

Ž. Veinović; prof. dr. P. Kvasnička

Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska

S. Sesar; dr. I. Vrkljan, znan. suradnik

Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, Hrvatska

ISPITIVANJE VODOPROPUSNOSTI ALTERNATIVNIH MATERIJALA ZA IZRADU BRTVENIH SLOJEVA ODLAGALIŠTA KOMUNALNOG OTPADA U KRŠU

SAŽETAK: Cilj provedenih ispitivanja bio je određivanje koeficijenata propusnosti alternativnih materijala, koji bi se mogli rabiti za izradu brtvenih slojeva odlagališta komunalnog otpada u kršu. Kao primjer takvog materijala odabrana je otpadna kamena prašina, dobivena obradom arhitektonsko-građevnog (AG) kamena. U Hrvatskoj, odnosno u njenom krškom dijelu, postoji više pilana AG kamena u kojima se kao specifičan problem nameće odlaganje otpadne kamene prašine. Uporabom tog materijala u svrhu izrade brtvenih slojeva riješio bi se problem njegovog odlaganja kao i problem iznalaženja odgovarajućeg vododrživog materijala za zaštitne slojeve odlagališta komunalnog otpada. Ispitivanjima je trebalo odrediti: zadovoljava li ovaj materijal primarni zahtjev vezan uz brtvene slojeve - da je koeficijent propusnosti manji od 1×10^{-7} cm/s. Određivanje koeficijenta propusnosti provedeno je metodom zadane protoke ("flow-pump" pokusom). Rezultati ispitivanja su pokazali da je koeficijent propusnosti nešto veći od kriterija, ali autori smatraju da se ovaj problem može riješiti dodavanjem aditiva.

KLJUČNE RIJEČI: Alternativni materijali, brtveni slojevi, odlagalište otpada, koeficijent propusnosti, otpadna kamena prašina, pokus sa zadanim protokom.

COEFFICIENTS OF PERMEABILITY OF SOME ALTERNATIVE MATERIALS FOR MINERAL LINERS OF LANDFILLS IN CARST

SUMMARY: The aim of research was to determine coefficients of permeability of some alternative materials concerning their possible application in landfill liners in karst regions. As a representative of this materials, chosen was a waste stone dust, produced in dimension stone processing plants. In Croatian karst regions there are many dimension stone processing plants with a problem of waste stone dust disposal. By using this material as a mineral liner two problems may be solved: the disposal of a stone dust and the problem of finding appropriate landfill lining material. The aim of research presented in the paper was to determine whether this material meets primary demand concerning landfill liners, that is - whether its coefficient of permeability is less than 1×10^{-7} cm/s. The coefficients of permeability were measured by laboratory flow-pump test. The results showed that the coefficients of permeability were something above the criteria but authors expect that this problem can be solved by applying some additives.

KEY WORDS: Alternative materials, liners, landfill, coefficient of permeability, waste stone dust, flow-pump test.

1. UVOD

Teritorij Hrvatske se većim dijelom sastoji od sedimentnih stijena koje pokrivaju oko 95 % njene površine, od čega otprilike polovina otpada na krš (Kovačić et al. 1998). Jedan od značajnijih problema vezanih uz zaštitu okoliša u Republici Hrvatskoj jest sanacija smetlišta te projektiranje i izgradnja sanitarnih odlagališta. Gradnja sanitarnih odlagališta posebno je složena u krškim područjima, gdje je tlo mahom jako propusno i omogućuje izravnu komunikaciju oborinskih i procjenih voda s podzemnom vodom. Da se sprijeći utjecanje zagađenih procjednih voda iz odlagališta otpada u podzemne vode, neophodno je izvesti kvalitetne brtvene slojeve u sustavu površinske i temeljne zaštite odlagališta otpada.

Materijali za brtvene slojeve moraju zadovoljiti niz propisanih kriterija, od kojih je, vjerojatno najvažniji - zahtjev za niskom vrijednošću koeficijenta propusnosti. Prema hrvatskom "Pravilniku o uvjetima za postupanje s otpadom" (1997) najveća dopuštena vrijednost koeficijenta propusnosti brtvenih slojeva odlagališta otpada I kategorije (odlagališta komunalnog i nekih vrsta tehnološkog otpada) mora biti jednaka ili manja od 1×10^{-7} cm/s, a za brtvene slojeve odlagališta II kategorije (odlagališta nekih vrsta tehnološkog otpada) od 1×10^{-5} cm/s. U krškom području Hrvatske nema dovoljnih količina materijala čija bi propusnost zadovoljila tražene kriterije, a uporaba bila ekonomski isplativa i opravdana. Od umjetno dobivenih, posebno su interesantni materijali koji su nusprodukt u nekom tehnološkom procesu, pa su i sami otpad.

U Hrvatskoj postoji nekoliko većih pogona za iskorištavanje i obradu arhitektonsko-gradevnog (AG) kamena, primjerice, kamenolomi i postrojenja firme "Kamen - Pazin" iz Pazina te pogon za obradu kamena "Klesarstvo Lucić" iz Samobora. Prilikom obrade AG kamena stvaraju se veće količine vrlo fine kamene prašine koja predstavlja tehnološki otpad i mora se na odgovarajući način zbrinuti. Najčešće se odlaže na deponije u neposrednoj blizini pogona za obradu. Premda se do sada u nekoliko navrata pokušalo taj materijal korisno upotrijebiti, odgovarajuće rješenje još nije pronađeno.

Uz dobru ugradivost, kemijski rezistivitet na utjecaj agresivnih fluida oslobođenih iz otpada i slične zahtjeve glede brtvenih slojeva odlagališta komunalnog otpada, najvažniji je, već spomenuti, zahtjev za niskim koeficijentom propusnosti tih slojeva. U geomehanici je uvriježen način ispitivanja propusnosti metodom s vremenski promjenljivom ili stalnom razlikom potencijala (uz uporabu edometra ili troosnog uređaja). Kod obje se metode zadaje razlika potencijala (tlakova u vodi), a mjeri količina procjeđenog fluida.

Ideja da se uporabi obrnuti postupak, tj. da se zadaje protoka, a mjeri promjena pornog tlaka kao posljedica nametnute protoke, primijenjena je u praksi tek kada je preciznost mjerjenja porasla toliko da je omogućila mjerjenje malih protoka (Olsen 1985, Aiban i Znidarčić 1989). Metoda je naročito pogodna za slabopropusne materijale kod kojih je potrebno dugo čekati da se procjede dobro mjerljive količine vode. Ovim se postupkom postiže brzo i kvalitetno određivanje koeficijenta propusnosti, no usprkos svojim prednostima, ovaj se postupak rijetko susreće u praksi.

2. PREGLED LITERATURE

Ideja o uporabi alternativnih materijala za izradu brtvenih slojeva odlagališta nije nova. Nedostatak odgovarajućih materijala za izradu brtvenih slojeva odlagališta komunalnog otpada u kršu potaknuo je projekt istraživanja drugih materijala koji bi mogli biti zanimljivi te se u članku Kovačića et al. (1998) kao materijal za tu svrhu predlaže istarski fliš. Fliš se u krškom području, u sklopu geoloških formacija toga kraja, ponaša kao vodonepropusna barijera, što upućuje na to da ovaj materijal posjeduje brtvena svojstva.

Alternativne materijale tražili su i Barrington i Hengnirun (1966). Oni su predlagali da se, kao brtveni sloj u gnojnici, umjesto betona, ugrađuje materijal dobiven mljevenjem vapnenca. Istraživanja su bila usmjerenja ka utvrđivanju kakvoće filtrata nakon procjedivanja kroz sloj vagnenačkog praha. Izložen filtratu koji sadrži organske tvari, porozni medij uglavnom gubi dio svoje propusnosti. Mechanizmi brtvljenja mogu se svrstati u tri grupe: mehanički, biološki i kemijski:

- **Mehaničko brtvljenje** nastupa kad su krute čestice koje filtrat sadrži (nosi) krupnije od pora brtvenog sloja pa se zbog toga u njemu zaustavljuju.
- **Biološko brtvljenje** izazivaju mikroorganizmi u vidu biljne smole (engl. *gum*) i polisaharida. To su ugljikohidrati s na površini vrlo gusto raspoređenim električno pozitivno nabijenim mjestima. Oni se adhezivno vežu na stijenke pora brtvenog sloja što, ako su pore izložene intenzivnom protjecanju bioloških nusprodukata, u konačnosti dovodi do njihovog začepljenja.
- **Kemijsko brtvljenje** nastaje kad filtrat kemijski reagira s česticama brtvenog sloja. Gleizacija (engl. *gleization*) je kemijski proces, koji se događa u zasićenim uvjetima, a kod kojeg ugljikohidrati služe kao hrana anaerobnim mikroorganizmima koji vrše redukciju i otapaju metalne okside u čvrstim česticama brtvenog sloja. Ti se metali izdvajaju u nakupinama i začepljuju pore (makropore) što uzrokuje smanjenu propusnost.

Barrington i Hengnirun su na temelju mjerena propusnosti pri raznim uvjetima zaključili da su biološki i kemijski procesi brtvljenja nestabilni i da brtvljenje sloja vapnenog praha prvenstveno ovisi o mehaničkom brtvljenju. Tu je važan i odnos čestica koje nosi filtrat prema veličini pora u brtvenom sloju, jer se čestice filtrata veće od promjera pora zadržavaju i dodatno brtve sloj. Ako se, međutim, ne uzme u obzir ovaj proces, već se postavi kriterij u odnosu na propuštanje čiste vode, može se pretpostaviti da će dobiveni rezultat biti na strani sigurnosti. Naravno, ako zadovolji kriterije vodopropusnosti, materijal tek "ulazi među materijale kandidate" koje treba ispitati i obzirom na druge moguće štetne pojave.

3. MATERIJAL I METODE

Prvi korak u mjerenu bio je provjera same metode zadane protoke. Naime, iako je metoda poznata već dvadesetak godina, zbog njezine rijetke primjene, obavljena je i korelacija s paralelnim "klasičnim" mjeranjima na istovrsnim uzorcima u edometru i troosnom uređaju. Nakon ove preliminarne provjere krenulo se s ispitivanjima svojstava kamene prašine.

3.1. Porculanska glina

Za provjeru uređaja odabran je i poseban materijal - porculanska glina. Porculanska glina je umjetno proizveden materijal u tvornici keramike "Inker" u Zaprešiću. Materijal je pretežno **kaolin** s nešto dodataka, a proizvodi se ustaljenim postupkom tako da ima stalan, određenim zahtjevima propisan sastav. Za pretpostaviti je da takav materijal ima i ustaljena svojstva, zbog čega je pogodan za kontrolna mjerena (Lovičić, 1981). Za potrebe ovog ispitivanja važno je da koeficijent propusnosti porculanske gline bude blizu tražene vrijednosti od 1×10^{-7} cm/s. Granulometrijski sastav kaolina prikazan je na slici 4.

3.2. Pokus mjerena propusnosti metodom zadane protoke (*flow-pump test*)

Mjerenje koeficijenta propusnosti materijala metodom zadane protoke (*laboratory flow-pump test*) proizašlo je iz očite prednosti ovog testa pred uobičajenim metodama, a to je da se protoka može preciznije **nametnuti** nego **mjeriti** kao posljedica nametnute razlike potencijala na krajevima uzorka (Kvasnička, Matešić, 1994). Druga je prednost ovog postupka da se stacionarno tečenje, i kroz slabopropusni uzorak, uspostavlja u relativno kratkom roku, pa je, za vrijeme trajanja jednog "klasičnog" ispitivanja moguće obaviti i desetak ispitivanja sa zadanim protokom. Time se, ovisno o broju potrebnih ispitivanja, može isplatiti i nešto skuplja oprema kakva je, primjerice, potrebna za zadavanje protoke.

Postupak je inverzan postupku mjerena koeficijenta propusnosti sa stalnim padom potencijala u troosnom uređaju. Uzorak se ugradi u troosnu čeliju i konsolidira, a njegova zasićenost se osigurava povratnim tlakom (*back pressure*). Kroz konsolidirani uzorak nameće se zadana protoka - s donje strane uzorka, a na drugom kraju - gornjoj strani, početni porni tlak održava se stalnim. Kao reakcija

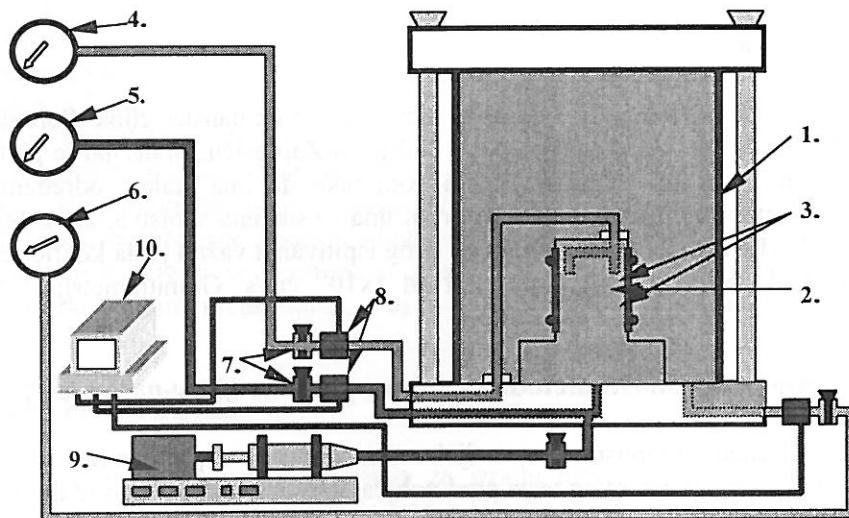
na nametnutu protoku, na donjoj strani uzorka dolazi do postupnog porasta pornog tlaka. Kada se tlak ustali, znači da je uspostavljenje stacionarno tečenje kroz uzorak, pa možemo odrediti hidraulički gradijent i . Kako nam je poznata protoka možemo odrediti i koeficijent propusnosti, prema D'Arcyjevom zakonu, kao odnos protoke i gradijenta:

$$k = \frac{V}{i} = \frac{\frac{V}{At}}{\frac{\Delta u}{\gamma_w} - \Delta l} \quad (1)$$

gdje su:

- k ... koeficijent propusnosti;
- v ... brzina tečenja kroz jediničnu površinu uzorka;
- i ... hidraulički gradijent;
- V ... volumen vode;
- A ... površina uzorka;
- t ... vrijeme;
- Δu ... promjena pornog tlaka;
- Δl ... put na kojem se mijenja potencijal;
- γ_w ... zapreminska težina vode.

Shematski prikaz uređaja predstavljen je slikom 1.



LEGENDA:

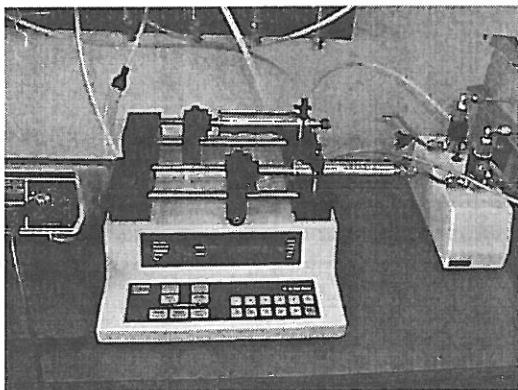
- | | |
|---|---|
| 1. troosna čelija; | 6. regulacija/održavanje čelijskog tlaka; |
| 2. uzorak; | 7. ventili; |
| 3. porozne pločice; | 8. osjetila za tlak; |
| 4. regulacija/održavanje pornog tlaka na kapi uzorka; | 9. pumpa za zadavanje protoke; |
| 5. regulacija/održavanje pornog tlaka na bazi uzorka; | 10. bilježenje i obrada podataka. |

Slika 1. Shema uređaja za određivanje koeficijenta propusnosti metodom zadane protoke.

Uzorci promjera 7,0 cm i visine 1,9 cm ugrađuju se u klasičnu troosnu čeliju. Tijekom prve faze pokusa, konsolidacije uzorka, gornji i donji porni tlak se održavaju konstantnim. Na početku druge faze zatvara se ventil koji vodi ka regulatoru tlaka na bazi uzorka i pumpom se počinje nametati protoka. Osjetilima za mjerjenje tlaka registriraju se vrijednosti pornog tlaka na bazi i kapi uzorka te vrijednost čelijskog tlaka. Kada se tlak na bazi ustali, pokus se smatra završenim, zaustavlja se pumpa za nametanje protoke i otvara ventil prema regulatoru pornog tlaka na bazi.

Na svakom uzorku obavljene su četiri serije ispitivanja pri konsolidacijskim naprezanjima od 50, 100, 200 i 400 kN/m². Svaka serija ispitivanja uključuje nekoliko različitih protoka čiji iznosi ovise o ispitivanom materijalu. Propusniji materijal zahtijevat će veću protoku, no ovdje treba voditi računa o hidrauličkim gradijentima koji bi se trebali kretati u granicama $i=10 \div 40$. Velike protoke bi izazvale turbulentno tečenje kroz uzorak i poremetile njegovu strukturu, što bi rezultiralo krivim mjerjenjima. Rezultati mjerjenja koeficijenta propusnosti ne bi se smjeli razlikovati obzirom na iznos zadane protok, u navedenim granicama, ali bi se trebali razlikovati obzirom na konsolidacijsko opterećenje (veće opterećenje - manji koeficijent propusnosti).

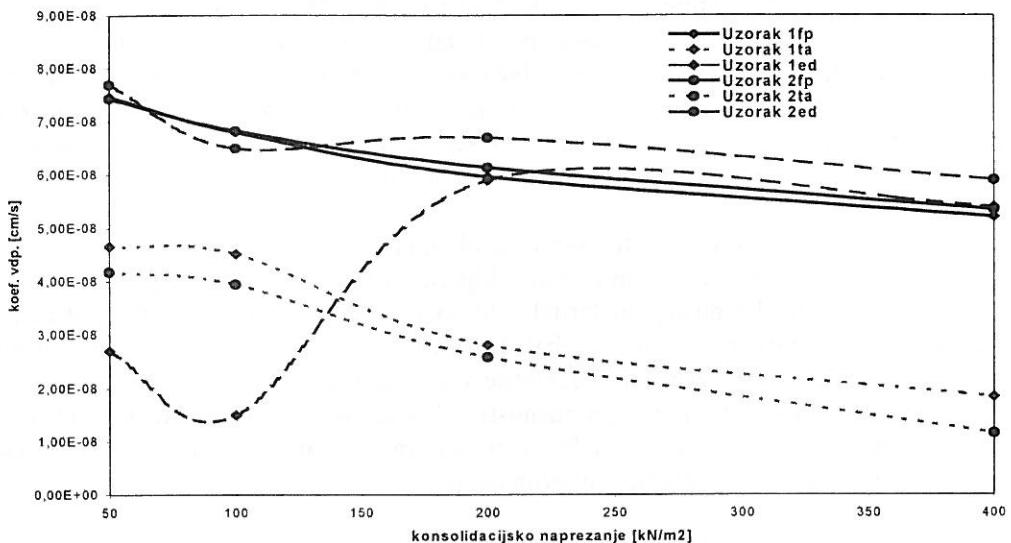
Za nametanje zadane protok je medicinska pumpa *Harvard Apparatus Syringe Pump Model '33'* (slika 2). Ona nije posebno namijenjena ovoj vrsti ispitivanja, ali se, uz neka ograničenja, može upotrijebiti. Pumpa ima dvije injekcije (šprice) za ubrizgavanje tekućine, čiji se volumeni kreću od 10 µl do 50 ml. O veličini montirane injekcije ovisi mogućnost nametanja protoka: minimalne - 0.0073 µl/h s injekcijom od 10 µl, i maksimalne - 53.346 ml/min s injekcijom od 50 ml. Ova ispitivanja provedena su s injekcijom od 50 ml, čiji je minimalni protok 24.42 µl/h. Spajanjem pumpe na računalo protoku je moguće kontrolirati računalom, što daje dodatne mogućnosti ispitivanjima.



Slika 2. Puma za nametanje protok: *Harvard Apparatus Syringe Pump*.

3.3 Korelacija metoda na porculanskoj glini

Kao što je već rečeno, ispitivanja provedena na kaolinu trebala su poslužiti kao korelacija metode s nametnutom protokom i drugih, već uvriježenih metoda za mjerjenje vodopropusnosti. Tako su usporedno mjerjenjima vodopropusnosti zadanom protokom obavljena i mjerjenja vodopropusnosti s promjenljivom razlikom potencijala u edometarskom uređaju, odnosno metodom sa stalnom razlikom potencijala u troosnom uređaju. Rezultati mjerjenja su prikazani na slici 3. Iz dijagrama je vidljivo da su koeficijenti propusnosti dobiveni mjerenjem sa zadanom protokom bliski onima dobivenim u edometru, dok rezultati troosnog ispitivanja nešto razlikuju, ali su još uvijek u prihvatljivim granicama. Ova se razlika pripisuje načinu mjerjenja pornih tlakova. Naime, razlika pornih tlakova, koja izravno utječe na veličinu koeficijenta propusnosti, određuje se kao razlika dvaju velikih brojeva (pornih tlakova na bazi i kapi uzorka). Apsolutna pogreška mjerjenja tlakova se višestruko odražava na mjerenuj nijove razlike, pa se u uređaj planira ugraditi novo osjetilo - za mjerjenje razlike tlakova.



LEGENDA:

Uzorak 1fp → prvi uzorak kaolina, flow-pump test; **Uzorak 2fp** → drugi uzorak kaolina, flow-pump test;
Uzorak 1ta → prvi uzorak kaolina, troosni uređaj; **Uzorak 2ta** → drugi uzorak kaolina, troosni uredaj;
Uzorak 1ed → prvi uzorak kaolina, edometar; **Uzorak 2ed** → drugi uzorak kaolina, edometar;

Slika 3. Korelacija metoda mjerjenja koeficijenta propusnosti na porculanskoj glini.
Oba uzorka su imala ista svojstva (vidi tablicu 2, podaci za kaolin).

3.4. Kamena prašina

Kamena prašina se u proizvodnji AG kamena pojavljuje kao otpadni materijal nastao prilikom piljenja kamenih blokova u ploče, odnosno pri brušenju i poliranju ploča. Zavisno od porijekla i vrste stijena čiji se blokovi obrađuju, kamena prašina po sastavu može biti "granitna", "vapnenačka" odn. "mramorna" i miješana¹. Najčešće se na odlagalištima nalazi smjesa granitne i vapnenačke kamene prašine kod koje udio pojedinog materijala ovisi o dnevnoj proizvodnji ploča u pogonu za obradu. Za potrebe istraživanja uzorci kamene prašine uzeti su iz pogona "Klesarstva Lucić" iz Samobora. Kemijski sastav miješane kamene prašine dan je u tablici 1.

Gubitak žarenjem	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
4,64	41,00	16,63	10,50	17,86	8,19	0,12	0,71	0,39

Tablica 1. Kemijski sastav miješane kamene prašine iz pogona "Klesarstva Lucić" (brojčane vrijednosti su postotci).

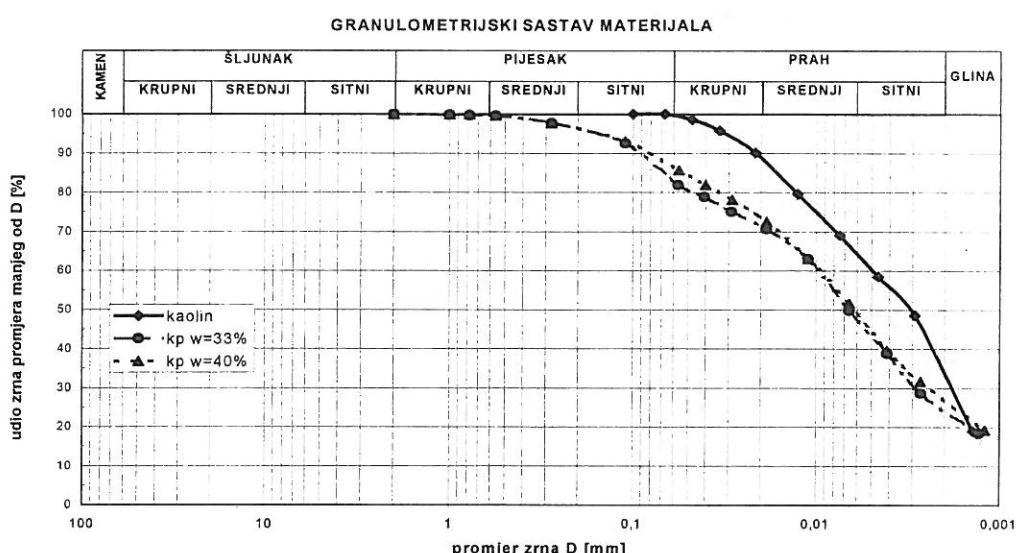
Uzimajući u obzir kemijsku analizu može se konstatirati da je količina željeza znatno veća nego što bi mogla potjecati iz silikatnih minerala, a objašnjava se trošenjem materijala alata za piljenje i obradu kamena. Tomu u prilog govori i činjenica da je dio čestica dosta feromagnetičan. Analizom talne vode (filtrata dobivenog procjeđivanjem redestilirane vode kroz uzorak prašine) utvrđeno je prisustvo izdvojenog mangana u iznosu od 0,4 ppm i željeza 0,55 ppm. Ove vrijednosti su bliske nuli pa se može smatrati da ne bi došlo do izluživanja Fe i Mn procjeđivanjem vode kroz materijal.

¹ Naziv *granitna* dolazi od komercijalnog naziva *graniti* pod kojim se na tržište plasiraju sve vrste kamena magmatetskog porijekla, dok se pod nazivom *mramori* često puta zapravo misli na vapnence.

Geomehanička ispitivanja materijala dala su rezultate prikazane u tablici 2., a granulometrijski sastav prikazan je na slici 4.

MATERIJAL	SPECIFIČNA GUSTOĆA [g/cm ³]	PRIRODNA VLAŽNOST [%]	GRANICA TEČENJA [%]	GRANICA PLAST. [%]	INDEKS PLAST. [%]
Kaolin	2,59	30,74	44,35	24,94	19,41
Kamena prašina 1	2,96	33	46,24	29,04	17,20
Kamena prašina 2	2,96	40	46,24	29,04	17,20

Tablica 2. Specifična gustoća i Atterberg-ove granice ispitivanih materijala.



Slika 4. Granulometrijski sastav materijala ispitivanih *flow-pump* testom. Na dijagramu su usporedno prikazani sastav kaolina te granulometrijski sastav uzorka kamene prašine (kp) pripremljenih *Proctor-om* u uvjetima optimalne (w = 33 %) i povećane vlažnosti (w = 40 %).

Određivanjem karakteristika zbijanja, metodom Proctor-a, dobiven je podatak o optimalnoj vlažnosti pri ugradnji od $w = 33\%$, pri suhoj jediničnoj težini $\gamma_d = 13,7 \text{ kN/m}^3$. Relativni porozitet takovog materijala iznosi $n = 0,515$.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

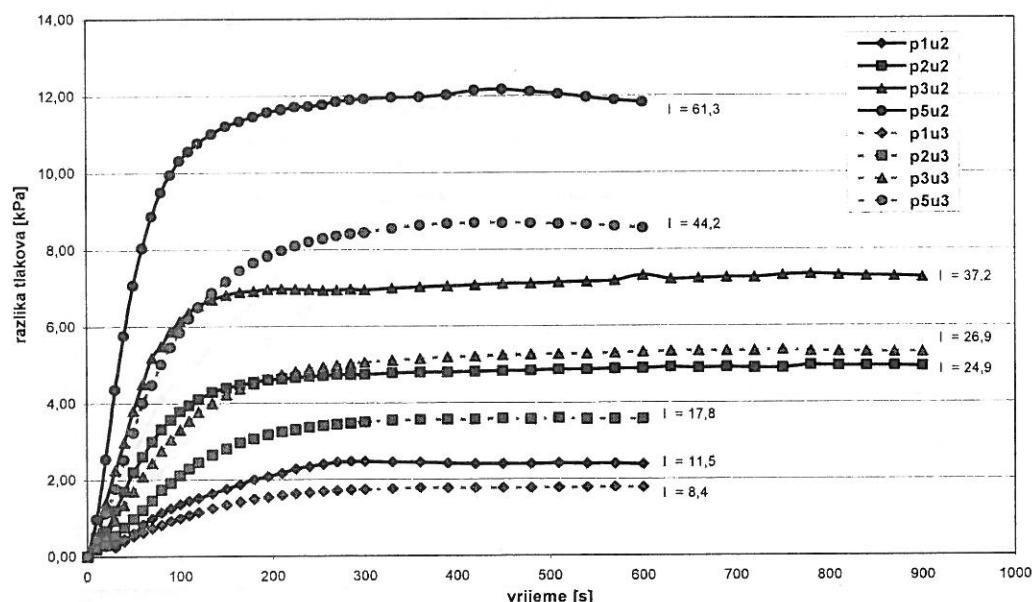
REZULTATI MJERENJA. Početna mjerena, obavljena na kaolinu, provedena su u svrhu "kalibracije" uređaja, odnosno uhodavanja metode.

Ugrađeni uzorci ostavljeni su oko 16 sati na konosolidaciji pri zadatom čelijskom i povratnom tlaku, uz obostrano dreniranje. Prije samog mjerena vodopropusnosti, radi (posredne) provjere stupnja saturacije, mjerilo se Skemptonov B-parametar (odnos inkrementa pornog i čelijskog tlaka u nedreniranom stanju). Tijekom ispitivanja B-parametri za uzorce u troosnom uređaju bili su između (0,98±1) dok su u pokusu zadane protoke bili nešto niži, što treba pripisati prevelikoj stišljivosti cijevi i spojeva.

Vodopropusnost je mjerena po četiri dana na jednom uzorku - za konsolidacijska naprezanja od 50, 100, 200 i 400 kN/m², a s protokama koje su odgovarale materijalu od kojeg je uzorak uzet.

Odabrane protoke za mjerjenja na kaolinu iznosile su: 300, 600, 800 i 1000 mm³/h ($\mu\text{l}/\text{h}$), a za kamenu prašinu: 1000, 2000, 3000 i 5000 mm³/h ($\mu\text{l}/\text{h}$). Odabir protoka bazirao se na tome da **minimalna protoka** bude ona kod koje pokus daje (suvisle) rezultate i kod koje je hidraulički gradijent veći od 10 ($i > 10$), a da **maksimalna protoka** - bude ona kod koje je hidraulički gradijent manji od 40 ($i < 40$). Prema njemačkim preporukama (GLR, 1993), prilikom mjerjenja koeficijenta propusnosti brtvenih slojeva odlagališta otpada, hidraulički gradijent treba biti $i = 30$, odnosno, određuje se prema uvjetima na terenu.

Rezultati mjerjenja - promjena razlike tlakova u vremenu te odgovarajući hidraulički gradijenti prikazani su na slici 5, a veličine koeficijenta propusnosti kamene prašine dobivene ovim ispitivanjem na slici 6.



LEGENDA:

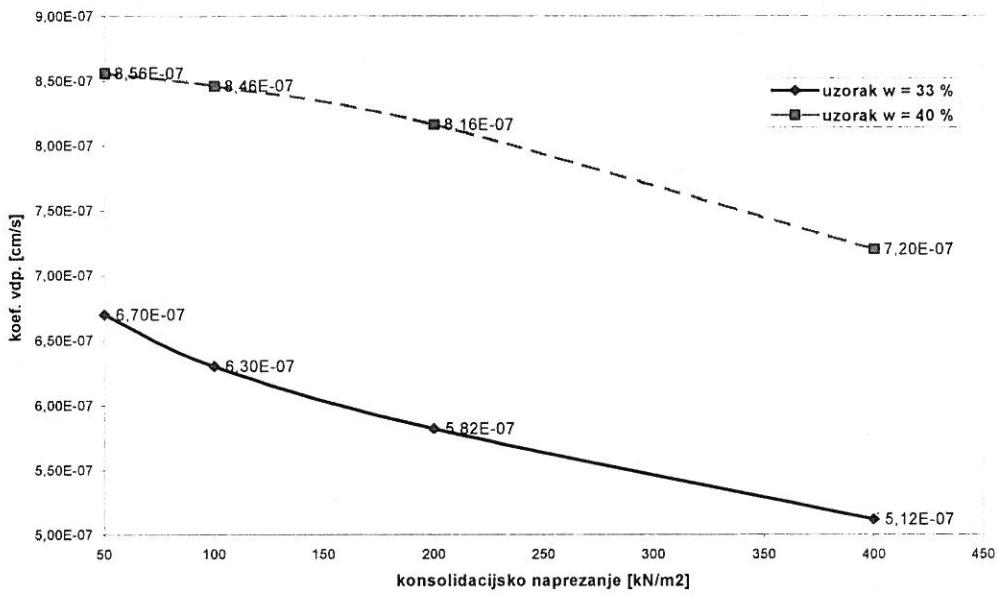
- p1-p5 - protoke od 1000 mm³/h do 5000 mm³/h;
- u2 - uzorak br. 2 sa optimalnom vlažnošću w=33%;
- u3 - uzorak br. 3 sa povećanom vlažnošću w=40%.

Slika 5. Promjena razlike pornih tlakova na bazi i kapi uzorka u vremenu.

Mjerjenja provedena na kaolinu pokazala su da metoda zadane protoke daje rezultate koji su bliski vrijednostima dobivenim u edometru i troosnom uređaju. Mjerjenja provedena na kamenoj prašini rađena su na dva tipa uzoraka. Prvi tip je uključivao uzorke pripremljene u Proctor-ovom aparatu s optimalnom vlažnošću od $w = 33\%$, a drugi tip je uključivao one pripremljene s povećanom vlažnošću $w = 40\%$. Ovim se htjelo provjeriti ovisnost koeficijenta propusnosti o prirodnoj vlažnosti (pri ugradnji), obzirom na mogućnost ugradnje uzorka na terenu s vlažnošću koja odstupa od optimalne.

Zanimljivo je primjetiti da su se vrijednosti koeficijenata propusnosti na ispitivanim uzorcima kamene prašine mogle očitati već u šestoj minuti pokusa, dok se kod kaolina trebalo čekati u prosjeku sat vremena. To je i bilo za očekivati s obzirom na razliku u svojtvima tih materijala.

Kao što se i očekivalo, s povećanjem konsolidacijskog naprezanja (nadpritisaka) došlo je do smanjenja koeficijenta propusnosti. Ovo bi trebalo uzeti u obzir kod projektiranja odlagališta, jer se nadpritisak povećava s povećanjem visine sloja otpada.



Slika 6. Rezultati ispitivanja koeficijenta propusnosti u ovisnosti o prirodnoj vlažnosti materijala i konsolidacijskom naprezanju.

Povećana vlažnost ugrađenog materijala (za 7 % veća od optimalne) uzrokovala je povećanje vrijednosti koeficijenta propusnosti, ali odstupanja nisu jako velika. Veći problem od navedenih odstupanja predstavlja otežano zbijanje u Proctor-ovom aparatu, jer se uzorak približio granici tečenja.

5. SMJERNICE ZA NASTAVAK ISPITIVANJA

Daljnja ispitivanja bit će vršena na ponešto modificiranom uređaju, što će utjecati na poboljšanje kvalitete mjerjenih podataka. Bit će omogućeno mjerjenje promjene volumena tijekom obje faze pokusa (konsolidacije i nametanja protoka) iz čega će se računati promjena koeficijenta pora uzorka.

Planirano je ispitivanje nekoliko vrsta kamene prašine (s većim udjelom CaCO_3) i ispitivanje istarskog fliša. Također se želi ispitati i mogućnost uporabe kamene prašine s dodatkom aditiva (npr. bentonita ili sl. minerala glina) koji bi joj smanjili vodopropusnost.

Osim navedenog, planira se usmjeravanje istraživanja ka ispitivanju fizičkih, kemijskih i bioloških mehanizama brtvljenja s obzirom na međudjelovanje filtrata odlagališta otpada i kamene prašine kao materijala za izradu brtvenih slojeva. Koliko je upitan negativan utjecaj nekih karakteristika filtrata na određene minerale sadržane u kamenoj prašini (pH vrijednost filtrata / CaCO_3) toliko je i upitan negativan utjecaj nekih komponenti filtrata na aktivnost minerala glina u klasičnim brtvenim slojevima.

6. ZAKLJUČAK

Mjerjenja propusnosti otpadne kamene prašine (*Klesarstvo Lucić*), uz pomoć metode sa zadanim protokom - "laboratory flow-pump test", kao rezultat daju vrijednosti koeficijenta propusnosti u iznosu od $8,56 \times 10^{-7}$ do $7,20 \times 10^{-7}$ cm/s pri uvjetima optimalne zbijenosti po Proctor-u.

Izmjerene vrijednosti koeficijenta propusnosti veće su od propisima zahtijevanih za brtvene slojeve odlagališta komunalnog otpada (1×10^{-7} cm/s), ali su u skladu sa zahtjevima glede brtvenih slojeva odlagališta nekih vrsta tehnološkog otpada (1×10^{-5} cm/s).

Na temelju prikazanih ispitivanja se može konstatirati da otpadna kamena prašina zadovoljava kao materijal za izradu brtvenih slojeva odlagališta II kategorije, a u svezi odlagališta I kategorije trebalo bi ispitati mogućnost dodavanja nekih aditiva (bentonit i sl.). Ovo ukazuje na eventualni smjer daljnjih ispitivanja.

Nastavak ispitivanja mogao bi se, također, usmjeriti ka utvrđivanju međudjelovanja filtrata odlagališta otpada i kamene prašine, odnosno efektima mehaničkog, biološkog i kemijskog brtvljenja.

Uporaba otpadne kamene prašine u svrhu izrade zaštitnih slojeva odlagališta otpada u krškim krajevima značila bi, s jedne strane, rješavanje problema iznalaženja za tu svrhu adekvatnog materijala u području koje s njim oskudjeva, a s druge strane - efikasan i jeftin način zbrinjavanja velikih količina industrijskog otpada.

ZAHVALA

Mjerenja i analize, opisane u ovom radu obavljene su u okviru znanstvenih projekata: "Geotehnologija za odlagališta otpada" (D. Kovačić), "Impervious barriers for landfills in karst" (D. Kovačić, D. Znidarčić), "Mineralni brtveni slojevi za odlagališta otpada" (P. Kvasnička). Dio mjerenja obavljen je u okviru diplomskih radova studenata Slađane Đurić i Matije Ferića. Koristimo ovu priliku da zahvalimo djelatnicima Inkera iz Zaprešića - teh. direktoru g. Kruni Uidenici i direktoru pogona porculana - gđi Miljenki Mandekić-Poteri, na pruženoj pomoći pri nabavci porculanske gline za ova ispitivanja. Posebno se želimo zahvaliti g. Stipi Luciću na pruženoj pomoći pri nabavci uzoraka kamene prašine.

Ispitivanja su obavljena u Zavodu za geotehniku Instituta građevinarstva Hrvatske, Zagreb.

BIBLIOGRAFIJA

- Aiban, S. A. & Znidarčić, D. (1989): Evaluation of the flow pump and constant head techniques for permeability measurements. *Géotechnique* 39, No. 4, 655-667.
- Barringtnon, S.F. & Hengnirun, S. (1996): Limestone liners to protect groundwater quality against organic wastewater seepage. *Water air and soil polution* 92. pp 315-327.
- GLR (1993): Geotechnics of Landfill Design and Remedial Work. Technical recommendations - GLR. Second edition. Ernst & Sons. 158 pp. Berlin.
- Kovačić, D., Kovačević-Zelić, B., Vrkljan, M. & Znidarčić, D. (1998): Impervious barriers for landfills in karst. In Marić, Lisac & Savits-Nossan (eds.), *Proc. XIth Danube-European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Poreč, 435-440, Rotterdam, Balkema.
- Kvasnička, P. & Matešić, L. (1994): Mjerenje vodopropusnosti pomoću zadane protoke uzoraka s lokacije odlagališta otpada u Zaprešiću. U Milanović (ed.), *Zbornik radova III simpozija Gospodarenje otpadom - Zagreb '94*, Zagreb, 306-313, Zagreb, ZGO.
- Lovinčić, M. (1981): Laboratorijsko ispitivanje vlačnih karakteristika gline. *Magistarski rad na Građevinskom institutu Fakulteta građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu*. Zagreb.
- Olsen, H., W., Nichols, R., W. & Rice, T., L. (1985): Low gradient permeability measurements in a triaxial system. *Géotechnique* 35, No. 2, 145-157.
- Pravilnik o uvjetima za postupanje s otpadom. *Narodne novine* Br. 123/97. (1997), Zagreb.