

# Dugoročna učinkovitost glinenih geosintetičkih barijera

---

**Kosić, Danijela**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2016**

*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:169:647133>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-03**



*Repository / Repozitorij:*

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Danijela Kosić

**DUGOROČNA UČINKOVITOST  
GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO–GEOLOŠKO–NAFTNI FAKULTET

Danijela Kosić

**DUGOROČNA UČINKOVITOST  
GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Zagreb, 2016.



UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND PETROLEUM  
ENGINEERING

Danijela Kosić

**LONG–TERM EFFICIENCY OF  
GEOSYNTHETIC CLAY BARRIERS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Biljana Kovačević Zelić, PhD

Zagreb, 2016.

*Doktorski rad je izrađen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pod mentorskim vodstvom prof.dr.sc. Biljane Kovačević Zelić.*

Doktorski rad sadrži 128 stranica teksta, 62 slike i 28 tablica.

*...Tebi, koji si vjerovao u mene, kada više ni sama u sebe vjerovala nisam.*

*Tebi, koji si mi osmjehom zbrisao tamu s lica.*

*Tebi, koji si dao svoju radost i preuzeo moj teret.*

*Tebi, čija su mi ljubav i osmijeh dali krila za let.*

*Tebi, kojem ni u ovom, ni u slijedećem životu neću moći dovoljno zahvaliti...*

*...Ovaj rad posvećujem tebi...*

*Hvala ti, dida.*

## Zahvale

*Ovaj doktorski rad ne bi ugledao svjetlo dana bez nesebične pomoći mnogih divnih ljudi. Zahvale stoga upućujem baš njima.*

*Prvenstveno zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Biljani Kovačević Zelić na stručnom vodstvu prilikom izrade ovog rada. Hvala Vam na susretljivosti, savjetima, podršci i strpljenju, te što ste svoje slobodno vrijeme posvetili poboljšanju ovog rada. Hvala i na riječima potpore svaki put u pravom trenutku.*

*Zahvaljujem članovima povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Marti Mileusnić, prof. dr. sc. Tatjani Rukavini, doc. dr. sc. Dubravku Domitroviću i prof. dr. sc. Gordanu Bedekoviću. Hvala vam na svakom slobodnom trenutku koje ste posvetili nastanku i poboljšanju ovog rada bilo terenskim i laboratorijskim radom bilo stručnim savjetima. Hvala vam i na beskonačnom strpljenju i dobrim žvcima, jer vam surađivati samnom nije bilo lako.*

*Zahvaljujem Evelini, bez čije bi pomoći prvi laboratorijski koraci bili nemogući. Hvala ti na trudu i vremenu koje si uložila u sve ovo. Hvala ti na prijateljstvu, nesebičnom razumijevanju i što sam na tvoju pomoć uvijek mogla računati.*

*Zahvaljujem dr. sc. Michaeli Hruškovej Hasan na stručnim savjetima, te bezrezervnoj pomoći i pruženom znanju. Hvala i na strpljenju koje si pokazala pokušavajući mi objasniti zašto nešto ne treba raditi baš onako kako sam si ja to zamislila.*

*Zahvaljujem gđi. Branki na neizmjerne pomoći i gđi. Nadi koja mi je svojom neiscrpnom energijom odredila takav tempo rada, za koji sam do tada mislila da je neizvediv.*

*Hvala Branetu koji je, uz sve svoje obveze, uskočio u ključnom trenutku i pomogao prilikom ispitivanja.*

*Hvala Karolini na pomoći i potpori, te Želimiru na idejama i sprovođenju istih u djelo.*

*Zahvaljujem prof. Željki Kurelec i Emi Kelin, mag. oec. na savjetima i pomoći tijekom svih ovih godina.*

*Hvala Juliji i Kristini na razumijevanju i potpori. Hvala vam što ste bezpogovorno slušale moja izlaganja vezana uz nastanak ovog rada, iako vas to možda u nekim trenucima i nije zanimalo.*

*Hvala prof. Tatjani Jauk na utrošenom slobodnom vremenu koje je provela u beskonačnom prevođenju.*

*Zahvaljujem Heleni koja je bila u situaciji kao i ja, pa je ovo, htjela to ili ne, prolazila zajedno samnom. Hvala ti na konstruktivnim razgovorima koji su se najčešće odvijali vikendima, praznicima i blagdanima. Hvala ti na razumijevanju, prijateljstvu, pomoći i potpori.*

*Zahvaljujem Hrvatskim vodama bez čijih financijskih sredstava ovo ne bi bilo ostvareno.*

*Zahvaljujem svojoj obitelji i svima onima koji su uvijek, kada je bilo potrebno, bili u blizini, te mi svojim strpljenjem, prijateljstvom i ljubavlju pružili neizmjernu podršku.*





## SAŽETAK

Glinene geosintetičke barijere (GCL) su tvornički proizvedene hidrauličke barijere koje se sastoje od mineralne (bentonitna glina) i geosintetičke komponente (geomembrana ili geotekstil).

Svrha ovog istraživanja bila je utvrditi u kojoj mjeri dolazi do promjene svojstava bentonitne gline nakon ugradnje u završni pokrov odlagališta otpada uzrokovane procesima koji se događaju u tijelu odlagališta otpada, te u njegovom neposrednom okolišu.

Ispitivanja su provedena na ukupno sedamnaest uzoraka nadsloja, dvadeset i četiri uzorka bentonitne gline, te deset uzoraka GCL-a. Dvadeset i tri uzorka bentonitne gline i uzorci nadsloja uzorkovani su s bočnih stranica završnog pokrovnog sustava odlagališta otpada u središnjoj Hrvatskoj u kojem je GCL bio ugrađen tijekom razdoblja od tri do devet godina. Jedan uzorak nije bio ugrađen u odlagalište otpada, pa su sve vrijednosti dobivene njegovim ispitivanjem prikazane kao referentna vrijednost. Isto tako, devet uzoraka GCL-a uzorkovano je s terena, dok rezultati uzorka koji nije bio ugrađen u odlagalište otpada predstavljaju referentnu vrijednost.

Ispitivanjem nadsloja dobivene su vrijednosti njegove debljine, vlažnosti, gustoće i granulometrijskog sastava. Rezultati dobiveni fizičkim, kemijskim i mineraloškim ispitivanjima, te ispitivanjima indeksnih pokazatelja bentonitne gline, pokazali su kako je kod uzoraka bentonitne gline došlo do promjene svojstava u odnosu na referentni uzorak tijekom dugotrajnog boravka u odlagalištu otpada. Osim toga, ispitivanja hidrauličke propusnosti provedena su kako bi se istražilo da li je i u kojoj mjeri smanjenja učinkovitost GCL-a kao brtvene barijere te da bi se istražilo postojanje korelacijskih veza između indeksnih pokazatelja i hidrauličke propusnosti.

Utvrđeno je kako na promjenu svojstava bentonitne gline utječu kvaliteta izgradnja završnog pokrovnog sustava, prvenstveno debljina, vlažnost nadsloja i njegov granulometrijski sastav, te godina ugradnje uzorka, odnosno vrijeme koje je bentonitna glina provela u odlagalištu otpada. Osim toga, na promjene svojstava utječu još i fizički, kemijski i mineralni sastav bentonitne gline, te uvjeti koji se javljaju u tijelu odlagališta.

Osim što je ispitivanjima dokazano kako je došlo do degradacije indeksnih svojstava bentonitne gline (bubrenje, upijanje, indeks gubitka fluida) tijekom dugotrajnog korištenja u

odlagalištima otpada, uočeno je također kako srednje vrijednosti određenog indeksnog pokazatelja, kao i odstupanja od srednje vrijednosti variraju ovisno o godini ugradnje. Ispitivanja su pokazala da relativno konzistentna svojstva imaju uzorci ugrađivani 2004. godine, veća odstupanja primjetna su za uzorke ugrađene tijekom 2010. godine, dok se najveća odstupanja javljaju kod uzoraka ugrađenih tijekom 2009. godine. Radi toga se nije mogla uspostaviti jedinstvena veza promjene svojstava s vremenom ugradnje. Međutim, utvrđeno je kako je mogući razlog takvoj nekonzistentnosti nejednoliki sastav bentonitne gline koja se koristila prilikom izrade GCL-a koji je ugrađen u odlagalište. Usprkos navedenom, promjene koje su se dogodile u bentonitnoj glini tijekom vremena proteklog od ugradnje nisu velike, tako da ona, a time i GCL još uvijek pokazuju zadovoljavajuće svojstvo brtvljenja u skladu s preporukama koje se primjenjuju za barijere u pokrovnom zaštitnom sustavu. Samo je na nekoliko lokacija uočena značajnija promjena hidrauličkih svojstava GCL-a, koja je redovito bila povezana s neadekvatnim slojem za zaštitu, bilo da je riječ o njegovoj debljini ili fizičkim svojstvima. To je uzrokovalo pojačano isušivanje i veće promjene hidrauličkih svojstava GCL-a koje su bile to izraženije što je konsolidacijsko naprezanje bilo manje.

Nadalje, u radu su obrađene i veze uzajamne ovisnosti (korelacijske veze) između indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a. Kako je hidraulička propusnost najvažniji parametar za projektiranje brtvenih barijera, time je omogućena jednostavna i brza procedura za detekciju potencijalno problematičnih zona, te procjenu dugoročne učinkovitosti GCL-a koja se temelji na provedbi većeg broja jednostavnih i isplativih pokusa.

Ključne riječi: bentonitna glina, geosintetička glinena komponenta, odlagalište otpada, dugoročna učinkovitost

## **SUMMARY**

Geosynthetic clay liners (GCLs) are factory-manufactured hydraulic barriers consisting of mineral (bentonite) and geosynthetic components (geomembrane or geotextile).

The purpose of the study was to identify the extent of change in bentonite clay properties when built into the final cover of the landfill brought about by the processes taking place within the landfill body and in its immediate surroundings.

Analyses were made on a total of 17 samples of the cover soil, 24 samples of bentonite clay and 10 samples of GCLs. 23 samples of bentonite clay and samples of the cover soil were collected from the sides of the final cover system of a landfill in central Croatia into which GCL had been built over a period of three to nine years. One sample was not built into the landfill, which is why all the values obtained by its analysis are presented as a reference value. Likewise, nine GCL samples were collected from the landfill, while the results of the sample which wasn't built into the landfill represent a reference value.

Analysing the cover soil, the values of its depth, moisture content, density and grain size distribution were obtained. The results obtained from physical, chemical and mineralogical analyses and analyses of index properties of bentonite clay show that compared to the reference sample the properties of the sampled bentonite clay have changed during the long period spent in the landfill. In addition to that, hydraulic conductivity was analysed in order to investigate whether and to what extent the efficiency of GCL as a hydraulic barrier has decreased and to investigate whether there is a correlation between index properties and hydraulic conductivity.

It was identified that the change of bentonite clay properties is affected by the quality of construction of the final cover system, primarily the depth and moisture content of the overburden and its grain size distribution, and the year when the sample was built in, i.e. the period during which the bentonite clay has been present in the landfill. In addition to that, the properties change due to physical, chemical and mineralogical composition of bentonite clay, and the conditions taking place in the landfill body.

The analyses not only prove that bentonite clay properties (swelling, absorption, fluid loss index) have degraded during long-time use in landfills, but also show that both the mean values of a specific index property and deviations from the mean value vary depending on the

year of building in. Analyses show that the samples built in during 2004 have relatively consistent properties; stronger deviations are noticed in the samples built in during 2010; while the largest deviations are present in the samples built in during 2009. This was the reason why it was not possible to establish a unique correlation between the change in properties and the time of construction. However, it has been identified that the potential cause for such inconsistency is probably an uneven composition of bentonite clay used during the manufacture of GCL built into the landfill. Despite that, the changes that had taken place in bentonite clay during the time elapsed since construction are not substantial, which is why bentonite clay and consequently GCL show a still satisfactory sealing property in accordance with the recommendations applied for barriers in the final cover system. A more significant change of hydraulic properties of GCL has been observed only in a few locations and was as a rule associated with an inadequate protective layer, either its depth or physical properties. Thus has led to more intensive drying-out and stronger change in hydraulic properties of GCL, which grew more marked as consolidation stress decreased.

Furthermore, the paper also addresses interdependencies (correlations) between index properties of bentonite clay and the hydraulic conductivity of GCL. Since hydraulic conductivity is the most important parameter in the design of hydraulic barriers, this provides a simple and fast procedure to detect potentially problematic zones and assess long-term efficiency of GCLs based on implementation of a bigger number of simple and cost-effective tests.

Key words: bentonite clay, geosynthetic clay barriers, waste landfill, long-term efficiency

## SADRŽAJ

1	UVOD .....	1
2	ZAŠTITNI SUSTAVI ODLAGALIŠTA OTPADA.....	6
3	GLINENE GEOSINTETIČKE BARIJERE (GCL).....	10
4	BENTONITNA GLINA.....	14
5	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	21
6	PLAN I PROGRAM ISTRAŽIVANJA.....	27
7	METODE ISTRAŽIVANJA SVOJSTAVA BENTONITNE GLINE I GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA.....	35
7.1	Fizičke analize bentonitne gline.....	35
7.2	Kemijske analize bentonitne gline .....	35
7.2.1	Masena spektrometrija s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS).....	35
7.2.2	XRF spektrometrija .....	36
7.2.3	Određivanje pH .....	36
7.2.4	Određivanje električne vodljivosti .....	36
7.3	Mineraloške analize .....	37
7.3.1	Određivanje mineralnog sastava primjenom rendgenske difrakcije na prahu ...	37
7.3.2	Određivanje kapaciteta kationske zamjene (CEC).....	38
7.4	Određivanje indeksnih pokazatelja bentonitne gline .....	39
7.4.1	Određivanje granice tečenja .....	39
7.4.2	Određivanje granice plastičnosti .....	40
7.4.3	Određivanje volumena slobodnog bubrenja.....	41
7.4.4	Određivanje sposobnosti upijanja vode.....	42

7.4.5	Određivanje indeksa gubitka fluida.....	44
7.5	Određivanje hidrauličke propusnosti GCL-a .....	45
8	REZULTATI ISPITIVANJA PROVEDENIH NA UZORCIMA NADSLOJA I REFERENTNOM UZORKU BENTONITNE GLINE .....	46
8.1	Rezultati ispitivanja uzoraka nadsloja.....	46
8.2	Rezultati ispitivanja referentnog uzorka bentonitne gline .....	53
9	REZULTATI ISPITIVANJA FIZIČKIH, KEMIJSKIH I MINERALOŠKIH SVOJSTAVA UZORKOVANE BENTONITNE GLINE.....	55
9.1	Analiza fizičkih svojstava ispitivanih uzoraka bentonitne gline.....	57
9.1.1	Boja uzoraka.....	57
9.1.2	Gustoća i vlažnost uzoraka.....	60
9.2	Analiza kemijskih svojstava ispitivanih uzoraka .....	63
9.2.1	pH i električna vodljivost .....	63
9.2.2	Kemijski sastav .....	65
9.3	Analiza mineralnih svojstava ispitivanih uzoraka .....	66
9.3.1	Kapacitet kationske zamjene (CEC) .....	66
9.3.2	Mineralni sastav .....	68
10	REZULTATI ISPITIVANJA INDEKSNIH POKAZATELJA UZORKOVANE BENTONITNE GLINE.....	72
10.1	Atterbergove granice.....	72
10.2	Volumen slobodnog bubrenja .....	78
10.3	Sposobnost upijanja vode.....	81
10.4	Indeks gubitka fluida.....	91
11	REZULTATI ISPITIVANJA HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA.....	95
12	OVISNOST HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA O INDEKSNIM POKAZATELJIMA BENTONITNE GLINE .....	98

12.1	Utjecaj granice tečenja bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a .....	99
12.2	Utjecaj indeksa plastičnosti bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a ..	101
12.3	Utjecaj volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a	104
12.4	Utjecaj sposobnosti upijanja vode bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a	107
12.5	Utjecaj indeksa gubitka fluida bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a	110
13	ZAKLJUČAK .....	115
	LITERATURA .....	123

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

KAZALO OZNAKA

KAZALO KRATICA

ŽIVOTOPIS

# 1 UVOD

Prema Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagalište otpada (NN 114/15) odlagalište otpada je: *"građevina namijenjena odlaganju otpada na površinu ili pod zemlju (podzemno odlagalište), uključujući:*

- *interno odlagalište otpada na kojem proizvođač otpada odlaže svoj otpad na samom mjestu nastanka,*
- *stalno odlagalište otpada ili njegov dio, koje se može koristiti za privremeno skladištenje otpada (na primjer za razdoblje dulje od jedne godine),*
- *iskorištene površinske kopove (eksploatacijska polja) ili njihove iskorištene dijelove nastale rudarskom eksploatacijom i/ili istraživanjima koji su pogodni za odlaganje otpada sukladno ovom Pravilniku i koji su predviđeni i mogući sukladno posebnim propisima koji reguliraju rudarstvo."*

Pored ove zakonodavne definicije, u praktičnom inženjerstvu primjerenija je definicija koja pod odlagalištem podrazumijeva *"objekt koji je izgrađen i opremljen za trajno, kontrolirano, organizirano i sigurno odlaganje otpada"* (Milanović 1992).

Kako se u odlagališta odlažu različite vrste otpada tako je svako odlagalište potrebno zasebno projektirati uvažavajući općeniti zakonski okvir i specifičnosti pojedinog odlagališta. Pod tim se podrazumijeva da s jedne strane treba ograničiti negativne utjecaje odlagališta na okoliš (površinske i podzemne vode, tlo, zrak, flora i fauna) i ljudsko zdravlje, a s druge strane odlagalište treba zaštititi od mogućih vanjskih negativnih utjecaja.

Zbog navedenog svako odlagalište otpada sastoji se od četiri osnovna elementa, a to su:

- temeljni zaštitni sustav,
- tijelo odlagališta,
- drenažni sustavi i
- završni pokrovni sustav.

Uloga temeljnog zaštitnog sustava je spriječiti procjeđivanje procjedne tekućine iz tijela odlagališta, te onečišćenje i zagađenje okolnog tla i podzemnih voda. Da bi se to osiguralo temeljni zaštitni sloj mora biti izgrađen od materijala koji je nepropustan, otporan na različite utjecaje (hidrauličke, kemijske, mehaničke), te koji zadovoljava uvijete koji su propisani pravilnicima i zakonima koji vrijede prilikom izgradnje odlagališta. Najčešće je temeljni zaštitni sustav izgrađen od glinovitog materijala (gline), te kompozitnog brtvenog sustava



kojeg može činiti glina ili glinena geosintetička barijera (GCL) u kombinaciji s geomembranom.

Drenažni sustav najčešće je izgrađen od drenažnog i filtarskog sloja, te drenažne cijevi koji služi za prikupljanje i odvodnju filtrata iz odlagališta.

Glavna uloga završnog pokrovnog sustava je spriječiti ulazak atmosferilija i oborinske vode u tijelo odlagališta, te spriječiti prodor plinova i tekućine iz tijela odlagališta u okoliš. Što se izvedbe završnog pokrovnog sustava tiče, njegov vertikalni presjek može biti sličan vertikalnom presjeku temeljnog brtvenog sustava, jer se drenažni i brtveni slojevi u pravilu rade od sličnog materijala. Razlika postoji i očituje se u tome što je završni pokrovni sustav izložen izmjenama ciklusa vlaženja i sušenja, te smrzavanja i odmrzavanja. Glineni materijal jako je podložan utjecaju navedenih pojava, pri čemu mu se funkcija brtvljenja može smanjiti. Zbog toga se izvedba završnog pokrovnog sustava temelji na upotrebi glinenih geosintetičkih barijera (eng. *Geosynthetic Clay Liner* - GCL-a) koje predstavljaju tvornički načinjenu hidrauličku barijeru koja se sastoji od mineralne (bentonitna glina) i geosintetičke (geomembrana ili geotekstil) komponente. Istraživanja su pokazala da GCL bolje podnosi diferencijalna slijeganja, ima bolju mogućnost samozacjeljenja i manje je podložan promjeni svojstava uslijed izmjene gore navedenih ciklusa u odnosu na sustave bazirane na primjeni brtvene barijere načinjene od slojeva zbijene gline (eng. *Compacted Clay Liner* – CCL) (Znidarčić et al. 1995).

Tijekom životnog vijeka odlagališta završni sustavi izloženi su različitim vanjskim utjecajima (Znidarčić et al. 1995):

- mehaničkim utjecajima koji djeluju na stabilnost odlagališta, a javljaju se kao posljedice raznih deformacija koje se očituju slijeganjima, a ovise o opterećenju od nadsloja, nagibu odlagališta, te izvedbi odlagališta,
- kemijskim utjecajima koji se očituju u vrsti i sastavu filtrata, sastavu odlagališnog plina,
- termičkim utjecajima uslijed izmjene suhih i vlažnih razdoblja, te izmjene ciklusa smrzavanja i odmrzavanja,
- hidrauličkim utjecajima kao što je djelovanje vode ili nekog drugog fluida (eluat, kišnica).

Upravo stoga već se dugo provode ispitivanja trajnosti pojedinih komponenti zaštitnih sustava što će biti detaljnije prikazano u drugom poglavlju za brtvene komponente završnog pokrova. Takva ispitivanja mogu se provoditi na originalnim uzorcima te pomoću pripremljenih ispitnih fluida (eluati) koji do određene mjere simuliraju stvarne uvjete na odlagalištu. Također, neka ispitivanja provode se in-situ, a u ovom radu bit će prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja na uzorcima koji su uzeti sa stvarnog odlagališta odnosno njegovih bočnih stranica gdje su bili ugrađeni od tri do devet godina.

Lokacije na odlagalištu s kojeg su uzorci uzeti odabrane su s ciljem utvrđivanja utjecaja okolišnih uvjeta prisutnih na odlagalištu u različitim fazama njegove izgradnje na određena mineraloška, kemijska, fizičko–mehanička i hidraulička svojstva bentonitne gline.

Svrha istraživanja provedenih u okviru izrade ove disertacije je utvrditi u kojoj mjeri dolazi do promjene svojstava bentonitne gline nakon ugradnje u završni pokrov odlagališta otpada uzrokovane procesima koji se događaju u tijelu odlagališta otpada, te u njegovom neposrednom okolišu.

U okviru istraživanja nizom laboratorijskih ispitivanja će se analizirati uzorci nadsloja uzorkovanih s terena, te uzorci GCL-a iz kojih će biti izdvojena mineralna komponenta odnosno bentonitna glina.

Provedenim ispitivanjima na navedenim uzorcima cilj je utvrditi zadržava li bentonitna glina svoja svojstva (bubrivost, sposobnost upijanja, visoku plastičnost, te malu hidrauličku propusnost) tijekom dugotrajnog korištenja u odlagalištima otpada, te pod kojim uvjetima ona može funkcionirati kao hidraulička brtvena barijera zadovoljavajućih svojstava u odnosu na propisane vrijednosti.

Planirana istraživanja provedena su u fazama:

1. prikupljanje uzoraka na terenu:
  - prikupljanje uzoraka nadsloja,
  - prikupljanje uzoraka GCL-a,
2. obrada uzoraka s terena koja je provedena:
  - izdvajanjem bentonitne gline iz GCL-a,
  - određivanjem nultog stanja uzoraka,
3. laboratorijska ispitivanja kojim su obuhvaćena:
  - određivanja svojstava nadsloja (vlažnost, granulometrijski sastav, gustoća),

- određivanja svojstava bentonitne gline (indeksni pokazatelji) i GCL-a (hidraulička propusnost), te

#### 4. analiza rezultata.

Istraživanjem je trebalo provjeriti sljedeće hipoteze:

- debljina i vlažnost nadsloja utječu na svojstva GCL-a, te je moguće odrediti njihovu graničnu vrijednost koja osigurava dugoročnu učinkovitost GCL-a,
- moguće je odrediti ovisnost indeksnih pokazatelje i hidrauličke propusnosti bentonitne gline o vremenu provedenom u odlagalištu otpada,
- moguće je definirati proceduru za ocjenu učinkovitosti GCL-a na temelju jednostavnih i brzih laboratorijskih ispitivanja.

Kako bi se utvrdilo u kojoj mjeri završni pokrovni sustav stvarno štiti okoliš od onečišćenja i predstavlja li odgovarajuću hidrauličku barijeru oborinskim i površinskim vodama na putu prema tijelu odlagališta, provođenjem navedenog plana i programa ispitivanja, cilj ovog rada je dati uvid u brtvena svojstva navedenog sustava. Sva su svojstva brtvenih materijala (mineraloška, fizička i hidraulička) propisana normama i preporukama, a usporedba izmjerenih i preporučenih ili propisanih svojstava omogućila je ocjenu učinkovitosti završnog pokrovnog sustava na jednom stvarnom odlagalištu otpada.

Za definiranje *učinkovitosti* GCL-a poslužila je norma EN ISO 10318 u kojoj se dugoročna učinkovitost definira kao *"Sposobnost proizvoda da odoli slabljenju svojstava prouzročenih trošenjem, mehaničkim, kemijskim, biološkim ili drugim vremenski ovisnim efektima, djelovanjima tijekom vremena, i zadržavanje svojstava potrebnih za ostvarenje odgovarajuće funkcije tijekom radnog vijeka."*<sup>1</sup>

Disertacija se sastoji od trinaest poglavlja.

U uvodnom poglavlju ukratko je definiran pojam odlagališta otpada, prikazan je plan i program ispitivanja, te hipoteze i očekivani znanstveni doprinos.

Drugo poglavlje daje osvrt na projektiranje odlagališta otpada.

Poglavlje tri donosi opis glinenih geosintetičkih barijera i njihove primjene.

Četvrto poglavlje odnosi se na bentonitnu glinu i njezina mineraloška i kemijska svojstva.

---

<sup>1</sup> Preuzeto iz Mulabdić & Bošnjaković 2011

Poglavlje broj pet daje detaljan pregled literature u kojima su prikazana provedena laboratorijska ispitivanja koja ukazuju na promjenu svojstava bentonitne gline i GCL-a koji su bili ugrađeni u završne pokrovne sustave odlagališta otpada u odnosu na početna svojstva prije ugradnje.

U šestom poglavlje dan je pregled plana i programa istraživanja, opisan je postupak izbora lokacija za uzimanja uzoraka na terenu, vrste uzoraka te predviđena ispitivanja i metode ispitivanja potrebnih za karakterizaciju bentonitne gline, GCL-a i materijala u zaštitnom pokrovu. Navedene su i preporuke kojima su definirana poželjna svojstva bentonitnih glina koja garantiraju njihovu primjenjivost za proizvodnju GCL-a i djelotvornost u brtvenim barijerama.

U poglavlju broj sedam detaljnije su opisane metode koje su se koristile prilikom određivanja mineraloških, kemijskih i fizičkih svojstava bentonitne gline, te opisi metoda korištenih prilikom određivanja indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a.

Osmo poglavlje obuhvaća prikaz rezultata ispitivanja uzoraka izvađenih iz nadsloja, kao i rezultata ispitivanja referentnog uzorka bentonitne gline.

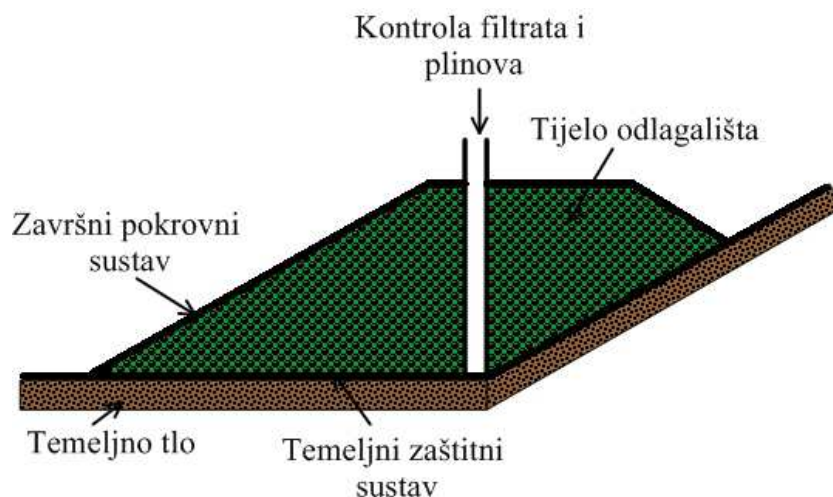
U devetom poglavlju prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja svojstava bentonitne gline uzorkovane s terena, a obuhvaćaju ispitivanja mineraloških, kemijskih i fizičkih svojstava. Deseto poglavlje obuhvaća prikaz rezultata ispitivanja Atterbergovih granica i indeksnih pokazatelja bentonitne gline uzorkovane s terena.

U jedanaestom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja hidrauličke propusnosti GCL-a, dok je u dvanaestom poglavlju prikazana ovisnost hidrauličke propusnosti GCL-a o indeksnim pokazateljima bentonitne gline.

U trinaestom poglavlju zbirno su prikazani svi zaključci proistekli iz istraživanja, te generalna ocjena može li i u kojim uvjetima GCL predstavljati dugoročno učinkovitu hidrauličku barijeru.

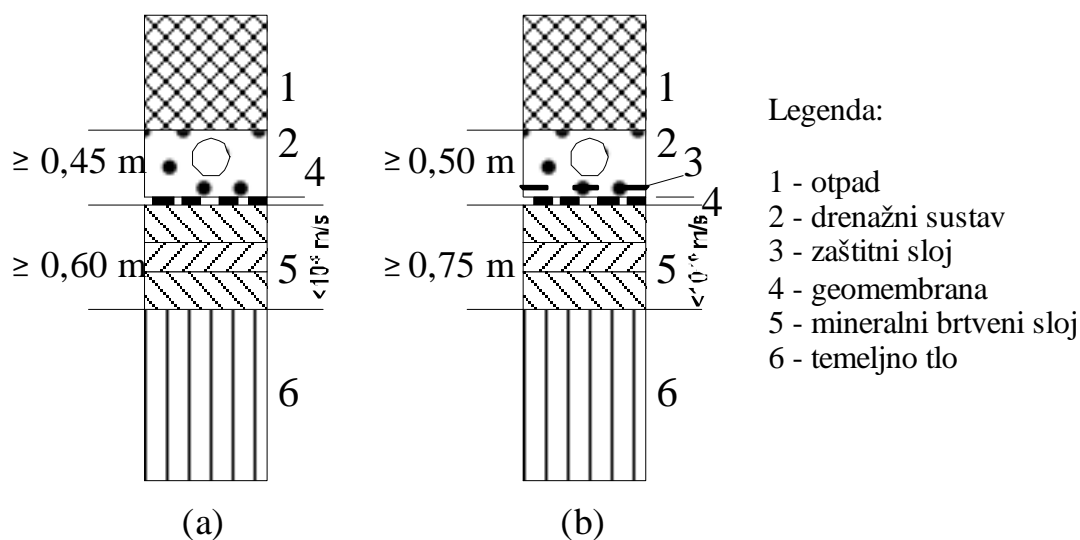
## 2 ZAŠTITNI SUSTAVI ODLAGALIŠTA OTPADA

Već su u uvodnom poglavlju spomenuti osnovni elementi odlagališta otpada kojeg čine zaštitni sustavi (temeljni zaštitni sustav, drenažni sustav, završni pokrovni sustav), te tijelo odlagališta (slika 2-1).

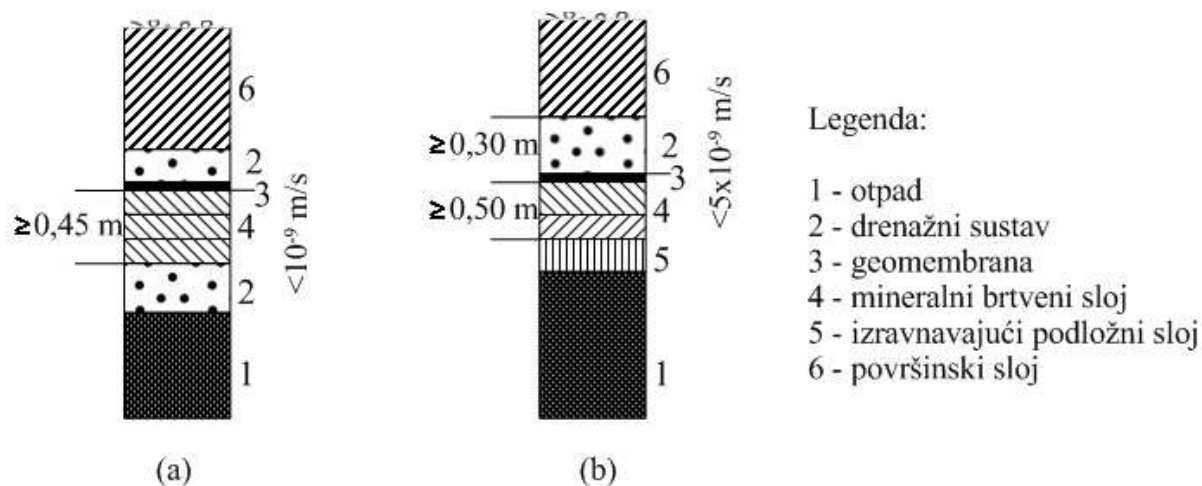


**Slika 2-1** Osnovni elementi odlagališta otpada (modificirano prema Znidarčić et al. 1995)

U svijetu se zaštitni sustavi projektiraju na različite načine. Slika 2-2 prikazuje usporedbu izvedbe temeljnog zaštitnog sustava koja je uobičajena u Njemačkoj (i većini europskih zemalja) i Sjedinjenim Američkim Državama dok su na slici 2-3 prikazane izvedbe završnog pokrovnog sustava.



**Slika 2-2** Minimalni zahtjevi za temeljni zaštitni sustav: (a) u SAD-u, (b) u Njemačkoj (modificirano prema van Impe 1998)



**Slika 2-3** Minimalni zahtjevi za završni pokrovni sustav: (a) u SAD-u, (b) u Njemačkoj (modificirano prema van Impe 1998)

U skladu s važećim propisima u Republici Hrvatskoj u tablici 2-1 prikazani su zahtjevi za površinsko brtvljenje prema Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima za odlagalište otpada (NN 114/15).

**Tablica 2-1** Zahtjevi za površinsko brtvljenje u Republici Hrvatskoj (NN 114/15)

Element odlagališta/Vrsta odlagališta	Odlagalište neopasnog otpada	Odlagalište opasnog otpada
Sloj za otplinjavanje	zahtijeva se	ne zahtijeva se
Nepropusni umjetni brtveni sloj	ne zahtijeva se	zahtijeva se
Nepropusni mineralni sloj	zahtijeva se	zahtijeva se
Drenažni sloj > 0,5 metara	zahtijeva se	zahtijeva se
Rekultivacijski sloj > 1 metra	zahtijeva se	zahtijeva se

Prema tablici 2-1 za odlagalište neopasnog otpada, u koje pripada odlagalište s kojega su uzeti uzorci, ne zahtijeva se nepropusni umjetni brtveni sloj, ali se zahtijeva nepropusni mineralni sloj. Pri spomenu nepropusnog mineralnog sloja prilikom projektiranja odlagališta do osamdesetih godina prošlog stoljeća podrazumijevala se upotreba zbijene gline (eng. *Compacted Clay Liner* – CCL) koja je trebala zadovoljiti određena svojstva. Međutim,

posljednjih tridesetak godina umjesto upotrebe CCL-a, rjeđe u temeljnom zaštitnom, a vrlo često u završnom pokrovnom sustavu omogućena je upotreba glinenih geosintetičkih barijera (GCL-a). Jedini uvjet koji GCL mora zadovoljiti je da pokaže ista i/ili bolja svojstva nego što ih ima CCL (Bouazza 2002; Sunil 2015).

U tablici 2-2 prikazane su prednosti i nedostaci upotrebe GCL-a kao komponente završnog pokrovnog sustava odlagališta otpada.

**Tablica 2-2** Prednosti i nedostaci GCL-a (Bouazza 2002)

<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
Brzo postavljanje	Niska posmična čvrstoća
Niska hidraulička propusnost	Moguća oštećenja prilikom i nakon postavljanja
Podnosi velika slijeganja	Moguć gubitak bentonita prilikom postavljanja
Odlična sposobnost samozacjeljenja	Podložan ionskoj izmjeni
Otporan na cikluse smrzavanje - odmrzavanje	Podložan isušivanju ukoliko nije pravilno prekriven
Hidratizirani bentonitni tepih je učinkovita plinska barijera	Slabo hidratiziran bentonitni tepih je plinopropustan
Mala debljina - veći volumen odlagališta	Mala debljina može uzrokovati osjetljivost na mehanička oštećenja

Iz raspoložive dokumentacije tvrtke ECOINA d.o.o. iz Zagreba, za odabrano odlagalište (travanj 2014. godine), može se uočiti da je završni pokrov izveden u dvije varijante: jednoj za pokrov na vrhu, a drugoj za pokrov na bočnim stranicama odlagališta. Ispitivanja u ovom radu provedena su samo na uzorcima uzetim s bočnih stranica, pa će ovdje biti navedeni slojevi i vrste materijala na bočnim stranicama odlagališta. Presjek slojeva je preuzet iz spomenute dokumentacije, te prikazan od najvišeg prema nižim slojevima:

- gornji sloj tla (visina 0,15 m),
- sloj protiv smrzavanja (visina 0,85 m),
- netkani/separacijski geotekstil,
- drenažni sloj (visina 0,5 m),
- netkani/separacijski geotekstil,
- sloj od gline (visina 0,5 m),

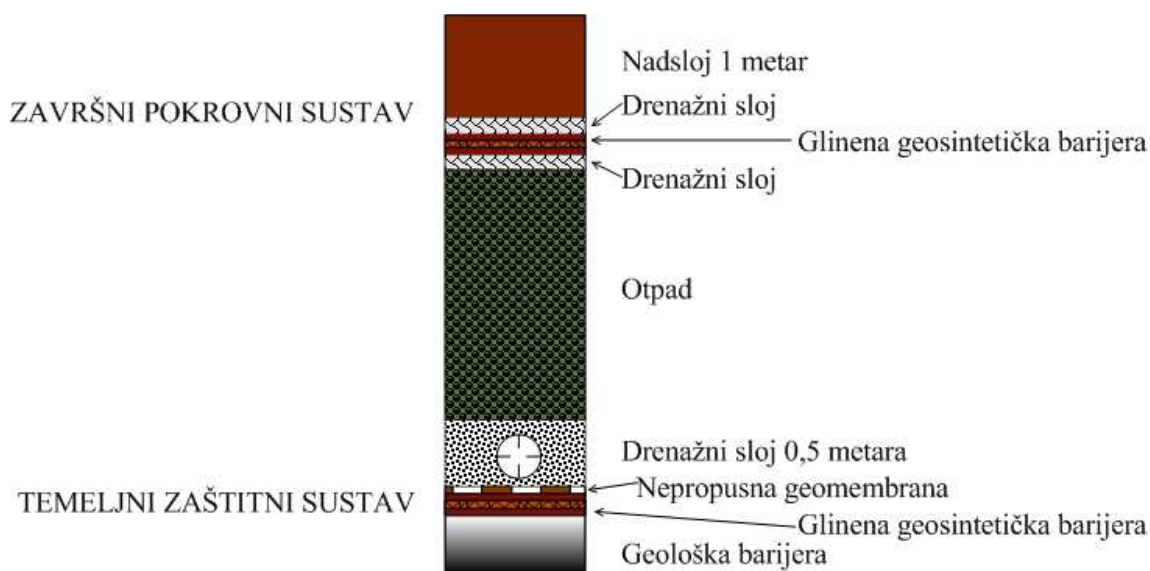
- sloj za otplinjavanje (visina 0,5 m)
- međupokrov (dnevni pokrov).

Međutim, prilikom uzorkovanja uočeno je da je drenažni sloj prilikom izgradnje odlagališta zamijenjen kompozitnim drenažnim slojem debljine 0,01 metar, a predviđeni sloj gline zamijenjen je glinenom geosintetičkom barijerom debljine približno 0,006 metara.

Prema tome, završni pokrovni sustav na bočnim stranicama izveden je kako slijedi:

- prekrivni sloj (0,15 m),
- sloj protiv smrzavanja (0,85 m),
- kompozitni drenažni sloj (0,010 m),
- bentonitni tepih (0,006 m),
- kompozitni drenažni sloj (0,01 m),
- međupokrovni sloj (0,3 m).

Može se zaključiti da se na odlagalištu otpada u središnjoj Hrvatskoj pri izvedbi završnog pokrovnog sustava, na bočnim stranicama odlagališta otpada, koristilo rješenje s većom uporabom geosintetika u odnosu na konvencionalni sustav s većom uporabom zemljanih materijala pri izradi drenažnih i brtvenih slojeva kao što je prikazano na slici 2-4, što predstavlja uobičajenu praksu u posljednje vrijeme posvuda u svijetu.



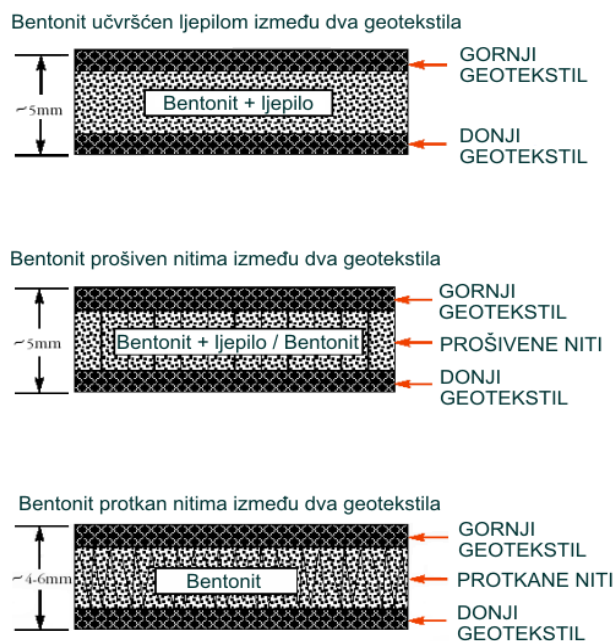
**Slika 2-4** Izvedba zaštitnih sustava na odlagalištu neopasnog otpada



### 3 GLINENE GEOSINTETIČKE BARIJERE (GCL)

Brtni sustavi u odlagalištima otpada mogu biti izvedeni od zbijene gline (eng. *Compact Clay Liner* – CCL) određenih svojstava, upotrebom glinenih geosintetičkih barijera (eng. *Geosynthetic Clay Barrier* – GCL ili *Clay Geosynthetic Barrier* – GBR-C), upotrebom tala poboljšanih bentonitom (eng. *Bentonite Enhanced Soil* - BES) ili upotrebom mješavine koju čine glina i polimeri. Bilo da se upotrebljava u temeljnom ili zaštitnom pokrovnom sustavu GCL mora imati određene točno propisane karakteristike. Ugradbom u temeljni zaštitni sustav on mora zadovoljavati propisana svojstva hidrauličke propusnosti, kemijske kompatibilnosti, sposobnosti upijanja, te otpornosti na djelovanje različitih kemijskih tvari i termičkih djelovanja. U pokrovnom završnom sustavu GCL mora imati odgovarajuću kontaktnu i unutarnju čvrstoću, mora biti otporan na cikluse uzrokovane izmjenom suhih i vlažnih razdoblja, te izmjenama niskih i visokih temperatura (Bouazza et al. 2002; Kovačević Zelić et al. 2004).

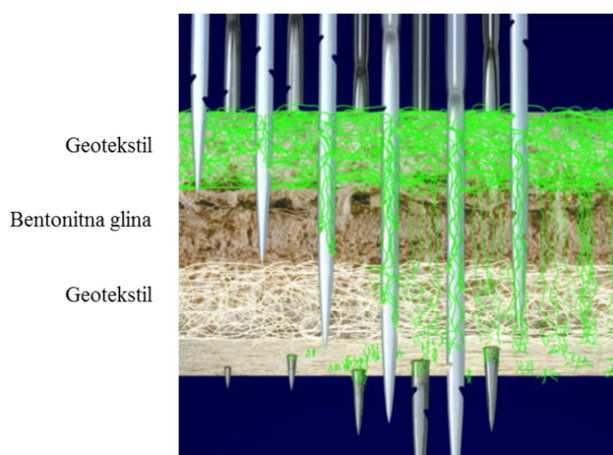
Glinene geosintetičke barijere (GCL) su tvornički proizvedene hidrauličke barijere sastavljene od mineralne (bentonitna glina) komponente male debljine (približno pet milimetara) koja se nalazi između dvije geosintetičke komponente (geomembrana ili geotekstil) kako je prikazano na slici 3-1.



**Slika 3-1** Različite izvedbe glinenih geosintetičkih barijera (prema Koerner & Daniel 1997)

Razlika između pojedinih izvedbi GCL-a je u načinu spajanja geosintetičkih slojeva (geotekstila) koji predstavljaju nosivu komponentu i bentonitne gline koja čini nepropusnu komponentu, a svojim iznimnim svojstvima osigurava funkciju brtvljenja. Prema tome bentonitni tepisi mogu biti armirani prošivenim ili protkanim tekstilnim nitima.

Prema Marshallu (2002) iglanje i prošivanje su metode kojima se glina zadržava između dva geotekstila, čime se povećava i unutarnja posmična čvrstoća, što ovisi o gustoći prošivanja. Na slici 3-2 može se vidjeti izvedba GCL-a iglanjem.



**Slika 3-2** Način vezivanja bentonitne gline i geotekstila iglanjem (protkivanjem)

[http://www.civilmastergroup.com/ge\\_GBR-C.html](http://www.civilmastergroup.com/ge_GBR-C.html), preuzeto (21.3.2016.)

Upotrebljavaju se još i nearmirane glinene geosintetičke barijere kod kojih je mineralna komponenta adhezijski vezana za geosintetičku komponentu, a čija je upotreba ograničena na ravne podloge i kosine manjih nagiba.

Glinene geosintetičke barijere proizvedene ranih osamdesetih godina prošlog stoljeća prvotno su upotrebljavane kao vanjska hidroizolacija prilikom temeljenja. EPA (eng. *Environmental Protection Agency*) je 1983. godine u svrhu zaštite okoliša propisala zahtjeve koji moraju biti zadovoljeni prilikom izgradnje odlagališta otpada. Preporuke su da odlagalište treba biti sagrađeno na podlozi od nepropusne gline ili umjetnom materijalu koji će spriječiti migraciju procjednih otpadnih voda (Buell & Girard 1994<sup>2</sup>). Prva primjena na odlagalištima otpada

<sup>2</sup> Preuzeto iz Sunil 2015

zabilježena je krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća u Sjedinjenim Američkim Državama (Carson 1995).

Pored upotrebe na odlagalištima otpada, glinene geosintetičke barijere upotrebljavaju se kao hidraulička barijera unutar različitih inženjerskih hidrotehničkih zahvata (kanali, nasipi, lagune) i prometnica (ceste, željeznice, zračne luke). Primjena bentonitne gline kao mineralne komponente GCL-a posljednjih desetljeća raste. Zbog svojih svojstava kao što je pojavnost bubrenja, koja je naročito izražena kod natrijskih bentonitnih glina, velike sposobnosti upijanja vode, male hidrauličke i plinske propusnosti, te osim što je važan sastavni dio glinenih geosintetičkih barijera one se upotrebljavaju i kao samostalni brtveni slojevi u različitim inženjerskim zahvatima u okolišu. Koriste se u hidrotehničkom i geotehničkom inženjerstvu okoliša, transportnom inženjerstvu, u naftnoj industriji za odstranjivanje nečistoća, te pročišćavanje otpadnih voda (Slovenec & Bermanec 2003).

Ovisno o upotrebi i mjestu ugradnje, glinene geosintetičke barijere prilikom ugradnje u odlagalište otpada moraju zadovoljiti određene tehničke uvjete. U završnim pokrovnim sustavima na odlagalištima otpada glinene geosintetičke barijere se ugrađuju s ciljem sprječavanja prodora oborinske vode u odlagalište otpada kao i sprječavanje izlaska odlagališnih plinova iz tijela odlagališta u okoliš. Tekućina koja se s površine procjeđuje i ulazi u završni pokrovni sustav je najčešće voda koja sadrži otopljene organske i neorganske tvari. Odlagališni plin (bioplin) sadrži osim hlapivih organskih komponenti, dušikovog oksida, vodikovog sulfida i ugljikovog monoksida, kao glavne komponente metan i ugljični dioksid koji su glavni uzročnici pojave "efekta staklenika" (Rowe 2011).

Nakon ugradnje GCL-a u završni pokrovni sustav odlagališta otpada, uslijed djelovanja atmosferilija, vrste i debljine pokrovnih naslaga, te duljine vremenskog razdoblja izloženosti spomenutim faktorima, može doći do promjene indeksnih pokazatelja bentonitne gline. Osim toga, ti isti utjecajni faktori uzrokuju i promjenu hidrauličke propusnosti GCL-a. Da bismo utvrdili je li došlo do promjene svojstava bentonitne gline provode se razna laboratorijska ispitivanja: određivanje mineraloških i kemijskih svojstava, ispitivanja indeksnih pokazatelja (volumen slobodnog bubrenja, sposobnost upijanja vode i Atterbergove granice), te ispitivanja hidrauličke propusnosti GCL-a.

Promjenu hidrauličke propusnosti može uzrokovati nedostatna visina nadsloja, vrsta nadsloja kroz koji voda prolazi do brtvenih slojeva pokrovnog zaštitnog sustava, promjene temperature

koje se očituju izmjenom suhих i vlažnih razdoblja, izmjena ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, te utjecaj korijenja biljaka koje se nalaze na površini odlagališta, a koji mogu dovesti do pojave pukotina u GCL-u. Nadalje, do promjene hidrauličke propusnosti može doći kationskom zamjenom u bentonitnoj glini koja čini mineralnu komponentu GCL-a. Bentonitna glina u kontaktu s oborinskom vodom koja sadrži različite otopljene spojeve mijenja svoj mineralni sastav, čime dolazi i do promjene njenih svojstava. Zato se velika pozornost posvećuje istraživanju interakcije između bentonitne gline i kationa koji se nalaze u vodi koja ulazi u odlagalište, jer njihovo međudjelovanje ima utjecaj na hidrauličku propusnost GCL-a. Vrijednosti hidrauličke propusnosti GCL-a koje se kreću u originalnom stanju između  $1 \cdot 10^{-11} < k < 5 \cdot 10^{-11}$  m/s, kationskom zamjenom koja je posljedica međusobnog djelovanja bentonitne gline i procjedne tekućine, može doći do povećanja hidrauličke propusnosti do  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s (Petrov & Rowe 1997). Stoga, prilikom projektiranja treba paziti na izvedbu cijelog odlagališta, a ne svake komponente posebno.

U ovom radu će biti prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja mineraloškog i kemijskog sastava tla i indeksnih pokazatelja bentonitne gline, te hidrauličke propusnosti GCL-a, čija je svrha bila utvrditi je li i u kolikoj mjeri došlo do promjene svojstava na uzorcima mineralne komponente GCL-a koji su bili ugrađeni na jedno odlagalište otpada u razdoblju od približno tri do devet godina.

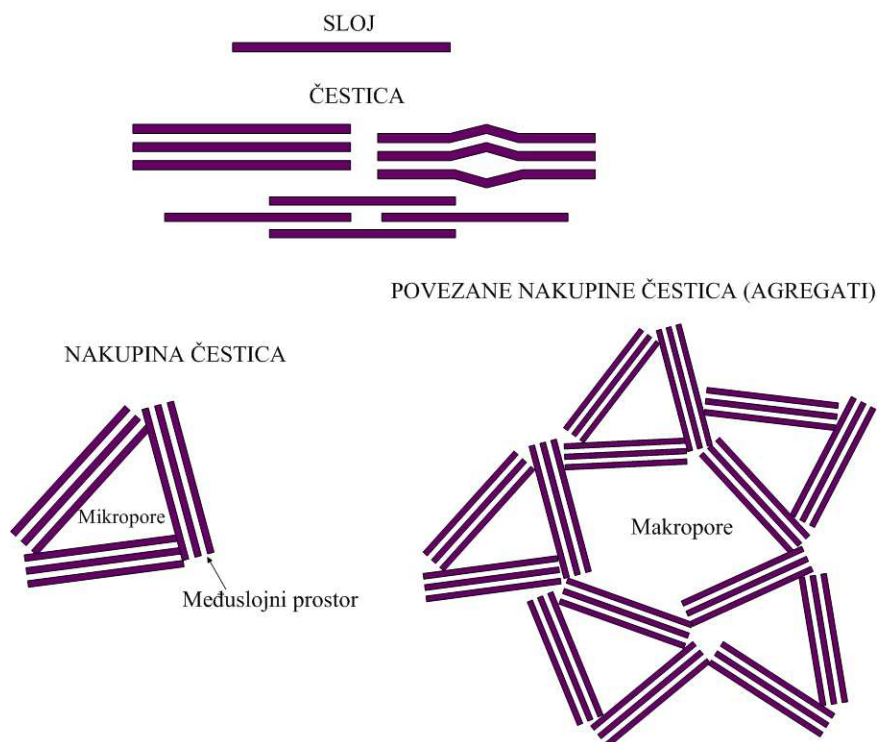
## 4 BENTONITNA GLINA

Pojam „glina“ ima više različitih značenja. Jedno od značenja vezano je uz veličinu čestica, te se glinom smatraju čestice veličine manje od 2 mikrometra.

U petrologiji, glina je nevezana sedimentna stijena čije su čestice pretežno manje od 2 mikrometra. Te stijene uglavnom se i sastoje od minerala glina, no sadrže i druge minerale (npr. kvarc, karbonate, feldspate, hidrokside) (Bergaya & Lagaly 2006).

U mineralogiji, glinama se smatra grupa minerala koji spadaju u filosilikate (listićaste su strukture), te nastaju uglavnom trošenjem primarnih minerala. Ti sekundarni minerali najčešće su vrlo sitni, a time i velike specifične površine i uglavnom veličinom odgovaraju česticama gline prethodno spomenute veličine. U minerale glina spadaju smektiti (npr. montmorillonit), vermikuliti, illit, kaolinski minerali (npr. kaolinit), kloriti. Slika 4-1 prikazuje čestice te nakupine čestica (agregate) minerala glina. Čestice se povezuju u nakupine čestica, pri čemu prostor između nakupine čestica tvori mikropore. Slaganjem više nakupina čestica javljaju se makropore. Prema do sada navedenom može se reći kako su svi filosilikati porozni, sadrže pore i različitog su oblika i veličina čestica (Bergaya & Lagaly 2006).

Voda može ulaziti u pore i ispunjavati ih (porna voda), može se nalaziti u međuslojnom prostoru (međuslojna voda), a može i elektrostatskim (električnim) silama biti vezana za površinu čvrstih čestica (adsorbirana voda). Adsorbirane molekule vode čine tanki nefluidni sloj (film) koji je vezan vodikovom vezom uz negativno nabijenu površinu čestice minerala glina. Na stvoreni vodeni sloj vežu se daljnji slojevi molekula vode čime se vodeni sloj povećava i počinje djelovati poput maziva, čestice klize jedna prema drugoj dovodeći tako do plastičnosti. Ukoliko se vodeni sloj s vremenom povećava, dolazi do gubitka plastičnosti i nastanka suspenzije.



**Slika 4-1** Strukturni prikaz minerala glina (modificirano prema Bergaya & Lagaly 2006)

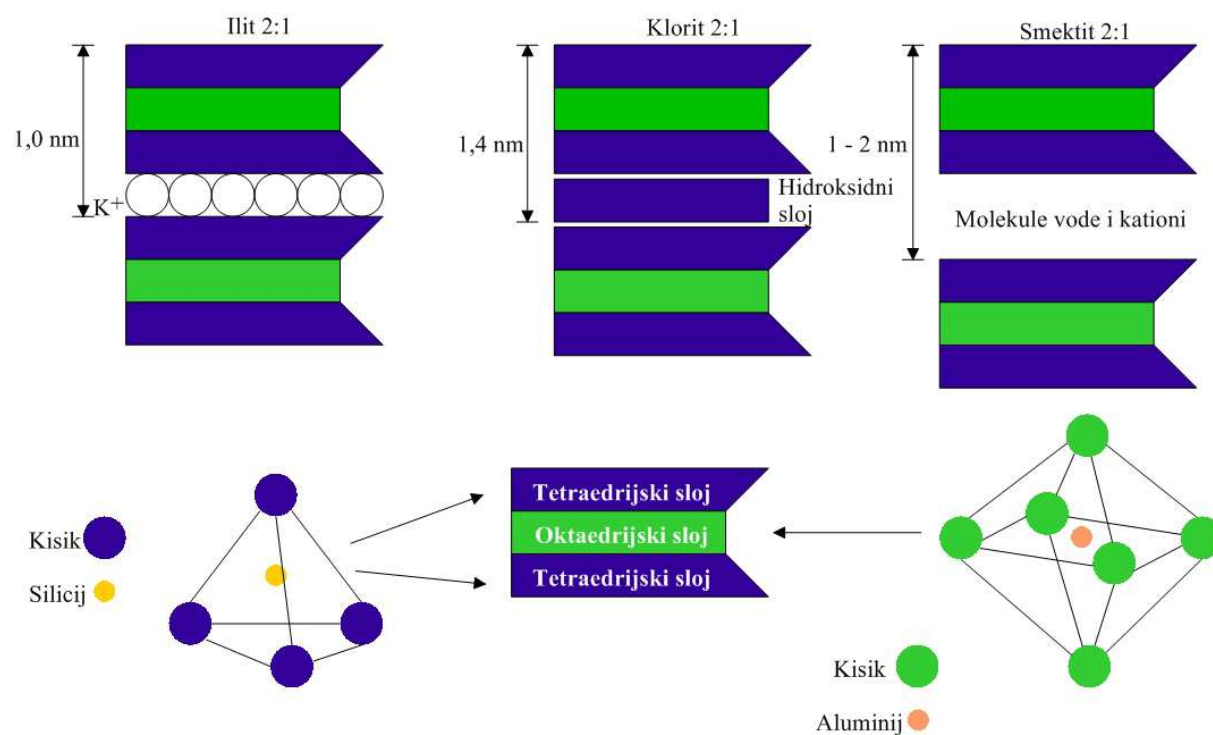
**Bentoniti** su stijene nastale u morskoj sredini izmjenom piroklastičnog materijala, prvenstveno vulkanskog pepela ili precipitacijom u alkalnim kontinentalnim bazenima (Galán 2006). Sastoje se od minerala smektitne skupine glina (najčešće montmorillonita), kaolinita i illitičnog materijala, no mogu sadržavati plagioklase, kvarc, feldspate, biotit, piroksen, te cirkon (Christidis & Huff 2009). Grim & Guven<sup>3</sup> 1978. termin bentonit koriste šire tj. za bilo koju glinu koja u svom sastavu kao primarni mineral ima neki od minerala smektitne skupine. Kako za primjenu podrijetlo materijala nije bitno, već su bitna njegova svojstva, u daljnjem tekstu bentonitom će se smatrati svi glinoviti materijali u čijem je sastavu dominantan mineral montmorillonit.

S obzirom da su specifična svojstva bentonita zapravo posljedica strukture montmorillonita, u daljnjem tekstu opisati će se struktura i ostale mineraloške karakteristike minerala glina, s naglaskom na smektitnu skupinu minerala glina čiji je glavni predstavnik montmorillonit.

Svi minerali glina spadaju u skupinu filosilikata i građeni su od tetraedrijskih i oktaedrijskih slojeva. Tetraedrijski sloj čine  $\text{SiO}_4$  tetraedri pri čemu je svaki atom silicija okružen s četiri atoma kisika, a oktaedarski sloj čine oktaedri u čijem je središtu atom aluminijski okružen s

<sup>3</sup> Preuzeto iz Murray 2007

atomima kisika ( $O^{2-}$ ) ili hidroksilne skupine ( $OH^-$ ) u vrhovima oktaedra. Tetraedrijski i oktaedrijski slojevi mogu tvoriti strukture 1:1 i 2:1. Struktura 1:1 znači da se ona sastoji od jednog tetraedrijskog i jednog oktaedrijskog sloja (T-O). Struktura 2:1 znači da je jedan oktaedrijski sloj okružen s tetraedrijskim slojevima (T-O-T). Različitim kombinacijama osnovnih strukturnih jedinica nastaju različiti minerali glina (slika 4-1, tablica 4-1).



**Slika 4-2** Struktura minerala glina (modificirano prema Lory, <http://soilnews.feedsynews.com/clay-mineralogy/>, preuzeto 7. veljače 2016.)

Jedni od najčešćih predstavnika minerala glina sa strukturom 2:1 su smektiti. Smektiti nastaju u kori trošenja raspadanjem matičnih stijena gdje zbog slabe drenaže nastaje slabolužnata sredina, pa iz feldspata nastaje smektit. Smektiti mogu nastati još i trošenjem vulkanskog stakla u efuzivnim i piroklastičnim stijenama (Slovenec 2011). Kao rezultat izomorfne zamjene unutar tetraedrijskih i oktaedrijskih slojeva nastaje trajni negativan naboj koji je uravnotežen prisustvom zamjenjivih i hidratiziranih kationa od kojih su najčešći  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  i  $Mg^{2+}$  (Spark 2003) i kreće se u rasponu 0,2 – 0,6 po jediničnom paketu.

**Tablica 4-1** Kristalne strukture i kristalna svojstva minerala glina (Pusch 2002)

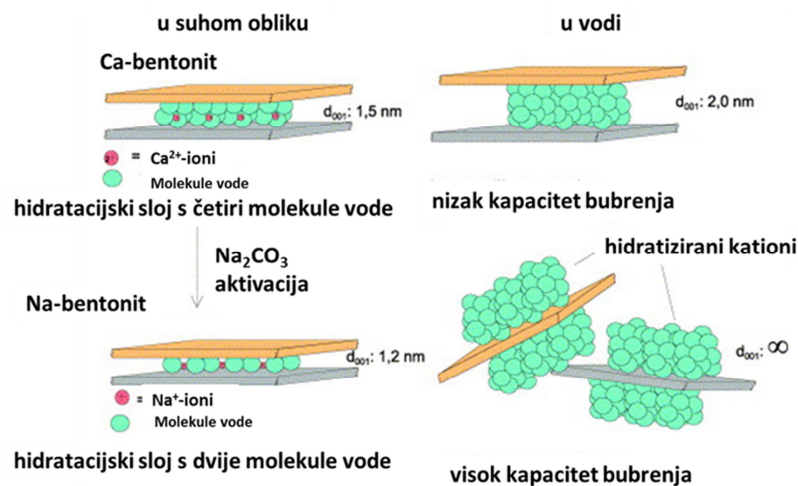
Mineral glina	Kristalna struktura	Naboj	Struktura habitusa	Svojstva
<b>Kaolinit</b>	Jedan tetraedrijski SiO sloj i jedan dioktaedrijski OH/Al sloj	0	Triklinski. Oblik heksagonalnih ploča, promjer 0,1 - 4 $\mu\text{m}$ , debljina 0,05 - 2 $\mu\text{m}$	Nestišljiv i čvrst. Specifična površina 10 - 20 $\text{m}^2/\text{g}$
<b>Vermikulit</b>	Dva tetraedrijska sloja SiO i jedan trioktaedrijski OH/Mg sloj	0,6 - 0,9	Monoklinski. Nejednakih oblika, veličina čestica nekoliko $\mu\text{m}$	Vrlo mekan. Velika ekspanzija zagrijavanjem. Specifična površina 800 $\text{m}^2/\text{g}$
<b>Illit</b>	Dva tetraedrijska sloja SiO i jedan dioktaedrijski OH/Mg sloj. Kalijski ioni	0,6 - 0,9	Monoklinski. Nejednakih oblika, veličina čestica 0,01 - 2 $\mu\text{m}$	Relativno čvrst. Specifična površina 65 - 100 $\text{m}^2/\text{g}$
<b>Smektit</b>	Dva Si/Al/O tetraedrijska sloja i di- ili trioktaedrijski jedan OH/Mg, OH/Al ili OH/Fe sloj	0,2 - 0,6	Monoklinski. Nejednakih oblika, veličina čestica nekoliko <0,5 $\mu\text{m}$	Vrlo mekan. Velika ekspanzija povećanjem vlage. Specifična površina 800 $\text{m}^2/\text{g}$
<b>Klorit</b>	Di- ili trioktaedarski mješoviti slojevi	0,3 - 1,0	Monoklinski. Oblik heksagonalnih ploča, promjer 0,1 - 4 $\mu\text{m}$ , debljina <0,2 $\mu\text{m}$	Mekan. Specifična površina 65 - 100 $\text{m}^2/\text{g}$
<b>Mješoviti slojevi</b>	Mnogo kombinacija: smektit/ilit, smektit/kaolinit	0,2 - 0,6	Monoklinski. Nejednakih oblika, veličina čestica nekoliko <0,5 $\mu\text{m}$	Vrlo mekan. Specifična površina 100 - 300 $\text{m}^2/\text{g}$

Mineralni smektitne grupe razlikuju se među sobom po prevladavajućem kationu u oktaedrijskom sloju. Ukoliko je prevladavajući kation dvovalentan, on zapunjava sve oktaedrijske šupljine i mineral spada u trioktaedrijske smektite (npr. saponit s magnezijem kao glavnim oktaedrijskim kationom), a ukoliko je prevladavajući kation trovalentan, mineral spada u dioktaedrijske smektite jer zapunjava dvije od tri oktaedrijske šupljine (npr. montmorillonit s dominantnim kationom aluminijem; nontronit s dominantnim kationom  $\text{Fe}^{3+}$ ).

Kako je već ranije rečeno, negativni naboj sloja smektita kompenziran je međuslojnim kationom. Kod montmorillonita to su najčešće natrij i kalcij. Međuslojni kation je hidratiziran.



Hidratacija međuslojnog kationa povećava se s relativnom vlagom. Ukoliko je međuslojni kation natrij debljina paketa (2:1 sloj i međuslojni prostor) iznosi oko 12,4 Å (Grim 1953) (1Å = 0,1 nm) budući da natrij na sebe veže jedan sloj vode. Kalcij veže na sebe dva sloja vode, što ima za posljedicu debljinu paketa od oko 15 Å. Međuslojna voda uzrokuje širenje paketa što dovodi do promjene fizikalnih svojstava smektita, u ovom slučaju do bubrenja. Razlikujemo interkristalinsko i osmotsko bubrenje. Inerkristalinsko bubrenje očituje se povećanjem volumena koje je uzrokovano hidratacijom ovisno o količini vode koja ulazi u međuslojni prostor. Ovakav način bubrenja javlja se kod kalcijevih montmorillonita pri čemu se volumen montmorillonita povećava dvostruko u odnosu na suhi uzorak. Što se natrijskih bentonita tiče, kod njih ioni natrija iz međuslojnog prelaze na vanjsku površinu sloja, čime dovode do nastajanja električnih dvostrukih slojeva koji se međusobno odbijaju. Rezultat je veće bubrenje u odnosu na interkristalinsko bubrenje. Kod natrijskih montmorillonita javljaju se i osmotsko i interkristalinsko bubrenje, tako da se natrijskom bentonitu volumen povećava od osam do petnaest puta u odnosu na suhi uzorak. Međutim, u određenim uvjetima može doći do izmjene međuslojnih kationa, pa kation natrija bude zamijenjen nekim drugim kationom, najčešće kalcijem (slika 4-3) što može dovesti do smanjenja bubrenja. U svoj međuslojni prostor smektiti osim vode mogu apsorbirati i razne organske molekule što također utječe na fizikalna svojstva glinovitih materijala.



**Slika 4-3** Aktivacija kalcijevog bentonita (Koch 2002)

Natrijski montmorillonit, kao i većina minerala glina, male je veličine čestica, ljuskaste strukture, koju je Keller 1982. slikovito nazvao „cornflake“ strukturom. Mala veličina čestica ima za posljedicu veliku specifičnu površinu do 800 m<sup>2</sup>/g. Velika površina i veliki naboj slojeva kod natrijskog montmorillonita rezultira velikom sposobnošću upijanja vode, viskoznošću i pojavom tiksotropije.

Osim što su skloni adsorpciji vode, minerali smektitne skupine pokazuju sklonost zamjenama kationa u međuslojnom prostoru pri čemu se ponašaju kao ionski izmjenjivači. Do kationske zamjene dolazi kad se jedan kation zamjenjuje drugim slične veličine bez narušavanja kristalne rešetke minerala. Mjera zamjene kationa naziva se kapacitetom kationske zamjene (eng. *Cation exchange capacity* – CEC) i izražava se kao broj kationa po masi materijala, dakle u mmol/100g ili meq/100g. Kapacitet kationske zamjene u smektitima varira ovisno o prevladavajućem ionu. Pa tako CEC kalcijskog montmorillonita iznosi 40 meq/100g, natrijskog montmorillonita 80 – 110 meq/100 g, dok kod beidelita ta vrijednost može ići čak do 150 meq/100g (Murray 2007)

Stupanj kationske zamjene, osim o prevladavajućem kationu, ovisi i o koncentraciji iona u otopini, vezama između slojeva, veličini čestica, temperaturi okoline.

Mineraloška svojstva bentonitne gline vrlo su važna prilikom proizvodnje GCL-a. Stoga se bentonitna glina koja se upotrebljava prilikom proizvodnje GCL-a može se svrstati u tri skupine: (1) prirodni natrijski bentonit, (2) prirodni kalcijski montmorillonit, (3) natrijski aktiviran montmorillonit. Prirodni natrijski bentonit je karakteriziran velikim kapacitetom kationske zamjene te visokim vrijednostima volumena slobodnog bubrenja što osigurava malu hidrauličku propusnost GCL-a. Prirodni kalcijski montmorillonit koji bubri u kontaktu s vodom, ali manje od natrijskog montmorillonita, ima manji kapacitet kationske zamjene, te nešto veću hidrauličku propusnost. Natrijski aktiviran montmorillonit je prirodni kalcijski montmorillonit tretiran s Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·10H<sub>2</sub>O kako bi mu se stvorila svojstva što sličnija prirodnom natrijskom bentonitu (Koch 2002).

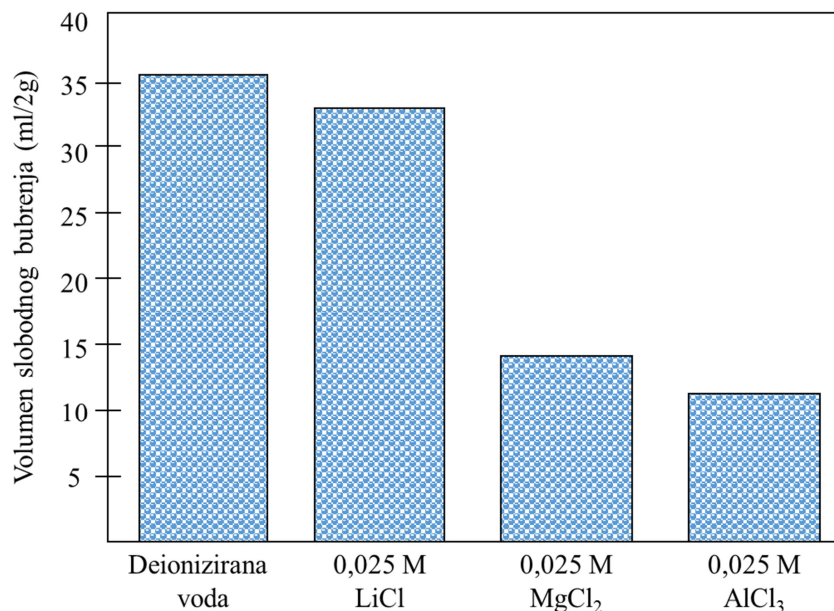
Veličina čestica, sklonost bubrenju i upijanju vode, te ljuskasti oblik čestica daje natrijskom montmorillonitu sposobnost formiranja neke vrste membrane koja je nepropusna za vodu. Time se osigurava dobro brtvljenje koje je izrazito važno u tehničkom smislu, naročito kod izgradnje odlagališta otpada, jer bentonitne gline s natrijskim ionom u oktaetrijskom sloju

(natrijski montmorillonit) čine nepropusnu barijeru sprječavajući gubitak fluida, čime se ujedno smanjuje i hidraulička propusnost GCL-a.

## 5 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Do danas su provedena istraživanja različitih svojstava mineralne komponente GCL-a, odnosno bentonitnih glina, koje su bile ugrađene u završne pokrovne sustave na odlagalištima otpada. Pri tome se istraživanja u kojima su najčešće bili ispitivani indeksni pokazatelji, te hidraulička propusnost, mogu podijeliti u dvije skupine. U prvu skupinu ispitivanja pripadaju ona kod kojih su u laboratorijskim uvjetima ispitivana svojstva bentonitne gline koristeći različite ispitne fluide, dok drugoj skupini pripadaju ispitivanja koja su provedena na uzorcima izvađenim iz odlagališta otpada.

Shackelford et al. (2000), Egloffstein (2001), te Jo et al. (2001) su utvrdili kako volumen slobodnog bubrenja pokazuje veće vrijednosti ako je uzorak zasićen otopinama koje sadrže jednovalentne katione, dok se najmanje vrijednosti dobivaju kad je uzorak zasićen otopinama viševalentnih kationa (slika 5-1). Veća vrijednost hidrauličke propusnosti postiže se zasićenjem uzorka viševalentnim otopinama, kao i otopinama većih koncentracija. Manju hidrauličku propusnost pokazuju uzorci zasićeni deioniziranom vodom ili otopinama jednovalentnih kationa. Iz navedenog može se zaključiti da porast valencije kationa i porast koncentracije otopine dovodi do smanjenja volumena slobodnog bubrenja, a time i do povećanja hidrauličke propusnosti.

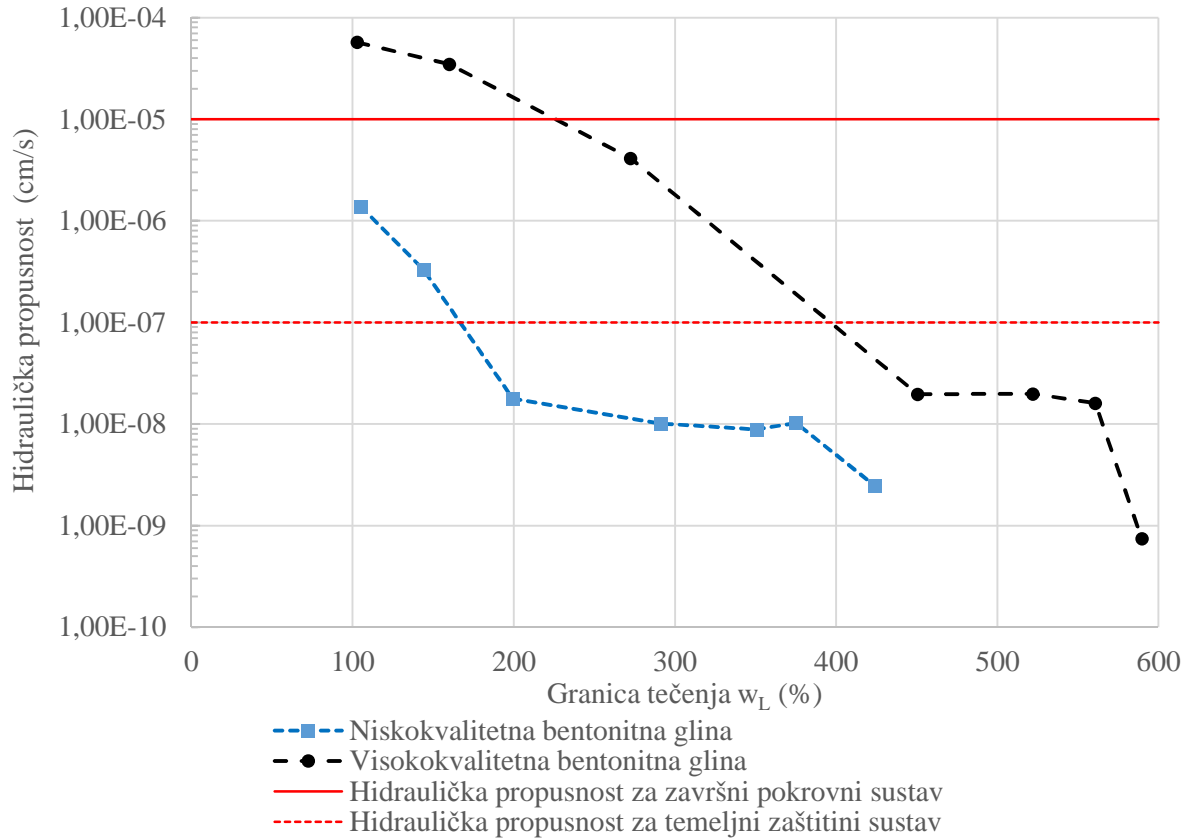


**Slika 5-1** Volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline zasićene otopinama različitih koncentracija (modificirano prema Shackelford et al. 2000)

Olsta et al. (2004) pokušali su usporediti rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjima indeksa slobodnog bubrenja, gubitka fluida i hidrauličke propusnosti. Kao ispitne tekućine koristili su deioniziranu, destiliranu i vodovodnu vodu. Utvrdili su da je volumen slobodnog bubrenja najveći prilikom upotrebe vodovodne vode kao ispitnog fluida. Gledajući rezultate dobivene ispitivanjem gubitka fluida, on je manji što je volumen slobodnog bubrenja veći. Međutim, autori nisu mogli dovesti u vezu volumen slobodnog bubrenja i gubitak fluida s koeficijentom hidrauličke propusnosti. Njihovi rezultati pokazuju da kod volumen slobodnog bubrenja od 31 ml gubitak fluida iznosi 12,8 ml, a hidraulička propusnost  $4,7 \cdot 10^{-9}$  cm/s. S druge strane za volumen slobodnog bubrenja od 21 ml, gubitak fluida iznosi 16,4 ml, a hidraulička propusnost  $1,4 \cdot 10^{-9}$  cm/s. Lee et al. (2005a) su utvrdili da porastom valencije kationa dolazi do smanjenja vrijednosti granice tečenja, te su pokušali dati korelacijske veze između indeksnih pokazatelja odnosno koeficijenta propusnosti i kvalitete bentonitne gline, te apliciranog stanja naprezanja.

Utvrdili su da se, bilo da je riječ o visoko ili niskokvalitetnoj bentonitnoj glini, porastom granice tečenja smanjuje hidraulička propusnost (slika 5-2).

Hidraulička propusnost za završni pokrovni sustav mora biti manja od  $10^{-7}$  m/s ( $10^{-5}$  cm/s), a temeljni zaštitni sustav manja od  $10^{-9}$  m/s ( $10^{-7}$  cm/s). Na slici 5-2 vidljivo je kako prema navedenim vrijednostima kod niskokvalitetnih bentonitnih glina promjenom granice tečenja od 100 do 430%, hidraulička propusnost se mijenja za skoro 1000 puta. Kod visokokvalitetnih bentonitnih glina granicom tečenja u rasponu od 100 do 590% hidraulička propusnost mijenja se za oko 100000 puta.

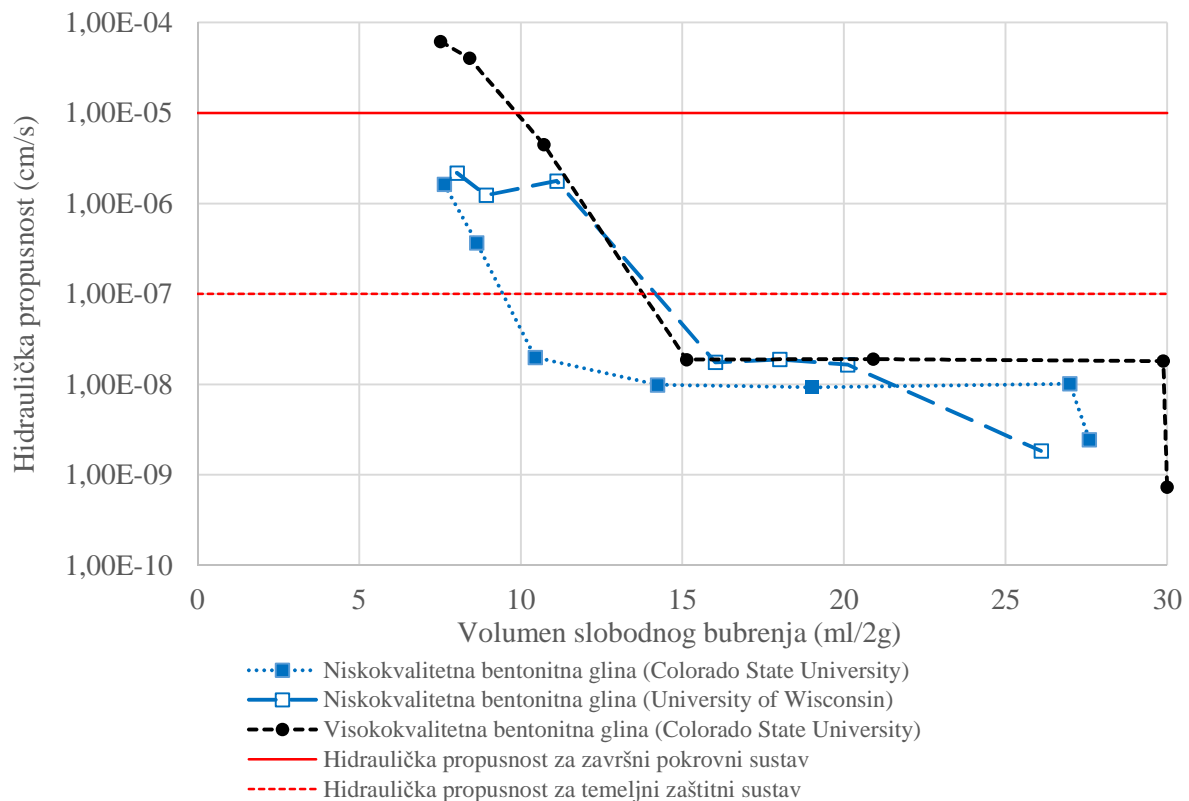


**Slika 5-2** Odnos granice tečenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a (modificirano prema Lee et al. 2005a)

Lee & Shakelford (2005b) utvrdili su da je visokokvalitetna bentonitna glina koja sadrži minimalno 83% natrijskog montmorilonita otpornija na kemijske utjecaje otopina različitih koncentracija.

Osim usporedbe granice tečenja i hidrauličke propusnosti Lee et al. (2005b) dali su i usporednu vezu između volumena slobodnog bubrenja i hidrauličke propusnosti. Utvrdili su da se, bilo da je riječ o visoko ili niskokvalitetnoj bentonitnoj glini, porastom granice tečenja smanjuje hidraulička propusnost (slika 5-3).

U odnosu na ranije spomenute zahjevanе vrijednosti hidrauličke propusnosti za završni i temeljni zaštitni sustav na slici 5-3 vidljivo je kako kod niskokvalitetnih bentonitnih gline pri promjeni volumena slobodnog bubrenja od 7 ml do 27 ml hidraulička propusnost se smanjuje za oko 1000 puta. U slučaju visoko kvalitetne bentonitne gline do smanjenja hidrauličke propusnosti od skoro 100000 puta dolazi kod promjene volumena slobodnog bubrenja od 7 ml do 30 ml.



**Slika 5-3** Odnos volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a (modificirano prema Lee et al. 2005a)

Lin & Benson (2000) slično kao i Benson & Meer (2009) provodili su laboratorijska ispitivanja o utjecajima jednovalentnih i dvovalentnih kationa na isušivanje GCL-a. Zaključili su da za velik porast hidrauličke propusnosti može biti odgovorna izmjena ciklusa vlaženja i sušenja kada voda protječe kroz završni pokrov u kojem mogu biti prisutne tvari koje u svom sastavu mogu sadržavati viševalentne katione. Predlažu kemijsku analizu porne vode u pokrovnom dijelu koja može biti korisna u područjima gdje može doći do izmjene ciklusa vlaženja – sušenja. Uz to, Lin & Benson (2000) smatraju da ni GCL nije uvijek učinkovita hidraulička barijera, pa se njegova upotreba u područjima podložnima isušivanju treba uzimati s oprezom.

Bradshaw et al. (2013) su proveli ispitivanja utjecaja isušivanja i kationske zamjene na svojstvo hidrauličke propusnosti GCL-a. GCL su stavljali na zasićenu podlogu i promatrali promjene unutar trideset dana i godine dana. Glavni uzrok CEC-a je prisutnost dvovalentnih kationa u pornoj vodi koja se nalazi u podlozi na koju je GCL ugrađen. Utvrdili su kako je kapacitet kationske zamjene unutar trideset dana gotovo nemjerljiv, samim time nije bilo ni

promjene u hidrauličkoj propusnosti. U roku godine dana 30% iona natrija zamijenjeno je kalcijevim ionom, što dugoročno može uzrokovati porast hidrauličke propusnosti.

Egloffstein (2001) kao i Köditz et al. (2004) zaključuju kako je važno svojstvo GCL-a brtvljenje u sušnom razdoblju u kojem dolazi do ranijeg formiranja pukotina čime se svojstvo brtvljenja smanjuje, te da će se nakon nekoliko razdoblja isušivanja i stalnog vlaženja pukotine isušivanja uvijek pojaviti na istom mjestu. Uzevši u obzir lokalne klimatske uvjete, odgovarajuće projektiranje završnog pokrovnog sustava na odlagalištima otpada, te odgovarajuća debljina i vrsta nadsloja (od 0,8 metar do 1,5 metar) iznad GCL-a spriječit će pojavu pukotina. Do istog zaključka dolaze Müller-Kirchenbauer et al. (2008) nakon što su proveli terenska istraživanja pomoću lizimetara koji su bili ugrađeni ispod GCL-a u razdoblju od devet godina.

Kovačević Zelić et al. (2006a, 2006b, 2008) provodili su ispitivanja indeksnih pokazatelja, te XRD analize na uzorcima GCL-a koji je bio izlagan djelovanju procjedne tekućine dobivene s odlagališta otpada Jakuševac-Prudinec. Uočene su promjene u izmjerenim vrijednostima indeksnih pokazatelja za koje su pretpostavili da su uzrokovane izmjenom međuslojnih kationa. Do tog zaključka došli su na osnovu uočene promjene međuslojnog razmaka.

Benson & Scalia (2010), Scalia & Benson (2011), te Barrall et al. (2012) proučavali su kemijska i hidraulička svojstva GCL-a koji je nekoliko godina bio ugrađen u završni pokrovni sustav. Utvrdili su kako izmjena međuslojnih kationa i vlažnost GCL-a ovisi o podlozi na koju je GCL ugrađen. Izmjena iona natrija ionom kalcija dovodi do smanjenja bubrenja čime će se povećati koeficijent hidrauličke propusnosti. Uzimajući u obzir brzu hidrataciju i pojavu bubrenja koja se postiže ugradnjom na vlažnu podlogu, GCL predstavlja vrlo učinkovitu hidrauličku barijeru.

Stark & Newman (2010) dali su osvrt na projektiranje završnog pokrovnog sustava na bočnim stranicama odlagališta otpada sa stajališta stabilnosti kosina. Osim toga dali su prijedlog da bi završni pokrovni sustav na bočnim stranicama trebao imati minimalno 0,6 metara debeo nadsloj koji bi sprječavao stvaranje većih količina procjedne tekućine, a time i spriječio moguće onečišćenje podzemnih voda. Uzimajući navedeno u obzir preporučili su da bi nagib kosina trebao biti 3H : 1V ili manji, te da bi uz nadsloj određene debljine završni pokrovni sustav na bočnim stranicama trebao sadržavati i sloj niske propusnosti, primjerice – geomembranu.



Touze-Foltz et al. (2010) nakon laboratorijskih ispitivanja na uzorcima GCL-a koji je u odlagalištu otpada proveo šest godina utvrdili su kako je došlo do promjene svojstava GCL-a. Pretpostavljaju da je zbog malog nadsloja (između 0,2 m i 0,5 metara) došlo do pojave pukotina u GCL-u, te potpunog CEC-a to jest zamjene natrijevog iona ionom kalcija, što je uzrokovalo mali volumen slobodnog bubrenja ( $< 10 \text{ ml/2g}$ ) i nisku hidrauličku propusnost (od  $1,07 \cdot 10^{-6}$  do  $6,91 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ).

Rowe (2013) proučavanjem vlažnosti, granulometrijskog sastava tla iznad i ispod GCL-a, geokemijskih reakcija između bentonitne gline i pornog fluida, debljine nadsloja, izloženosti termalnim ciklusima i veličinom termalnih gradijenata na svojstva GCL-a smatra kako je najvažniji parametar koji utječe na učinkovitost GCL-a kao hidrauličke barijere stupanj saturacije. Uz navedeno Benson (2013) je zaključio kako se veća učinkovitost postiže ugradnjom GCL-a na već zasićenu podlogu. Time se zadržava mala hidraulička propusnost GCL-a, čak i ukoliko dođe do izmjene iona natrija dvovalentnim kationima.

Temeljem proučene literature može se zaključiti da do sada nisu provedena sustavna ispitivanja i usporedba rezultata ispitivanja koja bi bila obavljena na identičnoj vrsti GCL-a odnosno bentonitne gline u njezinom izvornom, odnosno, neporemećenom stanju koje se opisuje tvornički deklariranim vrijednostima, te u stanju nakon uporabe u stvarnom odlagalištu otpada, odnosno, stanju poremećenom različitim utjecajima tijekom vremena.

U okviru disertacije cilj je korištenjem neporemećenih i poremećenih uzoraka istovrsnog GCL-a, odnosno bentonitne gline, s jednog stvarnog odlagališta u Hrvatskoj, napraviti niz laboratorijskih ispitivanja svojstava bentonitne gline.

Na taj način doći će do novih spoznaja o ponašanju bentonitne gline, a time i GCL-a u uvjetima koji vladaju u završnom pokrovnom sustavu na bočnim stranicama odlagališta otpada.

## 6 PLAN I PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Bentonitna glina koja je sastavni dio glinenih geosintetičkih barijera (GCL-a) većinom se sastoji od minerala montmorillonita koji lako reagira s tvarima u okolišu. Stoga se pretpostavlja da će nakon dugog razdoblja provedenog u odlagalištu otpada doći do promjena u kemijskom i mineraloškom sastavu bentonitne gline, a time i do promjene njenih indeksnih pokazatelja, te fizičko-mehaničkih i hidrauličkih svojstava. Istraživanja su provedena na uzorku bentonitne gline izdvojene iz GCL-a koji je korišten pri izgradnji odlagališta otpada u središnjoj Hrvatskoj. Pri tome su ispitivanja provedena na uzorcima bentonitne gline u neporemećenom stanju (referentni uzorak), te na uzorcima bentonitne gline i GCL-a prikupljenim na terenu. Osim toga, ispitivanja su provedena na nekoliko uzoraka nadsloja koji se nalazio iznad uzorkovanog GCL-a.

Glinene geosintetičke barijere uzete iz završnog pokrovnog sustava na bočnim stranicama odlagališta pripadaju proizvodu komercijalnog naziva Bentomat AS100J kojeg proizvodi tvrtka Cetco iz Poljske. Bentonitna glina koja je sastavni dio ovog proizvoda oznake je Saline Seal 100, istog proizvođača. Međutim, kako je ranije spomenuto glinene geosintetičke barijere su u odlagalište otpada bile ugrađivane u završni pokrovni sloj na bočnim pokosima u razdoblju između travnja 2004. godine i listopada 2010. godine. Kako je riječ o dugom vremenskom razdoblju koje je GCL proveo ugrađen u odlagalište otpada postavlja se pitanje, je li na cijeloj površini, koja je obuhvaćena postavljenim GCL-om, ugrađen isti tip GCL-a koji sadrži mineralnu komponentu istih karakteristika? Da bi mogli odgovoriti na to pitanje potrebno je napraviti laboratorijska ispitivanja GCL-a i bentonitne gline uzorkovanih na terenu.

Za potrebe ovog rada uzorkovanje je provedeno tijekom lipnja 2013. godine sa završnog pokrovnog sustava na bočnim stranicama odlagališta otpada na dvadeset i tri lokacije (na slici 6-1 naznačene plavom bojom). Dio uzoraka (površine 2 m<sup>2</sup>) uzet je iz istražnih raskopa s lokacija koje su smještene na jugoistočnoj strani odlagališta (uzorci S32, S31, S26, S21, S19, S16, S13, S11, S7, S1, S2, S3 i S4), a dio na sjeverozapadnoj strani odlagališta (uzorci S5, S6, S9, S14, S15, S20, S23, S27, S29 i S30).

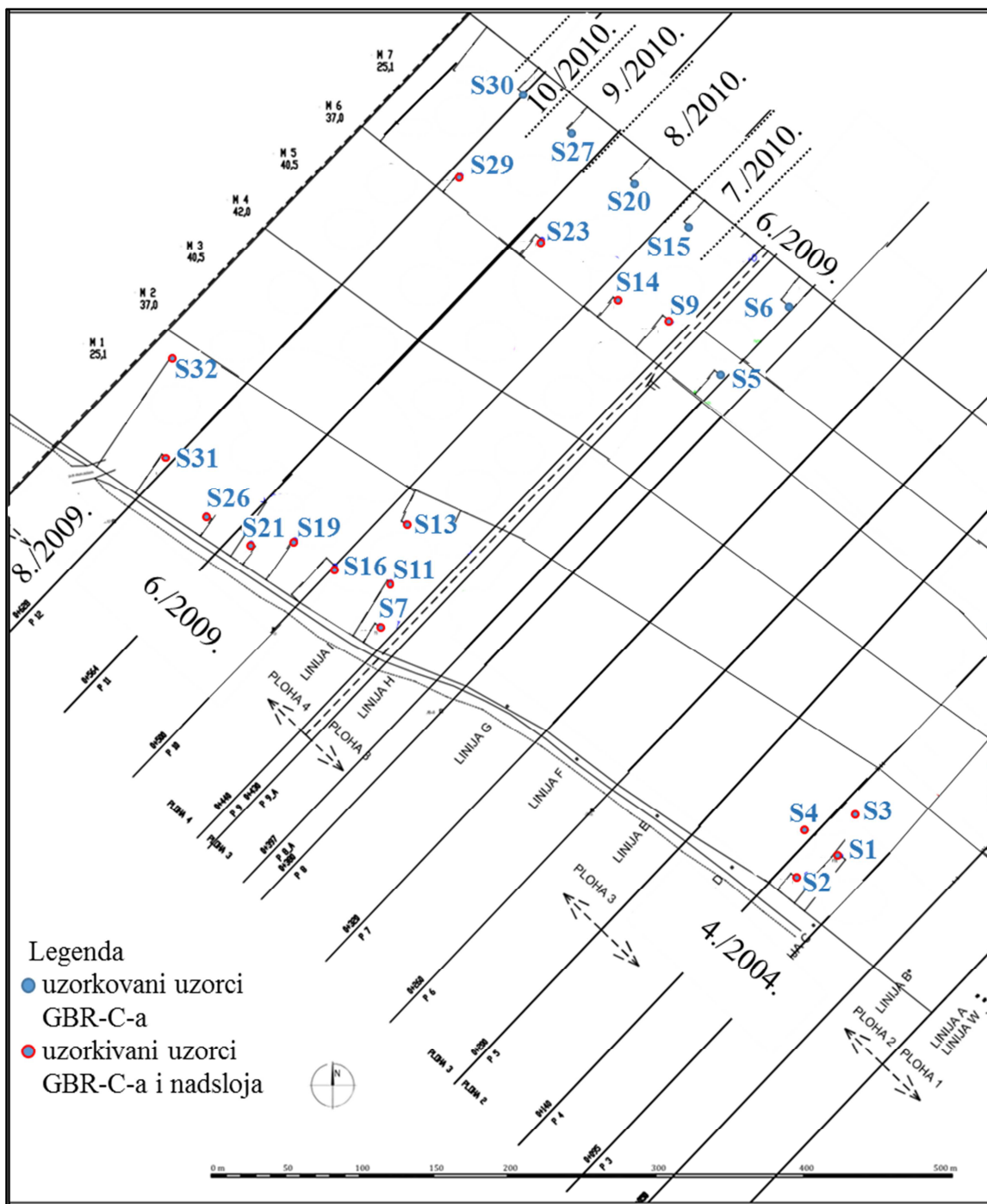
Nakon izdvajanja GCL-a iz odlagališta, uzorci su pakirani u vreće. Zatvoreni i označeni odloženi su u vlažnu komoru geomehničkog laboratorija, kako bi zadržali svoje stanje do vremena kada su ispitivanja bila provedena.

S obzirom da se navedeno odlagalište, zbog stalnog napredka u tehnologiji, te izmjena propisa vezanih za projektiranje odlagališta, razvijalo u fazama, kako i preporučuje EPA u svojim "Preporukama", tijekom duljeg vremenskog razdoblja, izborom lokacija nastojalo se obuhvatiti moguće različite izvedbe završnog pokrova. Time je moguće dobiti uvid i u različite vanjske utjecaje tijekom životnog vijeka odlagališta nakon ugradnje završnog pokrova.

Tako su uzorci iz istražnih raskopa na jugoistočnoj strani odlagališta S26, S21, S19, S16, S13, S11 i S7 u odlagalište ugrađivani u lipnju 2009. godine, uzorci S32, S31 ugrađivani su u odlagalište u kolovozu 2009. godine. Uzorci iz istražnih raskopa S1, S2, S3 i S4 ugrađivani su u travnju 2004. godine i ujedno predstavljaju uzorke koji su najdulje vremensko razdoblje proveli u odlagalištu otpada. Uzorci S5, S6 i S9 na sjeverozapadnoj strani odlagališta ugrađivani su također u lipnju 2009. godine, dok su ostali uzorci ugrađivani u istražne raskope S14 i S15 u srpnju 2010. godine, S20 i S23 u kolovozu 2010. godine, S27 u rujnu 2010. godine, te uzorci S29 i S30 u listopadu 2010. godine.

Rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjima na uzorcima iz navedenih istražnih raskopa omogućit će usporedbu svojstava mineralne komponente istovrsne glinene geosintetičke barijere (GCL-a) prije ugradnje, te nakon korištenja u odlagalištu otpada. Dobiveni rezultati pomoći će u opisivanju ponašanja GCL-a kao komponente završnih pokrovnih sustava odlagališta otpada u stvarnim uvjetima, te procjenu njihove dugoročne učinkovitosti.

Osim uzoraka GCL-a na trenu je uzorkovano sedamnaest uzoraka nadsloja od čega trinaest s jugoistočne strane i četiri sa sjeverozapadne strane odlagališta otpada, što je također naznačeno na slici 6-1.



**Slika 6-1** Lokacija uzorkovanja s označenim mjestima uzimanja uzoraka, te vremenom ugradnje u odlagalište otpada

Istraživanja su provedena u laboratorijima na uzorcima GCL-a koji je korišten pri izgradnji odlagališta otpada i to u neporemećenom stanju (novi uzorci identičnog tipa GCL-a koji odgovaraju stanju prilikom ugradnje), te na uzorcima prikupljenim na terenu (poremećeni uzorci s odlagališta nakon razdoblja korištenja od tri do devet godina). Programom laboratorijskih istraživanja obuhvaćeno je prikupljanje:

1. Podataka za karakterizaciju bentonitne gline:

- mineralni sastav XRD analizom,
- kemijski sastav,
- granice plastičnosti,
- volumen slobodnog bubrenja,
- sposobnost upijanja vode,
- indeks gubitka fluida, te

2. Podataka za karakterizaciju GCL-a:

- hidraulička propusnost.

Na uzorcima nadsloja koji su uzorkovani iz sedamnaest istražnih raskopa, laboratorijskim ispitivanjima određena je granulometrijska analiza kombiniranom metodom (areometriranje i sijanje), vlažnost i gustoća uzoraka, te debljina nadsloja.

Rezultati dobiveni ispitivanjima na originalnom uzorku bentonitne gline, predstavljaju referentnu vrijednost uzorcima koji su tijekom različitih vremenskih razdoblja bili ugrađeni u odlagalište otpada. Time je omogućena međusobna usporedba dobivenih rezultata, koja je kasnije poslužila prilikom konačne analize podataka.

Vrijednosti dobivene ispitivanjem indeksnih pokazatelja povezane su s rezultatima ispitivanja hidrauličke propusnosti. Ispitivanjem mineralnog i kemijskog sastava bentonitne gline nakon uporabe na odlagalištu dobiven je uvid u eventualne izmjene međuslojnih kationa, koje posljedično utječu na indeksne pokazatelje, te fizičko-mehanička i hidraulička svojstva bentonitne gline.

Volumen slobodnog bubrenja određen je laboratorijskim ispitivanjem prema normi ASTM D 5890. Ova norma omogućuje istraživanje karakteristika bubrenja u deioniziranoj vodi, a primjenjuje se za procjenu funkcionalnosti glinenih geosintetičkih barijera koje se koriste u svrhu brtvljenja. Sposobnost upijanja vode ispitana je prema normi DIN 18132:1995 kojom se laboratorijskim postupkom određuje sposobnost upijanja vode sitnozrnate frakcije tla.

Atterbergove granice (granice plastičnosti) određene su normom BS 1377-2. ASTM D 5891 je norma koja je upotrebljena za određivanje vrijednosti indeksa gubitka fluida, a kojom se procjenjuje gubitak tekućine iz suspenzije glinenih materijala pod određenim pritiskom. Određivanje hidrauličke propusnosti provedeno je prema normi ASTM D 5084.

Zbog dugotrajnog korištenja u odlagalištima otpada, jedan od ciljeva je navedenim ispitivanjima utvrditi zadržava li bentonitna glina svoja svojstva (bubrenje, sposobnost upijanja, visoku plastičnost). Drugi cilj je ustanoviti zadržava li GCL svojstvo male hidrauličke propusnosti, te pod kojim uvjetima može funkcionirati kao trajna hidraulička brtvena barijera.

Preporučene vrijednosti koje bi trebalo dobiti prilikom ispitivanja navedene su u tablici 6-1.

**Tablica 6-1** Preporučene vrijednosti za pojedina ispitivanja (DGGT 2002, von Maubeuge 2002)

Svojstvo	Metoda	Vrsta bentonitne gline	DGGT	von Maubeuge
<b>Volumen slobodnog bubrenja</b>	ASTM D 5890	Natrijska	> 20 ml	>24 ml
		Kalcijska	≥ 8 ml	
<b>Indeks gubitka fluida</b>	ASTM D 5891	Natrijska	< 18 ml	< 18 ml
		Kalcijska		
<b>Sposobnost upijanja vode</b>	DIN 18132	Natrijska	≥ 450%	≥ 600%
		Kalcijska	≥ 150%	
<b>Hidraulička propusnost</b>	ASTM D 5084	Natrijska	≤ 10 <sup>-9</sup> m/s	≤ 10 <sup>-9</sup> m/s
		Kalcijska		

Osim preporučenih vrijednosti navedenih u tablici 6-1, Egloffstein (2001) u svom radu preporučuje, između ostalih i vrijednosti sadržaja minerala montmorillonita u pojedinom uzorku, te pH vrijednosti (tablica 6-2).

**Tablica 6-2** Preporučene vrijednosti prema Egoffsteinu (2001)

<b>Sadržaj minerala montmorillonita (%)</b>	60-90
<b>Sposobnost upijanja vode (%)</b>	200-700
<b>Volumen slobodnog bubrenja (ml/2g)</b>	7-30
<b>pH vrijednost (otopine)</b>	9 - 10,5
<b>Indeks plastičnosti (I<sub>P</sub>) %</b>	140 - 380

Dakle, prema navedenom, u izradu ovog rada krenulo se s hipotezama da debljina i vlažnost nadsloja utječu na svojstva GCL-a, te da vrijeme provedeno u odlagalištu otpada utječe na promjene indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličku propusnost GCL-a. Ove će pretpostavke biti verificirane provedbom niza jednostavnih i brzih laboratorijskih ispitivanja kojima je cilj utvrditi utjecaj svojstava nadsloja, te okolišnih prilika na svojstva GCL-a i njegove mineralne komponente, te omogućiti procjenu dugotrajne učinkovitosti GCL-a.

Provedenim ispitivanjima na uzorcima GCL-a i bentonitne gline na kraju rada trebalo je:

- identificirati ključni parametri koji utječu na promjenu indeksnih pokazatelja bentonitne gline,
- utvrditi optimalne vrijednosti parametara nadsloja koji osiguravaju dugoročnu učinkovitost GCL-a;
- uspostaviti funkcijske veze između indeksnih pokazatelja i hidrauličke propusnosti bentonitne gline;
- definirati novi kriteriji i predložiti postupci za procjenu dugotrajne učinkovitosti GCL-a kao mineralne brtvene barijere.

Navedena ispitivanja, koja su i prikazana u tablici 6-3, provedena su u Geomehaničkom laboratoriju - Odjel za mehaniku tla na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u laboratorijskim uvjetima uz korištenje deionizirane vode kao ispitnog fluida na poremećenim i neporemećenim uzorcima. Mineraloška ispitivanja na uzorcima bentonitne gline provedena su u Zavodu za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-

geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, dok je kemijska analiza odabranih uzoraka bila napravljena u komercijalnom analitičkom laboratoriju ACME Analytical Laboratories Ltd. u Kanadi.



Tablica 6-3 Tablični prikaz provedenih ispitivanja na uzorcima betonitne gline i GCL-a

Uzorak	Mjesec /godina ugradnje	Debljina strukturnog paketa (Å)	Udio montmorillonita u uzorku (%)	CEC (meq/100g)	pH	Električna provodljivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Vlažnost bentonitne gline (%)	Gustoća čvrstih čestica ( $\text{Mg}/\text{cm}^3$ )	Boja	Atterbergove granice (%)	Volumen slobodnog bubrenja (ml/2g)	Sposobnost upijanja vode (%)	Indeks gubitka fluida (ml)	Hidraulička propusnost (m/s)
S1	4./2004.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
S4	4./2004.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S2	4./2004.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S3	4./2004.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
S26	6./2009.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
S7	6./2009.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
S21	6./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S19	6./2009.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
S11	6./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S16	6./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S13	6./2009.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	
S6	6./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S5	6./2009.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
S9	6./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S31	8./2009.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S32	8./2009.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
S15	7./2010.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S14	7./2010.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	
S20	8./2010.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
S23	8./2010.				+	+	+		+	+	+	+	+	+
S27	9./2010.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
S29	10./2010.				+	+	+		+	+	+	+	+	
S30	10./2010.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Referentna vrijednost		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

## 7 METODE ISTRAŽIVANJA SVOJSTAVA BENTONITNE GLINE I GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA

Mineraloška ispitivanja na uzorcima bentonitne gline napravljena su na Zavodu za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ispitivanja su obuhvatila mineralošku analizu primjenom rendgenske difrakcije na prahu, analizu kapaciteta kationske zamjene, određivanje vlažnosti, gustoće i boje, te određivanje pH i električne vodljivosti uzoraka.

Kemijska analiza odabranih uzoraka koja je obuhvatila ispitivanje sadržaja glavnih i sporednih elemenata, elemenata u tragovima i elemenata rijetkih zemalja napravljena je u komercijalnom analitičkom laboratoriju ACME Analytical Laboratories Ltd. u Kanadi.

### 7.1 Fizičke analize bentonitne gline

Boja je određena Munselovim atlasom boja na dvadeset i četiri uzorka.

Gustoća čvrstih čestica bentonitne gline određena je piknometrom na sedam odabranih uzoraka bentonitne gline prema normi ASTM D854-14, dok je vlažnost uzorka određena gravimetrijski na 5 grama uzorka sušenih 24 sata na 105°C.

### 7.2 Kemijske analize bentonitne gline

#### 7.2.1 Masena spektrometrija s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS)

Analiza elemenata u tragovima provedena je na trinaest uzoraka kod kojih se 0,2 grama uzorka rastalilo uz dodatak litij borata ( $\text{LiBO}_2$ ) te nakon toga otopilo u razrijeđenoj dušičnoj kiselini ( $\text{HNO}_3$ ). Dobivena otopina se raspršila u struju argona (plazmu).

Ovom analizom dobivene su koncentracije elemenata u tragovima (Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, Zr, Y) i elemenata rijetkih zemalja (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb i Lu).

### 7.2.2 XRF spektometrija

XRF spektometrija je analitička metoda koja se temelji na mjerenju sekundarnog zračenja koje je poznato još i kao fluorescentno rendgensko zračenje. Naime, atomi kemijskih elemenata mogu biti pobuđeni snopom primarnih rendgenskih zraka visoke energije koje su iz rendgenske cijevi usmjerene prema uzorku. Zračenje koje je karakteristično za različiti element u uzorku detektira se ili tehnikom razlaganja po valnoj duljini ili tehnikom razlaganja po energiji.

Ovom metodom moguće je odrediti osim osamdeset glavnih elemenata nekog uzorka u širokom rasponu njihovih koncentracija još i koncentracije elemenata u tragovima izražene u jedinici ppm. Zbog toga je ova metoda jedna od najčešće primjenjivanih metoda prilikom kemijske analize uzoraka.

Rezultati ispitivanja glavnih kemijskih elemenata prikazuju se u oksidima ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Uz navedene okside kao rezultat se prikazuje i gubitak žarenjem (eng. *Loss on ignition* - LOI) koji je dobiven iz razlike mase prije i poslije žarenja na  $1000^\circ\text{C}$ .

### 7.2.3 Određivanje pH

Određivanje pH izvedeno je prema austrijskoj normi ÖNORM L1083 (1989) na svih 24 uzoraka bentonitne gline. Koncentracija vodikovih iona određena je na uzorcima osušenim na zraku i usitnjenima na veličinu zrna 2 – 4 mm. Mjerena je pH-metrom WTW pH 196 i elektrodom Sen Tix97T u vodenoj suspenziji (uzorak : deionizirana voda = 1 : 2,5) nakon dva sata potresanja u tresilici.

### 7.2.4 Određivanje električne vodljivosti

Određivanje električne vodljivosti izvedeno je prema normi ISO 11265:1994 na svih 24 uzorka bentonitne gline. Uzorci potrebni za ovo ispitivanje također su sušeni na zraku i usitnjeni na veličinu zrna 2 – 4 mm.

Električna vodljivost mjerena je u vodenoj suspenziji uzorka (uzorak : deionizirana voda = 1:5) i to nakon dva sata potresanja u tresilici. Za mjerenje je upotrijebljen konduktometar WTW LF 191 s elektrodom LS1/T – 1,5. Vrijednost električne vodljivosti izražena je u  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 7.3 Mineraloške analize

Mineraloška analiza obuhvatila je određivanje mineralnog sastava primjenom rendgenske difrakcije na prahu i određivanje kapaciteta kationske zamjene na trinaest uzoraka uzetih sa završnog pokrovnog sloja na odlagalištu otpada u središnjoj Hrvatskoj.

#### 7.3.1 Određivanje mineralnog sastava primjenom rendgenske difrakcije na prahu

Rendgenska difrakcija na prahu je analitička metoda za određivanje mineraloškog sastava i kristalografskih karakteristika, a zasniva se na uporabi rendgenskih zraka i njihovoj difrakciji. Rendgenske zrake su elektromagnetski valovi čije se valne duljine kreću  $10^{-10}$  do  $10^{-13}$  metara.

Ova metoda koristi se za uzorke koji imaju određenu unutarnju simetriju kristala gdje se prilikom snimanja pojavljuju difrakcijski maksimumi tolikog intenziteta da se mogu odrediti. Raspored difrakcijskih maksimuma zabilježen brojačem naziva se difrakcijska slika, a njegov intenzitet ovisi o sadržaju jedinične ćelije. Za svaki mineral postoji karakteristična slika praha, zapravo postoji niz karakterističnih difrakcijskih maksimuma određenih intenziteta.

Dakle, uzorci su prije analize samljeveni u prah u ahatnom mlinu, te je izrađen neorijentirani uzorak praha originalnog uzorka. Difrakcijske slike praha snimljene su difraktometrom s brojačem Philips PW 1830, CuK $\alpha$  zračenjem ( $\lambda = 0,15418$  nm) u rasponu  $2 - 70^\circ 2\theta$ .

Za uspješno determiniranje minerala glina potrebno je izdvojiti frakciju čestica  $< 2 \mu\text{m}$  u kojoj je udio većine minerala glina u uzorku najveći. Stoga su uzorci dobro dispergirani (magnetna miješalica i ultrazvučna kupelj, te natrijev polisulfat), te je frakcija čestica  $< 2 \mu\text{m}$  izdvojena izvlačenjem (dubina i vrijeme izvlačenja određeni su prema Stockesovom zakonu). Suspenzija izdvojena pomoću pipete prenijeta je u keramičku zdjelicu i osušena na vodenoj kupelji.

Nakon snimanja neorijentiranog praha frakcije  $< 2 \mu\text{m}$ , navedena frakcija je pomiješana s etilen-glikolom i ponovno snimljena. Na kraju su uzorci frakcije žareni dva sata na temperaturi od  $600^\circ\text{C}$ .

Difrakcijske slike praha frakcije čestica  $< 2 \mu\text{m}$  tretirane etilen-glikolom snimljene su u području  $2 - 32^\circ 2\theta$ , dok su žareni uzorci snimani u području  $2 - 14^\circ 2\theta$ . Snimanje nakon oba tretmana izvršeno je brzinom od  $1^\circ/\text{min}$ . Minerali glina identificirani su na temelju tablice 7-1.

**Tablica 7-1** Kriteriji identifikacije minerala glina prema veličini međumrežnog razmaka refleksa 001 (u Å)

<b>Mineral</b>	<b>Prirodni (A)</b>	<b>EG (A)</b>	<b>600°C (A)</b>
Kaolinski minerali	7	7	nestaje
Illitični materijal	10	10	10
Kloriti	14	14	14↑
Vermikuliti	14	14	10
Smektiti	10-15	17	10

Legenda: EG – uzorak tretiran etilenglikolom; 600°C – uzorak žaren na 600°C; ↑ - difrakcijski maksimum na oko 14 Å je pojačan.

### 7.3.2 Određivanje kapaciteta kationske zamjene (CEC)

U svrhu ovog istraživanja CEC je određen na trinaest uzoraka mljevene bentonitne gline pomoću Cu-trien kompleksa. Prilikom dodavanja Cu-triena suspenziji uzorka i deionizirane vode, dolazi do apsorpcije Cu-triena u međuslojni prostor pri čemu iz njega izlaze kationi koji su bili prisutni. Koliko će Cu-triena ući u molekulu ovisi o negativnom naboju na površini molekule. Cu-trien boji uzorak plavim obojenjem pa se apsorpcija može mjeriti kolorimetrom.

U čašu se odvaži 0,5 g s točnošću na četiri decimale. Uzorke se zatim prelije s 10 ml deionizirane vode i dispergira 20 minuta u ultrazvučnoj kupelji. Dispergiranoj suspenziji dodaje se 30 ml reagensa (0,01 M Cu-trien), promiješa štapićem i ostavi reagirati pet minuta. Dobivena suspenzija filtrirana je kroz filter papir u tikvice. Nakon što sva suspenzija prođe kroz filter papir, talog koji ostaje na njemu ispiri se deioniziranom vodom. Tikvica se nakon toga puni vodom do oznake 50 mililitara.

Dobiveni filtrat analiziran je kolorimetrom pri čemu se mjerilo obojenje. Svaki kemijski element emitira elektromagnetske zrake određenih valnih duljina koje su karakteristične samo njemu. Stoga se kolorimetrijskim metodama određuju koncentracije obojenih smjesa koji se apsorbiraju u vidljivom dijelu spektra.

## 7.4 Određivanje indeksnih pokazatelja bentonitne gline

Ispitivanja Atterbergovih granica i indeksnih pokazatelja napravljeno je na dvadeset i tri uzorka bentonitne gline uzorkovane na terenu, te jednom uzorku bentonitne gline referentnih vrijednosti, dok je hidraulička propusnost određena na ukupno deset uzoraka GCL-a.

### 7.4.1 Određivanje granice tečenja

Granice tečenja određuju se laboratorijski pomoću dviju metoda: Casagrandeovim uređajem, te pomoću stožastog penetrometra prema normi BS 1377: dio 2.

Uzorci su pripremljeni mljevenjem i sušenjem na 105°C tijekom 24 sata. Nakon sušenja uzorak je prosijan. Prolaz kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$  korišten je za određivanje granice tečenja. Dio ovako pripremljenog uzorka, otprilike 150 g do 200 g miješa se s deioniziranom vodom na staklenoj plohi kako bi se homogenizirala vlažnost uzorka. U Casagrandeovom uređaju ispitivanja se provode pri četiri različite vlažnosti uzorka, tako da se očekivani rezultat iskazan kao broj udaraca potreban za zatvaranje standardiziranog žlijeba mora nalaziti u rasponu od 10 do 50 udaraca. Za svaki se uzorak odredi vlažnost,  $w$ , a rezultati se unose na dijagram  $w$  (% u linearnom mjerilu) i  $N$  (broj udaraca u logaritamskom mjerilu), te se granica tečenja određuje kao vlažnost koja odgovara broju udaraca  $N = 25$ .

Kod određivanja granice tečenja pomoću stožastog penetrometra uzorak se priprema na isti način kao i kod ispitivanja Casagrandeovim uređajem. Korišten je stožasti penetrometar s padajućim stošcem karakteristika 30°/80 g (kut šiljka 30°/masa stošca 80 grama). Stožac se prisloni na vlažno tlo u zdjelici uređaja te pušta da prodre vlastitom težinom u uzorak. Korištena je metoda više točaka, prema kojoj se granica tečenja određuje kao vlažnost koja odgovara prodoru stošca u tlo na dubini od 20 milimetara.

Ispitivanja provedena u Švedskom geotehničkom institutu (eng. *Swedish Geotechnical Institute*) pokazuju da kod ispitivanja granice tečenja za smektitne gline provedenih pomoću Casagrandeovog uređaja i stožastog penetrometra može doći do odstupanja dobivenih rezultata. Pri tome su preporučena odstupanja u rezultatima između te dvije metode do 20% (Pusch 2002).

#### 7.4.2 Određivanje granice plastičnosti

Granica plastičnosti određuje se laboratorijski ručnim valjanjem valjčića vlažnog tla na staklenoj podlozi prema normi BS 1377: dio 2. Uzorak je pripremljen kao i za ispitivanje granice tečenja opisano u poglavlju 7.4.1.

Prema normi granica plastičnosti definirana je kao vlažnost uzorka na kojemu se na valjčićima promjera 3 mm pojave pukotine. S valjanjem se obično započinje pri većoj vlažnosti od očekivane granice plastičnosti, a pokus se ponavlja tako što se između dva uzastopna pokusa uzorku oduzima vlažnost gnječenjem između dlanova tj. uzorak se isušuje, sve dok se ne zadovolji traženi kriterij. Granica plastičnosti određuje se kao prosječna vrijednost iz tri ispitivanja čiji rezultati mogu odstupati kako je propisano normom.

Indeks plastičnosti  $I_P$  (količina vode potrebna da bi tlo prešlo iz polučvrstog u žitko stanje) dobiva se kao razliku između granice tečenja  $w_L$  i granice plastičnosti  $w_P$ .

Na osnovi dobivenih vrijednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti može se izvršiti klasifikacija sitnozrnatih tala korištenjem tzv. dijagrama plastičnosti (slika 7-1). U ovom dijagramu na apscisu se nanosi vrijednost granice tečenja, a na ordinatu vrijednost indeksa plastičnosti. Prema Knappettu (2012), klasifikacija gline prema plastičnosti podijeljena je u pet skupina: nisku (L), srednju (I), visoku (H), vrlo visoku (V) i ekstremno visoku plastičnost (E), kako je prikazano na slici 7-1.

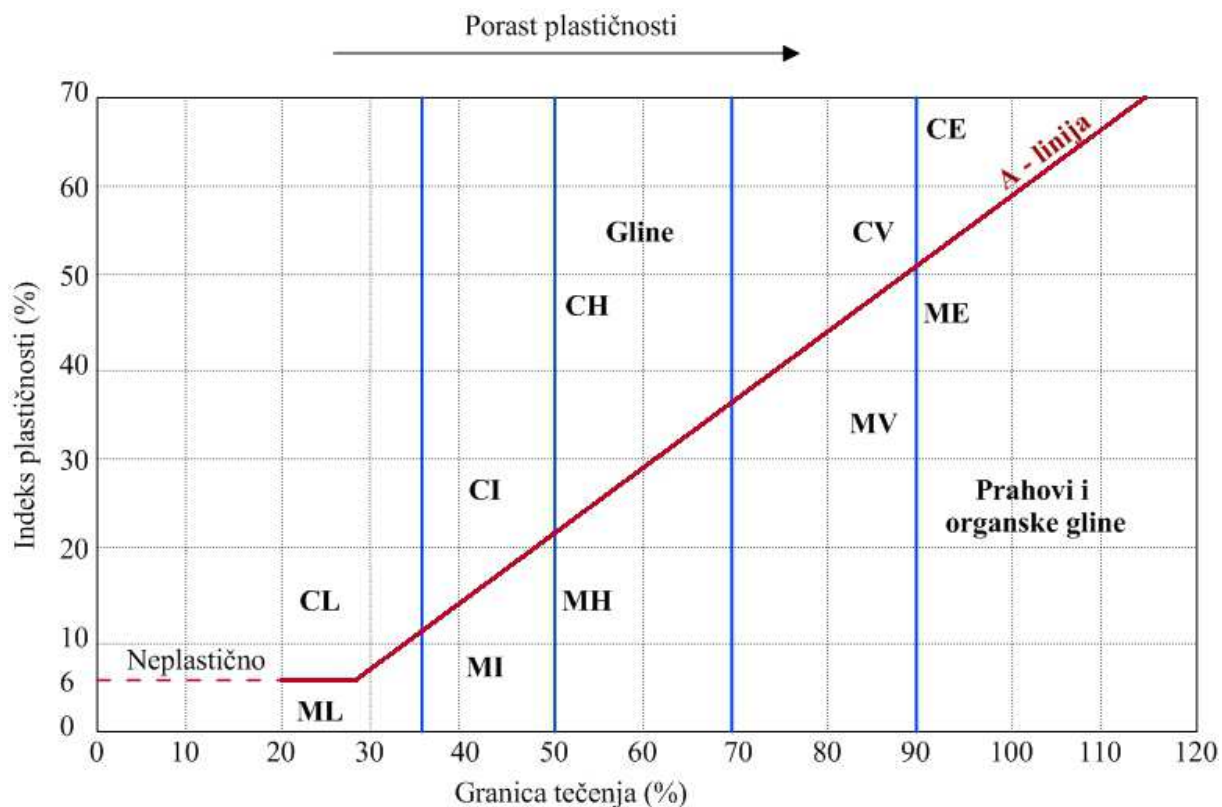
Rezultati se svrstavaju oko pravca koji se naziva „A-linija“ čija je jednadžba:

$$I_P = 0,73 \cdot (w_L - 20) \quad (7-1)$$

Gdje je:

$I_P$  – indeks plastičnosti (%),

$w_L$  – granica tečenja (%).



**Slika 7-1** Dijagram plastičnosti (modificirano prema Knappett & Craig 2012)

#### 7.4.3 Određivanje volumena slobodnog bubrenja

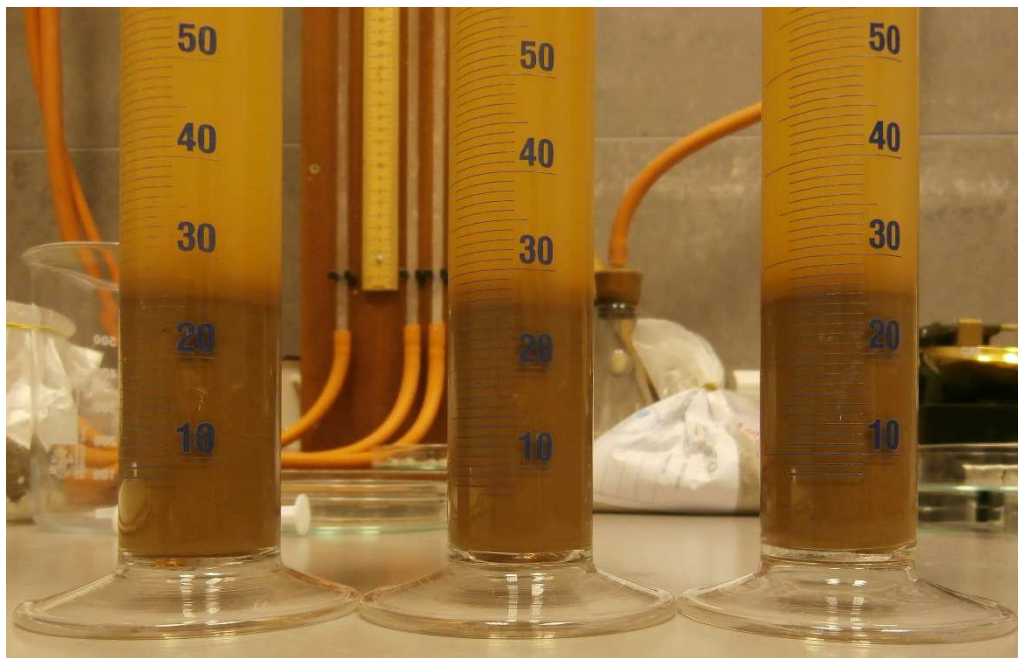
Volumen slobodnog bubrenja određen je laboratorijskim ispitivanjem prema normi ASTM D 5890. Ova norma omogućuje istraživanje karakteristika bubrenja tla u deioniziranoj vodi, a primjenjuje se za procjenu učinkovitosti brtvenih svojstava glinenih geosintetičkih barijera.

Postupak određivanja indeksa slobodnog bubrenja proveden je uzorcima pripremljenim mljevenjem i sušenjem na  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  tijekom 24 sata. Nakon sušenja uzorak je prosijan. Prolaz kroz sito veličine otvora  $70 \mu\text{m}$  korišten je za određivanje volumena slobodnog bubrenja.

Menzura zapremine 100 ml napuni se deioniziranom vodom do oznake 90 ml. Masa uzorka od  $2,00 \pm 0,01 \text{ g}$  se zatim postupno po 0,1 g u vremenskom intervalu od po 30 sekundi dodaje u menzuru. Postupak je potrebno ponavljati svakih 10 minuta sve dok se cijeli uzorak ne ubaci u menzuru. Nakon što je zadnje zrno palo na dno menzure, zaostale čestice na stjenkama menzure potrebno je isprati, a menzura se dopuni deioniziranom vodom do oznake 100 ml nakon čega je potrebno očitati temperaturu vode i zatvoriti menzuru. Dva sata nakon zatvaranja menzure uzorak je potrebno homogenizirati naginjanjem menzure pod kutom od



45° i valjanjem između dlanova. Nakon što je prošlo ukupno 16 sati od završetka dodavanja uzorka očitava se volumen nabubrenog uzorka (slika 7-2).



**Slika 7-2** Menzure s uzorkom prilikom određivanja volumena slobodnog bubrenja

#### 7.4.4 Određivanje sposobnosti upijanja vode

Sposobnost upijanja vode ispitana je prema normi DIN 18132:95 i služi za ispitivanja indeksnih svojstva glinenih materijala. Ispitivanja su provedena na samljevenim uzorcima sa 100% prolaska kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$  i osušenim na temperaturi 60°C u vremenskom razdoblju od 48 sati. Uređaj je napunjen deioniziranom vodom kao ispitnom tekućinom, a na staklenu filter pločicu usipano je 0,2 g pripremljenog uzorka. Volumen upijanja ( $V_w$ ) očitavan je u vremenskim intervalima ( $t$ ), definiranim normom između 30 sekundi i 24 sata (slike 7-3 i 7-4).

Prilikom ispitivanja dolazi do isparavanja vode iz uređaja. Zbog toga je potrebno koristiti i referentni uređaj, bez uzorka na poroznoj pločici, koji je ispunjen samo deioniziranom vodom.



**Slika 7-3** Uređaj za određivanje sposobnosti upijanja vode



**Slika 7-4** Uzorak tla u obliku stošca u uređaju za određivanje sposobnosti upijanja vode

Količina vode upijene u uzorak tla  $m_w$  u vremenu  $t$  računa se prema izrazu:

$$m_w = (V_w - V_K) \cdot \rho_w, \quad (7-2)$$

gdje je:

$m_w$  – količina upijene vode u vremenu  $t$  (g),

$V_w$  – volumen upijene vode u vremenu  $t$  (cm<sup>3</sup>),

$V_K$  – volumen ishlapjele vode u vremenu  $t$  (cm<sup>3</sup>),

$\rho_w$  – gustoća vode ( $\rho_w=1,0$  Mg/m<sup>3</sup>).

Iz dobivene vrijednosti  $m_w$  može se izračunati sadržaj upijene vode  $w_A$ , pri čemu je:

$$w_A = m_w/m_d, \quad (8-3)$$

gdje je:

$m_d$  – količina uzorka suhog tla koja je stavljena na poroznu pločicu (g).

Postotak upijene vode prikazuje se u dijagramu, pri čemu se na apscisu nanosi vrijeme  $t$  u logaritamskom mjerilu, a na ordinatu sadržaj upijene vode  $w_A$  u linearnom mjerilu.

#### 7.4.5 Određivanje indeksa gubitka fluida

Određivanjem indeksa gubitka fluida dobiva se uvid u brtvena svojstva glinenih materijala, a koristi se i za kontrolu kvalitete glinenih geosintetičkih barijera.

Ispitivanja se provode prema normi ASTM D 5891 na pripremljenim samljevenim uzorcima bentonitne gline, sušenima na 105°C, sa 100% prolaza kroz sito veličine otvora 70 μm. Uzorak mase  $22,5 \pm 0,01$  g izmiješan je s  $350 \pm 5$  ml deionizirane vode u menzuri volumena 500 ml. Nakon što je suspenzija odstajala 16 sati, prelivena je u cilindar na čijem dnu se nalazio filter papir (slika 7-5). Nakon nanošenja tlaka od 650 kPa, započinje se mjeriti vrijeme i količina procjedene tekućine u menzuri. Nakon 7,5 minuta, prva menzura koja se nalazila ispod cilindra, zamijenjena je drugom u koju će procjedna tekućina biti skupljana narednih 22,5 minute.

Indeks gubitka fluida dobije se kao dvostruka vrijednost volumena očitano u drugoj menzuri.



**Slika 7-5** Uređaj za određivanje indeksa gubitka fluida

## 7.5 Određivanje hidrauličke propusnosti GCL-a

Ispitivanja propusnosti GCL-a provedena su u troosnoj ćeliji (slika 7-6) prema normi ASTM D5084 metodom stalne razlike tlakova na uzorcima glinenih geosintetičkih barijera u uvjetima potpunog zasićenja. Ispitivanja su provedena s malim odstupanjem od norme. Uzorak je saturiran izvan troosne ćelije tri dana prije ugradnje u ćeliju, čime je ubrzan postupak ispitivanja, jer bi saturacija suhog uzorka u troosnoj ćeliji kako je to propisano normom predugo trajala. Postupak saturiranja se sastojao u izrezivanju GCL-a na promjer od 70 milimetara kako bi stao u kalup. Na uzorak su s gornje i donje strane stavljeni filtar papir, porozne pločice i opterećenje od 15,66 kPa. Zatim je dodana deionizirana voda i uzorak je ostavljen, kako bi nabubrio, tri dana pod navedenim opterećenjem. Nakon tri dana uzorku su izmjerene masa i dimenzije, te je takav ugrađen u troosnu ćeliju. Također, prilikom ispitivanja korištena je deionizirana voda, a ne kako je preporučeno normom vodovodna voda ili otopina  $\text{CaCl}_2$ , jer bentonitna glina lako stupa u reakcije s tvarima u okolišu što se htjelo izbjeći. Normom je također preporučen maksimalni hidraulički gradijent koji bi kod tala propusnosti manje od  $10^{-9}$  m/s trebao biti najviše 30. Međutim, u stručnoj literaturi je navedeno kako je kod ispitivanja glinene geosintetičke barijere, dozvoljeno korištenje hidrauličkog gradijenta u rasponu od 50 do 600 (Shakelford et al. 2000.) U ovom istraživanju gradijenti su se nalazili u rasponu od 32 do 194.



**Slika 7-6** Ispitivanje koeficijenta propusnosti u troosnom uređaju

## **8 REZULTATI ISPITIVANJA PROVEDENIH NA UZORCIMA NADSLOJA I REFERENTNOM UZORKU BENTONITNE GLINE**

U ovom poglavlju prikazana je analiza rezultata dobivenih laboratorijskim ispitivanjima na sedamnaest uzoraka tala iz nadsloja i referentnog uzorka bentonitne gline.

### **8.1 Rezultati ispitivanja uzoraka nadsloja**

Iz dosadašnjih je istraživanja poznato kako različite vrste i debljine nadsloja mogu utjecati na svojstva bentonitne gline, pa tako i na svojstva GCL-a. Vodeći se tom pretpostavkom s odlagališta otpada iz završnog pokrovnog sloja prilikom otkopavanja uzorkovano je sedamnaest uzoraka nadsloja. Trinaest uzoraka uzeto je s jugoistočne strane odlagališta (S1, S4, S2, S3, S26, S7, S21, S19, S11, S16, S16, S32 i S31), a četiri sa sjeverozapadne strane odlagališta (S9, S14, S23 i S29) (slika 6-1). Uzorci su odlomljeni, ukoliko je bilo potrebe, čekićem, skupljani lopaticom, stavljeni u označene plastične vrećice i otpremljeni u laboratorij. Na terenu je izmjerena još i debljina slojeva, te su načinjene fotografije pojedinih istražnih raskopa.

U laboratoriju je određivana vlažnost i gustoća uzoraka nadsloja, te njegov granulometrijski sastav kombiniranom metodom (sijanje i areometriranje), a rezultati su zbirno prikazani u tablici 8-1.

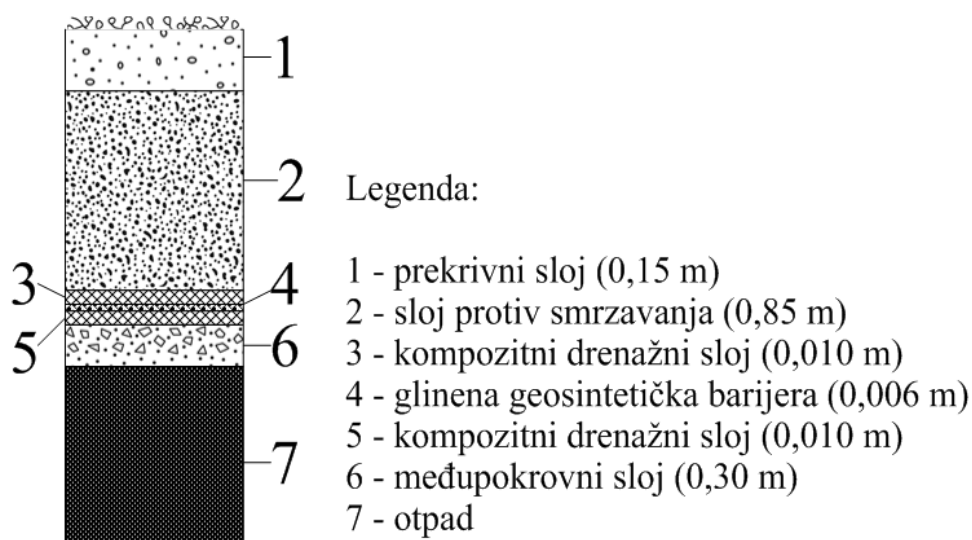
U elaboratu (ECOINA, 2014) je navedeno kako se komponente završnog pokrova na odlagalištu izvode na dva načina: jedan za pokrov na vrhu, a drugi za pokrov na stranicama.

**Tablica 8-1** Rezultati laboratorijskih ispitivanja za uzorke nadsloja

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Vlažnost nadsloja (%)	Gustoća nadsloja (Mg/m <sup>3</sup> )	Granulometrijski sastav (%)				Debljina nadsloja (m)
				Glina (C)	Prah (M)	Pijesak (S)	Šljunak (G)	
S1	4./2004.	7,8	1,56	27,00	51,00	20,00	2,00	0,58
S4	4./2004.	2,7	1,72	3,00	30,00	39,00	28,00	0,46
S2	4./2004.	8,05	1,63	27,00	53,00	15,00	5,00	0,86
S3	4./2004.	11,03	2,01	12,00	49,00	23,00	16,00	0,8
S26	6./2009.	6	1,33	32,00	45,00	13,00	10,00	0,3
S7	6./2009.	8	1,34	32,00	44,00	21,00	3,00	0,2
S21	6./2009.	6,7	1,6	31,00	46,00	11,50	11,50	0,3
S19	6./2009.	5	1,39	23,50	46,00	19,00	11,50	0,24
S11	6./2009.	15,7	1,53	36,00	45,00	12,00	7,00	0,2
S16	6./2009.	3,6	1,48	24,00	49,50	25,00	1,50	0,3
S13	6./2009.	10,5	1,62	15,00	45,00	31,80	8,20	0,33
S9	6./2009.	16,8	1,57	19,50	46,00	19,50	15,00	*
S31	8./2009.	12,5	1,59	45,00	16,00	12,00	27,00	0,59
S32	8./2009.	4,1	1,26	30,00	51,00	15,50	3,50	0,53
S14	7./2010.	13,09	1,58	4,00	25,00	37,50	33,50	*
S23	8./2010.	17,9	1,84	10,00	20,00	37,00	33,00	*
S29	10./2010.	15,5	1,94	12,00	52,00	29,80	6,20	*

-\* nije izmjereno

Prema navedenoma Elaboratu, a kako je ranije u radu spomenuto, može se uočiti da je tijekom izvedbe došlo do preinake drenažnog i brtvenog sustava. Tako je drenažni sloj od prirodnog tla debljine 0,5 m zamijenjen kompozitnim geosintetičkim drenažnim slojem debljine 0,1 m, a brtveni sloj od gline debljine 0,5 m zamijenjen je GCL-om debljine 0,006 metara (slika 8-1).



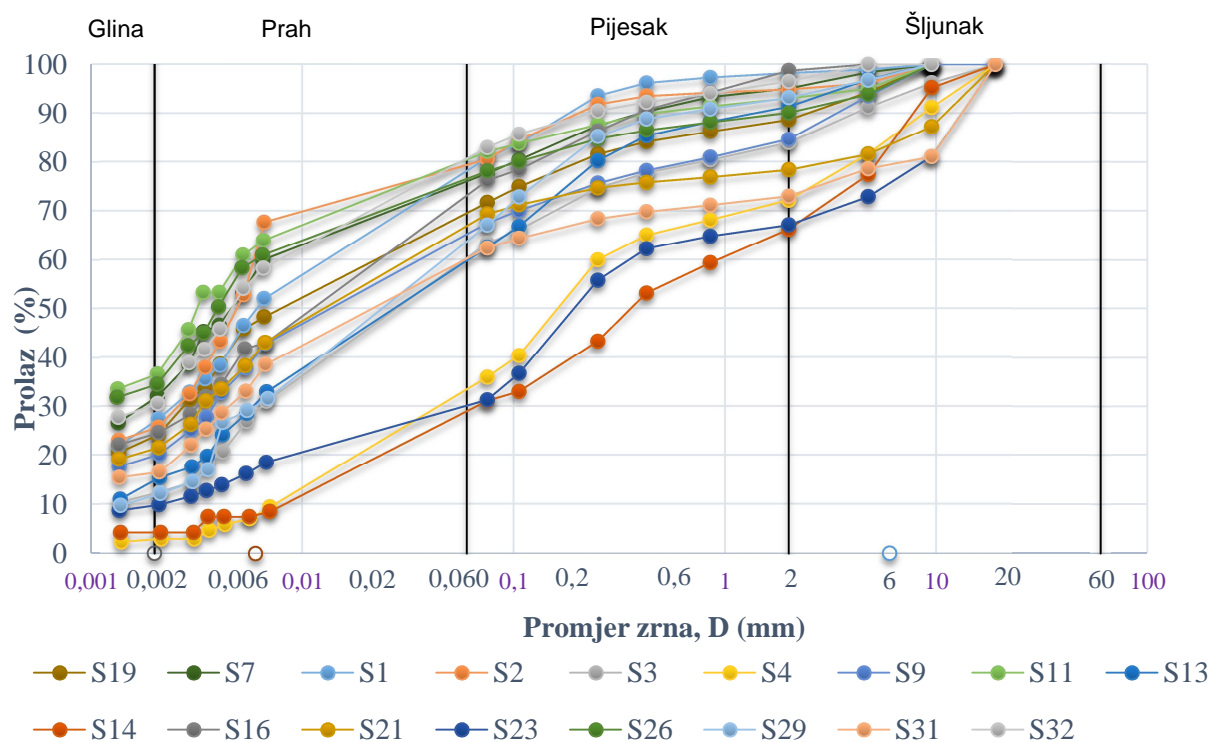
**Slika 8-1** Završni pokrovni sustav na bočnim stranicama predmetnog odlagališta otpada u središnjoj Hrvatskoj

Stanje zatečeno na odlagalištu 2013. godine, prilikom uzorkovanja nadsloja i GCL-a razlikovalo se od prikazanog u izvedbenom projektu. Prema rješenju, ali i prema slici 8-1 debljina nadsloja (prekrivni sloj i sloj protiv smrzavanja) trebala je iznositi jedan metar. Na slikama koje slijede u nastavku (8-8 i 8-9) i iz tablice 8-1 vidljivo je kako debljina nadsloja varira od 0,20 do 0,86 metara. Dakle, na mjestima gdje je izvršeno uzorkovanje za potrebe ovog istraživanja, debljina nadsloja nije iznosila jedan metar što se može pripisati različitim uzrocima od odstupanja od projektnog rješenja do naknadnog slijeganja slojeva, erozije tla i slično.

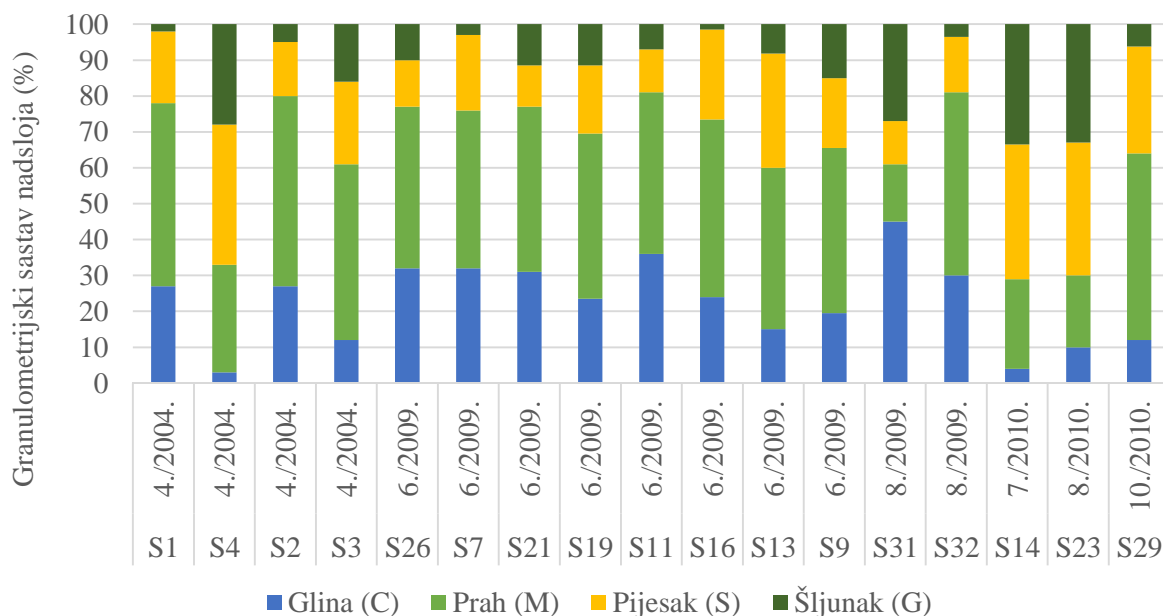
Iz rezultata dobivenih ispitivanjem vlažnosti vidi se kako ona varira između 2,7% i 17,9%, dok gustoća varira od 1,26 Mg/m<sup>3</sup> do 2,01 Mg/m<sup>3</sup>. Napomenuti treba da su navedene vlažnosti nadslojeva GCL-a koji je najdulje u odlagalištu (travanj, 2004., w = 2,7%) i onoga koji je u trenutku uzorkovanja bio najkraće u odlagalištu (kolovoz, 2010., w = 17,9%) (slike 8-4 i 8-5).

Iz granulometrijskog dijagrama (slika 8-2), te sa slike 8-3 može se zaključiti kako je nadsloj različitog granulometrijskog sastava. U nadsloju S4, S14 i S23 prevladava krupnozrnati materijal s prevladavajućim udjelom pijeska, dok je u nadsloju ostalih uzoraka dominantan sitnozrnati materijal (prah s primjesama gline). Izuzetak je uzorak S32 koji je također sitnozrnatog sastava, ali u njegovom sastavu prevladava glina. Takav različit granulometrijski sastav može imati utjecaj na procjeđivanje vode do GCL-a, čime bi imao izravan utjecaj i na

indeksne pokazatelje. Je li to zaista tako, pokazati će daljnja ispitivanja čiji su rezultati navedeni u nastavku.



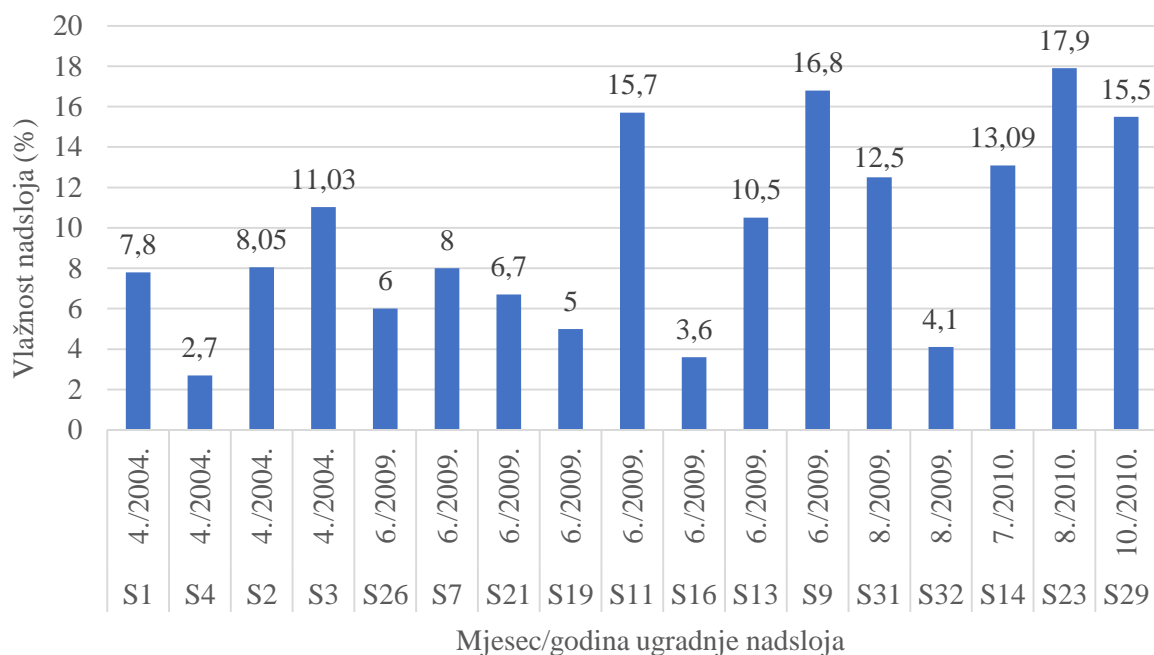
Slika 8-2 Granulometrijski dijagram uzoraka nadsloja



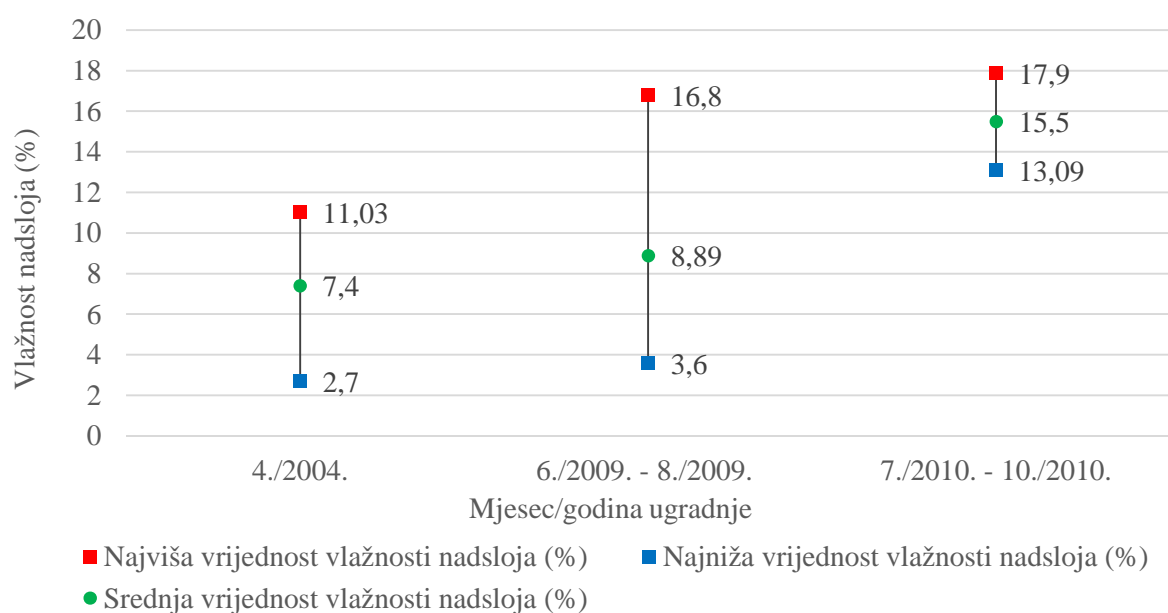
Slika 8-3 Granulometrijski sastav prikupljenih uzoraka nadsloja



Što se vlažnosti nadsloja (slika 8-4 i 8-5) tiče vidljivo je kako se kod uzoraka iz godine 2004. kreću u granicama od 2,7% za nadsloj S4 do 11,03% za nadsloj S3. Najmanju izmjerenu vlažnosti iz 2009. godine ima uzorak nadsloja S16 i koja iznosi 3,6%, dok najveću vrijednost ima nadsloj S9 sa 16,8%. Vlažnosti nadsloja uzoraka ugrađenih tijekom 2010. godine bitno se ne razlikuje i iznosi od 13,09% do 17,9%.

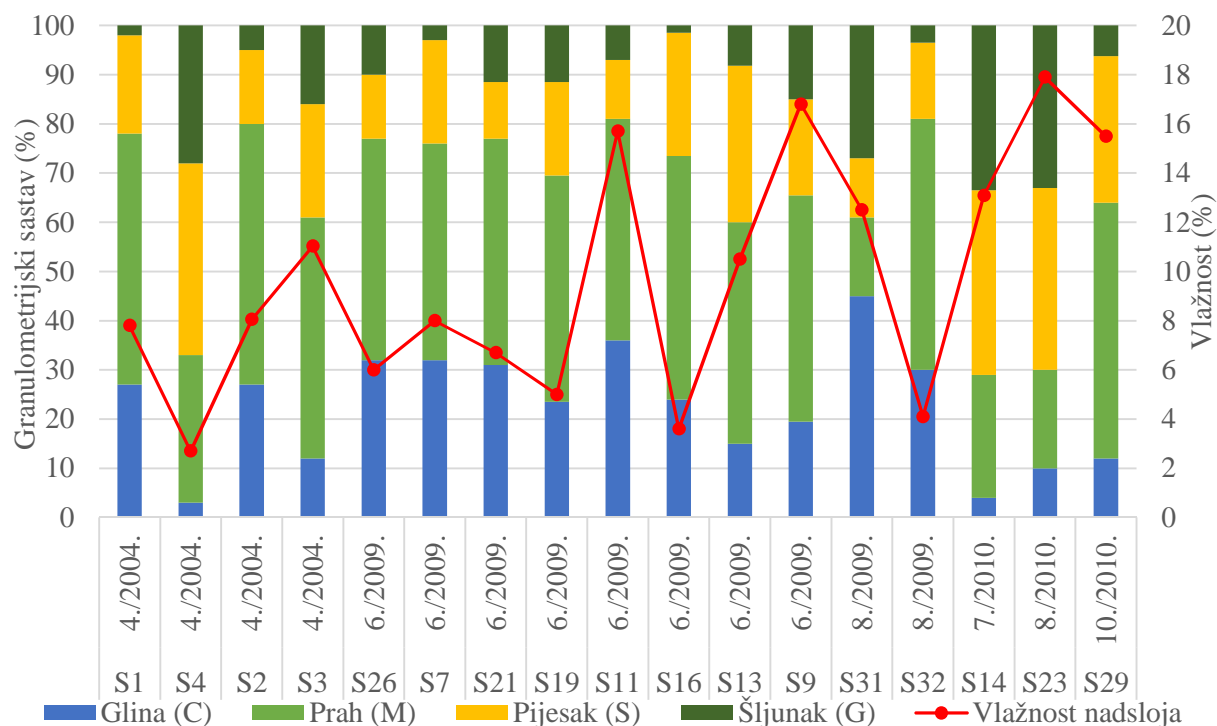


Slika 8-4 Vlažnost nadsloja s obzirom na godinu ugradnje



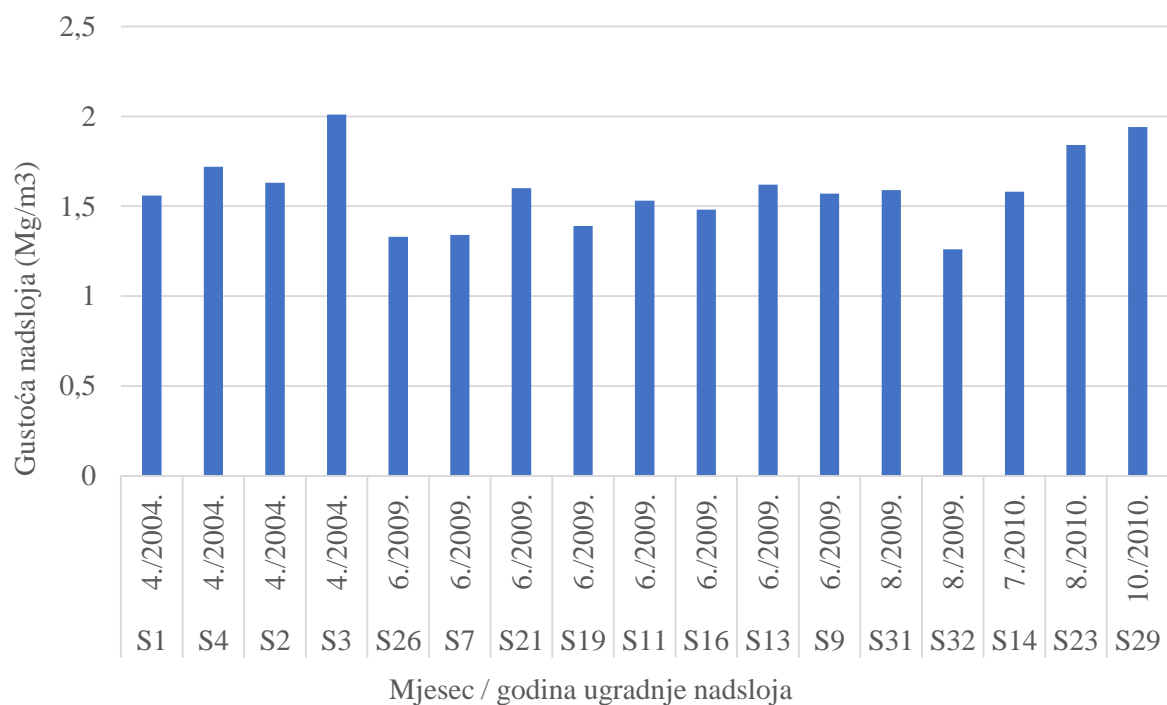
Slika 8-5 Prosječna vlažnost nadsloja

Usporedimo li granulometrijski sastav nadsloja s njegovom izmjerenom vlažnošću (slika 8-6) možemo ustanoviti kako veću vlažnost imaju uzorci u čijem sastavu prevladava krupnozrnato tlo (pijesak i šljunak). Pozornost treba obratiti i na to da su navedeni uzorci ujedno proveli najkraće razdoblje na odlagalištu otpada (2010. godina). Izuzetak čine uzorci S9 i S31 koji su na odlagalištu od 2009. godine.



**Slika 8-6** Usporedni prikaz granulometrijskog sastava i vlažnosti nadsloja

Gustoće tla u nadsloju (slika 8-7) s obzirom na godinu ugradnje kreću se u rasponu od 1,26 Mg/m<sup>3</sup> za nadsloj S32 ugrađene 2009. godine, do 2,01 Mg/m<sup>3</sup> iznad raskopa S3 ugrađene 2004. godine.



**Slika 8-7** Gustoća nadsloja s obzirom na godinu ugradnje

Usporedbom rezultata dobivenih ispitivanjem granulometrijskog sastava i vlažnosti uzoraka nadsloja, vidljivo je kako je različitost granulometrijskog sastava posljedica (slike 8-8, 8-9 i 8-10) raznolikosti prilikom izvedbe radova, čime se utječe na debljinu naslaga koje čine nadsloj, te na vlažnosti pojedinih uzoraka. Osim navedenog u nadslojevima je pronađen otpad (slika 8-10).



**Slika 8-8** Nadsloj iznad istražnog raskopa S7



**Slika 8-9** Nadsloj iznad istražnog raskopa S2



**Slika 8-10** Otpad u nadsloju

Prilikom daljnjih analiza osim podataka koji su dobiveni ispitivanjima GCL-a i bentonitne gline u obzir su uzeti i podaci dobiveni analizom nadsloja.

## 8.2 Rezultati ispitivanja referentnog uzorka bentonitne gline

Rezultati dobiveni ispitivanjem referentnog uzorka bentonitne gline, a koji su prikazani u tablici 8-2, te uspoređeni s preporučenim vrijednostima, u daljnjoj obradi podataka koristit će kao referentna vrijednost. Time će se vrijednosti dobivene njenim ispitivanjima usporediti s podacima dobivenim ispitivanjem bentonitne gline koja je provela u odlagalištu otpada određeno vremensko razdoblje.

**Tablica 8-2** Vrijednosti dobivene ispitivanjem referentnog uzorka

Svojstva bentonitne gline i GCL-a		Laboratorijski dobivene vrijednosti	Literaturne vrijednosti bentonitne gline	
Debljina strukturnog paketa (Å)		12,4	12,4	
Udio montmorillonita u uzorku (mas. %)		75	60 - 90 <sup>1</sup>	
CEC (meq/100g)		69±4	80 - 150	
pH		10,19	9 - 10,5 <sup>1</sup>	
Električna provodljivost (µS/cm)		550		
Vlažnost (%)		12,6		
Gustoća čvrstih čestica (Mg/m <sup>3</sup> )		2,76		
Boja		HUE 10YR		
Indeks plastičnosti	Casagrandeo v uređaj	382,4		
	Stožasti penetrometar	332,4		
Klasifikacija prema nacrtu norme ISO 14688-2 (2000)		CE		
Volumen slobodnog bubrenja (ml/2g)		27	Natrijska	> 20 <sup>2</sup>
			Kalcijska	≥ 8 <sup>2</sup>
Sposobnost upijanja vode (%)		453,33	Natrijska	≥ 450 <sup>2</sup>
			Kalcijska	≥ 150 <sup>2</sup>
Indeks gubitka fluida (ml)		20	Natrijska	< 18 <sup>2</sup>
			Kalcijska	
Hidraulička propusnost GCL-a (m/s) pri zadanim efektivnim naprežanjima	50 (kPa)	5,25 · 10 <sup>-11</sup>	< 10 <sup>-7 3</sup>	
	100 (kPa)	1,93 · 10 <sup>-11</sup>		
	200 (kPa)	5,87 · 10 <sup>-12</sup>		

<sup>1</sup> Egloffstein (2001) – navedene vrijednosti odnose se samo na natrijsku bentonitnu glinu

<sup>2</sup> DGGT

<sup>3</sup> Carson (1995)

## **9 REZULTATI ISPITIVANJA FIZIČKIH, KEMIJSKIH I MINERALOŠKIH SVOJTAVA UZORKOVANE BENTONITNE GLINE**

U tablici 9-1 zbirno su prikazani rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjima mineraloških, kemijskih, te fizičko-mehaničkih svojstava na ukupno dvadeset i četiri uzorka bentonitne gline.

Osim toga u tablici su navedene vrijednosti dobivene ispitivanjem hidrauličke propusnosti na deset uzoraka GCL-a.

Tablica 9-1 Zbirni pregled rezultata dobivenih ispitivanjima bentonitne gline i GCL-a

Bušotina	Mjesec/godina ugradnje	Debljina strukturnog paketa (Å)	Udio montmorillonita u uzorku (%)	CEC (meq/100g)	pH	Električna provodljivost (µS/cm)	Vlažnost (%)	Gustoća čvrstih čestica (Mg/m <sup>3</sup> )	Boja	Indeks plastičnosti (%)		Klasifikacija prema dijagramu plastičnosti	Klasifikacija prema nacrtu norme ISO 14688-2 (2000)	Volumen slobodnog bubrenja (ml)	Sposobnost upijanja vode (%)	Indeks gubitka fluida (ml)	Hidraulička propusnost (m/s) pri zadanim efektivnim naprezanjima (kPa)		
										Casagrandeov uređaj	Stožasti penetrometar						50	100	200
S1	4./2004.	13- mješanoslojni	75	75±5	7,61	2833	9,79	2,63	HUE 2.5Y	86,50	88,50	CH	CE	16	320,00	32	1,95·10 <sup>-09</sup>	2,04·10 <sup>-10</sup>	4,48·10 <sup>-11</sup>
S4	4./2004.				8,91	4677	11,14		HUE 7.5YR	82,70	89,70	CH/MH	CE/ME	15	307,50	34			
S2	4./2004.				8,66	268	11,83		HUE 10YR	81,70	83,70	CH	CE	17	324,17	16			
S3	4./2004.	15,4	75	73±1	7,87	799	10,99	2,75	HUE 10YR	91,60	83,60	MH	ME	12	207,50	89			
S26	6./2009.	14,6	55	56±1	7,76	797	11,47		HUE 2.5YR	157,20	156,20	CH	CE	12	261,67	61		1,15·10 <sup>-10</sup>	2,09·10 <sup>-11</sup>
S7	6./2009.	14,6	60	70±1	7,39	741	15,71	2,75	HUE 7.5YR	72,15	74,15	MH	ME	9	245,17	76			4,44·10 <sup>-09</sup>
S21	6./2009.				7,86	747	13,86		HUE 10YR	66,50	66,50	MH	ME	9	217,50	74			
S19	6./2009.	15	50	55±1	7,58	930	21,69		HUE 7.5YR	75,30	77,30	CH/MH	CE/ME	10	210,83	86		6,18·10 <sup>-10</sup>	3,83·10 <sup>-10</sup>
S11	6./2009.				7,81	279	16,31		HUE 10YR	85,90	86,90	CH/MH	CE/ME	9	174,50	80			
S16	6./2009.				9,11	499	11,09		HUE 10YR	74,10	76,10	CH/MH	CE/ME	10	216,67	66			
S13	6./2009.	15,5	65	69±3	7,77	765	15,57		HUE 10YR	68,60	68,60	CH/MH	CE/ME	8	163,00	92			
S6	6./2009.				8,98	649	12,21		HUE 2.5Y	100,09	102,09	CH	CE	11	242,50	70			
S5	6./2009.	15- mješanoslojni	70	72±0,2	7,68	715	11,51	2,72	HUE 5Y	105,60	95,60	CH	CE	11	233,33	68	3,79·10 <sup>-10</sup>	2,45·10 <sup>-10</sup>	5,61·10 <sup>-11</sup>
S9	6./2009.				8,98	644	9,63		HUE 5Y	154,70	136,70	CH	CE	13	292,50	84			
S31	8./2009.				7,82	774	10,3		HUE 5YR	136,46	118,46	CH	CE	11	265,00	76			
S32	8./2009.	15,5	60	61±0,3	7,84	624	9,12		HUE 5Y	90,70	84,70	CH	CE	12	238,33	60	1,75·10 <sup>-09</sup>	1,23·10 <sup>-09</sup>	1,94·10 <sup>-10</sup>
S15	7./2010.				7,86	668	9,79		HUE 5Y	134,70	121,70	CH	CE	13	249,17	51			
S14	7./2010.	15,1	50	52±1	8,85	467	10,77		HUE 5Y	130,90	122,90	CH	CE	12	258,33	56			
S20	8./2010.	15,5	70	69±2	7,79	804	9,05	2,72	HUE 10Y	133,60	118,60	CH	CE	13	268,33	54	7,89·10 <sup>-11</sup>	4,50·10 <sup>-11</sup>	2,26·10 <sup>-11</sup>
S23	8./2010.				8,17	283	10,26		HUE 2.5Y	114,50	100,50	CH	CE	12	220,83	56			
S27	9./2010.	15,6	55	59±1	7,84	689	11,26		HUE 5Y	123,80	128,80	CH	CE	12	212,50	64	8,11·10 <sup>-10</sup>	6,60·10 <sup>-10</sup>	3,43·10 <sup>-10</sup>
S29	10./2010.				8,11	279	9,95		HUE 2.5Y	132,40	111,40	CH	CE	11	250,83	52			
S30	10./2010.	15,1	60	60±2	7,61	702	10,46	2,69	HUE 10Y	173,30	151,30	CH	CE	12	245,00	60			2,19·10 <sup>-10</sup>
Referentna vrijednost		12,4	75	69±4	10,19	550	12,6	2,76	HUE 10YR	382,40	332,40	CH	CE	27	453,33	20	5,25·10 <sup>-11</sup>	1,93·10 <sup>-11</sup>	5,87·10 <sup>-12</sup>

## 9.1 Analiza fizičkih svojstava ispitivanih uzoraka bentonitne gline

### 9.1.1 Boja uzoraka

Boje uzoraka određene su prema Munsellovom sustavu boja, koji se temelji na subjektivnoj ljudskoj percepciji. Munsell je početkom prošlog stoljeća razvio prikaz boja u tri dimenzije atributa boja: HUE (ton), Value - V (svjetlina) i Chroma – C (zasićenost, čistoća ili intenzitet). Munsellov sustav boja sastoji se od niza kartica obojenih polja s kojima se uspoređuje ispitivani uzorak. Uzorci istog tona boja u tablicama poredani su u vertikalne i horizontalne redove. Uzorci u horizontalnom redu imaju istu svjetlinu, dok uzorci u vertikalnom redu imaju isto zasićenje.

Boje uzoraka izvađenih iz istražnih raskopa na odlagalištu prikazane su u tablici 9-2.

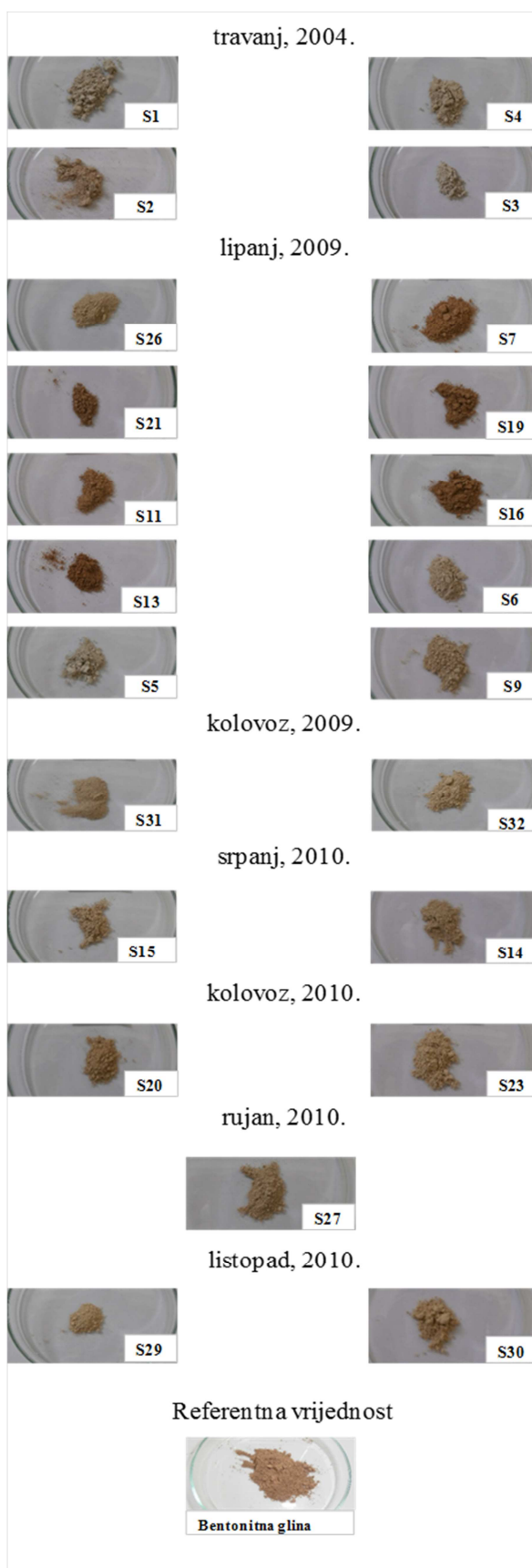
Prema tablici boja, te prema slici 9-1 na kojoj se vidi boja svih uzoraka bentonitne gline, ali i prema do sada dobivenim podacima može se pretpostaviti kako nije uvijek isti uzorak bentonitne gline bio „uklopljen“ u GCL, pa prema tome možemo pretpostaviti kako nije isti uzorak bio ugrađivan u odlagalište otpada. Na primjer, usporedimo li boje uzoraka bentonitne gline S26 i S27 vidimo da su tonovi boja isti, ali su različiti svjetlina i intenzitet. Također, boje uzoraka S32, S20, S14 i S30 razlikuju se po svjetlini i intenzitetu, dok im je ton isti.



Tablica 9-2 Boje uzoraka određene prema Munsellu

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Boja uzoraka (Munsell)			Debljina nadsloja (m)
S1	4./2004.	HUE 2.5Y	5/1	siva	0,58
S4	4./2004.	HUE 10YR	6/2	svjetlo-smeđe siva	0,46
S2	4./2004.	HUE 10YR	6/2	svjetlo-smeđe siva	0,86
S3	4./2004.	HUE 10YR	4/3	smeđa	0,80
S26	6./2009.	HUE 2.5YR	6/4	svjetlo-žuto smeđa	0,30
S7	6./2009.	HUE 7.5YR	4/3	smeđa	0,20
S21	6./2009.	HUE 10YR	4/3	smeđa	0,30
S19	6./2009.	HUE 7.5YR	4/4	smeđa	0,24
S11	6./2009.	HUE 10YR	4/3	smeđa	0,20
S16	6./2009.	HUE 10YR	4/4	tamno-žuto smeđa	0,30
S13	6./2009.	HUE 10YR	3/6	tamno-žuto smeđa	0,33
S6	6./2009.	HUE 2.5Y	6/2	svjetlo-smeđe siva	
S5	6./2009.	HUE 5Y	7/1	svjetlo siva	
S9	6./2009.	HUE 5Y	6/3	blijedo-maslinasta	
S31	8./2009.	HUE 5YR	6/3	blijedo-maslinasta	0,59
S32	8./2009.	HUE 5Y	6/2	svjetlo-zeleno siva	0,53
S15	7./2010.	HUE 5Y	6/3	blijedo-maslinasta	
S14	7./2010.	HUE 5Y	6/1	svjetlo-zeleno smeđa	
S20	8./2010.	HUE 10Y	5/4	žuto-smeđa	
S23	8./2010.	HUE 2.5Y	6/3	svjetlo-žuto smeđa	
S27	9./2010.	HUE 5Y	6/3	blijedo-maslinasta	
S29	10./2010.	HUE 2.5Y	4/3	maslinasto-smeđa	
S30	10./2010.	HUE 10Y	5/3	smeđa	
<b>Referentna vrijednost</b>		HUE 10YR	4/3	smeđa	

REZULTATI ISPITIVANJA FIZIČKIH, KEMIJSKIH I MINERALOŠKIH SVOJSTAVA UZORKOVANE BENTONITNE GLINE



**Slika 9-1** Uzorci bentonitne gline izvađeni iz GCL-a i uzorak referentne serije bentonitne gline

### 9.1.2 Gustoća i vlažnost uzoraka

Vlažnost uzoraka određena je na svih dvadeset i četiri uzorka, dok je gustoća čvrstih čestica određena na sedam uzoraka bentonitne gline.

Vrijednosti su zbirno prikazane u tablici 9-3.

Gustoća čvrstih čestica bentonitne gline može se kretati unutar raspona 2,6 - 2,8 Mg/m<sup>3</sup>. Iz tablice se vidi kako uzorak referentne vrijednosti ima najveću vrijednost gustoće čvrstih čestica koja iznosi 2,76 Mg/m<sup>3</sup>, te da i svi ostali uzorci zadovoljavaju naveden raspon vrijednosti.

Iz tablice 9-3 vidljivo je da je vlažnost uzoraka dobivenih iz odlagališta uglavnom manja od početne vlažnosti referentnog uzorka (12,6%), osim u nekoliko slučajeva tj. za uzorke S7, S21, S19, S11 i S13. Kod uzoraka ugrađivanih u odlagalište 2004. godine vlažnost bentonitne gline se kreće od 9,79% za uzorak S1 do 11,83% za uzorak S2. Vlažnost za uzorke ugrađene 2009. godine iznosi od 9,63% za uzorak S9 do 21,69% za uzorak S19. Za uzorke ugrađene 2010. godine vlažnost iznosi od 9,05% za uzorak S20 do 10,77% za uzorak S14. Iz navedenog se može uočiti kako uzorci koji su u odlagalište ugrađeni 2010. godine imaju najmanje vrijednosti vlažnosti bentonitne gline. Razlog tome mogao bi biti baš godina ugradnje.

Proizvođači GCL-a prilikom isporuke navode deklariranu vlažnost bentonitne gline u tom trenutku, to jest u trenutku isporuke, a koja u slučaju bentonitne gline Saline Seal iznosi 12%.

Kako su uzorci provedeni u odlagalištu određeno vremensko razdoblje dobiveni rezultati ne mogu se uspoređivati s deklariranim vrijednostima. Zbog toga će se kao dozvoljena vrijednost vlažnosti bentonitne gline uzeti referentna vrijednost. S obzirom na referentnu vrijednost od dvanaest uzoraka koji su u odlagalište ugrađeni 2009. godine njih sedam zadovoljava dozvoljenu vrijednost od oko 12% vlažnosti, dok je kod uzoraka S7, S21, S19, S11, S13 ta vrijednost dosta povećana. To je naročito istaknuto kod uzorka S19 kod kojeg vlažnost iznosi 21,69%.

REZULTATI ISPITIVANJA FIZIČKIH, KEMIJSKIH I MINERALOŠKIH SVOJSTAVA UZORKOVANE  
BENTONITNE GLINE

**Tablica 9-3** Vrijednosti dobivene ispitivanjem vlažnosti uzoraka i gustoće čvrstih čestica

Uzorak	Mjesec /godina ugradnje	Vlažnost bentonitne gline (%)	Gustoća čvrstih čestica bentonitne gline (Mg/m <sup>3</sup> )	Godišnji hod količine oborina (mm) <sup>1</sup>	Srednja mjesečna temperatura zraka (°C) <sup>1</sup>	Debljina nadsloja (m)
S1	4./2004.	9,79	2,63	*	*	0,58
S4	4./2004.	11,14				0,46
S2	4./2004.	11,83				0,86
S3	4./2004.	10,99	2,75			0,8
S26	6./2009.	11,47		67,6	19,8	0,3
S7	6./2009.	15,71	2,75			0,2
S21	6./2009.	13,86				0,3
S19	6./2009.	21,69				0,24
S11	6./2009.	16,31				0,2
S16	6./2009.	11,09				0,3
S13	6./2009.	15,57				0,33
S6	6./2009.	12,21				
S5	6./2009.	11,51	2,72			
S9	6./2009.	9,63				
S31	8./2009.	10,3				79,3
S32	8./2009.	9,12				0,53
S15	7./2010.	9,79		52,5	23,2	
S14	7./2010.	10,77				
S20	8./2010.	9,05	2,72	141,1	20,8	
S23	8./2010.	10,26				
S27	9./2010.	11,26		194,7	15,1	
S29	10./2010.	9,95		35,5	9,4	
S30	10./2010.	10,46	2,69			
<b>Referentna vrijednost</b>		12,6	2,76			

\*Podaci za godišnji hod količine oborina za određeni mjesec (mm) i srednju mjesečnu temperaturu zraka (°C) za 2004. godinu nisu bili raspoloživi.

<sup>1</sup> Podaci Državnog zavoda za statistiku Republike Hrvatske. Navedene vrijednosti odnose se na mjernu postaju Zagreb – Maksimir.

Svi uzorci koji su najdulje vremensko razdoblje proveli u odlagalištu zadovoljavaju referentnu vrijednost.

Uzorci ugrađivani najkasnije, točnije u razdoblju od srpnja do listopada 2010. godine također zadovoljavaju referentnu vrijednost.

Ukoliko se uspoređi debljina nadsloja s vlažnošću bentonitne gline može se primjetiti da povećane vrijednosti dobivene prilikom određivanja vlažnosti imaju uzorci kojima je nadsloj male debljine i kreće se od 0,2 m do 0,3 m.

Ukoliko se u obzir uzmu vrijednosti godišnjeg hoda količine oborina, pri čemu se u tablici 9-3 nalaze vrijednosti za navedeni mjesec ugradnje i srednje mjesečne temperature zraka za pojedinu godinu ugradnje uzoraka u odlagalište, može se vidjeti kako debljina nadsloja ima važnu ulogu u vlažnosti bentonitne gline. Naime, s obzirom da godišnja količina padalina za 2009. godinu nije bila velika, uzorci ugrađivani te godine pokazuju velike vrijednosti vlažnosti, ali i nedostatnu debljinu nadsloja.

Uzorci kod kojih je nadsloj veći pokazuju manju vlažnost. Kako se vidi iz tablice 9-3 2010. godina je imala značajne količine padalina, ali vlažnost bentonitne gline nije velika. Problem se javlja što za te uzorke ne postoje izmjereni podaci o visini nadsloja, no prema slici 9-2 vidljivo je kako je visina nadsloja manja nego na slici 9-3. Time se može zaključiti kako debljina nadsloja ima utjecaj na vlažnost bentonitne gline, a samim time i na vlažnost GCL-a.



**Slika 9-2** Nadsloj iznad istražnog raskopa S16



**Slika 9-3** Nadsloj iznad istražnog raskopa S20

## 9.2 Analiza kemijskih svojstava ispitivanih uzoraka

### 9.2.1 pH i električna vodljivost

Iz tablice 9-4 se vidi kako kod uzoraka koji su najdulje vremensko razdoblje proveli u odlagalištu (od travnja 2004.) električna vodljivost varira od 268  $\mu\text{S}/\text{cm}$  za uzorak S2, pa do čak 4677  $\mu\text{S}/\text{cm}$  za uzorak S4.

Za uzorke ugrađene 2009. godine električna vodljivost se kreće u rasponu od 279  $\mu\text{S}/\text{cm}$  kod uzorka S11, pa do 797  $\mu\text{S}/\text{cm}$  kod uzorka S26.

Uzorci koji su najkraće vremensko razdoblje proveli u odlagalištu imaju raspon električne vodljivosti od 279  $\mu\text{S}/\text{cm}$  za uzorak S29 do 804  $\mu\text{S}/\text{cm}$  za uzorak S20.

Iz tablice se vidi kako uzorci S1 i S4 koji su u odlagalištu bili najdulje vremensko razdoblje (od travnja 2004. godine) pokazuju najveće vrijednosti električne provodljivosti. Ona za uzorak S1 iznosi 2833  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dok za uzorak S4 iznosi 4677  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Prema dobvenim vrijednostima za uzorke S1 i S4, može se reći da je u nadsloju bilo dosta organskih tvari. Naime, prilikom areometriranja uzoraka nadsloja koji se na terenu nalazio iznad tih istražnih raskopa, uočeno je pjenušanje na vrhu suspenzije. Što se mogućeg utjecaja debljine nadsloja tiče, ona kod ovih uzoraka iznosi 0,58 m za uzorak S1 i 0,46 m za uzorak S4.

Tablica 9-4 Vrijednosti dobivene mjerenjem pH i električne provodljivosti

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	pH	Električna provodljivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Debljina nadsloja (m)
S1	4./2004.	7,6	2833	0,58
S4	4./2004.	8,9	4677	0,46
S2	4./2004.	8,7	268	0,86
S3	4./2004.	7,9	799	0,80
S26	6./2009.	7,8	797	0,30
S7	6./2009.	7,4	741	0,20
S21	6./2009.	7,9	747	0,30
S19	6./2009.	7,6	930	0,24
S11	6./2009.	7,8	279	0,20
S16	6./2009.	9,1	499	0,30
S13	6./2009.	7,8	765	0,33
S6	6./2009.	9,0	649	
S5	6./2009.	7,7	715	
S9	6./2009.	9,0	644	
S31	8./2009.	7,8	774	0,59
S32	8./2009.	7,8	624	0,53
S15	7./2010.	7,9	668	
S14	7./2010.	8,9	467	
S20	8./2010.	7,8	804	
S23	8./2010.	8,2	283	
S27	9./2010.	7,8	689	
S29	10./2010.	8,1	279	
S30	10./2010.	7,6	702	
<b>Referentna vrijednost</b>		10,2	550	

Uzorak S2 koji je ugrađen u odlagalište kad i uzorci S1 i S4, od svih ispitanih uzoraka ima najmanju električnu provodljivost koja iznosi 268  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Gledajući prijašnje rezultate

dobivene ispitivanjem nadsloja, može se uočiti kako uzorak S2 ima najdeblji nadsloj (0,86 metara).

Što se pH vrijednosti tiče za uzorke ugrađene 2004. godine, najveći pH ima uzorak S4 i iznosi 8,91, dok najmanji pH ima uzorak S1 i to 7,61. Vrijednosti dobivene mjerenjem kod uzoraka ugrađenih 2009. godine kreću se od 7,4 kod uzorka S7 do 9,1 kod uzorka S16.

Uzorcima ugrađenim u odlagalište tijekom 2010. godine minimalna pH vrijednost iznosi 7,6 za uzorak S30, dok je maksimalna 8,9 za uzorak S14.

Kod referentnog uzorka može se primijetiti kako on ima najveću izmjerenu pH vrijednost (10,19). Prema Egloffsteinu (2001) pH otopine u kojoj se nalazi natrijska bentonitna glina trebao bi iznositi od 9,5 do 10,5. Ovaj rezultat nam potvrđuje teoriju da referentni uzorak bentonitne gline u svom sastavu ima natrijski montmorillonit. Električna provodljivost ovog uzorka iznosi 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Niti jedan uzorkovani uzorak nema izmjerene vrijednosti približno sličnima referentnom uzorku. Vrijednosti najbliže referentnom uzorku ima uzorak S16, ugrađen u odlagalište 2009. godine, kod kojeg je izmjerena električna provodljivost od 499  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dok mu pH vrijednost iznosi 9,1.

#### 9.2.2 Kemijski sastav

Kemijski sastav određen je u ACMELabs-u u Kanadi.

Metodom LF100 Refractory and REEs by fusion and ICP-MS analysis, određene su koncentracije elemenata u tragovima (Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, Zr, Y) i elemenata rijetkih zemalja (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb i Lu).

Metoda LF702  $\text{LiB}_4\text{O}_7/\text{BO}_2$  fusion analysis by XRF pomogla je u odrađivanju glavnih kemijskih elemenata koji se prikazuju oksidima ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Od jedanaest navedenih oksida, u tablici 9-5 prikazano je njih devet, čije će vrijednosti pomoći u određivanju mineralnog sastava bentonitne gline.



**Tablica 9-5** Maseni udjeli pojedinih minerala u uzorcima

Uzorak	Mjesec /godina ugradnje	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>
		%	%	%	%	%	%	%	%	%
		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>S1</b>	4./2004.	59,61	19,86	3,90	1,56	2,44	0,38	0,64	0,02	0,17
<b>S3</b>	4./2004.	57,88	18,70	4,16	2,07	2,58	0,31	0,56	0,02	0,38
<b>S26</b>	6./2009.	57,34	17,20	4,88	3,63	2,20	0,84	1,96	0,09	0,60
<b>S19</b>	6./2009.	49,23	16,11	12,66	3,07	2,52	0,18	0,35	0,22	1,20
<b>S7</b>	6./2009.	50,33	16,72	12,30	2,68	2,60	0,16	0,54	0,12	1,06
<b>S13</b>	6./2009.	47,91	16,13	15,57	2,72	2,61	0,09	0,19	0,17	1,36
<b>S5</b>	6./2009.	58,55	18,94	4,24	2,25	2,75	0,31	0,53	0,03	0,39
<b>S32</b>	8./2009.	56,98	17,31	4,57	3,25	2,23	0,78	1,85	0,11	0,62
<b>S14</b>	7./2010.	57,82	17,58	4,94	3,34	2,31	0,76	1,70	0,13	0,61
<b>S20</b>	8./2010.	57,04	17,25	5,36	3,32	2,20	0,69	1,65	0,12	0,60
<b>S27</b>	9./2010.	56,18	17,13	4,77	3,80	2,22	0,80	1,82	0,14	0,63
<b>S30</b>	10./2010.	56,19	17,20	5,30	3,71	2,22	0,82	1,74	0,12	0,64
<b>Referentna vrijednost</b>		45,27	14,42	16,83	2,25	2,41	2,55	0,17	0,20	1,30

### 9.3 Analiza mineralnih svojstava ispitivanih uzoraka

#### 9.3.1 Kapacitet kationske zamjene (CEC)

U smektitima se između silikatnih slojeva nalaze međuslojni kationi i to najčešće Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, a negdje i Na<sup>+</sup>. Divalentni kationi imaju visoki ionski potencijal pa se okružuju molekulama vode. Uz uvjete standardnog tlaka, temperature i relativne vlage divalentni kationi nalaze se između dva sloja molekula vode i debljina takvog strukturnog paketa iznosi 15 Å. S druge strane ukoliko je međuslojni kation jednovalentni, slabo hidratizirani Na<sup>+</sup> debljina takvog paketa iznosi približno 12,4 Å. (Slovenec 2011.)

U tablici 9-6 i na slici 9-4 prikazane su vrijednosti kapaciteta kationske zamjene (CEC) za uzorke iz odlagališta otpada ovisno o vremenu ugradnje kao i za referentni uzorak. Može se

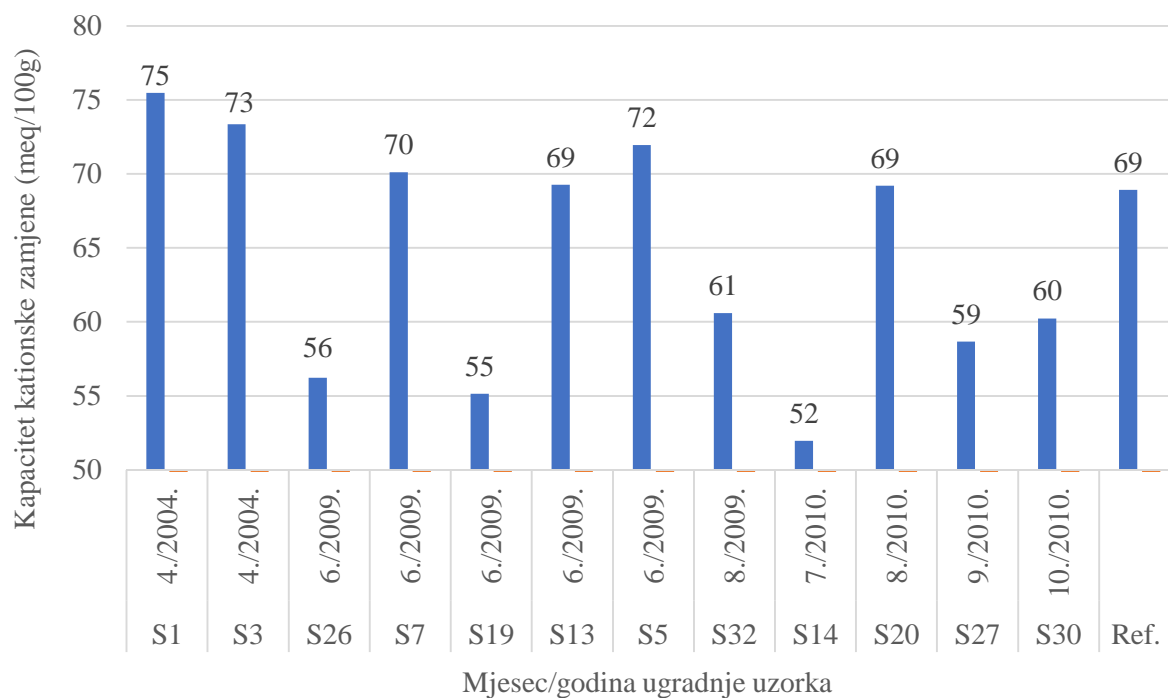
uočiti da je CEC za određeni broj uzoraka iz odlagališta manji, a za neke veći od referentne vrijednosti.

Vidljivo je kako uzorak S1 koji je bio u odlagalištu devet godina (devet godina i dva mjeseca), ima najveći kapacitet kationske zamjene (75 meq/100g). Najmanja vrijednost kapaciteta kationske zamjene dobivena je za uzorak S14 ugrađen u odlagalište 2010. godine, a iznosi 52 meq/100g. Prosječni CEC za pojedinu godinu ugradnje iznose 74 meq/100g za 2004. godinu, 64 meq/100g za 2009. godinu, te 60 meq/100g za 2010. godinu.

Iz navedenog se može zaključiti kako najmanju izmjenu kationa imaju uzorci koji su najkraće vremensko razdoblje proveli u odlagalištu otpada.

**Tablica 9-6** Kapacitet kationske zamjene analiziranih uzoraka

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Kapacitet kationske zamjene CEC (meq/100g)
S1	4./2004.	75±5
S3	4./2004.	73±1
S26	6./2009.	56±1
S7	6./2009.	70±1
S19	6./2009.	55±1
S13	6./2009.	69±3
S5	6./2009.	72±0,2
S32	8./2009.	61±0,3
S14	7./2010.	52±1
S20	8./2010.	69±2
S27	9./2010.	59±1
S30	10./2010.	60±2
<b>Referentna vrijednost</b>		69±4



**Slika 9-4** Odnos vremena ugradnje i kapaciteta kationske zamjene

### 9.3.2 Mineralni sastav

Mineralni sastav odabranih uzoraka određen je rendgenskom difrakcijom na prahu. U tablici 9-7 prikazani su semikvantitativni udjeli određeni interpretacijom rezultata rendgenske difrakcije u kombinaciji s rezultatima kemijske analize, te analize kapaciteta kationske zamjene. Mineralni sastav prikazan je na slici 9-5.

Precizan mineralni sastav nije moguće utvrditi zbog toga što su minerali glina različitog stupnja kristaliniteta, te su podložni izomornim zamjenama, a smektiti imaju i varijabilan sastav kationa u međuslojnom prostoru. Udio smektita, vjerojatno uglavnom montmorillonit, budući da se radi o bentonitnoj glini, procijenjen je na temelju visine difrakcijskog maksimuma 001 i kapaciteta kationske zamjene uzimajući u obzir i kemijski sastav. Temelj odredbe ipak je bio kapacitet kationske zamjene budući da je smektit jedini mineral (te eventualno mješanoslojni mineral koji u sebi ima smektitne slojeve) koji značajno doprinosi kapacitetu kationske zamjene. Naravno, u obzir je uzeto i to da jedan manji dio kapaciteta kationske zamjene otpada i na goethit.

Na temelju difrakcijskog maksimuma također se može zaključiti da je većina uzoraka kalcijski montmorillonit.

Natrijski montmorillonit nalazi se u referentnom uzorku, dok je u uzorcima S1 i S5 na temelju difraktograma teško odrediti radi li se o smjesi dva montmorillonita ili ima i minerala mješanih slojeva.

**Tablica 9-7** Semikvantitativni mineralni sastav odabranih uzoraka

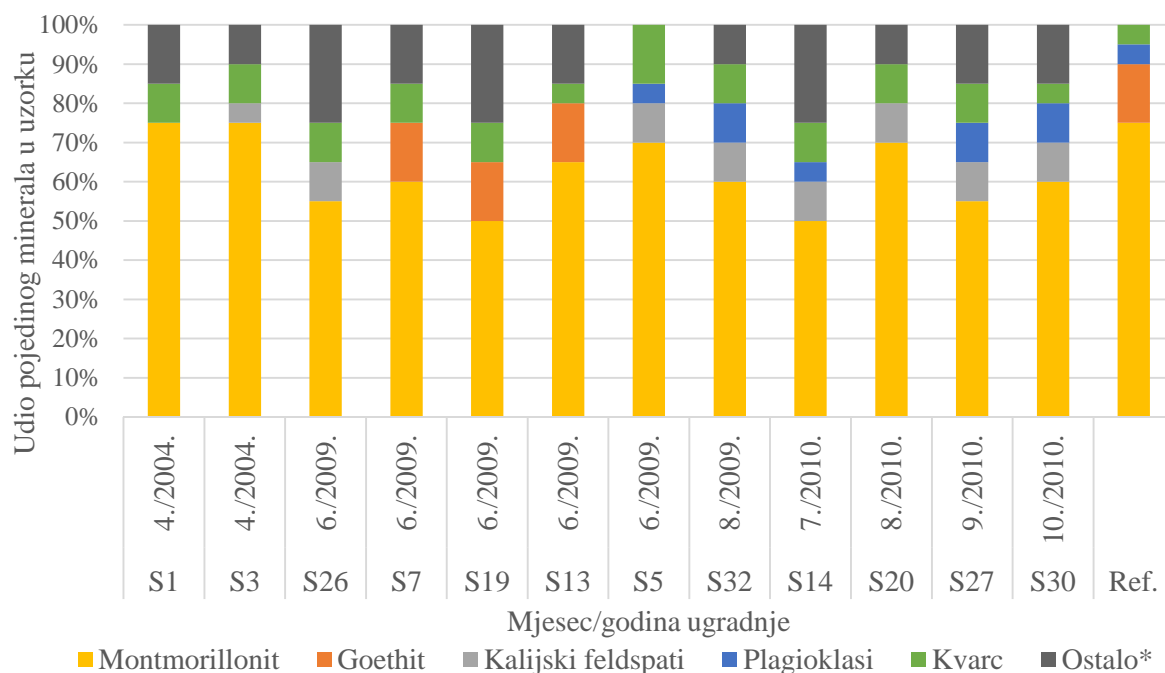
Uzorak	Mjesec/ godina ugradnje	Procijenjeni udio pojedinog minerala u uzorku (mas. %)					
		Montmorillonit	Goethit	Kalijski feldspati	Plagioklasi	Kvarc	Ostalo
<b>S1</b>	4./2004.	75 (ML)	n.d.	n.d.	n.d.	10	15
<b>S3</b>	4./2004.	75	n.d.	5	n.d.	10	10
<b>S26</b>	6./2009.	55	n.d.	10	n.d.	10	25
<b>S7</b>	6./2009.	60	15	n.d.	n.d.	10	15
<b>S19</b>	6./2009.	50	15	n.d.	n.d.	10	25
<b>S13</b>	6./2009.	65	15	n.d.	n.d.	5	15
<b>S5</b>	6./2009.	70 (ML)	n.d.	10	5	15	0
<b>S32</b>	8./2009.	60	n.d.	10	10	10	10
<b>S14</b>	7./2010.	50	n.d.	10	5	10	25
<b>S20</b>	8./2010.	70	n.d.	10	n.d.	10	10
<b>S27</b>	9./2010.	55	n.d.	10	10	10	15
<b>S30</b>	10./2010.	60	n.d.	10	10	5	15
<b>Referentna vrijednost</b>		75	15	n.d.	5	5	0

(Legenda: ML – mješanoslojni mineral; n.d. – nije detektiran)

Udjeli kalijevih feldspata (K-feldspata) i plagioklasi određeni su na temelju visina njihovih glavnih difrakcijskih maksimuma, te kemijskog sastava. Kalijski feldspati također nisu utvrđeni u svim uzorcima, no budući da u uzorcima nema drugih minerala (na primjer tinjaca) koji bi sadržavali značajnije udjele kalija, većina kalija vezana je i u tim uzorcima vjerojatno na kalijev feldspat. Iako je u tablici pod tim uzorcima za K-feldspat upisano n.d. (nije detektirano), prema kemijskom sastavu vjerojatno ih ima od 1 do 3 mas.%. Značajan broj uzoraka, pa i referentni, imaju neuobičajenu boju za bentonit. Naime, boja im je u jednoj od smeđih nijansi koje ukazuju na prisutstvo željezovih oksihidroksida. U četiri uzorka rendgenskom difrakcijom potvrđena je prisutnost goethita. S obzirom na boju i kemijski sastav, može se pretpostaviti da i većina ostalih uzoraka sadrži goethit čak i do 5 mas.%, no on nije vidljiv na difrakcijskim slikama zbog visoke granice detekcije (zbog prisutstva kvarca koji ima značajni difrakcijski maksimum vrlo blizu glavnog difrakcijskog maksimuma goethita). Dio željeza vjerojatno je vezan i u montmorillonitu kao izomorfna zamjena. Razlika

između zbroja udjela minerala u pojedinom uzorku do 100 mas.% odnosi se na amorfnu tvar, te minerale koji su ispod granice detekcije rendgenske difrakcije (na primjer goethit, anatas i slično).

Iz tablice 9-7 i sa slike 9-5 još se može iščitati kako uzorci koji bili ugrađeni u odlagalište, a koji u svom sastavu imaju mineral goethit s udjelom 15 mas.%, ne sadrže K-felspate i plagioklase. Zanimljiva je usporedba uzorka S5 i referentnog uzorka. Uočiti se može kako navedeni uzorci iako nemaju potpuno isti mineralni sastav, potpuno im je određen mineralni sastav, tj. nemaju ostataka koji se očituju kao amorfna tvar .



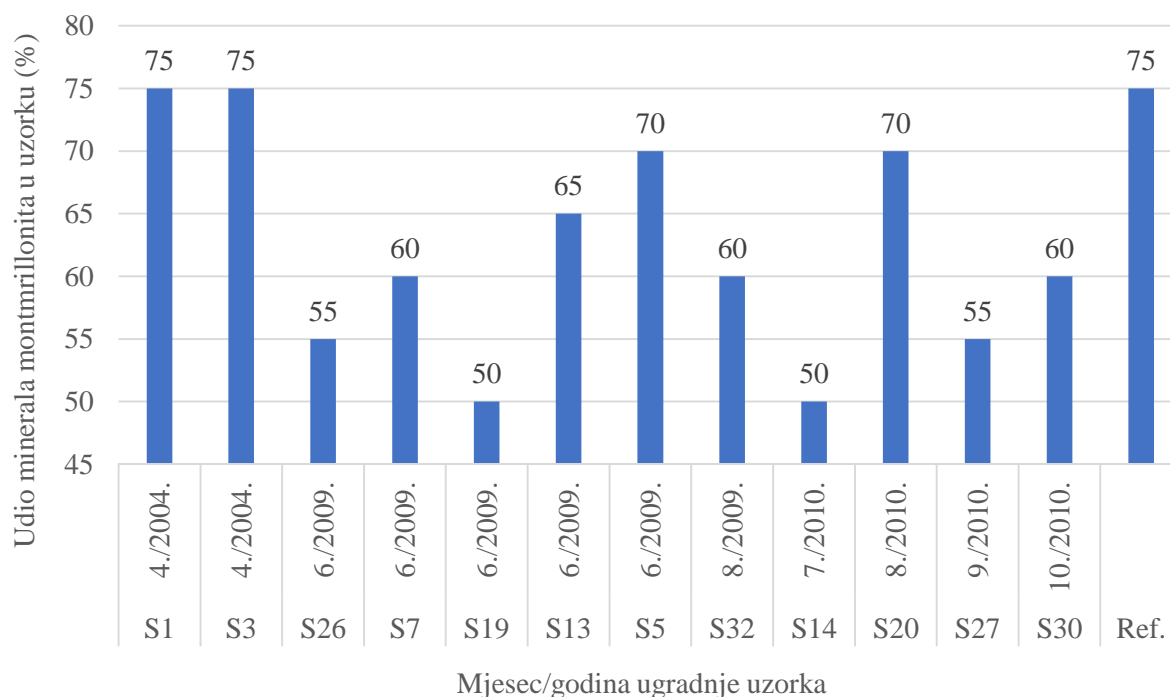
\*ispod granice detekcije

**Slika 9-5** Udjeli pojedinih minerala u uzorcima bentonitne gline

Na slici 9-6 prikazani su udjeli montmorillonita za uzorke iz odlagališta ovisno o vremenu ugradnje kao i za referentni uzorak.

Najveći udio minerala montmorillonita u svom sastavu, osim referentnog uzorka, imaju uzorci S1 i S3 ugrađeni 2004. godine. Najmanji udio minerala montmorillonita u svom sastavu ima uzorak S19 (ugrađen 2009. godine) i uzorak S14 (ugrađen 2010. godine), a iznosi 50%. Iz navedenog se može zaključiti kako udio minerala montmorillonita u uzorcima pada s godinom ugradnje. Izuzetak su uzorci S5 (ugrađen 2009. godine) i S20 (ugrađen 2010. godine) koji u svom sastavu imaju visok udio montmorillonita od 70%.

Prosječni udjeli montmorillonita za 2004. godinu iznosi 75%, u 2009. on iznosi 60%, dok je u 2010. 59%. Kao i kod rezultata dobivenih određivanjem kapaciteta kationske zamjene, rezultati dobiveni određivanjem udjela minerala montmorillonita u uzorcima pokazuje isti trend. I u ovom mjerenju vidljivo je kako udio montmorillonita pada s godinom ugradnje to jest, najmanji udio ovog minerala imaju uzorci koji su najkraće vrijeme proveli u odlagalištu otpada.



**Slika 9-6** Odnos vremena ugradnje uzorka i udjela minerala montmorillonita u uzorku

## 10 REZULTATI ISPITIVANJA INDEKSNIH POKAZATELJA UZORKOVANE BENTONITNE GLINE

Indeksni pokazatelji su parametri kojima se kod sitnozrnatih tala jednostavnim laboratorijskim ispitivanjima mogu dobiti podaci koji pomažu u klasifikaciji tla, te procjeni određenih svojstava tla. U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja slijedećih indeksnih svojstava: Atterbergove granice, volumen slobodnog bubrenja, sposobnost upijanja vode, te gubitak fluida bentonitne gline.

### 10.1 Atterbergove granice

Ispitivanje Atterbergovih granica provedeno je na dvadeset i četiri uzoraka prema normi BS 1377:2 s time da su granice tečenja određene pomoću dva uređaja tj. stožastim penetrometrom i Casagrandeovim uređajem.

U tablici 10-1 sumarno su prikazani podaci dobiveni ispitivanjima Atterbergovih granica, dok je na slici 10-1 prikazan dijagram plastičnosti ispitivanih uzoraka.

Radi lakšeg dodjeljivanja svakom uzorku njegove klasifikacijske oznake podaci iz tablice 10-1 osim skupnog prikaza na slici 10-1, podijeljeni su na slike 10-2 koja prikazuje dijagram plastičnosti referentnog uzorka i sliku 10-3 na kojoj je prikazan dijagram plastičnosti uzoraka s terena.

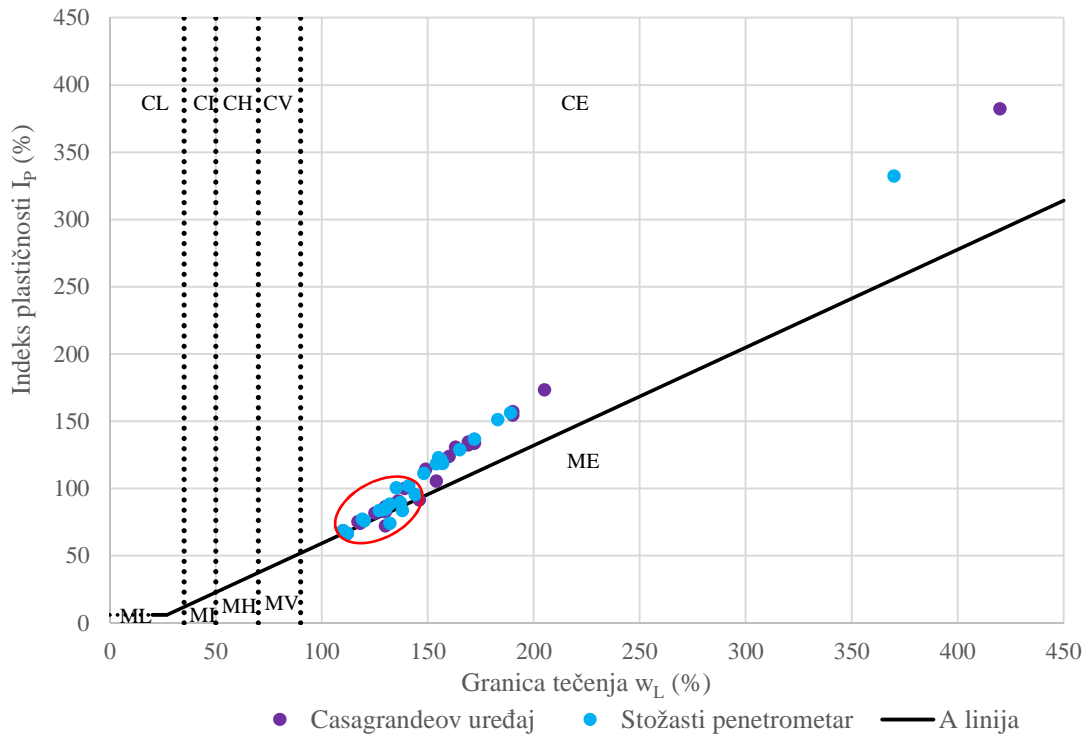
Kako je vidljivo iz dijagrama plastičnosti postoje dvije grupe dobivenih podataka. Jedni podaci dobiveni su ispitivanjem Atterbergovih granica Casagrandeovim uređajem, a drugi ispitivanjem stožastim penetrometrom.

Prema podacima prikazanim u tablici 10-1 vidljivo je da bentonitna glina koja nije bila ugrađena u odlagalište otpada (referentni uzorak) ima najveće vrijednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti, a po klasifikaciji pripada skupini glina ekstremno visoke plastičnosti (CH). Međutim, sa slike 10-1, te prema preporukama Međunarodne organizacije za normizaciju – ISO, nacrt norme ISO 14688-2 (2000), te prema normi BS 5930 preporučuje se podjela tala prema plastičnosti u pet podgrupa: niske (L), srednje (I), visoke (H), vrlo visoke (V) i ekstremno visoke (E) plastičnosti. Prema tom nacrtu norme i rezultatima dobivenim ispitivanjima referentni uzorak bentonitne gline pripada skupini glina ekstremno visoke plastičnosti oznake CE.

Tablica 10-1 Rezultati laboratorijskih ispitivanja – Atterbergove granice

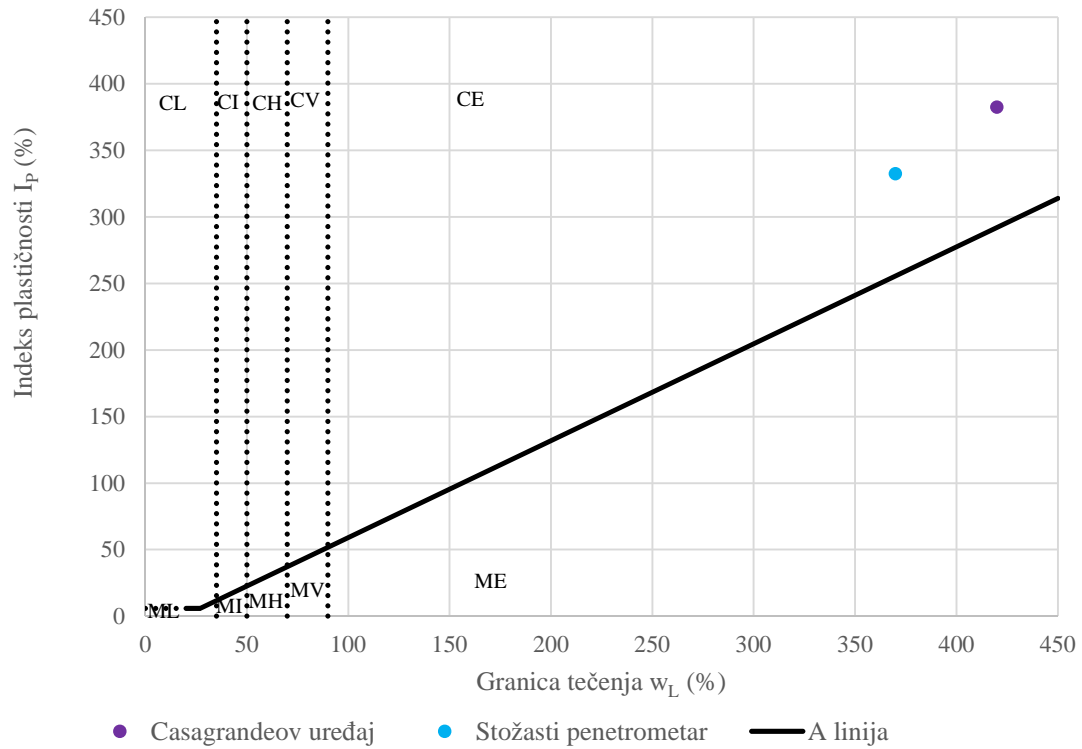
Uzorak	Mjesec / godina ugradnje	Granica tečenja $w_L$ (%)		Granica plastičnosti $w_P$ (%)	Indeks plastičnosti $I_p = w_L - w_P$ (%)		Klasifikacija prema dijagramu plastičnosti	Klasifikacija prema nacrtu norme ISO 14688-2 (2000)
		Casagrandeov uredaj	Stožasti penetrometar		Casagrandeov uredaj	Stožasti penetrometar		
S1	4./2004.	130	132	43,50	86,50	88,5	CH	CE
S4	4./2004.	130	137	47,30	82,70	89,7	CH/MH	CE/ME
S2	4./2004.	125	127	43,30	81,70	83,7	CH	CE
S3	4./2004.	146	138	54,40	91,60	83,6	MH	ME
S26	6./2009.	190	189	32,80	157,20	156,20	CH	CE
S7	6./2009.	130	132	57,85	72,15	74,15	MH	ME
S21	6./2009.	112	112	45,50	66,50	66,5	MH	ME
S19	6./2009.	117	119	41,70	75,30	77,3	CH/MH	CE/ME
S11	6./2009.	130	131	44,10	85,90	86,9	CH/MH	CE/ME
S16	6./2009.	118	120	43,90	74,10	76,1	CH/MH	CE/ME
S13	6./2009.	110	110	41,40	68,60	68,6	CH/MH	CE/ME
S6	6./2009.	139	141	38,91	100,09	102,09	CH	CE
S5	6./2009.	154	144	48,40	105,60	95,6	CH	CE
S9	6./2009.	190	172	35,30	154,70	136,7	CH	CE
S31	8./2009.	172	154	35,54	136,46	118,46	CH	CE
S32	8./2009.	136	130	45,30	90,70	84,7	CH	CE
S15	7./2010.	169	156	34,30	134,70	121,7	CH	CE
S14	7./2010.	163	155	32,10	130,90	122,9	CH	CE
S20	8./2010.	172	157	38,40	133,60	118,6	CH	CE
S23	8./2010.	149	135	34,50	114,50	100,5	CH	CE
S27	9./2010.	160	165	36,20	123,80	128,8	CH	CE
S29	10./2010.	169	148	36,60	132,40	111,4	CH	CE
S30	10./2010.	205	183	31,70	173,30	151,3	CH	CE
<b>Referentna vrijednost</b>		420	370	37,60	382,40	332,4	CH	CE



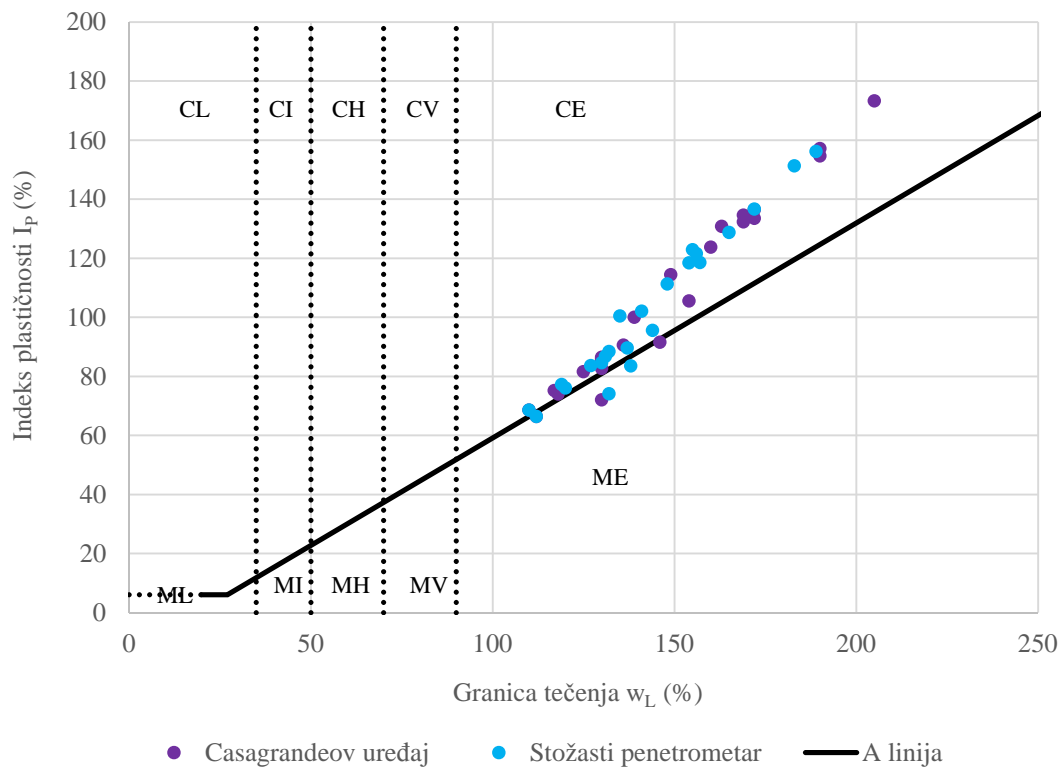


**Slika 10-1** Dijagram plastičnosti ispitivanih uzoraka prema nacrtu norme ISO 14688-2 (2000)

Kako se vidi na slikama 10-1 i 10-3 rezultati dobiveni za dio uzoraka s terena grupirani su blizu A – linije. Da bi se takvom materijalu mogla dodijeliti odgovarajuća klasifikacijska oznaka, to jest da bi se bolje vidjelo radi li se o glini vrlo visoke plastičnosti (CE), prahu vrlo visoke plastičnosti (ME) ili možda kombinaciji ta dva materijala (CE/ME), za klasifikaciju uzoraka upotrijebljena je kombinacija normi ASTM D 2487, te nacrt norme ISO 14688-2 (2000). Normom ASTM D 2487 su opisani postupci klasificiranja materijala za inženjerske svrhe na temelju laboratorijskih ispitivanja koja se temelje na određivanju veličine čestica, te granice tečenja i indeksa plastičnosti. Prema normi, uzorci čija je granica tečenja veća ili jednaka 50%, te kod kojih se vrijednosti indeksa plastičnosti, u dijagramu plastičnosti, nalaze na ili iznad A – linije, pripadaju grupi visokoplastične gline. Prema istoj normi, uzorci kojima su vrijednosti granice tečenja također veće ili jednake 50%, ali se nalaze ispod A – linije pripadaju skupini visoko plastičnog praha.



Slika 10-2 Dijagram plastičnosti referentnog uzorka



Slika 10-3 Dijagram plastičnosti uzoraka s terena (bez referentnog uzorka)

Ako sad uzmemo u obzir nacrt norme ISO 14688-2 (2000) i normu BS 5930:1999 uzorci na kojima su provedena ispitivanja mogu se klasificirati, kako pokazuju i dobiveni podaci, u ekstremno plastične. Uzorcima čija je granica tečenja veća od 90% i nalaze se iznad ili na A – liniji mogu se klasificirati kao glina ekstremno visoke plastičnosti. S druge strane, kod uzoraka čija je granica tečenja veća od 90%, a nalaze se ispod A – linije označavaju se kao ME, što znači da prema klasifikaciji pripadaju prahu ekstremno visoke plastičnosti.

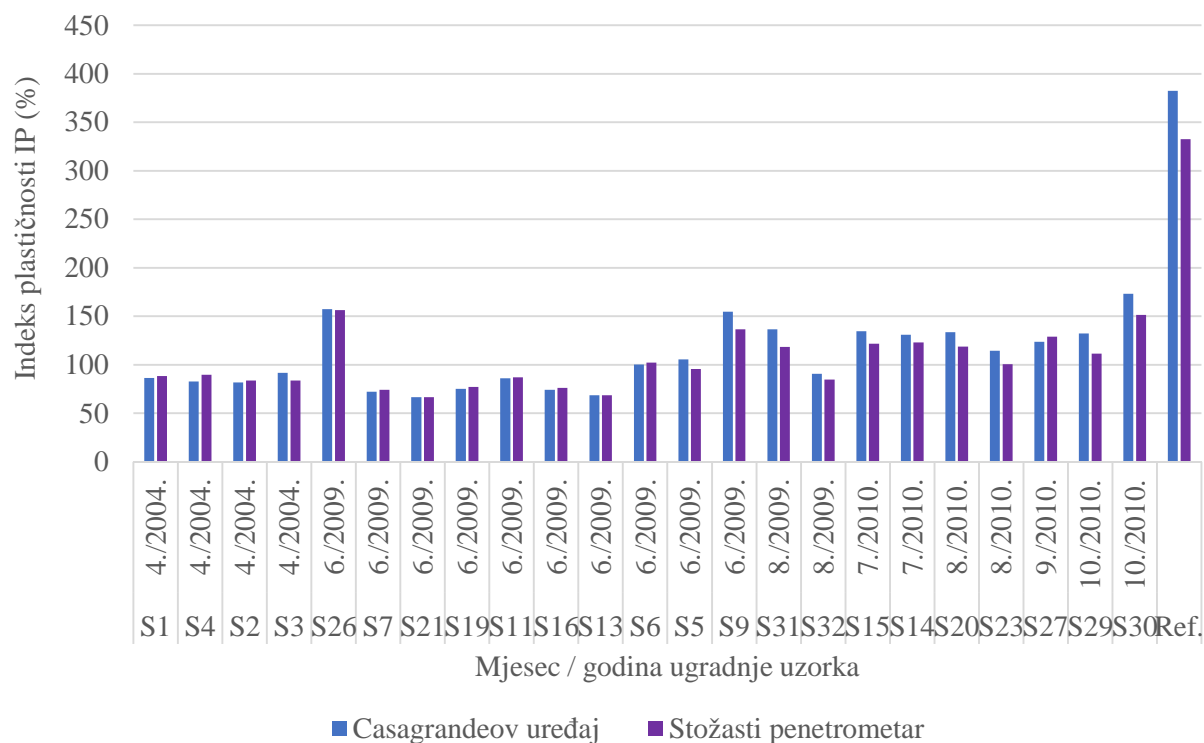
Uzimajući u obzir gore navedeno, te podatke iz tablice 10-1 i sa slike 10-3 uzorci S3, S7 i S21 pripadaju skupini praha ekstremno visoke plastičnosti (ME). Vrijednosti uzoraka S4, S13 i S16 iako se nalaze na A – liniji prema normi, kao i svi preostali uzorci koji se nalaze iznad A – linije pripadaju skupini gline ekstremno visoke plastičnosti (CE).

Na slici 10-1 vidljivo je kako je velik dio uzoraka koji su uzorkovani s terena grupiran oko A – linije.

S obzirom da je riječ o uzorcima koji su određeno vremensko razdoblje proveli u odlagalištu otpada podjela samo na CE ili ME nije zadovoljavajuća. U literaturi (Holtz & Kovacs 1981) navode kako se za klasifikaciju uzoraka čije su vrijednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti blizu A – linije ili su im vrijednosti granice tečenja oko 50% mogu upotrijebiti dvostruke oznake (CH/MH), odnosno u ovom slučaju CE/ME.

Prema navedenom i kako je naznačeno na slici 10-1 svi uzorci koji se nalaze u blizini A – linije, a čija je vrijednost granice tečenja veća od 90%, klasificirat će se kao CE/ME.

Dobiveni podaci prikazani u tablici 10-1 iz koje je vidljivo kako se rezultati ispitivanja dobiveni Casagrandeovim uređajem i stožastim penetrometrom razlikuju. U literaturi (Pusch 2010) je pronađeno kako su moguća odstupanja prilikom ispitivanja granice tečenja između navedena dva načina. Odstupanja u dobivenim vrijednostima prilikom ispitivanja granice tečenja mogu biti čak i do 20%, pri čemu je potrebno napomenuti da odstupanje raste s porastom granice tečenja. Isti trend postoji i provedenim ispitivanjima što znači da porastom granice tečenja raste i odstupanje u dobivenim rezultatima spomenutih dviju metoda (slika 10-4).



**Slika 10-4** Usporedni prikaz indeksa plastičnosti dobivenog pomoću Casagrandeovog uređaja i stožastog penetrometra

Granica tečenja za uzorke ugrađene 2004. godine kreće se u rasponu od 125% za uzorak S2 do 146% za uzorak S3. Kod uzoraka ugrađenih 2009. godine granica tečenja iznosi od 110% za uzorak S13 do 190% za uzorke S26 i S9, dok su kod uzoraka ugrađenih 2010. godine te vrijednosti od 135% za uzorak S23 do 205% za uzorak S30.

Rezultati dobiveni ispitivanjem indeksa plastičnosti kreću se od 81,7% za uzorak S2 do 91,60% za uzorak S3 kod uzoraka ugrađenih 2004. godine. Uzorci ugrađeni 2009. godine imaju indeks plastičnosti od 66,50% za uzorak S21 do 157,20% za uzorak S26.

Kod uzoraka ugrađenih 2010. godine najmanji indeks plastičnosti ima uzorak S23 (100,5%), a najveći uzorak S30 koji iznosi 173,30%.

Može se uočiti kako najmanji raspon dobivenih vrijednosti imaju uzorci ugrađeni 2004. godine, dok najveći raspon imaju uzorci koji su u odlagalištu proveli najkraće vremensko razdoblje.

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti kako na granicu tečenja značajniji utjecaj ima vremensko razdoblje koje je bentonitna glina provela u odlagalištu otpada u odnosu na debljinu nadsloja. Što se utjecaja granulometrijskog sastava nadsloja na ispitana svojstva

bentonitne gline tiče, prema dobivenim rezultatima može se zaključiti kako granulometrijski sastav nema značajnog utjecaja na navedena svojstva.

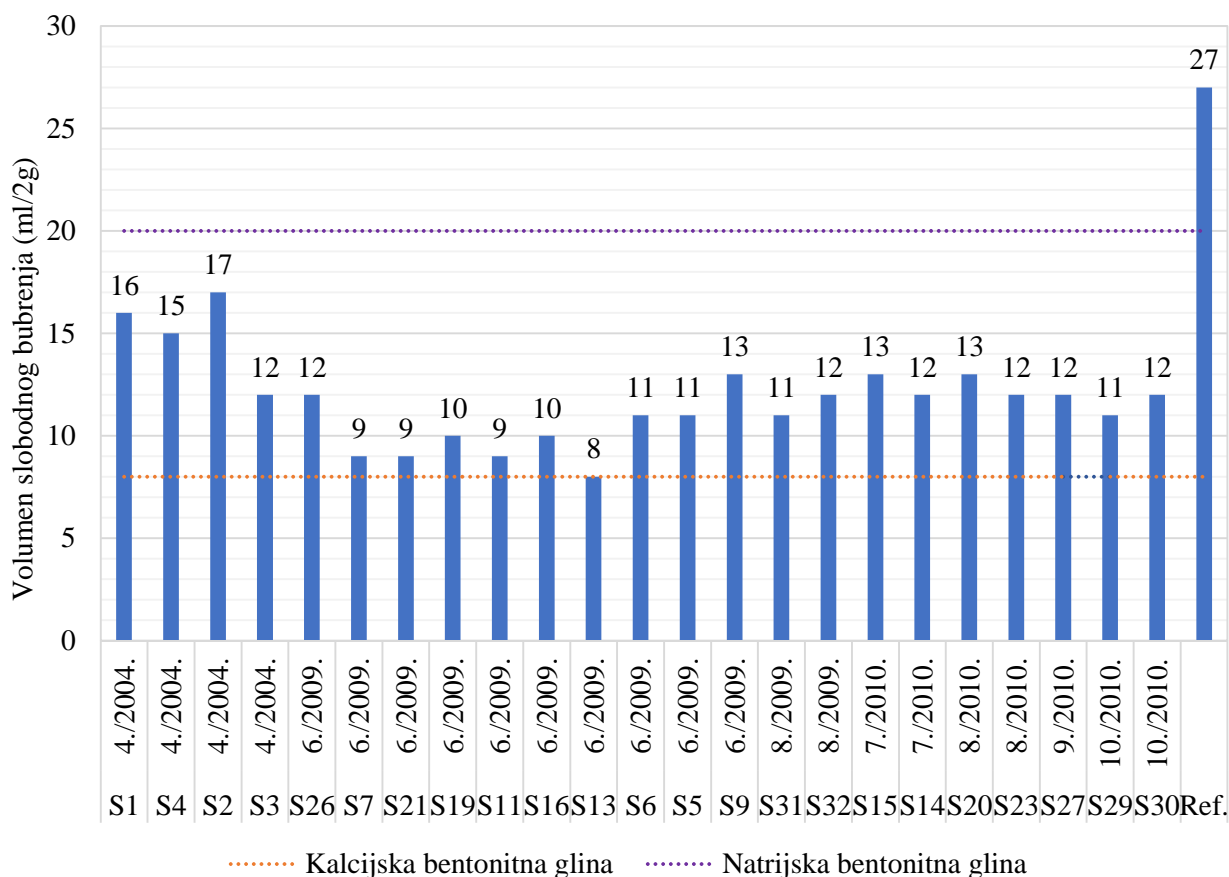
## 10.2 Volumen slobodnog bubrenja

Ispitivanje volumena slobodnog bubrenja provedeno je na dvadeset i četiri uzorka bentonitne gline prema normi ASTM D5890. Ovim ispitivanjem dobiveni su rezultati (tablica 10-2 i slika 10-5) koji će pomoći u procjeni funkcionalnosti glinenih geosintetičkih barijera u svrhu brtvljenja u završnom pokrovnom sustavu.

**Tablica 10-2** Rezultati laboratorijskih ispitivanja volumena slobodnog bubrenja

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Volumen slobodnog bubrenja (ml/2g)	Debljina nadsloja (m)
S1	4./2004.	16	0,58
S4	4./2004.	15	0,46
S2	4./2004.	17	0,86
S3	4./2004.	12	0,80
S26	6./2009.	12	0,30
S7	6./2009.	9	0,20
S21	6./2009.	9	0,30
S19	6./2009.	10	0,24
S11	6./2009.	9	0,20
S16	6./2009.	10	0,30
S13	6./2009.	8	0,33
S6	6./2009.	11	
S5	6./2009.	11	
S9	6./2009.	13	
S31	8./2009.	11	0,59
S32	8./2009.	12	0,53
S15	7./2010.	13	
S14	7./2010.	12	
S20	8./2010.	13	
S23	8./2010.	12	
S27	9./2010.	12	
S29	10./2010.	11	
S30	10./2010.	12	
<b>Referentna vrijednost</b>		27	

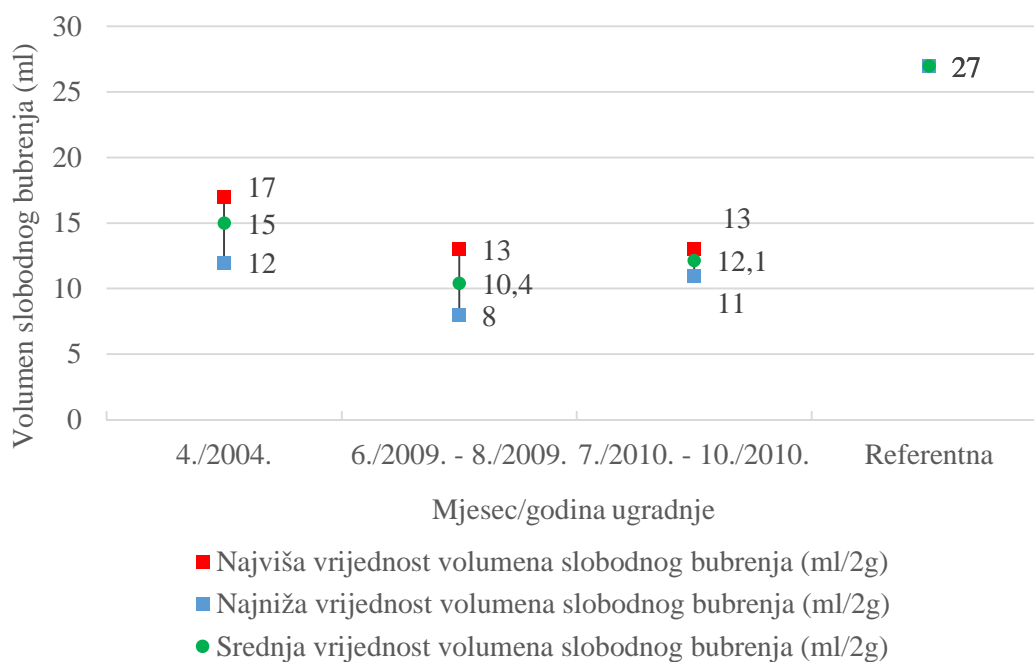
Na slici 10-5 prikazani su rezultati dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja s naznačenim preporučenim vrijednostima ovisno o vrsti bentonitne gline (prema tablici 6-1).



**Slika 10-5** Rezultati dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja

Kako se može vidjeti iz tablice 10-2, te sa slika 10-5 i 10-6 za uzorke ugrađivane 2004. godine volumen slobodnog bubrenja kreće se između 12 ml/2g za uzorak S3 i 17 ml/2g za uzorak S2. Volumen slobodnog bubrenja za uzorke ugrađene 2009. godine kreće se od 8 ml/2g kod uzorka S13 do 13 ml/g kod uzorka S9. Uzorci koji su najkraće vremenski razdoblje proveli u odlagalištu (od 2010. godine) imaju vrijednosti od 11 ml/2g (S29) do 13 ml/2g (S15 i S20).

Gledajući dobivene rezultate svih uzoraka zajedno, najmanji volumen slobodnog bubrenja ima uzorak S13, a iznosi 8 ml/2g. I kod uzorka S7, S21 i S11 vrijednosti su male i iznose 9 ml/2g, dok su kod uzorka S19 i S16 neznatno veće i iznose 10 ml/2g.



**Slika 10-6** Rasponi vrijednosti dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja

S druge strane uzorci S1, S4 i S2 pokazuju najveći volumen slobodnog bubrenja i kreću se od 15 – 17 ml/2g. Navedeni uzorci su jedni od četiri uzoraka koji su najduže vremenski razdoblje proveli u odlagalištu otpada. Vrijednost četvrtog uzorka S3 koji je ugrađen 2004. godine pokazuje manju vrijednost za tu skupinu uzoraka, a koja iznosi 12 ml/2g.

Uzimajući u obzir debljinu nadsloja uzorak S2, ugrađen 2004. godine, s najvećim volumenom slobodnog bubrenja koji iznosi 17 ml/2g je imao najdeblji nadsloj od 0,86 m. Uzorak S13 s najmanjim volumenom slobodnog bubrenja (8 ml/2g) ugrađen je 2009. godine je imao nadsloj debljine 0,33 m. Uzorak s najmanjim nadslojem od 0,20 m (S11) imao je volumen bubrenja 9 ml/2g.

Što se granulometrijskog sastava nadsloja tiče, iz do sada prikazanih rezultata vidljivo je kako se kod uzoraka nadsloja krupnozrnatog sastava (S4, S14 i S23) volumen slobodnog bubrenja kreće od 12 ml/2g (S14 i S23) do 15 ml/2g (S4). Kod uzoraka nadsloja sitnozrnatog sastava volumen slobodnog bubrenja kreće se u rasponu od 8 ml/2g do 17 ml/2g.

Obzirom na dobivene rezultata može se zaključiti da debljina nadsloja, godina ugradnje imaju utjecaj na volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline. S druge strane, granulometrijski sastav nema značajniji utjecaj na volumen slobodnog bubrenja.

Kako je vidljivo iz tablice jedino referentni uzorak bentonitne gline zadovoljava vrijednosti preporučene u tablici 6-1, a kod kojeg volumen slobodnog bubrenja iznosi 27 ml/2g. Prema

referentnom uzorku najveće odstupanje srednje vrijednosti imaju uzorci ugrađeni u odlagalište 2009. godine. Najmanja odstupanja u rezultatima imaju uzorci koji su u odlagalište ugrađeni 2004. godine.

Preporučene vrijednosti za volumen slobodnog bubrenja u tablici 6-1 date su prema vrsti bentonitne gline što znači da je u obzir uzeto je li riječ o natrijskoj ili kalcijskoj bentonitnoj glini. Prema toj tablici i prema slici 10-5 svi uzorci uzorkovani iz istražnih raskopa na terenu zadovoljavaju preporučene vrijednosti ukoliko se radi o kalcijском montmorillonitu, a niti jedan ne zadovoljava preporučene vrijednosti za natrijski montmorilonit.

### 10.3 Sposobnost upijanja vode

Ovo ispitivanje izvedeno je prema normi DIN 18132 kojim su dobivene vrijednosti sposobnosti upijanja vode za dvadeset i četiri uzorka bentonitne gline, a prikazane su u tablici 10-3.

Na slikama od 10-7 do 10-13 prikazane su vrijednosti sposobnosti upijanja vode dobivene laboratorijskim ispitivanjem. Radi lakšeg pregleda ispitivanja su prikazana po godini ugradnje u odlagalište. Kako bi se lakše protumačila legenda oblik obilježavanja je ujednačen za sve uzorke prema obliku SX-Y. Na primjer oznaka S1-1.

S1-1 uzorak S1 – 1 prvo mjerenje sposobnosti upijanja vode uzorka S1 ,

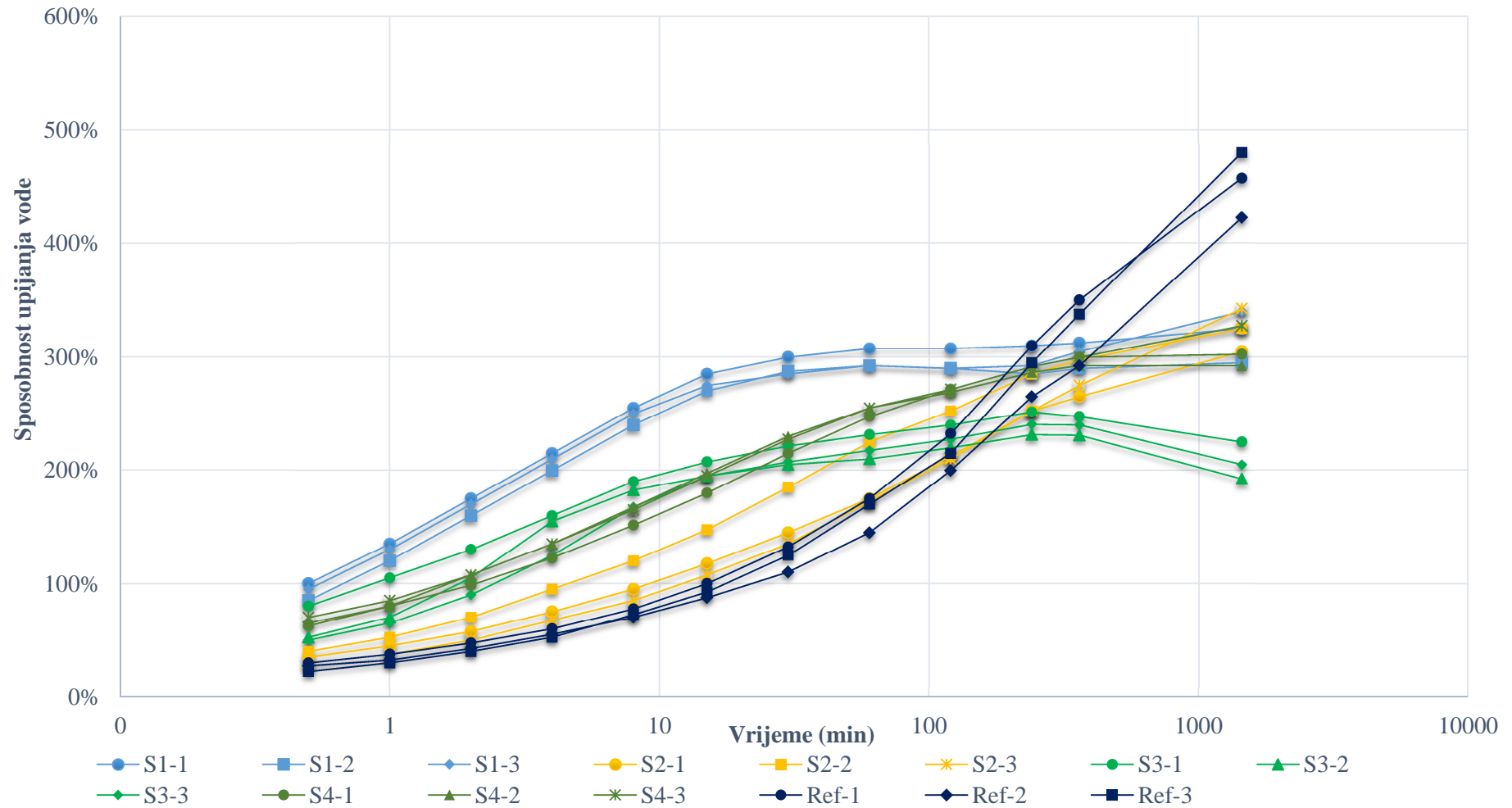
S1-2 uzorak S1 – 2 drugo mjerenje sposobnosti upijanja vode uzorka S1,

S1-3 uzorak S1 – 3 treće mjerenje sposobnosti upijanja vode uzorka S1 i tako redom za sve preostale uzorke.

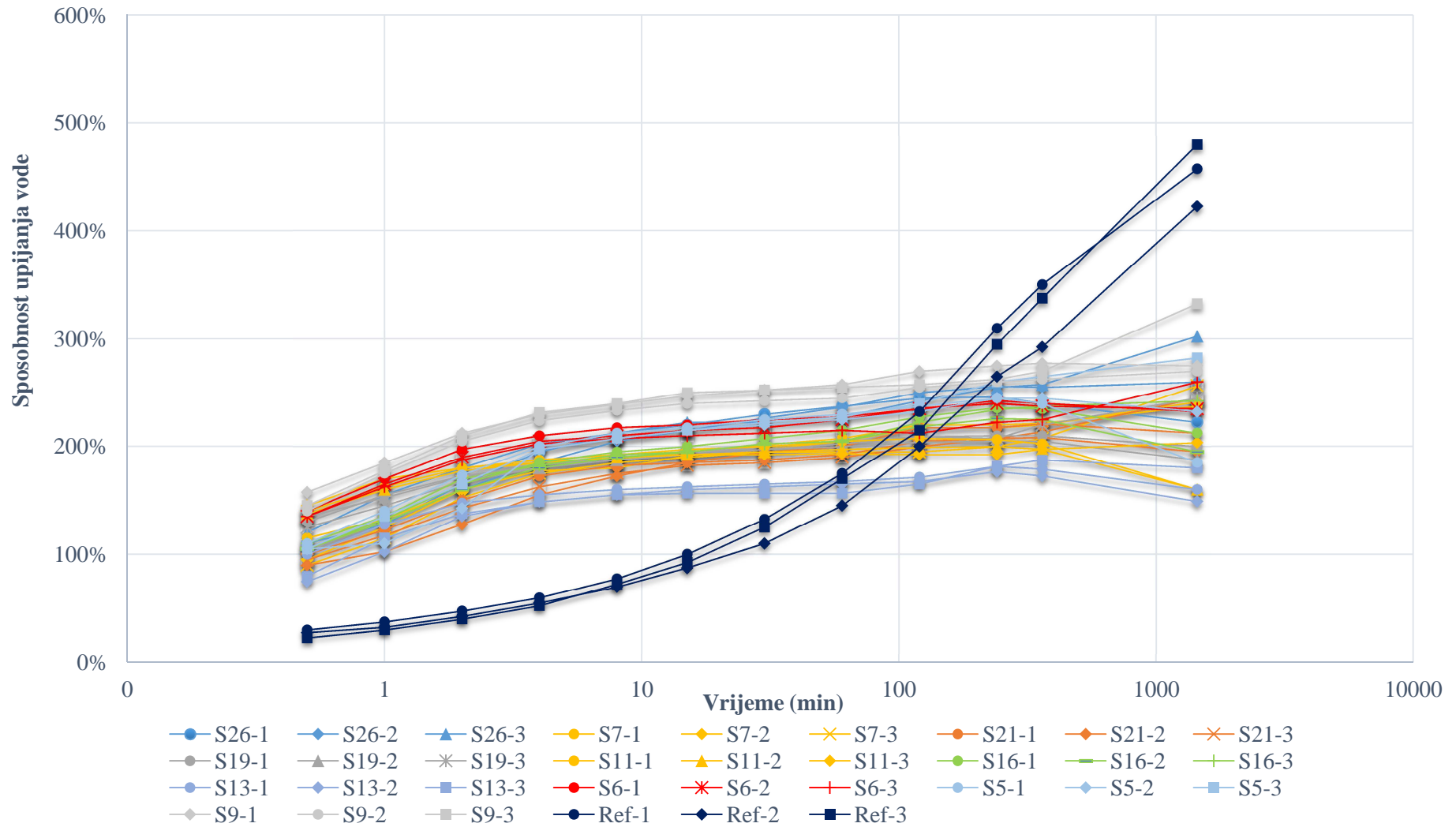


**Tablica 10-3** Rezultati laboratorijskih ispitivanja sposobnosti upijanja vode

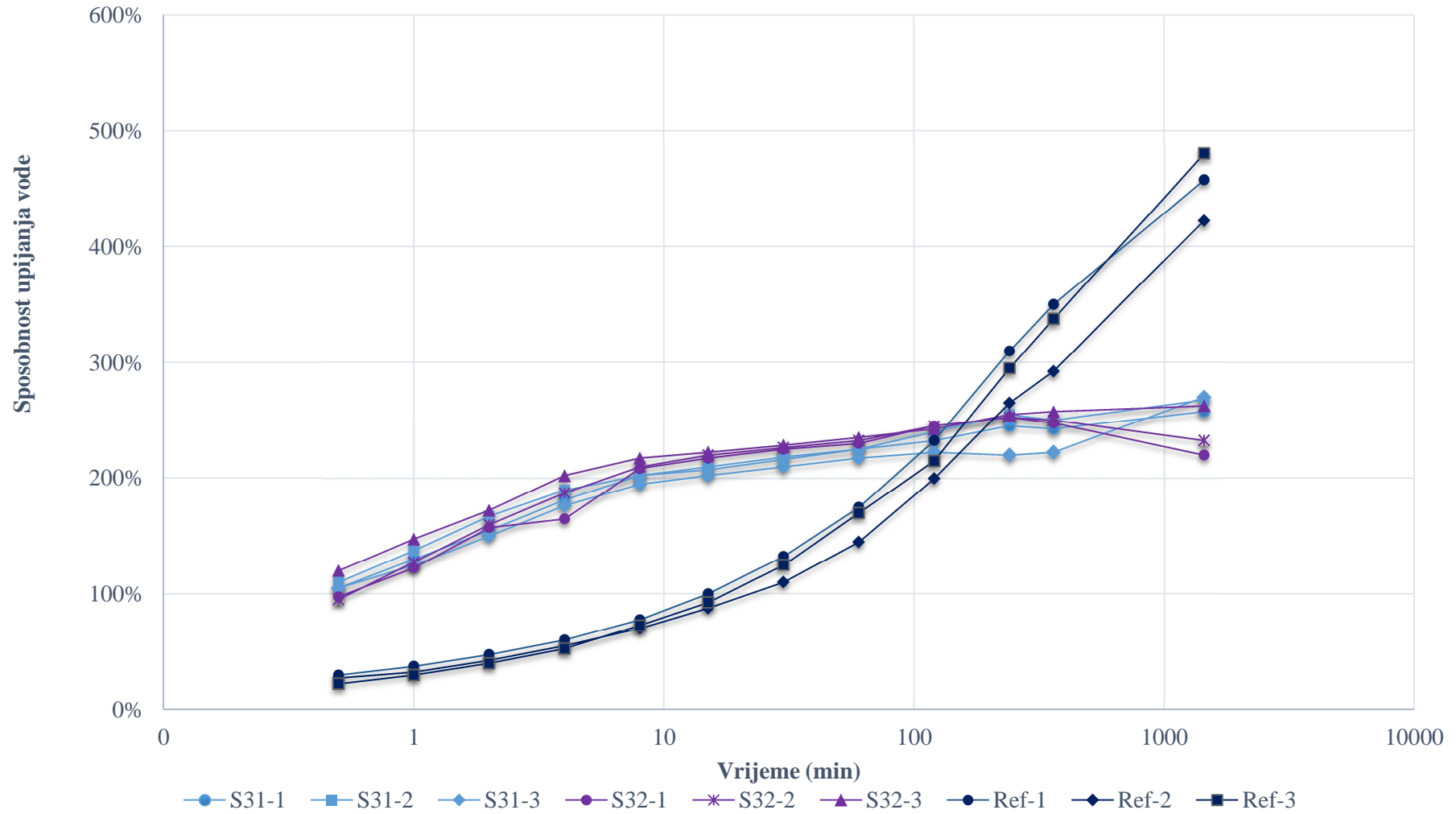
<b>Uzorak</b>	<b>Mjesec/godina ugradnje</b>	<b>Sposobnost upijanja vode (%)</b>	<b>Debljina nadsloja (m)</b>
<b>S1</b>	4./2004.	320,00	0,58
<b>S4</b>	4./2004.	307,50	0,46
<b>S2</b>	4./2004.	324,17	0,86
<b>S3</b>	4./2004.	207,50	0,80
<b>S26</b>	6./2009.	261,67	0,30
<b>S7</b>	6./2009.	245,17	0,20
<b>S21</b>	6./2009.	217,50	0,30
<b>S19</b>	6./2009.	210,83	0,24
<b>S11</b>	6./2009.	174,50	0,20
<b>S16</b>	6./2009.	216,67	0,30
<b>S13</b>	6./2009.	163,00	0,33
<b>S6</b>	6./2009.	242,50	
<b>S5</b>	6./2009.	233,33	
<b>S9</b>	6./2009.	292,50	
<b>S31</b>	8./2009.	265,00	0,59
<b>S32</b>	8./2009.	238,33	0,53
<b>S15</b>	7./2010.	249,17	
<b>S14</b>	7./2010.	258,33	
<b>S20</b>	8./2010.	268,33	
<b>S23</b>	8./2010.	220,83	
<b>S27</b>	9./2010.	212,50	
<b>S29</b>	10./2010.	250,83	
<b>S30</b>	10./2010.	245,00	
<b>Referentna vrijednost</b>		453,33	



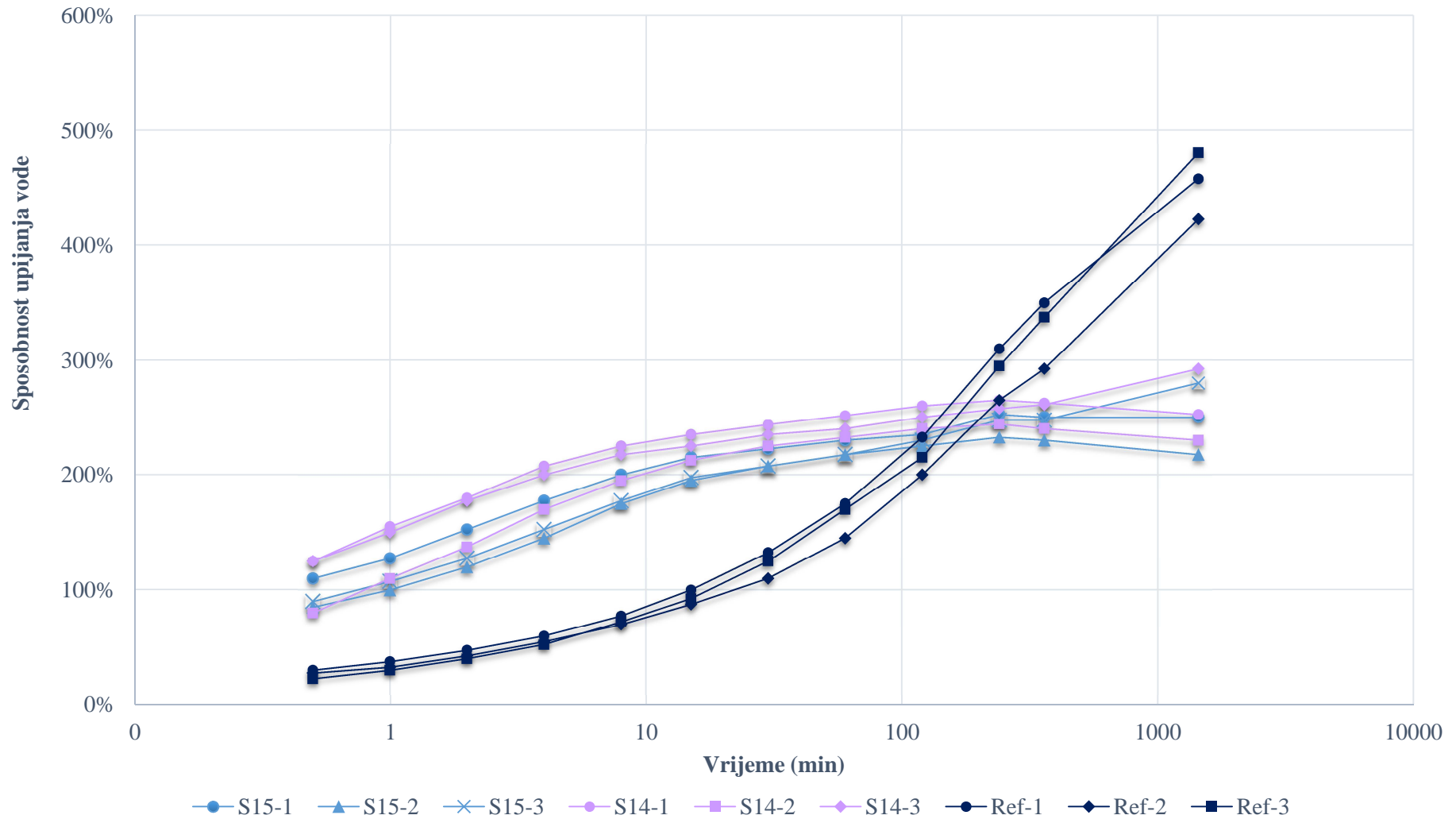
**Slika 10-7** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzorka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u travnju 2004. godine prema referentnom uzorku



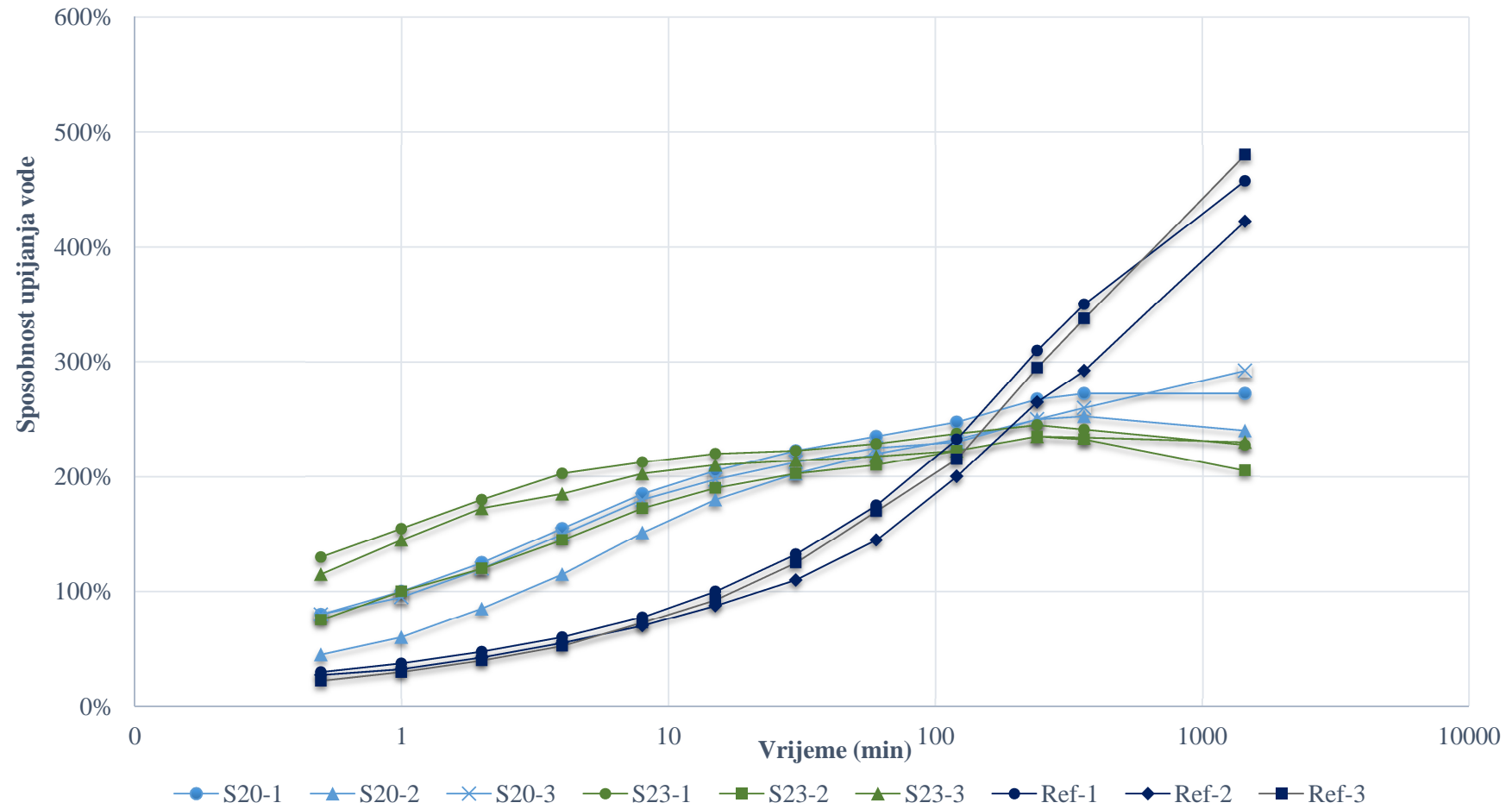
**Slika 10-8** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u lipnju 2009. godine prema referentnom uzorku



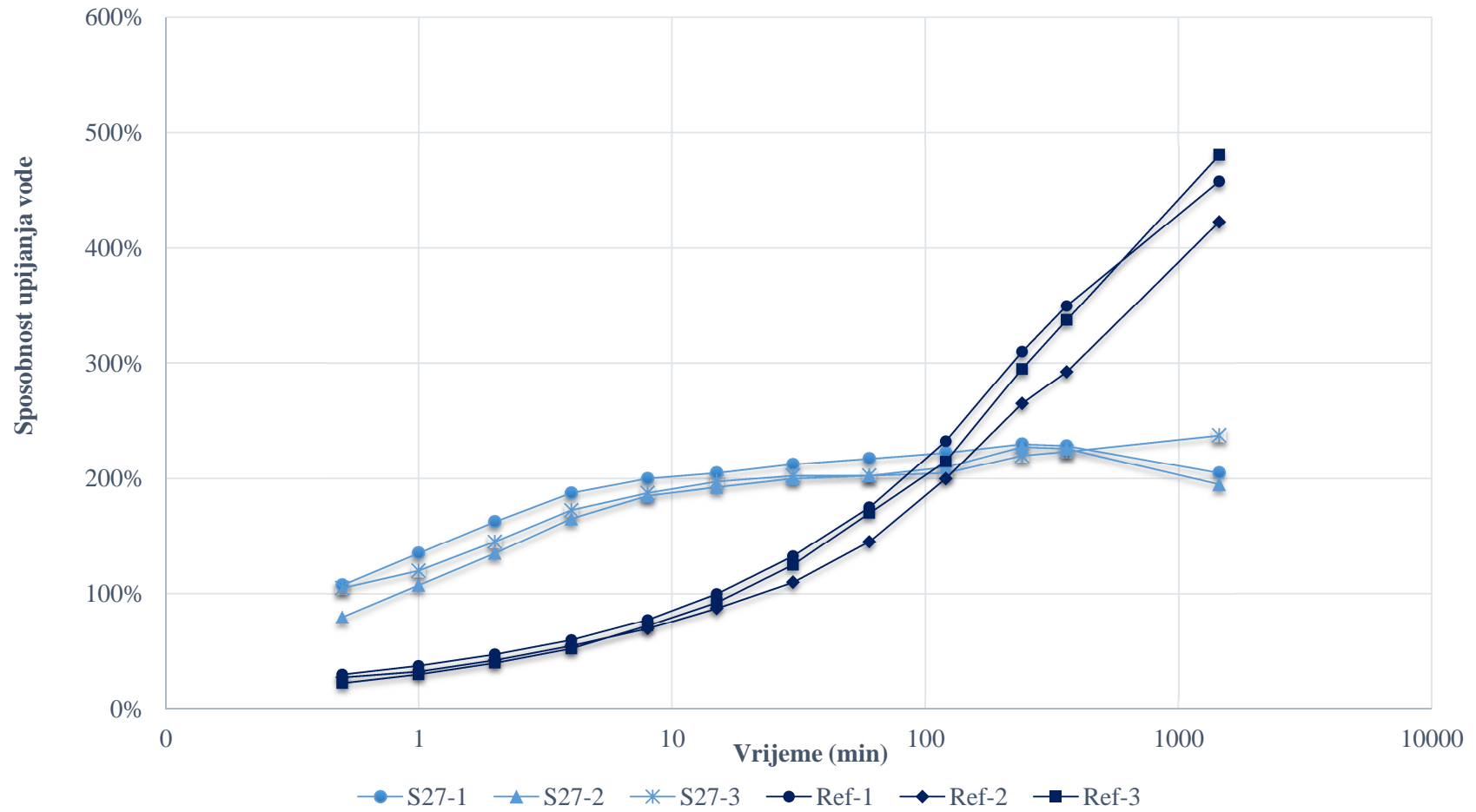
**Slika 10-9** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzorka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u kolovozu 2009. godine prema referentnom uzorku



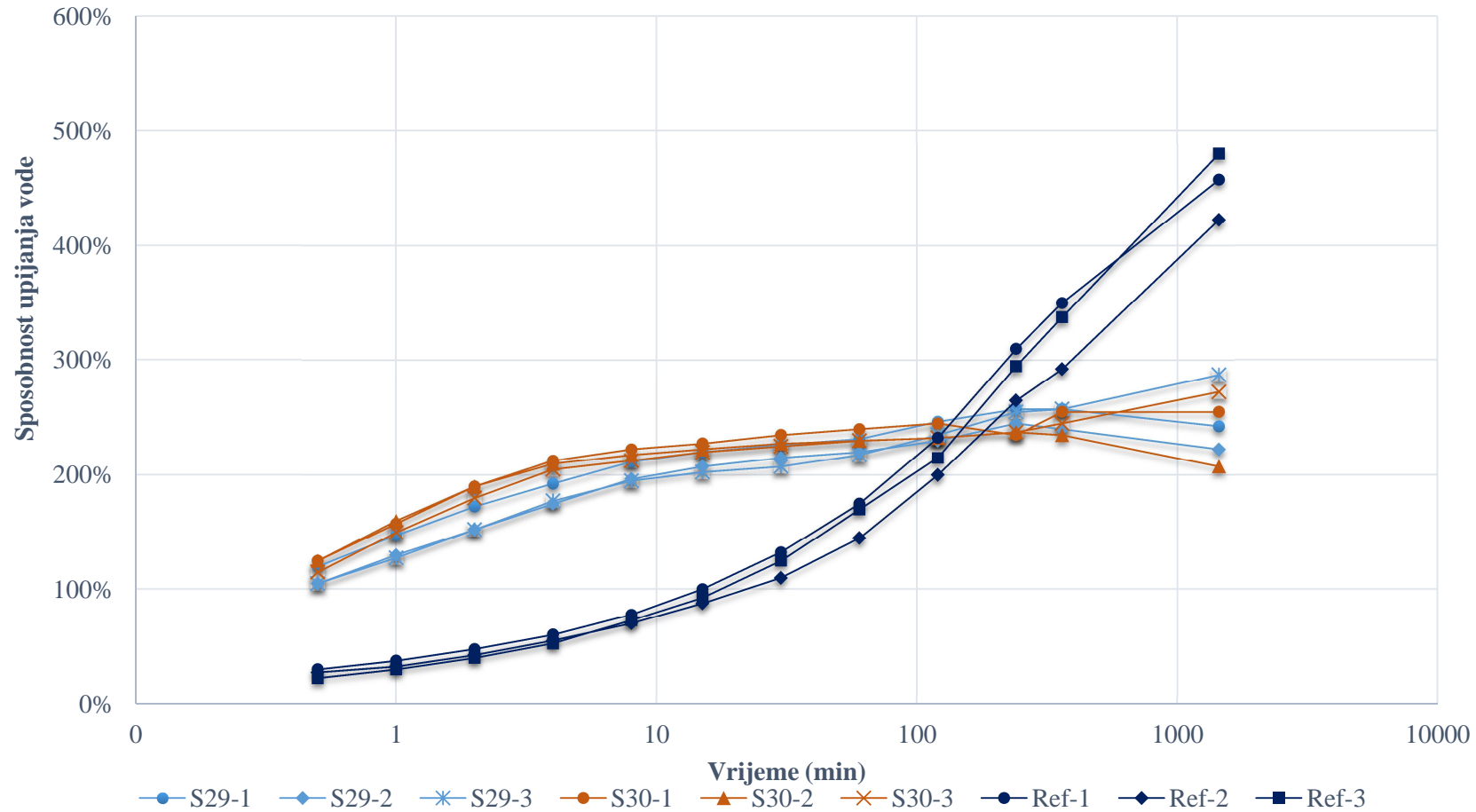
**Slika 10-10** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u srpnju 2010. godine prema referentnom uzorku



**Slika 10-11** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u kolovozu 2010. godine prema referentnom uzorku



**Slika 10-12** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u rujnu 2010. godine prema referentnom uzorku

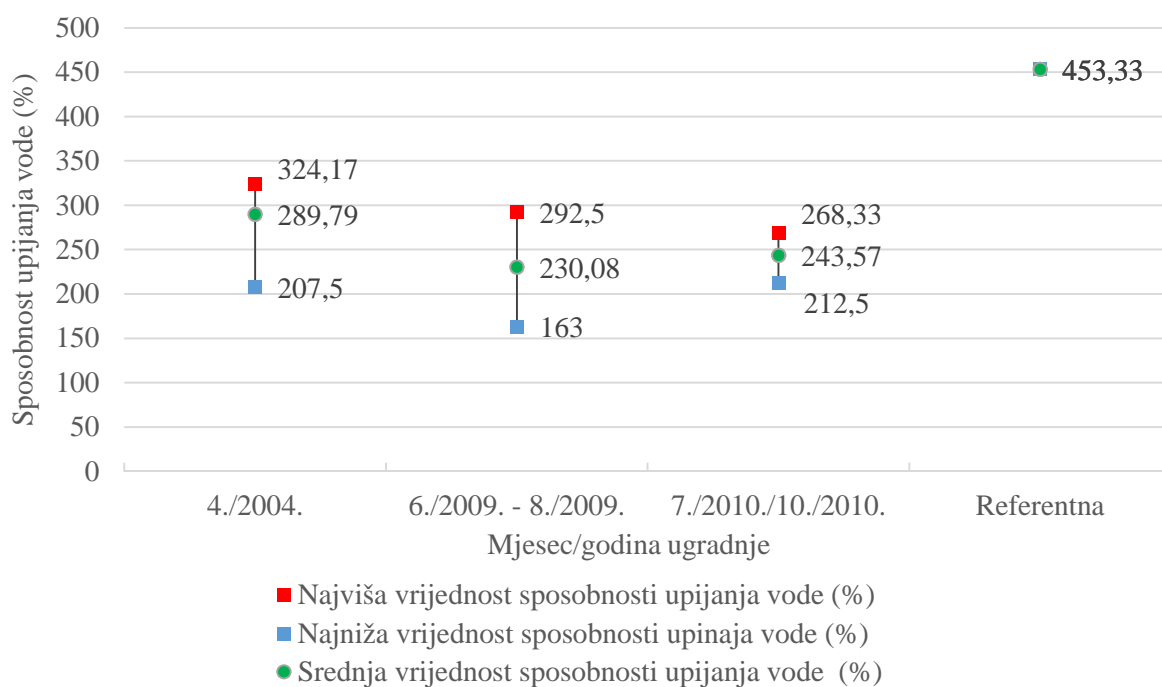


**Slika 10-13** Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u rujnu 2010. godine prema referentnom uzorku



Prema dobivenom može se vidjeti kako uzorci ugrađeni 2004. godine najmanje odstupaju od referentne vrijednosti, dok je kod uzoraka ugrađivanih 2009. i 2010. godine obrnut slučaj.

Sposobnost upijanja vode za uzorke ugrađene 2004. godine kreće se od 207,5% za uzorak S3 do 324,17% za uzorak S2 (slika 10-14).



**Slika 10-14** Rasponi vrijednosti dobiveni ispitivanjem sposobnosti upijanja vode

Kod uzoraka ugrađenih 2009. godine sposobnost upijanja vode iznosi 163% za uzorak S13 što je ujedno i najmanja vrijednost za razdoblje, dok najveću sposobnost upijanja ima uzorak S9, a koja iznosi 292,5%. Kod uzoraka ugrađenih 2010. godine dobiveni raspon kreće se od 212,5% (uzorak S27) do 268,33% (uzorak S20). Gledajući tablicu kao cjelinu, najmanju sposobnost upijanja vode ima uzorak S13, a iznosi 163%. Treba napomenuti da taj uzorak ima i najmanji volumen slobodnog bubrenja. Malo veću sposobnost upijanja koja iznosi 174,50% ima uzorak S11. Dosta malo upijanje u rasponu od 210,83% do 217,5% imaju uzorci S21, S19 i S16. Zanimljivo je kako su svi do sada navedeni uzorci (S13, S11, S21, S19 i S16) u odlagalište bili ugrađeni u lipnju 2009. godine. Ovime bi se samo skrenula pozornost na veliki raspon dobivenih vrijednosti za uzorke ugrađivane u istom mjesecu iste godine.

Uzorci S1, S4 i S2 pokazuju najveću sposobnost upijanja vode koja se kreće od 307,50% do 324,17%. Navedeni uzorci su ugrađeni u odlagalište 2004. godine. Sposobnost upijanja

uzorka S3, koji je ugrađen u odlagalište kad i uzorci S1, S4 i S2, pokazuje manje upijanje koje iznosi 207,50%.

Uspoređujući debljinu nadsloja i dobivene vrijednosti vidi se kako uzorak s najdebljim nadslojem (0,86 metara) koji je ugrađen 2004. godine ima najveću sposobnost upijanja vode od svih uzorkovanih uzoraka s terena (324,17%). Najmanju sposobnost upijanja vode od svih uzoraka ima uzorak S13, ugrađen u odlagalište 2009. godine, s debljinom nadsloja 0,33 metara.

Uzorak s najmanjim nadslojem od 0,20 metara (S11), ugrađen također 2009. godine ima sposobnost upijanja vode 174,50%.

Uzevši u obzir sve navedeno, može se zaključiti da na vrijednosti sposobnosti upijanja vode bentonitne gline, kao i na vrijednosti dobivene ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline, utjecaj imaju i debljina nadsloja i vrijeme ugradnje u odlagalište otpada, dok granulometrijski sastav nema značajnijeg utjecaja.

Referentni uzorak bentonitne gline zadovoljava vrijednosti preporučene u tablici 6-1, a iznosi 453,33%.

Prema referentnom uzorku najveća odstupanja u dobivenim rezultatima imaju uzorci ugrađivani 2009. godine, dok najmanja odstupanja imaju uzorci ugrađeni 2004. godine (slika 10-14).

Prema tablici 6-1 svi uzorkovani uzorci zadovoljavaju preporučene vrijednosti za kalcijski montmorillonit, dok dobivenu vrijednost koja odgovara vrijednostima za natrijski montmorillonit zadovoljava samo uzorak referentne vrijednosti.

#### 10.4 Indeks gubitka fluida

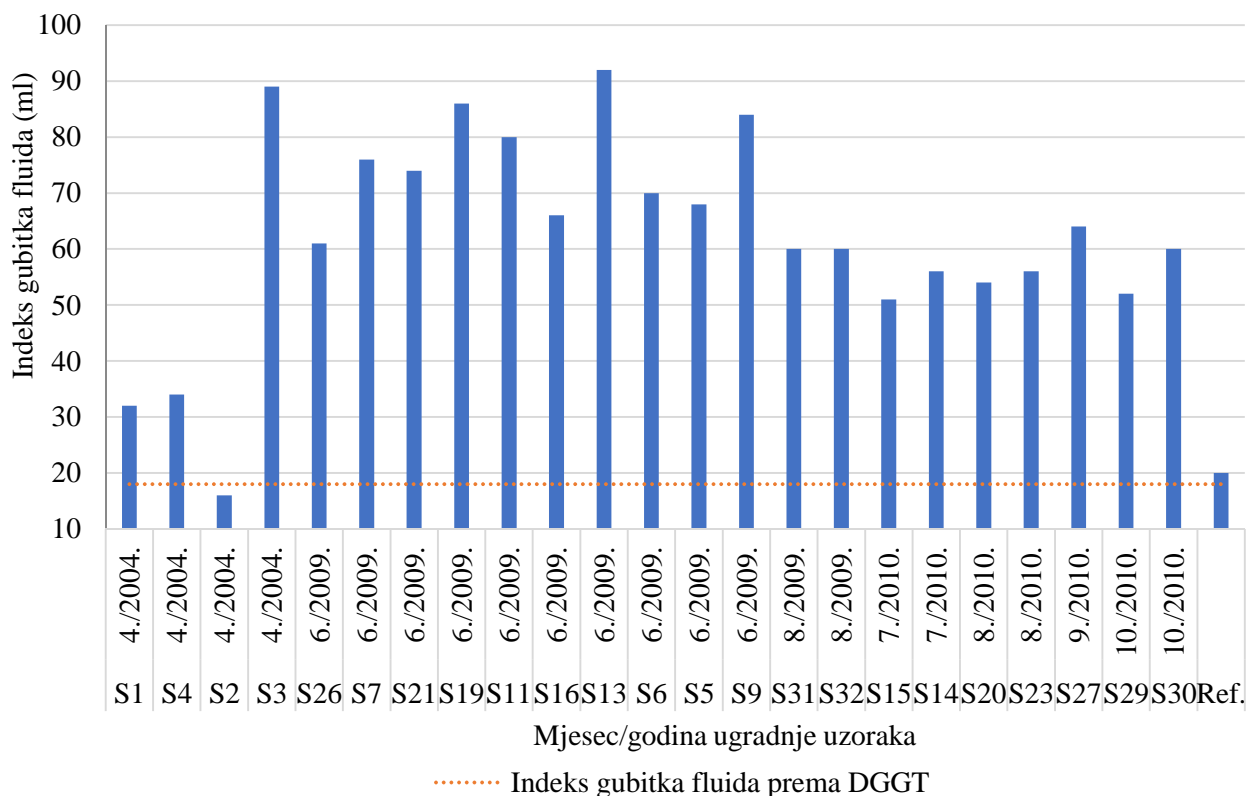
Ispitivanje indeksa gubitka fluida izvedeno je prema normi ASTM D 5891 pomoću koje se može procijeniti gubitak tekućine iz suspenzije glinenih materijala pod određenim pritiskom.

Vrijednosti dobivene ovim ispitivanjem prikazane su u tablici 10-4 i na slici 10-15.

**Tablica 10-4** Rezultati laboratorijskih ispitivanja indeksa gubitka fluida

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Indeks gubitka fluida (ml)	Debljina nadsloja (m)
S1	4./2004.	32	0,58
S4	4./2004.	34	0,46
S2	4./2004.	16	0,86
S3	4./2004.	89	0,80
S26	6./2009.	61	0,30
S7	6./2009.	76	0,20
S21	6./2009.	74	0,30
S19	6./2009.	86	0,24
S11	6./2009.	80	0,20
S16	6./2009.	66	0,30
S13	6./2009.	92	0,33
S6	6./2009.	70	
S5	6./2009.	68	
S9	6./2009.	84	
S31	8./2009.	76	0,59
S32	8./2009.	60	0,53
S15	7./2010.	51	
S14	7./2010.	56	
S20	8./2010.	54	
S23	8./2010.	56	
S27	9./2010.	64	
S29	10./2010.	52	
S30	10./2010.	60	
<b>Referentna vrijednost</b>		20	

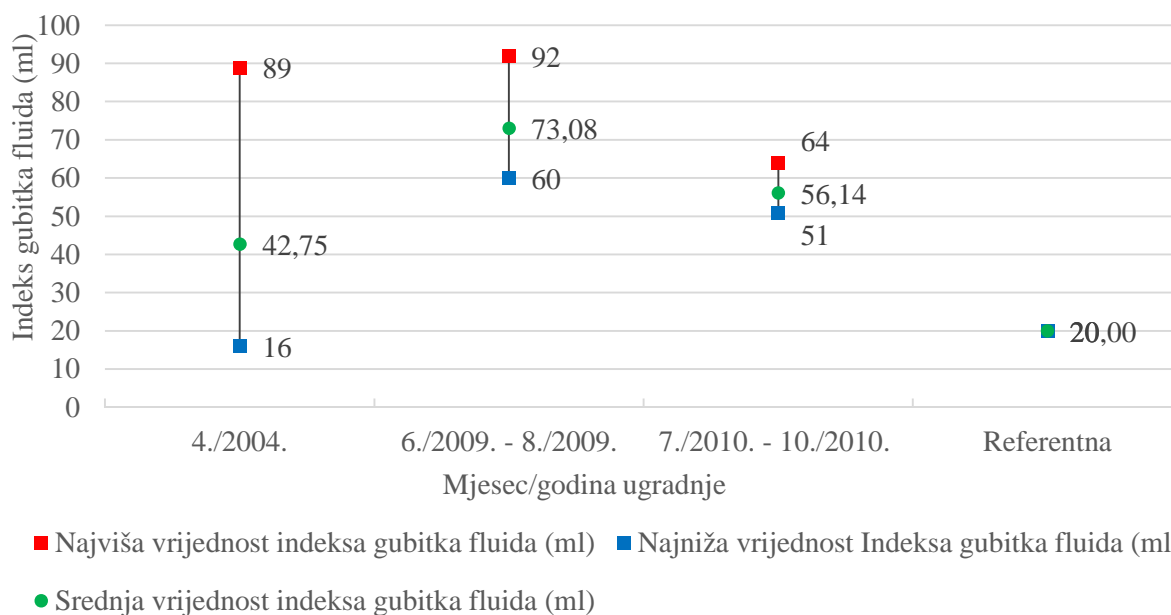
Kod uzoraka ugrađenih u odlagalište 2004. godine najmanji indeks gubitka fluida od 16 ml ima uzorak S2, dok najveću vrijednost ima uzorak S3, a koja iznosi čak 89 mililitara.



**Slika 10-15** Rezultati dobiveni ispitivanjem indeksa gubitka fluida

Indeks gubitka fluida za uzorke S31 i S32 ugrađene 2009. godine iznosi 60 ml, dok najveći indeks gubitka fluida za isto vrijeme ugradnje ima uzorak S13, a koja iznosi 92 mililitra. Raspon dobivenih vrijednosti uzoraka ugrađenih u odlagalište 2010. godine kreću se od 51 ml za uzorak S15, do 64 ml za uzorak S27 (slika 10-16).

Kod uzoraka S7 i S11 iznad kojih je najmanji nadsloj, a koji je iznosio 0,20 m vrijednosti dobivene ovim ispitivanjem kreću se od 76 ml do 80 ml, dok je kod uzorka S13 kod kojeg je nadsloj neznatno deblji (0,33 m) izmjereni indeks gubitka fluida visokih 92 ml. Treba napomenuti da uzorak S7 pripada grupi praha ekstremno visoke plastičnosti (ME), dok su uzorci S11 i S13, koji pripadaju graničnim vrijednostima između gline visoke plastičnosti i praha visoke plastičnosti, a klasificirani su dvostrukom oznakom CE/ME. Uspoređujući podatke dobivene ispitivanjem indeksa gubitka fluida i debljine nadsloja iz tablice 10-6 može se vidjeti kako debljina nadsloja ima utjecaj na indeks gubitka fluida. Naime, uzorci s manjim nadslojem imaju veći gubitak fluida. Gledajući godinu ugradnje uzoraka, uzorci koji su ugrađeni u odlagalište 2010. imaju najmanje vrijednosti gubitka fluida.



**Slika 10-16** Raspon vrijednosti dobivenih ispitivanjem indeksa gubitka fluida

U tablici 6-1 nalazi se preporučena vrijednost koju je potrebno zadovoljiti ispitivanjem indeksa gubitka fluida, a koja mora biti manja od 18 mililitara.

Prema svim dobivenim rezultatima prikazanim u tablici 10-4 u kojoj se nalaze vrijednosti koje su dobivene ispitivanjem uzoraka s odlagališta i uzorka koji nije bio ugrađen u odlagalište, te vrijednosti dobivene mjerenjem debljine nadsloja vidljivo je kako samo uzorak S2, čiji indeks gubitka fluida iznosi 16 ml, iznad kojeg se nalazi najdeblji nadsloj, a koji je u nju ugrađen u travnju 2004. godine, jedini zadovoljava preporučenu vrijednost koja iznosi 18 mililitara.

Kod rezultata dobivenih ispitivanjem indeksa gubitka fluida zanimljivo je da čak niti referentni uzorak čiji indeks gubitka fluida iznosi 20 ml, ne zadovoljava preporučenu vrijednost prema tablici 6-1.

Ukoliko se ipak uzme vrijednost dobivena ispitivanjem bentonitne gline koja nije bila ugrađena u odlagalište kao referentna vrijednost, sa slike 10-16 se vidi kako i u ovom slučaju najmanja odstupanja dobivenih vrijednosti imaju uzorci ugrađeni u odlagalište 2004. godine, dok najveća odstupanja u rezultatima obzirom na referentnu vrijednost imaju uzorci ugrađivani 2009. godine. Može se zaključiti kako godina ugradnje uzoraka i debljina nadsloja imaju najveći utjecaj na indeks gubitka fluida, dok granulometrijski sastav nadsloja nema utjecaja na ispitano svojstvo.

## 11 REZULTATI ISPITIVANJA HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA

Vrijednosti hidrauličke propusnosti na 10 uzoraka koje se nalaze u tablici 11-1 dobivene su prema normi ASTM D5084.

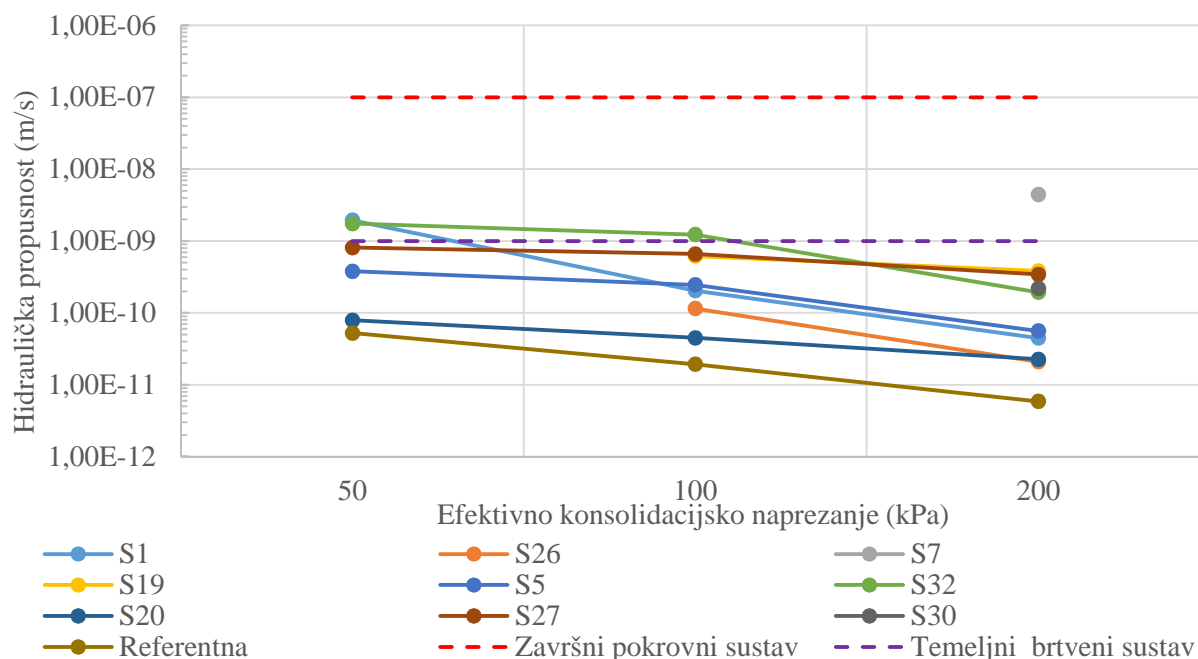
**Tablica 11-1** Rezultati laboratorijskih ispitivanja hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s)			Debljina nadsloja (m)
		Efektivno konsolidacijsko naprezanje (kPa)			
		50	100	200	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	0,58
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	0,3
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	0,2
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	0,24
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	0,53
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	

Hidraulička propusnost ispitivana je na devet uzoraka GCL-a uzorkovanih iz istražnih raskopa s odlagališta i na GCL-u referentnih vrijednosti koji nije bio ugrađen u odlagalište (slika 11-1).

Na slici su naznačene i vrijednosti koje GCL mora zadovoljiti prema tome ugrađuje li ga se u temeljni zaštitni ili završni pokrovni sustav.

Da bi GCL zadovoljio uvjete ugradnje u temeljni zaštitni sustav njegova hidraulička propusnost treba biti manja od  $10^{-9}$  m/s (tablica 6-1), dok bi za ugradnju u završni pokrovni sustav GCL trebao osigurati hidrauličku propusnost manju od  $10^{-7}$  m/s (Carson 1995).



**Slika 11-1** Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem hidrauličke propusnosti GCL-a

Prema Pravilniku (NN 114/15) hidraulička propusnost tla na području temeljnog tla i bočnih strana tijela odlagališta mora biti manja od:

- za odlagalište za opasni otpad:  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s u debljini tla najmanje od pet metara,
- za odlagalište za neopasni otpad:  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s u debljini tla od najmanje jednog metra,
- za odlagalište za inertni otpad:  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s u debljini tla od najmanje jednog metra.

Prema dobivenim rezultatima vidljivo je kako svi uzorci još uvijek zadovoljavaju vrijednost koju trebaju imati ugrađujući li se u završni pokrovni sustav, premda je tijekom vremena došlo do povećanja propusnosti u odnosu na referentni uzorak u nekim slučajevima čak 100 puta.

Uzorak S1 kod manjeg efektivnog konsolidacijskog napreznjanja (50 kPa), uzorak S32 kod napreznjanja manjih od 200 kPa, te uzorak S7 ni pod kojim napreznjanjem, ne zadovoljavaju uvjete za ugradnju u temeljni zaštitni sustav.

Usporede li se rezultati, uzevši pri tome u obzir godinu ugradnje u odlagalište i efektivna konsolidacijska naprezanja, vidi se da kod naprezanja od 50 kPa najveću hidrauličku propusnost ima uzorak ugrađen u odlagalište 2004. godine.

Povećanjem naprezanja do 200 kPa dolazi do promjene, pa veću hidrauličku propusnost pokazuju uzorci koji su najkraće vremensko razdoblje proveli ugrađeni u odlagalištu otpada.

GCL koji nije bio ugrađen u odlagalište pokazuje najmanje vrijednosti hidrauličke propusnosti.

S obzirom na godinu ugradnje uzoraka u odlagalište otpada pokazalo se da uzorak S7 koji je u odlagalište bio ugrađen od 2009. godine ima najveću hidrauličku propusnost.

Sa slike 11-1 vidljivo je da hidraulička propusnost pada povećanjem efektivnog konsolidacijskog naprezanja.

Iz tablice 11-1 se vidi kako svi uzorci zadovoljavaju preporučenu vrijednost za ugradnju u završni pokrovni sustav. Kod uzoraka S19 i S26 nije bilo moguće izmjeriti hidrauličku propusnost kod efektivnog naprezanja od 50 kPa. Isto se dogodilo kod uzoraka S7 i S30, samo kod njih nije bila mjerljiva ni propusnost pri efektivnom naprezanju od 100 kPa. U tablicu 11-1 koja pokazuje dobivene vrijednosti hidrauličke propusnosti uvršten je redak u kojem se nalaze vrijednosti debljine nadsloja. Usporedbom debljine nadsloja i uzoraka kod kojih nije bilo moguće odrediti hidrauličku propusnost kod naprezanja od 50 kPa i 100 kPa, jer je bila prevelika, vidljivo je da se iznad tih uzoraka nalazio nadsloj male debljine (0,20 do 0,30 m) dok je u slučaju uzoraka S1 i S32 kod kojih je nadsloj deblji od 0,50 m bilo moguće izmjeriti vrijednost hidrauličke propusnosti za sva tri nanesena efektivna konsolidacijska naprezanja. Temeljem toga, analiza dobivenih rezultata ukazuje da postoji utjecaj debljine nadsloja na hidrauličku propusnost. Za pretpostaviti je da je mala debljina nadsloja pogodovala stvaranju pukotina isušivanja koje su kod određenog broja uzoraka dovele do značajnijeg povećanja hidrauličke propusnosti.



## 12 OVISNOST HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA O INDEKSNIM POKAZATELJIMA BENTONITNE GLINE

Nakon provedenih ispitivanja i analize dobivenih podataka, u ovom će se poglavlju usporediti podaci dobiveni ispitivanjem svojstava bentonitne gline i podaci dobiveni ispitivanjem glinene geosintetičke barijere.

Za lakšu usporedbu dobivenih rezultata koristila se korelacijska analiza u cilju utvrđivanja uzajamne ovisnosti ispitivanih parametara bentonitne gline i GCL-a.

Uzajamna ovisnost (korelacijski odnos) prikazan je pomoću koeficijenta determinacije ( $R^2$ ) prema Chadock-ovoj ljestvici jakosti veze čije su vrijednosti navedene u tablici 12-1.

Chaddock-ova ljestvica prikazuje utjecaj jedne ili više nezavisnih varijabli na vrijednost zavisne varijable kako bi se što lakše utvrdila njihova međusobna ovisnost. U ovom radu nezavisne varijable predstavljaju indeksni pokazatelji bentonitne gline, dok je zavisna varijabla hidraulička propusnost GCL-a.

Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) je omjer između protumačenih i ukupnih odstupanja, a poprima vrijednosti od 0 do 1. Što je uspostavljena funkcionalna veza točnija vrijednost koeficijenta determinacije je bliža 1.

**Tablica 12-1** Chadock-ova ljestvica jakosti veze

Koeficijent determinacije ( $R^2$ )	Jakost veze
0,00	odsutnost veze
0,00 - 0,25	slaba veza
0,25 - 0,64	veza srednje jakosti
0,64 - 1,00	čvrsta veza
1,00	potpuna veza

Zaključci koji su dobiveni ovakvom usporednom metodom olakšavaju kasniju procjenu je li glinena geosintetička barijera, koja je u odlagalištu otpada provela određeno vremensko razdoblje, zaista učinkovita hidraulička barijera.

## 12.1 Utjecaj granice tečenja bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a

U analizu rezultata dobivenih ispitivanjem granice tečenja bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a krenulo se s ciljem kako bi se potvrdilo da veće vrijednosti granice tečenja uzrokuju smanjenje hidrauličke propusnosti (Lee et al. 2005b)

Rezultati dobiveni ispitivanjem granice tečenja i hidrauličke propusnosti navedeni su u tablici 12-2, te grafički prikazani na slikama 12-1 i 12-2.

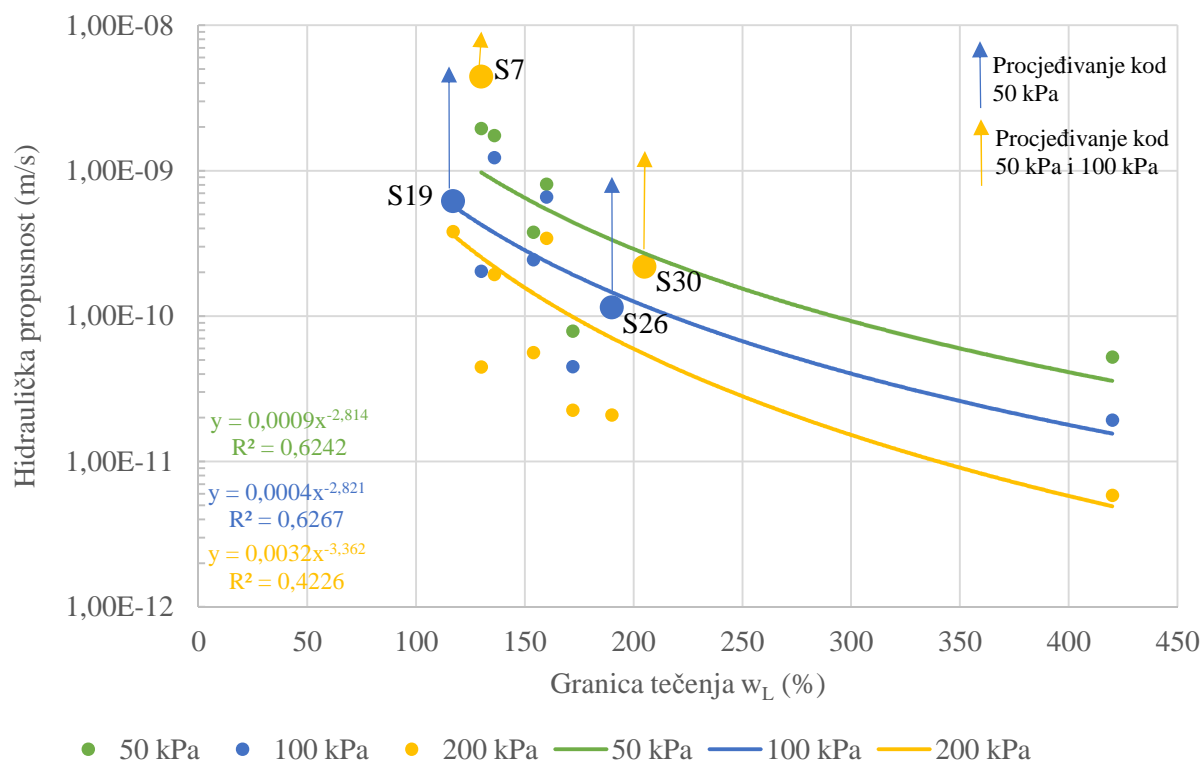
Kao što je već spomenuto u poglavlju 11, a i vidljivo je i iz tablice 12-2, hidrauličku propusnost za neke uzorke, pod određenim naprezanjima nije bilo moguće izmjeriti.

**Tablica 12-2** Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem granice tečenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s) kod određenog efektivnog konsolidacijskog naprezanja (kPa)			Granica tečenja $w_L$ (%)
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	130
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	190
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	130
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	117
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	154
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	136
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	172
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	160
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	205
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	420

Na slici 12-1 povučene su i linije trenda. Za ovo, kao i za uzajamnu ovisnost indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a koja tek slijede, odabrana je potencijnska linija trenda, jer ona od svih mogućih linija trenda najbolje prikazuje taj odnos. U

ovom ispitivanju, a prema tablici 12-1, koeficijent determinacije ( $R^2$ ) kreće se u granicama od 0,4226 za efektivno naprezanje od 200 kPa do 0,6267 za efektivno naprezanje kod 100 kPa. Prema navedenom uzajamna ovisnost granice tečenja i hidrauličke propusnosti predstavlja vezu srednje jakosti.

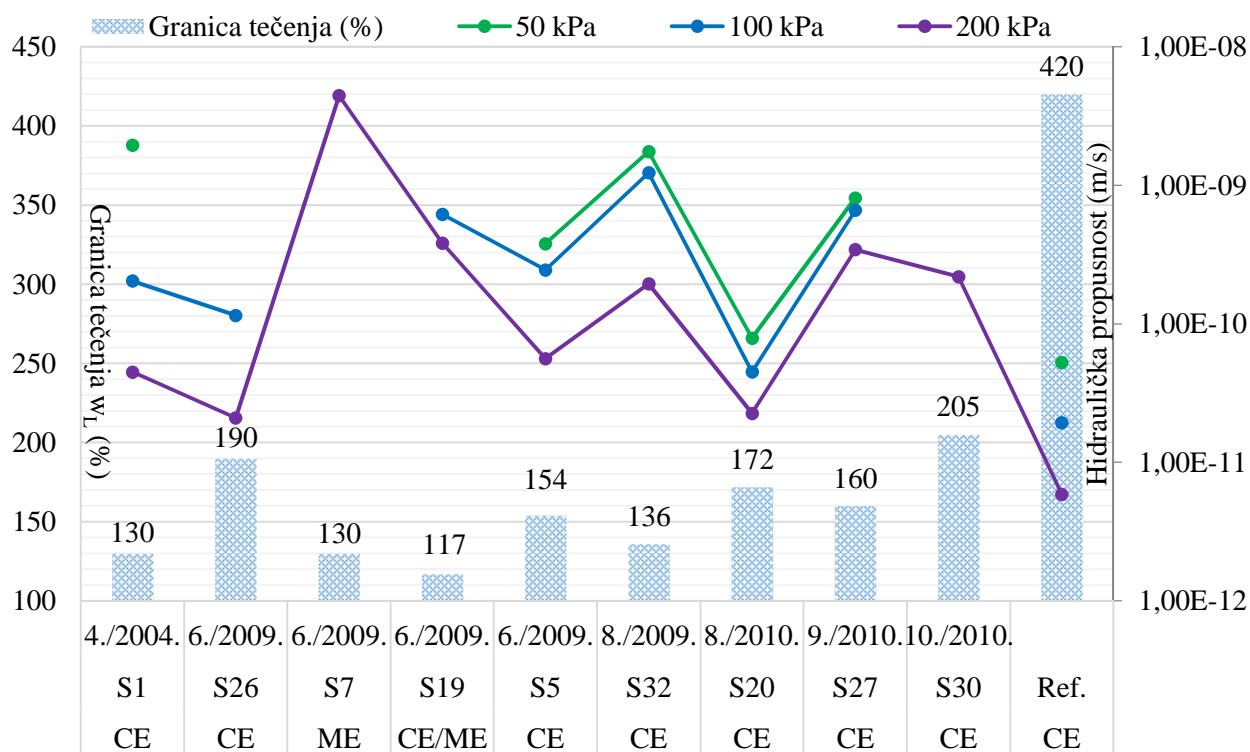


**Slika 12-1** Utjecaj granice tečenja na hidrauličku propusnost

Pogledamo li sliku 12-2 i uzmemo li u obzir da povećanje vrijednosti granica tečenja bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost, možemo zaključiti da je to najizraženije u slučaju bentonitne gline referentnih vrijednosti. Također je vidljivo da uzorci koji imaju manje vrijednosti granice tečenja pokazuju veću hidrauličku propusnost.

Prema navedenom, tvrdnja da povećanje granice tečenja bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost, i obrnuto, pokazala se ispravnom.

OVISNOST HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA O INDEKSNIM POKAZATELJIMA BENTONITNE GLINE



Vrijeme ugradnje - oznaka uzorka - klasifikacijska oznaka

**Slika 12-2** Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o granici tečenja i efektivnim konsolidacijskim naprežanjima.

## 12.2 Utjecaj indeksa plastičnosti bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a

Indeks plastičnosti bentonitne gline djeluje na hidrauličku propusnost GCL-a na način da povećanje indeksa plastičnosti smanjuje hidrauličku propusnost.

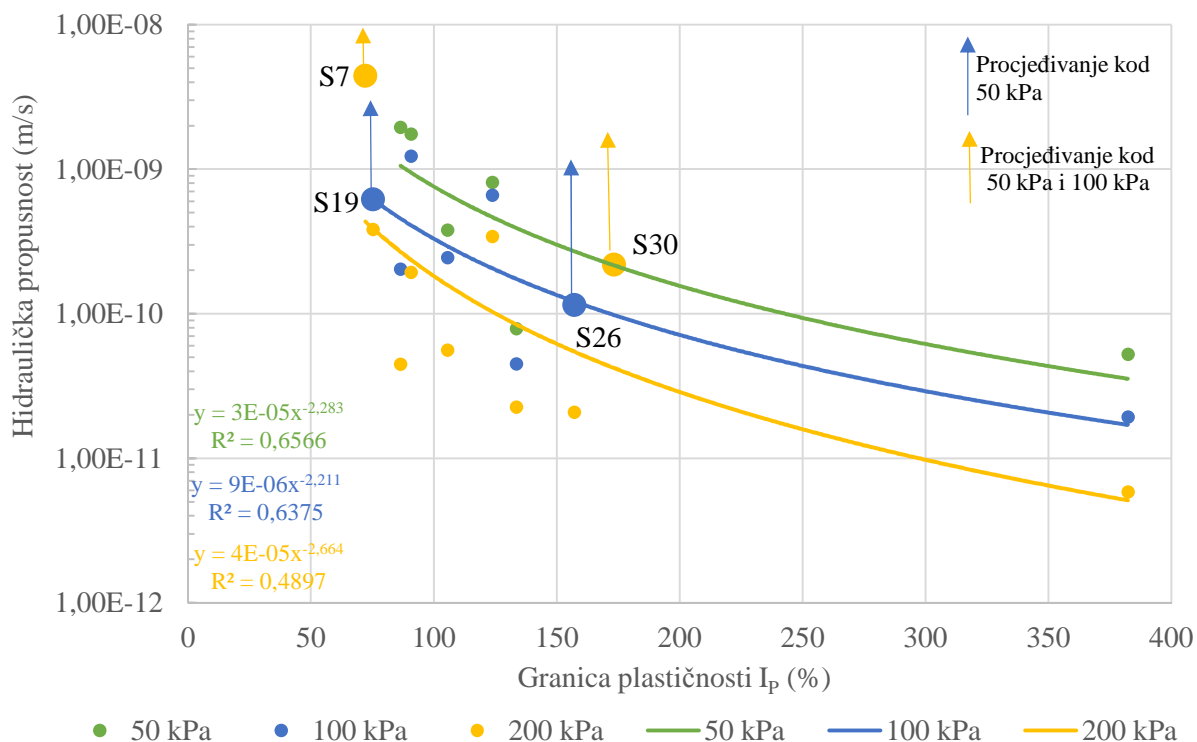
Iz tablice 12-3 može se iščitati da uzorci ugrađeni u odlagalište otpada 2010. godine imaju veće vrijednosti indeksa plastičnosti, dok najveću vrijednost ima referentni uzorak koji nije bio ugrađen u odlagalište.

**Tablica 12-3** Rezultati ispitivanja indeksa plastičnosti bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s) kod određenog efektivnog konsolidacijskog naprezanja (kPa)			Indeks plastičnosti $I_p$ (%)
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	86,50
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	157,20
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	72,15
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	75,30
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	105,60
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	90,70
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	133,60
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	123,80
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	173,30
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	382,40

Na slici 12-3 prikazana je uzajamna ovisnost indeksa plastičnosti bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a. Vidljivo je kako najveći indeks plastičnosti i najmanju hidrauličku propusnost ima uzorak bentonitne gline koji nije bio ugrađen u odlagalište otpada.

Prema koeficijentu determinacije za efektivna naprezanja kod 100 kPa i 200 kPa ostvarena je veza srednje jakosti između indeksa plastičnosti i hidrauličke propusnosti. Kod naprezanja od 50 kPa navedena uzajamna ovisnost ostvaruje čvrstu vezu.

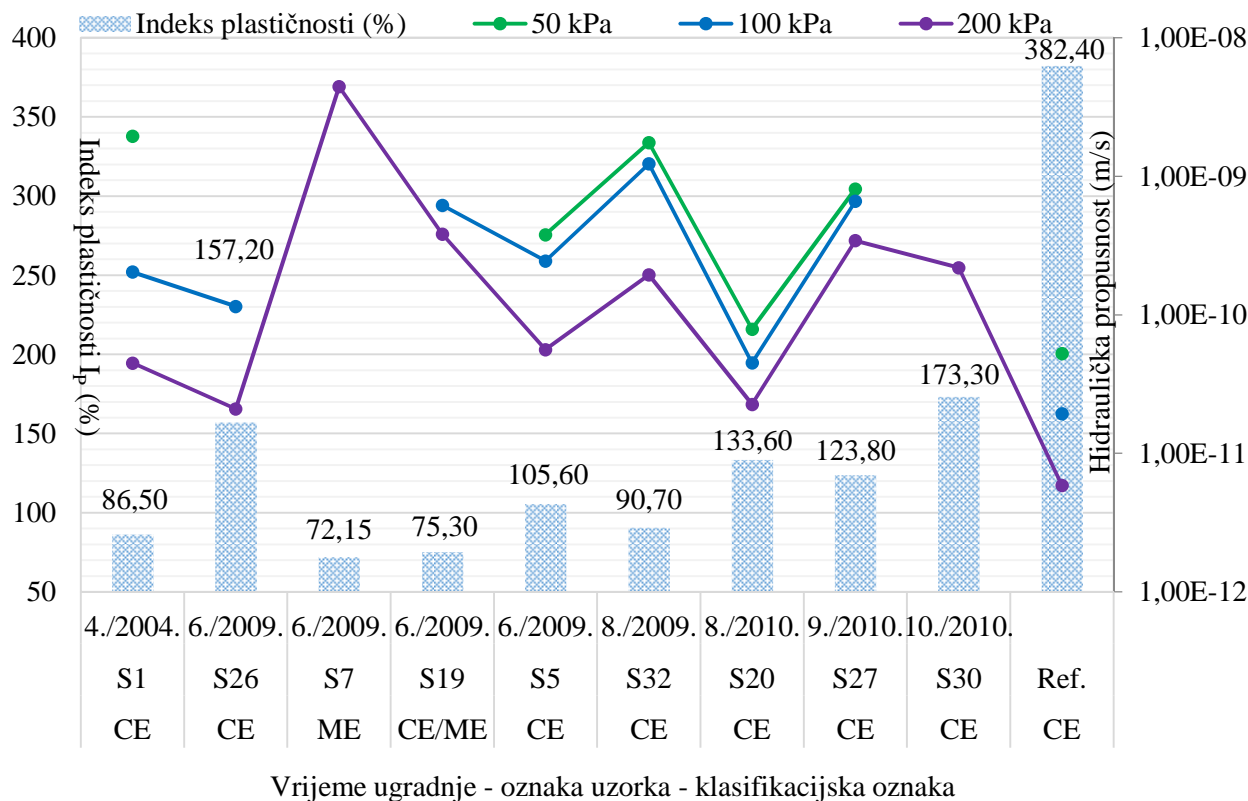


**Slika 12-3** Utjecaj indeksa plastičnosti na hidrauličku propusnost

Slikom 12-4 potvrđuje se tvrdnja kojom bentonitna glina većih vrijednosti indeksa plastičnosti smanjuje hidrauličku propusnost GCL-a.

To se najbolje može uočiti na uzorku referentnih vrijednosti. Međutim i ostali uzorci potvrđuju tu ovisnost. Na primjer uzorci s manjim vrijednostima indeksa plastičnosti i koji po klasifikaciji pripadaju grupi tala koja u svom sastavu imaju prah visoke plastičnosti, pokazuju veće vrijednosti hidrauličke propusnosti naročito uzorci S7 i S19.

*OVISNOST HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA O INDEKSNIM  
POKAZATELJIMA BENTONITNE GLINE*



**Slika 12-4** Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o indeksu plastičnosti i efektivnim konsolidacijskim napreznjima

### 12.3 Utjecaj volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a

U usporedbu navedena dva podatka krećemo s tvrdnjom kako bi veće vrijednosti dobivene ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja, trebale pokazati manju hidrauličku propusnost (Shackelford et al. 2000).

Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 12-4, te na grafički na slici 12-5. Dakle, uzorci prikazuju povećanje volumena slobodnog bubrenja s povećanjem vremenskog razdoblja od ugradnje GCL-a.

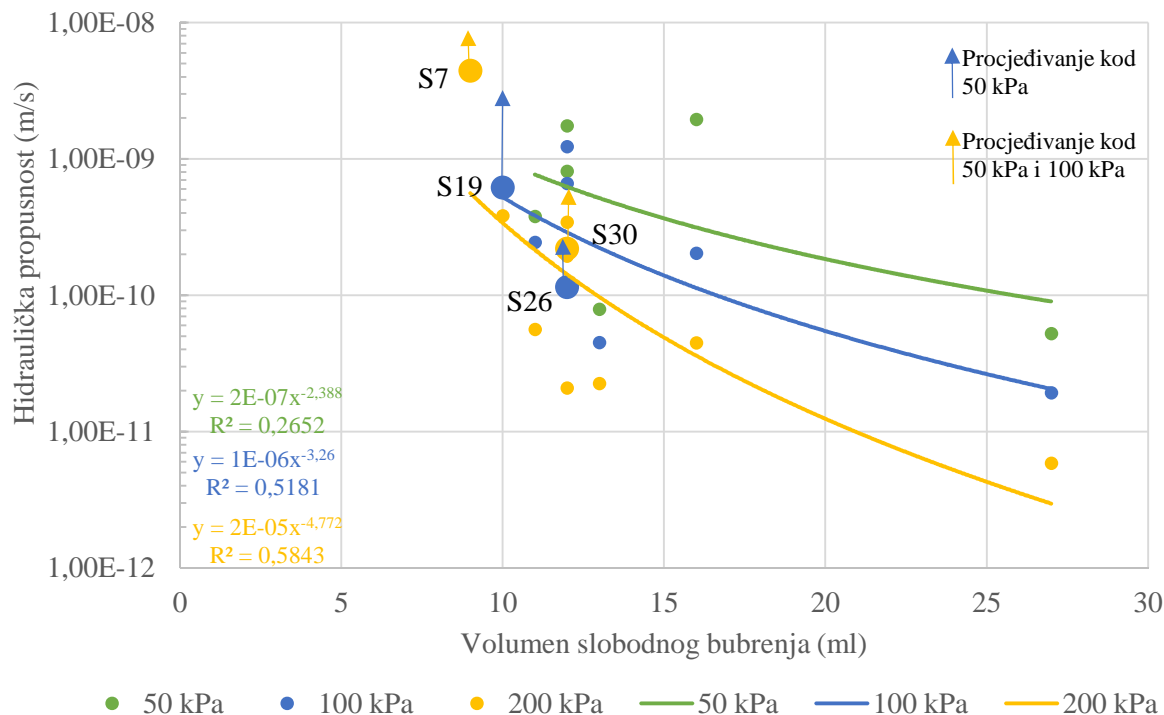
**Tablica 12-4** Rezultati dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s) kod određenog efektivnog konsolidacijskog naprezanja (kPa)			Volumen slobodnog bubrenja (ml)
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	16
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	12
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	9
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	10
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	11
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	12
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	13
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	12
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	12
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$5,25 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	27

Na slici 12-5 vidljiv je utjecaj volumena slobodnog bubrenja na hidrauličku propusnost uzorka. Jasno je vidljivo da se hidraulička propusnost smanjuje kako povećanjem efektivnih konsolidacijskih naprezanja tako i povećanjem volumena slobodnog bubrenja.

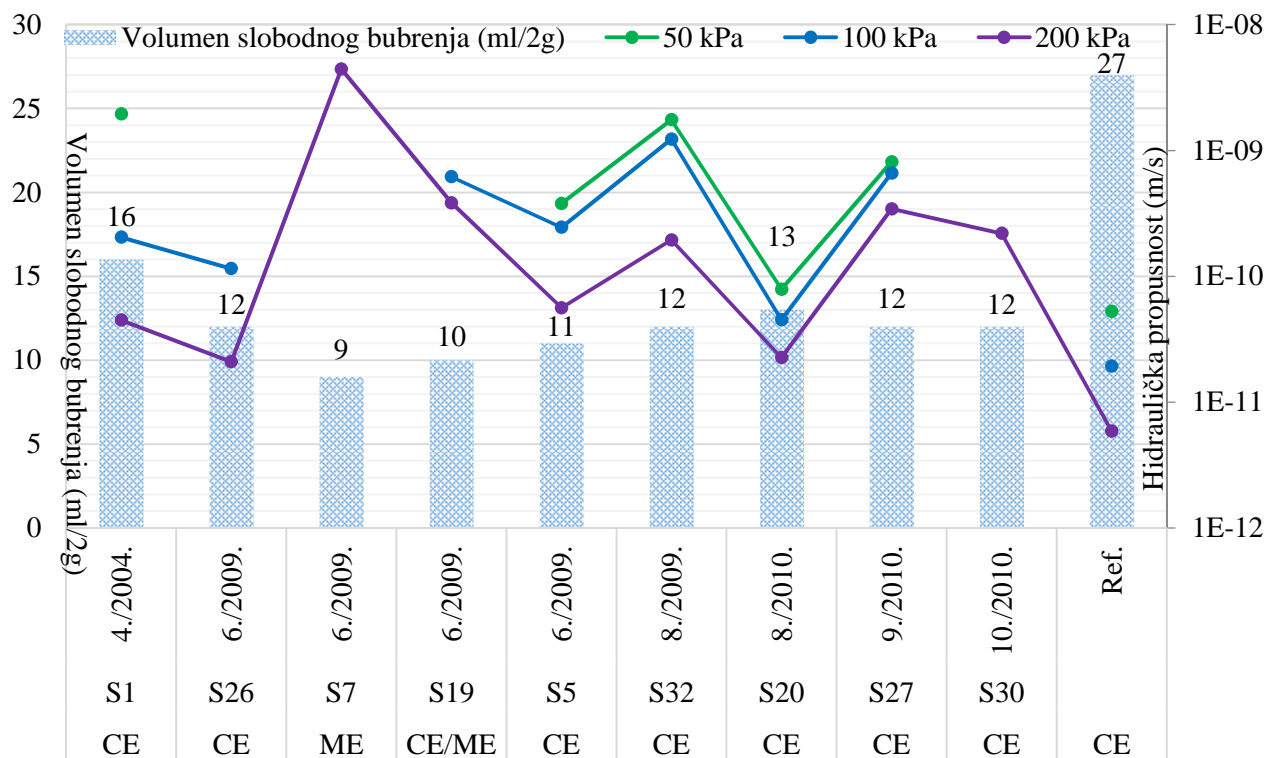
Općenito, korelacijski odnosi prikazuju vezu srednje jakosti. Najjači odnos dobiven je kod efektivnog konsolidacijskog naprezanja od 200 kPa ( $R^2 = 0,5843$ ), dok je najslabiji ostvaren kod naprezanja od 50 kPa ( $R^2 = 0,2652$ ).





**Slika 12-5** Utjecaj volumena slobodnog bubrenja na hidrauličku propusnost

Tvrđnja s kojom smo krenuli u analizu uzajamne ovisnosti volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a pokazala se djelomično ispravnom. Naime, uzorak bentonitne gline referentne vrijednosti potvrđuje spomenutu tvrdnju, jer je sa slike 12-6 vidljivo kako on svojim velikim volumenom slobodnog bubrenja uzrokuje malu propusnost GCL-a. Osim toga, uzorci S7 i S19 s malim volumenom slobodnog bubrenja, prema slici 12-6, povećavaju hidrauličku propusnost. U to se ne uklapa uzorak S1, jer usprkos velikom volumenu slobodnog bubrenja ima niske vrijednosti hidrauličke propusnosti. Međutim, to je i najstariji uzorak nad kojim se provodilo ispitivanje. Prema tome, moglo bi se zaključiti da povećanje volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline ukazuje na smanjenje hidrauličke propusnosti GCL-a, ali pri tome se treba uzeti u obzir i godina ugradnje.



Vrijeme ugradnje - oznaka uzorka- klasifikacijska oznaka

**Slika 12-6** Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o volumenu slobodnog bubrenja i efektivnim konsolidacijskim naprezanjima

#### 12.4 Utjecaj sposobnosti upijanja vode bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a

U ovu analizu krećemo s tvrdnjom kako veća sposobnost upijanja vode uzrokuje smanjenje hidrauličke propusnosti.

U tablici 12-5 prikazani su podaci dobiveni ispitivanjem sposobnosti upijanja vode i hidrauličke propusnosti, dok je na slikama 12-7 i 12-8 grafički prikazana uzajamna ovisnost sposobnosti upijanja na hidrauličku propusnost s obzirom na godinu ugradnje u odlagalište.

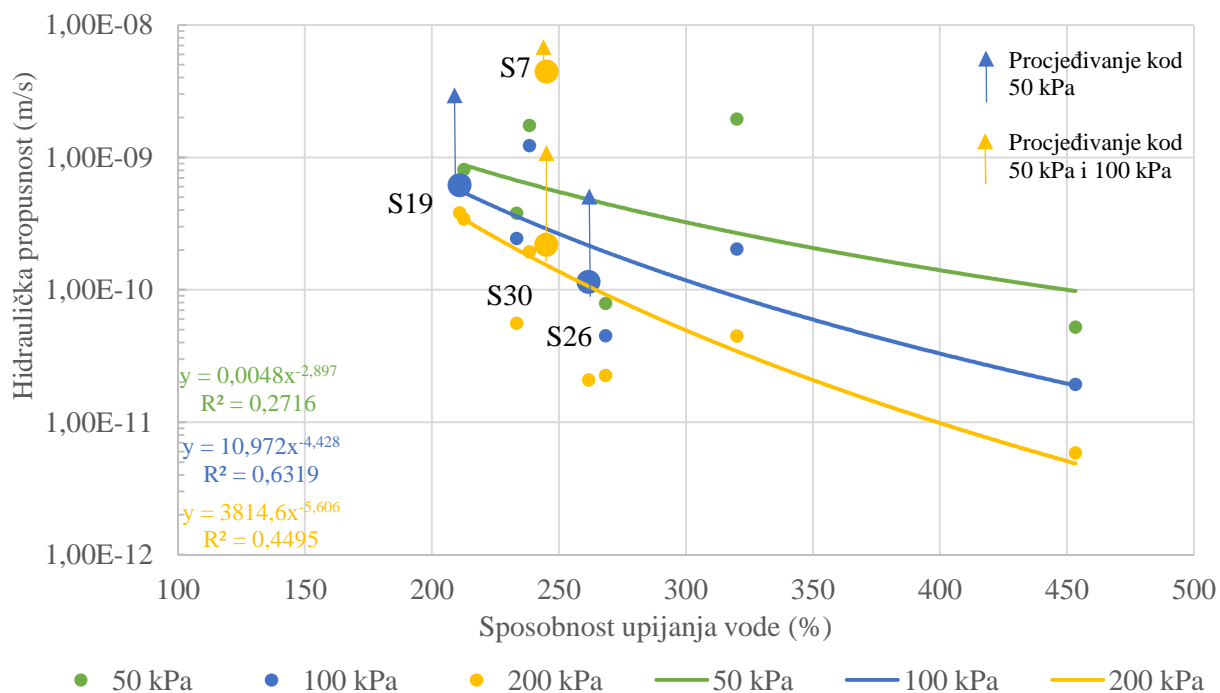
**Tablica 12-5** Rezultati dobiveni ispitivanjem sposobnosti upijanja vode bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s) kod određenog efektivnog konsolidacijskog naprezanja (kPa)			Sposobnost upijanja vode (%)
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	320,00
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	261,67
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	245,17
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	210,83
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	233,33
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	238,33
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	268,33
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	212,50
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	245,00
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	453,33

Iz tablice 12-4 vidljivo je da najveću vrijednost sposobnosti upijanja vode ima bentonitna glina referentne vrijednosti (453%).

Na slici 12-7 prikazan je uzajamni odnos sposobnosti upijanja vode i hidrauličke propusnosti uzoraka, pri čemu je vidljivo kako se hidraulička propusnost smanjuje i povećanjem efektivnih konsolidacijskih naprezanja i povećanjem sposobnosti upijanja vode.

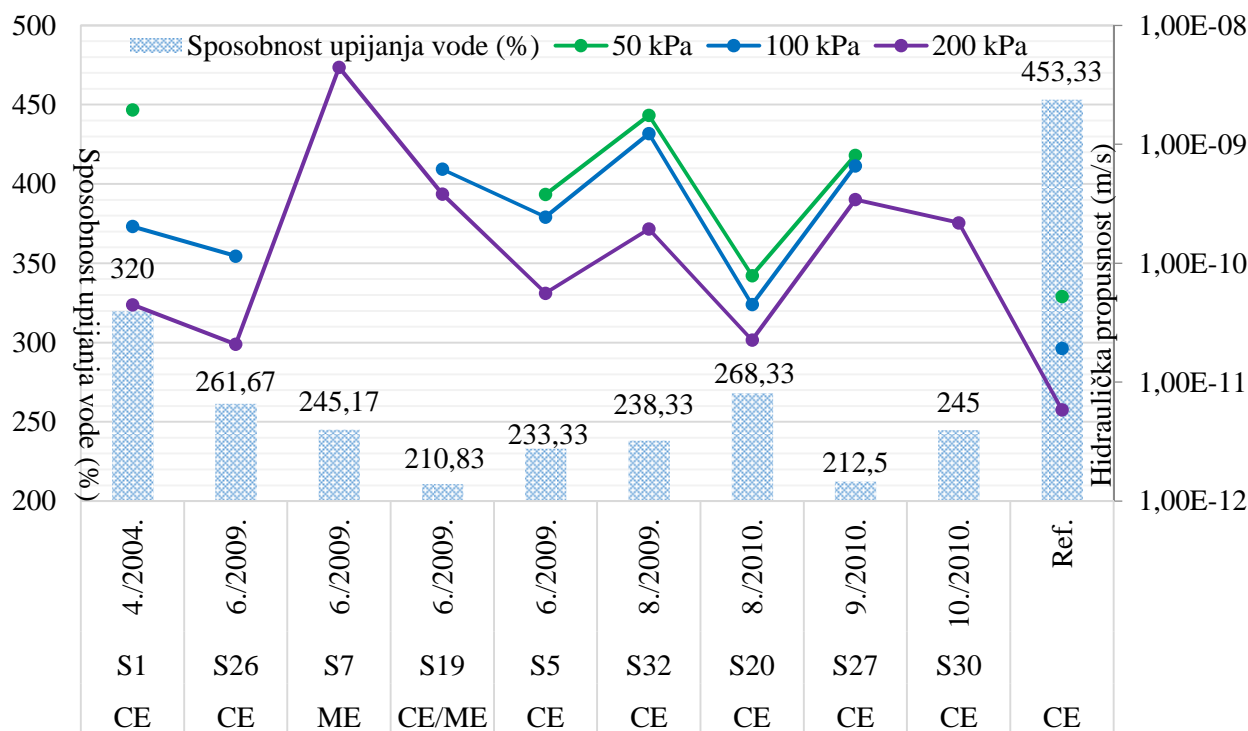
Najbolju uzajamnu ovisnost kojom je ostvarena veza srednje jakosti odvija se kod efektivnog konsolidacijskog naprezanja od 100 kPa ( $R^2 = 0,6319$ ), dok je slaba veza ostvarena između sposobnosti upijanja vode i hidrauličke propusnosti kod naprezanja od 50 kPa ( $R^2 = 0,2716$ ).



**Slika 12-7** Utjecaj sposobnosti upijanja vode na hidrauličku propusnost

Ukoliko se promatra odnos sposobnosti upijanja vode i hidrauličke propusnosti (slika 12-8) vidi se kako uzorci koji imaju manje vrijednosti upijanja vode (S7, S19, S32 i S27), djeluju na povećanje hidrauličke propusnosti.

OVISNOST HIDRAULIČKE PROPUSNOSTI GLINENIH GEOSINTETIČKIH BARIJERA O INDEKSNIM POKAZATELJIMA BENTONITNE GLINE



Vrijeme ugradnje - oznaka uzorka - klasifikacijska oznaka

**Slika 12-8** Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o sposobnosti upijanja vode i efektivnim konsolidacijskim naprežanjima

Ipak, najbolju potvrdu da povećanje sposobnosti upijanja vode smanjuje hidrauličku propusnost pokazuje bentonitna glina referentne vrijednosti.

Tvrđnju kojom smo krenuli u analizu potvrđuju skoro svi uzorci, pri čemu je izuzetak uzorak S1 koji sa svojim većim vrijednostima sposobnosti upijanja vode, obzirom na ostale uzorke, pokazuje veliku hidrauličku propusnost. To se može opravdati duljim vremenskim razdobljem provedenim u odlagalištu otpada.

## 12.5 Utjecaj indeksa gubitka fluida bentonitne gline na hidrauličku propusnost GCL-a

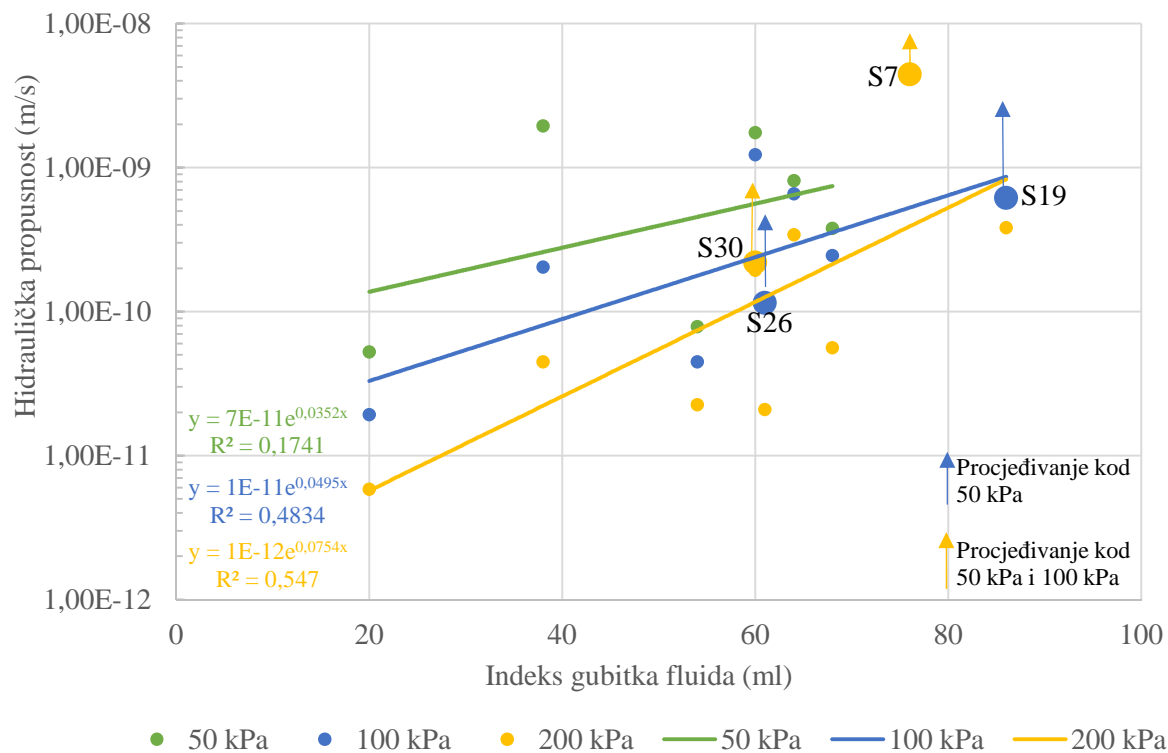
Pomoću analize rezultata prikazanih u tablici 12-6 probat će se potvrditi teorija da male vrijednosti indeksa gubitka fluida povećavaju hidrauličku propusnost.

**Tablica 12-6** Rezultati ispitivanja indeksa gubitka fluida bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a

Uzorak	Mjesec/godina ugradnje	Hidraulička propusnost (m/s) kod određenog efektivnog konsolidacijskog naprezanja (kPa)			Indeks gubitka fluida (ml)
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	
<b>S1</b>	4./2004.	$1,95 \cdot 10^{-09}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$4,48 \cdot 10^{-11}$	32
<b>S26</b>	6./2009.		$1,15 \cdot 10^{-10}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	61
<b>S7</b>	6./2009.			$4,44 \cdot 10^{-09}$	76
<b>S19</b>	6./2009.		$6,18 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	86
<b>S5</b>	6./2009.	$3,79 \cdot 10^{-10}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-11}$	68
<b>S32</b>	8./2009.	$1,75 \cdot 10^{-09}$	$1,23 \cdot 10^{-09}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	60
<b>S20</b>	8./2010.	$7,89 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	54
<b>S27</b>	9./2010.	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-10}$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	64
<b>S30</b>	10./2010.			$2,19 \cdot 10^{-10}$	60
<b>Referentna vrijednost</b>		$5,25 \cdot 10^{-11}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$5,87 \cdot 10^{-12}$	20

Prema grafičkom prikazu na slici 12-9 potvrđuje se ranije navedena tvrdnja kako se djelovanjem većeg efektivnog konsolidacijskog naprezanja indeks gubitka fluida smanjuje čime uvjetuje smanjenje hidrauličke propusnosti.

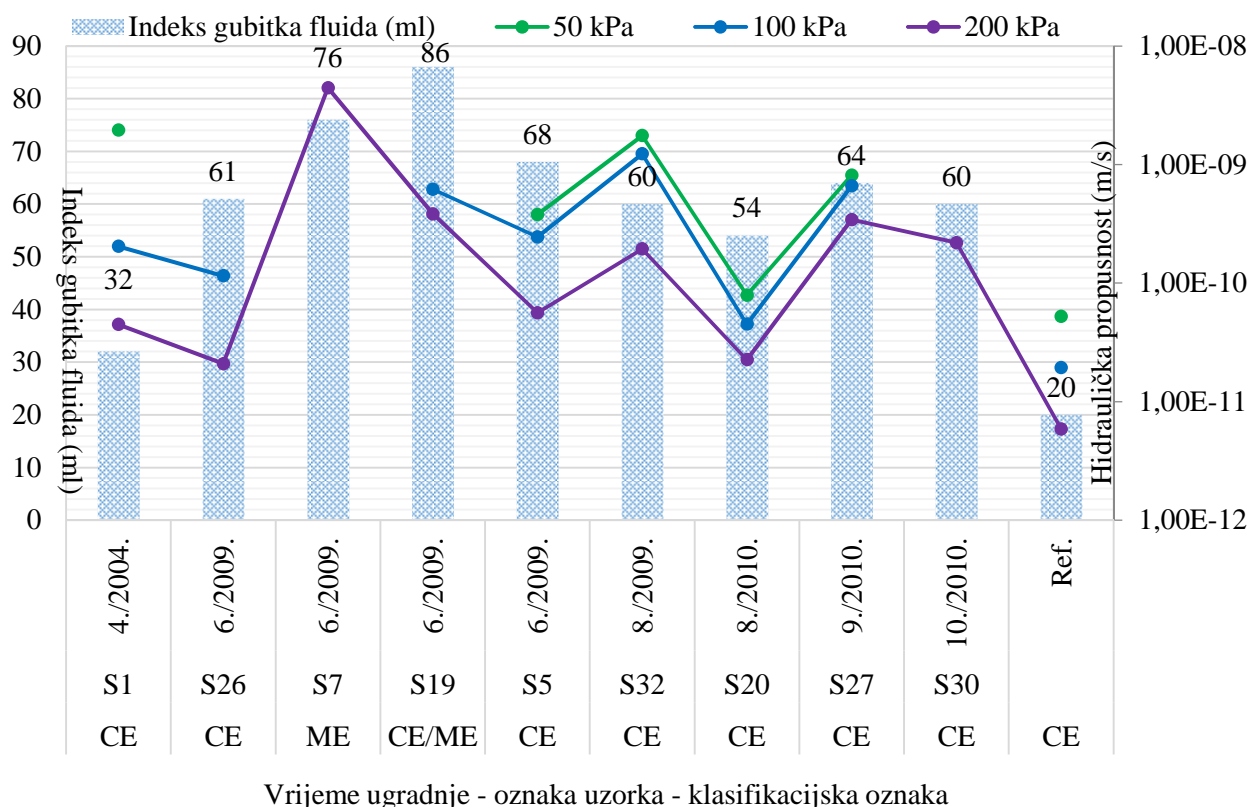
Promatrajući uzajamni odnos indeksa gubitka fluida i hidrauličke propusnosti, može se zaključiti kako je veza srednje jakosti ostvarena kod naprezanja od 100 kPa ( $R^2 = 0,4834$ ) i 200 kPa ( $R^2 = 0,547$ ), dok se kod naprezanja od 50 kPa odnos između navedenih svojstava očituje slabom vezom ( $R^2 = 0,1741$ ).



**Slika 12-9** Utjecaj indeksa gubitka fluida na hidrauličku propusnost

Na slici 12-10 može se vidjeti kako se smanjenjem indeksa gubitka fluida, smanjuje i hidrauličku propusnost, naročito ukoliko promatramo referentni uzorak koji ima najmanju hidrauličku propusnost.

Prema tome, tvrdnja da smanjenje indeksa gubitka fluida smanjuje i hidrauličku propusnost analizom ovih rezultata se pokazala ispravnom.



**Slika 12-10** Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o indeksu gubitka fluida i efektivnim konsolidacijskim napreznjima

U ovom poglavlju nastojalo se pokazati kako svojstva bentonitne gline dobivena ispitivanjem Atterbergovih granica i indeksnih pokazatelja, djeluju na hidrauličku propusnost GCL-a.

Pretpostavke kojima se ulazilo u svaku usporedbu radi lakše analize dobivenih rezultata su:

- povećanje vrijednosti granice tečenja bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost GCL-a,
- povećanje vrijednosti indeksa plastičnosti bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost GCL-a,
- povećanje vrijednosti volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost GCL-a, te
- povećanje vrijednosti sposobnosti upijanja vode bentonitne gline smanjuje hidrauličku propusnost GCL-a, dok
- povećanje vrijednosti indeksa gubitka fluida bentonitne gline povećava i hidrauličku propusnost GCL-a.



Nakon provedene analize podataka i usporedbe može se zaključiti kako bentonitna glina svojim svojstvima (bubrenje, upijanje) djeluje na svojstva GCL-a.

U ovom poglavlju može se uočiti kako kod svih uzoraka nije bilo moguće odrediti hidrauličku propusnost za sva efektivna konsolidacijska naprezanja. To bi se možda moglo „opravdati“ time da bentonitna glina izdvojena iz pojedinog GCL-a nije isto vremensko razdoblje provela u odlagalištu otpada, nema isti mineraloški sastav, nema istu debljinu i isti sastav nadsloja, te se prema dijagramu plastičnosti može različito klasificirati (CE, ME ili CE/ME). Nadalje, promatrajući uzajamnu ovisnost pri određenim konsolidacijskim napreznjima vidljivo je da kod usporedbe Atterbergovih granica bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a najlošija korelacija događa kod efektivnog konsolidacijskog napreznja od 200 kPa, dok je najbolja, u slučaju granice tečenja kod 100 kPa, a u slučaju indeksa plastičnosti kod 50 kPa.

Promatrajući uzajamnu ovisnost indeksnih svojstava bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a (tablica 12-7) može se uočiti kako su najjače veze dobivene pri većim konsolidacijskim napreznjima (veze srednje jakosti). Izuzetak je ovisnost indeksa plastičnosti i hidrauličke propusnosti kod efektivnog napreznja od 50kPa kod kojih je ostvarena čvrsta veza. Najlošija uzajamna ovisnost koja se očituje slabom vezom dobivena je u tri slučaja (bubrenje, upijanje i gubitak fluida) kod napreznja od 50 kPa.

**Tablica 12-7** Uzajamna ovisnost indeksnih svojstava i hidrauličke propusnosti prema Chadock-ovoj ljestvici jakosti veze

Indeksna svojstva bentonitne gline	Efektivno konsolidacijsko napreznje (kPa)					
	50		100		200	
	R <sup>2</sup>	Jakost veze	R <sup>2</sup>	Jakost veze	R <sup>2</sup>	Jakost veze
<b>Granica tečenja <math>w_L</math></b> (%)	0,6242	veza srednje jakosti	0,6267	veza srednje jakosti	0,4226	veza srednje jakosti
<b>Indeks plastičnosti <math>I_p</math></b> (%)	0,6566	čvrsta veza	0,6375	veza srednje jakosti	0,4897	veza srednje jakosti
<b>Volumen slobodnog bubrenja (ml/2g)</b>	0,2652	slaba veza	0,5181	veza srednje jakosti	0,5843	veza srednje jakosti
<b>Sposobnost upijanja vode <math>w_A</math> (%)</b>	0,2716	slaba veza	0,6319	veza srednje jakosti	0,4495	veza srednje jakosti
<b>Indeks gubitka fluida (ml)</b>	0,1741	slaba veza	0,4834	veza srednje jakosti	0,547	veza srednje jakosti

## 13 ZAKLJUČAK

Ovaj rad prikazuje rezultate istraživanja koji su se bavili jednim važnim aspektom prilikom projektiranja, izgradnje i naknadnog praćenja ponašanja zaštitnih sustava na odlagalištima otpada. Vrlo važan dio zaštitnih sustava predstavljaju brtvene barijere, koje se u posljednje vrijeme uglavnom izvode upotrebom glinenih geosintetičkih barijera (GCL-a). Te su barijere, kao i svi drugi materijali koji su sastavni dijelovi nekog od konstruktivnih elemenata odlagališta, izložene tijekom životnog vijeka odlagališta različitim mehaničkim, kemijskim, hidrauličkim i termičkim utjecajima koji su posljedica bilo procesa koji se odvijaju u samom tijelu odlagališta bilo procesa i pojava koje se nalaze u njegovom vanjskom okruženju. Bez obzira na to, brtvene barijere moraju zadovoljavati određene kriterije i obavljati predviđenu funkciju u odlagalištu. Kod brtvenih barijera, pa prema tome i GCL-a najvažnije je održavanje hidrauličke propusnosti u granicama koje su predviđene propisima i najboljom svjetskom praksom u projektiranju odlagališta. Kako zapravo mineralna komponenta GCL-a tj. bentonitna glina osigurava svojstvo brtvljenja, važno je da ona trajno zadrži svoja zahtjevana svojstva bilo da je riječ o bubrivosti i sposobnosti samozacjeljenja, o indeksnim pokazateljima ili hidrauličkoj propusnosti. Upravo stoga je svrha ovog istraživanja bila utvrditi dolazi li do promjene svojstava bentonitne gline, odnosno glinene geosintetičke barijere koja obavlja funkciju brtvljenja, nakon ugradnje u završni pokrovni sustav na odlagalištu otpada, te predočiti u kojoj su mjeri promjene uzrokovane procesima koji se događaju u tijelu odlagališta, te u njegovom neposrednom okolišu. Ciljevi istraživanja bili su identificirati ključne parametre koji utječu na promjenu indeksnih pokazatelja GCL-a, utvrditi optimalne uvjete izgradnje nadsloja kako bi se osigurala dugoročna učinkovitost GCL-a, uspostaviti funkcijske veze između indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a, te definirati kriterije i postupke za procjenu dugotrajne učinkovitosti GCL-a kao brtvene barijere.

Uzorci su za provedbu ovog istraživanja dobiveni s jednog realnog odlagališta u Republici Hrvatskoj. Radi boljeg ostvarivanja zadanih ciljeva provedeno je uzorkovanje GCL-a s dvadeset i tri lokacije (površina uzorkovanja na svakoj lokaciji iznosila je 2 m<sup>2</sup>). Osim toga, na sedamnaest lokacija preuzeti su i uzorci nadsloja. Uzorci GCL-a uzorkovani su iz istražnih raskopa na bočnim stranicama odlagališta s time da je s jugoistočne strane odlagališta uzorkovano trinaest uzoraka iz raskopa s oznakama S26, S7, S21, S31, S19, S11, S16, S1, S4, S2, S13, S3 i S32, dok je na sjeverozapadnoj strani odlagališta uzorkovano deset uzoraka

GCL-a iz raskopa s oznakama S6, S15, S20, S27, S5, S9, S14, S23, S29 i S30. Lokacije uzorkovanja odabrane su tako da je obuhvaćeno više faza u izgradnji odlagališta, a time su dobiveni uzorci koji su u odlagalištu bili ugrađeni tijekom vremenskog razdoblja od tri do devet godina. Uzorci bentonitne gline naknadno su u laboratoriju dobiveni iz uzoraka GCL-a odvajanjem gornjeg i donjeg geotekstila. Osim uzoraka dobivenih s realnog odlagališta, koristili su se i uzorci dobiveni od proizvođača GCL-a, koji predstavljaju tzv. neporemećene (referente) uzorke. Time je omogućeno utvrđivanje promjene svojstava tijekom vremena proteklog od izgradnje odlagališta, odnosno pojedine dionice završnog pokrova, do vremena kada je uzorkovanje na terenu provedeno. Također, navedene su preporučene vrijednosti indeksnih pokazatelja koje bi trebale s jedne strane pokazati da su geosintetičke glinene barijere proizvedene u skladu s normama koje propisuju kontrolu kvalitete proizvodnje. S druge strane, preporučene vrijednosti trebale bi jamčiti i da GCL ugrađen u odlagalište ima zadovoljavajuća inženjerska svojstva, prvenstveno hidrauličku propusnost.

Programom laboratorijskih ispitivanja obuhvaćena su ispitivanja mineralnog i kemijskog sastava, fizičkih svojstava i indeksnih pokazatelja bentonitne gline, te hidrauličke propusnosti GCL-a. Osim toga određena je debljina, vlažnost i granulometrijski sastav nadsloja kako bi se dobio uvid o njegovom eventualnom utjecaju na svojstva bentonitne gline i GCL-a.

Rezultati ispitivanja provedenih na uzorcima nadsloja pokazuju da se u pokrovu nalaze materijali varijabilnog granulometrijskog sastava. Također, uočava se trend smanjenja srednje vrijednosti vlažnosti uzoraka nadsloja u odnosu na vrijeme proteklo od ugradnje, iako se za pojedinačnu godinu može uočiti značajnija razlika u varijabilnosti mjerenja u odnosu na srednje vrijednosti.

Rezultati ispitivanja na referentnom uzorku bentonitne gline pokazuju kako uzorak zadovoljava vrijednosti koje se uobičajeno preporučuju za kvalitetne natrijske ili natrijem aktivirane bentonitne gline korištene za proizvodnju GCL-a. Dakle, u odlagalište je bio ugrađen GCL koji u svom sastavu ima natrijsku bentonitnu glinu. Kako je bentonitna glina u odlagalištu otpada provela određeno vremensko razdoblje, vrlo je vjerojatno da je uslijed procjeđivanja kišnice kroz slojeve nadsloja došlo do kationske zamjene iona natrija ionom kalcija, što je utjecalo na promjenu svojstava bentonitne gline iz odlagališta u odnosu na referentni uzorak. Takve pojave već su i ranije dokumentirane u referenciranoj literaturi gdje je navedeno kako do kationske zamjene može doći već unutar razdoblja od tri godine, pa se može zaključiti da je upravo do toga došlo i u promatranom odlagalištu.

Određivanjem Atterbergovih granica (granice tečenja i indeksa plastičnosti) bentonitne gline utvrđeno je da najmanji raspon vrijednosti imaju uzorci ugrađeni u odlagalište 2004. godine, dok najveći raspon podataka dobivenih laboratorijskim ispitivanjima koji su u odlagalište ugrađeni tijekom 2009. i 2010. godine. Najveće vrijednosti dobivene su ispitivanjem referentnog uzorka koji nije bio ugrađen u odlagalište.

Temeljem rezultata dobivenih ispitivanjem Atterbergovih granica, te prema dijagramu plastičnosti svakom od dvadeset i četiri ispitana uzorka dodijeljena je pripadajuća klasifikacijska oznaka. Uočeno je kako šesnaest uzoraka (uključujući i referentni) pripada glini ekstremno visoke plastičnosti (CE). Tim uzorcima pripadaju uzorci S1 i S2 ugrađeni 2004. godine, S26, S6, S5, S9, S31 i S32 ugrađeni 2009. godine te svi uzorci ugrađeni 2010. godine (S15, S14, S20, S23, S27, S29 i S30). Pet uzoraka (S4 ugrađen 2004., te S19, S11, S16 i S13 ugrađeni 2009. godine) klasificirani su dvostrukom oznakom kao glina odnosno prah ekstremno visoke plastičnosti (CE/ME). Tri uzorka S3 (ugrađen 2004.), te S7 i S21 (ugrađeni 2009. godine) klasificirani su kao prah ekstremno visoke plastičnosti (ME).

Temeljem proučene literature, volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline, koja je pogodna za ugradnju u GCL, a time i u odlagalište otpada, mora biti veći od 20 ml/2g ukoliko se radi o natrijskoj bentonitnoj glini ili veći od 8 ml/2g ukoliko je riječ o kalcijskoj bentonitnoj glini. Prema dobivenim vrijednostima potvrđeno je da svih dvadeset i četiri uzorka zadovoljavaju navedeno svojstvo. Pri tome jedino referentni uzorak zadovoljava preporučenu vrijednost za natrijske bentonitne gline jer je dobiven rezultat 27 ml/2g, dok svi ostali uzorci zadovoljavaju preporučenu vrijednost za kalcijsku bentonitnu glinu. Najveće odstupanje od referentnog uzorka imaju uzorci ugrađeni 2009. godine, a najmanje oni ugrađeni 2004. godine. Ukoliko prilikom interpretacije podataka uzmemo u obzir i svojstva nadsloja može se uočiti kako debljina nadsloja (uzorci s manjim nadslojem bubre manje) i vrijeme ugradnje u odlagalište imaju utjecaj na volumen slobodnog bubrenja.

I kod ispitivanja sposobnosti upijanja vode bentonitne gline preporučene su vrijednosti ovisno o tome radi li se o natrijskoj ili kalcijskoj bentonitnoj glini. Tako, preporučene vrijednosti za natrijsku bentonitnu glinu moraju biti veće od 450%, dok bi za kalcijsku ta vrijednost trebala biti veća od 150%. Prema navedenom svojstva natrijske bentonitne gline ima samo referentni uzorak (sposobnost upijanja vode je 453,33%). Međutim, kako smo ranije rekli da se radi o kalcijskoj bentonitnoj glini rezultati dobiveni ispitivanjima ostalih uzoraka pokazuju da su i ostali uzorci pogodni za ugradnju, jer je utvrđeno da je njihova sposobnost upijanja veća od 150%. Pri tome najveća odstupanja od referentne vrijednosti imaju uzorci ugrađeni tijekom

2009. godine, dok najmanje odstupanje imaju uzorci ugrađeni 2004. godine. Kao i kod određivanja volumena slobodnog bubrenja tako je i ovdje uočeno kako debljina nadsloja i vrijeme ugradnje u odlagalište imaju utjecaj na sposobnost upijanja bentonitne gline.

Preporučena vrijednost koja bi trebala biti postignuta ispitivanjem indeksa gubitka fluida treba iznositi manje od 18 ml. Zanimljivo je da čak ni referentni uzorak nije zadovoljavao preporučenu vrijednost jer je dobiven rezultat 20 ml. Jedino uzorak S2 koji je u odlagalište ugrađen 2004. godine s nadslojem debljine 0,86 m zadovoljava preporučenu vrijednost (izmjereno je 16 ml) neovisno radi li se o natrijskoj ili kalcijskoj bentonitnoj glini. Iz toga se može zaključiti kako i u ovom slučaju debljina nadsloja i vrijeme ugradnje u odlagalište imaju utjecaj na indeks gubitka fluida.

Kako se iz do sada navedenog može vidjeti nigdje nije spomenut utjecaj granulometrijskog sastava nadsloja na indeksna svojstva bentonitne gline. Razlog tome je nemogućnost dovođenja u vezu sastava nadsloja i indeksnih svojstava. Naime, neovisno o tome je li u nadsloju prevladava krupnozrnati ili sitnozrnati materijal, zbog velikog raspona u dobivenim rezultatima indeksnih svojstava dobiveni parametri ne mogu se dovesti u zavisnost, kao što je to moguće u slučaju debljine nadsloja i godine ugradnje u odlagalište.

Dakle, na svim uzorcima koji su bili ugrađeni u odlagalište došlo je do značajnog smanjenja granice tečenja i indeksa plastičnosti. Volumen slobodnog bubrenja, sposobnost upijanja vode i indeks gubitka fluida su pokazatelji koji ukazuju na sposobnost bubrenja gline i funkcionalnost kao brtvene barijere. Kod sva tri ispitivanja pokazuje se također značajna degradacija svojstava kod uzoraka bentonitne gline koja je bila ugrađena u odlagalište u odnosu na referentni uzorak s tim da su najmanje promjene uočene za uzorke bentonitne gline ugrađene tijekom 2004. godine, a najveće za one ugrađene tijekom 2009. godine. Također, uočeno je kako se odstupanja od srednje vrijednosti za određenu godinu ugradnje značajno razlikuju pri čemu su ta odstupanja najmanja za uzorke ugrađene 2010. godine.

Prilikom određivanja je li GCL pogodan za ugradnju u završni pokrovni sustav morao je zadovoljiti preporuku da mu hidraulička propusnost ne smije biti veća od  $10^{-7}$  m/s. Ispitivanja hidrauličke propusnosti provedena su metodom stalne razlike tlakova na deset uzoraka GCL-a (S1, S26, S7, S19, S5, S32, S20, S27, S30 i na referentnom uzorku) u uvjetima potpunog zasićenja pri efektivnim konsolidacijskim naprezanjima od 50, 100 i 200 kPa. Rezultati koji su dobiveni pokazuju kako se očekivano povećanjem efektivnih naprezanja hidraulička propusnost smanjuje.

Od deset uzoraka kod kojih je provedeno ispitivanje hidrauličke propusnosti, rezultatima je utvrđeno da svi još uvijek zadovoljavaju kriterije potrebne za završni pokrov iako je došlo do značajne promjene propusnosti u odnosu na onu za referentni uzorak, ponekad i za sto puta. Međutim, kod određenog broja uzoraka i malog vertikalnog opterećenja došlo je do „procurivanja“ uzorka. Uzrok tomu može biti pojava desikacijskih pukotina i promjena mineralnog sastava iz dominantno natrijskog u dominantno kalcijski montmorillonit. U oba slučaja glina djelomično gubi svoj kapacitet samozacjeljenja, koji je najizraženiji kod kvalitetnih natrijskih glina. Pojavnost desikacijskih pukotina veže se na podatke o vremenskom razdoblju koje je bentonitna glina izdvojena iz pojedinog GCL-a provela u odlagalištu otpada. Osim navedenog pukotine se mogu pojaviti i zbog raznolikosti zatečene debljine na lokacijama uzorkovanja, te različitim početnim svojstvima koja su potvrđena i klasifikacijom prema dijagramu plastičnosti (CE, ME ili CE/ME).

Nakon provedene analize podataka i komparacije indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličkih svojstava GCL-a može se zaključiti kako postoji određena uzajamna ovisnost. Prema Chadockovoj ljestvici ti parametri u prosjeku uspostavljaju veze srednje i slabe jakosti. Izuzetak je jedino slučaj indeksa plastičnosti kod kojeg odnos s hidrauličkom propusnošću kod efektivnog naprezanja od 50 kPa ostvaruje čvrstu vezu. Takve razlike u jakostima uzajamne ovisnosti mogu se opravdati malim brojem uzoraka i malim rasponom indeksnih pokazatelja na uzorcima na kojima je naknadno ispitana propusnost, te uočene varijabilnosti u tipu/vrsti ugrađene bentonitne gline, pa je ovakve zaključke potrebno dodatno istražiti. Ipak, uočeno je kako općenito vrijedi da se s povećanjem vrijednosti Atterbergovih granica, volumena slobodnog bubrenja, sposobnosti upijanja vode, te smanjenjem vrijednosti indeksa gubitka fluida bentonitne gline smanjuje hidraulička propusnost GCL-a.

Ključni parametri koji utječu na promjenu indeksnih pokazatelja bentonitne gline, a time i na promjenu svojstava GCL-a koji su određeno vremensko razdoblje proveli u odlagalištu otpada prema ovim istraživanjima su:

- izgradnja završnog pokrovnog sustava i pridržavanje preporuka predloženih projektnim rješenjima, jer je pokazano da ondje gdje se odstupilo od projektnog rješenja dolazi do značajnijih promjena svojstava GCL-a kao brtvene barijere,
- osim debljine nadsloja koja je preporučena gore navedenim, na indeksa svojstva može utjecati još i vlažnost nadsloja,
- vrijeme koje bentonitna glina, a time i GCL provede u odlagalištu otpada,

- fizički, kemijski i mineralni sastav ugrađene bentonitne gline, te
- uvjeti koji se javljaju u tijelu odlagališta i neposrednom okolišu.

Provedbom programa laboratorijskih ispitivanja i analizom dobivenih rezultata provjerene su sljedeće hipoteze:

- debljina i vlažnost nadsloja utječu na svojstva GCL-a, te može li se odrediti njihova granična vrijednost koja osigurava dugoročnu učinkovitost GCL-a.

Prema "Pravilniku o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima za odlagalište otpada" minimalna debljina nadsloja trebala bi iznositi jedan metar. U radu je prikazano kako uzorci GCL-a iznad kojih je bio sloj debljine od 0,50 m do 0,86 m u svom sastavu imaju bentonitnu glinu dobrih svojstava, čime je omogućeno dobro brtvljenje kroz dulje vremensko razdoblje.

- tijekom životnog vijeka odlagališta dolazi do promjena indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a.

Uzrok promjenama indeksnih svojstava je, kako se vidi iz dobivenih rezultata, promjena natrijske u kalcijsku bentonitnu glinu. Iako nije riječ o dugom vremenskom razdoblju koje je bentonitna glina provela u odlagalištu otpada, u pronađenoj literaturi (Egloffstein 2001) navodi kako do kationske zamjene može doći u vremenskom razdoblju od samo tri godine. Moguće je da su visoke koncentracije  $\text{Ca}^{2+}$  iona, koji su se nalazili u sastavu nadsloja, uslijed procjeđivanja kišnice došle u doticaj s natrijskom bentonitnom glinom. Time je došlo do kationske zamjene iona natrija kalcijevim ionom, što je imalo za posljedicu smanjenje brtvenih svojstava bentonitne gline.

- može se definirati funkcijska veza između promjene indeksnih pokazatelja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a.

Uzajamna ovisnost indeksnih svojstava i hidrauličke propusnosti grafički je prikazana dijagramima. Iz njih se može očitati kako je uzajamna ovisnost ostvarena vezama srednje i slabe jakosti (samo u jednom ispitanom slučaju veza je bila čvrsta). Kako su ispitivanja hidrauličke propusnosti napravljena na relativno malom broju uzoraka obzirom na sveobuhvatni broj uzorkovanih uzoraka, vjerojatno bi se bolja uzajamna ovisnost mogla dobiti proširivanjem programa ispitivanja.

- može se definirati kriterije i postupak ocjene učinkovitosti GCL-a na temelju jednostavnih i brzih laboratorijskih ispitivanja.

Temeljem rezultata dobivenih ispitivanjima fizičkih, kemijskih, mineraloških, te geomehaničkih svojstava bentonitne gline može se zaključiti da na bočnim stranicama odlagališta otpada nije ugrađivana istovrsna bentonitna glina odnosno istovrsni GCL. Kako se ne radi o istom uzorku ne mogu se definirati generalni zaključci o promjeni svojstava. Iz rezultata je ipak jasno vidljivo kako je učinkovitost GCL-a smanjena. U vremenskom razdoblju koje je bilo obuhvaćeno istraživanjem (do maksimalno 9 godina) od trenutka ugradnje u odlagalište, te premda je GCL bio izložen različitim vanjskim utjecajima, može se konstatirati da je učinkovitosti GCL- a kao brtvene barijere održana obzirom da još uvijek zadovoljava preporučene vrijednosti, iako je došlo do promjene svih svojstava bentonitne gline (mineralni sastav, indeksni pokazatelji i hidraulička propusnost).

Općenito se može reći da rezultati dobiveni ispitivanjima pokazuju kako je u odlagalište otpada bio ugrađen GCL koji u svom sastavu imao natrijsku bentonitnu glinu, ali da je vjerojatno uslijed procjeđivanja kišnice kroz slojeve nadsloja došlo do kationske zamjene iona natrija ionom kalcija, čime je bentonitna glina izgubila dio svojih svojstava. Ispitivanja indeksnih pokazatelja pokazuju degradaciju svih pokazatelja pri čemu je ta degradacija u većini slučajeva najizraženija za uzorke ugrađene tijekom 2009. godine, a najmanja za one ugrađene 2004. godine. Ukoliko se prilikom interpretacije podataka uzmu u obzir i svojstva nadsloja može se uočiti kako debljina nadsloja i vrijeme ugradnje u odlagalište imaju utjecaj na promjenu indeksnih pokazatelja. Rezultati ispitivanja hidrauličke propusnosti, pokazuju da većina uzoraka još uvijek zadovoljava kriterije potrebne za završni pokrov iako je došlo do značajne promjene propusnosti u odnosu na onu za referentni uzorak, ponekad i za sto puta. Međutim, kod određenog broja uzoraka i malog vertikalnog opterećenja došlo je do „procurivanja“ uzorka. Uzrok tomu vjerojatno je pojava desikacijskih pukotina i promjena mineralnog sastava iz dominantno natrijskog u dominantno kalcijski montmorillonit. Pri tome je glina izgubila svoj veliki kapacitet samozacjeljenja. Pojavnost desikacijskih pukotina veže se na podatke o vremenskom razdoblju koje je bentonitna glina izdvojena iz pojedinog GCL-a provela u odlagalištu otpada. Osim navedenog pukotine se mogu pojaviti i zbog raznolikosti zatečene debljine i sastava nadsloja na lokacijama uzorkovanja, te različitim početnim svojstvima koja su potvrđena i klasifikacijom prema dijagramu plastičnosti (CE, ME ili CE/ME). Nakon provedene analize podataka i usporedbe utjecaja indeksnih pokazatelja bentonitne gline na hidraulička svojstva GCL-a može se zaključiti kako postoji određena uzajamna ovisnost, u većini slučajeva te su veze prema Chadockovoj ljestvici veze srednje jakosti. Općenito vrijedi da se s povećanjem vrijednosti Atterbergovih granica, volumena



slobodnog bubrenja, sposobnosti upijanja vode, te smanjenjem vrijednosti indeksa gubitka fluida bentonitne gline smanjuje hidraulička propusnost GCL-a.

Na temelju rezultata ovog istraživanja može se zaključiti kako bi se cjelovitija analiza i bolja uzajamna ovisnost (korelacijske veze) mogle dobiti kada bi se isti program ispitivanja proveo na uzorcima koji bi bili u kontroliranim uvjetima ugrađeni na terenu izradom probnog polja. To bi podrazumijevalo ugrađivanje iste vrste GCL-a koji u svom sastavu ima bentonitnu glinu istih fizičkih, kemijskih, mineralnih i indeksnih svojstava, te vađenjem uzoraka iz probnog polja nakon proteka različitog razdoblja od trenutka ugradnje.

Ovo je istraživanje pokazalo da postoji međusobna veza između različitih indeksnih i hidrauličkih svojstava gline i okolišnih uvjeta, te kako je potrebno strogo pridržavanje svih zakonski donesenih propisa i normi. Na temelju rezultata ranijih istraživanja i njihovim uvažavanjem poboljšala bi se i unaprijedila izgradnja zaštitnih sustava, a time osigurala i dugoročna funkcionalnost odlagališta otpada u cijelosti.

**LITERATURA**

- 1) Barral, C., Touze-Foltz, N., Loheas, E. & Croissant, D. (2012): Comparative study of hydraulic behavior of Geosynthetic Clay Liners exhumed from a landfill cover and from a dam after several years in service; Eurogeo 5, Sep 2012, Valence, Spain. 7p., 2012.
- 2) Benson, C. & Meer, S. (2009): Relative Abundance of Monovalent and Divalent Cations and the Impact of Desiccation on Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 135 (3), 349–358.
- 3) Benson, C. H. & Scalia, J. (2010): Hydraulic conductivity of exhumed geosynthetic clay liners from composite barriers, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, 15-19 September 2010 Würzburg, Germany, Zanzinger, H., Koerner, R. M., Touze-Foltz, N. (Eds), 73-82.
- 4) Benson, C. H. (2013): Impact of subgrade water content on cation exchange and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners in composite barriers, *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, London, Manassero, M., Dominijanni, A., Foti, S. & Musso, G. (Eds), Taylor&Francis Group, 79-84.
- 5) Bergaya, F. & Lagaly, G. (2006): General introduction: Clay Mineral Particles and Aggregates, *Handbook of Clay Science*, Bergaya, F., Theng, B.K.G. & Lagaly G. (Eds), *Developments in Clay Science*, Vol. 1, 1-18.).
- 6) Bouazza, A. (2002): Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 3-17.
- 7) Bouazza, A., Zornberg, J. G. & Adam, A. (2002): Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances, *Geosynthetics 7th ICG*, 2002, Nice, France, Delmas, Gourc & Girard (Eds), Vol. 2, 455-507.
- 8) Bradshaw, S. L., Benson, C. H., Scalia, J. (2013): Hydratation and Cation Exchange during Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (4), 526-538.
- 9) Buell, P. & Girard, J. (1994): *Chemistry An Environmental Perspective*, Prentice-Hall inc. New Jersey.
- 10) Carson, D. A. (1995): US EPA experiences with geosynthetic clay liners, *Geosynthetic Clay Liners, Proceedings of an International Symposium Nürnberg /*

- Germany / 14-15 April 1994, Koerner, R. M., Gartung, E. & Zanzinger, H. (Eds), A. A. Balkema, Rotterdam, 17-27.
- 11) Christidis, G. E. & Huff, W. D. (2009): Geological Aspects and Genesis of Bentonites. Elements, Vol. 5, 93-98.
  - 12) DGGT: Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen, EAG-GTD, Ernst & Sohn, 2002.
  - 13) ECOINA d.o.o. (2014): Tehničko – tehnološko rješenje postojećeg postrojenja odlagališta otpada Prudinec/Jakuševac (2014.). Zagrebački Holding d.o.o. – Podružnica ZGOS. Ecoina d.o.o.
  - 14) Egloffstein, T. (2001): Natural bentonites - influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GBR-Cs, Geotextiles and Geomembranes, 19, 7 (2001), 427-444.
  - 15) Environmental Protection Agency (2000): Landfill manuals, Landfill site design, Ireland, Carty, P., Carty G., Donlon, B., Howley, D. & Nealon, T. (Eds).
  - 16) Galán, E. (2006): Genesis of clay minerals, Handbook of Clay Science, Bergaya, F. Theng, B.K.G. & Lagaly G. (Eds), Developments in Clay Science, Vol. 1, 1129-1162).
  - 17) Grim, R. E. (1953): Clay mineralogy. McGraw-Hill Book Company, Inc. USA.
  - 18) Grim, R. E. & Guven, N. (1978): Bentonites – Geology, Mineralogy, Properties and Uses. Elsevier.
  - 19) Holtz, R. D. & Kovacs, W. D. (1981): An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice – Hall, New York.
  - 20) Jo, Y. H., Katsumi, T., Benson, H. C. & Edil, B. T. (2001): Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GBR-Cs Permeated with Single-Species Salt Solutions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127 (7), 557-567.
  - 21) Keller, W. D. (1982): Applications of scanning electron microscopy to clays and other fine-grained minerals, Proceedings Process Mineralogy II, Hagni, R. D. (Eds), Metallurgical Society, AIME, 245-261.
  - 22) Knappett, J. A. & Craig, R. F. (2012): Craig's Soil Mechanics, 8th Edition, Spon Press, London.
  - 23) Koch, D. (2002): Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls, Applied Clay Science 21, 1–11)

- 24) Koerner, R. M. and Daniel, D. E. (1997): Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, ASCE Press, London, UK.
- 25) Köditz, J., Witt, K. J. & von Maubeuge, K.P. (2004): Laboratory test on the effect of static load to the desiccation of GBR-C, Proceed. 3rd European Geosynthetics Conference, Munich, Vol 2, 711-716.
- 26) Kovačević Zelić, B., Kovačić, D., Vrkljan, I. (2004): Bentonitni tepisi u odlagalištima otpada. Razprave četrteg posvetovanja slovenskih geotehnikov, Logar, J., Gaberc, A. (Eds), Ljubljana, SloGeD , 2004. 227-236.
- 27) Kovačević Zelić, B.; Kovačić, D.; Matešić, L. & Veličković, B. (2006a): Quality Acceptance Testing of GBR-Cs for Landfill Application. Proceedings of the ISSMGE 5th International Congress on Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics. H.R. Thomas (Eds), London, 2006, 525-532.
- 28) Kovačević Zelić, B., Domitrović, D., Kovačić, D., Matešić, L. & Veličković, B. (2006b): Behavior of GBR-C mineral component treated with site-specific liquid. Proceedings of the XIIIth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 29-31 May, 2006, Ljubljana, Slovenija, Logar, J., Gabrec, A. & Majes, B. (Eds), 281-286.
- 29) Kovačević Zelić, B. & Vrkljan, I. (2008): Laboratory Testing of GBR-Cs, Proceedings of the 1st Middle European Conference on landfill Technology, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Witt, K., Ramke, H., Telekes, G., Imre, E. (Eds), 31-41.
- 30) Lee, J. M., Shackelford, D. C., Benson C. H., Jo, Y. H. & Edil, B. T. (2005a): Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131 (11), 1319-1329.
- 31) Lee, J.M. & Shackelford, D. C. (2005b): Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131 (1), 64-77.
- 32) Lin, L. C. & Benson, C. H. (2000): Effect of Wet-Dry Cycling on swelling and hydraulic conductivity of GBR-Cs, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126 (1), 40-49.
- 33) Lory, J., <http://soilnews.feedsynews.com/clay-mineralogy/>, preuzeto 7. veljače 2016.

- 34) Marshall, R. W. (2002): The use of clay geosynthetic barriers within the UK regulatory framework, Clay Geosynthetic Barriers, Zanzinger, Koerner, Gartung (Eds). 2002 Swets & Zeitlinger, Lisse, 387-397.
- 35) Milanović, Z. (1992): Deponij – trajno odlaganje otpada. Zbrinjavanje gradskog otpada, Zagreb.
- 36) Mulabdić, M. & Bošnjaković, M. (2011): Pojmovnik geosintetika, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet.
- 37) Müller-Kirchenbauer, A., Blümel, W. & von Maubeuge, K. P. (2008): Long-term Efficiency of GBR-Cs with regard to Natural Drying and Wetting Cycles, Proceedings EuroGeo4, Edinburgh, 8 p., 1-8.
- 38) Murray, H. H. (2007): Applied clay mineralogy, Elsevier.
- 39) Narodne novine NN (114/15): Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima za odlagalište otpada.
- 40) Olsa, J. T., Chung, J. H. & Daniel, D. E. (2004): Various Aspects of Sodium Bentonite Testing, Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology 2nd Symposium, ASTM International, Eds. Mackey, R. E. & von Maubeuge, K. (Eds), 3-10.
- 41) Petrov, R. J. & Rowe, R. K. (1997): Geosynthetic clay liner (GBR-C) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (6), 863-885.
- 42) Pusch, R. (2002): The Buffer and Backfill Handbook, Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods. Technical Report, TR-02-20, 39.)
- 43) Rowe, R. K. (2011): Systems engineering: The design and operation of municipal solid waste Landfills to minimize contamination of groundwater. Geosynthetic International, 2011, 18, No. 6, 391 – 404.
- 44) Rowe, R. K. (2013): Recent advances in understanding and improving the performance of lining and capping systems for landfill and mining applications, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, London, Manassero, M., Dominijanni, A., Foti, S. & Musso, G. (Eds), Taylor&Francis Group, 3-20.
- 45) Scalia, J. & Benson, C. (2011): Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers with Composite Barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(1), 1–13.

- 46) Shackelford, D. C., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, B.T . & Lin, L. (2000): Evaluating the hydraulic conductivity of GBR-Cs permeated with non standards liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 133-161.
- 47) Slovenec, D. & Bermanec, V. (2003): *Sistematska mineralogija – mineralogija silikata*. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu.
- 48) Slovenec, D. (2011): *Opća mineralogija*. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu.
- 49) Spark, D. L. (2003): *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, Eslevier Science.
- 50) Stark, T. D. & Newman, E. J. (2010): Design of a landfill final cover system. *Geosynthetics International*, 2010, 17, No. 3, 124-131.
- 51) Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2010. Stranice 47-48. [http://www.dzs.hr/Hrv\\_Eng/ljetopis/2010/SLJH2010.pdf](http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/ljetopis/2010/SLJH2010.pdf), preuzeto: lipanj, 2016.
- 52) Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2011., Stranice 47-48. [http://www.dzs.hr/Hrv\\_Eng/ljetopis/2011/SLJH2011.pdf](http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/ljetopis/2011/SLJH2011.pdf), preuzeto: lipanj, 2016.
- 53) Sunil, B. M. (2015): Review on performance of geosynthetic liners in municipal solid waste landfills. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2 (69), 2368-2372.
- 54) Touze-Foltz, N., Croissant, D., Rosin-Paumier, S., Pirrion, T., Ouvry, J.-F. (2010): Performance of a GCL in a landfill cover after six years in service, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, 15-19 September 2010 Würzburg, Germany, Zanzinger, H., Koerner, R. M. & Touze-Foltz, N. (Eds), 83-91.
- 55) Touze-Foltz, N. (2012): Geosynthetic clay liners: performance and long-term durability. <https://geosynt.files.wordpress.com/2012/04/nathalie-touze-foltz-gcl.pdf> preuzeto (srpanj, 2016.)
- 56) van Impe, W. F. (1998): Environmental geotechnics – ITC5 – reports and future goals. *Geotechnical Hazards*, Marić, Lisac & Szavitz-Nossan (Eds), Rotterdam, 127-156.
- 57) von Maubeuge, K. P. (2002): Investigation of bentonite required for geosynthetic clay barriers, *Clay Geosynthetic Barriers*, Proceed. Int. Symp., Nuremberg, Germany, 16-17 April 2002, Zanzinger, Koerner, & Gartung (Eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, 155-163.

- 58) Znidarčić, D., Kovačić, D., Kvasnička, P., Mulabdić, M. (1995): Geotehnologija pri odlaganju komunalnog otpada. Građevni godišnjak '96, Simović, V. (Eds), Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 161-233.
- 59) [http://www.civilmastergroup.com/ge\\_GBR-C.html](http://www.civilmastergroup.com/ge_GBR-C.html), preuzeto (21.3.2016.)
- 60) ASTM D854-14 Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Picnometer
- 61) ASTM D2216 Standard Test Method for Laboratory determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock
- 62) ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- 63) ASTM D5084 Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter
- 64) ASTM D5890 Standard Test Method for Swell Indeks of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners.
- 65) ASTM D5891 Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Component of Geosynthetic Clay Liners
- 66) BS 1377: dio 2 (British Standard Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 2. Classification tests).
- 67) BS 5930:1999 Code of practice for site investigations.
- 68) DIN 18132:95 Bestimmung des Wassernahmevermögens
- 69) EN ISO 10318: Geosynthetics: Terms and definitions.
- 70) ISO 11265:1994 Soil quality Determination of the specific electrical conductivity.
- 71) ISO 14688-2 (2000) Geotechnical engineering – Identification and classification of soils, Part 2: Classification principles and quantification of descriptive characteristics (draft prEN ISO/DIS 14688-2:2001), International Standardisation Organisation.
- 72) ÖNORM L1083 (1989) Bestimmung der Acidität.

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1</b> Osnovni elementi odlagališta otpada (modificirano prema Znidarčić et al. 1995) ....	6
<b>Slika 2-2</b> Minimalni zahtjevi za temeljni zaštitni sustav: (a) u SAD-u, (b) u Njemačkoj (modificirano prema van Impe 1998).....	6
<b>Slika 2-3</b> Minimalni zahtjevi za završni pokrovni sustav: (a) u SAD-u, (b) u Njemačkoj (modificirano prema van Impe 1998).....	7
<b>Slika 2-4</b> Izvedba zaštitnih sustava na odlagalištu neopasnog otpada.....	9
<b>Slika 3-1</b> Različite izvedbe glinenih geosintetičkih barijera (prema Koerner & Daniel 1997)	10
<b>Slika 3-2</b> Način vezivanja bentonitne gline i geotekstila iglanjem (protkivanjem) <a href="http://www.civilmastergroup.com/ge_GBR-C.html">http://www.civilmastergroup.com/ge_GBR-C.html</a> , preuzeto (21.3.2016.).....	11
<b>Slika 4-1</b> Strukturni prikaz minerala gline (modificirano prema Bergaya & Lagaly 2006)....	15
<b>Slika 4-2</b> Struktura minerala glina (modificirano prema Lory, <a href="http://soilnews.feedsynews.com/clay-mineralogy/">http://soilnews.feedsynews.com/clay-mineralogy/</a> , preuzeto 7. veljače 2016.).....	16
<b>Slika 4-3</b> Aktivacija kalcijskog bentonita (Koch 2002).....	18
<b>Slika 5-1</b> Volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline zasićene otopinama različitih koncentracija (modificirano prema Shackelford et al. 2000).....	21
<b>Slika 5-2</b> Odnos granice tečenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a (modificirano prema Lee et al. 2005a).....	23
<b>Slika 5-3</b> Odnos volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a (modificirano prema Lee et al. 2005a).....	24
<b>Slika 6-1</b> Lokacija uzorkovanja s označenim mjestima uzimanja uzoraka, te vremenom ugradnje u odlagalište otpada .....	29
<b>Slika 7-1</b> Dijagram plastičnosti (modificirano prema Knappett & Craig 2012).....	41
<b>Slika 7-2</b> Menzure s uzorkom prilikom određivanja volumena slobodnog bubrenja.....	42
<b>Slika 7-3</b> Uređaj za određivanje sposobnosti upijanja vode .....	43
<b>Slika 7-4</b> Uzorak tla u obliku stošca u uređaju za određivanje sposobnosti upijanja vode .....	43
<b>Slika 7-5</b> Uređaj za određivanje indeksa gubitka fluida .....	44



<b>Slika 7-6</b> Ispitivanje koeficijenta propusnosti u troosnom uređaju .....	45
<b>Slika 8-1</b> Završni pokrovni sustav na bočnim stranicama predmetnog odlagališta otpada u središnjoj Hrvatskoj.....	48
<b>Slika 8-2</b> Granulometrijski dijagram uzoraka nadsloja .....	49
<b>Slika 8-3</b> Granulometrijski sastav prikupljenih uzoraka nadsloja .....	49
<b>Slika 8-4</b> Vlažnost nadsloja s obzirom na godinu ugradnje.....	50
<b>Slika 8-5</b> Prosječna vlažnost nadsloja.....	50
<b>Slika 8-6</b> Usporedni prikaz granulometrijskog sastava i vlažnosti nadsloja .....	51
<b>Slika 8-7</b> Gustoća nadsloja s obzirom na godinu ugradnje.....	52
<b>Slika 8-8</b> Nadsloj iznad istražnog raskopa S7 .....	52
<b>Slika 8-9</b> Nadsloj iznad istražnog raskopa S2 .....	53
<b>Slika 8-10</b> Otpad u nadsloju.....	53
<b>Slika 9-1</b> Uzorci bentonitne gline izvađeni iz GCL-a i uzorak referentne serije bentonitne gline .....	59
<b>Slika 9-2</b> Nadsloj iznad istražnog raskopa S16 .....	62
<b>Slika 9-3</b> Nadsloj iznad istražnog raskopa S20 .....	63
<b>Slika 9-4</b> Odnos vremena ugradnje i kapaciteta kationske zamjene.....	68
<b>Slika 9-5</b> Udjeli pojedinih minerala u uzorcima bentonitne gline .....	70
<b>Slika 9-6</b> Odnos vremena ugradnje uzorka i udjela minerala montmorillonita u uzorku.....	71
<b>Slika 10-1</b> Dijagram plastičnosti ispitivanih uzoraka prema nacrtu norme ISO 14688-2 (2000) .....	74
<b>Slika 10-2</b> Dijagram plastičnosti referentnog uzorka .....	75
<b>Slika 10-3</b> Dijagram plastičnosti uzorka s terena (bez referentnog uzorka) .....	75
<b>Slika 10-4</b> Usporedni prikaz indeksa plastičnosti dobivenog pomoću Casagrandeovog uređaja i stožastog penetrometra.....	77
<b>Slika 10-5</b> Rezultati dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja .....	79
<b>Slika 10-6</b> Rasponi vrijednosti dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja .....	80

<b>Slika 10-7</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u travnju 2004. godine prema referentnom uzorku.....	83
<b>Slika 10-8</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u lipnju 2009. godine prema referentnom uzorku.....	84
<b>Slika 10-9</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u kolovozu 2009. godine prema referentnom uzorku.....	85
<b>Slika 10-10</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u srpnju 2010. godine prema referentnom uzorku.....	86
<b>Slika 10-11</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u kolovozu 2010. godine prema referentnom uzorku.....	87
<b>Slika 10-12</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u rujnu 2010. godine prema referentnom uzorku.....	88
<b>Slika 10-13</b> Odnos vrijednosti dobivenih ispitivanjem sposobnosti upijanja vode uzoraka bentonitne gline ugrađene u odlagalište otpada u rujnu 2010. godine prema referentnom uzorku.....	89
<b>Slika 10-14</b> Rasponi vrijednosti dobiveni ispitivanjem sposobnosti upijanja vode .....	90
<b>Slika 10-15</b> Rezultati dobiveni ispitivanjem indeksa gubitka fluida.....	93
<b>Slika 10-16</b> Raspon vrijednosti dobivenih ispitivanjem indeksa gubitka fluida.....	94
<b>Slika 11-1</b> Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem hidrauličke propusnosti GCL-a .....	96
<b>Slika 12-1</b> Utjecaj granice tečenja na hidrauličku propusnost.....	100
<b>Slika 12-2</b> Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o granici tečenja i efektivnim konsolidacijskim naprezanjima. ....	101
<b>Slika 12-3</b> Utjecaj indeksa plastičnosti na hidrauličku propusnost .....	103

<b>Slika 12-4</b> Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o indeksu plastičnosti i efektivnim konsolidacijskim napreznjima .....	104
<b>Slika 12-5</b> Utjecaj volumena slobodnog bubrenja na hidrauličku propusnost .....	106
<b>Slika 12-6</b> Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o volumenu slobodnog bubrenja i efektivnim konsolidacijskim napreznjima.....	107
<b>Slika 12-7</b> Utjecaj sposobnosti upijanja vode na hidrauličku propusnost .....	109
<b>Slika 12-8</b> Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o sposobnosti upijanja vode i efektivnim konsolidacijskim napreznjima .....	110
<b>Slika 12-9</b> Utjecaj indeksa gubitka fluida na hidrauličku propusnost .....	112
<b>Slika 12-10</b> Prikaz zavisnosti hidrauličke propusnosti o indeksu gubitka fluida i efektivnim konsolidacijskim napreznjima .....	113

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1</b> Zahtjevi za površinsko brtvljenje u Republici Hrvatskoj (NN 114/15).....	7
<b>Tablica 2-2</b> Prednosti i nedostaci GCL-a (Bouazza 2002).....	8
<b>Tablica 4-1</b> Kristalne strukture i kristalna svojstva minerala glina (Pusch 2002).....	17
<b>Tablica 6-1</b> Preporučene vrijednosti za pojedina ispitivanja (DGGT 2002, von Maubeuge 2002).....	31
<b>Tablica 6-2</b> Preporučene vrijednosti prema Egoffsteinu (2001) .....	32
<b>Tablica 6-3</b> Tablični prikaz provedenih ispitivanja na uzorcima betonitne gline i GCL-a.....	34
<b>Tablica 7-1</b> Kriteriji identifikacije minerala glina prema veličini međumrežnog razmaka refleksa 001 (u Å).....	38
<b>Tablica 8-1</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja za uzorke nadsloja.....	47
<b>Tablica 8-2</b> Vrijednosti dobivene ispitivanjem referentnog uzorka .....	54
<b>Tablica 9-1</b> Zbirni pregled rezultata dobivenih ispitivanjima bentonitne gline i GCL-a.....	56
<b>Tablica 9-2</b> Boje uzoraka određene prema Munsellu.....	58
<b>Tablica 9-3</b> Vrijednosti dobivene ispitivanjem vlažnosti uzoraka i gustoće čvrstih čestica...	61
<b>Tablica 9-4</b> Vrijednosti dobivene mjerenjem pH i električne provodljivosti.....	64
<b>Tablica 9-5</b> Maseni udjeli pojedinih minerala u uzorcima.....	66
<b>Tablica 9-6</b> Kapacitet kationske zamjene analiziranih uzoraka .....	67
<b>Tablica 9-7</b> Semikvantitativni mineralni sastav odabranih uzoraka.....	69
<b>Tablica 10-1</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja – Atterbergove granice .....	73
<b>Tablica 10-2</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja volumena slobodnog bubrenja.....	78
<b>Tablica 10-3</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja sposobnosti upijanja vode.....	82
<b>Tablica 10-4</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja indeksa gubitka fluida.....	92
<b>Tablica 11-1</b> Rezultati laboratorijskih ispitivanja hidrauličke propusnosti GCL-a .....	95
<b>Tablica 12-1</b> Chadock-ova ljestvica jakosti veze .....	98
<b>Tablica 12-2</b> Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem granice tečenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a .....	99

<b>Tablica 12-3</b> Rezultati ispitivanja indeksa plastičnosti bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a .....	102
<b>Tablica 12-4</b> Rezultati dobiveni ispitivanjem volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a .....	105
<b>Tablica 12-5</b> Rezultati dobiveni ispitivanjem sposobnosti upijanja vode bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a .....	108
<b>Tablica 12-6</b> Rezultati ispitivanja indeksa gubitka fluida bentonitne gline i hidrauličke propusnosti GCL-a .....	111
<b>Tablica 12-7</b> Uzajamna ovisnost indeksih svojstava i hidrauličke propusnosti prema Chadock-ovoj ljestvici jakosti veze.....	114

## KAZALO OZNAKA

$\text{\AA}$  - angstrom (1  $\text{\AA}$  = 0,1  $\mu\text{m}$ )

$w_L$  – granica tečenja (%)

$w_p$  – granica plastičnosti (%)

$I_p$  – indeks plastičnosti (%)

$m_w$  – količina upijene vode u vremenu  $t$  (g)

$V_w$  – volumen upijene vode u vremenu  $t$  ( $\text{cm}^3$ )

$V_K$  – volumen ishlapljele vode u vremenu  $t$  ( $\text{cm}^3$ )

$\rho_w$  – gustoća vode ( $\rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$ )

$w_A$  – sadržaj upijene vode (%)

$m_d$  – količina uzorka suhog tla koja je stavljena na poroznu pločicu (g)

$w$  – vlažnost uzorka (%)

$N$  – broj udaraca

## **KAZALO KRATICA**

GCL – glinena geosintetička barijera (eng. *Geosynthetic Clay Liner*)

GBR-C – glinena geosintetička barijera (eng. *Clay Geosynthetic Barrier*)

CCL – zbijena glina (eng. *Compact Clay Liner*)

BES – bentonitom poboljšano tlo (eng. *Bentonite Enhanced Soil*)

CEC – kapacitet kationske zamjene (eng. *Cation Exchange Capacity*)

EPA – Agencija za zaštitu okoliša (eng. *Environmental Protection Agency*)

USCS – Jedinstven klasifikacijski sustav (eng. *Unified Soil Classification System*)

LOI – gubitak žarenjem (eng. *Loss on ignition*)

ICP-MS – masena spektrometrija s induktivno spregnutom plazmom (eng. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*)

XRF – rendgenska fluorescencijska spektroskopija (eng. *X-ray Fluorescence*)

## ŽIVOTOPIS

Danijela Kosić rođena je 15. kolovoza 1980. u Sisku gdje je završila osnovnu školu.

Srednju Kemijsku i geološku tehničku školu, današnju Prirodoslovnu gimnaziju Vladimira Preloga pohađala je od 1994. do 1998. godine pri čemu je stekla zvanje geološkog tehničara.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisuje 1998. godine na kojem 2004. godine stječe zvanje diplomiranog inženjera rudarstva obranivši diplomski rad pod nazivom "Pojednostavljeni rudarski projekt na modelu probnog polja šljunčare „Abesinija“."

Od 2. studenog 2004. zaposlena je u Hrvatskim vodama na radnom mjestu samostalnog inženjera.

2006. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij rudarstva na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Tijekom poslijediplomskog studija pomagala je pri izvođenju laboratorijskih vježbi iz predmeta Mehanika tla.

Do sada je objavila slijedeće radove:

1. Kovačević Zelić, Biljana; Strgar, Helena; Kosić, Danijela; Domitrović, Dubravko. **Ispitivanja bentonitnih glina za potrebe proizvodnje geosintetičkih glinenih barijera** // *Hrvatsko geotehničko društvo, 5. savjetovanje, Izvori rizika u geotehničkim zahvatima, Osijek, 20. - 21. svibnja 2009. / Mulabdić, Mensur (ur.). Osijek : Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2009. (objavljeni rad, znanstveni).*
2. Kosić, Danijela; Kovačević Zelić; Biljana; Domitrović, Dubravko; Barać, Davor. **Long-term efficiency of clay geosynthetic barriers** // *XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - ECSMGE 2015. 1-7 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).*
3. Kosić, Danijela; Kovačević Zelić, Biljana; Mileusnić, Marta; Hruškova Hasan, Michaela; Oršulić, Evelina. **Preliminary testing of the long-term efficiency of geosynthetic clay liners** // *8th Mid-European Clay Conference - Book of Abstracts / Madejova, Jana (ur.). Košice : Slovak Clay Group, 2016. 198-198 (poster, međunarodna recenzija, sažetak).*



