

# A HULLADÉKLERAKÓK ALJZATSZIGETELÉSÉNEK EGYENÉRTÉKŰSÉGE

Kovács Balázs  
egyetemi tanársegéd

*Miskolci Egyetem, Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Tanszék*

A hulladéklerakók aljzatszigetelése természetes és mesterséges anyagú összetevőkből állhat. Bármilyen anyagból is készüljön a szigetelés, szükséges a szigetelőréteg hatékony működésének egyenértékűség vizsgálatokkal való a bizonyítása. Az egyenértékűség megállapítása során azt vizsgáljuk, hogy adott összetételű csurgalékvizek mellett a tárolótéren kívül kialakuló legmagasabb koncentráció hogyan viszonyul a szabványokban, előírásokban rögzített felépítés mellett kialakuló koncentrációkhoz. Általánosságban két szigetelés akkor egyenértékű, ha a szigetelésen átjutó szennyezőanyag koncentrációja adott időintervallum elteltével azonos nagyságú. A magyarországi jogi szabályozás (102/1996. Kormányrendelet) szerint az egyenértékűséget 30 éves időintervallumra kell bizonyítani.

## AZ EGYENÉRTÉKŰSÉG VISZONYÍTÁSI ALAPJAI

Egyenértékűnek mondjuk azt a két tetszőleges szigetelőrendszert, amely a transzport-folyamatokat tekintve azonos idő alatt, azonos mentett oldali koncentrációkat tesz lehetővé. Az egyenértékűség megállapításához egy viszonyítási alapra, azaz egy előírt szigetelőrendszerre van szükség. A későbbiek során viszonyítási alapnak tekintjük a 102/1996. Kormányrendeletben az I. és II. osztályú veszélyes hulladékokra meghatározott aljzatszigetelő-rendszer felépítését. Kommunális hulladékok esetében az 1994 novemberében a KVM által kiadott közleményt (az 1996. évi önkormányzati céltámogatások műszaki követelményeiről) vehetjük alapul, amelyet a hazai regionális kommunális hulladéklerakó-építési gyakorlat is követ. A közelmúltban megépült lerakók esetében - minimális követelményként - a közlemény III. építési osztályának követelményrendszerét vették alapul. (SZABÓ-LAKATOS, 1997). Az egyenértékűség számítások során a legkedvezőtlenebb esetet szükséges feltételeznünk, hogy az ekvivalencia a vizsgált depónia minden pontján teljesüljön.

## AZ ADVEKTIV EGYENÉRTÉKŰSÉG (HIDRAULIKAI EGYENÉRTÉKŰSÉG)

Advektíve egyenértékűnek mondjuk azt a két tetszőleges szigetelőrendszert, amely pusztán az advektív transzport-folyamatokat tekintve azonos idő alatt azonos mentett oldali koncentrációkat tesz lehetővé. Tekintve, hogy az advektív szennyezőanyag fluxusokat koncentráció és a szivárgás Darcy-féle átlagsebessége (lamináris szivárgást feltételezve) szorzataként kaphatjuk, így az advektív egyenértékűség valójában hidraulikai egyenértékűséget jelent, azaz a két szigetelőrendszerre vonatkozó átlagos szivárgási sebesség megegyezését.

Tekintve egy  $i$  darab,  $m_i$  vastagságú,  $k_i$  szivárgási tényezőjű rétegből álló oszlop átlagos szivárgási tényezőjét:  $\bar{k} = \sum_{i=1}^n m_i / \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k_i}$ , a hidraulikai egyenértékűség esetén

$\bar{k}_{szabványos} \geq \bar{k}_{vizsgált}$ . A képletek segítségével a hidraulikai egyenértékűség - szakirodalmi átlagadatok alapján - számított értékeit az 1. táblázatban mutatjuk be.

Valamennyi számítás során alapkövetelmény, hogy a hidraulikus gradiens nagyobb legyen a küszöbesésnél, annak érdekében, hogy a szivárgás meginduljon.

1. táblázat: Szigetelőrétegek hidraulikai egyenértékűsége

| Anyag                          | A <sup>1</sup> [m] | B <sup>2</sup> [m] | C <sup>3</sup> [m] |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Épített agyag-szigetelőréteg   | 0.6                | 3.1                | 93                 |
| 3% bentonit és homok keveréke  | 300                | 1550               | 46500              |
| 5% bentonit és homok keveréke  | 60                 | 310                | 9300               |
| 10% bentonit és homok keveréke | 0.6                | 3.1                | 93                 |
| 15% bentonit és homok keveréke | 0.048              | 0.248              | 7.44               |
| Geomembrán                     | 0.00048            | 0.00248            | 0.0744             |
| Geomembrán 5 mm átm. lyukkal   | 0.00282            | 0.01457            | 0.4371             |
| Geomembrán 1 cm átm. lyukkal   | 0.0057             | 0.02945            | 0.8835             |
| Geomembrán 2 cm átm. lyukkal   | 0.0114             | 0.0589             | 1.767              |
| Bentonitszőnyeg                | 0.015              | 0.0775             | 2.325              |
| Hidraulikus szigetelőaszfalt   | 0.018              | 0.093              | 2.79               |

<sup>1</sup>60 cm vastag,  $k=10^{-9}$  m/s agyag-szigetelőréteggel egyenértékű vastagság [m]

<sup>2</sup>geomembránnal fedett, 60 cm vastag,  $k=10^{-9}$  m/s agyagszigetelő-réteggel egyenértékű vastagság [m] (kommunális hulladéklerakó)

<sup>3</sup>kétrétegű geomembránnal fedett, 60 cm vastag,  $k=10^{-9}$  m/s agyagszigetelő-réteggel egyenértékű vastagság [m] (veszélyes hulladéklerakó)

A táblázatból jól látható, hogy pusztán hidraulikai szempontok alapján az erősen vízrekesztő geomembrán, bentonitszőnyeg és aszfaltszigetelések közel egyenértékűnek mutatkoznak.

## A DIFFÚZIV EGYENÉRTÉKŰSÉG

A hidraulikai egyenértékűséghez hasonlóan diffúzív egyenértékűség is definiálható. Akkor tekinthetünk két szigetelőréteget diffúzió szempontjából egyenértékűnek, amennyiben a diffúzió következtében kialakuló anyagáramok azonos nagyságúak.

Tekintve a Fick-törvény egyik analitikus megoldását, a homogén feltételre instacioner állapotban a koncentrációkat a  $c_i(x, t) = c_{0i} \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{D_i t})$  képlet alapján számíthatjuk, ahol  $C_{0i}$  az  $i$  szennyezőanyag időben állandó koncentrációja, amely a diffúziót indukáló koncentrációkülönbségeket okozza,  $D_i$  a közegnek az adott  $i$  szennyezőanyagra vonatkozó diffúzióállandója,  $c_i$  a koncentráció  $x$  helyen  $t$  időpontban. Annak érdekében, hogy A és B szigetelőrétegek a diffúzív egyenértékűségét kimondhassuk a  $c_i$  koncentrációknak egyenlőnek kell lenniük azonos  $c_{i0}$  koncentrációk,  $x$  távolságok és  $t$  idők esetén, azaz  $x_A / \sqrt{D_A} = x_B / \sqrt{D_B}$ . Így B szigetelőanyagának az  $x_A$  vastagságú A anyaggal való diffúzív egyenértékűsége akkor áll fenn, ha  $x_B \geq x_A \sqrt{D_B} / \sqrt{D_A}$  (KOHLER és HEIMERL, 1995).

Amennyiben például számítjuk a diffúzive 2 mm vastag HDPE fóliával egyenértékű agyag-szigetelőréteg vastagságokat vagy fordítva, a 60 cm vastag agyag-szigetelőréteggel diffúzive egyenértékű fóliavastagságokat (2. táblázat), úgy kitűnik, hogy a geomembránok diffúzióval szembeni gátképessége mindösszesen 5-10 cm vastagságú agyagréteg hasonló képességének felel meg. Ha mindehhez, hozzávesszük azt a tény, hogy a fóliaszigetelések

esetén a fóliasérülésre és ezáltal a diffúzióállandónak a nagyságrendekkel való megnövekedésével lehet számolni (a HDPE fólia helyére az épített agyagszigetelés anyaga kerül), belátható a kombinált szigetelőrendszerek szükségessége.

**2.táblázat:** Geomembrán és agyag-szigetelőréteg diffúzió egyenértékűsége néhány szennyező-komponenssel szemben

| Anyag              | Effektív diffúzió-állandó<br>[10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s] | Effektív diffúzió-állandó<br>[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s] | 2mm HDPE fóliával egyenértékű agyag vastagsága<br>[cm] | 60 cm agyagszigeteléssel egyenértékű fólia vastagsága<br>[mm] |
|--------------------|--|--|--|---|
|                    | Agyag  | Geomembrán   |  |   |
| Metanol            | 4.8  | 0.8  | 4.9  | 0.00167   |
| Aceton             | 3.4  | 0.6  | 4.8  | 0.00187   |
| Ecetsav-etilészter | 2.8  | 0.15   | 8.6  | 0.00017   |
| Formaldehid-oldat  | 5.9  | 0.8  | 5.4  | 0.00110   |
| Kloroform          | 3.1  | 0.25   | 7.0  | 0.00039   |
| Széntetraklorid    | 2.9  | 0.25   | 6.8  | 0.00045   |
| Klórbenzol         | 2.7  | 0.25   | 6.6  | 0.00051   |
| Benzol             | 3  | 0.2  | 7.7  | 0.00027   |
| Xilol              | 2.4  | 0.2  | 6.9  | 0.00042   |
| Toluol             | 2.7  | 0.2  | 7.3  | 0.00033   |
| Pentán             | 2.7  | 0.2  | 7.3  | 0.00033   |
| Heptán             | 2.2  | 0.2  | 6.6  | 0.00050   |

## A KONVEKTÍV-DISZPERZÍV EGYENÉRTÉKŰSÉG

A konvektív és diszperzív transzportfolyamatokat is tekintetbe vevő egyenértékűség-számítási módszert SHACKELFORD (1990) dolgozott ki. Az eljárás lényege, hogy az egydimenziós transzportegyenlet alapján a különböző szennyezőanyag komponensek esetén, a gát mentett oldalán, egy adott koncentráció kialakulásához szükséges időt számítjuk. Amennyiben a kapott idő kisebb a megkívántnál, akkor a gát vastagságának növelésével ismételjük meg a számítást és fordítva. A vizsgálatot nyilvánvalóan a csurgalékvízben előforduló, vagy várhatóan előforduló elemekre külön-külön kell elvégezni.

A módszer a telített porózus közetekben mozgó, oldott anyagra vonatkozó, egydimenziós advektív-diszperzív transzport egyenlet analitikus megoldásának célszerűen átalakított formáján alapul:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{I - T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right) + \exp(P_L) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{I + T_R}{2\sqrt{T_R/P_L}} \right) \right] \quad (1)$$

ahol  $x$  a szigetelőréteg felszínétől mért távolság,  $D^*$  a diffúzióállandó,  $L$  a szigetelőréteg vastagsága,  $v_R$  az adszorbeálódó szennyezőkomponens migrációs sebessége

$T_R = \frac{v_s \cdot t}{R_d \cdot x} = \frac{v_R \cdot t}{x} = \frac{v_R \cdot t}{L} \Big|_{x=L}$  és  $P_L = \frac{v_s \cdot x}{D^*} = \frac{v_s \cdot L}{D^*} \Big|_{x=L}$ . Az  $R_d = \frac{v_s}{v_R}$  a retardációs (késleltetési) tényező, nem adszorbeálódó elemekre  $R_d = 1$ , egyébként  $R_d > 1$ .

A méretezés menete:

- becsüljük a szigetelőréteg vagy védőréteg vastagságát ( $L$ ),
- meghatározzuk a  $P_L = \frac{v_s \cdot L}{D^*}$  értékét,
- a  $c/c_0$  és  $P_L$  ismeretében az (1) képletből vagy az annak alapján rajzolt nomogrammból meghatározzuk  $T_R$  értékét,
- a  $t_l = \frac{T_R \cdot R_d \cdot L}{v_s}$  összefüggésből az átjutási idő számítható,
- összehasonlítjuk, hogy  $t_l > t_{szüks.}$  fennáll-e, ha nem, az  $L$  újabb, módosított értékével a számolást megismételjük.

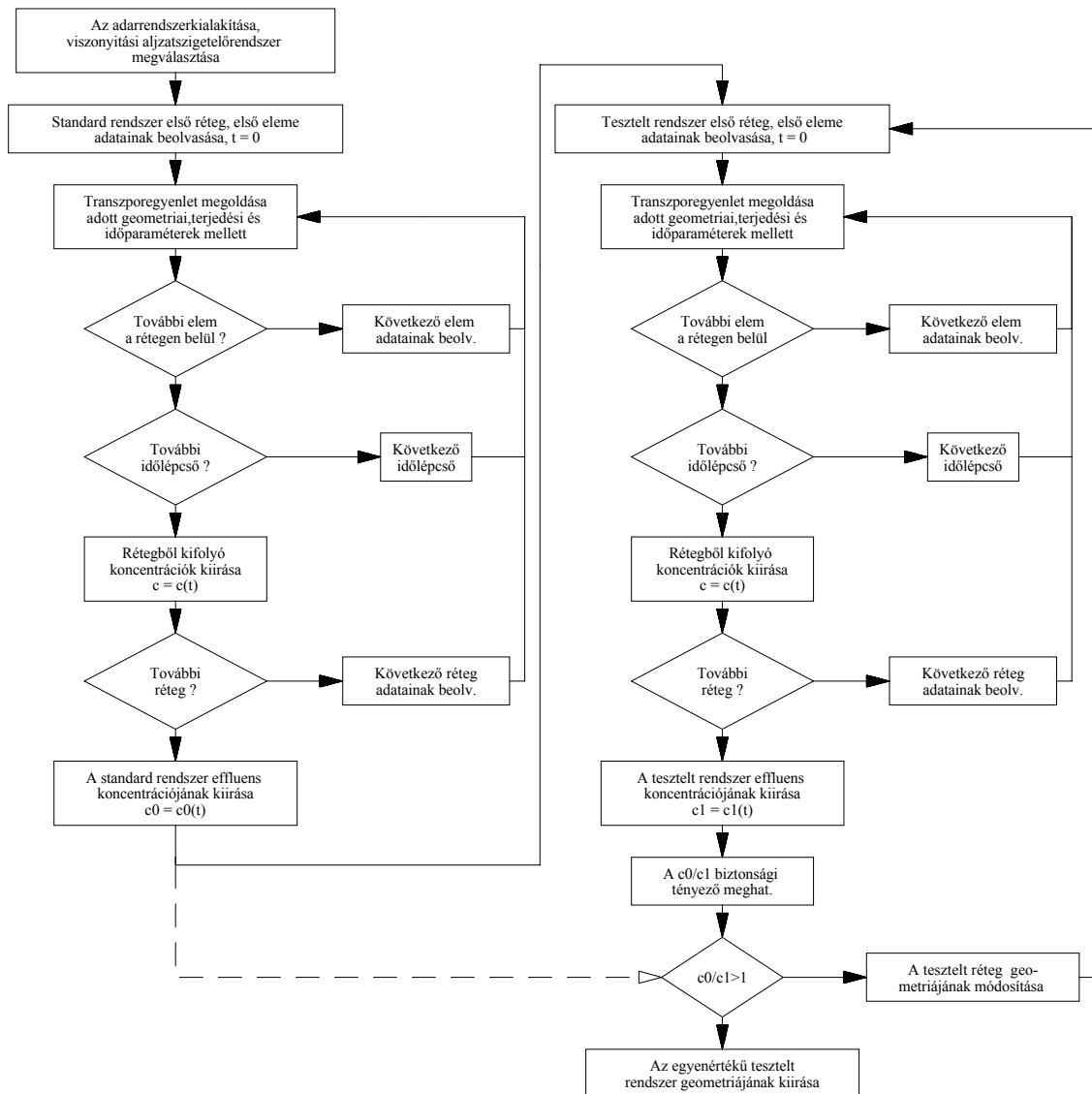
## AZ ÁLTALÁNOS EGYENÉRTÉKŰSÉG

Mint az a konvektív-diszperzív egyenértékűség bemutatásánál is látszott a transzportegyenlet analitikus megoldásain alapuló egyenértékűség számítások még számos nemkívánatos megkötetést tartalmaznak. Nagyon zavaró, hogy az eltérő anyagi tulajdonságú geomembrán, aszfalt, természetes, de tömörített agyag stb. rétegeket nem lehet figyelembe venni, ugyanakkor kedvező, hogy az egyszerűbb számítások esetén közvetlenül az egyenértékű rétegvastagságot kapjuk meg.

Az egyenértékűség számítások korábban meglévő korlátait kiküszöbölendő egy - a transzportegyenletnek a véges differencia elven való megoldásán alapuló - egyenértékűség számítási módszert mutatok be. A módszer célja hogy tetszőleges számú, ugyanakkor egymástól jelentősen eltérő anyagi tulajdonságokkal jellemezhető rétegeken keresztülráamló szennyezőanyag fluxusok számítása váljék lehetővé.

A számítás első lépcsőjében azonos tulajdonságokkal jellemezhető térrészekre bontjuk a vizsgált rendszert. Tekintettel arra, hogy az aljzatszigetelő rendszeren az átszivárgás uralkodóan függőleges, ezért egy  $1 \times 1$  m alapterületű oszlopra történik a szennyezőanyag-mérleg elemeinek meghatározása. Bár egy ilyen kiválasztott hasábnak természetesen az oldalfalán keresztül is történik szennyezőanyag áramlás (pl. diagonális diszperzív hozamok), ugyanakkor ezek a hozamok elhanyagolhatók tekintettel arra a feltételezésre, hogy a vizsgált térrész körül ugyanilyen transzportfolyamatokkal jellemezhető térrész található. Ebből a feltételezésből az következik, hogy amekkora szennyezőanyag mennyiség az oldalfalakon a transzverzális diszperzió miatti hozamokkal kikerül, ugyanakkora anyagmennyiség jut a szomszédos térrészből a vizsgált oszlopba. Horizontális irányban diffúzió nem következhet be, mivel ilyen irányban a részletezett peremfeltételek mellett koncentráció-gradiens nem alakul ki.

A megoldás során egy olyan modult alakítunk ki, amely a beérkező, időben tetszőlegesen változó koncentrációjú, de állandó sebességű folyadék esetén az adott geometriájú egységből eltávozó folyadék koncentrációjának időbeli változását számítja a transzportegyenlet felhasználásával (1. ábra). Így a modul egy influens koncentrációfüggvényre a vizsgált elem és a vizsgált folyadék transzportjellemzőinek függvényében számítja az effluens koncentrációt. Amennyiben egymáson több eltérő transzportjellemzővel leírható réteg fekszik, úgy a felső réteg effluens koncentrációi képezik az alsó réteg influens koncentrációit. Ezzel a tulajdonképpen explicit véges differencia megoldással a problémát néhány programsor nagyszámú ismétlésére vezettük vissza.



1. ábra: A numerikus egyenértékűség-számítás menete

A véges differencia megoldás azonban csak a koncentrációnak az időbeli változását tudja megadni. Éppen ezért az egyenértékűség bizonyítására a számításokat a viszonyítási alapként használt standard rétegsorral (ld. az egyenértékűség viszonyítási alapjai) meg szükséges ismételni. Ezután definiálhatunk egy  $\nu = \frac{c_{ki\ standard}}{c_{ki\ tervezett}}$  biztonsági tényezőt, ahol ha  $\nu \geq 1$  vagy egy meghatározott biztonsági tényező, akkor az egyenértékűség biztosított. A számítás során természetesen különböző vastagságú réteggel szükséges a számításokat elvégezni, majd a az adott  $\nu$  biztonsági tényezőhöz tartozó rétegvastagságot meghatározni.

## AZ ÁLTALÁNOS ÉS A KONVEKTÍV-DISZPERZÍV EGYENÉRTÉKŰSÉGI SZÁMÍTÁSOK ÖSSZEVETÉSE

A konvektív-diszperzív egyenértékűség számítások előnye a gyorsaság és az egyszerűség, ugyanakkor csak egyféle terjedési tulajdonságokkal jellemzett rétegre

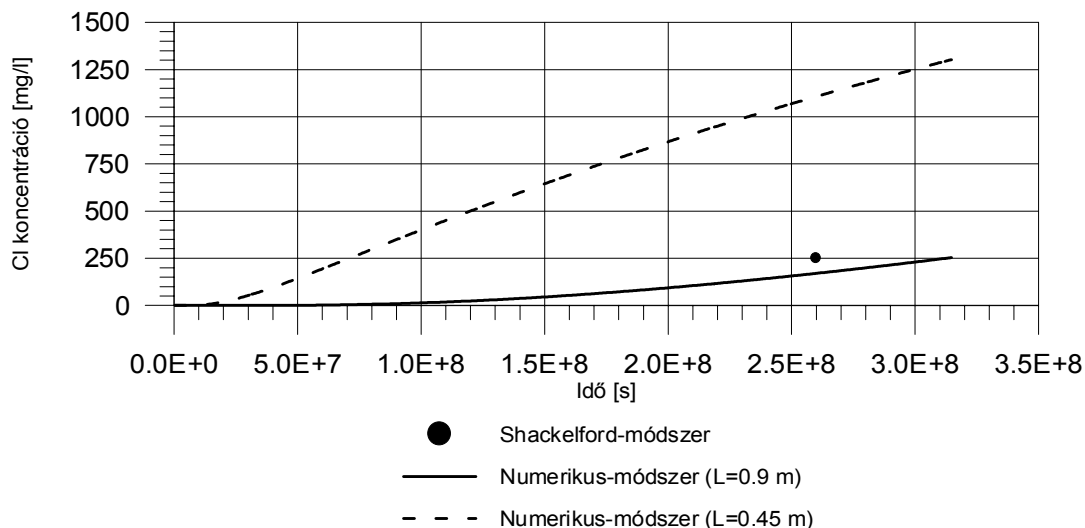
történhet a számítás. Tekintettel arra, hogy az egydimenziós transzportegyenlet analitikus megoldását használjuk fel, a megoldás matematikai szempontból egzakt, pontos.

A numerikus megoldás ezzel szemben a transzportegyenlet közelítő megoldásán alapul, bármilyen terjedési, illetve kémiai folyamat, amely matematikai formában megfogalmazható követhető vele, azonnal szolgáltatja a koncentráció mélység és időbeli változásának karakterisztikáját, tetszőleges rétegoszlop modellezhető vele. A két megoldási mód összevetését a 3. táblázat foglalja össze:

3. táblázat: Az analitikus és numerikus egyenértékűség-számítás jellemzői

| Jellemző                           | Analitikus számítás   | Numerikus számítás  |
|------------------------------------|---|---|
| matematikai megoldás               | egzakt  | közeliítő   |
| rétegek száma                      | egy   | tetszőleges   |
| eredmény                           | adott mentett oldali koncentrációhoz tartozó idő              | koncentráció változás a térben és az időben                   |
| advekción (konvekció) követése     | igen  | igen  |
| diffúzió követése                  | igen  | igen  |
| hidrodinamikai diszperzió követése | részben (diffúzió állandó diszperziós tényezőre cserélésével) | igen (diszperzivitás figyelembevételével)                     |
| adszorpció követése                | lineáris adszorpció   | lineáris, nem lineáris: Langmuir, Freundlich izoterma alapján |
| bomlás, biodegradáció követése     | nem lehetséges  | igen (exponenciális bomlás)                                   |
| kémiai reakciók követése           | nem lehetséges  | elvileg lehetséges, de a számításokat meglassítja             |
| csapadékképződés számítása         | nem lehetséges  | elvileg lehetséges, de a számításokat meglassítja             |

Klorid transzportja 0.9 m vastag agyagrétegen át



2. ábra: A numerikusan számított koncentrációk a mélység függvényében Amennyiben összevetjük azonos peremfeltételek mellett pl. klorid-ion transzportjának számításának a nomogramos Shackelford-módszerrel és a numerikus egyenértékűség-számítással kapott eredményeit, akkor némi eltérést tapasztalunk (2. ábra).

Míg az analitikus megoldás szerint 8.1 év volt szükséges ahhoz, hogy adott paraméterek mellett a mentett oldalon 250 mg/l koncentráció alakuljon ki, addig a numerikus számítás során ehhez mintegy 9.5 év lenne szükséges. Ennek csak részben oka, hogy a numerikus számítás során kismértékű, nem lineáris adszorpciót is figyelembe vettünk, de a még így is fennálló mintegy 10 %-os eltérés oka a Shackelford-féle nomogramról való leolvasás hibája. A nomogram egyszerűsíti a megoldást, de 5-10% leolvasási pontatlanság a  $T_R$  értékben az áttörési időben is ugyanekkora pontatlanságot okoz.

A numerikus megoldás további előnye, hogy számítás közben automatikusan egyéb mélységekben is számítjuk a koncentráció változását.

### **Irodalomjegyzék**

CZINKOTA I.- KOVÁCS B. - LAKATOS I. – SZABÓ I. (1998): **A practical application of contaminant transport modeling - Equivalence calculations of barriers**, AGK Schriftenreihe 54, Universität Karlsruhe

KOHLER, E.E. - HEIMERL, H.(1995): **Untersuchungen zur Bewertung der Gleichwertigkeit von Deponieabdichtungsmaterialien**, Sanierung von Altlasten (Hrsg. Jessberger), pp. 127-135.

LAKATOS I. - SZABÓ I. (1997): **A környezetvédelemben alkalmazható vertikális és horizontális szigetelőkátek egyenértékűségének feltételei**, Közl. és Mélyépítéstudományi Szemle, XLVII. Évf. 11. Szám, pp.423-431.

SHACKELFORD, Ch.D. (1990): **Transit time design of earthen barriers**, Engineering Geology, 29. pp.79-94.

SZABÓ I. (1995): **Hulladékelhelyezés II.**, 1995, Ipar a Környezetért Alapítvány, Budapest

SZABÓ I. - KOVÁCS B.(1995): **Hulladékelhelyezés IV.**, 1995, Ipar a Környezetért Alapítvány, Budapest