

Biljana KOVAČEVIĆ ZELIĆ  
Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

Davorin KOVAČIĆ  
Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Ivan VRKLJAN  
Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb

## BENTONITNI TEPISI U ODLAGALIŠTIMA OTPADA

**SAŽETAK:** Bentonitni tepisi koriste se u geotehničkom i transportnom inženjerstvu, te geotehnologiji u zaštiti okoliša. Propisi o izgradnji odlagališta u mnogim državama predviđaju njihovo korištenje kao alternativnog materijala u odnosu na klasične sustave izgrađene od zbijene gline. Pri tome treba pokazati njihovu ekvivalentnost, funkcionalnost i ekonomičnost. Sa stajališta projektiranja brtvenih sustava za dokazivanje ekvivalentnosti najvažnija su svojstva posmična čvrstoća i propusnost. U radu su pokazani rezultati nekih laboratorijskih pokusa provedenih na uzorcima bentonitnog tepiha. Pokazuje se koliko je ponašanje GCL-a kao kompozita determinirano ponašanjem glinovite komponente. Također, daje se kritički osvrt na ispitivanja u pokusu izravnog smicanja koja se provode u skladu s normom ASTM D 6243, te prijedlog za modifikaciju procedure ispitivanja i interpretacije tako dobivenih rezultata.

## GEOSYNTHETIC CLAY LINERS AT LANDFILLS

**ABSTRACT:** Geosynthetic clay liners are used in geotechnical, transportation and geoenvironmental engineering. The regulations in many countries envision their use as alternative materials to classical clay liners, if their equivalency can be proved. From the design point of view, the two most important parameters that should be considered are shear strength and hydraulic conductivity. The results of some laboratory tests conducted on the specimens of geosynthetic clay liner are presented in the paper. It is shown that the behaviour of GCL as composite material is governed by the behaviour of clay component. A critical review of the existing standard for shear strength testing in shear box (ASTM D 6243) is also presented, as well as the proposition for the modification of testing procedure and the interpretation of test results.

## UVOD

Bentonitni tepisi (GCL-i) pripadaju skupini materijala poznatih pod nazivom geosintetici. Taj naziv obuhvaća niz industrijskih proizvoda načinjenih uglavnom od umjetnih materijala koji se koriste u raznim područjima graditeljstva: prometnice, hidrotehnički i geotehnički objekti, geotehnologija u zaštiti okoliša itd. Po američkoj normi (ASTM D 4439 – 97a) bentonitni tepih definira se kao tvornički proizvedena hidraulička barijera koja se sastoji od gline učvršćene na jedan ili dva sloja sintetičkog materijala. To je dakle kompozit koji se sastoji od mineralne i sintetičke komponente. Detaljnije se može reći da je mineralna komponenta uglavnom bentonitna glina ali može biti i neki drugi materijal vrlo niske propusnosti. Glina se nalazi između dva geotekstila te može biti na njih dodatno pričvršćena ljepljenjem, iglanjem ili prošivanjem. Postoje također i izvedbe gdje se kao sintetička komponenta koristi geomembrana. Na tržištu nailazimo na širok raspon bentonitnih tepiha različitih proizvođača i različitih izvedbi. U stručnoj literaturi, oni se najčešće dijele u dvije velike skupine: armirani i nearmirani bentonitni tepisi (Frobel; 1996). Armirani bentonitni tepisi ojačani su protkanim ili prošivenim vlaknima čime se ostvaruje veća unutrašnja posmična čvrstoća. Nearmirani bentonitni tepisi se u posljednje vrijeme sve manje pojavljuju na tržištu.

U odlagalištima otpada, bentonitni tepisi mogu se naći unutar temeljnog i pokrovnog brtvenog sustava, bilo kao zamjena za zbijenu glinu (CCL) ili kao njezin nadomjestak. Prema mjestu ugradnje i namjeni za koju se ugrađuju, bentonitni tepisi moraju zadovoljiti različite kriterije. Tako su za tepihe ugrađene u temeljni brtveni sustav važni kriteriji: hidraulička provodljivost, kemijska kompatibilnost, kapacitet sorpcije i otpornost na dugotrajna djelovanja (npr. utjecaj kemijskih tvari ili termičko djelovanje). Za završni pokrov odgovarajući kriteriji su: kontaktna i unutrašnja posmična čvrstoća, utjecaj isušivanja, otpornost na ciklus smrzavanje-odmrzavanje. U literaturi su navedene već opće poznate prednosti i nedostaci bentonitnih tepiha. Usporedo sa sve češćom upotrebom, intenziviraju se i istraživanja njihovih svojstava, posebice: procjeđivanje usljed advekcije i difuzije, kemijska kompatibilnost, mehaničke osobine, trajnost i migracija plinova (Bouazza et al., 2002).

U načelu postoje dva koncepta za projektiranje pokrovnog i temeljnog brtvenog sustava. Prvi se temelji na propisanim vrijednostima – (*eng. prescriptive ili product-based design*), dok se drugi temelji na praćenju ponašanja (*eng. performance based design*). Većina zemalja propise je temeljila prema prvom konceptu propisujući npr. minimalnu debljinu glinene barijere i njezinu propusnost. Drugi pristup uzima u obzir prirodno okruženje u kojem se gradi odlagalište (npr. korištenje zemljišta i vodnih potencijala, klima). Time je omogućena upotreba alternativnih materijala (pa i GCL) u odlagalištima, naravno uz dokaz o njihovom ekvivalentnom ponašanju (Katsumi et al.; 2001, Bouazza et al.; 2002).

Problem procjene ekvivalentnosti GCL-a i klasičnih sustava sa zbijenom glinom (CCL) predmet je proučavanja već više od deset godina. Opsežna literatura o tom problemu objavljena je na dvije specijalizirane konferencije o bentonitnim tepisima (Koerner et al.; 1995, Zanzinger et al.; 2002). Iskustva dobivena dugogodišnjom proizvodnjom i primjenom GCL-a u različitim geotehničkim zadacima, najnovije trendove u proizvodnji GCL-a i usporedbu s klasičnim sustavom (CCL) opsežno je opisao Heerten (2002). Njegov je zaključak također sukladan konceptu praćenja ponašanja. Projektant je odgovoran da na odgovarajući način provjeri da li je primjena GCL-a moguća u određenim 'uvjetima sredine' te osigura primjenu postojećih normi pri projektiranju i ugradnji GCL-a.

Sa stajališta mehaničkih osobina, bentonitni tepisi imaju dvije osobine važne za praktičnu primjenu: vrlo nisku propusnost i malu posmičnu čvrstoću. Niska propusnost uglavnom je poželjno svojstvo u raznim objektima, a naročito pri izgradnji nepropusnih barijera. Nasuprot tomu, mala posmična čvrstoća često je kritična veličina pri projektiranju odlagališta, naročito ako se GCL koristi na pokosima. U radu su pokazani rezultati laboratorijskih ispitivanja provedenih na jednoj vrsti nearmiranog bentonitnog tepiha. Ponašanje GCL-a uspoređeno je s ponašanjem gline u pokusu bubrenja i kompresije. Također, daje se kritički osvrt na ispitivanja u uređaju za izravno smicanje koja se provode u skladu s normom (ASTM D 6243).

## BUBRENJE I KONSOLIDACIJA BENTONITNOG TEPIHA

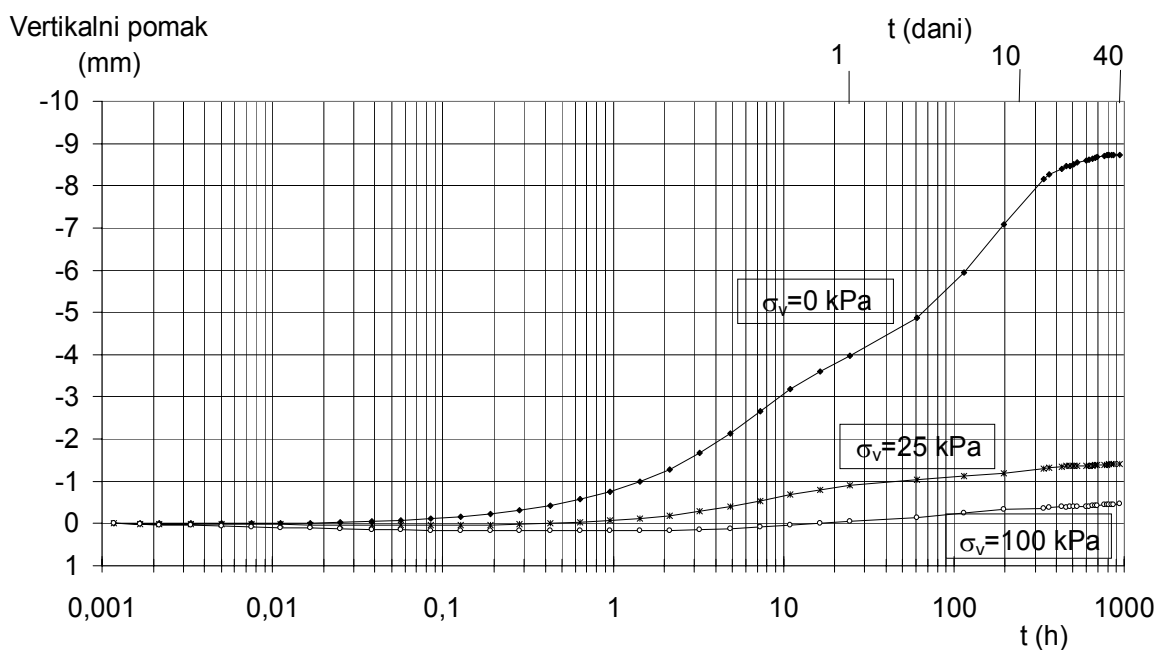
U okviru ispitivanja posmične čvrstoće bentonitnog tepiha (Kovačević Zelić; 2000) provedena su i ispitivanja bubrivosti prema normi ASTM D 4546-90. Pri tome su korišteni uzorci bentonitnog tepiha

poznatog pod komercijalnim nazivom Claymax 200R, koji pripada skupini nearmiranih bentonitnih tepiha. Korištene su dvije procedure za ispitivanje bubrivosti: slobodno bubrenje, ( $\sigma_v' = 0$  kPa), te bubrenje pod određenim vertikalnim opterećenjem ( $\sigma_v' = 25$  kPa i  $\sigma_v' = 100$  kPa). Vertikalni pomaci mjereni su sve dok nije postignuta zanemarivo mala promjena, što je u našem slučaju iznosilo oko 40 dana. Početne ( $h_0$ ) i konačne visine ( $h_k$ ) uzoraka bentonitnog tepiha navedene su u tablici 1.

**Tablica 1.** Pokus bubrenja

Uzorak	$\sigma_v'$ (kPa)	$h_0$ (mm)	$h_k$ (mm)	$(h_k/h_0) \times 100$ (%)
1	0	5,46	14,20	260
2	25	5,40	6,82	126
3	100	5,10	5,56	109

Iz pokazanih rezultata može se uočiti da su svi uzorci pokazali povećanje visine, koje je najveće u slučaju slobodnog bubrenja (uzorak 1), dok je ta promjena visine manja pri porastu vertikalnog napreznja (uzorci 2 i 3). U kasnije provedenim pokusima izravnog smicanja, pokazalo se da je vertikalno napreznje od oko 200 kPa potrebno za potpuno sprječavanje bubrenja navedenog bentonitnog tepiha. Na slici 1 pokazan je razvoj vertikalnih pomaka u vremenu za pokus bubrenja. Jedino je uzorak bez vertikalnog opterećenja bubrio od samog početka pokusa, dok je u druga dva slučaja bubrenje započelo naknadno nakon početne kratkotrajne faze slijeganja. Dakle, o veličini vertikalnog napreznja zavisi ne samo konačni iznos vertikalnog pomaka nego i njegov vremenski razvoj.

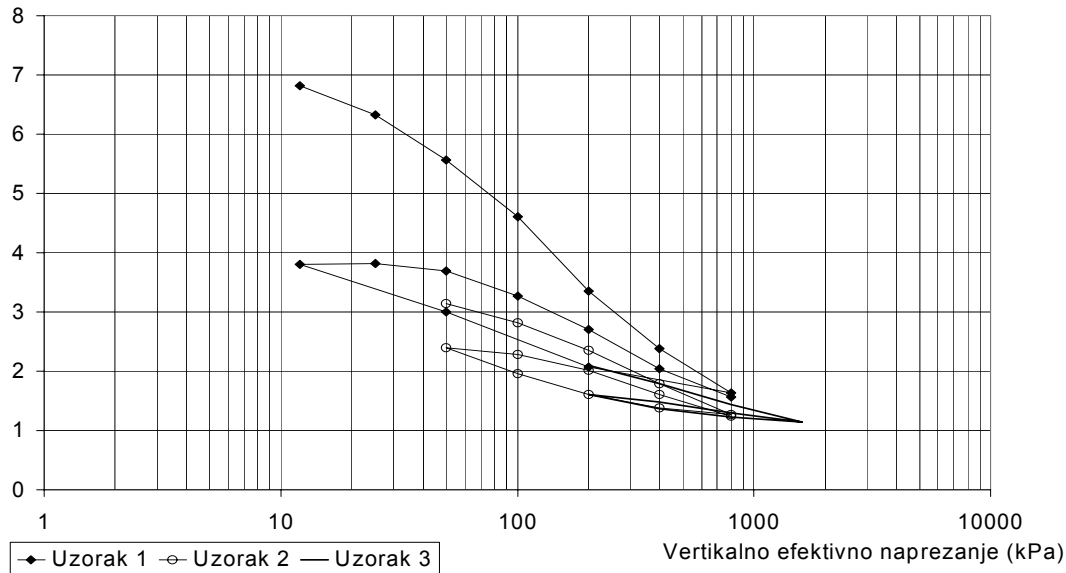


**Slika 1.** Bubrenje bentonitnog tepiha.

Na istim uzorcima je nakon bubrenja u trajanju od 40 dana, bez vađenja iz edometarske ćelije proveden pokus jednodimenzionalne konsolidacije. Na slici 2 pokazana je ovisnost koeficijenta pora o vertikalnom napreznju. Treba uočiti dosta visoke početne vrijednosti koeficijenta pora za uzorak 1, koji je slobodno bubrio bez vertikalnog opterećenja.

Rezultati ova dva pokusa korišteni su naknadno za planiranje procedure pripreme uzoraka bentonitnog tepiha za pokus izravnog smicanja, kao i za procjenu potrebne brzine smicanja za ostvarivanje dreniranih uvjeta prema relaciji navedenoj u normi ASTM D 3080. Tako je određena potrebna brzina smicanja od 0,001 mm/min, koja se bitno razlikovala od preporučene (1 mm/min) prema tada važećoj normi za ispitivanje bentonitnih tepiha (ASTM D 5321).

Koeficijent pora



Slika 2. Pokus jednodimenzionalne konsolidacije.

## POKUS IZRAVNOG SMICANJA

### Uvodno razmatranje

Pokusi smicanja provedeni su na uzorcima nearmiranog bentonitnog tepiha iz nekoliko razloga. Poznato je da armirani bentonitni tepisi imaju veću vršnu posmičnu čvrstoću, ali rezidualna je čvrstoća identična čvrstoći nearmiranih tepiha tj. čvrstoći bentonita (Gilbert et al.; 1996). Jedina je razlika što se rezidualne vrijednosti postižu pri većim pomacima. Pokusima provedenim na armiranim bentonitnim tepisima mjeri se simultano doprinos svih komponenti (sintetičke niti, bentonitna glina) na čvrstoću, ali se jasno ne može razlučiti njihov pojedinačni doprinos niti međusobni utjecaj (Richardson; 1997). Naše je mišljenje bilo da treba provesti ispitivanja na nearmiranim bentonitnim tepisima, kako bi se utvrdilo ponašanje bentonitne gline kao ključne komponente ovog kompozita. Osim toga kod nearmiranih bentonitnih tepiha veličina uzorka nije kritični parametar pokusa, te se oni mogu provesti u standardnom uređaju za smicanje kod kojeg se samo napravi mala modifikacija kutije za smicanje, kako bi se prvenstveno riješio problem učvršćivanja uzorka vrlo male debljine (5-7 mm).

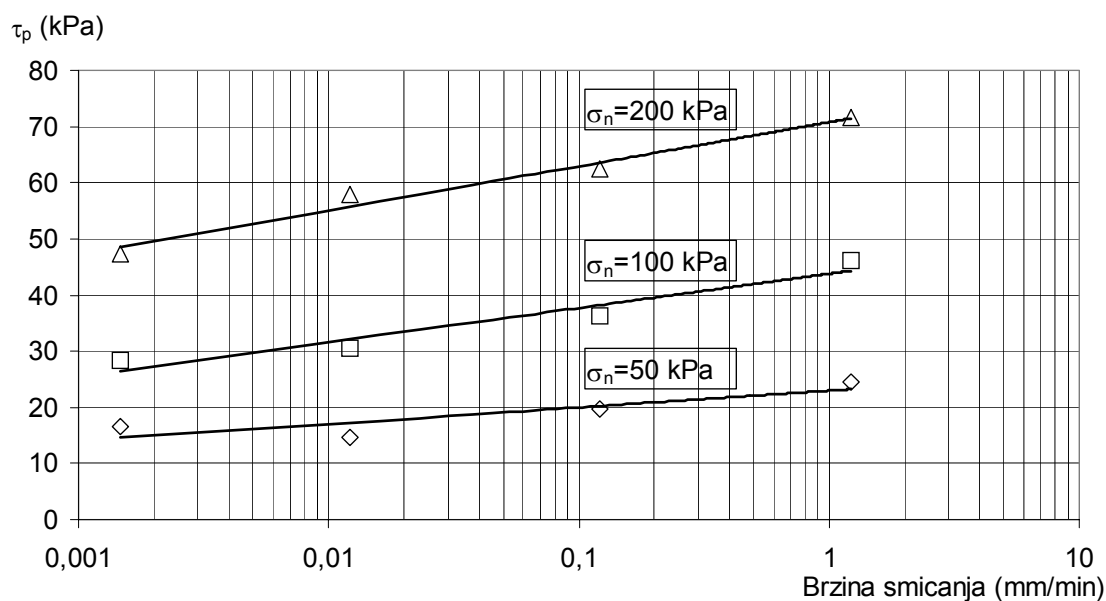
Pregledom objavljenih podataka o posmičnoj čvrstoći bentonitnih tepiha uočen je vrlo velik raspon izmjerenih vrijednosti, najvjerojatnije zbog primjene različitih postupaka kako prilikom pripreme uzoraka tako i prilikom samog smicanja. Do 1998. godine nije postojala odgovarajuća norma za ispitivanje bentonitnih tepiha, obzirom da bentonitni tepisi nisu bili u širokoj upotrebi. U nedostatku te norme primjenjivala se norma ASTM D 5321, namijenjen 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. Pored toga, laboratorijske

procedure ispitivanja razlikovale su se i po sljedećim značajkama: vrsta uređaja za smicanje, veličina uzorka, postupak pripreme uzorka, raspon normalnih naprezanja. Norma ASTM D 6243 za ispitivanje bentonitnih tepiha pojavila se 1998. godine, no još je uvijek dosta toga ostavljeno prilično nedefinirano tj. projektanti trebaju odrediti način provođenja pokusa prema specifičnom problemu kojeg treba riješiti te prema izabranoj vrsti proizvoda.

### Prvi program ispitivanja

Analiza publiciranih podataka pokazala je da su ključni parametri pokusa postupak pripreme tj. hidratacije uzorka i brzina smicanja, pa je naš prvi program ispitivanja planiran primjereno tomu. Primijenjene su dvije procedure hidratacije uzoraka: standardna u trajanju od 24 sata (serije I-IV), i produljena u trajanju od 9 dana (serija V). Tijekom hidratacije kontinuirano su praćeni vertikalni pomaci. Nakon te faze uslijedilo je smicanje korištenjem četiri različite brzine.

Rezultati ispitivanja pokazali su da sporije smicanje i dulja hidratacija uzoraka uzrokuju smanjenje čvrstoće kod bentonitnih tepiha. Kako bi se jasnije pokazali razlozi tomu, detaljnije su navedena mjerenja provedena u pokusima smicanja u tablici 2. Uspoređujući serije I i V, kod kojih je brzina smicanja ista a duljina hidratacije bitno različita, uočava se da su totalni iznosi vršnih i rezidualnih čvrstoća manji za seriju V. To je vjerojatno posljedica značajno većih konačnih vlažnosti uzoraka iz serije V. Utjecaj brzine smicanja na rezultate uočava se uspoređivanjem rezultata iz serija I-IV kod kojih je hidratacija uzoraka bila ista tj. trajala je 24 sata. Sporije smicanje uzrokuje smanjenje izmjerene čvrstoće, što je pokazano i na slici 3 za vršne vrijednosti (serije I-IV). Isti trend dobiva se i za rezidualne vrijednosti.



**Slika 3.** Ovisnost vršne posmične čvrstoće o brzini smicanja.

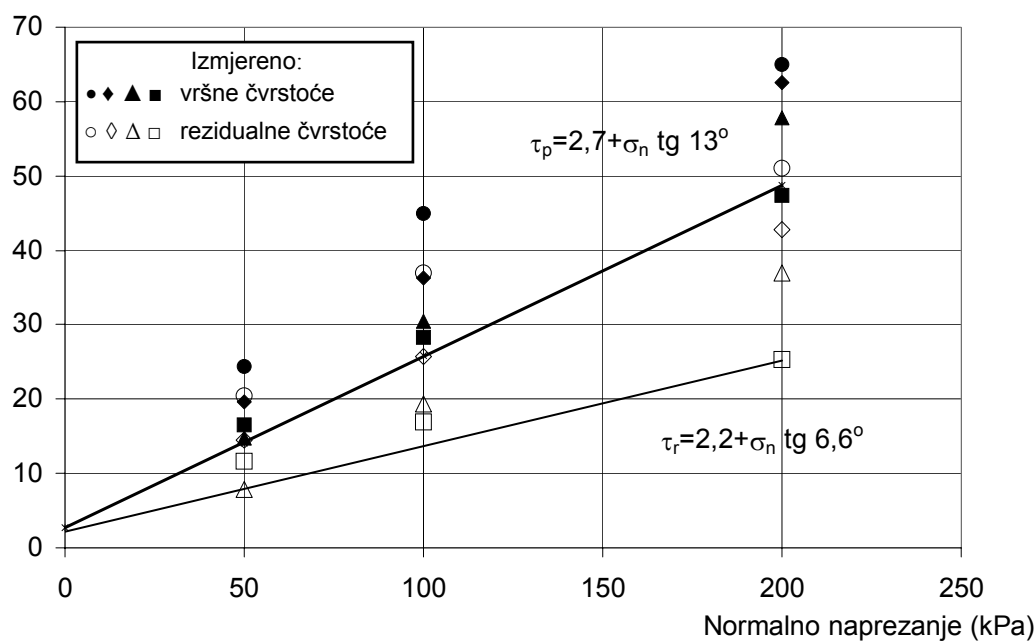
Obzirom na rezultate edometarskih pokusa i pokusa izravnog smicanja, predložen je za potrebe projektiranja kriterij čvrstoće nearmiranog bentonitnog tepiha kako je pokazano na slici 4. Vršna anvelopa loma dobivena je tako da su podaci pokazani na slici 3 ekstrapolirani na brzinu smicanja 0,001 mm/min za sva tri normalna naprezanja. Navedena brzina određena je na temelju edometarskih pokusa kao brzina potrebna za ostvarivanje dreniranih uvjeta u pokusu smicanja. Ekstrapolacijom dobivene vrijednosti daju pravac kojim se definira vršna čvrstoća (slika 4). Na identičan način dobiven je pravac koji pokazuje rezidualnu čvrstoću.

**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće

Uzorak	Brzina smicanja (mm/min)	Normalno naprezanje (kPa)	Vršna čvrstoća (kPa)	Rezidualna čvrstoća (kPa)	Vertikalni pomak*	Konačna vlažnost (%)
I – 1		50	24,4	20,4	+	80,88
I – 2	1,219	100	46,1	37,6	+	66,44
I – 3		200	71,5	59,5	+	57,67
II – 1		50	19,7	14,5	+	85,32
II – 2	0,1219	100	36,3	25,7	+	64,37
II – 3		200	62,5	42,8	+	53,00
III – 1		50	14,7	7,9	–	85,41
III – 2	0,01219	100	30,4	19,3	+	71,82
III – 3		200	57,8	36,9	+	58,97
IV – 1		50	16,5	11,7	–	122,61
IV – 2	0,00146	100	28,3	16,9	–	78,97
IV – 3		200	47,4	25,3	0	60,25
V – 1		50	22,5	14,9	+	124,51
V – 2	1,219	100	37,2	27,3	+	93,10
V – 3		200	66,7	45,1	+	71,76

\* Slijeganje +, bubrenje -, bez promjene 0

Posmično naprezanje (kPa)



**Slika 4.** Čvrstoća bentonitnog tepiha.

Na temelju prve serije ispitivanja zaključili smo da je za interpretaciju rezultata važno pratiti iznose početnih i konačnih vlažnosti uzoraka, kao i vertikalnih pomaka tijekom smicanja. Naime, nedovoljno hidratizirani bentonit nastaviti će proces bubrenja tijekom pokusa smicanja, a to će utjecati i na čvrstoću.

U vrijeme izvođenja ove serije pokusa norma ASTM D 6243 nije još postojala. Unatoč tomu, primijenjene su neke procedure koje su sada normom prihvaćene. U normi se navodi kako uzorak mora biti veličine najmanje 300×300 mm, ukoliko se ne dokaže kako se i na manjem uzorku dobivaju jednaki rezultati. Veliki uzorak potreban je kod ispitivanja armiranih bentonitnih tepiha ali ne i kod nearmiranih. Pokazali smo da se ista ispitivanja mogu provesti na malom uređaju, čija je prilagodba za provođenje ovakvih pokusa minimalna, vezana za rješavanje problema ugradnje i učvršćivanja GCL-a u uređaj. Za ispitivanja nearmiranih tepiha nema stoga potrebe investirati u vrlo skupe uređaje s velikom kutijom za smicanje.

Norma ASTM D 6243 sigurno je donijela napredak u ispitivanju GCL-a, u odnosu na ranije primjenjivane postupke. No, za istraživačke svrhe smatramo da diskusija o utjecaju procedure hidratacije, brzine smicanja, dreniranih-nedreniranih uvjeta u uzorku i efekata puzanja nije do kraja završena. Da bi se razriješile navedene dileme predložili smo na temelju iskustava iz vlastitih ispitivanja da za pravilno provođenje pokusa izravnog smicanja treba zadovoljiti sljedeće uvjete (Kovačević Zelić et al.; 2002):

- uzorci trebaju imati istu početnu vlažnost
- uzorci moraju biti potpuno hidratizirani prije smicanja
- smicanje treba provoditi brzinama pri kojima neće doći do pojave puzanja.

Prvi uvjet potrebno je zadovoljiti kako bi se smanjio rasap rezultata, te kako bi se kvalitetnija interpretacija mogla obaviti na temelju konačnih vlažnosti postignutih u smicanju. Drugim uvjetom omogućuje se razdvajanje fenomena bujanja od dilatancije u smicanju. Kako se u pokusu izravnog smicanja ne mogu mjeriti porni pritisci, brzinu smicanja za postizanje dreniranih uvjeta treba procijeniti na temelju edometarskog pokusa (prema normi za tlo ASTM D 3080). Ukoliko se primjene premale brzine moguća je pojava puzanja, a pokusi predugo traju što nije praktično za rad laboratorija.

Shodno tomu, na temelju iskustava iz prve serije pokusa, predložena je procedura ispitivanja bentonitnih tepiha u pokusu izravnog smicanja:

- FAZA 1: homogenizacija uzoraka
- FAZA 2: hidratacija uzoraka u trajanju od 7, 14 i 28 dana
- FAZA 3: smicanje brzinama 0,1 i 0,01 mm/min.

Prvu fazu treba provoditi u spremniku s konstantnom relativnom vlagom i temperaturom. Time bi se dobili uzorci jednake početne vlažnosti. U drugoj fazi, vlaženje uzoraka u trajanju od 28 dana treba omogućiti potpunu hidrataciju uzoraka i završen proces bubrenja. Ta bi serija dala referentne vrijednosti. Druge dvije serije pokusa (hidratacija 7 ili 14 dana) koristile bi se za utvrđivanje utjecaja procedure hidratacije u odnosu na referentnu seriju. Konačno, korištenje dviju brzina smicanja u trećoj fazi omogućilo bi primjenu postupka interpretacije ekstrapolacijom na potrebnu brzinu smicanja od 0,001 mm/min (određenu edometarskim pokusom). Trajanje faze smicanja tako bi bilo značajno smanjeno u odnosu na potrebnu. Za ostvarivanje relativne deformacije od 10% (veličina uzorka 100×100 mm), potrebno je 100 minuta uz brzinu smicanja 0,1 mm/min, odnosno oko 16,5 sati za brzinu smicanja 0,01 mm/min. Korištenjem predloženog postupka ekstrapolacije dobiva se podatak za brzinu smicanja 0,001 mm/min, za što bi pokus inače trebao trajati gotovo 7 dana.

## **Drugi program ispitivanja**

Druga serija ispitivanja istog bentonitnog tepiha po predloženoj proceduri upravo je u tijeku. U ovom radu pokazani su samo preliminarni podaci. U tablicama 3 i 4 navedene su vrijednosti vršnih i rezidualnih posmičnih čvrstoća dobivenih u drugoj seriji pokusa, a ponovno su navedeni i podaci za prvu seriju radi lakše usporedbe. Na slici 5 također su zbirno pokazani svi rezultati iz prve i druge serije pokusa preko odnosa izmjerene vršne posmične čvrstoće i konačne vlažnosti uzoraka postignute tijekom čitavog trajanja pokusa (faza hidratacije i faza smicanja).

**Tablica 3.** Vršna posmična čvrstoća

Brzina smicanja (mm/min)	Normalno naprezanje (kPa)	Vršna posmična čvrstoća (kPa)			
		1. serija	2. serija		
		Duljina hidratacije			
		1 dan	7 dana	14 dana	28 dana
0,1219	50	19,7	19	18,5	25
	100	36,3	29	28	30
	200	62,5	53	48	54
0,01219	50	14,7	15	14,5	15
	100	30,4	25	-	25
	200	57,8	41	45	44

**Tablica 4.** Rezidualna posmična čvrstoća

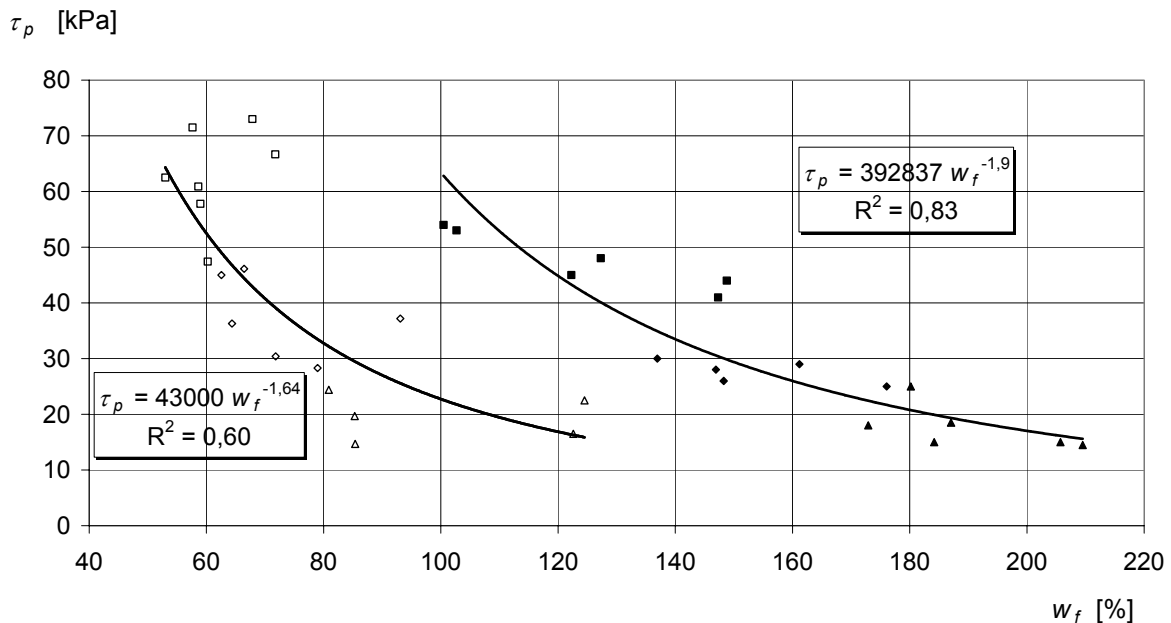
Brzina smicanja (mm/min)	Normalno naprezanje (kPa)	Vršna posmična čvrstoća (kPa)			
		1. serija	2. serija		
		Duljina hidratacije			
		1 dan	7 dana	14 dana	28 dana
0,1219	50	14,5	12	10	16
	100	25,7	20	17	15
	200	42,8	31	27	34
0,01219	50	7,9	8	7	8
	100	19,3	13	-	11
	200	36,9	16	17	19

Pregledom rezultata u tablicama 3 i 4, možemo zaključiti da su izmjerene vrijednosti posmičnih čvrstoća u drugoj seriji pokusa manje nego u prvoj, što je posljedica puno dulje faze hidratacije. Interesantno je, međutim, da razlike unutar druge serije pokusa nisu značajno velike, kako smo to očekivali. Pretpostavljamo da je to posljedica dugotrajne homogenizacije koja prethodi ugradnji uzoraka u uređaj za smicanje. Obzirom na veliku sposobnost apsorpcije vode bentonitne gline, čini se da su uzorci u spremniku gdje slobodno bubre (bez vertikalnog opterećenja) već ostvarili veliki dio svog kapaciteta apsorpcije. Nakon ugradnje u ćeliju s vertikalnim opterećenjem njihova daljnja hidratacija znatno je manja. Pretpostavljamo da je to razlog što smo za različite duljine hidratacije (7, 14 i 28 dana) dobili dosta slične iznose čvrstoće. Konačan stav o razlozima ovakve pojave moći ćemo dati nakon detaljnije analize početnih i konačnih vlažnosti uzoraka, kao i načina deformiranja u fazi smicanja (slijeganje – bubrenje).

Ono što je obećavajuće i potvrđuje naše pretpostavke nakon provedene prve serije ispitivanja, uočava se na slici 5. U drugoj seriji pokusa dobili smo puno bolju funkcionalnu vezu između konačne vlažnosti i čvrstoće uzoraka. Rasap rezultata u drugoj seriji znatno je manji, što potvrđuje našu tezu da treba provesti homogenizaciju početne vlažnosti uzoraka prije provođenja pokusa. Na žalost, niti u drugoj seriji ispitivanja nismo u potpunosti mogli ostvariti jednake početne uvjete. Naime, imali smo na raspolaganju samo jednu kutiju za smicanja iako bi trebalo imati seriju od tri (za tri različita normalna naprezanja), pa početne vlažnosti uzoraka nisu bile potpuno jednake.



Utjecaj brzine smicanja na rezultate ispitivanja potvrđen je i u drugoj seriji, obzirom da su za manju brzinu ponovno dobivene manje čvrstoće. Detaljnije objašnjenje svih uočenih pojava moći ćemo dati nakon analize svih izmjerenih parametara tijekom druge serije pokusa.



LEGENDA:

PRVA SERIJA	DRUGA SERIJA
□ $\sigma=200$ kPa	■ $\sigma=200$ kPa
◇ $\sigma=100$ kPa	◆ $\sigma=100$ kPa
△ $\sigma=50$ kPa	▲ $\sigma=50$ kPa

**Slika 5.** Ovisnost vršne posmične čvrstoće  $\tau_p$  o konačnoj vlažnosti uzorka  $w_f$ .

## ZAKLJUČAK

Laboratorijski pokusi provedeni u okviru ovog istraživanja pokazali su važnost ispitivanja pojave bubrenja kod bentonitnih glina i bentonitnih tepiha. Rezultati takvih pokusa mogu se koristiti ne samo pri planiranju pokusa izravnog smicanja nego i za procjenu drugih važnih svojstava kao što su propusnost i stišljivost, te za potrebe projektiranja i terenske ugradnje bentonitnih tepiha u objektima razne namjene.

Pokusima izravnog smicanja pokazano je da se standardni uređaj za smicanje može koristiti za ispitivanje nearmiranih bentonitnih tepiha, uz korištenje modificirane kutije što je daleko jeftinije rješenje od nabave skupih uređaja s velikim uzorcima.

Na temelju rezultata predložen je kriterij čvrstoće za nearmirani bentonitni tepih koji se može koristiti za potrebe projektiranja. No, za istraživačke svrhe potrebno je detaljnije objasniti utjecaj hidratacije i bubrenja bentonitnih glina na rezultate smicanja, kao i istražiti eventualno postojanje pojava puzanja pri sporom smicanju. Upravo je tako usmjereno laboratorijsko ispitivanje koje se provodi u drugoj fazi istraživanja. Preliminarni rezultati pokazani u ovom članku obećavajući su.

Kritičko razmatranje trenutno važećih normi, laboratorijskih postupaka i procedura doprinosi razvoju novog koncepta u projektiranju odlagališta otpada temeljenog na praćenju ponašanja. Bentonitni tepisi sigurno će se sve više upotrebljavati u bliskoj budućnosti. Često u prirodnim ležištima nema gline u dovoljnim količinama ili ne zadovoljavaju stroge kriterije za ugradnju u brtvene sustave (npr. područja krša). U takvim situacijama potencijal korištenja bentonitnih tepiha kao zamjenskog materijala za gline je velik. Pri tome treba imati na umu kritične parametre za svaki pojedinačni slučaj uzimajući u obzir

prirodno okruženje u kom se određeni objekt nalazi. Istraživanje provedeno u okviru ovog rada trebalo bi poslužiti kao poticaj da se u projektiranju raznih objekata gdje su potrebne brtvene barijere razmotre rješenja s korištenjem bentonitnog tepiha barem kao jednom od alternativa.

## LITERATURA

- (1) Bouazza, A., Zornberg, J.G., Adam, A. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. Proceed. 7th ICG - Nice, France, Vol. 2, 445-507.
- (2) Frobel, R. K. (1996). Geosynthetic clay liners, part five: interface and internal shear strength determination, Geotechnical Fabrics Report, October/November, 20-23.
- (3) Gilbert, R.B., Fernandez, F. & Horsfield, D.W. (1996). Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner. ASCE Journal of Geotechnical Engineering 122(4), 259-266.
- (4) Heerten, G. (2002). Geosynthetic clay liner performance in geotechnical applications, Proceed. Int. Symposium - Clay geosynthetic barriers (Eds: Zanzinger, H., Koerner, R.M., Gartung, E.), Nuremberg, Germany, 16-17. April, 2002. A.A.Balkema, Lisse.
- (5) Katsumi, T., Benson, C.H., Foose, G.J., Kamon, M. (2001). Performance-based design of landfill liners, Engineering Geology, 60, 139-148.
- (6) Koerner, R.M., Gartung, E., Zanzinger, H. (1995). Geosynthetic clay liners, Proceed. Int. Symposium, Nuremberg, 14-15. April, 1994, A.A.Balkema, Rotterdam.
- (7) Kovačević Zelić, B. (2000). Ispitivanje posmične čvrstoće bentonitnih tepiha, Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- (8) Kovačević Zelić, B., Znidarčić, D., Kovačić, D. (2002). Shear strength testing on a GCL. Proceed. 7th ICG - Nice, France, Vol. 4, 1329-1334.
- (9) Richardson, G.N. (1997). GCL internal shear strength requirements. Geotechnical Fabrics Report, 15(3), 20-25.
- (10) Zanzinger, H., Koerner, R.M., Gartung, E. (2002). Clay geosynthetic barriers, Proceed. Int. Symposium, Nuremberg, 16-17. April, 2002, A.A.Balkema, Lisse.
- (11) ASTM D 3080 – 90 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- (12) ASTM D 4546 – 90 Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.
- (13) ASTM D 5321 – 92 Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by Direct Shear Method.
- (14) ASTM D 4439 – 97a Standard Terminology for Geosynthetics.
- (15) ASTM D 6243 – 98 Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method.