

# Prilog projektovanju vodonepropusnih slojeva deponija

Milica Karanac<sup>1</sup>, Mića Jovanović<sup>2</sup>, Eugène Timmermans<sup>3</sup>, Huib Mulleneers<sup>3</sup>, Marina Mihajlović<sup>1</sup>, Jovan Jovanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Inovacioni centar Tehnološko–metalurškog fakulteta u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Tehnološko–metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

<sup>3</sup>Trisoplast Mineral Liners International BV, The Netherlands

## Izvod

Deponije predstavljaju složen sistem koji potencijalno može zagaditi životnu sredinu, što se sprečava obezbeđenjem vodonepropusnosti prilikom njihovog projektovanja. Prvi deo preglednog rada bavi se analizom odgovarajućih tehničkih propisa, tumačenja i preporuka iz SAD, EU i Srbije, u cilju podsticanja valjanog usaglašavanja domaće prakse i propisa sa najboljim dostupnim tehnikama na međunarodnom nivou. U drugom delu rada uporedno su analizirane alternative prilikom projektovanja vodonepropusnih slojeva za oblaganje dna i prekrivanje deponija. Opisane su slabosti i prednosti korišćenja prirodne gline, bentonita, geosintetičke glinene obloge i različitih mešavina peska, bentonita i polimera. Rad zaključno formuliše predlog unapređenja nacionalnog propisa o odlaganju otpada na deponije.

*Ključne reči: projektovanje deponija, veštačka geološka barijera.*

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

U većini zemalja odlaganje otpada na deponije je sastavni deo integrisanog sistema upravljanja otpadom. I pored smanjenja otpada nekom vrstom tretmana (reciklaža, spaljivanje, kompostiranje, itd.), iz otpada ostaje određena količina koja se neminovno odlaže na deponije. U domaćoj naučnoj literaturi, izučavanje problematike zaštite životne sredine sa aspekta otpadnih materijala relativno malo je zastupljeno [1–9], dok je izučavanje problematike deponovanja otpada vrlo skromno [10–12]. Sa druge strane, u svetu naučna literatura bavi se mnogim aspektima izgradnje i rada deponija, posebno njenom stabilnošću, problemom vodonepropusnosti, osobinama materijala koji se koriste pri deponovanju, itd. [13–17]. Budući da deponije potencijalno mogu zagaditi životnu sredinu, neophodno je da se njihovo projektovanje vrši prema važećim propisima. U Evropskoj uniji je 1999. godine, po ugledu na propise Sjedinjenih Američkih Država, doneta je Direktiva o deponijama (u daljem tekstu Direktiva) [18]. U Republici Srbiji, po ugledu na evropsku Direktivu, 2010. godine, doneta je Uredba o odlaganju otpada na deponije (u daljem tekstu Uredba) [19].

Savremena deponija se ogleda u pravilnom odabiru lokacije za njenu izgradnju, valjanim projektovanjem i izgradnjom iste, upravljanjem i monitoringom tokom faze punjenja i valjanim zatvaranjem deponije i nadzorom nakon zatvaranja. Na savremenim deponijama odlažu se određeni tipovi otpada za koje je deponija

PREGLEDNI RAD

UDK 628.4/.8:502/5045

Hem. Ind. 67 (6) 961–973 (2013)

doi: 10.2298/HEMIND121227012K

projektovana, te postoje deponije za opasan, neopasan i inertan otpad [18]. Zahtevi koji se pri projektovanju deponija moraju ispuniti različiti su za svaku vrstu deponija i od velikog značaja su za sprečavanje ili smanjenje negativnih uticaja na zdravlje stanovništva i životnu sredinu, tako da se obezbedi kontrolisano upravljanje procednim vodama i izdvojenim gasovima [19]. Deponije predstavljaju složen sistem, koji je po pravilu, sastavljen od: donje zaštitne obloge, sistema za sakupljanje i odvođenje procednih voda (često i tretmana procednih voda, sa ili bez recirkulacije), drenažnog sloja, sistema za sakupljanje (često i tretman) otpadnih gasova, kao i sistema za monitoring gasnih emisija, procednih voda, zagađivanja podzemnih voda od strane deponije i prekrivnog sloja. Potencijalno zagađenje sprečava se postavljanjem barijera koje obezbeđuju vodonepropusnosti: a) dna deponije tokom faze eksploatacije, a zatim i b) prekrivnog sloja, nakon zatvaranja deponije, kako opasnog tako i neopasnog otpada. Poslednjih 20–30 godina korišćeni su različiti prirodni i veštački materijali za izgradnju vodonepropusnih slojeva deponija. Mnogi autori su se bavili ispitivanjem mogućih rešenja za oblaganje i prekrivanje deponija, posebno karakteristikama različitih pogodnih materijala [20–25], kao i njihovim interakcijama sa procednim vodama [26,27]. U prošlosti vladalo je mišljenje da prirodna glina može valjano obezbediti vodonepropusnost. Vremenom je pokazano da postoje znatno bolja rešenja, te se za tu svrhu danas nudi više različitih veštačkih materijala zasnovanih na oplemenjenim prirodnim sirovinama. U literaturi postoje tvrdnje da najveću otpornost prema procednim vodama ima mešavina peska, bentonita i polimera, koja takođe pokazuje

Prepiska: M. Jovanović, Tehnološko–metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: mica@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 27. decembar, 2012

Rad prihvaćen: 28. januar, 2013

izuzetnu otpornost na vlažno/suve cikluse, što je slabost prirodne gline [28,29].

Zatvaranje deponija vrši se nanošenjem prekrivnog, zaštitnog sloja koji sprečava dotok i prodor atmosferskih voda u telo deponije, kao i prodor otpadnih gasova iz tela deponije u okolinu. Zbog toga je veoma važan odabir valjanog materijala koji obezbeđuje nepropusnost deponije. Zatvorena, dobro projektovana i izgrađena, nepropusna deponija može biti iskorišćena da se iznad nje izgrade parkovi, sportski tereni, aerodromi, itd.

Cilj rada je da, vezano za problematiku projektovanja deponija, da doprinos pri izboru valjanih rešenja koje bi u potpunosti ispunila zahteve za obezbeđivanjem vodonepropusnosti deponija. Osnova za definisanje zahteva pri projektovanju deponija su važeći međunarodni i domaći propisi, te njihova tumačenja i preporuke. U radu se uporedno analiziraju moguće alternative prilikom projektovanja vodonepropusnih slojeva za oblaganje dna i prekrivanje deponija. Pitanje izgradnje vodonepropusnih slojeva deponija u Srbiji izuzetno je važno, jer su u toku aktivnosti sanacije, zatvaranja i rekultivacije vrlo velikog broja divljih deponija, izgradnje novih industrijskih deponija i izgradnje regionalnih sanitarnih deponija [30].

#### ANALIZA PROPISA ZA OBEZBEĐIVANJE VODONEPROPUSNOSTI

Projektovanje deponija zasniva se na primeni odgovarajućih nacionalnih propisa. Prve propise, sedamdesetih godina prošlog veka, uvele su Sjedinjene Američke Države (SAD). Usledili su srodni propisi zemalja Evropske Unije (EU), sa različitom koncepcijom i rešenjima, posebno u zahtevima za obezbeđivanjem vodonepro-

pusnosti deponija, sastava zaštitnog sloja, debljine slojeva i vrednosti koeficijenta propustljivosti. Odgovarajući propis Republika Srbija (RS) uvela je 2010. god. sa pretenzijom da isti u potpunosti bude usaglašen sa evropskim.

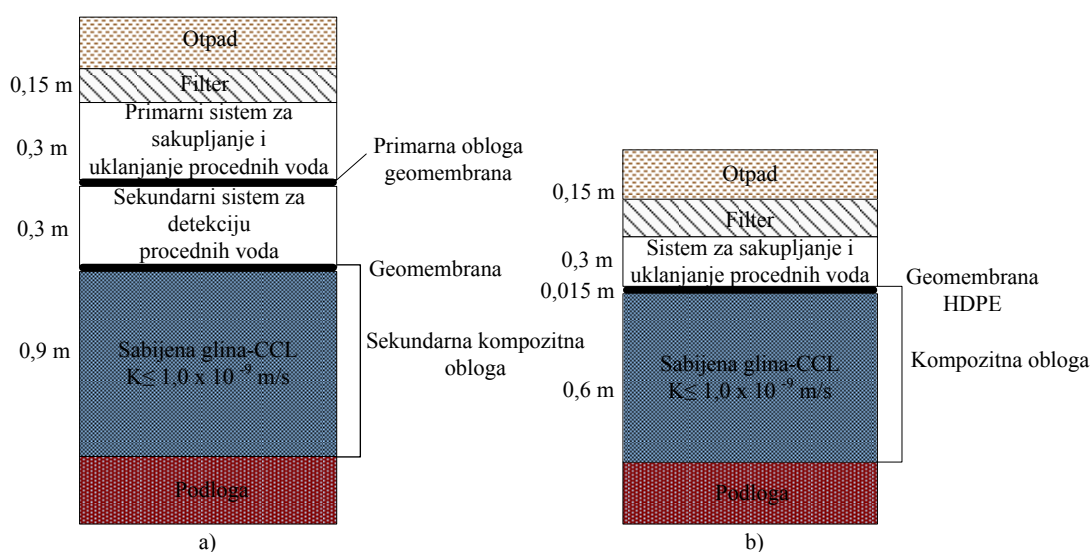
#### Sjedinjene Američke Države

Propisi iz oblasti upravljanja otpadom postoje od sedamdesetih godina prošlog veka i od tada su više puta menjani. Prema vrsti otpada doneti su propisi koji se odnose na opasan i neopasan-komunalni čvrsti otpad [31,32]. Smernice Američke agencije za zaštitu životne sredine US EPA (eng. *United States Environmental Protection Agency*), zahtevi za oblaganje deponijskog dna i preporuke za izgradnju prekrivke deponije, u pogledu vodonepropusnosti – K i debljine, prikazane su na slikama 1 i 2 [33].

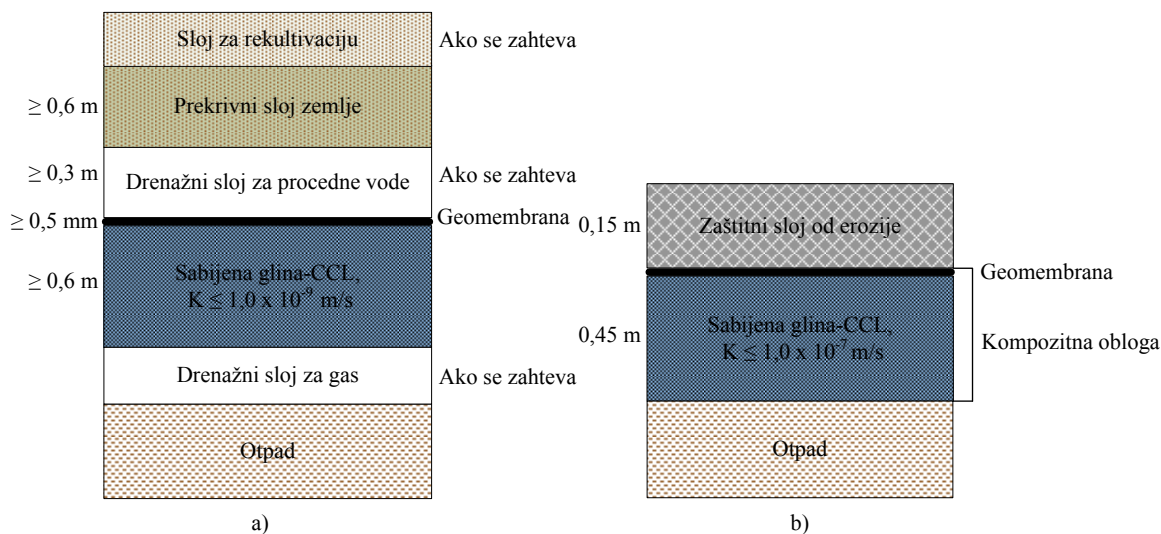
U prošlosti su u SAD, za obezbeđenje nepropusnosti, primenjivana sledeća rešenja: jednoslojna obloga izrađena od gline, takozvani sabijeni glineni sloj (eng. *Compacted Clay Liner, CCL*), geomembrane/fleksibilne membranske obloge (eng. *Flexible Membrane Liner, FML*) i geosintetički materijali (eng. *Geosynthetic Clay Liner, GCL* – bentonitna glina ojačana geomembranom ili geotekstilom).

Prema važećim propisima u SAD prilikom projektovanja deponije trebalo bi obezbediti sledeće:

– Dvoslojna kompozitna obloga (geomembrana, mineralni sloj) za dno deponije i sistem za sakupljanje procednih voda. U poređenju sa jednoslojnom oblogom obezbeđuje se dodatna zaštita podzemnih voda, omogućava se detekcija i sakupljanje procednih voda, takođe, povećava se kapacitet deponije. Kompozitna obloga se sastoji od dva ili više nisko propustljivih slojeva (geomembrana u kombinaciji sa geosintetičkom oblogom)



Slika 1. Zahtevi USA EPA za oblaganje dna deponije: a) opasnog i b) komunalnog čvrstog otpada.  
Figure 1. U.S. EPA requirements for the bottom lining of the landfill: a) for hazardous and b) for MSW.



Slika 2. Preporuka USA EPA za prekrivni sloj deponije: a) opasnog i b) komunalnog čvrstog otpada.  
Figure 2. U.S. EPA recommendation for the landfill cover: a) for hazardous and b) for MSW.

odvojenih drenažnim slojem. Dvoslojna obloga pruža efikasniju zaštitu javnog zdravlja i životne sredine po razumnoj ceni.

– Prekrivka deponije treba da bude sačinjena od: zaštitnog sloja sabijene gline ili geomembrane, drenažnog sloja i površinskog sloja, ekvivalentne propustljivosti ili manje kao obloga dna. Prekrivka treba da obezbedi zaštitu od erozije i infiltracije atmosferskih voda. Ukoliko se polietilen visoke gustine (eng. *High-Density Polyethylene, HDPE*) folija koristi za oblaganje dna deponije, onda za prekrivanje deponije nije neophodno korišćenje HDPE folije [34,35].

### Evropska Unija

U Evropskoj uniji postoje brojni propisi koji se odnose na oblast upravljanja otpadom [36–41]. Poblematiku izgradnje deponija otpada uređuje Direktiva o deponijama koja propisuje opšte kriterijume deponovanja otpada i određene tehničke standarde za deponije [18]. Tamo gde Direktiva ne obezbeđuje relevantne tehničke zahteve, primenjuju se opšti principi IPPC Direktive [42–44]. Sve zemlje Evropske unije su u obavezi da svoje nacionalne propise u potpunosti usklade sa zahtevima za projektovanje deponija propisanih u Direktivi.

Ključni tehnički zahtev, nezavisno od tipa deponije, je sprečavanje njenog zagađenja voda i zemljišta. Zaštita voda i zemljišta se postiže postavljanjem geološke barijere (eng. *geological barrier*), zaptivnog sloja i prikupljanjem procednih voda. Geološka barijera je određena geološkim i hidrogeološkim karakteristikama lokacije i sačinjena je od kombinacije geološke barijere i donje obloge deponije tokom radne faze i kombinacije geološke barijere i prekrivke nakon zatvaranja deponije. Kriterijumi za oblaganje dna i strana deponija u

smislu vodopropusnosti i debljine geološke barijere su sledeći:

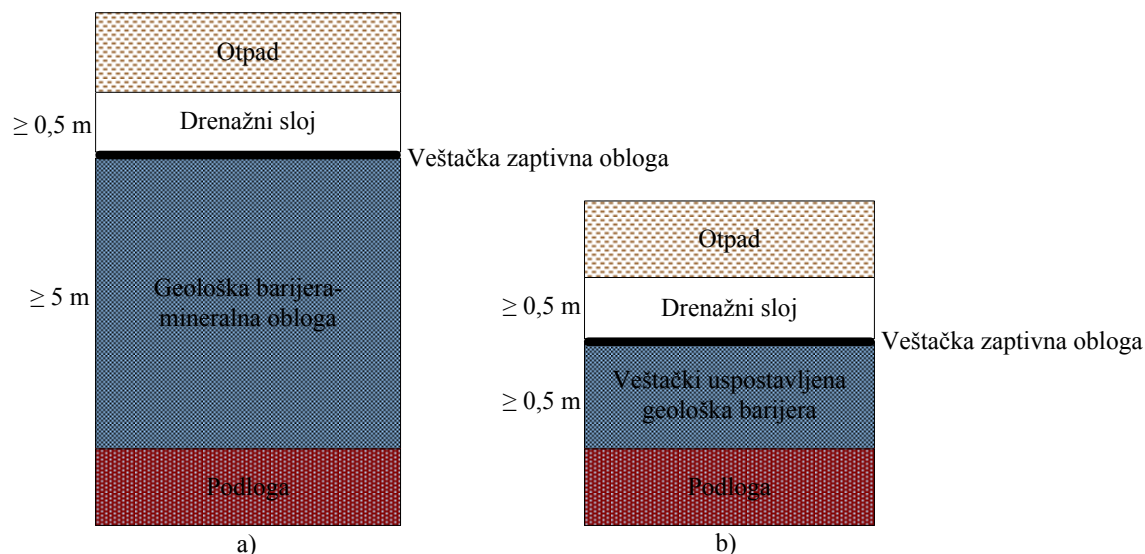
- deponije opasnog otpada:  $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$  m/s; debljina  $\geq 5$  m;
- deponije neopasnog otpada:  $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$  m/s; debljina  $\geq 1$  m;
- deponije inertnog otpada:  $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$  m/s; debljina  $\geq 1$  m.

Prema Direktivi o deponijama, tamo gde geološka barijera prirodno ne ispunjava propisane uslove zaštitni sloj se može završiti i veštački ojačati drugim materijalima koji pružaju ekvivalentnu zaštitu. Sloj veštački uspostavljene geološke barijere (eng. *artificially established geological barrier*) bi trebalo da bude minimalno 0,5 m (slika 3). Napominje se da prirodni teren može biti deo veštački uspostavljene barijere, pri debljini od 41 cm, zajedno sa 9 cm veštačkog sloja, koja ispunjava zahtevane uslove [45].

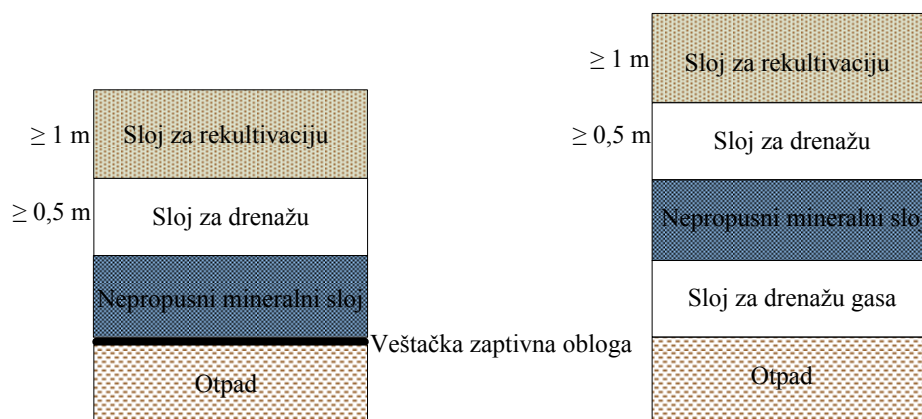
Veštačka zaptivna obloga koja se postavlja između geološke barijere i drenažnog sloja je obavezan element deponija opasnog i neopasnog otpada. U praksi se najčešće koristi HDPE. Geomembrana postavlja se po dnu deponije i po unutrašnjim kosinama nasipa, odnosno u delovima deponija u kojima dolazi do kontakta otpada i okruženja.

U evropskoj Direktivi nisu navedeni zahtevi za prekrivni sloj, već odgovarajući tehnički elementi koji imaju karakter preporuke za izgradnju zaštitne obloge sastavljene od: vodonepropusnog, drenažnog sloja za vodu i gasa i sloja za rekultivaciju (slika 4).

Nakon zatvaranja deponije narednih 30 godina neophodno je vršiti procenu rizika na životnu sredinu i ispitivanja trajnosti ugrađene barijere, primenom određenih metodologija u cilju pravilnog upravljanja deponijama [46].



Slika 3. Zahtevi Direktive za oblaganje dna deponije opasnog otpada: a) prirodna i b) veštačka barijera.  
Figure 3. Directive requirements for the bottom liner of the hazardous waste landfill: a) natural and b) an artificial barrier.



Slika 4. Preporuka Direktive za pokrivanje deponije.  
Figure 4. Directive recommendation for the landfill cover.

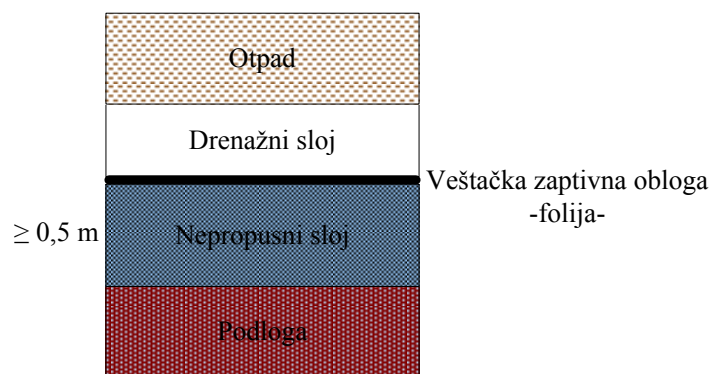
Na osnovu napred navedenog, vodonepropusnost obezbeđuje se zaptivnom oblogom i geološkom barijerom za koju su propisane vrednosti koeficijenta vodopropusnosti i debljine. Napominje se i da Evropska komisija još uvek nije izradila referentni dokument sa najbolje dostupnim tehnikama (eng. *Best Available Techniques Reference Document, BREF*) za deponije, odnosno da predmetna Direktiva predstavlja najbolju dostupnu tehniku [44].

#### Republika Srbija

U Republici Srbiji se od decembra 2010. g. primenjuje Uredba o odlaganju otpada na deponije [19]. Uredba propisuje uslove i kriterijume za određivanje lokacije, tehničke i tehnološke uslove za projektovanje, izgradnju i rad deponija, odlaganje otpada na deponiju, način i procedure rada i zatvaranja deponije, način monitoringa kao i održavanje nakon zatvaranja deponije.

Cilj Uredbe je da u potpunosti obezbedi primenu evropskih standarda za predmetnu oblast u Republici Srbiji. U tom smislu Uredba mora u potpunosti, nedvosmisleno, kao minimalno, primeniti zahteve, rešenja i preporuke sadržane u Direktivi. Prema Uredbi, kao i prema Direktivi, dno i bočne strane treba da se sastoje od prirodne geološke barijere i dodatne zaštite od migracije procednih voda (veštačka zaptivna obloga – folija i drenažni sloj).

Zahtevi Uredbe u pogledu vodopropusnosti i debljine prirodne geološke barijere su isti kao u Direktivi. Kada prirodna geološka barijera ne zadovoljava propisane vrednosti, ona se obezbeđuje oblaganjem deponijskog dna sintetičkim materijalima ili prirodnim mineralnim tamponom koji mora biti tako konsolidovan da se dobije ekvivalentna vrednost dna u smislu njegovih vodopropusnih svojstava. Prirodni mineralni tampon ne sme biti manji od 0,5 m (slika 5). Važno je napomenuti da je zahtev u vezi sa nepropusnosti dna deponije u



Slika 5. Zahtevi Uredbe za oblaganje dna.

Figure 5. Regulation requirements for the bottom lining.

Uredbi drugačije formulisan nego u Direktivi, te da u pojedinim elementima bitno menja njegovu sadržinu. Ovo se odnosi na mogućnost da se vodonepropusnost obezbedi oblaganjem deponijskog dna sintetičkim materijalima ili prirodnim mineralnim tamponom, u odnosu na zahtev Direktive za veštački uspostavljenom geološkom barijerom.

Nakon zatvaranja deponije, Uredba zahteva i formiranje gornjeg prekrivnog sloja, kako je prikazano na slici 6.

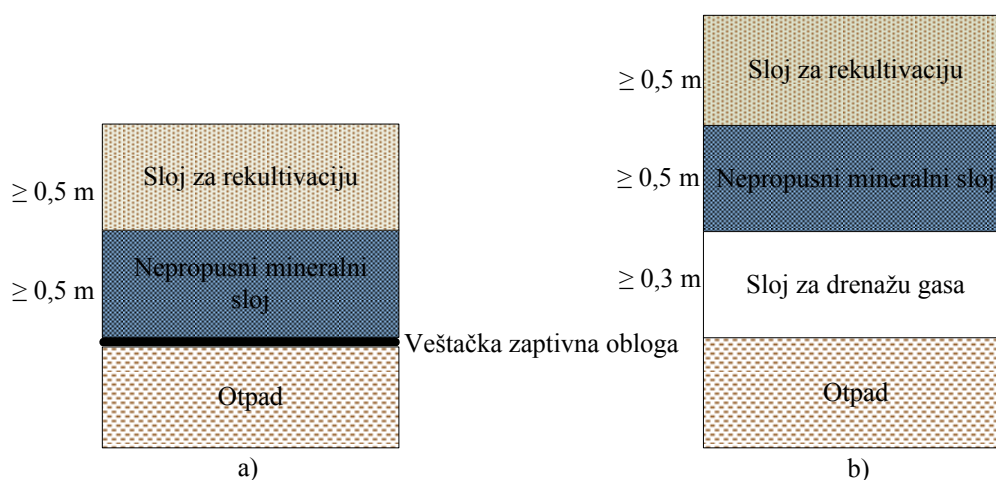
#### Komparativna analiza

Komparativna analiza zahteva, ograničenja i preporuka za izradu vodonepropusnih slojeva deponija izvedena je na dva nivoa. U prvom se porede rešenja koja se zahtevaju u SAD i EU. Na drugom nivou se za zemlje EU i RS porede pojedinačna rešenja koja dopunski razrađuju Direktivu. U tom smislu, posebno su značajna službena tumačenja predmetnih propisa iz različitih zemalja, odnosno podzakonski akti koji predstavljaju razradu osnovnih propisa.

U SAD je u prošlosti bilo propisano oblaganje dna jednoslojnom glinenom oblogom. Vremenom su uočeni

nedostaci koji su smanjili njenu efikasnost, tako da je uvedeno i tehničko rešenje sa dvoslojnom kompozitnom oblogom. Kada su geološki uslovi na izabranoj lokaciji dobri može se postaviti jednoslojna obloga, a kada je neophodna dodatna zaštita uvodi se dvoslojna obloga. Pojedine države SAD bavile su se ispitivanjem efikasnosti višeslojnih, dvoslojnih sistema zaštite i u skladu sa njima koristile pravo da propišu i oštrije zahteve, umanjujući primenu jednoslojne obloge, tako da većina država danas zahteva (skuplju) dvoslojnu kompozitnu oblogu, što je stručno diskutabilno [47].

Prema nacionalnim propisima u zemalja EU neophodan element za oblaganje dna deponija je geološka barijera, koja alternativno prirodnoj može biti i veštački uspostavljena. Pojedine zemlje EU i Srbija, su odlučile da u svoje propise ubace zahteve koji su iznad nivoa onih definisanih u Direktivi. Važno je istaći da se, po pravilu, ne navode ili preciziraju materijali koji se imaju koristiti za obezbeđenje vodonepropusnosti i zaptivnje. Od ovog stava odstupa Uredba koja eksplicitno precizira da je veštačka zaptivna obloga – folija. Napominje se i da EU Direktiva ne sprečava da se deponije



Slika 6. Zahtevi Uredbe za prekrivku deponije: a) opasnog i b) neopasnog otpada.

Figure 6. Regulation requirements for the landfill cover: a) hazardous and b) non-hazardous waste.

projektuju sa dvoslojnim dnom po ugledu na SAD, ali se ovo rešenje u praksi ne susreće, jer je skuplje.

EPA Velike Britanije (eng. *United Kingdom Environmental Protection Agency, UK EPA*) je razvila čitav niz dokumenata koja razrađuju problematiku deponovanja [44,48–56]. Posebno je značajno ukazati da neke deponije podležu IPPC Direktivi, a neke ne [44]. Prema EPA UK obavezan element deponija su geološka barijera i veštačka zaptivna obloga. Geološka barijera se postavlja po dnu i stranama deponije. Odabir geološke barijere se vrši prema proceni rizika za ispuštanje zagađujućih materija tokom životnog ciklusa deponije i procene stabilnosti [19]. Kada prirodna geološka barijera ne pruža dovoljnu zaštitu, može se veštački ojačati. Na osetljivim lokacijama moguće je u potpunosti koristiti samo veštački uspostavljenu geološku barijeru. Veštačka barijera u skladu sa Direktivom, ne sme biti manja od 0,5 m. Prema tome, geološka barijera ne može se ojačati samo pomoću geosintetičke obloge. Tumačenje UK EPA je da postoje dva elementa koja se mogu veštački obezbediti: a) sloj koji ojačava geološku barijeru, odnosno veštački uspostavljena minerala geološka barijera i b) veštačka zaptivna obloga. Nije moguće koristiti jednu veštačku zaptivnu oblogu za ispunjenje zahteva vodonepropusnosti postojeće, nedovoljno dobre, geološke barijere. Za odabir veštačke zaptivne obloge koristi se vodič za upotrebu geomembrana [48]. Mineralna veštačka zaptivna obloga može se koristiti na lokacijama gde postoji značajna prirodna geološka barijera. Posebno važno tumačenje ukazuje da je mala verovatnoća da se jedan mineralni sloj može posmatrati i kao veštački uspostavljena geološka barijera i kao veštačka zaptivna obloga. Ako je mineralna obloga prihvatljiva kao veštačka zaptivna obloga, preporuka je da se dodatno zaštiti od spoljašnjih uticaja, erozije, vremenskih uslova i sušenja [44]. Na osnovu napred iznetog HDPE folija koja se obično koristi kao veštačka zaptivna obloga, ne može biti upotrebljena kao veštački uspostavljena geološka barijera. Takođe, nije obavezno da se isključivo folija koristi kao veštačka zaptivna obloga.

U Holandiji se veliki deo teritorije nalazi ispod ili na nivou mora, odnosno ima visok nivo podzemnih voda, tako da se vodonepropusnost obezbeđuje formiranjem veštačkih barijera koje imaju ulogu geoloških barijera [57]. Kriterijumi za obezbeđivanje vodonepropusnosti su strožiji. Propisani zahtevi za opasan otpad primenjuju se i za deponije neopasnog otpada. Dopunski zahtevi su, na primer, debljina veštački uspostavljene geološke barijere koja za sve klase deponija iznosi 0,5 m, a debljina geomembrane – HDPE 2 mm. Debljina drenažnog sloja je 0,3 m. Vodonepropusnost obezbeđuje se sa gornje strane, kao i u ostalim zemljama, ali posebna pažnja obraća se obezbeđivanju stabilnosti deponije u odnosu na uticaj visokog nivoa podzemnih voda. Podzemne vode usled visokog hidrauličkog pritiska mogu

da razbiju sloj – veštačku geološku barijeru, čime bi ona izgubila osobine vodonepropusnosti. To podrazumeva, postavljanje dodatne podloge ispod geološke mineralne barijere. Izgradnja vodonepropusnih obloga podvrgnuta je velikom broju ispitivanja i odgovarajućem obezbeđenju kvaliteta, posebno pri izboru materijala [57]. Napominje se da prirodna glina u Holandiji (kao i u većini zemalja u svetu) ne ispunjava zahtevane uslove vodopropusnosti, pa je primena veštački uspostavljene geološke barijere obavezna. Holandski propisi ne navode eksplicitno koji se materijali moraju koristiti, ali su predložene njihove karakteristike i način izgradnje. Bilo koji materijal koji se koristi mora biti ispitan i prihvaćen od nadležne institucije. Takođe, važno je projektom deponije utvrditi i verifikovati životni vek barijere, od koga zavisi visina takse koja se plaća pri izgradnji deponije. Bolje i dugovečnije barijere uslovljavaju manje troškove taksi, a slabije, sa manjim životnim vekom znatno više.

U Nemačkoj se predlaže da glavna komponenta za oblaganje dna deponija opasnog i neopasnog otpada bude kompozitna obloga [58]. Propisi i njihova tumačenja zahtevaju upotrebu geološke barijere i sistema obloga. Ukoliko geološka barijera na osnovu svojih prirodnih karakteristika ne ispunjava navedene, minimalne evropske zahteve za  $K$  i  $d$ , takva barijera može biti izrađena, završena ili ojačana putem tehničkih mera. U tom slučaju debljina barijere može biti minimalno 0,5 m, pružajući ekvivalentnu zaštitu. Osnovni sistem obloga sastoji se od mineralne komponente, zaštitnog sloja i mineralnog drenažnog sloja. Mineralna komponenta može biti sačinjen od više slojeva, plastičnog zaptivnog sloja (ili asfaltne membrane) čija debljina ne sme biti manja od 2,5 mm i mineralne komponente minimalne debljine 0,5 m sa  $K \leq 5 \times 10^{-10}$  m/s, na gradijentu pritiska od  $i = 30$ . Debljina drenažnog sloja je 0,5 m. Pre izgradnje deponije, neophodno je dokazati svojstva odabranog materijala ili posedovati sertifikat koji izdaje Savezni institut za istraživanja i ispitivanja materijala. Sertifikat je priznat na nivou Savezne Republike Nemačke. Mora biti pokazano da će odabrani sistem obloga u periodu od 100 godina biti stabilan, odnosno da ne podleže spoljnim uticajima i interakcijama. U suprotnom, najmanje 30 godina bi trebalo sprovesti merenja i ispitivanja provodnosti barijere [59].

Tekst važeće Uredbe u Srbiji u odnosu na Direktivu sadrži neodgovarajuće formulacije (ili prevode), što je otvorilo mogućnosti za različita tumačenja pri projektovanju vodonepropusnih slojeva deponija u praksi. Uredba (Prilog 2 pod 1, odeljak 2) propisuje: "Kada prirodna geološka barijera ne zadovoljava propisane vrednosti, ona se obezbeđuje oblaganjem deponijskog dna sintetičkim materijalima ili prirodnim mineralnim tamponom koji mora biti tako konsolidovan da se dobije ekvivalentna vrednost dna u smislu njegovih vodopropusnih

svojtava. Prirodni mineralni tampon ne sme biti manji od 0,5 m". Takođe, Uredba zahteva da veštačka zaptivna obloga bude folija, ali propisuje i da se za zaptivanje mogu koristiti i druge metode i tehnike. Tekst Direktive je u detaljima drugačiji i propisuje (*Annex I*, 3.2.): „Tamo gde geološka barijera prirodno ne može da zadovolji propisane uslove, može biti veštački završena i ojačana drugim sredstvima dajući ekvivalentnu zaštitu. Veštački uspostavljena geološka barijera ne sme biti manja od 0,5 m". Drugačija formulacija veštački uspostavljene geološke barijere u Uredbi, dovodi u pitanje da li se oblaganjem deponijskog dna sintetičkim materijalima ili prirodnim mineralnim tamponom može obezbediti propisana vrednost koeficijenta vodopropusnosti. Postavlja se pitanje da li veštački uspostavljena geološka barijera može biti npr. prirodni mineralni tampon pri debljini od 0,5 m kako Uredba dozvoljava. Skreće se pažnja na propise i tumačenja u pojedinim evropskim zemljama [21,44] koji to eksplicitno zabranjuju. Postavlja se tehnološko pitanje, da li pri navedenoj debljini prirodni mineralni tampon (najčešće glina) može obezbediti zahtevanu vodonepropusnost  $K$  (za ispucale gline od  $5 \times 10^{-2}$  do  $5 \times 10^{-7}$  m/s i neispucale gline,  $k < 5 \times 10^{-7}$  m/s [28]). Pojedini autori smatraju da se geološka barijera veštački može ojačati materijalima sa drugih lokacija, dovoženjem dodatnog sloja gline, dajući jednaku zaštitu [60]. Uredba, takođe, ograničava mogućnost upotrebe drugih materijala kao veštačka zaptivne obloge, jer specificira da je to ista folija.

Ključni problem na koji se ukazuje je korišćenje termina „prirodni mineralni tampon“ u Uredbi na mestu izvornog termina „veštački uspostavljena geološka barijera“ iz Direktive. Napred citirani tekst Uredbe ne postoji u Direktivi, ne zna se kako je nastao, stručno je sporan, za njega nema zvaničnih tumačenja, te sveukupno izaziva nedoumice.

Za razliku od Direktive, koje daje preporuke za prekrivku deponije, Uredba je odlučila da za prekrivku propiše zahteve čiji je uporedni prikaz dat u tabeli 1. Podseća se da Uredba može biti tehnički zahtevnija od Direktive, ali mora ispuniti minimum zahteva iz nje. U

skladu sa tim, skreće se pažnja i da Uredba zahteva manju debljinu sloja za rekultivaciju, definiše debljinu nepropusnog mineralnog sloja i drenažnog sloja za gas kod deponija neopasnog otpada, dok drenažni sloj za vodu nije naveden.

## ANALIZA MOGUĆIH REŠENJA ZA OBEZBEĐIVANJE VODONEPROPUSNOSTI

Projektovanje modernih deponija trebalo bi da se zasniva na upotrebi dugovečne geološke barijere. Budući da u propisima nije navedeno koji materijali se imaju upotrebiti za izgradnju vodonepropusnog sloja, različiti pristupi projektovanju obloge i prekrivke deponija svode se na njihov izbor. Za izradu obloge/barijere deponija koriste se prirodni i/ili veštački materijali. U praksi se često, sa ciljem poboljšanja svojstava, kombinuju prirodni i sintetički materijali, u slojevima ili kao višeslojni „gotovi proizvod“ (kompoziti, geosintetičke glinene obloge, itd.).

Materijali koji se koriste za izradu barijera moraju da zadovolje niz propisanih kriterijuma među kojima je najvažnija vodopropusnost, dugoročna kompatibilnost sa hemikalijama, visok kapacitet sorpcije i nizak koeficijent difuzije [61]. Takođe, moraju imati visoku otpornost na oštećenja i deformacije tokom izgradnje i eksploatacije, jednostavnu konstrukciju i nisku cenu.

### Prirodni materijali

Prirodni materijali koji se upotrebljavaju imaju sposobnost bubrenja i sprečavanja prodiranja tečnosti. Najčešće korišćen prirodni materijal za izradu vodonepropusnih slojeva deponija je glina. Sabijena glina sastavljena je od prirodnih mineralnih materijala iskopanih na lokaciji deponije ili je dovežena sa drugih lokacija. Sloj sabijene gline je poslednjih 15–20 godina korišćen kao podloga za geomembrane, deo dvoslojne ili kompozitne obloge. U pojedinim zemljama dozvoljeno je korišćenje gline ako ispunjava propisane vrednosti vodopropusnosti. Pored gline mogu se upotrebljavati pesak, šljunak, bentonit, kamena prašina, itd. [62,63].

Tabela 1. Uporedni prikaz Uredbe i Direktive pri izgradnji prekrivke  
Table 1. Comparative review of Regulation and Directive in the construction of cover layer

Komponente za sloj prekrivke	Opasan otpad		Neopasan otpad	
	Uredba	Direktiva	Uredba	Direktiva
Sloj za drenažu deponijskog gasa	Ne zahteva se	Ne zahteva se	Zahteva se, $d \geq 0,3$ m	Zahteva se
Veštačka vodonepropusna obloga-folija	Zahteva se	Zahteva se	Ne zahteva se	Ne zahteva se
Nepropusni mineralni sloj	Zahteva se, $d \geq 0,5$ m	Zahteva se	Zahteva se, $d \geq 0,5$ m	Zahteva se
Drenažni sloj	Nije naveden	Zahteva se, $d > 0,5$ m	Nije naveden	Zahteva se, $d > 0,5$ m
Sloj za rekultivaciju	Zahteva se, $d \geq 0,5$ m	Zahteva se, $d > 1$ m	Zahteva se, $d \geq 0,5$ m	Zahteva se, $d > 1$ m

Primena samo gline kao vodonepropusnog sloja ima izvesna ograničenja. Usled različitog sleganja sabijenog sloja otpada, kao i vremenskih uslova, dolazi do fizičkog oštećenja gline. Formiranjem pukotina (slika 7) nakon samo par godina gлина gubi svojstvo vodonepropusnosti, odnosno gubi zaštitni efekat [21]. Takođe, hemijska reakcija procednih voda sa glinom vremenom povećava vodopropusnost gline [64].



Slika 7. Ispucala gлина.  
Figure 7. Cracked clay.

Pored navedenih ograničenja, trebalo bi uzeti u obzir da je propisana debljina prirodne barijere za deponijsko dno u rasponu od 1–5 m, što može imati uticaj sa aspekta kapaciteta i troškova budućeg deponovanja. U praksi se često koristi kombinacija različitih vrsta gline, takozvana multimineralna barijera [24]. Ranije se smatralo da 0,5 m gline može zameniti geomembranu, međutim takvo rešenje je odbačeno jer nema dugoročni efekat.

#### Jednostavni materijali na bazi bentonita i veštačkih materijala

Kao prirodni materijal, u praksi se veoma često se koristi bentonit koji sadrži glineni mineral, monmorilonit [24]. Primenom tzv. bentonitnih tepiha, ili u literaturi poznatijim pod nazivom „geosintetičke glinene obloge“ – GCL u praksi su prevazilažena ograničenja gline [23,65].

GCL je kompozitna obloga sačinjena od sloja natrijum- ili kalcijum-bentonita u kombinaciji sa slojem ili slojevima nekog od geosintetičkih materijala [23,66,67]. U prirodi se nalazi uglavnom nalazi Ca bentonit, ali češće se upotrebljava Na bentonit zbog svojstva bubrenja, niske vodopropusnosti i ojačanja deponija [68,69].

Kao sintetički materijali koriste se geotekstil, geomreže, georešetke ili geomembrane.

Geotekstil mogu biti tkani ili netkani, sačinjeni od polipropilena, poliester, poliamida, itd. Geomreže su sačinjene od istih materijala kao i geotekstil, češće se koriste za obezbeđivanje sigurnosti nestabilnih padina. Geomembrane se mogu koristiti same ili u kombinaciji sa drugim materijalima kada nastaju kompozitni materijali. Postoje različite vrste geomembrana: polivinil-

hlorid (PVC), polipropilen (PP), polivinilhlorid (PVC), polietilen visoke gustine (HDPE), bitumenske membrane, itd.

Giroud je vršio poređenje efikasnosti CCL-a i GCL-a koje se koriste sa geomembranama za formiranje kompozitnog sloja [70]. Rowe je u svom radu opisao trajnost, najčešće korišćene HDPE geomembrane [71], jer funkcionalnost deponije veoma zavisi od trajnosti geomembrane [72]. Vodopropusnost i unutrašnja erozija u zavisnosti su od podloge na koju se postavlja GCL [66]. Kada gлина nije dostupna na samoj lokaciji predviđenoj za izgradnju deponije, upotreba geomembrane je ekonomičnija i povoljnija za održavanje.

Na tržištu postoje različite vrste materijala, uglavnom sačinjenih od kombinacije natrijum-bentonita i polipropilenskog geotekstila različitih oblika, povezanih na različite načine. Vezivanje bentonita i geosintetičkih materijala obavlja se lepljenjem, zašivanjem iglama ili „lepljenjem sa prošivanjem“ [21]. Veoma je važno pažljivo i pravilno spajanje materijala, jer postoji mogućnost oštećenja prilikom postavljanja i spajanja geomembrana čime se gubi svojstvo vodonepropusnosti.

Mane geosintetičkih obloga upravo jesu kompleksan proces instalacije, oštećenja u spojevima materijala, gubitak mehaničke stabilnosti usled bubrenja bentonita i klizanja slojeva u bentonitnom tepihu i pojave unutrašnje erozije [73]. Takođe, ograničenja i nedostaci postoje i usled različitih vremenskih uslova (na primer sušenje), stabilnosti kosina, propustljivosti gasa i prodiranje korova kroz sloj [74]. S obzirom na to da je neophodno obezbediti dugoročnu stabilnost i efikasnost [21], navedeni nedostaci prethodno pomenutih obloga ograničavaju njihovu primenu.

Danas postoji mnogo mogućnosti za obezbeđenje vodonepropusnosti primenom tradicionalnih ili inovativnih barijera. Upotreba reaktivnih barijera, modifikovanih gline (dodatak zeolita u monmorilonit) kojom se smanjuje vodopropusnost [74]. Jonska razmena ili adsorpcija se može poboljšati dodatkom aditiva u barijeru, npr. dodatkom zeolita u bentonit, organski modifikovana gлина ima povećanu adsorpcionu moć organskih jedinjenja [75].

#### Složeni materijali na bazi bentonita

Složeni, tzv. kompozitni materijali daju najbolje rezultate u dugoročnoj zaštiti životne sredine. Kroz mnoga ispitivanja uočena je njihova visoka i dugoročna efikasnost [73]. Ispitivana je i reaktivnost organskih zagađujućih materija sa kompozitnim oblogama [26], kao i migracija zagađujućih materija kroz višeslojnu mineralnu barijeru [67].

GCL obloge se mogu ojačati dodatkom polimera. Pojedini autori smatraju da upotreba polimera, radi poboljšanja kvaliteta obloge, ne bi trebalo da se istražuje, jer je u praksi teško dokazati dugoročnu provodljivost [65]. EPA daje smernice za upotrebu GCL i



smatra da ne bi trebalo podsticati primenu polimera [48]. Međutim, novija istraživanja su dokazala upotrebu polimera kao veoma efikasno rešenje [77].

Jedno od rešenja za izgradnju vodonepropusnog sloja je veštačka mineralna barijera sačinjena od mešavine bentonita i peska ojačane sa polimerom (eng. *Polymer Enhanced Bentonite–Sand Mixture, PEBSM*). Komercijalni naziv ove mešavine, koja je razvijena i patentom zaštićena od strane GID Milieutechnik, je TRISOPLAST® [78].

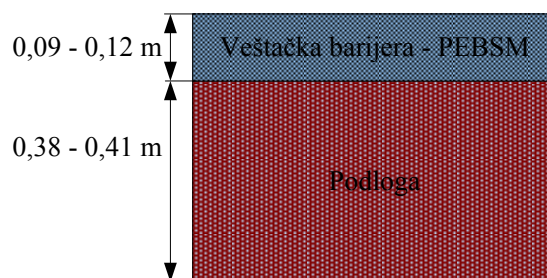
Ova veštačka mineralna barijera, odlikuje se mnogobrojnim prednostima u odnosu na tradicionalne materijale. U poređenju sa zahtevima iz Direktive, u pogledu vodopropusnosti i debljine geološke barijere, PEBSM ima karakteristike koje nadmašuju propisane vrednosti. Pored izrazito niske vrednosti koeficijenta vodopropusnosti ( $1 \times 10^{-12} \text{ m/s} < K < 5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ), karakterišu ga visoka mehanička, termička i hemijska stabilnost [74]. U poređenju sa glinom on sprečava pojavu rupa i pukotina jer ima svojstvo samoobnavljanja i veoma je otporan na cikluse suvo/vlažno [28]. Takođe, prisustvo polimera ne predstavlja nikakav rizik za upotrebu PEBSM, jer je prema istraživanjima nerazgradiv čak i pod ekstremnim mikrobiološkim uslovima.

PEBSM je ekološki povoljan materijal. Komponente od kojih je sačinjen su uglavnom prirodne sirovine: pesak (oko 87 %), bentonit (oko 13 %) i vezivni polimer (samo 2 % od iznosa bentonita). Proizvodi se na licu mesta, prema utvrđenom brzom, lakom i pouzdanom načinu. Proizvodnja Trisoplasta se sprovodi prema tačno definisanim standardima obezbeđenja kvaliteta, kompletne kontrole od strane nezavisne, akreditovane laboratorije standardom ISO 17025.

Ugradnjom PEBSM upija vodu iz okoline sa kojom dođe u kontakt. Bentonitna glina tako nabubrava i stvara nepropusnu mrežu hemijskih veza čime sa rastopljenim polimerom nastaje gusta, umrežena gel struktura, sa peskom dispergovanim u njoj. Pesak osigurava mehaničku čvrstoću, a gel bentonit – polimer mu pruža neophodnu elastičnost i vodonepropusnost koja je čak 100 do 1000 puta veća nego kod drugih tradicionalnih mineralnih barijera. Visok ugao unutrašnjeg trenja sa izrazitom kohezijom omogućava primenu PEBSM na strmim kosinama bez dodatne stabilizacije. Mehaničke osobine prilikom sabijanja neznatno su promenjene [79]. Zahvaljujući stvaranju gel strukture, u mnogim evropskim zemljama je dokazano da sloj Trisoplasta debljine od 0,07–0,09 m, nanesen na podlogu, može zameniti 1–5 m obloge od gline, čime omogućava i uštedu prostora za odlaganje (slika 8) [80].

Trisoplast se može primenjivati kako za oblaganje dna, tako i za prekrivanje deponija, za izgradnju puteva, skladišta uglja, remedijaciju zemljišta i uređenje terena [81,82]. Primenom Trisoplasta, troškovi održavanja deponija nakon zatvaranja se značajno umanjuju [77].

Jedna od najvažnijih svojstava Trisoplasta je dug životni vek, preko 100 godina, bez promenjenih svojstava [83,84]. Moguće je da početni troškovi izgradnje deponije prilikom upotrebe Trisoplasta budu nešto veći u odnosu na alternativne proizvode, ali nakon zatvaranja, troškovi održavanja su manji, jer funkcionalnost Trisoplast obloge produžava životni vek deponije [84]. Trisoplast ima ekonomske prednosti na lokacijama gde je pesak pristupačan po niskim cenama.



Slika 8. Poprečni presek veštački uspostavljene PEBSM barijere.

Figure 8. Cross-section of artificial established PEBSM barrier.

## ZAKLJUČAK

U radu je izvršena detaljna analiza pojedinih propisa u pogledu obezbeđivanja vodonepropusnosti prilikom projektovanja deponija. Poređenjem propisa konstatovano je da važeći nacionalni propis – Uredba – nije usaglašen sa Direktivom. Ocenjuje se da je neophodno izmeniti tekst Uredbe u Prilogu 2 pod 1, odeljak 2, iza definicije koeficijenta vodopropusnosti. Predlaže se da se tekst: „Kada prirodna geološka barijera ne zadovoljava propisane vrednosti, ona se obezbeđuje oblaganjem deponijskog dna sintetičkim materijalima ili prirodnim mineralnim tamponom koji mora biti tako konsolidovan da se dobije ekvivalentna vrednost dna u smislu njegovih vodopropusnih svojstava. Prirodni mineralni tampon ne sme biti manji od 0,5 m“ zameni sa „Tamo gde geološka barijera prirodno ne može da zadovolji propisane uslove, može biti veštački završena i ojačana drugim sredstvima dajući ekvivalentnu zaštitu. Veštački uspostavljena geološka barijera ne sme biti manja od 0,5 m“. Takođe, termin „prirodni mineralni tampon“ bi trebalo zameniti izvornim terminom „veštački uspostavljena geološka barijera“.

Ukazuje se da se geološka barijera ne može ojačati isključivo pomoću sintetičke obloge, odnosno HDPE folije, koja se obično koristi kao veštačka zaptivna obloga. HDPE folija ne može biti upotrebljena kao veštački uspostavljena geološka barijera i nije obavezno da se isključivo folija koristi kao veštačka zaptivna obloga, što Uredba zahteva.

Pri projektovanju deponija u RS neophodno je da projektant proračunom dokaže karakteristike upotrebljenih materijala u smislu vodopropusnosti, a da se u

procesu tehničke kontrole valjanost ovih proračuna provere i potvrde [85]. Odgovarajuća praksa izrade tehničke dokumentacije ukazuje da: a) projektima deponija često nedostaje tehnološki projekat sa odgovarajućim proračunima i b) da pomenutih proračuna nema, odnosno da se materijali za obezbeđenje vodonepropusnosti biraju bez odgovarajućih valjanih, proverljivih podloga, što je neprihvatljivo.

Kroz poređenje životnog ciklusa materijala, može se konstatovati da nedostaci CCL-a i GCL-a, smanjuju njihov životni vek, dok najduži životni vek i najniži koeficijent vodopropusnosti ima PEBSM. CCL, nakon veoma kratkog vremena usled gubitka vlage puca, čime gubi svojstvo vodonepropusnosti. Tokom instalacije GCL-a najčešći problem je u spojevima bentonita i sintetičkog materijala, česta mehanička oštećenja dovode do smanjenja životnog ciklusa materijala. Navedene karakteristike PEBSM nemoguće je postići alternativnim mineralnim, konkurentskim proizvodima (tabela 2).

Tabela 2. Poređenje alternativnih materijala  
Table 2. Comparison of alternative materials

Svojtvo	Veštačka barijera – PEBSM		Veštačka barijera – GCL	Geološka barijera – CCL		
Debljina barijere, $d / m$	0,007	0,009	0,01	1,00	1,00	5,00
Koeficijent vodopropusnosti, $K \times 10^9 / m s^{-1}$	0,03	0,03	0,03	100	1	1

Veštački uspostavljena geološka barijera sastavljena od 0,09 m PEBSM i 0,41 m prirodnog materijala može u potpunosti obezbediti vodonepropusnost i zameniti 1–5 m obloge od gline.

PEBSM predstavlja ekološki povoljan materijal, jer je najvećim delom sastavljen od prirodnih sirovina. Mehanički, hemijski i termički je stabilan materijal i jedini je otporan na cikluse suvo/vlažno. Dug životni vek PEBSM, bez promjenjenih svojstava, značajno umanjuje troškove održavanja deponija nakon zatvaranja.

### Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti na projektu TR 34009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### LITERATURA

- [1] M. Savić, M. Jovanović, J. Tanasijević, O. Očić, A. Spasić, P. Jovanić, I. Nikolić, Primena algoritma za redukovanje otpada u analizi uticaja na životnu sredinu: primer proizvodnje bitumena, Hem. Ind. **65**(2) (2011) 197–204.
- [2] D. Stanojević, M. Rajković, D. Tošković, Upravljanje korišćenim gumama, dometi u svetu i stanje u Srbiji, Hem. Ind. **65**(6) (2011) 727–738.
- [3] A. Mitovski, D. Živković, Lj. Balanović, N. Štrbac, Ž. Živković, Analiza životnog ciklusa bezolovnih lemnih legura sa aspekata zaštite životne sredine, Hem. Ind. **63**(3) (2009) 163–169.

- [4] H. Stevanović-Čarapina, J. Stepanov, D. Savić, A. Mihajlov, Emisija toksičnih komponenti kao faktor izbora najbolje opcije za upravljanje otpadom primenom koncepta ocenjivanja životnog ciklusa, Hem. Ind. **65**(2) (2011) 205–209.
- [5] M. Rajković, Klasifikacija fosfogipsa kao otpadnog proizvoda sa aspekta životne sredine, Hem. Ind. **58**(1) (2004) 26–32.
- [6] M. Životić, D. Stojiljković, Al. Jovović, V. Čudić, Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebom vrednošću, Hem. Ind. **66**(3) (2012) 403–412.
- [7] Š. Tisovski, V. Valent, Reciklovanje poliolefinskog otpada kao energenta, Hem. ind. **62**(6) (2008) 361–364.
- [8] A. Kostić-Pulek, S. Marinković, S. Popov, J. Đinović, Investigation of the possibility of the reutilization of some industrial wastes, J. Serb. Chem. Soc. **70**(6) (2005) 843–851.
- [9] A. Milutinović-Nikolić, J. Dostanić, P. Banković, N. Jović-Jovičić, S. Lukić, B. Rosić, D. Jovanović, A new type of bentonite-based non-woven composite, J. Serb. Chem. Soc. **76**(10) (2011) 1411–1425.
- [10] M.Đ. Ristić, M.Đ. Marjanović, Concentrations of Cu, Zn, Cd and Pb in urban soils in parks and green areas of Belgrade, Serbia, CI&CEQ **12**(4) (2006) 236–240.
- [11] M. Marjanović, M. Vukčević, D. Antonović, S. Dimitrijević, Đ. Jovanović, M. Matavulj, M. Ristić, Heavy metals concentration in soils from parks and green areas in Belgrade, J. Serb. Chem. Soc. **74**(6) (2009) 697–706.
- [12] N. Čalić, M. Ristić, Ispitivanje karakteristika procednih voda deponije „Vinča“ metodom izluživanja, Hem. Ind. **60**(7–8) (2006) 171–175.
- [13] N. Dixon, K. Zamara, D.R.V. Jones and G. Fowmes, Waste/Lining System Interaction: Implications for Landfill Design and Performance, Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA **43**(3) (2012), ISSN 0046-5828.
- [14] D.R.V. Jones, N. Dixon, Landfill lining stability and integrity: the role of waste settlement, Geotext. Geomembr. **23** (2005) 27–53.
- [15] N. Dixon, D. Russell, V. Jones, Engineering properties of municipal solid waste, Geotext. Geomembr. **23** (2005) 205–233.
- [16] A. Damgaard, S. Manfredi, H. Merrild, S. Stensøe, TH. Christensen, LCA and economic evaluation of landfill leachate and gas technologies, Waste Manage. **31** (2011) 1532–1541.
- [17] P.V. Divya, B.V.S. Viswanadham, J.P. Gourc, Influence of geomembrane on the deformation behaviour of clay-based landfill covers, Geotext. Geomembr. **34** (2012) 158–171.

- [18] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste (OJ L 182, 16.7.1999, p. 1–19).
- [19] Uredba o odlaganju otpada na deponije, („Sl. glasnik RS“, broj 92/2010).
- [20] T. Katsumi, C.H. Benson, G.J. Foose, M. Kamon, Performance – based design of landfill liners, *Eng. Geol.* **60** (2001) 139–148.
- [21] G. Heerten, R. Koerner, Cover systems for landfills and brownfields, *Land Contam. Reclam.* **16**(4) (2008) 343–356.
- [22] P.J. Fox, D.J. De Battista, D.G. Mast, Hydraulic performance of geosynthetic clay liners under gravel cover soils, *Geotext. Geomembr.* **18** (2000) 179–201.
- [23] A. Bouazza, Geosynthetic clay liners, review article, *Geotext. Geomembr.* **20** (2002) 3–17.
- [24] D. Koch, Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls, *Appl. Clay Sci.* **21** (2002) 1–11.
- [25] A. Bouazza, W. F. Van Impe, Liner design for waste disposal sites, *Environ. Geol.* **35**(1) (1998) 41–45.
- [26] U. Kalbe, W.W. Müller, W. Berger, Jürgen Eckardt, Transport of organic contaminants within composite liner systems, *Appl. Clay Sci.* **21** (2002) 67–76.
- [27] J.P. Giroud, K. Badu-Tweneboah, K.L. Soderman, Comparison of Leachate Flow Through Compacted Clay Liners and Geosynthetic Clay Liners in Landfill Liner Systems, *Geosynthetics International* **4**(3–4) (1997) 391–431.
- [28] S. Melchior, Wechselwirkungen zwischen mineralischen Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen, 28. Fachtagung „Die sichere Deponie 2012 - Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“ SKZ - ConSem GmbH, Würzburg und AK GWS Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V., Berlin.
- [29] D. Guyonnet, D. Cazaux, H. Vigier-Gailhanou, B. Chevrier, M. Gamet, TRISOLIX: compatibility testing of TRISOPLAST®, Final Report, 2008, BRGM/RP-56850-FR.
- [30] Strategija upravljanja otpadom za period 2010–2019. godine, [http://www.ekoplan.gov.rs/src/upload-centar/dokumenti/zakoni-i-nacrti-zakona/propisi/strategija\\_upravljanja\\_otpadom\\_konacno.pdf](http://www.ekoplan.gov.rs/src/upload-centar/dokumenti/zakoni-i-nacrti-zakona/propisi/strategija_upravljanja_otpadom_konacno.pdf) (februar 2012).
- [31] U.S. Environmental Protection Agency, Code of Federal Regulations, Title 40, Part 264 Subtitle C, Standards for Owners and Operators of Hazardous Waste Treatment, Storage, and Disposal Facilities, <http://www.wbdg.org/ccb/EPA/40cfr264.pdf> (jun 2012).
- [32] [U.S. Environmental Protection Agency, Code of Federal Regulations, Title 40, Part 258 Subtitle D, Criteria for Municipal Solid Waste Landfills, <http://www.epa.gov/wastes/wyl/tribal/pdf/txt/40cfr258.pdf> (jun 2012).
- [33] U.S. Environmental Protection Agency, Survey of Technologies for Monitoring Containment Liners and Covers, Solid Waste and EPA542-R-04-013 Emergency Response June 2004 (5102G), Washington, DC 20460, <http://www.epa.gov/tio/download/char/epa542r04013.pdf> (jun 2012)
- [34] Discussion Document Proposed Modifications to the Solid Waste Management Facility Regulations 310 cmr 19.000, may 24, 2004, <http://www.mass.gov/dep/recycle/laws/swregbgd.pdf> (avgust 2012).
- [35] U.S. Environmental Protection Agency Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure, Technology Transfer E PA162514-89I022, August 1989, <http://info-house.p2ric.org/ref/17/16909.pdf> (jul 2012).
- [36] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance) (OJ L 312, 22.11.2008, pp. 3–30).
- [37] Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste (OJ L 332, 28.12.2000, pp. 91–111).
- [38] Regulation (EC) No. 1013/2006 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2006 on shipments of waste (OJ L 190, 12.7.2006, pp. 1–98).
- [39] European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December, 1994, on packaging and packaging waste (OJ L 365, 31.12.1994, pp. 10–23).
- [40] Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September, 2006, on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC (Text with EEA relevance) (OJ L 266, 26.9.2006, pp. 1–14).
- [41] Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January, 2003, on waste electrical and electronic equipment (WEEE) – Joint declaration of the European Parliament, the Council and the Commission relating to Article 9 (OJ L 37, 13.2.2003, pp. 24–39).
- [42] Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January, 2008, concerning integrated pollution prevention and control (Codified version) (Text with EEA relevance) (OJ L 24, 29.1.2008, pp. 8–29).
- [43] Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine, „Sl. glasnik RS“, broj 135/2004.
- [44] Environment Agency, LFE5 Guidance for the Landfill Sector, Technical Requirements of the Landfill Directive and Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC S5.02), April 2007, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0407bmo-e-e.pdf> (jul 2012).
- [45] Alterra, Dutch governmentally installed expertise network for soil protection, Wageningen, The Netherlands, 2002.
- [46] A. Pivato, Landfill Liner Failure: An Open Question for Landfill Risk Analysis, *J. Environ. Prot.* **2**(3) (2011) 287–297.
- [47] J. Munie, Illinois Environmental Protection Agency, A Study of the merits and effectiveness of alternate liner systems at Illinois landfills, A research paper Submitted in Fulfillment of House Resolution 715 State of Illinois 92<sup>nd</sup> General Assembly January 2003, <http://www.epa.state.il.us/land/regulatory-programs/permits-and-management/alternate-landfill-liner-study/alternate-landfill-liner-study.pdf> (jul 2012).
- [48] Environment Agency, LFE5 – Using geomembranes in landfill engineering, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0409bpmh-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [49] Environment Agency, LFE8 – Geophysical testing of geomembranes used in landfills, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0409bpmh-e-e.pdf> (avgust 2012).

- ment-agency.gov.uk/geho0409bpm-e-e.pdf (avgust 2012).
- [50] Environment Agency, LFE10 - Using bentonite enriched soils in landfill engineering, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0409bpnw-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [51] Environment Agency, Environmental Permitting Regulations (England and Wales) 2010, Regulatory Guidance Series, No LFD 1, Understanding the Landfill Directive, [http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/RGN\\_LFD1\\_Landfills\\_\(v2.0\)\\_30\\_March\\_2010.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/RGN_LFD1_Landfills_(v2.0)_30_March_2010.pdf) (avgust 2012).
- [52] Environment Agency, LFE6 – Guidance on using landfill cover materials, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0409bpni-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [53] Environment Agency, Guidance on Financial Provision for Landfill [http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/Guidance\\_-\\_financial\\_provision\\_for\\_landfill.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/Guidance_-_financial_provision_for_landfill.pdf) (avgust 2012).
- [54] Environment Agency, LFE 2 – Cylinder testing geomembranes and their protective materials, A methodology for testing protector geotextiles for their performance in specific site conditions, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0611btuw-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [55] Environment Agency, LFE4 – Earthworks in landfill engineering, Design, construction and quality assurance of earthworks in landfill, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0211btlr-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [56] Environment Agency, How to comply with your environmental permit Additional guidance for: Landfill (EPR 5.02), March 2009, <http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0409bput-e-e.pdf> (avgust 2012).
- [57] D. Boels, Quality assurance of liner construction in The Netherlands, Landfill Construction Quality Assurance Seminar, Helsinki, Finland, Oct. 19, 2006 <http://www.ygoforum.fi/boelstex.pdf> (maj 2012).
- [58] Technical Committee on Geotechnics of landfill Engineering, German Geotechnical Society, Technical Committee Landfill Technology, Chapter 2.2, Principles of Bottom Barrier Systems, Erwin Gartung, Nürnberg Germany, Hans-Günter Ramke, Höxter, July 2009.
- [59] Ordinance Simplifying Landfill Law Of 27 April 2009, Federal Law Gazette I No. 22 of 29 April 2009, p. 900 [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ordinance\\_simplifying\\_landfill\\_law.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ordinance_simplifying_landfill_law.pdf) (jun 2012).
- [60] Lj. Obradović, M. Bugarin, Z. Stevanović, M. Ljubojev, Z. Milijić, Odlaganje opasnog otpada na deponije u skladu sa Direktivom Evropske Unije o deponijama br. 1999/31/EU, Rudarski radovi, Broj 2, 2010, str. 123–133.
- [61] C.H. Benson, A. Bouazza, E. Fratallocchi, M. Manassero, Traditional and Innovative Barriers Technologies and Materials, TC5 Report, September 2005, [http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/TR/Shackelford\\_et\\_al\\_2005.pdf](http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/TR/Shackelford_et_al_2005.pdf) (jul 2012).
- [62] G. Gjetvaj, P. Kvasnička, Ž. Veinović, Diffusion through Pulverized Stone Compared to Other Mineral Barrier Materials, *Geologia Croatica* **57/16**(3) (2004) 95–101.
- [63] Ž. Veinović, Mogućnosti uporabe otpadne kamene prašine za izradu brtvenih slojeva odlagališta, bib.irb.hr/datoteka/48629.ZGO\_Zlim.doc (maj 2012).
- [64] A. Allen, Containment landfills: the myth of sustainability, *Eng. Geol.* **60** (2001) 3–19.
- [65] K. P. Von Maubeuge, C. M. Quirk, Geosynthetic Clay Liners and long-term slope stability, [http://www.bentofix.com/naue/p/waste2000\\_shear.pdf](http://www.bentofix.com/naue/p/waste2000_shear.pdf) (april 2012).
- [66] R. Kerry Rowe, C. Orsini, Effect of GCL and subgrade type on internal erosion in GCLs under high gradients, *Geotext. Geomembr.* **21** (2003) 1–24.
- [67] P. Phillips and M. Eberle, The use of Geosynthetic Clay Liners (GCL's) in containment applications – an Australian perspective, [http://www.bentofix.com/naue/p/geo\\_env2001.pdf](http://www.bentofix.com/naue/p/geo_env2001.pdf) (april 2012).
- [68] D. Guyonnet, P. Perrochet, B. Côme, J.-J. Seguin, A. Parriaux, On the hydro-dispersive equivalence between multi-layered mineral barriers, *J. Contam. Hydrol.* **51** (2001) 215–231.
- [69] J.G. Zornberg, Geosynthetic Reinforcement in Landfill Design: US Perspectives, GSP 141 International Perspectives on Soil Reinforcement Applications, [http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/CP/Zornberg\\_2005a.pdf](http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/CP/Zornberg_2005a.pdf) (jun 2012).
- [70] J.P. Giroud, N.S. Rad, J.A. McKelvey, Evaluation of the Surface Area of a GCL Hydrated by Leachate Migrating Through Geomembrane Defects, *Geosynth. Inter.* **4**(3–4) (1997) 433–462.
- [71] R. Kerry Rowe, Henri P. Sangam, Durability of HDPE geomembranes, *Geotext. Geomembr.* **20** (2002) 77–95.
- [72] Y. Hsuan, Waste Containment Technology – Lifetime Prediction of The Landfill Liner, [www.gatewaycoalition.org/files/NewEH/htmls/Hsuan.doc](http://www.gatewaycoalition.org/files/NewEH/htmls/Hsuan.doc) (maj 2012).
- [73] Scottish Environment Protection Agency, Framework for Risk Assessment for Landfill Sites The Geological Barrier, Mineral Layer and the Leachate Sealing and Drainage System August 2002, <http://www.sepa.org.uk/> (maj 2012).
- [74] Y. Yukselen-Aksoy, Characterization of two natural zeolites for geotechnical and geoenvironmental applications, *Appl. Clay Sci.* **50** (2010) 130–136.
- [75] A. Kaya, S. Durukan, Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner, *Appl. Clay Sci.* **25** (2004) 83–91.
- [76] F.-G. Simon, W.W. Müller, Standard and alternative landfill capping design in Germany, *Environ. Sci. Policy* **7** (2004) 277–290.
- [77] J. Wammes, M. Naismith, H. Mulleneers, New developments for environmental protection demonstrated on the polymer enhanced mineral barrier Trisoplast®, Answai conf 2009, <http://conference.nswai.com/1%29%20J.wammes-TRISOPLAST.pdf> (februar 2012).
- [78] US2010/0087580 Method of producing a modified smectite or smectite – containing substance capable of taking up and releasing water in a reversible manner 04-08-2010 (februar 2012).
- [79] S.S. Agus, Y. F. Arifin, T. Schanz, Hydro-mechanical characteristic of a polymer-enhanced bentonite-sand mixture for landfill applications, International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills” LIRIGM, Grenoble 1 University, France, 2005, [http://www.gbf.ruhr-uni-bochum.de/forschung/pdf/32\\_AGUS.PDF](http://www.gbf.ruhr-uni-bochum.de/forschung/pdf/32_AGUS.PDF) (februar 2012).

- [80] M. Naismith, J. Wammes, H. Mulleneers, Soil & Groundwater protection by the mineral barrier Trisoplast (Applications and new developments), Remediation Technologies Symposium (RemTech™, 2001) in Baff, Canada) <http://www.esaa-events.com/remtech/2009/pdf/09-Naismith-paper.pdf.pdf> (Jun 2012).
- [81] D. Đurović, D. Urošević, J. Tanasijević, M. Savić, J. Jovanović, M. Jovanović, A. Spasić, Power plant coal storage design: prevention of water pollution, 43rd International October Conference on Mining and Metallurgy, October, Kladovo, Serbia, 2011, pp. 12–15.
- [82] J. Tanasijević, M. Savić, J. Jovanović, M. Jovanović, Improved Technical Solution of Power Plant Coal Storage, International Conference Innovation as a Function of Engineering Development, November, Niš, Serbia, 2011, pp. 25–26.
- [83] D. Boels, Comparing performance of Trisoplast with different mineral liner materials, T.C. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann (eds.), Barriers, waste mechanics and groundwater pollution; Sardinia 2001, eighth international waste management and landfill symposium; Proceedings, Vol. 3, S.I., Italy, CISA, 2001, pp. 45–54.
- [84] D. Boels, S. Melchior, B. Steinert, Are Trisoplast barriers sustainable? An evaluation of old barriers in landfill caps, AlterraReport 541, 2003.
- [85] Pravilnik o sadržini i načinu vršenja tehničke kontrole glavnih projekata, „Sl. glasnik RS“, broj 93/2011.

## SUMMARY

### IMPERMEABLE LAYERS IN LANDFILL DESIGN

Milica Karanac<sup>1</sup>, Mića Jovanović<sup>2</sup>, Eugène Timmermans<sup>3</sup>, Huib Mulleneers<sup>3</sup>, Marina Mihajlović<sup>1</sup>, Jovan Jovanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Innovation Center, Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia*

<sup>2</sup>*Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia*

<sup>3</sup>*Trisoplast Mineral Liners International BV, The Netherlands*

(Review paper)

Landfills are complex systems that could potentially contaminate the environment. This needs to be prevented by providing impermeability during the landfill design. In this aim, the related regulations should be followed and adequate materials that provide impermeability should be used. The first part of the paper presents a review of the current regulations, interpretations, and recommendations from the U.S., EU and Republic of Serbia. Knowing that the Serbian regulation should fully follow the related European Directive, some inadequate formulations and terms were observed in the analyses related to the Directive Annex I, 3.2. Request of the Regulation that deals with the bottom of the landfill leakage is formulated differently than in the Directive as well. The mentioned problems enable some design solutions that are not among the best available techniques. In the second part, the paper presents a comparative analysis of possible alternatives in impermeable layer design, both for the bottom and landfill cover. Some materials like clay, CCL, GCL might not be able to satisfy the prescribed requirements. The longest lifetime and the lowest coefficient of permeability, as well as excellent mechanical, chemical and thermal stability, show the mixture of sand, bentonite and polymers (PEBSM).

*Keywords:* Landfill design • Landfill impermeability • Artificial geological barrier