

KONTINUÁLNÍ SLEDOVÁNÍ PLYNNÝCH EMISÍ NA SKLÁDCE KOMUNÁLNÍHO ODPADU

MARTIN KUBAL, MAREK MARTINEC, JANA
CHUMCHALOVÁ a JIŘÍ HENDRYCH

*Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta
technologie ochrany prostředí, Ústav chemie ochrany pro-
středí, Technická 5, 166 28 Praha 6
Jana.Chumchalova@vscht.cz*

Došlo 31.8.20, přijato 7.11.20.

Klíčová slova: skládka, komunální odpad, skládkový plyn

Úvod

Komunální odpad vzniká v posledních letech v České republice v množství přibližně 4–5 milionů tun ročně a zhruba 50–60 % tohoto množství je ukládáno na skládky¹. Vysoký podíl skládkovaného odpadu je z hlediska obecně přijímané hierarchie nakládání s odpady nežádoucí, zejména s ohledem na ztrátu materiálové či energetické hodnoty². Dosud není rovněž zcela ujasněný přístup k uzavřeným skládkám, zejména v dlouhodobém časovém horizontu^{3,4}. Ze všech těchto hledisek je u každé jednotlivé skládky důležité mít k dispozici maximální dostupné množství objektivně podložených informací týkajících se charakteristik uloženého odpadu a stavu, ve kterém se odpad nachází. Významnou část těchto informací lze získat sledováním kvality i kvantity produkovaného skládkového plynu. V tomto textu je jako jeden z možných nástrojů k získání takových informací představeno dlouhodobé kontinuální sledování skládkového plynu prováděné na jedné dílčí sekci již uzavřeného skládkového tělesa.

Teoretická část

Tuhý komunální odpad je obecně tvořen rozložitelnou a nerozložitelnou frakcí, přičemž hranice mezi těmito frakcemi není příliš ostrá. Do rozložitelné frakce se počítají hlavně látky organického původu, zastoupené zde například kuchyňským odpadem, rostlinnými a živočišnými zbytky, papírem a dřevem. Rozklad organické frakce komunálního odpadu ve skládce bývá v odborné literatuře rozdělován do čtyř základních kroků^{4,5}. První krok odpovídá relativně krátké době, kdy je odpad na skládku navážen a zhuťován, jeho rozklad probíhá za aerobních podmínek a hlavním plynným produktem je oxid uhličitý. Ve druhém kroku se již odpad nachází v anaerobních podmínkách (překrytý dalším odpadem, případně těsnicí vrstvou) a dochází zde k fermentačním reakcím, jejichž hlavními

plynnými produkty jsou oxid uhličitý a vodík, přičemž typickým produktem ve skládkovém výluhu jsou nižší mastné kyseliny, zejména octová kyselina. Třetí krok, zpravidla označovaný jako methanogeneze, je charakteristický společnou tvorbou methanu a oxidu uhličitého. Ve čtvrtém a závěrečném kroku rozkladu organických látek odpad opět přechází do aerobních podmínek a dominantním plynným produktem je oxid uhličitý. Postupný rozklad organické frakce odpadu je tedy podle výše uvedené teorie provázen charakteristickým složením plynných produktů.

Teoretický mechanismus rozkladu organické frakce komunálního odpadu se v podmínkách skládkového tělesa uplatňuje s řadou komplikací, z nichž jsou zde zmíněny dvě nejvýznamnější. První z nich představuje heterogenita ukládaného odpadu, ve kterém je rozložitelná organická hmota navíc v posledních letech zastoupena jen malým podílem. Rozklad probíhá v izolovaných ostrůvcích s rozdílnou a zcela nepředvídatelnou mírou zvodnění. Tuto heterogenitu nelze prakticky ovlivnit pomocí inženýrských nástrojů. Na skládku se obecně nahlíží jako na „neřízený biochemický reaktor“ (cit.²) a v podstatě jediná možnost, jak ovlivnit uložený odpad po uzavření tělesa, spočívá v perkolaci skládkového výluhu. Znalost skutečného obsahu skládkového tělesa je navíc omezená, evidence je běžně vedena jen na úrovni katalogových čísel odpadu a závažných množství. Druhou komplikací, která je v kontextu této práce významná, představuje skutečnost, že plynné produkty vznikají nejenom v důsledku mikrobiálního rozkladu, ale také čistě chemickou cestou. Příkladem zde může být produkce vodíku z materiálů na bázi hliníku^{6,7}.

Tuhý komunální odpad je ukládán na skládky skupiny S-ostatní odpad, jejichž technické zabezpečení podle vyhlášky č. 294/2005 Sb., ve znění pozdějších předpisů (aktuálně vyhlášky č. 305/2019 Sb.), vyžaduje odvod a zpracování plynných produktů prostřednictvím systému odplynění. Specificky se zde vyhláška odkazuje na technickou normu ČSN 83 8034 (Skládkování odpadů – Odplynění skládek). Pro odběr skládkového plynu jsou zpravidla již při výstavbě skládky založeny plynové studny, které se vypaží až do finální kóty skládkového tělesa. Čerpání plynu je potom zahájeno až po zatěsnění tělesa izolační vrstvou v rámci rekultivace. Způsob sledování skládkového plynu potom specifikuje technická norma ČSN 83 8036 (Skládkování odpadů – Monitorování skládek), na kterou se odkazuje výše uvedená vyhláška. Norma vyžaduje, aby bylo na skládce prováděno měření objemu a složení skládkového plynu, pokud ukládaný odpad obsahuje biodegradovatelný podíl. Měření je vyžadováno minimálně jednou za rok, pokud množství roční navážky odpadu na skládku nepřevyšuje 30 000 tun. Při vyšším množství je měření vyžadováno minimálně dvakrát za rok. Norma dále stanoví, že tato měření mají být prováděna tak dlouho, dokud obsah spalitelných složek v plynu neklesne pod 1 obj.%. Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. (ve znění pozdějších předpisů) potom obecně vyžaduje postoperační péči o skládku po dobu 30 let.

Experimentální část

Data prezentovaná v tomto textu pocházejí z dlouhodobého sledování prováděného na skládce tuhých odpadů společnosti Ekologie s.r.o. Na uzavřené a již zatěsněné etapě skládky (zavážené odpadem v letech 1998–2008) byla vybrána plynová studna situovaná v okrajové části etapy, kam začal být odpad navážen nejdříve (zeměpisné souřadnice studny: N 50°7.51030', E 13°55.46110'). Středem vertikální plynové studny vedla perforovaná, šterkem obsypaná polypropylenová trubice procházející celou výškou skládkového tělesa. Nad povrch zde vyčnívala jen zhruba dvoumetrová zakončovací hlavice chráněná betonovou skruží. Zakončovací hlavice byla horizontální potrubní odbočkou připojena k povrchově vedenému potrubnímu rozvodu kogenerační jednotky. Zhruba v metrové vzdálenosti od připojení byla na této horizontální větvi již při zatěsnění skládky instalována škrticí klapka a těsně za ní vzorkovací ventil. Výhradně pro účely této práce byl před škrticí klapku navíc navařen ještě druhý vzorkovací ventil. Na tyto vzorkovací ventily tak bylo možné připojit měřicí stanici a úplným uzavřením škrticí klapky přes ni vést veškerý skládkový plyn odcházející vybranou studnou ze skládkového tělesa.

Měřicí stanice byla účelově zkonstruována pro potřeby dlouhodobého sledování charakteristik skládkového plynu a byla opatřena senzory pro sledování: 1) koncentrace methanu ve skládkovém plynu; 2) průtokové rychlosti skládkového plynu; 3) atmosférického tlaku a 4) teploty měřeného plynu.

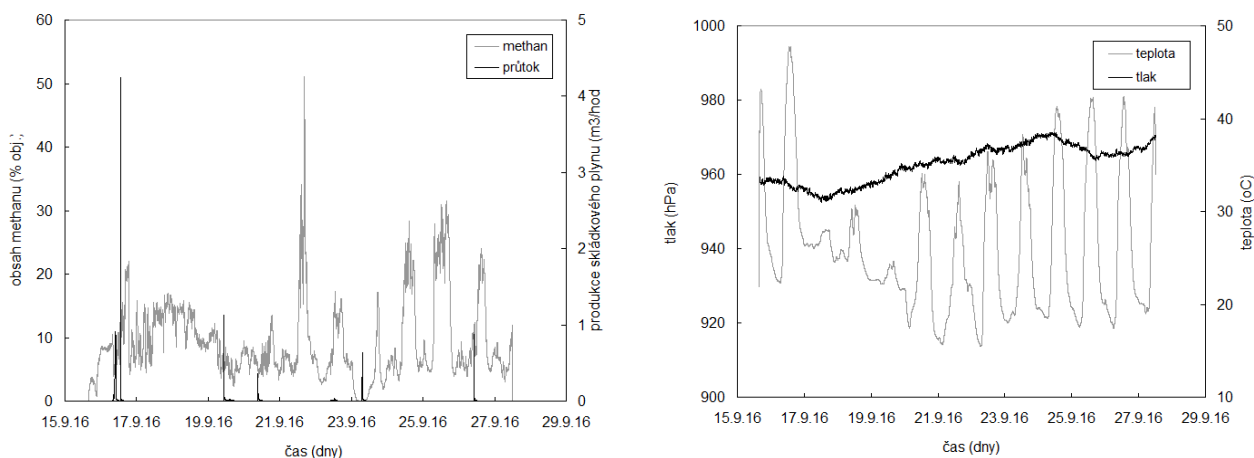
Základem měřicí stanice byla mikrokontrolní jednotka Arduino UNO rev. 3. Periferní komponenty k ní byly připojeny přes 14 digitálních vstupů a 6 analogových vstupů. Měřená data byla sekvenčně ukládána na připojenou paměťovou kartu. Měření fyzikálních parametrů skládkového plynu zajišťoval senzor teploty, tlaku a vzdušné vlhkosti Bosch Sensortec BME280 detegující teploty v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozlišením $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkost v rozmezí 0–100 % s rozlišením 0,008 %

a přesností $\pm 3\text{ }%$ a tlak v rozmezí 300–1100 hPa s rozlišením 0,18 Pa a přesností $\pm 1\text{ Pa}$. Obsah methanu ve skládkovém plynu byl měřen selektivním tepelně vodivostním detektorem MQ-4 se senzitivní vrstvou SnO_2 a Au elektrodou s Pt připojením. Tělo senzoru bylo chráněno antiexplozivní sítí z nerezové oceli. Průtok skládkového plynu měřicí stanicí (odpovídající celkovému průtoku plynové studny) byl měřen membránovým plynoměrem BK G2,5 osazeným nízkofrekvenčním pulzním snímačem IN-Z61.

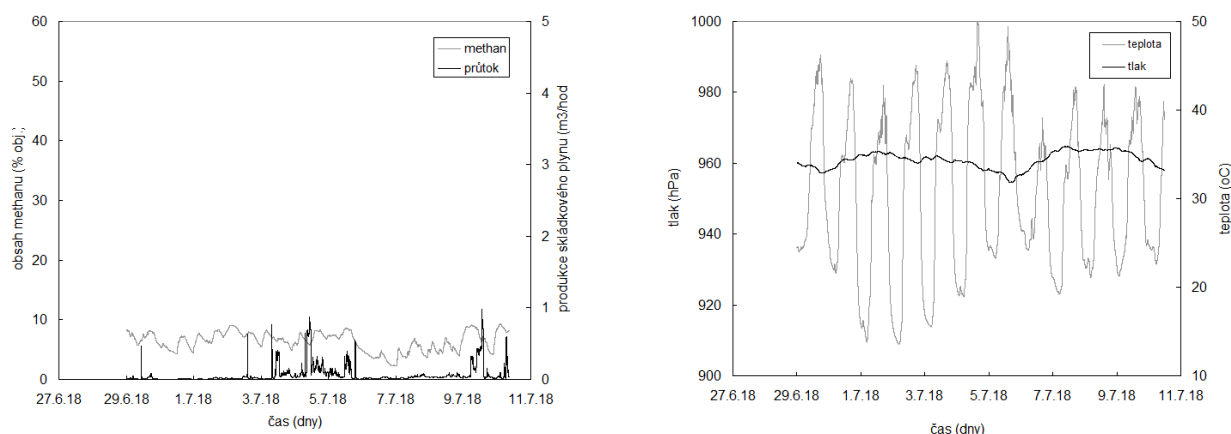
Veškeré výše specifikované komponenty byly uloženy v ochranných krytech účelově navržených a vytvořených z PETG s pomocí 3D tisku. Celá měřicí stanice byla potom umístěna ve vodotěsné plastové krabici a překryta černou plastovou fólií. Denní změny teploty se tak na teplotním čidle promítaly stejným způsobem jako uvnitř černé polypropylenové zakončovací hlavice a černého horizontálního sběrného potrubí. Sledované údaje byly měřeny a zaznamenávány s minutovou frekvencí, aby byly zachyceny i nejjemnější fluktuace sledovaných parametrů. Technické podrobnosti k použité měřicí jednotce již byly publikovány dříve⁸.

Výsledky a diskuse

Z mimořádně rozsáhlého datového souboru získaného při sledování zvolené plynové studny v letech 2016–2020 byly vybrány tři dvoutýdenní výseky ilustrující jak stav odpadu v odplyňované části skládky, tak i celkový informační přínos dlouhodobého kontinuálního monitoringu skládkového plynu. Tyto časové výseky jsou kvůli porovnání situovány do podobných ročních období let 2016, 2018 a 2020 a v každém z nich jsou postupně na obr. 1–3 ukázány souběžně časové závislosti průtokové rychlosti skládkového plynu na zakončovací hlavici sledované studny, obsahu methanu v tomto plynu, teploty vzorkovaného plynu a atmosférického tlaku.



Obr. 1. Charakteristiky skládkového plynu a atmosférické podmínky zjištěné v období 16. 9. – 27. 9. 2016



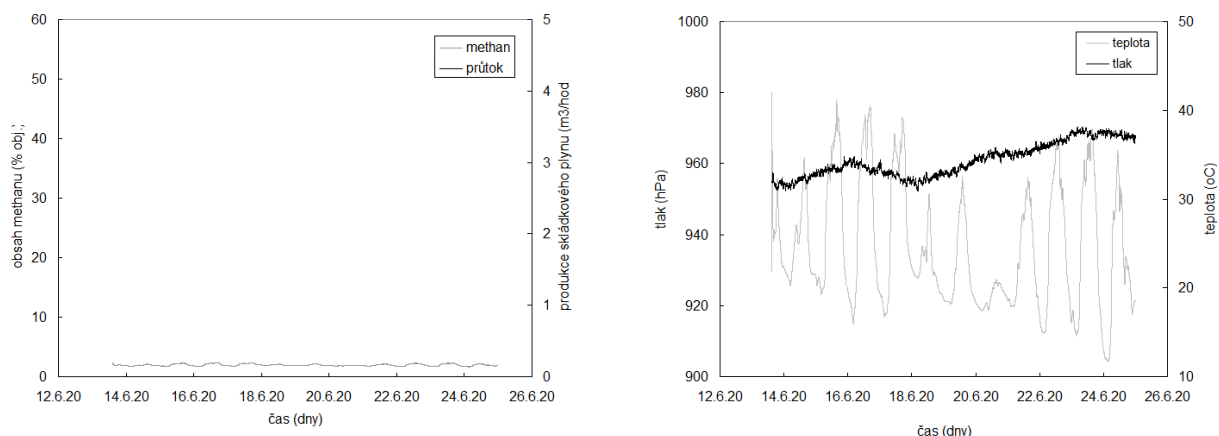
Obr. 2. Charakteristiky skládkového plynu a atmosférické podmínky zjištěné v období 29. 6. – 10. 7. 2018

Prezentované časové závislosti v první řadě ukazují zcela minimální produkci skládkového plynu na sledovaném segmentu uzavřené skládky. Použitý plynoměr detegoval průtokové rychlosti od $0,016 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a po většinu sledované doby byly měřené hodnoty blízko této hranice nebo pod ní. Vyšší průtoky byly zachycovány zpravidla ve formě krátkých, řádově minutových impulsů. V souhrnu se potom v letech 2016–2018 pohybovalo produkované množství plynu zhruba na úrovni jednoho krychlového metru měsíčně, zatímco v létě roku 2020 bylo již i souhrnné množství na plynoměru nulové.

Kolisání průtoku skládkového plynu na odběrové studni (zde již ve značně extrémní podobě) náleží ke známým jevům. Pohyb plynu v horninovém prostředí, jehož je skládkové těleso vždy součástí, a kterému se svým charakterem blíží, může být obecně ovlivňován širokým spektrem globálních, regionálních i lokálních faktorů^{9–12}. Nej-

výraznější vliv bývá v tomto směru přisuzován změnám atmosférického tlaku, které se s určitým časovým zpožděním promítají do horninového prostředí a vyvolávají tlakové gradienty až do úrovně nižších jednotek kPa. Takto výrazná hnací síla se již může značně uplatnit proti běžnému podtlaku používanému při jímání skládkového plynu. U skládkového tělesa lze potom také uvažovat krátkodobý efekt při odčerpávání skládkového výluhu. Z čistě praktického hlediska je zde nicméně zřejmé, že sledovaný segment skládky dospěl do stavu, který lze považovat za stabilizovaný. Skládkový plyn zde může s nevýznamnou rychlostí vznikat po velmi dlouhou dobu, jeho využití již ale nepřípadá v úvahu.

Podobný trend jako u objemové produkce skládkového plynu lze na obr. 1–3 vysledovat pro obsahy methanu ve skládkovém plynu. Průměrný obsah methanu pro září 2016 (obr. 1) činil 9,2 obj.%, pro červen/červenec 2018

Obr. 3. Charakteristiky skládkového plynu a atmosférické podmínky zjištěné v období 13. 6. – 25. 6. 2020 (průtok skládkového plynu byl v ukázaném období pod minimální měřitelnou hodnotou $0,016 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, čára průtoku se překrývá s osou X)

(obr. 2) činil průměrný obsah 6,3 obj.%, zatímco v červnu 2020 (obr. 3) již jen 1,9 obj.%. Obsahy methanu ve skládkovém plynu byly po celou dobu sledování velmi proměnlivé. Nejvýraznější bylo kolísání na samém počátku sledování (obr. 1), kde se měřené hodnoty pohybovaly v rozmezí od nižších jednotek do nižších desítek objemových procent, s nejvyšší zjištěnou hodnotou přes 50 obj.%. Kolísání obsahů methanu zde zřetelně vykazuje pravidelný průběh s přibližně jednodenní periodou, která koreluje s průběhem teploty vzorkovaného plynu. I když exaktní vysvětlení uvedených časových závislostí leží mimo rámec tohoto textu, je prakticky vyloučené, že by se denní změny teploty promítaly do větších hloubek uzavřeného skládkového tělesa (tedy pod rekultivační a těsnicí vrstvu) a ovlivňovaly rychlost rozkladu uloženého odpadu. Vezmou-li se v úvahu velmi malé objemy čerpaného skládkového plynu, je souvislost mezi denním kolísáním teploty a průběhem koncentrace methanu pravděpodobně dána jen vlivem na sběrné potrubí černé barvy, které se zčásti nachází nad povrchem skládky.

Význam výše popsaného kontinuálního sledování nespočívá ani tak v možnosti přispět k vysvětlení rozkladných procesů probíhajících v konkrétní uzavřené skládce, ale spíše v zásadním zpřesnění technických podkladů, na jejichž základě se bude rozhodovat o osudu právě této skládky ve fázi následné péče. Běžné jednorázové sledování skládkového plynu podle ČSN 83 8036 provádí specializovaná firma. Čistě technicky spočívá měření v tom, že ke vzorkovacím ventilům určených plynových studní je na dobu nejvýše jednotek minut (spíše však méně) připojen přístroj schopný kvantifikovat obsahy methanu, oxidu uhličitého, sulfanu, případně dalších složek. Z výše uvedených odstavců a dat je zřejmé, že občasné jednorázové měření skládkového plynu může v rozmezí jediného dne poskytnout oproti kontinuálně zjištěnému průměrnému obsahu methanu hodnoty snadno řádově nižší nebo také řádově vyšší.

Kontinuální sledování charakteristik skládkového plynu bývá obvykle na skládkách prováděno, ale až před vstupem do kogenerační jednotky, či jiného zařízení pro využití či zneškodnění plynu. Zde se ovšem potkává plyn zpravidla z desítek plynových studní a rozlišit příspěvky jednotlivých segmentů lze jen velmi hrubě prostřednictvím průběžného uzavírání vybraných částí. Výhody kontinuálního sledování jednotlivých plynových studní skládkového tělesa jsou zřejmé jak z hlediska řízení a provozu skládky, tak i z pohledu její environmentální bezpečnosti. Pro provozovatele skládky mohou být výstupy segmentovaného kontinuálního sledování podkladem pro optimalizaci režimu čerpání skládkového plynu. Například data ukázaná na obr. 1–3 zřetelně dokládají, že monitorovaný segment skládkového tělesa je pro provoz kogenerační jednotky bezvýznamný. Současně tyto výstupy poskytují velmi spolehlivý a zcela objektivní podklad pro rozhodnutí o způsobu zachytu zbytkových emisí v období následné péče o skládku.

Na území České republiky bylo k roku 2014 provozováno celkem 178 skládek všech kategorií¹³. Otázka přechodu do fáze následné péče se bude v blízké budoucnosti týkat velké části z nich. Skládka v této fázi již nebude přijímat odpad a svému majiteli vydělavat. Rovněž tak nebude odvádět poplatky obci, na jejímž katastru leží. Přijatelnost a celkové vnímání uzavřených skládek se tedy nepochybně změní. Kontinuální vícebodové sledování plynových emisí by v této souvislosti bylo zdrojem cenných objektivních dat.

Závěr

Kontinuální sledování skládkového plynu prováděné na úrovni jednotlivých plynových studní či jednotlivých segmentů skládkového tělesa prokazatelně přináší vyšší objektivitu informací o stavu uloženého odpadu oproti jednorázovému sledování podle aktuálně platné technické normy. Zde prezentované výsledky jednoznačně prokázaly stabilizovaný stav odpadu uloženého ve sledovaném segmentu skládky, což by cestou běžného zákonem vyžadovaného jednorázového měření nebylo zjištělné.

LITERATURA

1. https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2020/01/Statisticka_Rocenska_ZP_CR-2018.pdf, staženo 15. 8. 2020.
2. Kuraš M., v knize: *Odpady a jejich zpracování*, str. 111. Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r. o., Chrudim 2014.
3. Allen A.: *Eng. Geol.* 60, 3 (2001).
4. Krook J., Svensson N., Eklund M.: *Waste Manag.* 32, 513 (2012).
5. Straka F., v knize: *Bioplyn*, str. 92. GAS s.r.o., Říčany 2006.
6. Buryan P., Hlinčík T.: *Chem. Listy* 110, 703 (2016).
7. Buryan P., Horák J., Jankovská Z., Hopan F., Krpec K., Kubesa P.: *Chem. Listy* 107, 655 (2013).
8. Martinec M., Chumchalová J., Renkerová P., Kubal M.: *Paliva* 11, 57 (2019).
9. Xingxing Kuang, Jiu Jimmy Jiao, Hailong Li: *Water Resour. Res.* 49, 6137 (2013).
10. Nastev M., Therrien R., Lefebvre R., Gélinas P.: *J. Contam. Hydrol.* 52, 187 (2001).
11. Christophersen M., Kjeldsen P., Holst H., Chanton J.: *Waste Manag. Res.* 19, 595 (2001).
12. Young A.: *Water Air Soil Pollut.* 64, 601 (1992).
13. MŽP ČR: *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024*, https://www.mzp.cz/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty, staženo 15. 8. 2020.

M. Kubal, M. Martinec, J. Chumchalová, and J. Hendrych (*Department of Environmental Chemistry, University of Chemistry and Technology, Prague*):
Continuous Monitoring of Gaseous Emissions at Municipal Landfill

A landfill gas extraction well, situated at the closed section of municipal landfill, was continuously monitored for a four years period (2016–2020). The landfill gas production rate was measured, together with the methane content, atmospheric pressure and sampled gas temperature. The collected data clearly confirmed that the monitored landfill section was in a stabilized state, since practically no gas was passing through the well. The continuous monitoring system was found to be a useful tool for landfill control in the period of postclosure care.

Keywords: landfill, municipal waste, landfill gas