

A települési szilárd hulladéklerakókban keletkező bomlási hő kinyerésének vizsgálata, a bioreaktorként üzemeltetett lerakó koncepciója

Magyar Tamás¹, Erdélyi Attila², Murányi Attila³,
Kontra Jenő⁴, Romenda Roland⁵, Faitli József⁶

PhD hallgató¹, projekt menedzser², tudományos tanácsadó³,
egyetemi tanár⁴, MSc hallgató⁵, egyetemi docens⁶

Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet^{1,5,6}

.A.S.A. Magyarország Kft.²

Magyar Tudományos Akadémia, Agrártudományi Kutatóközpont, Talajtani és Agrokémiai Intézet³

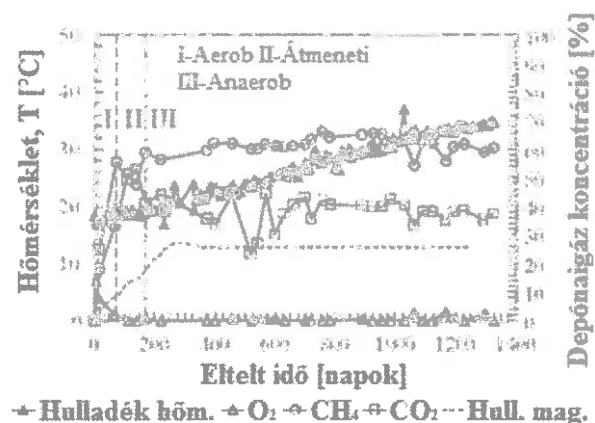
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Épületenergetikai és épületgépészeti Tanszék⁴

I. Bevezetés

Annak ellenére, hogy a hulladékgazdálkodás hierarchiája szerint a lerakással történő ártalmatlanítás a legkevésbé preferált megoldás, jelenleg évente közel 2,9 millió tonna települési szilárd hulladék kerül a közszolgáltatás keretén belül elszállításra Magyarországon, amelynek mintegy 75 %-át deponálják (KSH, 2012). A korszerű lerakókban a képződő depóniagáz energetikai hasznosításának a technológiája megoldott. Ezen túlmenően, a nagy tömegben jelenlévő hulladékban a lebomlási folyamatok következtében jelentős hőmennyiség keletkezik, amelyet az anyagtömeg tárol. Magyarországon az alapötlet, mely szerint egy még fel nem töltött TSZH lerakóba, vagy más műtárgyba könnyű hőcserélő csővezetékot fektetni, amely később alkalmas hőkinyerésre Szamek Zsolttól származik kb. 2008-ból. Később ez a munka vezetett a Depóniahő - hasznosítási technológia kidolgozása című projekt (KMR_12-1-2012-0128) sikeres megvalósításához. Az elvégzett szakirodalom kutatás szerint az első cikk, amely a hőkinyerés elméleti alternatíváit foglalja össze az Coccia et al. (2013) cikke. Egy amerikai kutatócsoport Yesiller és Hanson (2015) vezetésével szintén kísérleti munkát végez a témában. Az első cikk, amely megvalósított félüzemi - üzemi méretű hőcserélő technológia mért eredményeiről számol be az a szerzők cikke 2015-ből (Faitli et al., 2015b). A Depóniahő projekt keretében elvégzett vizsgálatok célja, hogy alkalmas hőcserélő beépítésével a bomlási hőnek egy része kinyerhető és hasznosítható legyen. Az előzetes méréseink szerint a depóniatestben a hőmérséklet akár a 70 °C-ot is elérheti. A hőtani paraméterek ismerete nélkülözhetetlen a hőkinyerési potenciál becsléséhez, a technológia megtervezéséhez, illetve, hogy kézzben tartzuk a lerakó belsejében lezajló folyamatokat (a metánképződés ne álljon le a túlzott hőkinyerés hatására). A bomlási folyamatok során képződő hő hatására a depónia belsejében a hőmérsékleti viszonyok megváltoznak (Yesiller et al., 2015), az így kialakuló hőterhelés jelentős hatást fejthet ki a depóniatest mechanikai-, illetve hidraulikai tulajdonságaira. Coccia et al., (2013) szerint a hőkinyeréssel nemcsak a lerakó belsejében lezajló folyamatokat kontrollálhatjuk, hanem az aljzsigetelés várható élettartalmát is befolyásolhatjuk.

II. Hőképződés a települési szilárd hulladéklerakókban

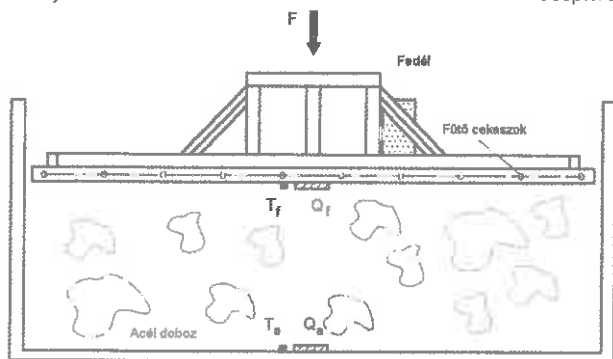
A deponált, szerves anyag tartalmú települési szilárd hulladékokban (TSZH) a bomlási folyamatok során végbemenő különböző biokémiai-, illetve fizikokémiai folyamatok eredményeként depóniagáz, csurgalékvíz, illetve hő keletkezik. A bomlási folyamatok jellemzően 3 fő fázisra oszthatók: aerob, átmeneti és anaerob. Az egyes lebomlási fázisokhoz tartozó hő- és a keletkező depóniagáz fő gázkomponenseinek a koncentrációját szemlélteti az 1. ábra az idő függvényében egy vizsgált lerakóra vonatkozóan.



1. ábra: A hő- és depóniagáz képződés az idő függvényében (Coccia et al., 2013 alapján)

Az 1. ábrán jól látható, hogy a települési szilárd hulladék kezdeti hőmérséklete a deponálásor nagyjából 20 °C körüli érték volt, amely a lerakás után a lebomlási folyamatok hatására szinte azonnal emelkedni kezdett, növekvő tendenciát mutatva. A vizsgált lerakóban a

hőtani és fizikai jellemzők még lerakóról - lerakóra és lerakón belül is jelentősen változnak. A szakirodalomban nagyon kevés adat található az említett paramétereikről, ezért új mérőberendezést kellett fejleszteni. A hővezetési tényező méréséhez olyan geometriájú mérőberendezést építettünk, amiben a teljes hőáramnak csak egy belső, jól meghatározott keresztmetszetét mérjük. A belső, mért keresztmetszet lényegesen kisebb, mint a teljes keresztmetszet, így a mért keresztmetszetben a hőáramvonalak párhuzamosak, az oldalirányú veszteségek pedig nem befolyásolják a mérést. A hővezetés-mérő berendezés két fontos része a fűtéssel ellátott fedél és az acél doboz (6. ábra), amelyekbe hőmérséklet- és hőárammérő szenzorok vannak beépítve.



6. ábra: A hővezetési mérő berendezés sematikus rajza, illetve betöltése

A deponált kommunális hulladék háromfázisú durva diszperz rendszer, ami szilárd (ϵ_s), folyékony (ϵ_l) és gáz (ϵ_g) halmazállapotú részekből áll. Az egyes fázisok térfogathányadának összege egy ($\epsilon_s + \epsilon_l + \epsilon_g = 1$). Hővezetés szempontjából a szilárd fázist alkotó szemcsék diszperzitás állapota és elrendezése meghatározó. Két elméleti véglet lehetséges, az úgynevezett soros és párhuzamos elrendezés. Soros elrendezés esetén a hő a fázisokon egymás után halad át. Ilyenkor a hővezetési tényező (λ) minimális, mert a rossz hővezető gáz (λ_g) fázison is – teljes keresztmetszetben – át kell haladnia. A soros elrendezés elméleti eredő hővezetési tényezője (1) (Faitli et al., 2015a).

$$\lambda = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g}{\epsilon_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g + \epsilon_l \cdot \lambda_s \cdot \lambda_g + \epsilon_g \cdot \lambda_s \cdot \lambda_l} \quad (1)$$

Párhuzamos elrendezés esetén a hő részarámokra bomlik, és egymás mellett áramlik a fázisokban. A jó hővezető szilárd fázis (λ_s) teljes hosszban vezeti a hőt, ezért ez az elméleti maximális hővezetési állapot. A párhuzamos elrendezés elméleti eredő hővezetési tényezője (2) (Faitli et al., 2015a).

$$\lambda = \lambda_s \cdot \epsilon_s + \lambda_l \cdot \epsilon_l + \lambda_g \cdot \epsilon_g \quad (2)$$

A lerakóbeli valóságos állapotban jelenleg még nem tudjuk számítani az eredő hővezetési tényezőt, ezért azt mérésrel kell meghatározni. Mérési eredmények találhatók a Faitli et al., 2015a cikkben. Egyszerűsített számításokat végezhetünk a következő módszer szerint. A szilárd fázis hőtani jellemzőit becsülhetjük a szabványos (MSZ

21420/28 és 29) hulladékösszetéti vizsgálat eredményei alapján (2. táblázat).

Szabványos hulladék kategória	Mért tömeg hányad [%]	Becsült sűrűség [kg/dm ³]	Becsült hővezetési tényező [W/mK]	Becsült fajhő [J/gK]
1. Biológiailag lebomló	21,6	0,7	0,15	2,721
2. Papír	12,7	1,1	0,05	1,34
3. Karton	4,7	1,1	0,21	1,34
4. Kompozit	2,1	1,1	0,2	2,19
5. Textil	3,6	0,25	0,06	1,29
6. Higiéniai	4,4	1	0,155	1,48
7. Műanyag	19,9	1,15	0,25	1,67
8. Éghető egyéb	2,9	1,2	0,2	2,19
9. Üveg	3,6	2,7	0,87	0,837
10. Fém	3,6	4	91,92	0,483
11. Nem éghető egyéb	4,4	2,5	1,59	0,858
12. Veszélyes	0,7	3,5	56,22	1,1
Finom (< 20 mm)	15,7	1,5	0,16	2,112
Szilárd fázis eredője:	100 %	1,297	3,99	1,8

2. táblázat: A szilárd fázis hőtani jellemzőinek becslése a szabványos (MSZ 21420/28 és 29) hulladékösszetéti vizsgálat eredményei alapján

A fázisok eredő jellemzőit a következő ismert adatok alapján becsülhetjük. További jelentős egyszerűsítést jelent a gáz fázist a normál állapotú levegő adataival jellemezni (3. táblázat).

Fázis	Sűrűség [kg/dm ³]	Hővezetési tényező [W/mK]	Fajhő [J/gK]
Folyadék (víz)	$r_l = 1$	$l_l = 0,6$	$C_{ml} = 4,181$
Gáz (levegő)	$r_g = 0,0012$	$l_g = 0,025$	$C_{mg} = 1,012$
Szilárd (TSZH)	$r_s = 1,297$	$l_s = 3,99$	$C_{ms} = 1,8$

3. táblázat: Az egyes fázisok eredő hőtani jellemzőinek becslése

IV. Hőcserélő technológia fejlesztése

A DepóniaHő projekt keretében, kb. 3 km KPE csővezeték felhasználásával 2014 nyarára készült el a 7. ábrán sematikus bemutatott komplett hőcserélő- és hasznosító rendszer. A technológia fő elemei a vízszintes és a függőleges elrendezésű hőcserélők, az összekötő hőszigetelt csővezetékrendszer szerelvényekkel, a gépészeti berendezések (gerincvezetékek, szivattyúk, szerelvények, stb.) fém konténer házban, a hő hasznosítására szolgáló elemek, mint az üvegház - téli üzemben és a csurgalékvíz medencében épített csővezeték - nyári üzemben, ill. a számítógépes mérésadatgyűjtő rendszer.

A módszer két alapvető megfigyelésen alapul. Az előremenő és visszaterő csőágak a furat szélénél helyezkednek el, így a távolság közöttük maximális. A hulladék és a csővezeték között a hőtermelő szakaszon jó hő kapcsolatot kell biztosítani, amelyre alkalmas a betonnal való kitöltés. A betonnal való kitöltés a rendszer mechanikai stabilitását is biztosítja. A beton hővezetési tényezője $1,09 \text{ W/mK}$, amely kétszer jobb, mint a hulladéké vagy a KPE csőé. A felső szakaszon hőszigetelő anyagot kell alkalmazni. A fa hővezetési tényezője $0,14 \text{ W/mK}$, azaz kb. negyede a hulladékénak. A lerakón található - 2 cm-nél durvább - komposzt maradvány anyag, amely nagy fa tartalmú. Ez a maradvány anyag alkalmas a felső 6 m-es réteg kitöltésére. A rendszer rugalmasságát az biztosítja, hogy a fém konténerben, mint gépházban elhelyezett két acél gyűjtőcsőbe csatlakozik minden bejövő (vízsintes hőcserélők ("piskóta" és "hurkos") és a függőleges hőcserélők) és elmenő (üvegház, csurgalékvíz medence) csővezetékpár (10. ábra). Az egyes rendszerek csapok és szelepek működtetésével be- illetve kikapcsolhatók.



10. ábra: Az üvegházba és a csurgalékvíz medencébe épített hőcserélők segítségével hasznosítható a kinyert hő

V. Hőkinyerési- és hőhasznosítási félüzemi méretű kísérletek

Az üzembe helyezést követően megkezdtük a szisztematikus félüzemi méretű hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérleteket. A kísérletek egyik célja az volt, hogy mindhárom hőkinyerő és mindkét hőhasznosító rendszer közös üzemét megvizsgáljuk, ez összesen hat kapcsolási elrendezést jelent. A fő cél azonban az volt, hogy meghatározzuk a kinyerhető energia nagyságát és az adott hőcserélők ható környezetét (ahonnan kinyerjük a hőt), mert ezek alapján lehet a rendszer fő műszaki és gazdasági jellemzőit megtervezni. További fontos kérdés volt a hőkinyerés időzítésének a vizsgálata, mert számos stratégia szerint megválaszthatjuk és beállíthatjuk a hőcserélő közeg térfogatáramát, azaz a hőkinyerés intenzitását és a hőkinyerési és regenerációs szakaszok időtartamát. Mindezek érdekében 10 különféle hőkinyerési és hőhasznosítási félüzemi kísérletet végeztünk el. Az egyes kísérletek főbb jellemzőit a 4. táblázat foglalja össze.

Mérés jelölése	Hőkinyerő és hőhasznosító	Hőkinyerés stratégiája	Időtartam
2014/I.	Függőleges a csurgalékvíz medencére	intenzív hőkinyerés, hosszú regeneráció	2014.08.21.-2014.09.15.
2014/II.	Függőleges az üvegházra	alacsony intenzitással stacionér állapot elérése	2014.09.17.-2014.10.13.
2014/III.	"Hurkos" a csurgalékvíz medencére	szakaszos működés, változó intenzitás	2014.11.01.-2014.11.25.
2014/IV.	"Piskóta" az üvegházra	szakaszos működés, változó intenzitás	2014.11.26.-2014.12.11.
2014/V.	Függőleges az üvegházra	intenzív hőkinyerés	2014.12.12.-2014.12.20.
2015/I.	"Piskóta" a csurgalékvíz medencére	kis intenzitás, folyamatos üzem	2015.06.01.-2015.06.08.
2015/II.	Függőleges a csurgalékvíz medencére	kis intenzitás, napi váltásban a kinyerés és regeneráció	2015.06.09.-2015.06.19.
2015/III.	"Piskóta" a csurgalékvíz medencére	mérsékelt intenzitás, hosszú aktív és passzív szakasz	2015.06.19.-2015.07.07.
2015/IV.	Függőleges az üvegházra	mérsékelt intenzitás, rövidebb aktív és passzív szakasz	2015.07.08.-2015.07.16.
2015/V.	"Piskóta" a csurgalékvíz medencére	változó intenzitás, hosszú aktív és passzív szakasz	2015.07.17.-2015.07.31.

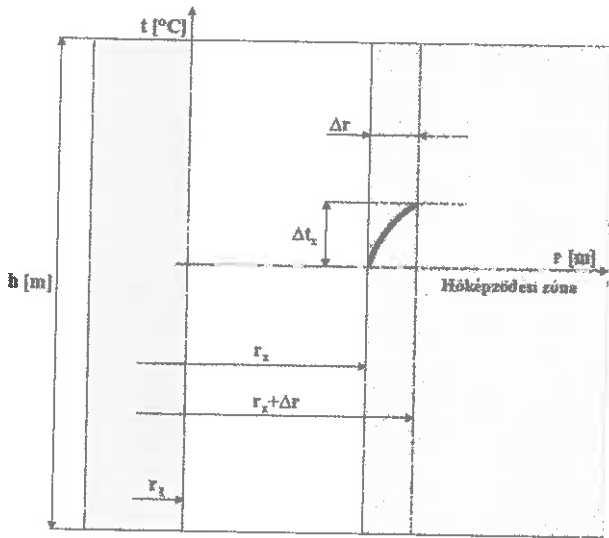
4. táblázat: A hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérletek főbb jellemzői

V.1. Mérési eredmények kiértékelése

A következőkben az elvégzett mérések közül csak egyet, a 2014/I.-es jelű mérés eredményeivel foglalkozunk. A mérés 2014.08.21. és 2014.09.09. között zajlott, amely során a 4 db hőcserélő kutat a csurgalékvíz gyűjtő medencére csatlakoztunk. A vizsgálat első 6 napjában a hőcserélő közegét állandó térfogatárammal ($= 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) keringtettük az összekapcsolt hőkinyerő- és hőhasznosító rendszerekben. A 4 db hőkinyerő kút ("A", "B", "C" és "D") egy úgynevezett Tichelmann rendszer (Usemann, 1993) alapján lett összekapcsolva, ezért feltételezhető, hogy a 4 kút mindegyikén a keringtetett közeg térfogatáramának a negyede haladt át. A 6 napig tartó hőkinyerést 13 nap regeneráció (a munkaközegét nem keringtettük) követte. Példaként az "A" jelű kútban a hőmérsékletmérő szenzorok által rögzített értékeket és a számított, kinyert hőáram értékeket szemlélteti a 11. ábra. A B jelű kútban is hasonló tendenciájúak az adatok.

P [W/m ³]	r_n [m]	q_c [W]	r_{x0} [m]	r_{x1} [m]	r_{x2} [m]	r_{x3} [m]	r_{x4} [m]	r_{x5} [m]	r_{x6} [m]	r_{x7} [m]	r_{x8} [m]	r_{x9} [m]	r_n [m]
0,53	6	962	0,4	0,96	1,52	2,08	2,64	3,2	3,76	4,32	4,88	5,44	6
			t_{x0} [°C]	t_{x1} [°C]	t_{x2} [°C]	t_{x3} [°C]	t_{x4} [°C]	t_{x5} [°C]	t_{x6} [°C]	t_{x7} [°C]	t_{x8} [°C]	t_{x9} [°C]	t_{x10} [°C]
			34	40,2	43,3	45,4	46,9	48	48,8	49,4	49,8	50	50

6. táblázat: Az iteratív számítási eljárás eredményei



13. ábra: A csőhéj-modell a hőképződés figyelembe vételével

A csőhéj-modell szintén alkalmazható az r_x - $r_x + \Delta r$ sugarú csőhéj leírására, amelyek alapján a hőmérséklet-változás az alábbiak szerint írható fel (7A és 7B):

$$q_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)} \cdot \Delta t_x \cdot h \quad \text{és} \quad \Delta t_x = \frac{q_x \cdot \ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h} \quad (7A \text{ és } 7B)$$

A csőhéj-modell a hőképződés figyelembe vételével már alkalmas a jelenlegi helyzet leírására. A lebomlás fajlagos hőteljesítményének számításához elsőként néhány paraméter bevezetése szükséges, amelyek az "A"- és "B" hőkút mért eredményeiből származtathatók. Az említett paraméterek tulajdonképpen egy virtuális hőkútra jellemzők, ahol a hőmérséklet értéke állandó a függőleges tengely mentén a vízszintes sík bármely pontjában. Az alkalmazott paraméterek a következők (5. táblázat):

A mag palástjának hőmérséklete, t_1 [°C]	Eredeti, hőkinyerés nélküli hőmérséklet, t_n [°C]	Kinyert hőáram, q [W]	Hővezetési tényező, λ [W/mK]
34	50	961	1,4

5. táblázat: A számításokhoz felhasznált paraméterek és értékeik.

A gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék hővezetési tényezőjét a bemutatott méréseink során meghatároztuk (Faitii et al., 2015a). A hőtani paraméterek mérésére kifejlesztett berendezés, illet-

ve módszer mintavételezésen alapul. A mintavétel hatására viszont a települési szilárd hulladék halmazsűrűsége jelentősen csökken - mivel a vizsgálandó anyagot a mérőberendezésbe kell tölteni - az eredeti, a hulladéklerakó belsejében lévő átlagos halmazsűrűséghez képest. A méréseink alapján a gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék átlagos hővezetési tényezője 1,4 W/mK, amelyet 1000 kg/m³-es halmazsűrűséget feltételezve, extrapolálással kapunk meg.

A további számításokhoz szükséges p és r_n értékét iteratív számítással határoztuk meg. Az iteratív számításához első lépésben az r_1 - r_n távolságot 10 részre osztottuk fel, majd a 7.A és 7.B egyenletek alapján meghatároztuk Δr_x értékét. Az r_n és p értékek szisztematikus változtatásával t_{nc} és q_c értékeket addig számítottuk, ameddig el nem érték a vizsgálat során mért értékeket ($t_n = 50$ °C és $q = 961$ W). Az eredményeket a 6. táblázat szemlélteti.

Az iteratív számítási eljárás a $p=0,53$ W/m³ és az $r_n=6$ m értékekhez konvergál, amely tulajdonképpen azt jelenti, hogy a lebomlás fajlagos hőteljesítménye 0,53 W/m³, amelyet a hőkút egy 12 m átmérőjű és 16 m magasságú hengerből képes kinyerni. A kapott eredmények könnyen ellenőrizhetők. A henger térfogata az említett magassággal és átmérővel számolva: 1809 m³. Figyelembe véve, hogy a lebomlásból származó fajlagos hőteljesítmény 0,53 W/m³, a 2014./-es vizsgálathoz tartozó hőkinyerési szakasz időtartama pedig 9085 perc, a teljes, képződő hő mennyisége 0,54 GJ-ra adódik, amely jól közelíti a kísérlet során mért értéket. Amennyiben a térfogatáramot növeljük a hőcserélő rendszerben, a csőhéjhoz tartozó sugár (r_n) szintén nőni fog, tehát nagyobb térfogatú hengerből lehetséges a hőkinyerés.

A kísérlet alapján egy másik fontos következtetés az, hogy a hőkinyerési szakaszt egy regenerációs szakasznak kell követnie, amikor a munkaközeg nem kering a hőcserélő rendszerben. A regenerációs szakasz alapján a lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye (p_e) is meghatározható. Amint már említettük, a vizsgálat során a hőkinyerési szakasz 9085 percen át, a regenerációs szakasz pedig 18180 percen át tartott, amelyből a p_e értéke 0,18 W/m³-re adódik. A lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye tehát 0,18 W/m³, amely a hőcserélő technológia méretezéséhez nélkülözhetetlen paraméter, ugyanis ez az érték adja meg az adott hulladéklerakó, adott ütemére vonatkozóan, a deponált TSZH-ra jellemző hőképződés nagyságát. Ez azt is jelenti, hogy az adott esetben, 0,18 W teljessítménnyel a lerakó adott köbméterére vonatkoztatva a hő folyamatosan, hosszútávon elvonható.

VI. Összefoglalás és a bioreaktorként üzemeltetett hulladéklerakó koncepciója

A bevezetőben összefoglaltuk, hogy hazai viszonylatban még mindig magas a keletkező TSZH lerakásra kerülő - és biológiailag bomló komponenseket tartalmazó - mennyisége. A lerakó művelése közben, - amíg nincsen feltöltve - könnyű a hőcserélő csővezeték kiépítése. Hatalmas hőforrást jelentenek azonban a már feltöltött és a már reaktivált, bezárt lerakók is. Akár a lebomlási szakasz lezárulta után is nyerhető ki hő, mivel ilyenkor normál „földhő” hőszivattyús üzemben lehet a beépített hőcserélőt működtetni.

Annak ellenére, hogy az általános cél az, hogy a hulladéknak a lehető legkisebb hányada kerüljön lerakóra, a lerakást nem lehet elkerülni, mert valójában mindig marad vissza valamilyen tovább nem kezelhető anyag. Vagyis lerakó kapacitások kiépítésére mindig szükség lesz. Ezért megfontolandó az az alternatíva, amikor a