



FUGITÍVNE EMISIE ZO SKLÁDOK A ICH KVANTIFIKÁCIA

Marek HRABČÁK

FUGITIVE EMISSIONS FROM LANDFILLS AND THEIR QUANTIFICATION



ENVIRONMENTAL POLICY TOOLS '2019

ABSTRAKT

Plynné emisie do ovzdušia t.j. nezachytený skládkový plyn (LFG) predstavujú zrejme najväčší podiel z negatívnych dopadov skládkovania neupravených komunálnych odpadov na životné prostredie. Jedná sa predovšetkým o metán (CH_4), ale aj oxidy dusíka, sirovodík a prchavé nemetánové organické zlúčeniny (NMVOC). Napriek pomerne striktnej a rezolútnej legislatívnej kategorizácie zdrojov emisií podľa ich produkcie je spôsob výpočtu produkcie LFG pomerne benevolentný a založený na viacerých "konštantách" (k , L_0 , DOC), ktoré sú ale pri bližšom skúmaní lokálne veľmi "variabilné". Pre fugitívne emisie to platí absolútne a žiadna z navrhovaných metodík nie je dostatočne presná a validovateľná.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: plyn, emisie, odpad, skládka

ABSTRACT

Gaseous emissions to air i.e. unsecured landfill gas (LFG), are probably the largest share of the negative environmental impacts of landfilling untreated municipal waste. These are mainly methane (CH_4), but also oxides of nitrogen, hydrogen sulphide and volatile non-methane organic compounds (NMVOC). Despite the relatively strict and resolute legislative of the categorization of emission sources according to their production, the method of calculating LFG production is relatively benevolent and based on several "constants" (k , L_0 , DOC), that are, however, locally very "variable" at closer examination. This is absolutely true for fugitive emissions and none of the proposed methodologies is sufficiently accurate and validable.

KEY WORDS: gas, emissions, waste, landfill site

1. Úvod

Skládkový plyn (LFG) tvorí podstatnú časť nepriaznivých emisií vznikajúcich v procese zneškodňovania komunálnych odpadov skládkovaním. Svojím zložením (metán, oxidy uhlíka a dusíka atď.) sa zaradzuje medzi tzv. skleníkové plyny, ktoré podľa niektorých vedcov výrazne prispievajú ku klimatickým zmenám. Podľa rôznych autorov a metodík inventarizácie emisie metánu z procesu nakladania s odpadmi (okrem iného aj skládkovania komunálnych odpadov) prispievajú až 15 % ku globálnym antropogénnym emisiám metánu vo svete. Aj keď je polčas rozpadu metánu v ovzduší pomerne krátky, svojím GHC impakt faktorom má oveľa nepriaznivejší dopad na klimatické zmeny ako samotný oxid uhličitý. Obmedzovanie emisií metánu v procese nakladania s odpadmi je preto jedna z dôležitých úloh v tomto sektore. V poslednom období viaceré odborné združenia v odpadovom hospodárstve (ISWA, SWANA, FEAD) vydali rôzne metodiky a doporučená pre svojich členov, ako tento problém riešiť.

Na základe § 26 ods. 1 písm. e, zákona č. 39/2013 Z. z. o integrovanej prevencii a kontrole znečisťovania životného prostredia a o zmene a doplnení niektorých zákonov je každý prevádzkovateľ zariadenia povinný oznamovať údaje do národného registra znečisťovania. Podrobnosti oznamovania údajov rieši zákon č. 205/2004 Z. z. a jeho novela č. 4/2010 Z. z. Oznámenie do národného registra znečisťovania obsahuje najmä údaje podľa osobitného predpisu. Osoby povinné oznamovať údaje do národného registra znečisťovania oznamujú tieto údaje na oznámení za oznamovací rok raz ročne, najneskôr však do 31. marca nasledujúceho kalendárneho roka. Podľa aktualizovaného znenia zákona sa na Slovensku do národného registra znečisťovania oznamujú emisie bez zohľadnenia prahových hodnôt uvedených v prílohe č. 1 k zákonu č. 205/2004 Z. z. - teda aj podlimitné (t.j. $\text{CH}_4 \leq 100\,000$ kg/r). Prevádzkovatelia skládok odpadov s IP povolením tak oznamujú podľa § 5 vyhlášky č. 448/2010 Z. z. údaje o emisiách do ovzdušia pre:

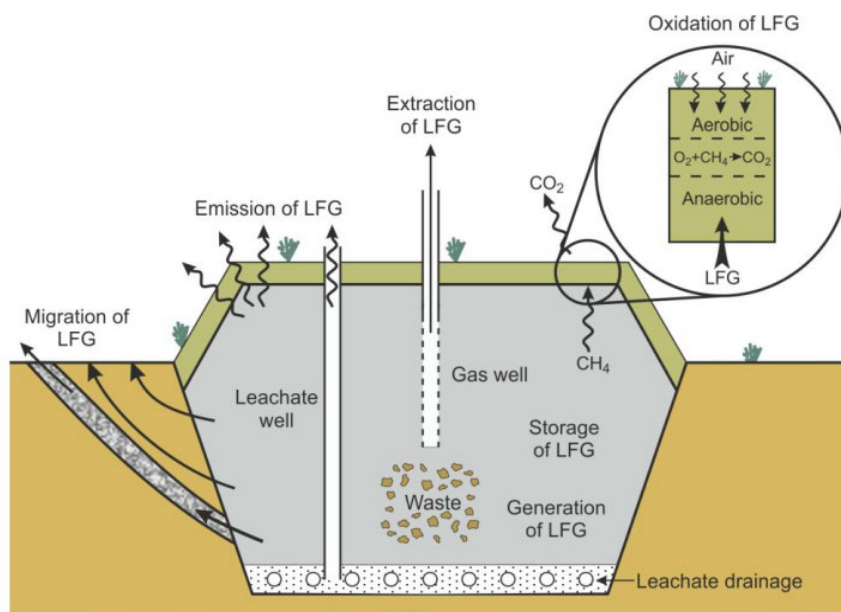
- metán (CH_4),
- oxid uhličitý (CO_2)
- nemetánové prchavé organické látky (NMVOC).

Podľa Pokynu EK zo dňa 16.7.2012 (Komise, 2012) zariadenia ktoré emitujú menej ako 25 000 t $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ ročne možno v súlade s článkom 47 smernice 2003/87/ES kategorizovať ako zariadenia s nízkymi emisiami. Pre takéto zariadenia možno použiť zvláštne systémy zjednodušenia monitorovania, vykazovania a overovania, aby sa znížili administratívne náklady. Zároveň pre zariadenia, ktoré vypúšťajú maximálne 5 000 t $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ ročne platia aj znížené požiadavky na úroveň presnosti.

2. Emisie skládkového plynu

Podľa (Kjeldsen Peter, 2015) pre koncepčný model migrácie LFG a teda aj metánu zo skládok komunálneho odpadu rozlišujeme nasledovné zložky:

$$\text{CH}_4, \text{ generated} = \text{CH}_4, \text{ extracted} + \text{CH}_4, \text{ emitted} + \text{CH}_4, \text{ migrated} + \text{CH}_4, \text{ oxidized} + \text{CH}_4, \text{ stored}$$



Obrázok 1: Emisie metánu zo skládky (zdroj Kjeldsen, P. 2015)



Celkový generovaný Σ METAN =

- metán využívaný napr. na výrobu el. energie alebo pasívne spaľovaný (Mv)
- metán plošne emitovaný do ovzdušia (fugitívne emisie) (Me)
- metán pod povrchovo migrovaný mimo skládku (Mm)
- metán oxidovaný v povrchovej vrstve odpadu (Mo)
- metán trvalo zadržiavaný v skládke (Ms)

Fugitívne emisie už zo svojej podstaty je však veľmi ťažké kvantifikovať, pretože nemôžu byť priamo in situ merané, najmä na plošne rozsiahlych skládkach. Fugitívne emisie preto bývajú často len odhadnuté pre jednotlivé skládky v kombinácii s rôznymi výpočtovými modelmi na národnej úrovni. Tento prístup ku kvantifikácii fugitívnych emisií zo skládky je zaťažený viacerými faktormi. Aj keď primárne vychádza z národných faktorov a konštánt, lokálne zmeny na úrovni konkrétneho miesta skládky alebo jej prevádzky môžu mať oveľa väčší dopad.

Celoštátne resp. súhrnné výpočty emisií na národnej úrovni sú počítané za použitia odhadovaných súhrnných parametrov. Niektoré z týchto vstupov, ako napríklad celková tonáž skládkovaného odpadu alebo množstvo LFG priamo zachyteného aktívnym odplynením je možné priamo zmerať. Iné faktory, ako je napríklad celkové množstvo generovaného metánu alebo množstva metánu oxidovaného na povrchu skládok nie je možné merať pre každú konkrétnu skládku. Kvantifikácia fugitívnych emisií zo skládok odpadov tak zostáva potenciálne hlavným zdrojom chýb v inventarizácii skleníkových plynov a ďalších znečisťujúcich látok v sektore odpadového hospodárstva.

Na základe informácií o konkrétnej prevádzke každej skládky a jej aktívnom odplyňovacom zariadení môžeme potom určiť, aké množstvo LFG bolo za daný rok využité resp. spálené (Mv). Plošné geosyntetické tesnenie dna a bokov modernej skládky (GM resp. GCL) zamedzuje podpovrchovej migrácii LFG, preto tento parameter zanedbávame ($Mm=0$). Podobne zadržiavaný metán v skládke (Ms) môžeme z hľadiska emisii zanedbať, keďže dočasne ostáva v telese skládky a neemituje mimo jej priestor. Podľa vzorca pre výpočet množstva tohto metánu:

$$CH_{4_stored} = LP \times F_{CH_4} \times L_{vol} \times \gamma$$

kde LP je porozita skládkového telesa ($\approx 0,2$), F_{CH_4} je podiel metánu v LFG, L_{vol} je celkový objem skládkového telesa a γ je objemová hmotnosť metánu. Po dosadení údajov sa množstvo zadržiavaného metánu v skládke klasických rozmerov ($Volume \leq 200\,000\,m^3$) pohybuje okolo 5 až 10 t/r t.j. zanedbateľné množstvo v porovnaní s celkovou produkciou. Najdôležitejšie sú teda fugitívne emisie metánu (Me) zo skládky, ktoré určíme tak, že od celkového generovaného množstva metánu Σ METAN odpočítame metán využitý (Mv) a metán oxidovaný (Mo) v pri povrchovej vrstve. Pre výpočet celkovej produkcie metánu sme použili SW výpočty podľa rôznych modelov na výpočet produkcie skládkového plynu (LandGEM, AFVAL, LMOP, atd.)

3. Metodika výpočtu LFG

Podľa oficiálnej metodiky IPCC sektor 6A ODPADY (vid' www.ghg-inventory.sk) je skládkovanie odpadov významným zdrojom emisií metánu, ktorý vzniká pri rozklade organických látok prítomných v odpade a anaeróbných podmienkach. Skládkový plyn pozostáva približne z 50 % metánu a 50 % oxidu uhličitého a stopovým množstvom ne-metánových prchavých organických zlúčenín (NMVOCs). Toto zloženie skládkového plynu nie je stabilné, mení sa v závislosti od zloženia a veku odpadu uloženého na skládke, ako aj od podmienok skládkovania. Emisie skleníkových plynov zo skládok sa zisťujú výpočtom podľa množstva uložených odpadov na skládku. Do bilancii skleníkových plynov sa zahŕňa iba metán, CO_2 emisie zo skládok nepochádzajú z fosílnych palív, preto sa do bilancií nezahŕňajú. Na Slovensku sa od roku 2005 výpočet emisií metánu zo skládok odpadu vykonáva podľa metódy Tier 2, predtým sa používala jednoduchšia metóda Tier 1.



Stručný popis použitej metodiky je na uvedenom internetovom zdroji, podrobný popis vrátane doporučených konštánt je v manuáli „Handbook on Waste Sector“, CGE GHG Inventory 2006. Pre zmesový komunálny odpad sa používa postup Tier 2 – rovnica rozkladu prvého radu, ktorá je popísaná nižšie. Táto rovnica umožňuje výpočet emisií metánu zo skládok, ktorý sa uvoľňuje z odpadu počas dlhého obdobia, t.j. odpad uložený v minulých rokoch ovplyvňuje množstvo emisií v roku, pre ktorý sa emisie počítajú. To umožňuje presnejší výpočet emisií ako metodika Tier 1, ktorá berie do úvahy len odpad uložený na skládke v roku, pre ktorý sa výpočet robí. Táto metóda je vhodná len pre výpočet s konštantným návozom odpadu na skládku. Z výsledkov modelovania emisií zo skládok vyplýva, že emisie metánu vypočítané podľa Tier 2 metodiky sú asi o 10 % nižšie ako výsledky získané použitím metodiky Tier 1. Podľa Kim, S. (2002) ak množstvo skládkovaného odpadu rastie medziročne o cca 2%, pre 20-30 ročnú periódu sú potom výsledky nadhodnotené o 20 - 25%.

Rovnica Tier 1 (základná = zjednodušená) je založená na nasledovných predpokladoch – nerozlišuje medzi riadenou skládkou a neriadenou, odpočítava sa množstvo zoxidovaného metánu pri prechode krycej vrstvy. Rovnica na výpočet celkového ročného množstva emisií metánu v Gg/rok podľa metodiky Tier 1 je nasledovná:

$$Q = (MSW_T * MSW_F * MCF * DOC * DOC_F * F * 16/12 - R) * (1 - OX)$$

kde jednotlivé parametre sú podrobne popísané v zdrojovej literatúre v závere tohto príspevku a nebudeme sa nimi v texte detailnejšie zaoberať.

Rovnica Tier 2 vychádza z tých istých princípov a používa tie isté parametre ako metodika Tier 1, ale na rozdiel od očakávania, že všetok metán je emitovaný v tom istom roku ako bol odpad uložený, sú emisie rozložené počas viacerých rokov podľa krivky rovnice rozkladu prvého radu t.j. exponenciálnu krivku. Toto rozloženie emisií je v podstatnej miere determinované parametrom (k) = rýchlosť rozkladu organickej hmoty. Rovnica pre výpočet celkového ročného množstva emisií metánu (Q) podľa tejto metodiky je nasledovná:

$$Q_{t,x} = \sum_x [(A * k * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * Lo_{(x)}) * e^{-k(t-x)}]$$

Výpočet emisií metánu zo skládok pomocou počítačových programov je pomerne rozšírený a existuje viac ako 10 rôznych softwarových nástrojov, ktoré v podstatnej miere rešpektujú lokálne charakteristiky podľa krajiny vzniku.

Podľa D. Reinharta (2010) je nepravidelnosť v tvorbe LFG hlavným problémom pri projektovaní odplyňovacích zariadení. Optimálna metóda na odhad parametrov LFG je determinovať L_0 uloženého odpadu na skládke pomocou laboratórnych rozborov ako potenciál tvorby metánu z uloženého odpadu. Hodnota k môže byť potom určená ako výsledok regresnej priamky pri použití first-order modelu a v tiež v súlade s aktuálnymi údajmi o produkcii LFG z výsledkov meraní. Ak také údaje nie sú k dispozícii, môžeme hodnotu k vybrať z technickej literatúry (publikovaných článkov), zohľadňujúc pritom miestne klimatické kritéria, zloženie odpadu a spôsob prevádzky skládky.

Predpovedný model býva často nižší ako skutočné výnosy asi o 10%. Presnosť výpočtu (resp. koeficient variácie výsledkov) sa pohybuje okolo $\pm 17\%$ až $\pm 30\%$ pre skládky počas prevádzky, $\pm 9\%$ až $\pm 18\%$ pre skládky tesne po ukončení a okolo $\pm 16\%$ až $\pm 203\%$ v lehote 50 rokov po ukončení. Priemerná účinnosť odplyňovacieho systému t.j. recovery rate (% využiteľného LFG oproti celkovému produkovánemu množstvu) na základe meraných prietokov LFG a modelovaných výpočtov sa podľa rôznych autorov pohybuje od 50 do 90 %.

Uvedený teoretický úvod poukazuje na to, že k vypočítaným výsledkom je potrebné pristupovať s patričnou mierou opatrnosti, najmä pri nadhodnocovaní budúcich dôsledkov z únikov LFG alebo plánovaní technologických investícií na ich zamedzenie. Najmä v súvislosti s rozbiehajúcim sa



oddeleným zberom biologicky rozložiteľných odpadov, ktoré sa už nesmú ukladať na skládky. Je logické, že následne dôjde aj k zmene niektorých konštánt (DOC_f , k , L_o), ktoré podstatným spôsobom ovplyvňujú výslednú tvorbu LFG.

4. Modelový výpočet emisií

Aby sme konkrétne poukázali na niektoré zásadne neistoty pri stanovení fugitívnych emisií zo skládok odpadov na Slovensku, modelovali sme výpočty pre stredne veľkú skládku o objeme cca 200 000 m³ s konštantným návozom odpadu v množstve cca 15 000 t/rok za 12 rokov prevádzky a cca 66 % skládkovaného odpadu tvorí komunálny odpad.

Pre modelový výpočet teoretického množstva skládkového plynu sme použili modely: Scholl Canyon, LandGEM a Afvalzorg ($\approx$ TNO). Metodikou výpočtu a teoretickými odlišnosťami týchto modelov sa nezaobráame, podrobne sú uvedené v prácach (Farideh Atabi, 2014), (Kaushal A., 2015) (Thompson S., 2009), (Spokas K., 2006). Pre skládky, ktoré sú prevádzkované v zmysle smernice EK 1999/31/ES ako zabezpečené a riadené skládky sa podľa metodiky IPCC používa hodnota MCF = 1. Parameter F, ktorý predstavuje podiel metánu v skládkovom plyne sme do výpočtov dosadili default hodnotu (50%) podľa IPCC: $F = 0,5$. Na základe pravidelného monitoringu skládkového plynu však je potrebné do záverečných výpočtov hmotnostných podielov CH₄ a CO₂ dosadiť konkrétne namerané hodnoty zloženia LFG v %. Parameter DOC (degradable organic carbon) sme do výpočtov použili 0,118. Vychádzame z údajov o priemernom percentuálnom zložení komunálneho odpadu pre východoslovenský región (údaje z KOSIT) a dosadení do vzorca:

$$DOC = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,30 \times D) + (0,24 \times E) = 0,118$$

kde A = papier a karton, B = zelený odpad, C = potravinový odpad, D = drevo, E = textil

Podľa správy NIR 2016 SK bola pre výpočet GHG emisií zo slovenských skládok použitá podobná konštanta $DOC = 0,112$. Podľa doporučenia ISWA a IPCC je pre región Európa East je doporučená hodnota až 0,180. Hodnotu DOC_f (fraction of assimilated DOC) sme použili 0,77 podľa vzorca pre výpočet: $DOC_f = 0,014 \times T + 0,28$, kde T je teplota anaeróbného rozkladu pri tvorbe LFG (35°C). Podľa IPCC default hodnota od roku 1996 bola 0,77, po roku 2006 sa začala používať hodnota 0,50. Odporúčané hodnoty sú v rozsahu 0,42 až 0,98 podľa miestnych podmienok. Hodnotu degradačnej konštanty k (decay rate) sme vypočítali pri miestnych zrážkach ($PE = 600$ mm) podľa vzorca:

$$k = 3,2 \times 10^{-5}(PE) + 0,01$$
$$k = 0,0292$$

Takto vypočítaná hodnota však vychádza len z miestnych klimatických pomerov a nezohľadňuje napríklad skrúpanie odpadov počas prevádzky skládky čerpaním priesakovej kvapaliny. Do výpočtov sme preto použili default hodnotu $k = 0,05$ ktorú odporúča IPCC pre klimatické pásmo Boreal - Dry ($MAT \leq 20^\circ C$, $PMAP/PE \leq 1$) a podľa nášho názoru reálnejšie zohľadňuje konkrétne podmienky. Pre výpočet konštanty L_o sme použili známy vzorec:

$$L_o = DOC \times DOC_f \times MCF \times F \times 16/12$$

$$L_o = 0,118 \times 0,77 \times 1 \times 0,5 \times 1,333$$

Podľa metódy Tier 2 - FOD sme výpočty produkcie skládkového plynu pre modelovú skládku podľa modelov LMOP, Afvalzorg a LandGEM realizovali pri hodnotách $k = 0,05$ a $L_o = 60$, ktoré



sme získali z predošlých výpočtov. Kontrolný prepočet podľa Lo / DOC dáva hodnotu 58,2, čo zodpovedá výpočtu podľa IPCC.

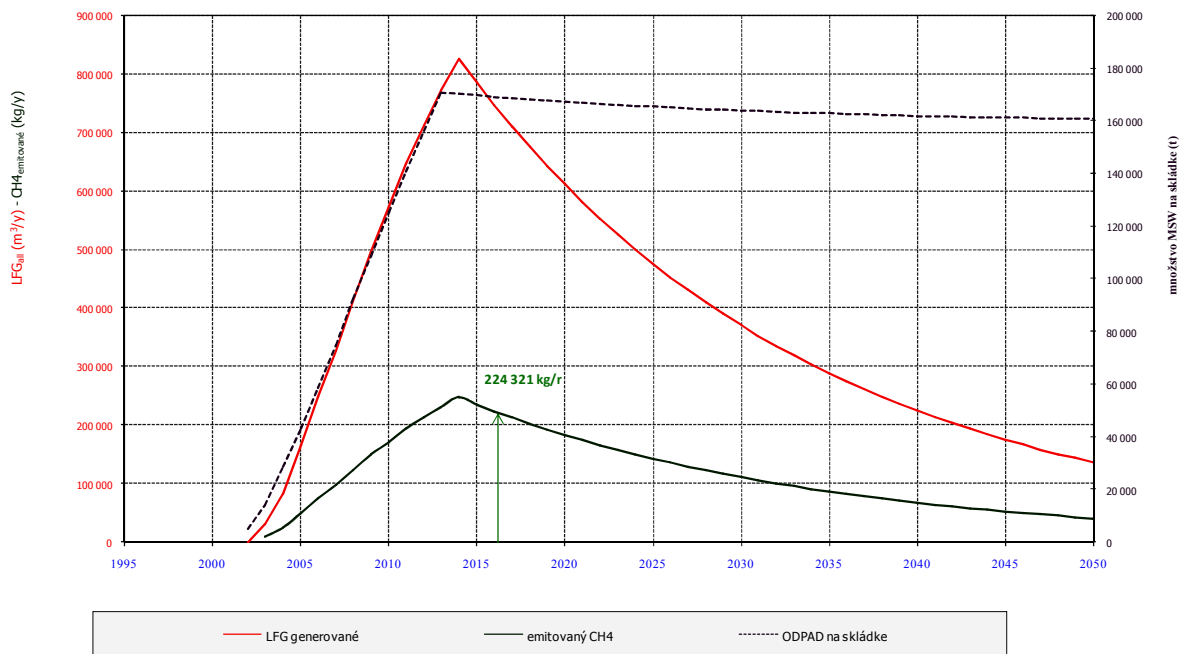
Pre úplnosť treba uviesť, že premenná k stúpa s obsahom rýchlo rozložiteľných bioodpadov a dostatkom ich vlhkosti, premenná Lo je závislá na celkovom obsahu rozložiteľných bioodpadov na skládke.

Pre modelovú skládku je množstvo vznikajúceho LFG počítané z celkového skládkovaného množstva odpadov, ktorý je na nasledujúcom grafe znázornený fialovou prerušovanou čiarou = cca 180 000 t uloženého odpadu na skládke. V dôsledku rozkladu bioodpadov dochádza k postupnému poklesu objemového množstva celkového uloženého odpadu, preto fialová krivka postupne časom mierne klesá. Vypočítaná celková teoretická produkcia LFG (LFG generované) pri uvedených parametroch $k = 0,05$ a $Lo = 60$ je znázornená červenou krivkou. Z krivky je zrejme, že maximálna produkcia LFG na skládke (826 000 m³/r) nasledovala cca rok po ukončení navážania odpadu a postupne klesá.

Emitované množstvo metánu pri teoretickej 10% oxidácii v pripovrchovej vrstve je vyznačené zelenou krivkou. Pre rok 2016 je teoretické množstvo emisií metánu do ovzdušia pre túto modelovú skládku cca 224 321 kg/r. Dôležitým faktorom je však skutočnosť, že výpočet a krivky znázorňujú celkový LFG resp. podiel metánu, ktorý zodpovedá ideálnemu zloženiu 50/50 a nie skutočným nameraným % podielom zloženia skládkového plynu na konkrétnej skládke.

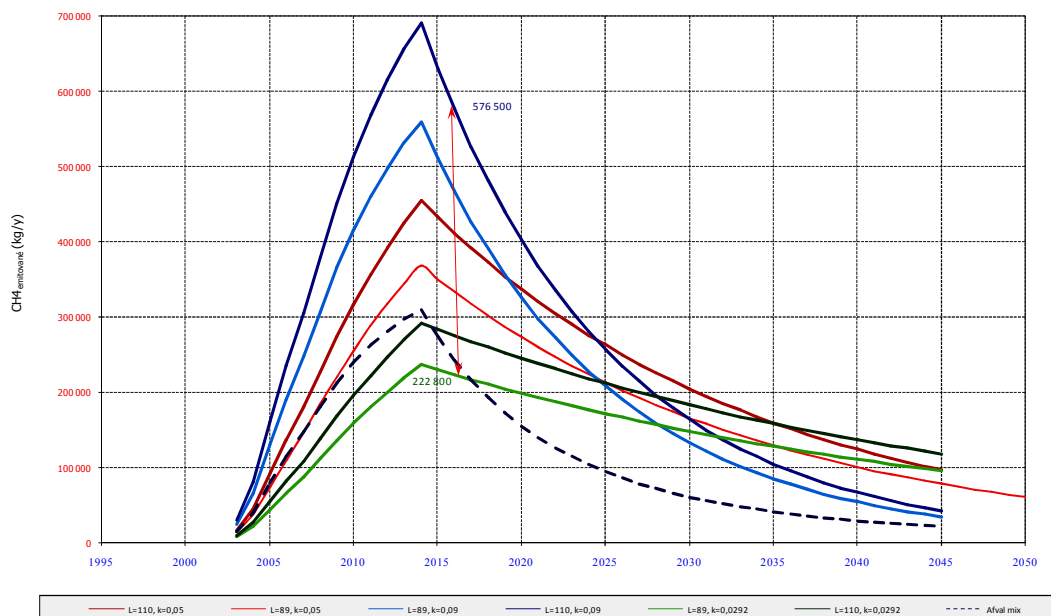
Produkcia LFG a emisie CH₄ na modelovej skládke - LMOP model

$k = 0,05$ $Lo = 60$





Porovnanie emisií CH₄ na modelovej skládke pri rôznych hodnotách k a Lo.



5. Záver

V našom príspevku sme sa pokúsili poukázať na zložitú problematiku kvantifikácie fugitívnych emisií zo skládok odpadov. Odporúčany postup, kedy emitovaný metán predstavuje zvyšok po odpočítaní využitého resp. spaľeného a oxidovaného plynu od celkového generovaného množstva skládového plynu však naráža na problematiku vierohodného výpočtu produkcie LFG na skládke. Ako je vidieť z posledného grafu, kde sme pre tú istú skládku dosadili len rôzne premenné k a Lo do výpočtu celkovej produkcie LFG, výsledný rozptyl hodnôt emitovaného metánu za rok 2016 je príliš veľký :

od 222 800 kg/r až do 576 500 kg/r !

Podotýkame, že použité hodnoty k aj Lo v týchto výpočtoch sú reálne hodnoty používané rôznymi autormi pri výpočtoch produkcie LFG pre skládky v EU a nijak extrémne nevybočujú z odporúčaných hodnôt. Podľa tohto modelu až okolo roku 2030 dochádza k určitému zjednoteniu výslednej hodnoty emisií metánu, čo je ale už polovica celého monitorovaného obdobia skládky po jej uzavretí.

Pre konkrétneho prevádzkovateľa skládky tak nastáva zásadná dilema: ktorý model pre výpočet fugitívnych emisií metánu zo skládky použiť a aké konkrétne čísla vyplniť do hlásenia pre NEIS ? Problematika vierohodného stanovenia emisií metánu zo skládok odpadov je tak založená na príliš vysokej neurčitosti a je otáznou, nakoľko sú vypočítané a ohlasované hodnoty do národného registra znečisťovania hodnoverné a validovateľné.



ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- Farideh Atabi, M. A. (2014). Calculation of CH₄ and CO₂ Emission Rate in Kahrizak Landfill. World Sustainability Forum 2014 – Conference Proceedings Paper.
<http://www.sciforum.net/conference/wsf-4>.
- Kaushal A., S. M. (2015). Methane Emission from Panki Open Dump Site of Kanpur, India. International Conference on Solid Waste Management, 5IconSWM 2015 . Available online at www.sciencedirect.com.
- Kjeldsen Peter, S. C. (2015). Suggested guidelines for gas emission monitoring at danish landfills. Proceedings Sardinia 2015, Fifteenth International Waste Management and Landfill Symposium . S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: CISA Publisher, Italy.
- Komise, E. (2012). Nařízení o monitorování a vykazování emisí skleníkových plynů - Pokyn č. 1 ze dne 16.6.2012. EK - CLIMA .A.3.
- Spokas K., B. J. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? Waste Management .
- Thompson S., S. J. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. Waste Management 29 (2009) 2085–2091 , 2085-2091.

ADRESA AUTORA

Ing. Marek HRABČÁK

Geosofting, s.r.o. Prešov, Slovenská republika

e-mail: geosofting@stonline.sk



RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.