

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 19	str. 99 - 110	Zagreb, 2007.
----------------------------------	---------	---------------	---------------

UDK 552.52:624.13.37
UDC 552.52:624.13.37

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

Jezik/Language: *Hrvatski/Croatian*

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA BENTONITNIH GLINA ZA POTREBE PROJEKTIRANJA I IZGRADNJE ODLAGALIŠTA

LABORATORY TESTING OF BENTONITE CLAYS FOR LANDFILL DESIGN AND CONSTRUCTION

BILJANA KOVAČEVIĆ ZELIĆ, DUBRAVKO DOMITROVIĆ, ŽELIMIR VEINOVIĆ

*Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska
biljana.kovacevic-zelic@rgn.hr, dubravko.domitrovic@rgn.hr, zelimir.veinovic@rgn.hr*

Ključne riječi: brtveni sustavi, bentonitna glina, indeks slobodnog bubrenja, indeks gubitka fluida, kapacitet upijanja vode, posmična čvrstoća, koeficijent propusnosti, kemijska kompatibilnost

Key words: landfill, clay liners, bentonite, free swell index, fluid loss, water absorption capacity, shear strength, permeability, chemical compatibility

Sažetak

Temeljni i pokrovni brtveni sustavi sastavni su elementi svakog odlagališta. Najčešće se izvode kao klasični sustavi od zbijene gline točno određenih svojstava (CCL – compacted clay liner) ili korištenjem nekog od alternativnih rješenja kao što su: bentonitni tepisi (GCL – geosynthetic clay liner), bentonitom poboljšana tla (BES – bentonite enhanced soils), te mješavine glina s polimerima. Prateći svjetske trendove, i u Hrvatskoj se već više godina primjenjuju bentonitni tepisi u odlagalištima otpada. Ovisno o mjestu ugradnje i namjeni, bentonitni tepisi moraju zadovoljiti različite kriterije. Sukladnost s propisanim kriterijima potvrđuje se različitim laboratorijskim postupcima. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće i kemijske kompatibilnosti bentonitnih tepiha, te probna ispitivanja hidrauličke propusnosti na uzorcima kaolinske gline.

Abstract

Top and bottom liners are one of the key construction elements in every landfill. They are usually made as compacted clay liners (CCLs) composed of several layers of compacted clay with strictly defined properties or by the use of alternative materials such as: GCL – geosynthetic clay liner, BES – bentonite enhanced soils or bentonite/polymer mixtures. Following the state of the art experiences in the world, GCLs are used in Croatian landfills for several years, as well. Depending upon the location and the obeying function, GCLs have to fulfill certain conditions. A legislated compatibility criterion has to be proven by various laboratory tests. In the paper are presented the results of direct shear and chemical compatibility tests of GCLs as well as the results of permeability measurement of kaolin clay.

Uvod

U Strategiji gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130, 2005.), stoji da je u RH tek oko 10% postojećih odlagališta sagrađeno u skladu s propisima, dok to ostala nisu pa predstavljaju potencijalnu opasnost za okoliš. Strategija također predviđa da se udio saniranih odlagališta treba s 5%, koliko ih je bilo 2000. godine, povećati na 65% do 2010. godine. To drugim riječima znači da će se izgradnja novih sanitarnih odlagališta i sanacija nekih postojećih intenzivirati u narednim godinama. Najvažniji elementi svakog sanitarnog odlagališta su temeljni i pokrovni brtveni sustav, sustav za prikupljanje i odvođenje procjedne vode, te sustav za odplinjavanje. Svaki od ovih elemenata može se izgraditi upotrebom prirodnih i umjetnih materijala, ili njihovom kombinacijom. U nastavku ovog članka detaljnije će biti govora o nekim materijalima koji se koriste za izgradnju brtvenih sustava

(gline, bentonitni tepisi), te o laboratorijskim pokusima koji se koriste za određivanje svojstava bitnih kako za izgradnju, tako i za kasniju upotrebu i opažanja na odlagalištima otpada.

Temeljni i pokrovni brtveni sustavi sastavni su elementi svakog odlagališta, a s obzirom na zaštitu podzemnih voda svakako i najvažniji. Brtveni sustavi na odlagalištima mogu biti izvedeni kao klasični sustavi načinjeni od zbijene gline točno određenih svojstava (kratica CCL – compacted clay liner) ili korištenjem nekog od alternativnih rješenja. Među alternativnim rješenjima nalaze se bentonitni tepisi (kratica GCL – geosynthetic clay liner), bentonitom poboljšana tla (kratica BES – bentonite enhanced soils) te konačno inovativne barijere poput mješavina glina s polimerima. U Hrvatskoj se već više godina od alternativnih rješenja najčešće koriste bentonitni tepisi, za koje će u nastavku biti opisani postupci ispitivanja.

Bentonitni tepisi predstavljaju relativno novi proizvod, razvijen osamdesetih godina prošlog stoljeća. Po američkoj normi (ASTM D 4439–97a) bentonitni tepih je tvornički proizvedena hidraulička barijera koja se sastoji od gline učvršćene na jedan ili dva sloja sintetičkog materijala. Ovisno o mjestu ugradnje i namjeni, bentonitni tepisi moraju zadovoljiti različite kriterije. Tako su za tepihe ugrađene u temeljni brtveni sustav važni kriteriji: hidraulička propusnost, kemijska kompatibilnost, kapacitet sorpcije i otpornost na dugotrajna djelovanja (npr. termičko djelovanje). Za završni pokrov odgovarajući kriteriji su: kontaktna i unutrašnja posmična čvrstoća, utjecaj isušivanja, otpornost na cikluse smrzavanje-odmrzavanje (Bouazza et al., 2002). Bentonitni tepisi imaju brojne prednosti u odnosu na klasični brtveni sustav od zbijene gline. Lako se i brzo instaliraju, imaju nisku hidrauličku propusnost (2×10^{-10} do 2×10^{-12} m/s), posjeduju sposobnost samozacjeljivanja. Ovim prednostima možemo dodati i povoljnu cijenu osobito u onim područjima gdje nedostaju ležišta glina pogodnih za ugradnju u brtvene sustave odlagališta. U Hrvatskoj je to priobalno područje gdje bentonitni tepisi sigurno predstavljaju prihvatljivo rješenje za brtvene slojeve bilo kao samostalni element ili u kombinaciji s drugim prirodnim i/ili umjetnim materijalima.

Najvažnija svojstva mineralnih brtvenih barijera pri projektiranju i izgradnji odlagališta su hidraulička propusnost i posmična čvrstoća. Procjene rizika na okoliš koje uzrokuju odlagališta moraju se načiniti za duži vremenski period. Prema Pravilniku o uvjetima za postupanje s otpadom u Hrvatskoj (NN 123, 1997) odlagalište je potrebno pratiti najmanje 20 godina nakon zatvaranja. Stoga je osim početne hidrauličke propusnosti potrebno predvidjeti kako će se mineralna brtvena barijera ponašati u svom okruženju. Naime, kod glina izloženih djelovanju procjedne vode može se javiti značajno povećanje propusnosti (Petrov and Rowe, 1997.). Kako bi se odredio utjecaj procjedne vode često se stoga vrše ispitivanja kompatibilnosti, gdje se ispituje djelovanje procjedne vode na određena svojstva mineralnih barijera.

Ispitivanja koeficijenta propusnosti mogu se obaviti na više načina: metodama stalnog ili promjenjivog potencijala te metodom zadanog protoka (Veinović et al., 2003). Sve ove ispitne metode su relativno skupe, pa se kao prvi korak u dokazivanju kompatibilnosti gline s procjednom vodom koriste ispitivanja indeksnih pokazatelja. Prethodne studije pokazuju da su promjene indeksnih pokazatelja izravno vezane uz promjenu koeficijenta propusnosti. Tako su primjerice Shackelford i dr. (2000.) i Jo i dr. (2001.) dokazali da indeks slobodnog bubrenja bentonitne gline i koeficijent propusnosti ovise o valentnosti i koncentraciji iona u procjednoj vodi. Otopine s ionima veće valencije i većom koncentracijom uzrokovale su povećanje koeficijenta pora odnosno smanjenje indeksa slobodnog bubrenja. Della Porta i Tresso (2003.) dokazali su također da se s povećanjem valentnosti i koncentracije iona u otopini povećava i indeks gubitka fluida.

Posmična čvrstoća bentonitnih tepiha ima značajan utjecaj na stabilnost odlagališta otpada. Problem može nastati kada mineralna barijera dođe u kontakt s odlagališnom procjednom vodom. Naime, bentonitne gline pripadaju skupini bubrivih tala, karakteriziranih gubitkom posmične čvrstoće tijekom procesa bubrenja (Holtz and Gibbs, 1956). Ova pojava vezana je za povećanje vlažnosti i smanjenja gustoće materijala pri bubrenju.

U ovom radu prikazani su najprije rezultati ispitivanja posmične čvrstoće nearmiranog bentonitnog tepiha u uređaju za izravni posmik. Osobita pažnja posvećena je određivanju utjecaja postupka hidratacije i pojave bubrenja u bentonitnim glinama, te brzine smicanja na rezultate ispitivanja. Ispitivanje koeficijenta propusnosti planira se na uzorcima bentonitnog tepiha (gline) provesti u drugoj fazi istraživanja korištenjem metode zadanog protoka. Ova metoda je izabrana zbog prednosti kod ispitivanja slabopropusnih materijala u odnosu na ostale metode, od kojih su najvažnije brzina izvođenja ispitivanja i točnost dobivenih rezultata. Za sada su obavljena probna ispitivanja koeficijenta propusnosti na uzorcima kaolinske gline. Osim toga prikazani su rezultati ispitivanja indeksnih pokazatelja: indeks slobodnog bubrenja, indeks gubitka fluida i kapacitet upijanja vode. Ispitivanja su provedena na dva uzorka natrijskih bentonita, od kojih je jedan bio u granulama a drugi u prahu, a korištena su i dva ispitna fluida: demineralizirana voda i procjedna voda s odlagališta otpada Jakuševac.

Sa stajališta fizikalno-mehaničkih osobina, bentonitni tepisi imaju dva svojstva važna za praktičnu primjenu: vrlo nisku propusnost i malu posmičnu čvrstoću. Niska propusnost poželjno je svojstvo u odlagalištima otpada. Nasuprot tomu, mala posmična čvrstoća često je kritična veličina pri projektiranju odlagališta, naročito kada se bentonitni tepisi koriste na pokosima. Osobito je važno da se ova dva svojstva ne mijenjaju s vremenom uslijed različitih utjecaja kojima su bentonitni tepisi izloženi tijekom eksploatacije odlagališta kao i nakon njegova zatvaranja.

Posmična čvrstoća bentonitnih tepiha

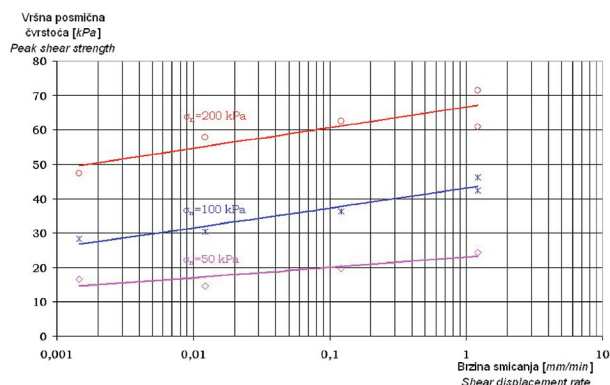
Pregledom ranije objavljenih podataka o posmičnoj čvrstoći bentonitnih tepiha uočen je vrlo velik raspon izmjerenih vrijednosti, najvjerojatnije zbog primjene različitih postupaka prilikom pripreme uzoraka kao i samog smicanja. Do 1998. godine nije postojala odgovarajuća norma za ispitivanje bentonitnih tepiha pa se primjenjivala norma ASTM D-5321 namijenjena za ispitivanje kontaktne čvrstoće svih vrsta geosintetika. Kao posljedica toga, većina je mjerenja čvrstoće bentonitnih tepiha provedena uz korištenje brzine smicanja od 1 mm/min. Bentonitna glina posjeduje vrlo malu propusnost, pa se može pretpostaviti da publicirani podaci predstavljaju nedrenirane parametre čvrstoće. Pored toga, laboratorijske procedure ispitivanja razlikovale su se i po sljedećim značajkama: vrsta uređaja za smicanje, veličina uzorka,

postupak pripreme uzorka, raspon normalnih naprežanja. Norma ASTM D-6243 za ispitivanje bentonitnih tepiha pojavila se 1998. godine, no još je uvijek dosta toga ostavljeno prilično nedefinirano s napomenom da projektanti trebaju odrediti način provođenja pokusa prema specifičnom problemu kojeg treba riješiti.

Analiza publiciranih podataka pokazala je da su ključni parametri pokusa postupak pripreme tj. hidratacije uzorka i brzina smicanja, pa je program ispitivanja bentonitnih tepiha u uređaju za izravni posmik bio planiran primjereno tomu (Kovačević Zelić, 2000). Primijenjene su dvije procedure hidratacije uzoraka: standardna u trajanju od 24 sata i produljena u trajanju od 9 dana. Nakon te faze uslijedilo je smicanje korištenjem četiri različite brzine.

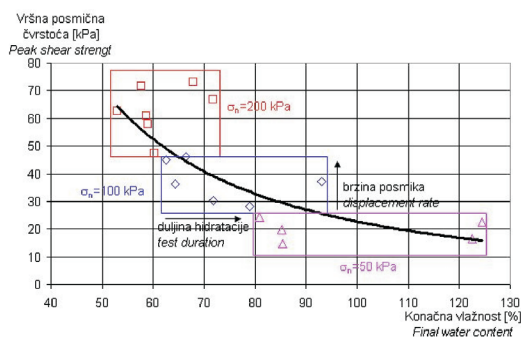
Rezultati ispitivanja pokazali su da sporije smicanje i dulja hidratacija uzoraka uzrokuju smanjenje čvrstoće bentonitnih tepiha. Na slici 1 je prikazana ovisnost vršne posmične čvrstoće o brzini smicanja, a na slici 2 ovisnost vršne posmične čvrstoće o konačnoj vlažnosti uzorka.

Pravci vršne i rezidualne posmične čvrstoće, gdje se mogu uočiti i odgovarajući parametri smicanja tj. kohezija i kut unutarnjeg trenja prikazani su na slici 3, a dobiveni su ekstrapolacijom prethodno navedenih rezultata ispitivanja na brzinu smicanja 0,001 mm/min, koja predstavlja referentnu veličinu za postizanje dreniranih parametara.



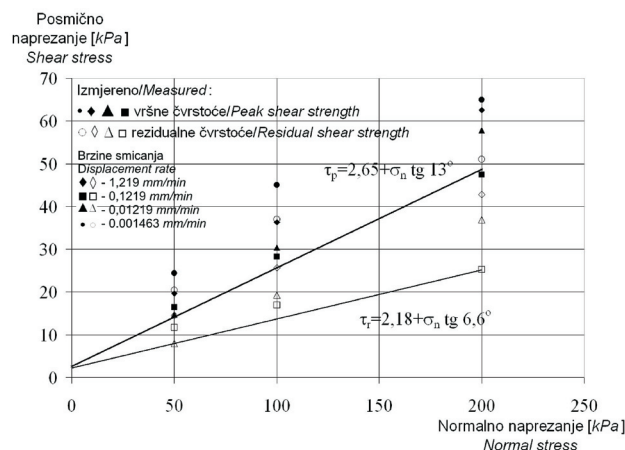
Slika 1. Ovisnost vršne posmične čvrstoće o brzini smicanja

Figure 1 Peak shear strength vs. shear displacement rate



Slika 2. Ovisnost vršne posmične čvrstoće o konačnoj vlažnosti

Figure 2 Peak shear strength vs. final water content



Slika 3. Čvrstoća bentonitnog tepiha

Figure 3 Shear strength of the geosynthetic clay liner

Analizom navedenih rezultata utvrđeno je da je za pravilno provođenje pokusa izravnog smicanja potrebno zadovoljiti sljedeće uvjete:

- uzorci trebaju imati istu početnu vlažnost,
- uzorci moraju biti potpuno hidratizirani prije smicanja,
- smicanje treba provoditi brzinama pri kojima će utjecaj puzanja biti zanemarivo mali.

Da bi se to moglo ostvariti predložena je i procedura ispitivanja bentonitnih tepiha u pokusu izravnog smicanja u tri faze:

- (1) homogenizacija uzoraka u spremniku s konstantnom relativnom vlagom i temperaturom,
- (2) hidratacija uzoraka u trajanju od 7, 14 i 28 dana,
- (3) smicanje brzinama 0,1 i 0,01 mm/min.

Prvi uvjet potrebno je zadovoljiti kako bi se smanjio rasap rezultata, a interpretacija obaviti na temelju konačnih vlažnosti postignutih u smicanju. Drugim uvjetom omogućuje se razdvajanje fenomena bujanja od dilatacije u smicanju, a trećim uvjetom izbjegava se pojava puzanja i omogućava određivanje dreniranih parametara smicanja.

Hidraulička propusnost

Koeficijent propusnosti može se u laboratoriju odrediti na više načina: metodom stalne ili promjenjive razlike potencijala, te metodom zadanog protoka. Posljednja metoda je relativno nova a daje vrlo precizne rezultate u kratkom vremenu. Metoda zadanog protoka je metoda mjerenja koeficijenta propusnosti u troosnom uređaju (Veinović et al., 2003.). Uzorak se ugradi u troosnu ćeliju nakon čega slijedi faza konsolidacije. Nakon faze konsolidacije, na donjoj strani uzorka nameće se zadani protok

dok se na gornjem kraju uzorka početni porni tlak održava stalnim. Nametanje protoka uzrokuje porast pornog tlaka u donjem dijelu uzorka. Da bi se mogao odrediti hidraulički gradijent u uzorku, mora se čekati da se tlak ustali tj. da se uspostave stacionarni uvjeta tečenja kroz uzorak.

Uz poznatu promjenu pornog tlaka u uzorku i protok lako se prema Darcy-jevom zakonu odredi koeficijent propusnosti:

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\frac{V}{At}}{\frac{\Delta u}{\gamma_w} - \Delta l}$$

gdje je:

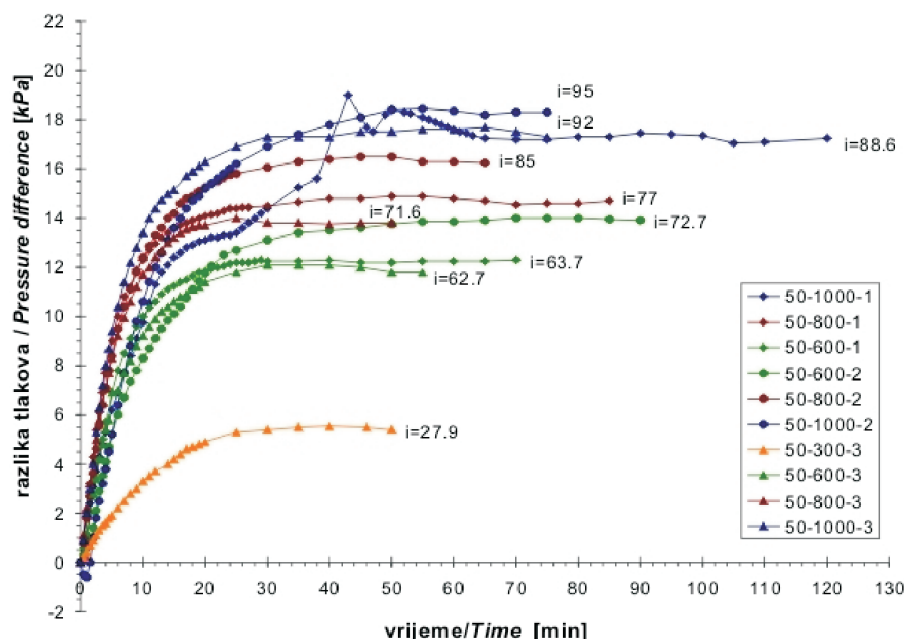
- k koeficijent propusnosti [cm/s];
- v brzina tečenja kroz jediničnu površinu uzorka [cm/s];
- i hidraulički gradijent [-];
- V volumen vode [cm³];
- A površina uzorka [cm²];
- t vrijeme [s];
- Δu promjena pornog tlaka [N/cm²];
- Δl put na kojemu se mijenja potencijal (visina uzorka) [cm];
- γ_w zapreminska težina vode [N/cm³].

Maksimalna dozvoljena vrijednost koeficijenta propusnosti za materijale unutar brtvenih sustava odlagališta otpada definirana je člankom 14. Pravilnika o uvjetima za

postupanje s otpadom (1997) gdje stoji: „*Temeljni brtveni sloj, bokovi i završni brtveni sloj odlagališta otpada I. kategorije izgrađuje se od mineralnog materijala čija najveća vrijednost koeficijenta propusnosti mora iznositi 10⁻⁹ m/s.*”

Probna mjerenja metodom zadanog protoka obavljena su na porculanskoj glini. Usporedno su obavljena mjerenja propusnosti metodom sa stalnom razlikom potencijala u troosnom uređaju. Porculanska glina se sastojala pretežno od kaolinita te nešto dodataka. Obzirom da je ovaj materijal umjetno proizveden ustaljenim postupkom pretpostavlja se da ima i konstantna svojstva, zbog čega je bio pogodan za probna mjerenja. Također, koeficijent propusnosti ovog materijala je oko 10⁻⁹ m/s, što je slično vrijednostima deklariranim za bentonitne gline.

Koeficijent propusnosti mjeren je za konsolidacijski tlak od 50, 100, 200 i 400 kPa te protoke od 300, 600, 800 i 1000 mm³/h. Slika 4 prikazuje promjenu pornih tlakova u vremenu (t) uz odgovarajuće hidrauličke gradijente (i) za pokuse provedene uz konsolidacijski tlak od 50 kPa. U legendi su oznake određene na sljedeći način: prvi broj označava konsolidacijski tlak, drugi broj protok u mm³/h, a treći redni broj uzorka. Vidljivo je da kod konsolidacijskog tlaka od 50 kPa, do stabilizacije pornih tlakova dolazi već nakon tridesetak minuta. Dakle, ovom metodom koeficijent propusnosti dobiva se vrlo brzo u usporedbi s klasičnim metodama kod kojih pokus može trajati i nekoliko dana. Povećanjem protoka povećavaju se i gradijenti što smanjuje duljinu trajanje pokusa, ali to može uzrokovati i lokalna odstupanja od Darcy-jevog zakona i kretanja čestica unutar uzorka (Veinović, 2003).

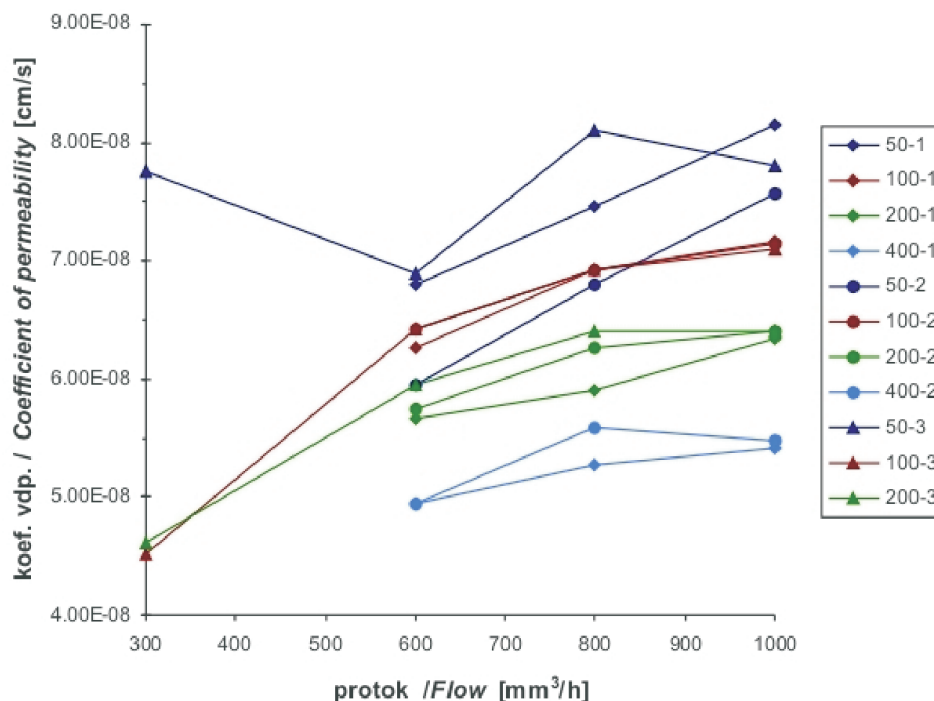


Slika 4. Promjena razlike pornih tlakova na bazi i kapi uzoraka u vremenu za konsolidacijski tlak 50 kN/m² (protoci: 300-1000 mm³/h; uzorci: 1-3)

Figure 4 Differential pore pressure variation at the bottom and at the top of the sample for consolidation pressure 50 kN/m² (flow rates: 300-1000 mm³/h; samples: 1-3)

Slika 5 prikazuje vrijednosti koeficijenta propusnosti porculanske gline obzirom na nametnuti protok i konsolidacijski tlak. Iz prikazanog dijagrama se može uočiti da izmjereni koeficijent propusnosti raste s porastom protoka te opada s porastom konsolidacijskog tlaka. Ova pojava

ukazuje da tečenje u uzorku nije laminarno, budući da je koeficijent propusnosti za laminarno tečenje konstantan. Odnosno, došlo je do lokalnog odstupanja od Darcy-jevog zakona i kretanja čestica unutar uzorka zbog relativno visokih gradijenata (slika 4).

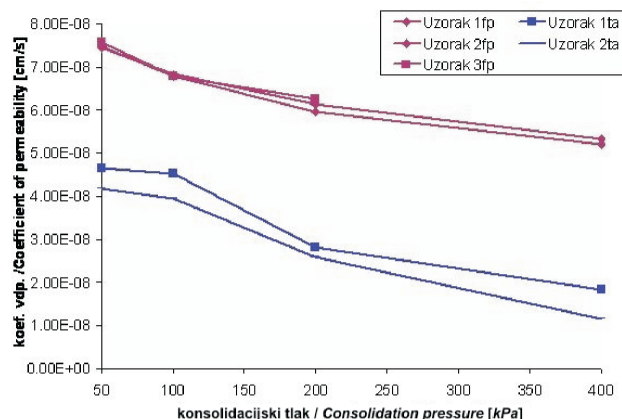


Slika 5. Usporedba koeficijenta vodopropusnosti za različite protoke (konsolidacijski tlak: 50-400 kN/m², uzorci: 1-3)

Figure 5 Coefficient of permeability / different flow rates relationship (consolidation pressure: 50-400 kN/m², samples: 1-3)

Slika 6 prikazuje usporedne rezultate mjerenja koeficijenta propusnosti. Oznaka *fp* korištena je za koeficijent propusnosti određen metodom zadanog protoka, a oznaka *ta* za uzorke ispitane metodom konstantne razlike potencijala u troosnom uređaju. Vidljivo je da su koeficijenti propusnosti dobiveni mjerenjem metodom zadanog protoka bliski onima dobivenim metodom s konstantnom razlikom potencijala u troosnom uređaju. Postojeća razli-

ka se pripisuje nedostatku diferencijalnog osjetila za tlak čime bi bilo omogućeno izravno mjerenje razlike tlakova. Također, metoda zadanog protoka daje preciznije rezultate jer je lakše mjeriti promjenu tlakova nego količinu procijeđenog fluida. Rezultati se kreću između $7,5 \times 10^{-10}$ – $5,5 \times 10^{-10}$ m/s što je u okviru vrijednosti traženih zakonom (članak 14. Pravilnika o uvjetima za postupanje s otpadom, 1997).



Slika 6. Usporedba metoda za mjerenje koeficijenta propusnosti

Figure 6 Permeability measurement method comparison

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da metoda zadanog protoka ima nekoliko važnih prednosti u odnosu na ostale metode. Točnija mjerenja koeficijenta propusnosti omogućena su preciznim mjerenjem razlike tlakova, za razliku od standardnih metoda kod kojih je potrebno mjeriti količinu procjeđene vode, što je puno teže precizno mjeriti. Također, brzina određivanja koeficijenta propusnosti daleko je veća nego kod standardnih metoda, što je naročito značajno za ispitivanje slabopropusnih materijala koji se ugrađuju u brtvene sustave na odlagalištima otpada.

Kemijska kompatibilnost

Prema normi ASTM D-6141 propisuje se određivanje indeksa slobodnog bubrenja i indeksa gubitka fluida prije i nakon izlaganja bentonitne gline utjecaju procjedne vode ili neke sintetičke kemijske otopine. U navedenoj normi navodi se da je za GCL dokazana kompatibilnost ukoliko ne dolazi do promjene indeksnih pokazatelja nakon izlaganja djelovanju procjedne vode. U protivnom,

kompatibilnost treba dodatno utvrditi određivanjem koeficijenta propusnosti. Neki autori za dokazivanje kompatibilnosti koristili su i pokus kapaciteta upijanja vode (von Maubeuge, 2002.). Također, prema uputama koje je objavilo Njemačko društvo za geotehniku (DGGT, 2002.) propisuju se odgovarajući postupci ispitivanja i potrebne karakteristike materijala kako je to prikazano u tablici 1.

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja navedenih indeksnih pokazatelja na dva uzorka natrijskih bentonita. Jedan uzorak je bio u obliku granula dok je drugi uzorak bio u prahu. Uzorak bentonita u granulama imao je 75%, a uzorak bentonita u prahu 80 % minerala glina, pretežito smektitske skupine (Kovačević Zelić et al., 2006). U pokusima je kao ispitni fluid korištena demineralizirana voda, te procjedna voda s odlagališta otpada Jakuševac. Parametri kemijskog sastava procjedne vode redovito se prate od proljeća 2000. godine kada je počela sanacija odlagališta Jakuševac. Tablica 2 prikazuje vrijednosti dobivene u svibnju 2005. godine kada je uziman uzorak procjedne vode za ova ispitivanja.

Tablica 1. Preporučene metode ispitivanja i potrebne vrijednosti indeksnih pokazatelja

Table 1 CQA testing summary of the GCLs mineral component

Svojstvo bentonitne gline (<i>Bentonite properties</i>)	Metoda (<i>Testing method</i>)	Preporučena vrijednost (<i>Recommended value</i>)	
		DGGT, 2002.	von Maubeuge, 2002.
Indeks slobodnog bubrenja (<i>Free swell index</i>)	ASTM D5890	≥ 20 ml	> 24 ml
Indeks gubitka fluida (<i>Fluid loss index</i>)	ASTM D5891	≤ 18 ml	< 18 ml
Kapacitet upijanja vode (<i>Water absorption capacity</i>)	DIN 18132	≥ 450 %	> 600 %

Tablica 2. Kemijski sastav procjedne vode na odlagalištu otpada Jakuševac (ECOINA, 2005)**Table 2** Chemical composition of leachate at the landfill Jakusevec (ECOINA, 2005)

Parametar (Parameter)	Svibanj, 2005. (May, 2005)
Temperatura (Temperature) [°C]	8,15
pH	7,83
Elektroprovodljivost (Electroconductivity) [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	7760
Natrij (Sodium) Na^+ [mg/l]	871,27
Kalij (Potassium) K^+ [mg/l]	413,74
Kalcij (Calcium) Ca^{2+} [mg/l]	81,6
Magnezij (Magnesium) Mg^{2+} [mg/l]	117,4
Amonijak (Ammonium) NH_4 [mg/l]	190,41
COD ^a [mg/l]	955
BOD ^b [mg/l]	120
SM ^c [mg/l]	4724
Ulja (Total oil) [mg/l]	2,71
Mineralna ulja (Mineral oils) [mg/l]	0,26

^aCOD kemijska potrošnja kisika (chemical oxygen demand)

^bBOD biokemijska potrošnja kisika (biological oxygen demand)

^cSM otopljena tvar (suspended matter)

U tablicama 3 i 4 sumarno je prikazan program ispitivanja tj. vrste ispitivanja, način pripreme uzoraka te korišteni ispitni fluid. Tablica 3 se odnosi na uzorke bentonita u granulama a tablica 4 na uzorke bentonita u prahu. Prva serija ispitivanja (serija I) provedena je na obje vrste uzoraka te predstavlja referentne vrijednosti indeksnih pokazatelja. Provedena je bez posebne pripreme uzoraka te korištenjem demineralizirane vode kao ispitnog fluida. U sljedeće tri serije (serije II-IV) uzorci mineralne komponente bentonitnog tepiha su bili posebno pripremani

potapanjem u procjednu vodu u trajanju od 1, 7 i 60 dana. Nakon tog razdoblja uzorci su bili osušeni te su izvedena ispitivanja indeksnih pokazatelja korištenjem demineralizirane vode kao ispitnog fluida. U posljednjoj seriji (serija V) izvršeno je za sada samo određivanje indeksa slobodnog bubrenja i to samo za uzorak u obliku granula. U ovoj seriji je kao ispitni fluid korištena procjedna voda. Programom istraživanja je predviđen nastavak ispitivanje kako bi i u ovoj seriji bili određeni svi indeksni pokazatelji za obje vrste bentonitne gline.

Tablica 3. Program ispitivanja za uzorak granularnog bentonita**Table 3** Testing program for granular bentonite

	Priprema uzoraka* (Sample preparation)	Ispitni fluid (Test fluid)	Provedena indeksna ispitivanja Index testing		
			Slobodno bubrenje (Free swelling)	Gubitak fluida (Fluid loss)	Kapacitet upijanja (Absorption capacity)
Seriya (Series) I	NE/No	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) II	1 dan/day	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) III	7 dana/days	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) IV	60 dana/days	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) V	NE/No	Eluat (Leachate)	DA/Yes	NE/No	NE/No

* potapanje u procjednu vodu (immersion in leachate)
DV – demineralizirana voda (Deionized water)

Tablica 4. Program ispitivanja za uzorak bentonita u prahu**Table 4** Testing program for powder bentonite

	Priprema uzoraka* (Sample preparation)	Ispitni fluid (Test fluid)	Provedena indeksna ispitivanja Index testing		
			Slobodno bubrenje (Free swelling)	Gubitak fluida (Fluid loss)	Kapacitet upijanja (Absorption capacity)
Seriya (Series) I	NE/No	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) II	1 dan/day	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) III	7 dana/days	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes
Seriya (Series) IV	60 dana/days	DV	DA/Yes	DA/Yes	DA/Yes

* potapanje u procjednu vodu (immersion in leachate)
DV – demineralizirana voda (Deionized water)

Indeks slobodnog bubrenja

U tablici 5 prikazani su rezultati ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja za uzorak u granulama dok su u tablici 6 prikazani rezultati ispitivanja za uzorak u prahu. Slika 7 prikazuje ovisnost indeksa slobodnog bubrenja o duljini potapanja uzorka u procjednu vodu. Vidljivo je da se indeks povećava s duljinom izlaganja bentonitne gline procjednoj vodi kod oba uzorka. Kod bentonita u granulama najveća se promjena dogodila u Seriji IV,

odnosno u uzorku koji je bio najdulje potapan u procjednu vodu. Kod bentonita u prahu najveća promjena se dogodila u Seriji II, odnosno odmah nakon početnog djelovanja procjedne vode. Pojava da se indeks slobodnog bubrenja povećava s produljenjem djelovanja procjedne vode nije u skladu s normom ASTM D 6141, gdje bi se djelovanje procjedne vode na bentonitnu glinu trebalo očitovati kroz smanjenje indeksa slobodnog bubrenja. Ova je pojava uočena jedino za seriju V, gdje je kao ispitni fluid korištena procjedna voda.

Tablica 5. Indeks slobodnog bubrenja (uzorak u granulama) [ml/2g]**Table 5** Free swell (granular bentonite) [ml/2g]

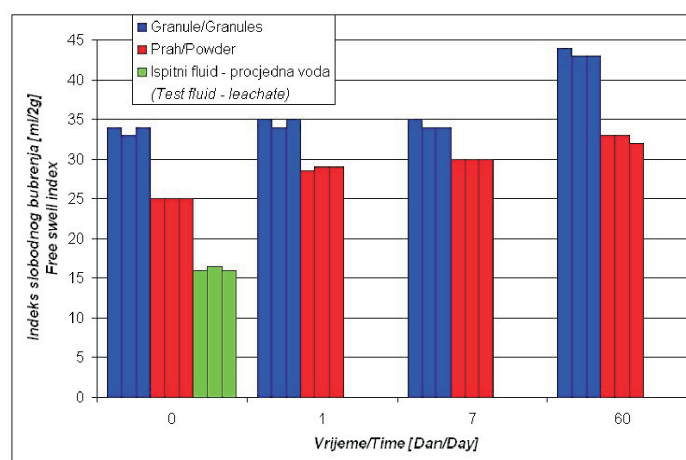
Uzorak (Sample)	Seriya I (Series I)	Seriya II (Series II)	Seriya III (Series III)	Seriya IV (Series IV)	Seriya V (Series V)
1	34	35	35	44	16
2	33	34	34	43	16,5
3	34	35	34	43	16

Tablica 6. Indeks slobodnog bubrenja (uzorak u prahu) [ml/2g]**Table 6** Free swell (powder bentonite) [ml/2g]

Uzorak (Sample)	Seriya I (Series I)	Seriya II (Series II)	Seriya III (Series III)	Seriya IV (Series IV)
1	25	28,5	30	33
2	25	29	30	33
3	25	29	30	32

Pretpostavlja se da je razlog neuobičajene pojave registrirane u pokusima serija od II do IV kemijska reakcija između uzorka bentonitne gline i procjedne vode korištene za pripremu uzorka. Ova reakcija rezultira stvaranjem mjehurića zraka koji ostaju zarobljeni unutar uzorka čime se indeks slobodnog bubrenja samo prividno povećava i ne odražava nužno hidrataciju gline (Kovačević-Zelić et al., 2006.).

Najveći utjecaj procjedne vode uočava se za seriji V kod koje indeks slobodnog bubrenja iznosi 16 ml, a gdje je pokus proveden korištenjem procjedne vode kao ispitnog fluida. Ovo predstavlja značajno smanjenje u odnosu na referentnu seriju I za koju iznos bubrenja iznosi 34 ml, te predstavlja očekivanu reakciju kakva je predviđena normom u slučaju štetnog djelovanja procjedne vode na mineralnu komponentu.

**Slika 7.** Promjena indeksa slobodnog bubrenja u ovisnosti o duljini potapanja uzorka u procjednoj vodi**Figure 7** Bentonite free swell vs. duration of sample exposure to leachate

Indeks gubitka fluida

Rezultati ispitivanja gubitka fluida su prikazani u tablicama 7 i 8 za bentonit u granulama odnosno u prahu.

Tablica 7. Gubitak fluida (bentonit u granulama) [ml]

Table 7 Fluid loss (granular bentonite) [ml]

Uzorak (Sample)	Seriya I (Series I)	Seriya II (Series II)	Seriya III (Series III)	Seriya IV (Series IV)
1	12	14	14	14
2	12	14	14	12

Tablica 8. Gubitak fluida (bentonit u prahu) [ml]

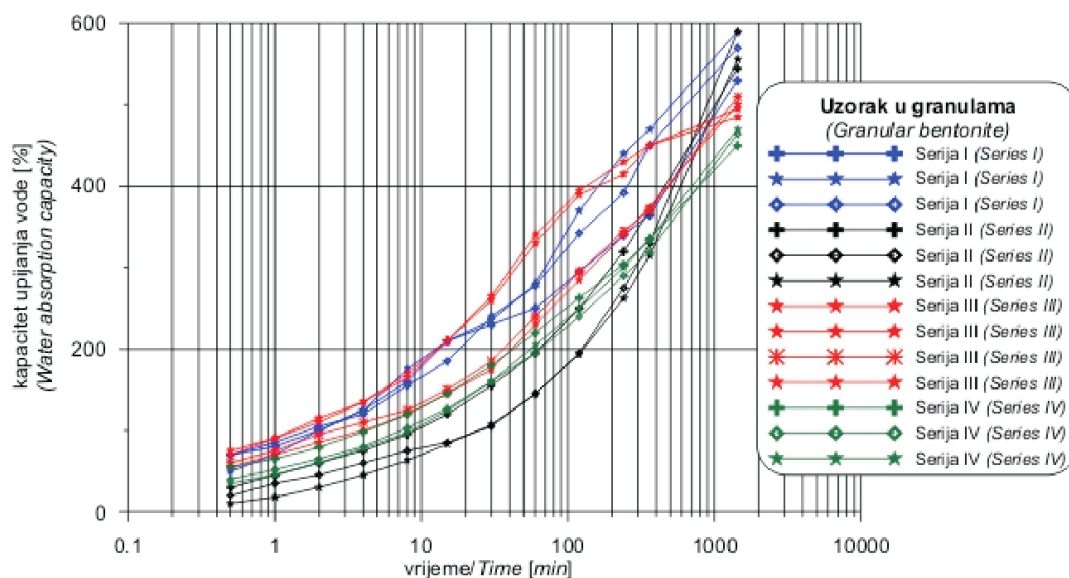
Table 8 Fluid loss (powder bentonite) [ml]

Uzorak (Sample)	Seriya I (Series I)	Seriya II (Series II)	Seriya III (Series III)	Seriya IV (Series IV)
1	12	14	14	14
2	12	14	14	14

Vidljiv je blagi porast gubitka fluida kod uzoraka koji su pripremani potapanjem u procjednu vodu. Kod obje vrste bentonita promjena se javlja već u seriji II, odnosno odmah po početku djelovanja procjedne vode, dok produljeno izlaganje utjecaju procjedne vode nije imalo značajniji utjecaj na ovaj pokazatelj. Povećanje indeksa gubitka fluida upućuje i na moguće povećanje koeficijenta propusnosti, što treba dodatno istražiti.

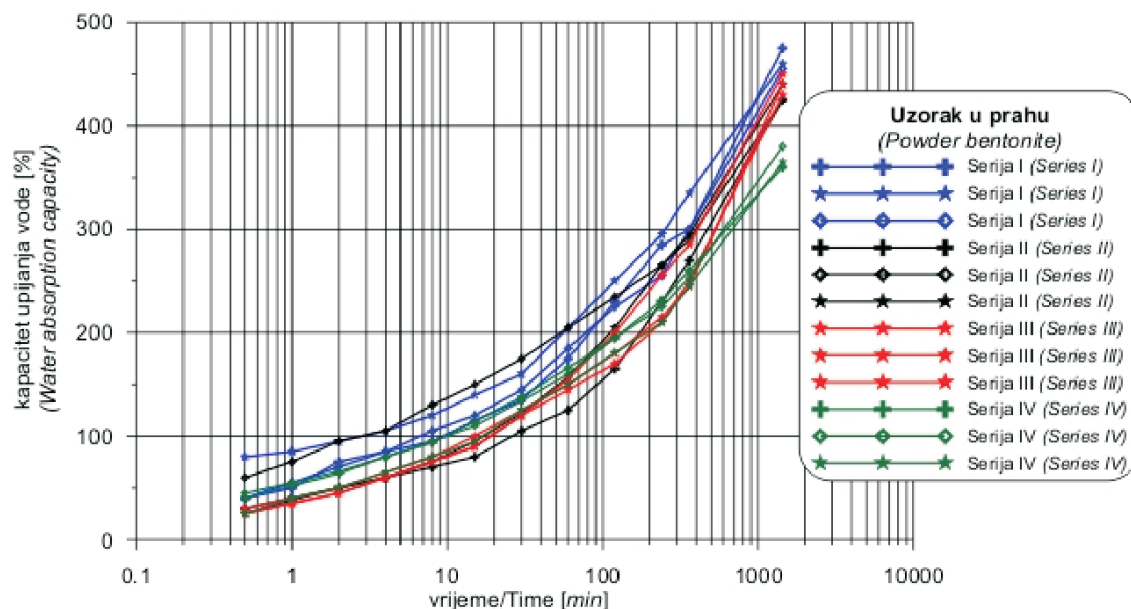
Kapacitet upijanja vode

Rezultati ispitivanja kapaciteta upijanja vode dani su na slici 8 za uzorak u granulama, na slici 9 za uzorak u prahu. U tablici 8 prikazane su vrijednosti kapaciteta upijanja vode za oba uzorka u serijama I-IV. Jedino za seriju V za sada nisu provedena ispitivanja kapaciteta upijanja iako su u planu. Najveće vrijednosti za obje vrste bentonitne gline dobivene su za uzorke iz serije I odnosno kod uzoraka koji nisu izlagani utjecaju procjedne vode. Uzorak u granulama pokazuje puno veće vrijednosti kapaciteta upijanja od uzorka u prahu. Raspon dobivenih rezultata za uzorke u granulama iznosi od 530–590, a za uzorke u prahu od 455–475. Kod uzorka u granulama, u serijama II-IV jasno se uočava trend smanjenja kapaciteta upijanja, izmjenjenog nakon 24 sata kako je definirano normom, s produljenjem vremena potapanja uzorka u eluatu u fazi pripreme uzoraka. Kod uzorka u prahu značajniji trend smanjenja kapaciteta upijanja dogodio se tek za seriju IV.



Slika 8. Kapacitet upijanja vode (uzorak u granulama)

Figure 8 Water absorption capacity (granular bentonit)



Slika 9. Kapacitet upijanja vode (uzorak u prahu)

Figure 9 Water absorption capacity (powder bentonite)

Tablica 9. Kapacitet upijanja vode nakon 24 sata

Table 9 Water absorption capacity after 24 hours

	Kapacitet upijanja vode [%] (Water absorption capacity)			
	Uzorak u granulama (Granular sample)		Uzorak u prahu (Powdered sample)	
	Vrijednosti (Value)	Raspon (Range)	Vrijednosti (Value)	Raspon (Range)
Serija I (Series I)	530		475	
	570	530 - 590	460	455 - 475
	590		455	
Serija II (Series II)	545		425	
	590	545 - 590	425	425 - 440
	556		440	
Serija III (Series III)	495		440	
	500	485 - 510	430	430 - 450
	510		450	
Serija IV (Series IV)	485		-	
	450		360	
	464	450-470	380	360 - 380
	470		365	

Razlike dobivenih vrijednosti kapaciteta upijanja vode mogu se pripisati razlici u mineraloškom sastavu gline te veličini zrna (granule-prah), a smanjenje kapaciteta uzrokovano potapanjem u procjednu vodu upućuje na negativan utjecaj procjedne vode te na moguće povećanje propusnosti gline.

Zaključak

Pokusima smicanja na uzorcima bentonitnog tepiha dokazan je utjecaj procesa hidratacije/bubrenja i brzine smicanja na rezultate ispitivanja. Upravo stoga, predložena je detaljna procedura ispitivanja i interpretacije rezultata, koja omogućava određivanje relevantnih parametara posmične čvrstoće.

Konvencionalne metode određivanja koeficijenata propusnosti kod izrazito nepropusnih materijala kao što je bentonitna glina, dugotrajne su te zbog vremenske komponente često i nepouzdanе. Metodom zadanog protoka rezultati su dostupni u puno kraćem vremenu, a njihova je preciznost povećana. Kao glavni problem kod ispitivanja ovom metodom javlja se izbor hidrauličkog gradijenta. Naime, povećanjem protoka povećavaju se i gradijenti što smanjuje duljinu trajanje pokusa ali može uzrokovati i lokalna odstupanja od Darcy-jevog zakona i kretanja čestica unutar uzorka (Veinović et al., 2003). Ukoliko pokrov i sustav za drenažu ostvaruju svoju funkciju u odlagalištu očekujemo nisku razinu procjedne vode odnosno hidrauličke gradijente koji se kreću u rasponu od 10-20. Međutim, ovako mali gradijenti u pokusu sa zadanim protokom uzrokuju također i vrlo male razlike tlakova koji se mjernom opremom ne mogu precizno odrediti. Stoga su se u našem slučaju kod ispitivanja izrazito slabopropusnih tala kao optimalni pokazali gradijenti u rasponu od 30 do 100.

Na temelju prikazanih rezultata ispitivanja indeksnih pokazatelja, koji se rade u svrhu određivanja kemijske kompatibilnosti mineralne komponente, možemo zaključiti da je do značajne promjene svojstava došlo jedino u slučaju kada je kao ispitni fluid korištena procjedna voda. Uzorci koji su bili jedino u pripremljenoj fazi izloženi njegovom djelovanju, pokazali su donekle neuobičajenu reakciju. Suprotno očekivanjima djelovanje procjedne vode uzrokovalo je povećanje indeksa slobodnog bubrenja. Ova pojava se pripisuje kemijskim reakcijama koje se tijekom pokusa odvijaju, a koje vjerojatno imaju za posljedicu stvaranje mjehurića zraka koji ostaju zarobljeni u uzorku i ne odražavaju izravno hidrataciju bentonitne gline (Kovačević Zelić et al., 2006). Ostala dva indeksa pokazuju blago djelovanje procjedne vode na glinu u negativnom smislu tj. smanjenje kapaciteta upijanja vode i povećanje gubitka fluida. Obzirom na takve rezultate, preporučljivo je provesti i kontrolna ispitivanja koeficijenta propusnosti, kako bi se utjecaj procjedne vode na mineralnu komponentu u potpunosti istražio.

Received: 18.09.2007.

Accepted: 30.10.2007.

Literatura

- ASTM D 4439 – 97a Standard Terminology for Geosynthetics.
- ASTM D 5321 – 92 Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by Direct Shear Method.
- ASTM D 6141 Standard Guide for Screening Clay Portion of Geosynthetic Clay Liner (GCL) for Chemical Compatibility to Liquids.
- ASTM D 6243 – 98 Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method.
- Bouazza, A., Zornberg, J.G., Adam, A. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. *Proceed. 7th ICG - Nice, France, Vol. 2, 445-507.*
- Della Porta, C. and Tresso, G. (2003): Geosynthetic Clay Liners: how different solutions interact with hydraulic and colloidal properties of bentonite of GCLs. *Seventh International Conference on Geosynthetics 22-27 September 2002 Nizza - French Rivier.*
- DGGT (2002): *Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen, EAG-GTD, Ernst & Sohn.*
- ECOINA (2005): *Monitoring of the surface waters and leachate and waters from the Sava river – Report no: 17/2005.*
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. I. (1956): Engineering properties of expansive clays, *Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 121, 641-663.*
- Jo, Y. H.; Katsumi, T.; Benson, H. C. and Edil B. T. (2001): Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127 (7): 557-567.*
- Kovačević Zelić, B.; Domitrović, D.; Kovačić, D.; Matešić, L. and Veličković, B. (2006): «Behaviour of GCL mineral component treated with site-specific liquid», ISSMGE, XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana.
- Kovačević Zelić, B. (2000): *Ispitivanje posmične čvrstoće bentonitnih tepiha. Doktorska disertacija. RGN-fakultet, Zagreb.*
- Petrov, J. R. and Rowe, K. R. (1997) Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Can. Geotech. J. 34: 863-885.*
- Pravilnik o uvjetima za postupanje s otpadom (1997), *Narodne novine, No. 123, Zagreb.*
- Shackelford D. C.; Benson H. C.; Katsumi T.; Edil, B. T. and Lin, L. (2000): Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes 18: 133-161.*
- Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (2005): *Narodne novine, No. 130 2.11.2005, Zagreb.*
- Veinović, Ž.; Kovačević Zelić, B. and Kvasnička P. (2003): *Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda. Rudarsko-geološko-naftni zbornik vol. 15: 95-102.*
- 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.*