



[www.ror.tf.bor.ac.rs](http://www.ror.tf.bor.ac.rs)

Stručni rad

UDK 628.472.3(497.11)

## PRILOG TEHNOLOŠKOM PROJEKTOVANJU DEPONIJA U SRBIJI

### LANDFILL DESIGN IN SERBIA

Milica Karanac<sup>1</sup>, Mića Jovanović<sup>2,\*</sup>, Marina Mihajlović<sup>1</sup>, Ana Dajić<sup>1</sup>, Dimitrije Stevanović<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

Primljen: 14. januar 2015. Prihvaćen: 15. april 2015.

**IZVOD** – Deponovanje otpada je element integrisanog upravljanja otpadom. Valjano izrađeni projekti izgradnje i/ili zatvaranja deponije osiguravaju bezbedno odlaganje otpada, uz minimalne negativne uticaje na životnu sredinu. U prvom delu rada izvršen je pregled i analiza deponija u Republici Srbiji. U drugom delu rada, u funkciji analize, opisani su značajni elementi tehnološkog projektovanja savremenih deponija koji uključuju: a) program deponovanja, b) obezbeđivanje vodonepropusnosti dna i prekrivnog sloja, c) sakupljanje i tretman procednih voda i d) sakupljanje, tretman i iskorišćenje deponijskog gasa. U radu je konstatovano da postojeće, savremene deponije nisu u potpunosti projektovane u skladu sa propisima, te da je neophodna njihova rekonstrukcija. Takođe, postojeća smetlišta i divlje deponije neophodno je zatvoriti i sanirati. U ovom radu predstavljene su smernice za valjano tehnološko projektovanje deponija koje su u funkciji ispunjavanja zahteva i preporuka nacionalnih i evropskih propisa.

**Ključne reči:** projektovanje deponije, program deponovanja, vodonepropusni sloj, procedne deponijske vode, deponijski gas

**ABSTRACT** - Waste disposal is an important element of integrated waste management. In order to dispose of waste that is free of environmental risk, the proper design of landfills during their construction and/or closure is necessary. The first section of the paper presents the current state of landfills in Serbia, the second deals with problems in project design of landfills, especially in regard to their: a) program of waste disposal; b) impermeable layer; c) leaching collection and treatment; and d) gas collection and treatment. Analysis shows that many modern landfills in Serbia do not meet environmental protection requirements, therefore, they need reconstruction. All existing landfills owned by municipalities, as well as illegal dump sites, should be adequately closed. This paper presents the guidelines for successful landfill design which are to serve to meet the requirements and recommendations of Serbian and European regulations. Sound design of landfill technological elements should insure full sustainability of landfills in Serbia.

**Key words:** landfill design, waste disposal procedure, impermeability, landfill leachate, landfill gas

\* Kontakt adresa autora: Mića Jovanović, Tehnološko - metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija, E - mail: [mica@tmf.bg.ac.rs](mailto:mica@tmf.bg.ac.rs)

\* Rad je delimično predstavljen na 27. međunarodnom kongresu o procesnom inženjerstvu PROCESING '14, 22-24. septembar 2014. Beograd Srbija (2014)

\*\*Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti na projektu TR 34009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Posebnu zahvalnost dugujemo Agenciji za zaštitu životne sredine Republike Srbije.

## UVOD

Elementi integrisanog upravljanja otpadom obuhvataju: nastajanje otpada, selekciju na mestu nastanka, sakupljanje, transport, skladištenje, reciklažu, tretman otpada sa ili bez iskorišćenja energije i deponovanje. Pored različitih postupaka tretmana otpada, kao što su spaljivanje i mehaničko - biološki tretman, uvek postoji potreba za deponovanjem ostatka - otpada kao neizbežnim sastavnim delom tretmana. U Evropskoj Uniji, pre 15 godina, doneta je Direktiva o deponijama (u daljem tekstu Direktiva) koja je dopunjena odlukom Saveta Evropske komisije za utvrđivanje kriterijuma i procedura za prihvatanje otpada [1, 2]. Direktiva definiše ciljeve koje bi trebalo ispuniti, ujedno predstavlja i najbolje dostupnu tehniku za projektovanje različitih klasa deponija (eng. *Best Available Techniques*, BAT) [3]. Irska Agencija za zaštitu životne sredine (eng. *Ireland's Environment Protection Agency*, EPA) izdala je smernice za najbolje dostupne tehnike u vezi sa aktivnostima na deponijama [4]. Republika Srbija (u daljem tekstu RS) je 2010. god., po ugledu na Direktivu, donela Uredbu o odlaganju otpada na deponije (u daljem tekstu Uredba) [5]. Uredba klasifikuje deponije u tri osnovne klase: deponije inertnog, neopasnog i opasnog otpada. Stručna javnost iznela je stav da je potrebno donošenje podzakonskih akata, tumačenja i izmena pojedinih elemenata Uredbe [6].

Postoji veliki broj radova koji se bavi problematikom otpada [7] kao i pojedinim elementima tehnološkog projektovanja deponija kao što su: postupak deponovanja [8], izgradnja vodonepropusnih slojeva [9-11], upravljanje i tretman procednim vodama [12, 13] i deponijskim gasom [14]. U domaćoj naučnoj literaturi postoje radovi iz oblasti upravljanja otpadom [15-21], ali je malo onih koji se bave samim procesom projektovanjem deponija [6, 21].

U stručnoj literaturi, zvaničnim dokumentima RS i u praksi pojavljuju se različiti termini za deponije: divlja, neuređena, nekontrolisana, stara, zastarela, sanitarna, savremena, moderna deponija, smetlište, nesanitarna komunalna deponija čvrstog otpada, regionalna sanitarna deponija, itd. U ovom radu za postojeće deponije koje nisu u skladu sa propisima koristi se termin **neuređena deponija**. Neuređene deponije mogu biti legalne (opštinske/gradske sa dozvolom za odlaganje)- **smetlišta** ili ilegalne - **divlje deponije**. Za deponije koje su izgrađene i rade u skladu

sa propisima/tehničkim standardima koristi se pojam **savremena deponija**.

U praksi izgradnje industrijskih postrojenja čest je slučaj izostanka tehnoloških projekata u tehničkoj dokumentaciji. Cilj rada je formulisanje osnove za valjano tehnološko projektovanje deponija u Srbiji. U prvom delu rada izvršen je pregled i analiza postojećeg stanja deponija. U funkciji rezultata analize, u drugom delu rada, predstavljeni su elementi tehnološkog projektovanja savremenih deponija i diskutovana moguća rešenja. Predstavljanje smernica za valjano tehnološko projektovanje deponija je u funkciji ispunjavanja zahteva i preporuka nacionalnih i evropskih propisa.

## STANJE DEPONIJA U SRBIJI

Prema Nacionalnoj strategiji upravljanja otpadom, do 2019. god., predviđeno je formiranje regionalnih deponija kao komponente regionalnih centara za upravljanje otpadom, kroz udruživanje više opština. U planu je izgradnja 29 regionalnih centara za upravljanje otpadom sa centrima za separaciju reciklabilnog otpada, centrima za kompostiranje ili anaerobnu digestiju, centrima za odvojeno sakupljanje reciklabilnog otpada i transfer stanicama u skladu sa tehničkim zahtevima/pravilima Evropske Unije [22].

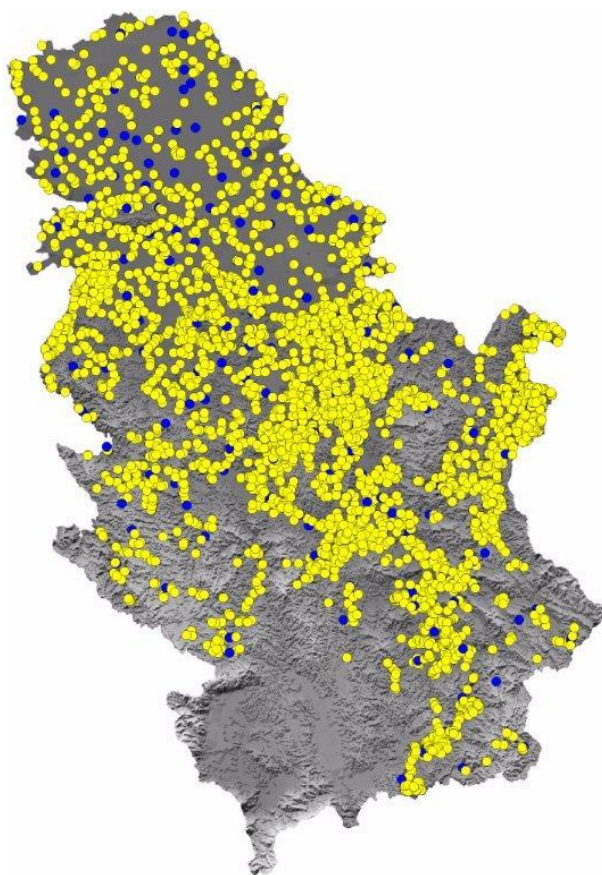
Pre pristupanja procesu projektovanja deponije, potrebno je precizno definisati kriterijume i procedure za prihvatanje, neprihvatanje i odlaganje otpada na deponiju, odnosno vrste otpada koje se na njoj mogu odlagati u skladu sa Direktivom i Uredbom. U zavisnosti od vrste otpada, odnosno granične vrednosti parametara prema listama parametara za ispitivanje otpada za odlaganje, projektom se definišu obavezni elementi za različite klase deponija zahtevani Uredbom [5, 23].

Vodonepropusni sloj obezbeđuje se postavljanjem geološke barijere (npr. glina, bentonitni tepih, mešavina peska i bentonita ojačana polimerom, itd.). Drugi obavezan element deponije je zaptivni element (npr. folija). Neophodno je obezbediti vodonepropusnost završnog, prekrivnog sloja prilikom zatvaranja deponija. Obavezno je sakupljanje i tretman procednih voda, sa ili bez recirkulacije, kao i sakupljanje i tretman deponijskog gasa, njegovo iskorišćenje ili spaljivanje [5].

U RS trenutno postoji više od 3500 identifikovanih svih tzv. „deponija“. Oko 180 su zvanične opštinske/gradske neuređene deponije i spadaju u smetlišta [18]. Ostale deponije su divlje, bez

identifikovanog vlasnika, nalaze se na neodgovarajućim i/ili nepristupačnim lokacijama, i značajno zagađuju okruženje. Svega sedam novoizgrađenih deponija kandiduju se da budu savremene. U vezi sa ispunjavanjem važećih propisa kod novoizgrađenih deponija, sa tehnološkog aspekta, javljaju se određene dileme. Argument u prilog sumnji je činjenica da većina pomenutih, novoizgrađenih deponija nema upotrebnu i integrisanu dozvolu.

Na slici 1 prikazana je mapa postojećih deponija u RS. Svetlim tačkama obeležene su divlje, a tamnim smetlišta i savremene deponije. Valja primetiti da se zvanični podaci Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije ne poklapaju u potpunosti sa napred pomenutim podacima iz drugih izvora. Ove razlike ne utiču na zaključak da je ogromna većina deponija u Srbiji neuređena. Prema Strategiji predviđeno je zatvaranje, sanacija i rekultivacija postojećih, neuređenih deponija [22].



**Slika 1.** Mapa deponija u Srbiji (izvor: Agencija za zaštitu životne sredine)

Savremene deponije u Srbiji velikom većinom su deponije regionalnog tipa i prema strategiji, predviđene su za odlaganje neopasnog otpada (tabela 1). Ne postoji definisan postupak prijema otpada na deponije u skladu sa Direktivom i Uredbom [2, 5]. Kao vodonepropusni sloj većina ovih deponija koristi glinu. Kao zaptivni element koristi se HDPE folija (eng. *High - density polyethylene*, HDPE), dok se kao zaštitni sloj zaptivnog elementa koristi geotekstil. Procedne vode sakupljaju se i tretiraju u lagunama, a pojedine deponije ne vrše tretman otpadnih voda već ih vraćaju u telo deponije. Prečišćene otpadne vode se upuštaju u recipijent ili gradsku kanalizaciju. U ovom momentu, nijedna savremena deponija ne vrši spaljivanje deponijskog gasa, već se nastali gas ispušta u atmosferu. U RS ne postoje deponije za opasan otpad.

Pored navedenih deponija u tabeli 1 postoje izgrađene i deponije lokalnog tipa u Gornjem Milanovcu i Vranju. U pojedinim regionalnim centrima deponije su u fazi izgradnje: Pančevo-Opovo i Inđija. Deponije za koje je tehnička dokumentacija u pripremi predviđene su na lokacijama: Ub, Subotica, Nova Varoš, Zrenjanin, Zaječar i Vršac.

Analizom prikupljenih podataka uočeni su pojedini elementi koji ukazuju da novoizgrađene deponije i one koje su u procesu izgradnje nisu u potpunosti projektovane u skladu sa propisima. Uočene slabosti odnose se na nedovoljnu kontrolu prijema otpada, odnosno vrstu otpada koja se odlaže na pomenute deponije. Ne postoji definisan postupak odlaganja otpada. Takođe, slabosti se mogu uočiti i u obezbeđenju adekvatne vodonepropusnost dna, strana i prekrivnog sloja; kao i sistema za prečišćavanje procednih voda. Ističe se da nijedna deponija nema sistem za spaljivanje deponijskog gasa. Sve nove deponije trebalo bi da imaju dozvolu za integrisano sprečavanje i kontrolu zagađivanja životne sredine (eng. *Integrated Pollution Prevention and Control*, IPPC). Rok za podnošenje zahteva za IPPC dozvole za sve postojeće regionalne deponije neopasnog otpada istekao je decembra 2013. godine. Nijedna deponija u Srbiji nema ovu dozvolu, iako su pojedine deponije u proceduri za njeno dobijanje.

Tabela 1. Pregled postojećih regionalnih savremenih deponija u Srbiji

RB	Deponija	Tip deponije <sup>1</sup>	Vlasništvo deponije <sup>2</sup>	Obezbeđenje vodonepropusnosti	Procedne vode			Deponijski gas	
					Sakupljanje i tretman	Upuštanje	Recirkulacija	Sakupljanje i tretman	Iskorišćenje
1.	Kikinda	NO, aktivna od 2008. god.	JPP, „A.S.A. Kikinda d.o.o.“	Dva sloja gline po 0,25 m	Sabirni bazen. Nema tretmana	Ne	Da	Biotnovi	Ne
2.	Lapovo, „Vrbak“	NO, aktivna od 2009. god.	JPP, „A.S.A. Eko d.o.o.“	Dva sloja gline po 0,25 m	Sabirni bazen. Nema tretmana	Ne	Da	Biotnovi	Ne
3.	Jagodina, „Gigoš“	NO, aktivna od 2010. god.	JPP „Poor Werner&Weber“	Dva sloja bentonitnog tepiha	Aeraciona i taložna laguna	Da-u gradsku kanalizaciju	Da	Biotnovi	Ne
4.	Užice, „Duboko“	NO, aktivna od 2011. god.	JKP „Duboko“	Glina i bentonitni tepih	Aeraciona i taložna laguna	Da-u lokalni potok i gradsku kanalizaciju	Da	Biotnovi	Ne
5.	Pirot, „Muntina padina“	NO, aktivna od 2013. god.	JKP „Regionalna deponija Pirot“	0,50 m gline	Aeraciona i taložna laguna	Da-u gradsku kanalizaciju	Ne	Biotnovi	Ne
6.	Leskovac, „Željkovac“	NO, aktivna od 2009. god.	JPP „Poor Werner&Weber“	Dva sloja bentonitnog tepiha	Aeraciona i taložna laguna	Da-u gradsku kanalizaciju	Da	Biotnovi	Ne
7.	Šabac i Sremska Mitrovica „Srem-Mačva“	NO, probna dozvola od januara 2014. god.	JKP Regionalna deponija „Srem Mačva“	Slojevi gline od po 0,15 m, ukupne debljine 0,50 m	Aeraciona i taložna laguna	Ne	Da	Biotnovi	Ne

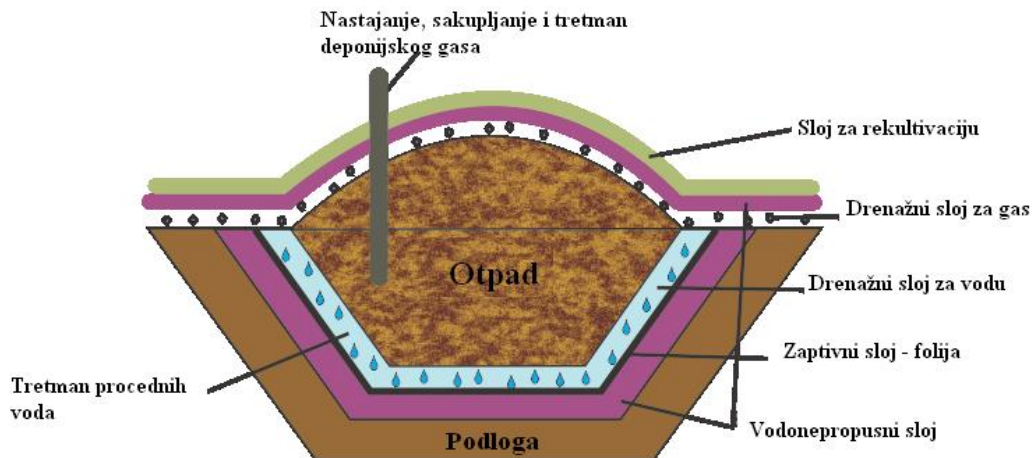
<sup>1</sup>Neopasan otpad- NO

<sup>2</sup>Javno komunalno preduzeće- JKP, javno-privatno partnerstvo- JPP

## ELEMENTI TEHNOLOŠKOG PROJEKTOVANJA DEPONIJA

Savremena deponija predstavlja složen sistem sastavljen iz nekoliko celina koje bi trebalo da spreče potencijalno zagađivanje zemljišta, vazduha, površinskih i podzemnih voda. Valjano projektovanje deponija obezbeđuje trajno rešavanje problema zagađenja životne sredine i zaštitu zdravlja stanovništva. Tokom rada deponije sprovodi se postupak za odlaganje otpada u skladu sa projektovanim planom odlaganja. Pojedine kasete deponije se pune i privremeno prekrivaju i/ili zatvaraju u skladu sa planom i proračunima količina otpada, a nove otvaraju. Na kraju životnog veka deponije (15 - 30 godina) ista se finalno

zatvara. Akcenat rada su tehnološka rešenja savremenih deponija, na osnovu kojih se razrađuju ostala tehnička rešenja (posebno značajno hidrograđevinsko, mašinsko i elektro rešenje) [24]. Tehnološki projekat bavi se postupkom odlaganja čvrstog otpada na deponiju na način da se u potpunosti primene tehnološki proces odlaganja i obezbede mere zaštite životne sredine u odnosu na okruženje. Ključni elementi tehnološkog projekta savremene deponije koji bi trebalo da definišu valjana rešenja su: a) program/postupak deponovanja otpada, b) obezbeđivanje vodonepropusnosti dna i prekrivnog sloja (zatvaranje deponije), c) sakupljanje i tretman procednih voda i d) sakupljanje, tretman i iskorišćenje deponijskog gasa (slika 2).

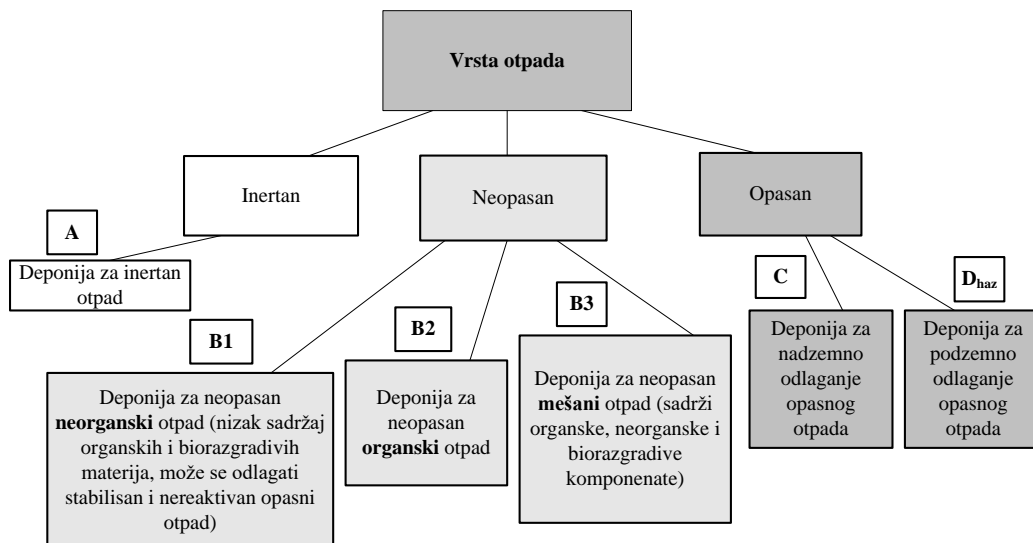


Slika 2. Telo deponije sa ključnim elementima tehnološkog projektovanja

### Program deponovanja otpada

Program/postupak deponovanja otpada odnosi se na vrstu i klasu otpada koji se prihvata na deponije. U EU postoji dodatna klasifikacija deponija na potklase (slika 3). Postoji definisano koja vrsta otpada se deponuje na određenoj klasi deponije [2]. Na deponiju neopasnog otpada može se odložiti samo komunalni otpad posle separacije, neopasni otpad, stabilizovan i nereaktivan opasan otpad. Na deponiji za opasan otpad može biti

odložen samo opasan otpad, a na deponiji za inertan otpad samo inertan otpad. U našoj praksi često se dešava da pored navedenog otpada bude odložen i netretirani opasan, kao i industrijski otpad. Stoga, veoma je važno obratiti pažnju na precizno definisanje vrste otpada koji se može odlagati na deponiju, kao i šema i plana odlaganja. Obzirom da su savremene deponije u RS projektovane za odlaganje neopasnog otpada, konstatuje se da iste ne zadovoljavaju zahteve definisanja programa deponovanja.



Slika 3. Klasifikacija deponija prema vrsti otpada koja se deponuje [2]

### Obezbeđivanje vodonepropusnosti

Cilj postavljanja vodonepropusnog sloja je zaštita podzemnih, površinskih voda i zemljišta od zagađenja iz tela deponije i vrši se prema zahtevima i preporukama iz propisa [1, 5]. Vodonepropusnost dna i strana deponije obezbeđuje zaštitu tokom operativne faze rada deponije,

a prekrivnog sloja nakon završenog perioda eksploatacije, prilikom zatvaranja deponije. Vodonepropusnost dna deponije postiže se izgradnjom deponija na terenu sa osobinom prirodne geološke barijere ili uspostavljanjem veštačke geološke barijere, sastavljene od prirodnih i/ili veštačkih materijala. U

zavisnosti od klase deponije Uredba propisuje vrednosti koeficijenta vodopropusnosti - K i debljine barijere. Pored geološke barijere obavezan element deponija je veštačka zaptivna obloga, uglavnom folija (često mehanički zaštićena slojem geotekstila), koja se postavlja između geološke barijere i drenažnog sloja. Važno je istaći da zaptivna obloga ne može zameniti geološku barijeru i ne može biti upotrebljena kao veštački uspostavljena geološka barijera. Tehnološko rešenje vodonepropusnosti dna deponije pravi izbor materijala za veštački uspostavljenu geološku barijeru. Projekat bi trebalo da dokaže da izabrani materijal ispunjava zahteve Uredbe u pogledu vrednosti K. Da bi se obezbedila vodonepropusnost sa veštačkom barijerom pri debljini 0,5 m, za deponije neopasnog otpada, neophodno je da ekvivalentna vrednost koeficijenta vodopropusnosti iznosi  $K \leq 5 \times 10^{-10}$  m/s. Neophodno je da materijal sa takvim svojstvima ostane nepromenjen tokom životnog veka deponije. U praksi Srbije (videti tabelu 1) često se za te svrhe koristi 0,5 m gline. Zahtevi Uredbe biće ispunjeni, ukoliko visokokvalitetna glina (koja se može dobiti posebnom obradom) ima  $K \leq 5 \times 10^{-10}$  m/s i dug životni vek [6].

Prilikom zatvaranja savremene deponije prekrivni sloj sastoji se od vodonepropusnog sloja, drenažnog sloja za vodu i gas i sloja za rekultivaciju. Pitanje vodonepropusnosti prekrivnog sloja neopasnog i opasnog otpada, prema Uredbi, rešava se ugradnjom nepropusnog mineralnog sloja minimalne debljine 0,5m.

Kao elementi vodonepropusnog sloja najčešće se koriste sledeći materijali: a) prirodni (glina), b)

jednostavni materijali na bazi bentonita i veštačkih materijala (geomembrane; geosintetička glinena obloga - eng. *Geosynthetic Clay Liner*, GCL) i c) složeni materijali na bazi bentonita (mešavina peska i bentonita ojačana polimerom - eng. *Polymer Enhanced Bentonit-Sand Mixture*, PEBSM) [6]. Prilikom projektovanja deponija neophodno je proračunom i ispitivanjem dokazati karakteristike upotrebljenih materijala u pogledu vodonepropusnosti (npr. *Darsijev zakon*), kao i da se valjanost tih proračuna proveri i potvrdi u procesu tehničke kontrole tehničke dokumentacije. U praksi projektovanja savremenih deponija u RS, uočeno je da tehnička dokumentacija ne sadrži tehnološki projekat sa odgovarajućim proračunima i da se materijali za obezbeđivanje vodonepropusnosti biraju bez odgovarajućih valjanih, proverljivih podloga, što se ocenjuje neprihvatljivim.

### Tretman procednih voda

Kvalitet procednih deponijskih voda uslovljen je fizičkim, hemijskim i biološkim procesima u telu deponije. Sastav procednih voda zavisi od brojnih faktora: sastava otpada, njegovog predtretmana, procesa stabilizacije i razgradnje otpada na deponiji, visine i starosti odloženog otpada, tehnike punjenja i stepena sabijanja otpada, vremenskih i hidroloških uslova na lokaciji i sl. [25]. Na osnovu podataka iz literature, može se ilustrativno prikazati prosečan sastav procednih voda (tabela 2) [13].

Tabela 2. Kvalitet procednih voda

Parametri	Starost deponije, godina		
	<1	1-10	10-20
pH	5,4-7,7	7,1-8,7	7,3-9,3
Hloridi, mg/l	-	420-2.875	119-5.856
Suspendovane materije, mg/l	1.875	1.950-385,6	150-1.150
Ukupne suspendovane materije, mg/l	4,568 -6,786	848-6.786	767-6.786
HPK, mg/l		641-13.040	5.500-17.600
BPK, mg/l	5.000-15.000	280-15.000	207-1.800
TKN, mg/l	-	450-2.860	104-2.540
NH <sub>3</sub> -N, mg/l	-	150-2.700	2-47
Ni, mg/l	-	0,02-1,56	0-1,56
Cd, mg/l	-	0-0,126	0-0,05
Pb, mg/l	-	0-3,25	0-3,45
Cr, mg/l	-	0,046-16,9	0,04-1,16
Hg, mg/l	-	0,4-1,70	-

Procedne vode sakupljaju se drenažnim sistemom i mogu se tretirati zajedno sa otpadnim vodama iz postrojenja za separaciju reciklabilnog otpada, komunalnim otpadnim vodama iz pomoćnih objekata deponije, kao i otpadnim vodama od pranja vozila.

Količina procednih voda u toku godine značajno varira u funkciji meteoroloških uslova, a samim tim i njihov kvalitet, odnosno koncentracije zagađujućih materija. Postoje brojne tehnologije za tretman procednih voda prikazane u tabeli 3 [12, 13, 26, 27]. Nije primereno

unapred precizirati koje su tehnologije najbolje, odnosno ne može se predložiti opšte rešenje. Napred navedeno ukazuje na potrebe projektovanja postrojenja za prečišćavanje procednih voda koje bi bilo u stanju da se

efikasno i ekonomično izdori sa varijacijama u kvalitetu i količini otpadnih voda, kao i sa potrebnim stepenom prečišćavanja na osnovu zahtevanog kvaliteta vode u recipijentu.

**Tabela 3.** Tehnologije za tretman procednih voda

Tehnologija i procesi	Prednosti	Nedostaci
Fizičko-hemijski procesi: flotacija, koagulacija/flokulacija, taloženje, hemijska oksidacija, adsorpcija, aeracija i isparavanje	Niska ulaganja	Nizak nivo efikasnosti prečišćavanja
Biološki procesi: aerobni (aerisane lagune), sa suspendovanim aktivnim muljem, peščani filteri sa navodnjavanjem, anaerobni-anaerobne lagune i anaerobna digestija; rotacioni biološki reaktor	Efikasno i ekonomično uklanjanje BPK i amonijaka	Kompleksno održavanje sistema
Membranske tehnologije: mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija i reverzna osmoza	Visok nivo efikasnosti prečišćavanja	Visoka ulaganja, predtretman otpadnih voda, problematika otpadnog mulja

U svetu se često predlaže savremena metoda elektrokoagulacije sa nanofiltracijom, aerobne lagune i mokra polja [28, 29]. Jedan od načina za smanjenje zagađujućih materija u procednoj vodi je recirkulacija. Na deponijama sa recirkulacijom procednih voda ubrzavaju se biološki procesi razgradnje otpada unutar tela deponije. Dolazi do stabilizacije otpada, doprinosi se smanjenju njegove zapremine čime se omogućava odlaganje dodatne količine otpada, smanjuje sadržaj zagađujućih materija u procednim vodama, uz pospešivanje stvaranja metana [30-32]. Recirkulacijom procednih voda postiže se *in situ* tretman procednih voda čime se smanjuju troškovi tretmana procednih voda i ukupni troškovi rada deponije [33]. Obzirom na varijacije u kvalitetu i količini otpadnih voda postavlja se pitanje da li je moguće izgraditi deponiju bez sistema za prečišćavanje procednih voda, odnosno da jedina solucija za smanjenje koncentracije zagađujućih materija bude recirkulacija procednih voda. Autori izražavaju sumnju da bi potencijalno postojao problem u vezi sa definisanjem dimenzija prihvatnog bazena, čiji bi kapacitet osigurao prihvatanje celokupne količine otpadnih voda za vreme velikih padavina.

Napred navedeno ukazuje da je neophodno prečišćavanje procednih deponijskih voda. Jedan od načina je recirkulacija procednih voda kroz telo deponije čime se smanjuje koncentracija zagađujućih materija, ubrzava razgradnja otpada i povećava stvaranje deponijskog gasa.

### Nastajanje i sakupljanje deponijskog gasa

Deponijski gas, odnosno biogas nastaje kao proizvod mikrobiološke razgradnje otpada u aerobnim ili anaerobnim uslovima. Sastav deponijskog gasa zavisi od sastava i starosti otpada, faze razgradnje otpada, dubine deponije, sadržaja vlage, pH, temperature, stepena sabijanja otpada, atmosferskog pritiska, itd. Biološka razgradnja otpada odvija se u više faza. U početnoj fazi deponovanja postoje aerobni uslovi pri čemu se oslobađaju CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O. Razgradnjom otpada dolazi do potrošnje kiseonika kada aerobni uslovi postepeno prelaze u anaerobne, pri čemu se menja i pH. Tada se i dalje oslobađa CO<sub>2</sub> i stvaraju se kiseline. Prelaskom iz aerobnih u anaerobne uslove postepeno dolazi do stvaranja i CH<sub>4</sub>. U anaerobnim uslovima, tzv. metanogenoj fazi oslobađa se CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub>. Pored CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> deponijski gas sadrži i N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, H<sub>2</sub>, nemetanska jedinjenja, itd.

Postoji više matematičkih modela za predviđanje emisije deponijskog gasa [34]. Jedan od načina kojim se povećava stvaranje deponijskog gasa je recirkulacija procednih voda. Kao alternativa recirkulaciji procednih voda, a u cilju ubrzane i kontrolisane razgradnje otpada, preporučuje se aeracija otpada [35].

U zavisnosti od mehanizma biorazgradnje otpada bioreaktori se mogu podeliti na: aerobne, anaerobne, kombinovane aerobno/anaerobne hibridne i fakultativne. Postoje i poluaerobne deponije sa poboljšanom

recirkulacijom procednih voda [31]. Pojedini autori su pokazali da su anaerobni reaktori sa recirkulacijom procednih voda znatno efikasniji u pogledu smanjenja koncentracije zagađujućih materija, povećanja stvaranja deponijskog gasa, ubrzanja degradacije otpada, kao i produžavanja životnog veka deponije [36]. Kod hibridnih bioreaktora u gornjim slojevima su aerobni uslovi i ubrzana je razgradnja otpada, dok u donjim slojevima, vladaju anaerobni uslovi i povećana je količina stvaranja  $\text{CH}_4$ . Fakultativni bioreaktor je kombinovani proces anaerobne razgradnje uz mehanizam za smanjenje koncentracije amonijaka u procednoj vodi. Biološkim procesom nitrifikacije vrši se konverzija amonijaka u nitrate, potom se tretirana procedna voda vraća u telo deponije. U anaerobnim uslovima pojedini mikroorganizmi, uključujući i fakultativne bakterije, u procesu denitrifikacije, koriste nitrate pri čemu dolazi do proizvodnje i uklanjanja gasovitog  $\text{N}_2$ . Prilikom odabira najpogodnijeg tipa bioreaktora, trebalo bi uzeti u obzir sve navedene faktore, koji uslovljavaju nastajanje biogasa.

Metan u kontaktu sa kiseonikom iz vazduha ima eksplozivna svojstva na povišenim temperaturama. Da bi se odstranili negativni uticaji nekontrolisanog širenja deponijskog gasa, obavezno je kanalisanje i plansko sakupljanje gasa postavljanjem degazacionog sistema.

Sakupljanje i kontrola deponijskog gasa postiže se postavljanjem horizontalnih i vertikalnih sabirnih cevi za gas (biotnovi ili neki drugi, savremeni sistem). Biotnovi su gasni bunari koji se postavljaju po telu deponije i služe za odvođenje deponijskog gasa (slika 4).



Slika 4. Biotrn

(izvor: <http://www.duboko.rs/sr/galerija/slike/detail/63/486>)

Savremeni sistem za sakupljanje deponijskog gasa sastoji se od gustih mreža vertikalnih i horizontalnih perforiranih fleksibilnih cevi, kojima se postiže maksimalna ekstrakcija gasa, u kombinaciji sa izgradnjom prekrivnih slojeva (slika 5). Takav sistem obezbeđuje kontrolu protoka nastalog i sakupljenog gasa, bez gubitka ili emisija u atmosferu. Karakterišu ga jednostavna ugradnja, mogućnost optimalnog, procentualnog podešavanja izdvajanja  $\text{CH}_4$  i niski operativni troškovi. Omogućava izvlačenje i do četiri puta više gasa iz deponije u kraćem vremenskom periodu u odnosu na tradicionalne sisteme [37].



Slika 5. Savremeni sistem za sakupljanje deponijskog gasa (izvor: Multriwell, The Netherlands)

### Tretman deponijskog gasa

Prema Direktivi i Uredbi, zahteva se sakupljanje i iskorišćenje deponijskog gasa uz dobijanje energije

[1, 5]. Otpadni deponijski gas klasifikovan je kao obnovljivi izvor energije. Ukoliko iskorišćenje deponijskog gasa nije ekonomično, onda se mora spaljivati na licu mesta na „baklji“.



Agencija za životnu sredinu (eng. *Environment Agency*, EA) Velike Britanije razvila je niz dokumenata koji razrađuju problematiku upravljanja deponijskim gasom, njegovim iskorišćenjem, sakupljanjem i spaljivanjem. Pravilno upravljanje deponijskim gasom je od velikog značaja u prevenciji nastajanja požara i eksplozija, širenja neprijatnih mirisa i emisija gasova sa efektom staklene bašte. Američka agencija za zaštitu životne sredine (eng. *United States Environmental Protection Agency*, US EPA) razvila je dokument o emisiji štetnih gasova sa zatvorenih deponija [38].

Jedan od načina tretmana deponijskog gasa je spaljivanje na baklji. Daleko bolje, energetske efikasnije rešenje je sagorevanje i direktna upotreba nastale toplotne energije. Direktna upotreba deponijskog gasa je isplativa kada su objekti, koji bi koristili deponijski gas kao gorivo, maksimalno udaljeni 8 km od deponije [15]. Za tretman deponijskog gasa mogu se koristiti: motori sa unutrašnjim ili spoljašnjim sagorevanjem, gasne turbine, mikroturbine, Stirlingov motor, infracrveni grejač, membranska separacija (proizvodnja metana) i za isparavanje procednih voda, ukoliko je tretman otpadnih voda skup [14]. Neke tehnologije zahtevaju predtretman deponijskog gasa, dodatni operativni materijal, a kao nus proizvod mogu nastati otpadne vode što znatno poskupljuje održavanje postrojenja.

Prednost iskorišćenja deponijskog gasa u energetske svrhe je zaštita vazduha od zagađenja, smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, takođe postiže se i ekonomska dobit. Indirektna upotreba deponijskog gasa je proizvodnja električne energije na generatorima.

Konstatuje se da je kod savremenih deponija neophodno sakupljanje i iskorišćenje deponijskog gasa. Ukoliko iskorišćenje deponijskog gasa nije ekonomično, onda se mora spaljivati na licu mesta.

## ZAKLJUČAK

Analizom prikupljenih podataka o postojećim deponijama u RS konstatovano je da je većina deponija neuređena. Oko 180 deponija spada u legalne - smetlišta, a preostale su ilegalne - divlje deponije. U budućnosti, sve ove objekte, trebalo bi rekonstruisati, a neke i zatvoriti. Novoizgrađene deponije, sa tehnološkog aspekta, nisu u potpunosti projektovane u skladu sa propisima i nemaju upotrebne dozvole. Savremene deponije trebalo bi da budu izgrađene u skladu sa najbolje dostupnim tehnikama i da imaju IPPC dozvolu. Da bi savremena deponija bila valjana projektovana neophodno je obezbediti sve elemente tehnološkog projektovanja koji obuhvataju: a) program/postupak

deponovanja otpada, b) obezbeđivanje vodonepropusnosti dna i prekrivnog sloja (zatvaranje deponije), c) sakupljanje i tretman procednih voda i d) sakupljanje, tretman i iskorišćenje deponijskog gasa. U praksi je uočeno da tehnička dokumentacija ne sadrži tehnološki projekat sa odgovarajućim proračunima i da se materijali za obezbeđenje vodonepropusnosti biraju bez odgovarajućih podloga, što je neprihvatljivo. Program prijema otpada savremene deponije trebalo bi u potpunosti da odgovara klasi (potklasi) deponije. Prečišćavanje procednih voda zahteva projektovanje postrojenja koje može da podnese varijacije u kvalitetu i količini otpadnih voda i karakteristike recipijenta. Ukazuje se na mogućnost/potrebu da se vrši recirkulacija procednih voda kroz telo deponije, radi upravljanja stvaranjem deponijskog gasa i smanjenja koncentracije zagađujućih materija u otpadnoj vodi. Deponijski gas, kao obnovljivi izvor energije, trebalo bi sakupljati i iskoristiti za dobijanje energije. Smernice za valjano tehnološko projektovanje deponija predstavljene su u funkciji a) ispunjavanja zahteva i preporuka nacionalnih i evropskih propisa i b) izgradnje tehnološki i ekonomski održivih objekata za deponovanje otpada.

## LITERATURA

1. Directive 1999/31/EC of the European Communities Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC (OJ L 11/27, 16.1.2003.).
2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (OJ L 312/3, 22.11.2008.).
3. 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/geho0407bmho-e-e.pdf> (jul 2012.).
4. Environment Protection Agency Ireland, Final Draft BAT Guidance Note on Best Available Techniques for the Waste Sector: Landfill Activities, December 2011 <http://www.epa.ie/pubs/advice/bat/BAT%20Landfil%20-%20Final%20Draft%20-%20December%202011.pdf> (jun 2013.).
5. Uredba o odlaganju otpada na deponije, („Sl. glasnik RS“, br. 92/2010).

6. Karanac, M., Jovanović, M., Timmermans, E., Mulleneers, H., Mihajlović, M., Jovanović, J., Prilog projektovanju vodonepropusnih slojeva deponija, *Hem. Ind.* **2013**, 67 (6), 961-973.
7. Wilson, D. C, Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A, Alabaster, G., Comparative analysis of solid waste management in 20 cities, *Waste Manage Res* **2012**, 30, 237.
8. Environment Agency, Waste acceptance at landfills, Guidance on waste acceptance procedures and criteria, November 2010, [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/296422/geho1110btew-e.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296422/geho1110btew-e.pdf) (februar 2015.)
9. Hoor. A., Rowe. R., Potential for Desiccation of Geosynthetic Clay Liners Used in Barrier Systems, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **2013**, 139 (10), 1648-1664.
10. Divya, P. V., Viswanadham, B. V. S., Gourc, J. P., Influence of geomembrane on the deformation behaviour of clay-based landfill covers, *Geotext. Geomembr.* **2012**, 34, 158-171.
11. Simon, Franz-Georg, Müller, Werner W., Standard and alternative landfill capping design in Germany, *Environ. Sci. Policy* **2004**, 7, 277-290.
12. Renou, S., Givaudan, J-G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., Landfill leachate treatment: review and opportunities, *J. Hazard. Mater.* **2008**, 150 (3), 468-493.
13. State of the Art Review Landfill Leachate Treatment, Asian Institute of Technology, Thailand and National Engineering Research Center for Urban Pollution Control Tongji University Shanghai, China (2004).
14. Dudek, J., Klimek, P., Kolodziejak, G., Niemczewska, J., Zaleska-Bartosz, J., Landfill gas energy technologies, Institut nafty i gazu, Kraków **2010**.
15. Stevanović-Čarapina, H., Stepanov, J., Savić, D., Mihajlov, A., Emisija toksičnih komponenti kao faktor izbora najbolje opcije za upravljanje otpadom primenom koncepta ocenjivanja životnog ciklusa, *Hem. Ind.* **2011**, 65 (2), 205-209.
16. Vujić, G., Jovičić, N., Redžić, N., Jovičić, G., Batinić, B., Stanisavljević, N., Abuhress, O. A., A fast method for the analysis of municipal solid waste in developing countries - case study of Serbia, *Environ. Eng. Manag. J.* August **2010**, 9 (8), 1021-1029.
17. Vujić, G., Batinić, B., Stanisavljević, N., Ubavin, D., Živančev. M., Analiza stanja i strateški okvir upravljanja otpadom u Republici Srbiji, *Reciklaža i održivi razvoj* **2011**, 4, 14-19.
18. Vujić, G., Milovanović, D., Upravljanje otpadom, pravac naučnih istraživanja u budućnosti, *Reciklaža i održivi razvoj* **2012**, 5, 30-38.
19. Prokić, D., Mihajlov, A., Contaminated sites. Practice of solid waste Management in a developing country (Serbia), *Environ. Prot. Eng.* **2012**, 38 1.
20. Trumić, M., Trumić, M., Bogdanović, G., Postupci reciklaže plastičnog otpada sa posebnim osvrtom na mehanički tretman, *Reciklaža i održivi razvoj* **2012**, 5, 39-52.
21. Karanac, M., Mihajlović, M., Dajić, A., Stevanović, D., Jovanović, J., Jovanović, M., Tehnološki elementi projektovanja deponija, 27. međunarodni kongres o procesnom inženjerstvu PROCESING '14, 22-24. septembar, Beograd Srbija (2014), ISBN: 978-86-81505-75-5, pp. 1-6.
22. Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. god., („Sl. glasnik RS“, br. 29/2010).
23. Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada, („Sl. glasnik RS“, br. 56/2010).
24. Jovanović, M., Jovanović, J., Osnovi tehnološkog projektovanja, Udruženje hemičara i tehnologa Srbije: Čigoja štampa, Beograd 2013.
25. Heng Lee, A., Nikraz, H., Tse Hung, Y., Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality, *IJESD* October **2010**, 1 (4).
26. Abood, A. R., Bao, J., Dua, J., Zheng, D., Luo, Y., Non-biodegradable landfill leachate treatment by combined process of agitation, coagulation, SBR and filtration, *Waste Manage.* **2014**, 34, 439-447.
27. Ahmed, F. N., Lan, C. Q., Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review, *Desalination* **2012**, 287, 41-54.
28. Mariam, T., Nghiem, L. D., Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes, *Desalination* **2010**, 250, 677-681.
29. Watzinger A., Reichenauer, T. G., Gerzabek, M. H., Blum, W.E.H. Treatment of Landfill Leachate by Irrigation and Interaction with Landfill Gas, *Environ. Technol.* **2006**, 27 (4), 447-457.
30. Bilgili, M. S., Demir, A., Özkaya, B., Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes, *J. Hazard. Mater.* **2007**, 143, 177-183.
31. Benson, C. H., Barlaz, M. A., Lane, D. T., Rawe, J. M., Practice review of five bioreactor/recirculation landfills, *Waste Manage.* **2007**, 27, 13-29.
32. Calabrò, P. S, Mancini, G., Possible interactions between recirculated landfill leachate and the

- stabilized organic fraction of municipal solid waste, *Waste Manag. Res.* **2012**, 30 (5), 551-557.
33. Berge, N. D., Reinhart, D. R., Batarseh, E. S., An assessment of bioreactor landfill costs and benefits, *Waste Manage.* **2009**, 29, 1558-1567.
34. Zishen, M., Scheutz, C., Kjeldsen, P., Evaluating the biochemical methane potential (BMP) of low-organic waste at Danish landfills, *Waste Manage* **2014**, 34 2251–2259.
35. Ritzkowski, M., Stegmann, R., Landfill aeration worldwide: Concepts, indications and findings, *Waste Manage.* **2012**, 32, 1411-1419.
36. Erses, A. S., Onay, T. T., Yenigun, O., Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills, *Bioresource. Technol.* **2008**, 99, 5418-5426.
37. Naismith, M., Timmermans, E., Hillebregt, T., A new, effective solution for landfill gas extraction, Proceedings Venice 2012, Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste San Servolo, Venice, Italy; 12-15 November 2012.
38. Robertson, T., Dunbar, J., Guidance for evaluating landfill gas emissions from closed or abandoned facilities, U. S. Environment Protection Agency, EPA-600/R-05/123a September 2005.