičku glinenu barijeru prema DGGT (2002) i von Maubeuge (2002) koje su dane u tablici 3-1.

U prvom koraku pristupilo se karakterizaciji uzoraka bentonitne gline. Ova ispitivanja nisu paralelno provedena u oba laboratorija. U svrhu karakterizacije uzoraka bentonitne gline provedena su ispitivanja fizikalnih svojstava bentonitne gline (granulometrijski sastav granula utvrđeno je u Geomehaničkom laboratoriju RGN fakulteta, te gustoća vrstih estica u Geomehaničkom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb) i granica plastičnosti (granica tečenja i indeks plastičnosti utvrđeni su u Geomehaničkom laboratoriju RGN fakulteta).

Na temelju granulometrijske analize svi su uzorci klasificirani kao jednoliko graduirane granule velike zrna pijeska. Valja napomenuti da se radi o uzorcima izrazito velike plastičnosti (granica tečenja uzoraka se kreće od 364,5 % do 410,5% a indeks plastičnosti od 306,9% do 367,7%) te s izraženim svojstvom bubrenja, te je kao takav vrlo šezahvalan materijal nad kojim se provodi ispitivanje. Gustoća vrstih estica uzoraka bentonitne gline 16-002-001 i 16-003-001 iznosila je 2,73 i 2,77 g/cm<sup>3</sup> i ove vrijednosti se mogu smatrati bliskima prijašnjim studijama provedenim na različitim vrstama bentonitnih glina. Netočna vrijednost gustoće vrstih estica dobivena je za uzorak 13-001-025 (2,86 g/cm<sup>3</sup>). Pretpostavlja se da bi ispitivanja mineralogičkog i kemijskog sastava dala detaljniju sliku o ovom uzorku.

U drugom koraku provedena su me ulaboratorijska ispitivanja indeksnih pokazatelja bentonitne gline (sposobnost upijanja vode, indeks slobodnog bubrenja i indeks gubitka fluida). Navedene metode se koriste prilikom kontrole kvalitete GCL-a. Ispitivanja su provedena paralelno u Geomehaničkom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb i Geomehaničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

Dobiveni rezultati me ulaboratorijskog ispitivanja, koje je rađeno sukladno zahtjevima norme ASTM E691 (osoba koja provodi ispitivanje, korištena oprema, kalibracija opreme

te laboratorijski uvjeti: temperatura, vlažnost zraka, kakvoća zraka itd.) su veoma bliski te nema većeg odstupanja (>5%) vrijednosti.

Uspoređujući i dobivene rezultate s preporučenim vrijednostima za ugradnju materijala u geosintetičku glinenu barijeru danu u tablici 3-1, granice za indeks slobodnog bubrenja te indeksa gubitka fluida zadovoljavaju svi ispitni uzorci, dok za ispitivanje sposobnosti upijanja vode jedino uzorak 13-001-025 zadovoljava nižu granicu od 450%.

## 8 LITERATURA

- Andal, M., Chandrasekhar, M., Viswanadh, K. (2012.): Hydraulic conductivity of gel with bentonite ó silica fume matrix, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, volume 2, Pages 109-112
- Bouazza, A. (2002): *Geosynthetic Clay Liners, Geotextiles and Geomembranes 20*, Elsevier Science, Pages 3-17
- Germaine, T.D, Germaine, V. (2009.): *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*, by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Pages 7-11
- Strgar H., Kova evi Zeli , B., Mileusni , M. (2010.): Laboratory testing of bentonite for liner applications, University of Zagreb, Faculty of mining, geology and petroleum engineering
- Von Maubeuge P., Coulson P., Hedrich F. (2002.): *Landfill cap design with geosynthetic clay liners*
- Vrkljan, M. (2011.): *Op a mineralogija i petrologija*, Rudarsko-geolo-ko-naftni fakultet, Zagreb, stranica 46-47
- Domitrovi , D. (2012.): *Utjecaj bubrenja bentonitne gline na njezina mehani ka svojstva*, Doktorska disertacija, RGN-fakultet, Zagreb
- Domitrovi , D., Vu enovi , H., Kova evi Zeli , B. (2012.): *Ispitivanje svojstava bentonita kao infenjske barijere u odlagali-tima radioaktivnog otpada*. Rudarsko-geolo-ki-naftni zbornik, volumen 24, str. 19-27.
- Kova evi Zeli , B., Domitrovi , D. i Veinovi , fi. (2007.): *Laboratorijska ispitivanja bentonitnih glina za potrebe projektiranja i izgradnje odlagali-ta*. Rudarsko-geolo-ki-naftni zbornik, volumen 19, str. 99-110.
- ASTM D 854: *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.
- ASTM D 5890: *Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners*.
- ASTM D 5891: *Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Component of Geosynthetic Clay Liners*.



ASTM E691: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.

ISO/TS 17892-4:2004 describes methods for the determination of the particle size distribution of soil samples.

DIN 18132: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.

What is CompaLab doing: <http://www.compalab.org/pages/what-is-compalab/what-is-compalab.html> (22.9.2016.)