

Miskolci Egyetem
Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar
Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet
Hidrogeológus Mérnöki Intézeti Tanszék



Szennyezett talajok transzportfolyamatainak vizsgálata DKS-
permeábméterrel és Matrix Diffusion Toolkit szoftverrel

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Készítette:

Novák Lilla

Szakirány:

Hidrogeológus mérnök MSc II. évfolyam

Konzulensek:

Székelly István

Tudományos segédmunkatárs

Dr. Madarász Tamás Sámuel

Egyetemi docens

Beadási dátum:

2024.11.11.

Miskolc, 2024.

Eredetiség nyilatkozat

Eredetiségi nyilatkozat Alulírott Novák Lilla, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2024. november 11.

.....
hallgató aláírása

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Székely István, a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének tudományos segédmunkatársa és Dr. Madarász Tamás, a Miskolci Egyetem Víz- és Környezetgazdálkodási Intézetének egyetemi docense a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélik.

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Miskolc, 2024. november 11.

.....
konzulens aláírása

.....
konzulens aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Szénhidrogén szennyeződések környezetre gyakorolt hatásai.....	5
3. Szénhidrogén szennyeződések és transzportfolyamataik a talajban	5
3.1. Szénhidrogén szennyeződések.....	5
3.1.1. LNAPL szennyeződések:	6
3.1.2. DNAPL szennyeződések	8
3.2. A szennyeződések transzportfolyamatai.....	9
3.2.1. Szennyezések transzportfolyamatainak elemei	10
4. Rediffúzió.....	13
5. Matrix Diffusion Toolkit bemutatása és alkalmazhatósága	16
5.1. Szoftver bemutatása	16
5.2. Szoftver kezelésének ismertetése.....	21
5.2.1. Squareroot modell:	22
5.2.2. Dandy-Scale modell:	29
6. Modellezési eredmények.....	31
7. DKS- permeábméter felépítése és működési alapelve	39
8. Összegzés, célkitűzések	41
9. Köszönetnyilvánítás	42
10. Irodalomjegyzék.....	42
11. Ábrajegyzék	44
12. Táblázatjegyzék.....	45
13. Mellékletek:.....	45

1. Bevezetés

Az elmúlt évszázadban az ipar, a közlekedés és az infrastruktúra folyamatos fejlődésével egyre nagyobb számban fordulnak elő a földtani közeget és a felszín alatti vizeket érintő szénhidrogén-szennyeződések. A kőolaj és származékjainak tényleges környezeti veszélye abban rejlik, hogy erősen perzisztensek, azaz lassan bomlanak le, ugyanakkor gyorsan és nagy területen képesek szétterülni, nagy föld-, vagy vízfelületeket elszennyezni.

Az antropogén hatások következtében, a környezetbe kikerült szénhidrogén szennyeződések a talajba beszivároghatva, nem csak a transzmisszív zónát, hanem az adszorpciós és diffúziós folyamatok következtében a kis transzmisszivitású rétegeket is elszennyezik. Ennek hatására, az amúgy sem egyszerű eltávolításuk a földtani közegből és felszín alatti vízből még nehezebbé válik.

Annak érdekében, hogy az akár több évtizede fennálló szénhidrogén szennyezések kármentesítésének hatásfoka az elérhető technológiákkal növelhető legyen, elengedhetetlen a felszín alatt lejátszódó transzportfolyamatok minél pontosabb megismerése.

Dolgozatomban egy, a hazai kármentesítési gyakorlatban kevésbé elterjedt szoftvert, a Matrix Diffusion Toolkit-et mutatom be, és annak alkalmazási lehetőségeit a szennyezőanyagok transzportjának vizsgálatában. A kutatómunkám során a szoftver segítségével elsősorban a különböző szivárgási tényezővel rendelkező rétegek közötti anyagtranszport folyamatokat vizsgáltam fiktív modellfuttatások segítségével. Ezen modellek futtatásával elsősorban azt vizsgáltam, hogy különböző földtani képződmények esetén a rediffúziós folyamatok milyen időtávlatokban és milyen koncentrációkkal mennek végbe.

A Matrix Diffusion Toolkit -el végzett szimulációk mellett, bemutatom a Miskolci Egyetemen a Víz-és Környezetgazdálkodási Intézetben több éve fejlesztett, a rediffúzió laboratóriumi vizsgálatára kialakított mérési módszert.

2. Szénhidrogén szennyeződések környezetre gyakorolt hatásai

A kőolaj és származékainak környezetszennyező hatása mára már jól ismert. A szénhidrogén szennyezés a talajt terméketlenné teheti, mélyebb rétegekbe szivároghatva az ott fellelhető vízkészletet is veszélyeztetheti. A problémával hosszabb távon kell foglalkozni, mivel olajszállító és tárolótartályok (rendszerint földalattiak) meghibásodása, vagy felújítása sajnos elég gyakran a környezet nagyobb mértékű szennyeződésével jár. Hasonló jellegű problémát jelentenek a közúti, vagy vasúti szállítás során meghibásodó tartálykocsik. Az olajszennyeződés felszín alatti vízbe kerülve annak felületén, filmrétegni vastagon szétterül, míg a felszín alatti közegben akár vastagabb olajrétegeket is kialakíthat. Ezek csökkentik, vagy teljesen meg is gátolják a talajokban vagy vizekben található legkülönbözőbb élőlények levegőhöz jutását, ami az után a környezet minőségének rohamos romlását hozza maga után. [1]

A jelenleg is szennyező tevékenységek mellett azonban nem szabad elfeledkezni a múlt történéseiről sem. Magyarországon az elmúlt évtizedek alatt sok ezer tonna ipari hulladék (többnyire veszélyes hulladék), elszivárgott üzemanyag, egyéb kőolajszármazékok, valamint más káros anyagok kerültek a földtani közegbe és felszín alatti vízbe. Rengeteg olyan területtel találkozhatunk hazánkban, ahol a múltban kőolajat vagy kőolaj származékokat tároltak, vagy üzemanyagok átféjtését hajtották végre – ilyenek voltak például a laktanyák is –, esetlegesen vegyi üzemeket, vasútállomásokat üzemeltettek, az idő múlásával ezek az épületek bontásra, átépítésre kerültek és gyakran az ott történt környezetkárosító tevékenységek elfelejtődtek. A felszín alá került szennyezőanyagok azonban továbbra is ott maradtak, sőt, nagyvalószínűséggel tovább terjedtek, ezzel még nagyobb kockázatot okozva. [1]

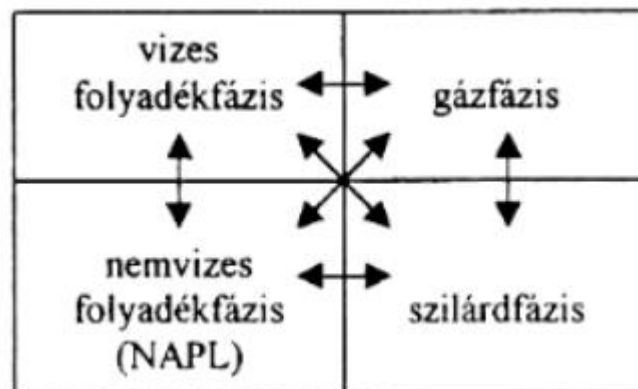
3. Szénhidrogén szennyeződések és transzportfolyamataik a talajban

3.1. Szénhidrogén szennyeződések

A legtöbb szénhidrogén szennyeződés antropogén hatások (többnyire ipari eredetűek) következtében kerülnek be a felszín alatti környezetbe. Általánosságban elmondhatjuk azt, hogy nemzetközileg is a leggyakrabban szennyezést okozó kockázatos anyag a szénhidrogén, melynek okai a következő tevékenységekre vezethetők vissza:

- kőolajbányászat és feldolgozása,
- felhagyott laktanyák,
- benzinkutak, közlekedés,
- műanyaggyártás (kerozin, benzin, gázolaj, gépolajok),
- zsírtalanítási technológiák,
- növényvédőszer gyártás és felhasználás, és
- fafeldolgozás, papírgyártás. [2]

Alapvetően elmondhatjuk azt a kőolajról és származékairól, hogy önálló fázisként mozognak és nem oldódnak vízben. Az ilyen típusú anyagokat a hidrogeológiában *Non-Aqueous-Phase-Liquids*-nek (NAPLs), vagyis „nem vízfázisú folyadékoknak” nevezzük és két nagy csoportba tudjuk őket besorolni. Az úgynevezett Dense-Non-Aqueous-Phase-Liquids (DNAPLs) az egyik csoport, ami olyan szénhidrogén származék, melynek sűrűsége nagyobb, mint a vízé. Ezzel szemben a Light-Non-Aqueous-Phase-Liquids (LNAPLs) kisebb a sűrűséggel rendelkezik, mint a víz. Annak ellenére, hogy az NAPL anyagok önálló fázist alkotnak, előfordulhat, hogy fázisátalakuláson esnek át, azaz gáz fázisba párolognak vagy beoldódnak a talajvízbe, majd a szilárd részecskék felületén adszorbeálódnak, ezzel még jobban megnehezítve a szennyeződés terjedési mechanizmusának meghatározását (pl.: terjedési idő, szennyezőcsóva vertikális és horizontális kiterjedése) (1. ábra).



1. ábra: Szénhidrogén szennyeződések fázisai talajban

3.1.1. LNAPL szennyeződések:

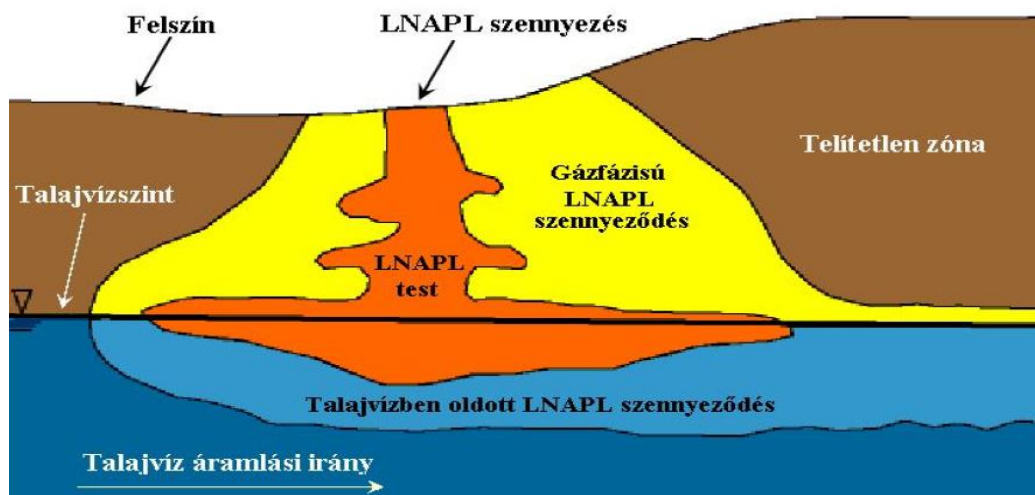
Ahogy már fentebb említettem, az úgynevezett Light-Non-Aqueous-Phase-Liquids mint gyűjtőnév, olyan anyagokat foglal magába, amelyeknek sűrűsége kisebb a víznél – tehát kisebb, mint 1 g/cm^3 – és nem vizes folyadékfázisúak. Az LNAPL szennyezőanyagok

közé elsősorban petrolkémiai finomított termékek tartoznak, de lehetnek finomítatlan nyersolaj-szennyezőanyagok és finomított termékek keverékei is. A leggyakoribb petrolkémiai termékeket és azok paramétereit a következő táblázat tartalmazza (1. táblázat). [7]

1. táblázat: Szénhidrogén termékek legfontosabb paramétereit [7]

Petrolkémiai termék	Sűrűsége (g/cm³)	Viszkozitás (cP)	Felületi feszültség (mN/m)	Határfelületi feszültség (mN/m)
Benzin	0,67 – 0,85	0,32 – 1,0	19,8	18,0
Gázolaj	0,82 – 0,87	2,0 – 4,0	26,5 – 27,4	24,0 – 35,4
Nyersolaj	0,82 – 0,98	7,0 – 68,0	25,0 – 37,0	19,1 – 22,5

Fontos azt is tudni az LNAPL-ek csoportjáról, hogy a talajvíztükör tetején olajlencsék alakulnak ki a kisebb sűrűségből adódó lefelé migrálás hatására. A gravitáció és a nehézségi erő által előidézett vertikális mozgás eredményeként a szennyeződés először áthalad a telítetlen zónán, ahol a kapilláris erő hatására a talaj pórusaiba kerül be az anyag kisebbik része. A másik része addig halad lefelé, amíg fizikai határokba nem ütközik, vagy a vízszint közelében jelenlévő felhajtó erő hatására meg nem változik az útja. Az olajlencse kiterjedését és alakját elsősorban a talaj és az alatta lévő rétegek szerkezete, neme, fizikai jellemzői és a szennyeződés mennyisége befolyásolja. A talajvízszint éves ingadozása megakadályozza az olajtest kialakulását, mivel ahhoz több évre is szükség lehet. Mivel az olajlencséből a horizontálisan és vertikálisan is mozgó talajvíz különböző anyagokat old ki, így a csóva szélesedésével egyre kisebb annak koncentrációja (2. ábra). [3]



2. ábra: LNAPL típusú szennyeződések mozgása a talajban [4]

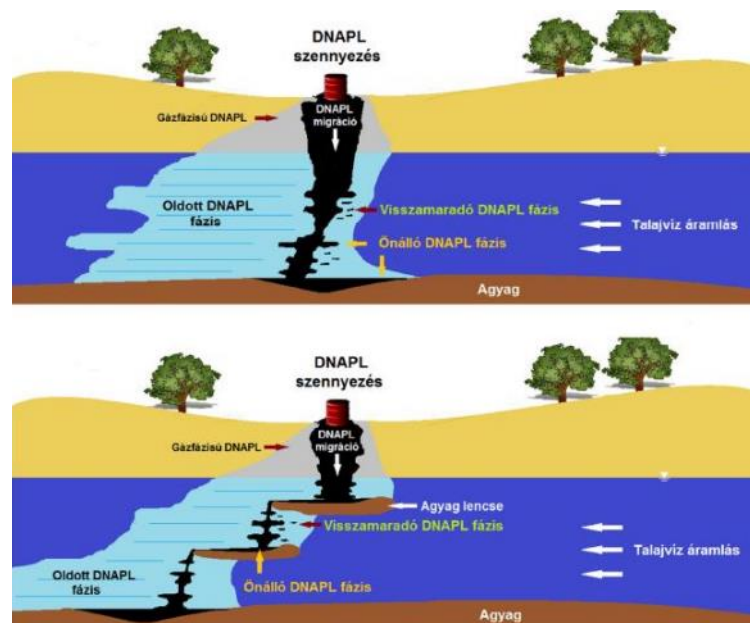
3.1.2. DNAPL szennyeződések

A víznél nagyobb sűrűséggel rendelkező anyagokat a DNAPL szennyezők csoportjába soroljuk. A DNAPL-ekre irányuló emberi igények a 20. században kezdett el megnőni és a mai napig tart.

A DNAPL-ekre is, mint az LNAPL szennyezőkre nagymértékben hat a gravitációs és a nehézségi erő, melyek hatására bekövetkezik a mélyebb rétegek felé történő vertikális mozgás. Amely még nagymértékben meghatározza ezen szennyező típus mozgásbeli irányát, az a földtani közeg áteresztőképessége és szerkezeti adottságai, hiszen képes a pórusterekből kiszorítani a vizet és a levegőt egyaránt. A kapilláris erőnek köszönhető a szennyezőanyag szemcsékhez történő tapadása hiszen a gáz és szerves folyadékok, illetve a víz és a szerves folyadékok között felületi feszültség alakul ki. Ez azért is nagyon fontos, mivel ezeket a szemcsékhez tapadt DNAPL cseppeket még jelentős mértékű hidraulikus gradiens, vagy kútba történő szivattyúzás hatására sem tudjuk elmozdítani. Ezeknek, a nem összefüggő cseppeknek, vagy ereknek a hálózata előfordulhat akár a talajvízszint felett és alatt is (3. ábra). [4]

A DNAPL típusú szennyeződések 3 állapot szerint lehet kategorizálni a mozgásuk alapján: mobilis, potenciálisan mobilis, reziduális (visszamaradó). A mobilis DNAPL szennyezők kiterjedése összefüggő, a kapilláris nyomás értéke meghaladja a pórusvíznyomásét, ezzel kiszorítva a talajvizet, amelynek hatására a szennyezőanyag képes a felszín alatti terjedésre. Potenciálisan mobilis szennyeződésnek nevezzük a DNAPL-eket

abban az esetben, ha a szennyező kapilláris nyomásának értéke nem haladja meg a pórusvíznyomás értékét, vagyis az áramlás nem jön létre és a talajvíz nem kerül kiszorításra. Ez abban az esetben változhat meg, ha valamilyen változás (pl. DNAPL testen keresztül fúrás történik) történik a rendszerben, ilyenkor a szennyeződés újra mobilis lehet. Abban az esetben, ha a DNAPL „cseppek” nem képesek a pórusnyomáson felülkerekedni és kiszorítani a vizet (fúrással sem), akkor reziduális, visszamaradó szennyeződésről beszélünk. Ilyenkor habár a szennyeződés jelen van a rendszerben a szilárd szemcsék felületén, mégis közvetlen összeköttetés a cseppek között. [5]



3. ábra: Földtani közegben lévő DNAPL típusú szennyeződések mozgása [6.]

A szennyeződések akár önálló folyadéktesteket is létrehozhatnak az olyan alacsony áteresztőképességű földtani képződmények felszínén, mint például az agyaglencsék. Ha ez az önálló fázis jelen van a talajban, úgy megtörténhet a szennyező vízbe oldódása, szilárd szemcséken való megkötése, illetve a pórustérbe történő kipárolgás. Ezeknek a szennyezőknek kicsi a vízben történő oldhatóságuk és a szivárgási sebességük is alacsony, így a teljes vízbe történő beoldódás akár évtizedeken át is elhúzódhat. [6]

3.2. A szennyeződések transzportfolyamatai

A szennyezőanyagoknak transzportfolyamatai szempontjából két alapvető folyamatot kell megvizsgálni: az advekciót és a hidrodinamikai diszperziót. Ezen folyamatok során

változhat az anyagkoncentráció térben és időben is. Fontos megemlíteni azt is, hogy ezek összessége szükséges a szennyezőnek ahhoz, hogy a talajban mozogni tudjon.

3.2.1. Szennyezések transzportfolyamatainak elemei

a) Advekción:

Az advekción, másnéven – a hőtanból átvéve – konvekcion az a folyamat, mely során a felszín alatti víz oldott anyagokat szállít magával a pórusokban. A transzport mértéke a felszín alatti víz átlagos lineáris sebességével jellemezhető.

$$v = \frac{q}{n}$$

ahol

- v : átlagos lineáris sebesség,
- q : áramlási intenzitás vagy fajlagos hozam,
- n : a porozitás. [4]

b) Diszperzió:

Ennek a transzport folyamatnak alapvetően két fajtáját tudjuk elkülöníteni: a hidrodinamikai és a mechanikai diszperziót.

A hidrodinamikai diszperzió az advekción miatti mechanikai keveredés és az oldat részecskéinek termális-kinetikai energiájából adódó molekuláris diffúzió eredményeként létrejövő fizikai folyamat. Ennek egy speciális esete az úgynevezett makrodiszperzió, amely során úgy jön létre a szennyezőanyag szóródása, hogy eltérő vízföldtani tulajdonságokkal rendelkező földtani képződményekben egymástól eltérő áramlási sebességek alakulnak ki. Mind a kettő arányos a pórusokra jellemző átlagos szivárgási sebességgel, azaz ha nagyobb a póruson belüli átlagsebesség, akkor a szennyezőanyag szóródása is nagyobb lesz [4].

Ezzel szemben a mechanikai diszperzió egy olyan folyamat, mely során az anyagban az áramlási sebesség nagysága és iránya lokális mikrováltozásokon megy keresztül a porózus közegben.

c) Adszorpció:

Adszorpciónak a szennyezőanyag porózus közeg felületén történő reverzibilis megkötődését nevezzük. Ez a folyamat a modellezett tér anyagmérlegében lehet nyelő (adszorpció), vagy a szennyező anyag oldatba jutásának forrása (deszorpció) attól függően, hogy milyen az uralkodó felületi kémiai folyamat. [4]

d) Bomlás:

Két fajta bomlást különböztetünk meg, a kémiai és a radioaktív bomlást. A bomlási folyamat során a szennyezőanyag koncentrációjának időbeli csökkenése megy végbe. [4]

e) Diffúzió:

A Fick I. és II. törvénye által leírt térbeli kémiai potenciál-különbségek hatására létrejövő tömegáramot diffúciónak nevezzük. Az elektromos potenciál, vagy a hőmérséklet különbségek okozta anyagmozgást kényszerdiffúciónak, míg a koncentráció különbségek miatt létrejövő diffúziót közönséges diffúciónak nevezzük.

Diffúzió során az anyagszemcsék véletlenszerű, szabálytalan mozgást végeznek, és így terjednek az adott közegben. Fontos szabályként kell megemlíteni, hogy az anyagáramlás a magasabb koncentrációjú hely felől a kisebb felé történik. [8]

Porózus közegben a diffúzióval szállított anyagáram három összetevője a következő formában írható fel:

$$\begin{aligned}F_{x,diff.} &= \frac{dM_{xz}}{dydzdt} = -D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x}, \\F_{y,diff.} &= \frac{dM_{y2}}{dxdzdt} = -D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y}, \\F_{z,diff.} &= \frac{dM_{z2}}{dxdydt} = -D_{eff} \frac{\partial C}{\partial z}\end{aligned}$$

Ahol:

(D_{eff}) – effektív diffúziós állandó, amely porózus közegben kisebb, mint vizes közegben (D_0). [4]

Számos empirikus összefüggést határoztak meg a vízben és a porózus közegben lévő diffúziós állandók között, amelyeket az alábbi táblázatban mutatok be.

2. táblázat: Az effektív-diffúziós állandó meghatározása [4]

<i>Az effektív diffúzió-állandó meghatározása néhány szerző szerint</i> SHACKELFORD és DANIEL (1991) nyomán	
Képlet	Szerző
$D_{\text{eff}} = D_0 / \tau$	GILLHAM et al.(1984), BARONE et. al.(1990)
$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \alpha / \tau$	LI és GREGORY (1974)
$D_{\text{eff}} = D_0 \Theta / \tau$	BERNER (1971), DREVER (1982)
$D_{\text{eff}} = D_0 \Theta \alpha \gamma / \tau$	KEMPER et al.(1964), OLSEN és KEMPER (1968), NYE (1979)
$D_{\text{eff}} = D_0 \gamma / \tau$	PORTER et al.(1960)
$D_{\text{eff}} = D_0 \Theta \alpha / \tau$	van SCHAIK és KEMPER (1966)
$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \frac{1}{\tau(1 + K_d)}$	FILEP (1988) FRIED és COMBARNOUS (1971) alapján
$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \frac{\Theta}{\tau^2} = D_0 \cdot \frac{1}{F}$	A tárolómérnöki gyakorlatban alkalmazott formula, ahol F a formációs ellenállási tényező

Az effektív diffúziós állandó egyenesen arányos a vizes közegben lévő diffúziós állandóval és fordítottan arányos a hajlítási sebességgel. Koncentrált oldatokban és viszkózus anyagokban az adszorpciós sebességet meghatározó negatív adszorpciós és viszkozitási együtthatók tovább csökkentik az effektív diffúziós állandót. A diffúziós állandó kiszámításának és a szükséges paraméterek meghatározásának nehézségei miatt az effektív diffúziós állandó meghatározása laboratóriumi kísérletekkel történik (2. táblázat).

Fick I. törvénye alapján a diffúzió során kialakuló anyagáramot a következőképpen írhatjuk fel [9]:

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

Ahol:

- $\Delta c/\Delta x$ – koncentrációváltozás egységnyi távolságra, amely megadja a diffúzió “erősségét” egy rendszeren belül.
- D – diffúziós együttható (egységnyi idő alatt egységnyi felületen átdiffundált anyag mennyisége, egységnyi koncentrációesés függvényében [m^2/sec]. Ez az együttható a diffundáló részecskék alakjának és méretének, valamint a közeg viszkozitásának és hőmérsékletének a függvénye.)

Fick I törvényével szemben, a II. Törvény már figyelembe veszi a koncentráció térbeli és időbeli változását is, amelyet a következő egyenlettel lehet felírni:

$$D\Delta t \frac{\Delta\left(\frac{\Delta c}{\Delta x}\right)}{\Delta x} + c(t) = c(t + \Delta t)$$

Ahogy látjuk, az összefüggés megmondja, hogy milyen lesz az új eloszlás egy későbbi $t+\Delta t$ időpontban, ha ismerjük a koncentráció térbeli eloszlását egy adott t időpontban. Ez az egyenlet általában nem megoldható. Néhány speciális esetben közelíthető, de leggyakrabban numerikus számítógépes módszereket használnak. [4]

4. Rediffúzió

Az alacsony áteresztőképességű zónákba diffundált felszín alatti vízszennyező anyagok elismerten hozzájárulnak a szennyezőanyag – folyadék fennmaradásához, amikor a koncentrációs gradiens megfordul és az oldott anyagok felszabadulnak. [10] Ez a folyamat lelassíthatja a víztisztítási erőfeszítéseket, mivel a szennyezés újra megjelenhet, még akkor is, ha a forrását már eltávolították. A folyamat mértékét leginkább két tulajdonság határozza meg: a vízzáró réteg környezetének földtani tulajdonságai (pl.: rétegvastagság vagy a különböző rétegek szorpciós tulajdonságai), valamint a szennyezőanyagok fizikai-kémiai tulajdonságaitól. Általában hosszan tartó, lassú folyamat, amely a szennyezés időbeni elhúzódásához vezethet (több évtized).[11] A folyamat jellemzéséhez általában a konvekció-

diffúzió egyenletet használják, amely egyesíti a diffúziót (szétterülés) és a konvekciót (áthelyezkedés).

Konvekció-diffúzió egyenlet (1D esetén):

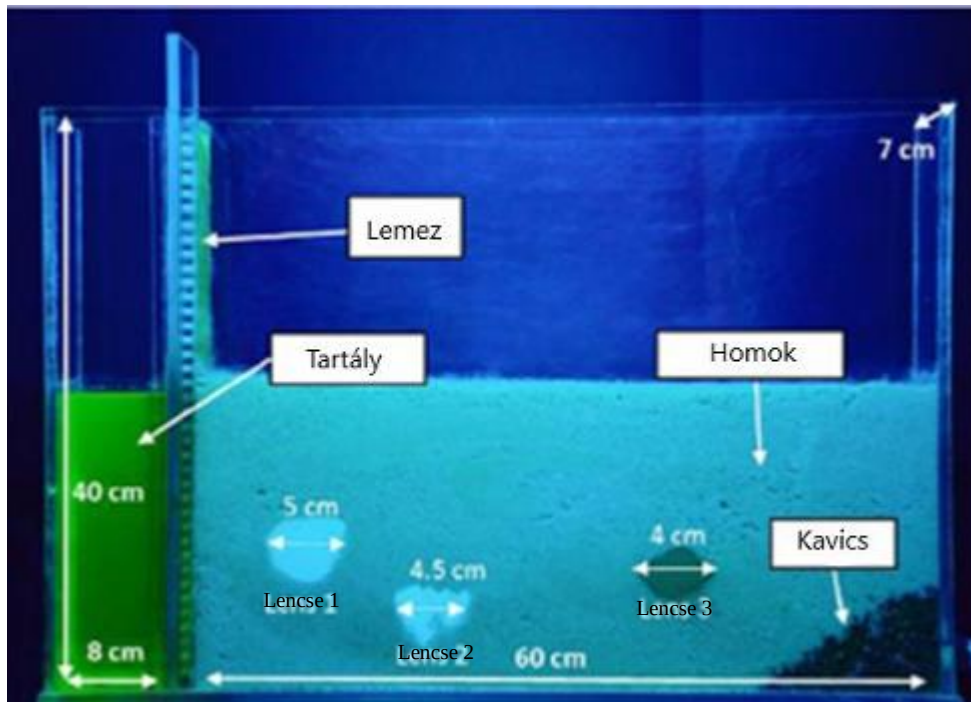
$$0 = \frac{\partial C}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(v_x * C)}_{\text{Konvekció}} - \underbrace{D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}_{\text{Diffúzió}}$$

ahol:

- v – felszín alatti víz sebessége (konvekciós hatás),
- D – diffúziós együttható,
- C – szennyezőanyag koncentrációja.

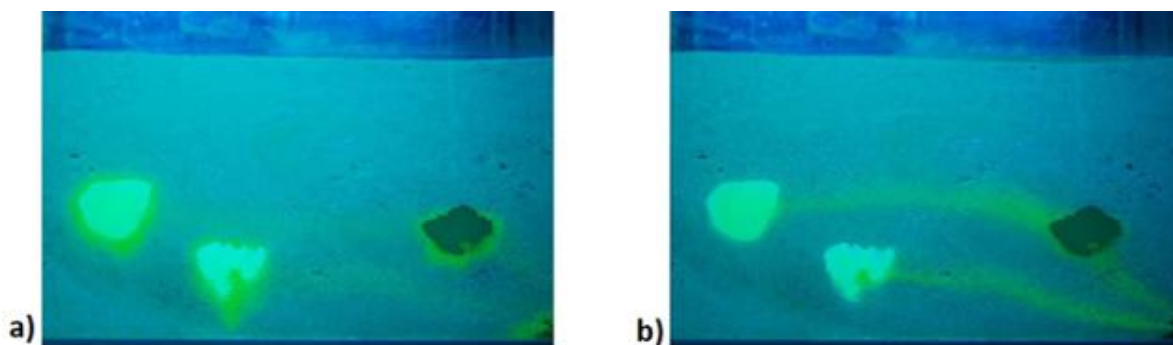
Ez az egyenlet figyelembe veszi a szennyezőanyag diffúzióját és a vízáramlásával való elmozdulását is. A rediffúzió során a szennyezőanyag ismét visszakerül a víz áramába, miközben a koncentrációgradiens a közeg és a víz között fennáll. Ez a képlet jól reprezentálja a folyamatot, ahol a diffúzió és a konvekció együttesen hatnak a szennyezőanyag eloszlására a felszín alatti közegekben. [12] [13]

A rediffúzió jelenségének vizsgálatáról több tanulmányt is készítettek, ilyen volt Tatti és társainak a 2017-es laboratóriumi mérésorozata, mely során a talajvíz és a rediffúziós folyamatok közötti kapcsolatot vizsgálták. A folyamatokat egy műanyag tartályban végezték el, de a felszerelés része volt még két perisztaltikus pumpa, egy UV lámpa, és egy úgynevezett 3CCD kamera is. A tartályba magas permeabilitású rétegeket – jelen esetben homok és kavics – helyeztek el, amelyek közé alacsonyabb permeabilitású lencsákat – az első kettő anyaga kvarcliszt, a harmadiké nátrium-bentonit volt – raktak. A két perisztaltikus pumpa funkciójukat tekintve a talajban végbemenő talajvíz áramlási folyamatokat szimulálták. A nátrium-fluoresszcint, mint nyomjelző anyag használták, amely UV-fénnyel gerjesztve a koncentráció függvényében zöldtől narancssárgáig terjedő fényt bocsájtott ki (4. ábra). [14]



4. ábra: A vízádó réteg rekonstrukciója [14]

A vízádó elszennyezéséhez 2 g/l nátrium-fluoreszcencint fecskendeztek, majd amikor a tartály átlagkoncentrációja elérte ezt az értéket, három hétig „pihentették”, telített állapotban, a víz áramlása nélkül. Ez idő alatt a molekuláris diffúzió (azaz a koncentrációk kiegyenlítődése) hatására a fluoreszcencia a nagyobb áteresztőképességű rétegből (homok) a kisebb áteresztőképességű rétegbe, a lencsékbe került. Ez után az elsődleges szennyeződés eltávolítása következett, amely egy 10 napon át tartó vízüblítéssel történt. Ennek hatására a szennyezés koncentráció gradienseinek iránya megfordult és a szennyeződés a lencsékben volt megtalálható nagyobb koncentrációban. Erre ad magyarázatot a rediffúzió folyamata, hiszen a magas áteresztőképességű és permeabilitású homokos vízádó rétegből eltávolításra került a szennyezőanyag, viszont a kvarclisztes, nátrium-bentonitos lencséből a szennyeződés nem tűnt el ezzel a módszerrel (5. ábra).



5. ábra: Fluoreszcencia kioldódása (a: nyugalmi állapotban; b: víz áramoltatása közben) [14]

A rediffúziót nem csak laboratóriumi, hanem terepi viszonyok között is vizsgálták már, ilyen volt a Parker és Chapman által elvégzett 2005-ös mérésorozat is. A vizsgált terület DNAPL-el szennyezett ipari terület volt, ahol megfigyelhető volt, hogy a szennyeződés a porózus vízadótól egészen a vízzáróig is eljutott. A vizsgálat során tesztcellákat helyeztek el a talajba, amelyekből magmintákat vettek és elemezték azokat. A szennyezett területen található figyelőkutak adatait feldolgozták és a Therrien és Sudicky munkáján alapuló HydroGeoSphere – korábban FRAC3DVS – háromdimenziós végelelemes numerikus modellt használták a felszín alatt lezajló transzportfolyamatok modellezésére. Az eredményből azt a következtetést vonták le, hogy a szennyeződés felszín alatti mozgása a következő 5-10 évben lesz a legaktívabb, illetve hogy a terjedés alakja csóva-szerű. [16]

A rediffúziós folyamatok megismerése, értelmezése és modellezése fontos részei a kármentesítési eljárásoknak, de főképp a DNAPL-el szennyezett területek esetén, hiszen ez a típusú szennyeződés még napjainkban is megnehezíti a jól képzett szakemberek munkáját.

5. Matrix Diffusion Toolkit bemutatása és alkalmazhatósága

5.1. Szoftver bemutatása

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kap a szennyezett területek kármentesítése. A földtani közeg és a felszín alatti víz tisztítására széles körben elterjedt módszer az úgynevezett „Pump & Treat”, mely során termelőkutakat létesítenek és minimális üzemi depresszióval működtetve a felszín alatti szennyezett vizet kitermelik majd kezelik. A módszernek az egyik hátránya, hogy elsősorban csak a jó áteresztőképességű rétegekből távolítható el a szennyezőanyag jó hatásokkal. A kis áteresztő képességű rétegekben, főleg a hosszú ideje fennálló szennyeződések esetében a módszer alacsony hatásokkal működik. Az ilyen típusú szennyezett területek esetében ezért gyakorta fennálló probléma, hogy az aktív kármentesítési szakaszt követően, a kis áteresztő képességű rétegből, a koncentráció gradiens irányának megváltozásával a szennyeződés ismét megjelenik a megtisztított vízadó rétegben is. Ennek a rediffúziós folyamatnak köszönhetően, a területen újbóli kármentesítésre kényszerítve az illetékeseket.

A fent említett esetekben mégjobban felértékelődik, a felszín alatt lejátszódó transzportfolyamatok térbeli és időbeli végbemenetele. Az ilyen jellegű területek

szennyezőanyagterjedési mechanizmusainak modellezésére a Defense's Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) keretein belül hozták létre a Matrix Diffusion Toolkit nevű alkalmazást. [17]

A Mátrix Diffusion Toolkit egy olyan Microsoft Excel-en alapuló ingyenes szoftver, amely segítséget nyújt a vizsgálandó szennyezett felszín alatti terület rediffúziós hatásának a hatékony és eredményes becsléséhez. A szoftver segítségével azokat a folyamatokat vizsgálhatjuk, mely során a felszín alatti alacsony áteresztőképességű zónákba – például iszap- és agyagrétegek – diffundáló vegyületek idővel közvetett, alacsony szintű szennyezőforrásként szolgálhatnak a nagyobb áteresztő zónák számára. [18] [19]

A szoftver továbbá segítséget nyújt a kármentesítési célok rövidtávú megvalósíthatóságának meghatározásában. A program bármely olyan területen alkalmazható, ahol a felszín alatti közeget heterogenitás jellemzi, DNAPL szennyeződés van/volt jelen és/vagy ahol a forrászóna helyreállítása után tartós talajvíz-szennyezőanyag-koncentrációkat figyeltek meg.

A Matrix Diffusion Toolkit segítséget nyújt a szennyezett területek koncepcionális modelljeinek kidolgozásához, a helyszín jellemzésére irányuló erőfeszítések támogatásához, a helyreállítási tervek elkészítéséhez, valamint annak meghatározásához, hogy a rediffúzió befolyásolja-e a felszín alatti vizek helyreállítási terveit. A szoftver segítségével olyan modelleket is készíthetünk – kész modell esetén frissíthetjük őket – , amelyekkel meghatározhatjuk, hogy a kármentesítés céljából kialakított termelőkutak elegendőek-e a szennyeződés eltávolítására, vagy, hogy a kármentesítés végeztével van-e olyan erős rediffúziós hatás, hogy a szennyeződés koncentrációja ismét a célként kitűzött (D) kármentesítési határérték fölé nőjön. Ha ezek az információk rendelkezésünkre állnak még a kármentesítés végrehajtása előtt, úgy segítséget nyújthat a terület szennyezettségének eltávolításához szükséges legjobb módszer kiválasztásában, illetve hatékonyan és eredményesen kezelhetjük vele a rediffúziós hatások lehetséges problémáit. Továbbá az sem mellékes, hogy ezzel rövidíthetjük az akár több évtizedekig is eltartó kármentesítések időtartamát, amely a projektköltségek megtakarítását is eredményezhetik.

A Matrix Diffusion Toolkit segítségével a következő kérdésekre kereshetjük meg a választ:

- Ha helyreállítok egy transzmissziós zónát, de a helyreállítási technológiám nem távolítja el kellőképpen a szennyeződések az alacsony szivárgási tényezőjű zónákból, amelyek érintkeznek a nagy áteresztőképességű zónával, el tudom-e érni az előírt „D” kármentesítési határértéket?
- Milyen mennyiségben lehet jelen a szennyezőanyagom az alacsony szivárgási tényezőjű rétegekben?
- Ha egy áteresztő reaktív gátat telepítek, gondot fog okozni a „D” határérték elérése a gáttól lejjebb eső szakaszon?
- Ha az összes DNAPL-t eltávolítom, van-e esély arra, hogy még mindig a „D” határérték feletti értékem lesz?
- Mennyi ideig kell várnom arra, hogy a forrászóna elérje a „D” kármentesítési határértéket, miután az összes DNAPL eltűnt? [18]

A Microsoft Excel alapú program segítségével 2 féle modellt tudunk előállítani, amely segít számunkra megtalálni a válaszokat a fentebb említett kérdésekre:

1.) Square root (négyzetgyök) Modell:

Ez a modell tervezési szintű becsléseket ad a felszín alatti közeg szennyezőanyagtól történő mentesítésről [g/d] abban az esetben, ha a szennyezőanyag a kis áteresztőképességű rétegből (iszap vagy agyag) a nagy áteresztőképességű, advekciónal jellemezhető rétegbe (homok vagy kavics) diffundál. Becsülhetjük vele továbbá a szennyezőanyag fennmaradó koncentrációjának mennyiségét a szennyeződés forrásának eltávolítása után a nagy áteresztőképességű rétegben. [18]

2.) Dandy-Sale modell:

Ez a modell lehetővé teszi számunkra, hogy vizsgáljuk a...

- a szennyezőanyagok advekción és keresztirányú diffúzió útján történő mozgását az áteresztő rétegben, és
- a rediffúzió útján történő mozgását az alacsony áteresztőképességű zónában.

A következő táblázat segítségével eldönthetjük, hogy a kívánt eredmény tudatában melyik modellt válasszuk:

3. táblázat: Modell választás a Matrix Diffusion Toolkit rendszerében [18]

A megválaszolandó probléma	Melyik modell?	Eredmény
Tömegáramlási adatok a kis- és nagy áteresztőképességű zónák között [g/d] az idő függvényében (múlt és jövő).	Square Root / Dandy-Sale	Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében
Mekkora szennyezőanyag mennyiség lehet az érintett területen?	Square Root / Dandy-Sale	Alacsony áteresztőképességű rétegben lévő szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében
Ha egy áteresztő reaktív gátat telepítek, gondot fog okozni elérni a szabályokban meghatározott eredményeket?	Square Root / Dandy-Sale	Szennyezőanyag koncentrációja az idő függvényében; Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében
Ha eltávolítom az összes DNAPL szennyeződést a szennyezett rétegből, van rá esély, hogy marad még annyi szennyeződés, hogy mennyisége „D” határérték feletti? Mennyi ideig kellene még várnom arra, hogy a forrászóna is elérje a „D” határértéket, miután az összes DNAPL eltűnt?	Square Root (pontosabb) / Dandy-Sale	Szennyezőanyag koncentrációja az idő függvényében; Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében
Szeretném megtudni a koncentráció és a mélység kapcsolatát egy alacsony áteresztőképességű zónában.	Dandy-Sale	Szennyezőanyag koncentrációja a mélység függvényében; Szennyezőanyag koncentrációja vertikális irányban
Biztosra akarok menni, hogy a rediffúziós modell figyelembe veszi a szennyezőanyag-koncentrációkat diffúzió értékének számításakor, amikor a szennyezőanyag a magas áteresztőképességű zónákba diffundál az alacsony áteresztőképességű zónákból.	Dandy-Sale	Szennyezőanyag koncentrációja az idő függvényében; Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében
Számításba akarom venni a termelőkút elérési idejét a nagy áteresztőképességű rétegben, így tehát a lefelé haladó alacsony áteresztőképességű rétegek terhelési időszaka később kezdődik, mint a forrásközel alacsony-k zónák terhelési időszaka. (Ez fontosabb a hosszú tartózkodási idejű, > 20 év).	Dandy-Sale	Szennyezőanyag koncentrációja az idő függvényében; Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében

Természetesen, mint minden programnak, a Matrix Diffusion Toolkit-nek is megvannak a saját feltételezései és különböző korlátjai:

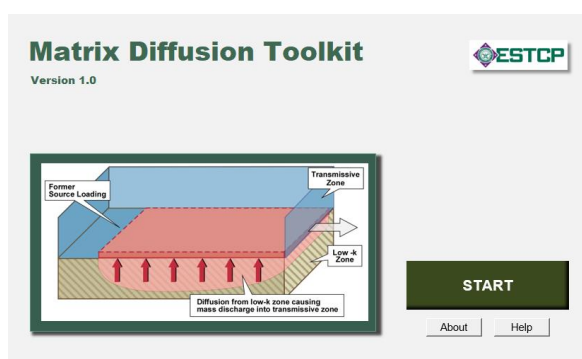
- Feltételezi, hogy a program használója ismeri a felszín alatti vízben és a földtani közegben lejátszódó folyamatokat;
- Egy egyszerűsített, kétrétegből álló rendszert használ (alacsony- és magas áteresztő képességű zónák), ahol két különböző időszakot különböztet meg a könnyebb használhatóság érdekében:
 - „Terhelési időszak”: A vízáadó rétegben és a „vízzáró” rétegben állandó a szennyezőanyag koncentrációja. Itt az áteresztő rétegből áramlik a szennyezőanyag az alacsony permeabilitású réteg felé.
 - „Oldódási időszak”: Feltételezzük, hogy a vízáadó réteg már mentesítve van a szennyezőanyagoktól és becsüljük az alacsony áteresztőképességű rétegekből történő szennyezőanyag kimosódásának mennyiségét.
- Feltételezi, hogy az alacsony áteresztőképességű réteg végtelenül vastag, amely a gyakorlatban azt jelenti, hogy ez a zóna legalább egy méter vastag, és a diffúziós folyamatok több évtizeden keresztül zajlanak. Természetesen vékonyabb zónákat is modellezhetünk, de ebben az esetben számolnunk kell azzal, hogy a számított értékek pontatlanabbak lehetnek;
- Nem számol az áteresztő zónákban lejátszódó biodegradációs folyamatokkal;
- A Squarerooot modell feltételezi, hogy az alacsony áteresztőképességű zónából történő rediffúzió során a koncentráció az vízáteresztő zónában nulla, illetve hogy a szennyezőanyag terjedési iránya horizontális (a Dandy-Shale modellel szemben, amely vertikális terjedési irányt feltételez);
- A koncentráció értékeket mindkét modell esetében a kilépő anyag mennyiségéből becsülték meg az alacsony áteresztőképességű zónán keresztül. A koncentrációkat 10 láb, azaz 3, 048 méter mélységig mérték.

Összegezve, a Matrix Diffusion Toolkit-et a következő információk meghatározására használhatjuk:

- Az alacsony áteresztőképességű rétegből kilépő anyagmennyisége [g/nap];

- A szennyezőanyag koncentrációjának meghatározása a monitoring kutakban (legfeljebb 10 láb mélységben, az áteresztő rétegben);
- A forrászónát elhagyó szennyező anyagok átlagos koncentrációja (feltételezve, hogy a modellezett alacsony áteresztőképességű zóna felett minimális a talajvízáramlás);
- Szennyezőanyag mennyisége az idő függvényében;
- Szennyezőanyag koncentrációja a hely és az idő függvényében, az áteresztő rétegben. [18]

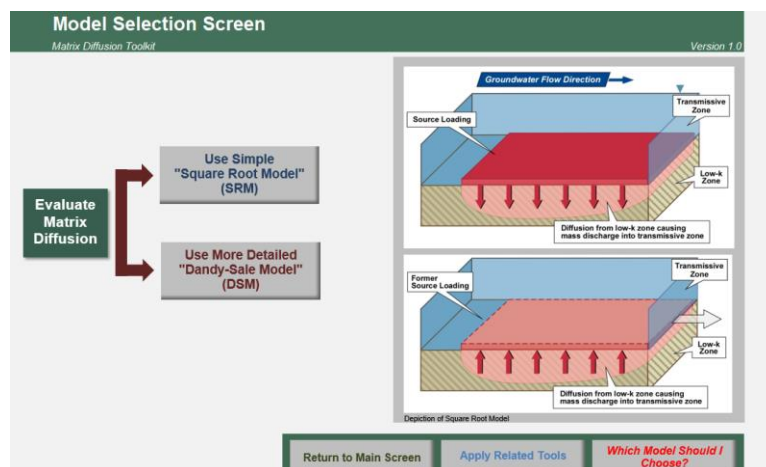
5.2. Szoftver kezelésének ismertetése



6. ábra: Matrix Diffusion Toolkit nyitókép

A Matrix Diffusion Toolkit megnyitásakor a 6. ábrán látható nyitóképernyőt látjuk. A bal oldalán található kép elmagyarázza nekünk, hogy melyik réteg/zóna hol található, amely segítséget nyújt a transzport folyamatok és a rétegrendeződések közötti kapcsolatok megértéséhez a szoftver rendszerében. A modell elindításához első lépésként meg kell nyomni a START gombot.

A program elindítása után ki kell választanunk, hogy melyik módszerrel szeretnénk dolgozni (7.ábra):



7. ábra: Modul választó felület

Ha nem vagyunk teljesen biztosak a modell választásban, a „Which Model Should I Choose?” gomb segítséget nyújt.

5.2.1. Squareroot modell:

Az eredetileg Dr. Beth Parker és John Cherry által elkészített és Dr. Tom Sale által módosított Squareroot modell (SRM) segítségével becsléseket készíthetünk a szennyező anyag kibocsátásáról [g/nap] az alacsony áteresztőképességű (iszap, agyag) rétegből (8. ábra). Ezen kívül megbecsülhető a szennyező anyag koncentrációja és mennyisége a víztartó rétegben (homok, kavics) a szennyező forrás eltávolítása után. A program alapbeállításokkal rendelkezik, a mellékelt kézikönyv tartalmazza a különböző típusú földtani közegek hidrogeológiai, transzport stb. tulajdonságait, jellemző értékeit (pl. porozitás, permeabilitás stb.). Természetesen az adatokat kézzel is megadhatjuk, hiszen a vizsgált terület jellemzői eltérhetnek a kézikönyvben szereplőktől. Ha a modell működését egy példán keresztül szeretnénk jobban megérteni, az Excel táblán belül, a beviteli képernyő jobb alsó részében található „Paste Example” gombbal megtehetjük. A példához használt információk a Chapman és Parker 2005-ös vizsgálatokból származnak.

SRM Data Input Screen
Matrix Diffusion Toolkit Version 1.0

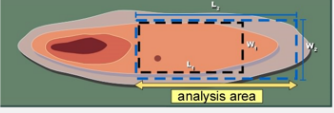
Site Location and ID:

1. SYSTEM UNITS
☒ SI Units ☐ English Units

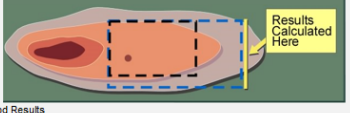
2. ANALYSIS TYPE
☐ Source Zone Analysis ☒ Plume Analysis ☐ PRB Analysis

3. HYDROGEOLOGY
 Low-k Zone Description:
 Low-k Zone Total Porosity: ϕ (-)
 Transmissive Zone Darcy Velocity: V_d (m/d)

4. TRANSPORT - Low-k Zone
 Key Constituent:
 Molecular Diffusion Coefficient in Free Water: D_o (m²/sec)
 Apparent Tortuosity Factor Exponent: p (-)
 Retardation Factor: R (-)

5. PLUME CHARACTERISTICS

 High Concentration Zone (Black Box in Picture):
 Approximate Length (Length of Black Box): L_1 (m)
 Approximate Width (Width of Black Box): W_1 (m)
 Highest Historical Concentration in Black Box: (ug/L)
 Concentration of Contour Line in Black Box: C_{st} (ug/L)
 Representative Concentration (OK to Override): (ug/L)
 Next Highest Concentration Zone (Blue Box in Picture):
 Approximate Length (Length of Blue Box): L_2 (m)
 Approximate Width (Width of Blue Box): W_2 (m)

5. PLUME CHARACTERISTICS CONT'D
 Concentration of Contour Line in Blue Box: (ug/L)
 Representative Concentration (OK to Override): C_{st} (ug/L)
 Uncertainty in Plume Concentration Estimations: $\pm$ factor of

6. GENERAL
 Source Loading Starts in Year: (format: yyyy)
 Source Removed in Year: (format: yyyy)

 See Release Period Results:
 from Year: (format: yyyy)
 to Year: (format: yyyy)
 in intervals of: (yrs)

7. FIELD DATA FOR COMPARISON

Year	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Concentration (ug/L)	3832	2371	3162	1957	1000	1488	908
Mass Discharge (g/day)							
Mass (kg)			3000				

Next Step: Show Graph

8. ábra: SRM adatbeviteli felülete

Az adatbevitel első lépéseként meg kell adnunk neki, hogy SI (méter, stb.), vagy Angol (láb, stb.) mértékegységben számoljon.

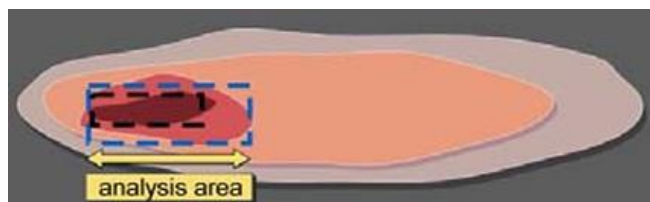
Második lépésben az analízis típusát kell megadni a modell számára, amelyet három különböző módszer közül kell kiválasztani (2. ábra):

2. ANALYSIS TYPE

☐ Source Zone Analysis
 ☒ Plume Analysis
 ☐ PRB Analysis

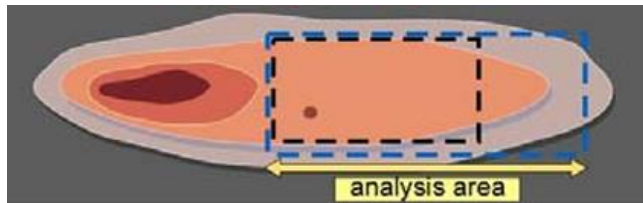
9. ábra: Analízis típusa

- Forrás zóna analízis (10. ábra):
 - Ezzel a típussal meg tudjuk vizsgálni a rediffúziós hatásokat a forrászónában.



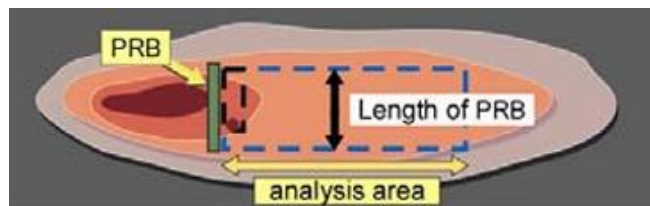
10. ábra: Forrás zóna analízis

- Kút analízis (11. ábra):
 - A rediffúzió hatásait a forrásponton kívül és a kútban vizsgálhatjuk.



11. ábra: Kút analízis

- PRB analízis (12. ábra):
 - A reaktív gát (PRB – permeable reactive barrier) utáni területen lejátszódó rediffúziós folyamatok vizsgálatát tudjuk elkészíteni.



12. ábra: Reaktív gát analízis

Következőként meg kell állapítani a transzport folyamatban résztvevő rétegek hidrogeológiai tulajdonságait (13. ábra), amelyhez – ha nincs a vizsgált területről megfelelő információnk – segítséget nyújt a már fentebb is említett kézikönyv.

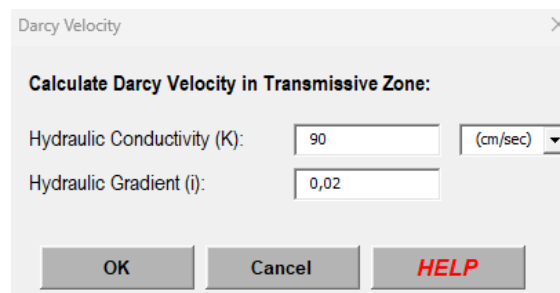
3. HYDROGEOLOGY			
Low-k Zone Description		User Input	
Low-k Zone Total Porosity	Φ	(-)	
Transmissive Zone Darcy Velocity	V_d	0,13 (m/d)	Calculate Vd ?

13. ábra: Hidrogeológia paraméterek beviteli pontja

- Alacsony áteresztőképességű réteg típusa:
 - A modell több talajtípust is felajánl a számunkra, amelyek közül választhatunk, de a „User Input” segítségével akár saját talajtípust is megadhatunk. Az SRM-ben megtalálható talajtípusok a következők: iszap, agyag, homokkő/palakő, törmelékes homokkő, gránit.
- Alacsony áteresztőképességű réteg teljes porozitása:
 - Miután megadtuk, hogy milyen rétegben vagyunk, az SR modell megad számunkra egy általános értéket a porozitásra, de saját értéket is adhatunk meg neki. Amit fontos tudni az érték megadásakor, hogy ebben az esetben a teljes porozitás az összes repedezés (beleértve a nem összefüggő repedéseket is) és a víztartó réteg térfogatának arányát

jelenti, és az effektív porozitás és a másodlagos porozításra vonatkozó információkat tartalmazó porozitási adatok nem használhatók.

- Dimenzió nélküli érték.
- A felszín alatti víz szivárgási-sebessége (V_d):
 - A Darcy-törvény által számított érték.
 - Ahhoz, hogy jellemezni tudjuk a szennyezőanyag koncentrációkat egy 3,048 méter mélységű kútban a vízáteresztő rétegben, reprezentatív mérési eredményekre van szükség, vagy tudnunk kell a hidraulikus gradiensét és szivárgási tényezőjét a rétegnek (amelyet a következő lépésben szintén meg lehet változtatni).
 - Természetesen a modell itt is felajánl egy általános szivárgási sebességet a réteg típusa alapján.
 - Mértékegysége lehet (SI rendszert alkalmazva): m/nap, cm/sec, m/yr.
- Szivárgási tényező (K):
 - A „calculate V_d ” gomb megnyomásával lehetőségünk van megadni az általunk mért szivárgási tényező értékét, de a réteg típusából erre is ad egy általános értéket.
 - Mértékegysége: cm/sec, m/nap, m/yr.
- Hidraulikus gradiens (i):
 - A „calculate V_d ” gomb megnyomásával meg tudjuk adni a rétegünk hidraulikus gradiens értékét.
 - Mértékegysége: m/m



14. ábra: Darcy együttható paramétereinek beviteli felülete

A negyedik lépésben a vízáadó réteg transzportfolyamatainak jellemzőit adhatjuk meg a modellnek (15. ábra), 8 paraméteren keresztül, amelyeket a következő sorokban ismertettek.

4. TRANSPORT - Low-k Zone

Key Constituent		TCE	TCE
Molecular Diffusion Coefficient in Free Water	D_o	9,10E-10	(m ² /sec)
Apparent Tortuosity Factor Exponent	p	1,33E+00	(-)
Retardation Factor	R	1,20	(-)

Calculate R ?

15. ábra: Transzportfolyamatok megadandó paraméterei

- Szennyezőanyag:
 - Elsőként a számunkra fontos szennyezőanyagot adhatjuk meg, amelyhez a modell újabb lehetséges 14 fajta szennyezőanyagot sorol fel, köztük a benzolt, etil-benzolt és a vinil-kloridot is.
- Diffúziós együttható a szabadon áramló vízben (D_o):
 - Ez egy arányossági tényező, amely az egységnyi idő alatt egységnyi koncentrációs gradiensén keresztül, egységnyi területen át diffundáló szennyezőanyag mennyiségét fejezi ki.
 - A modell a beállított szennyezőanyag típusához mérten felajánl számunkra különböző értékeket, de természetesen, ha van saját, mért értékünk, megadhatjuk neki azt, cm²/sec vagy m²/sec mértékegységben is.
 - A diffúziós együttható értékei a Pankow és Cherry, 1996 (Oldószerek), és Wiedemeier et al., 1999 (Különböző összetevők) referencia könyveiből származnak.
- Látszólagos tortuozitási tényező exponense (p):
 - A látszólagos tortuozitási tényező (τ) a diffúziós együtthatónak (D_o) és az effektív diffúziós együtthatónak (D_e) a viszonyát jelenti, vagyis:

$$\frac{D_e}{D_o} = \tau \cong \Phi^p$$
 - Ahol Φ a porozitás és a p a látszólagos tortuozitási tényező exponense
 - A τ értéke 0 és 1 között mozoghat.
 - A p – amely egy dimenzió nélküli szám – értéke a geológiai közegtől függően 0,3 és 5,4 közé esik (például a legmagasabb érték az agyagé, amely 1,33; míg legkisebb az iszapé 0,33).
- Retardációs/késleltetési tényező (16. ábra):
 - Ez a tényező egy mértékegység nélküli érték, amely az oldott és szorbált alkotóelemek tömegének és a vizes fázisban lévő oldott alkotóelemek tömegének aránya a víztartó réteg egy egységnyi

térfogatában, vagyis a víztartó réteg és az alkotóelemek tulajdonságainak a függvénye.

- Ez az érték általában réteg- és kémiai adatokból becsülhető a következő kifejezéssel [20]:

$$R = 1 + K_d \cdot \frac{\rho_d}{n}$$

- Ahol:
 - $K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$
 - ρ_d = térfogatsűrűség
 - n = porozitás
 - K_{oc} = szerves szén-víz megoszlási együttható
 - K_d = szervesz szén megoszlási hányados
 - f_{oc} = szerves széntartalom
- Ha saját értéket szeretnénk neki megadni azt a „Calculate R” gomb megnyomásával lehetséges, amelyhez meg kell adni a vízáradó réteg térfogatsűrűségét (g/mL), illetve a szerves széntartalmát (g/g) vagy a szerves szén-víz megoszlási együttható (mL/g) értékét. A szoftverhez tartozó kézikönyv tartalmazza ezen adatokhoz tartozó általános értékeket különböző talaj és szennyezőanyag típusokra vonatkoztatva.

Calculate Retardation Factor

Enter Parameters to Calculate Retardation Factor:

Soil Bulk Density of Low-k Zone (ρ_b) (g/mL)

AND

Distribution Coefficient (K_d): (mL/g)

or

Fraction of Organic Carbon (f_{oc}): (-)

Organic Carbon Partitioning Coefficient (K_{oc}): (L/kg)

OK Cancel HELP

16. ábra: Retardációs faktor számításához szükséges paraméterek

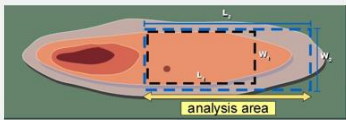
A következő lépés a kút karakterisztika, amely az SRM típusú modellezés egyik legfontosabb pontja. Ennek oka, hogy nem szükséges a szennyezőcsóva vagy a kút teljes területét modellezni, hanem elég csak azokat a pontokat/részeket modellezni, ahol a legmagasabb szennyezőanyag koncentráció érték lett mérve a szennyezőanyag megjelenése óta. A területet érő rediffúziós hatás 90%-át megismerhetjük abban az esetben, ha a mért, és a koncentrációs térképről leolvasott két legnagyobb koncentrációjú kontúrvonalon belüli

területet modellezzük (amint azt a fentebbi ábrákon a kék és fekete dobozok mutatták). Ehhez a lépéshez két módszer áll rendelkezésre:

- Standard módszer (gyakorlottsabb felhasználóknak ajánlott): Meg kell határozni a modellezni kívánt területet, majd megadni a hosszúságot, a szélességet és a reprezentatív mért szennyezőanyag koncentrációt. Ez a modell lehetővé teszi a vizsgált terület két különböző részére vonatkozó adatok megadását (azaz két hosszúság, két szélesség és két reprezentatív szennyezőanyag koncentráció).
- Kontúrtérkép módszer: A kontúrtérkép hosszát, szélességét és a mért legnagyobb szennyezőanyag koncentrációját szükséges megadni a modellnek. Ez azt is jelenti, hogy ha a szennyezőanyag koncentrációja az 1990-es években volt a legmagasabb, akkor az akkoriban készített kontúrtérképet érdemes használni, nem pedig a legújabbat. [18]

Ahogy az 17. ábrán is láthatjuk, ebben a lépésben az utolsó érték, amelyet meg kell adnunk, a rendszernek a becslés bizonytalansága. Ez azt jelenti, hogy a felhasználóknak reális becslést kell készítenie arról, hogy mekkora bizonytalanság társul a modellezett koncentrációbecsléshez. Ennek a paraméternek (és bizonyos mértékig a szoftvernek) az a lényege, hogy figyelembe veszi azt, hogy minden koncentráció-becslés nagyfokú bizonytalansággal jár. Általában a ± 10 -es tényező értékét használják. Megjegyzendő, hogy ha 1-es értéket használunk, akkor csak a „legvalószínűbb” becslési vonal jelenik meg majd későbbiekben a grafikonokon.

5. PLUME CHARACTERISTICS



High Concentration Zone (Black Box in Picture)

Approximate Length (Length of Black Box) L_1 (m)

Approximate Width (Width of Black Box) W_1 (m)

Highest Historical Concentration in Black Box (ug/L)

Concentration of Contour Line in Black Box (ug/L)

Representative Concentration (OK to Override) C_{s1} (ug/L)

Next Highest Concentration Zone (Blue Box in Picture)

Approximate Length (Length of Blue Box) L_2 (m)

Approximate Width (Width of Blue Box) W_2 (m)

5. PLUME CHARACTERISTICS CONT'D

Concentration of Contour Line in Blue Box (ug/L)

Representative Concentration (OK to Override) C_{s2} (ug/L)

Uncertainty in Plume Concentration Estimations $\pm$ factor of

17. ábra: Kút karakterisztika paraméterek

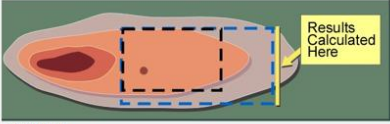
Ha az előző 5 lépés paramétereit megadtuk a szoftvernek, elérkezünk a modell azon részéhez, ahol a szennyezett területtel kapcsolatos legfontosabb időpontokat szükséges megadnunk (18. ábra):

- A szennyezőanyag megjelenésének éve a vizsgált területen
- A szennyezőanyag eltávolításának éve
- A rediffúziós hatás megjelenésének éve
- A rediffúziós hatás eltűnésének éve
- A rediffúziós hatás időintervalluma

6. GENERAL

Source Loading Starts in Year (format: yyyy)

Source Removed in Year (format: yyyy)



See Release Period Results

from Year (format: yyyy)

to Year (format: yyyy)

in Intervals of (yrs)

18. ábra: Általános adatok

Ezen a felületen az utolsó, hetedik lépés az összehasonlítás, amelyben a szoftver összeveti a terepi adatokat a modellben megadott adatokkal (19. ábra). Ehhez kötelezően meg kell adnunk számára azokat az éveket, amelyekről rendelkezésünkre állnak terepi adatok, majd az időponthoz tartozó transzmissziós zónában mért legnagyobb szennyezőanyag koncentráció értékeit [ug/L, mg/L]. Ha van további információnk erről a zónáról (hány kg a tömege és mennyi szennyezőanyag halad át rajta naponta), van lehetőségünk beírni, de a szoftver ezek nélkül is reális grafikont készít a számunkra.

7. FIELD DATA FOR COMPARISON

Year	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
Concentration (ug/L)	3832	2371	3162	1957	1000	1468	908	
Mass Discharge (g/day)								
Mass (kg)			3000					

19. ábra: Terepi adatok összehasonlításhoz

5.2.2. Dandy-Scale modell:

Egy 2003-as AFCEE projekt keretében Dr. David Dandy a Colorado Állami Egyetemen pontos analitikus megoldást dolgozott ki a rediffúzió megismerésére egy kétrétegű rendszerben. A Dandy-Sale modell egy kifinomultabb verziója az SR modellnek, és további bemeneti adatokat igényel. Ami viszont változatlan, hogy ugyanazon az

elgondoláson alapszik, vagyis egy két rétegű rendszeren keresztül vizsgálja a szennyezett területet, két időintervallumban (szennyezőanyag jelenlétekor és a mentesítés után) (20. ábra). [18]

DSM Data Input Screen
Matrix Diffusion Toolkit Version 1.0

Site Location and ID: Industrial Site

1. SYSTEM UNITS
☒ SI Units ☐ English Units

2. HYDROGEOLOGY
 Transmissive Zone Description: Sand
 Transmissive Zone Effective Porosity: $n_s = 0.35$
 Low-k Zone Description: Silt
 Low-k Zone Total Porosity: $n' = 0.43$
 Transmissive Zone Seepage Velocity: $V = 3.70E-01$ (m/d) **Calculate V**

3. TRANSPORT
 Key Constituent: TCE
 Plume Loading Concentration Immediately Above Low-k Zone in Vertical Plane Source During Loading Period: $C_2 = 1100$ (mg/L)
 Molecular Diffusion Coefficient in Free Water: $D_2 = 9.10E-10$ (m²/sec)
 Transmissive Zone Apparent Tortuosity Factor Exponent: $\rho = 0.33$
 Low-k Zone Apparent Tortuosity Factor Exponent: $\rho' = 0.33$
 Bulk Density of Transmissive Zone: $\rho_s = 1.70$ (g/mL)
 Bulk Density of Low-k Zone: $\rho'_s = 1.50$ (g/mL)
 Distribution Coefficient: K_d
 Transmissive Zone Fraction of Organic Carbon: $f_{oc} = 3.80E-04$
 Low-k Zone Fraction of Organic Carbon: $f'_{oc} = 5.40E-04$
 Organic Carbon Partitioning Coefficient: $K_{oc} = 9.33E+01$ (L/kg)
 Calculated R: 1.17

4. SOURCE ZONE CHARACTERISTICS
 Source Zone Length: $L = 32.1$ (m)
 Source Zone Width: $W = 39.3$ (m)
 Transverse (Vertical) Hydrodynamic Dispersivity: $\alpha = 1.00E-03$ (m)
 Source Loading Starts in Year: 1952 (format: yyyy)
 Source Removed in Year: 1978 (format: yyyy)

5. GENERAL
 See Release Period Results for:
 Year: 2000 (format: yyyy)
 Lateral Distance from Source: $x = 280$ (m)
 Depth into Low-k Zone: $z = 3$ (m)

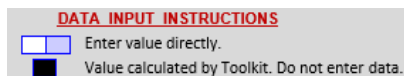
Buttons: Next Step: Show Graph, New Site/Clear Data, Paste Example, Save Data, Load Data, Show Previous Results, Return to Model Selection Screen, Return to Main Screen, HELP

20. ábra: DSM beviteli felülete

Az első lépés teljesen megegyezik az SR modell első lépésével. A hidrogeológiai adatok megadása annyival egészült ki az SRM-hez képest, hogy nem csak az alacsony, hanem a magas áteresztőképességű réteg típusára (kavics, homok, durva-, közepes és finom homok, de saját talaj típust is lehet megadni) és porozítására is kíváncsi, illetve e réteg szivárgási-sebességét számolja (V).

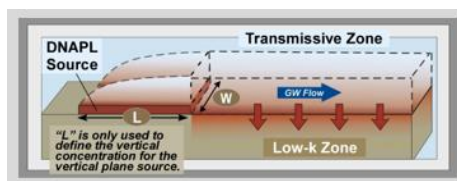
A harmadik lépés a transzport folyamatokkal foglalkozik. A szennyezőanyag megadása után, közvetlenül az alacsony áteresztőképességű zóna feletti szennyezőanyag koncentráció értékét szükséges megadni a modellnek, mely érték 0,0001 – 20,000 mg/L közé esik. Ezt az értéket minden esetben a felhasználónak kell megadnia. Ezeken kívül mind a magas, mind az alacsony áteresztőképességű rétegre vonatkozóan meg kell határozni a tortuozitási tényezőt és a térfogatsűrűséget. Az SR modellhez hasonlóan a szoftvernek szüksége van a szabadon áramló víz szivárgási-együtthatójára is. Ahhoz, hogy a retardációs tényezőt (R) a módszer meg tudja határozni, az SR modellel szemben biztosan szüksége van a következő adatokra (az alap egyenlet a tényező számolásának mind a két modellezési módszer esetében ugyan az): szerves szén-víz megoszlási együttható (K_{oc}) szerves szén megoszlási hányados (K_d), illetve a szerves széntartalom a magas (f_{oc}) és alacsony (f'_{oc}) áteresztőképességű rétegben. Ahogyan azt az instrukció is jelzi (21.ábra), a fekete négyzet

értékét semmi esetre sem szabad megváltoztatni, mert az a szoftver magának számolja. Ebben a módszerben ez az R értéke.



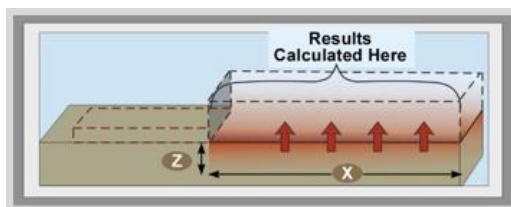
21. ábra: Beviteli útmutató

A negyedik lépés pontos megértéséhez a modell segítséget nyújt a felhasználó számára egy ábrával (22. ábra), amelyen keresztül szemlélteti, hogy melyik érték melyik hosszt jelent pontosan. Amely értékek elengedhetetlenek a modell számára, a következők: Szennyezőforrás hossza (L), szélessége (W); Szennyeződés kezdete és mentesítésének vége; Vertikális irányú hidrodinamikai diszperzivitás.



22. ábra: Csóva mérete

Az utolsó lépésként az általános adatokat kell megadni a modellnek, amelyhez újabb ábra tartozik (23. ábra).



23. ábra: Vizsgált terület mérete

Meg kell adnunk a modellnek a szennyezőforrás hosszát (x), az alacsony áteresztőképességű réteg vastagságát (z) és azt az időpontot, amikor vizsgálni szeretnénk a szennyezőanyag jelenlétét a rétegekben.

6. Modellezési eredmények

A rediffúzió jelenségének idő- és térbeli vizsgálata céljából egy fiktív terület szennyeződés transzportfolyamatait modelleztem a Dandy-Scale féle modul segítségével. A modellfuttatások eredményeinek elemzéskor a célom, az volt, hogy különböző áteresztő képességű földtani közegek esetében vizsgáljam a rediffúzió intenzitását térben és időben.

A modell futtatások során a 4. és 5. táblázatban szereplő paramétereket alkalmaztam. Ezek közül volt, amit minden egyes futtatás során állandónak tekintettem, illetve olyanok amelyeket folyamatosan változtattam.

4. táblázat: Állandó paraméterek

Állandó paraméterek		
Szennyezőanyag	típusa	TCE (triklór-etilén)
Molekuláris diffúziós együttható	D_0	$9,10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$
Vízadó réteg tortuozitási tényezője	p	0,33
Vízadó réteg térfogatsűrűsége	ρ_b	1,7 g/mL
Vízzáró réteg térfogatsűrűsége	ρ'_b	1,5 g/mL
Forrásterület hossza	L	50m
Forrásterület szélessége	W	50m
Szennyeződés megjelenésének ideje	év	1950
Terület mentesítésének vége	év	2000
Forrástól mért távolság	x	1000m
Vízzáró réteg vastagsága	z	0,10m
Szennyezőanyag mennyisége	C_0	3000 $\mu\text{g/L}$
Hidraulikus gradiens	i	0,005

5. táblázat: Változó paraméterek

Változó paraméterek		
Vízadó réteg	típusa	finom homok
		homok
		kavics
Vízadó réteg porozitása	n_e	0,20 (finom homok)
		0,25 (homok)
		0,23 (kavics)
Vízzáró réteg	típusa	agyag
		iszap
Vízadó réteg porozitása	n'	0,47 (agyag)
		0,48 (iszap)
Szivárgási tényező [K]	kavics	16 m/d
	homok	8 m/d
	finom homok	4 m/d
Vizsgált időpont	év	2010
		2100

A szimulációk során a fiktív szennyezett terület 50 méter hosszú (L) és 50 méter (W) szélességűnek vettem, amely trikóretilénnel (TCE) szennyezett. Kiindulási szennyezőanyag koncentrációnak $3000 \mu\text{g/L}$ (C_0) adtam meg (a hatályban lévő 6/2009. (IV.14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendeletben foglalt felszín alatti vizekre előírt (B) szennyezettségi ($30 \mu\text{g/l}$) határérték százszorosa). A modell futatások során a forrásterülettől (x) 1000 méteres távolságig vizsgáltam a szennyezőanyag koncentráció változásokat a területre megadott 0,005 hidraulikus gradiens érték mellett. A szennyezettség fennállását 50 évre állítottam be minden egyes scenárió esetében.

A modellező szoftver kétrétegű rendszerben képes vizsgálni a szennyezőanyag transzport folyamatait. Én a vízáadó rétegek esetében finom homokot, homokot és a kavicsot állítottam be, vízzáró réteggként pedig agyagot és iszapot adtam meg. A különböző vízáadók és vízzárók kombinációjával összesen 6 db különböző rétegsort állítottam össze (finom homok-iszap; finom homok-agyag; homok-iszap; homok-agyag; kavics-iszap; kavics-agyag). A rétegekre jellemző porozitás és szivárgási tényező értékeket az 5. táblázat tartalmazza.

A forrásterülettől számított 1000m-es távolságig a szennyezőanyag koncentráció alakulását a vízáadó és vízzáró rétegben két különböző időpontban vizsgálatam. Első körben a szennyező forrás felszámolását követő 10. évben, majd 100. évben. Így összesen 12 modell futtatást végeztem. A Dandy-Scale féle modul lehetőséget biztosít a vízzáró réteg különböző mélységeiben a szennyezőanyag koncentrációk alakulásának megadásában, de én a futtatások során a réteghatárok közötti átmenetre voltam kíváncsi, így 10 cm-es mélységben vizsgáltam a vízrekesztő réteget.

A modell futtatásokat követően kigyűjtöttem és ábrázoltam, minden rétegpár esetében a szennyezőanyag koncentráció változását a forrásterülettől számított 1000 m-es távolságig, 100 méteres osztásközönként. Ezt a folyamatot elvégeztem mind a vízzáró, mind a vízáadó rétegekre egyaránt, a forrásterület felszámolását követő 10 és 100 év elteltével. A kapott eredményeket az alábbiakban mutatom be.

A 6. és 7. táblázatban a vízzáró réteg 0,1m-es mélyégében a szennyezőanyag koncentrációk alakulása látható ($\mu\text{g/l}$) a forrásterület felszámolását követő 10. és 100. évben, különböző réteg kombinációk esetében.

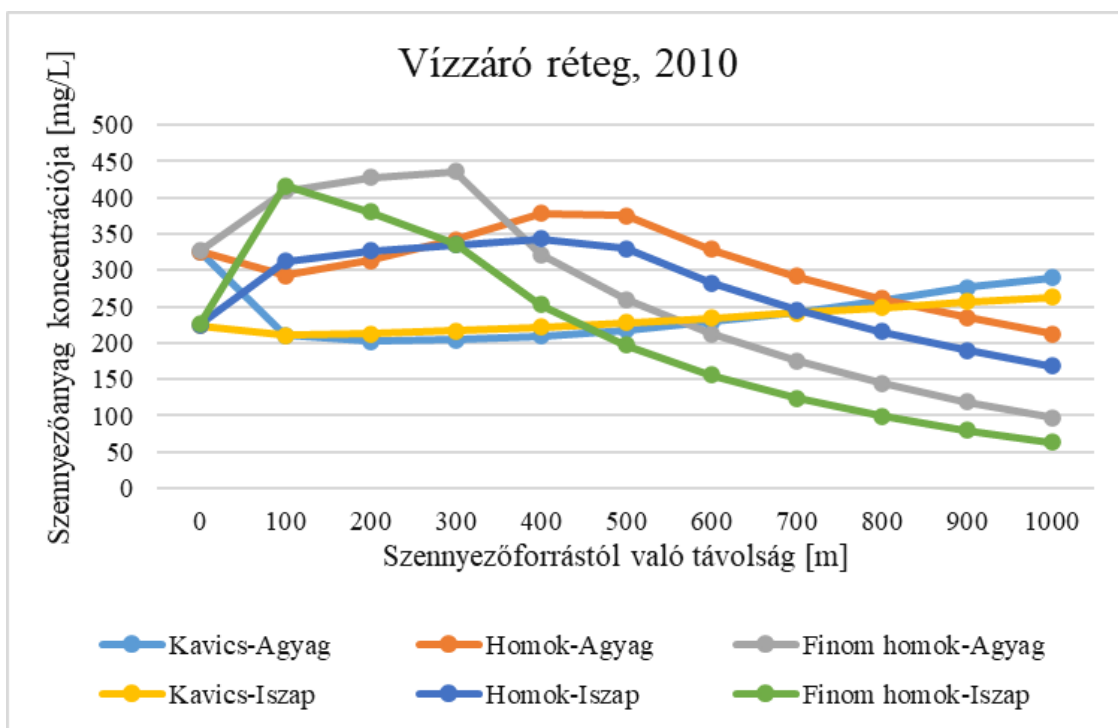
6. táblázat: Vízáró rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2010)

Réteg	Vízáró réteg					
Időpont	2010					
Forrástól mért távolság [m]	Kavics-Agyag	Homok-Agyag	Finom homok-Agyag	Kavics-Iszap	Homok-Iszap	Finom homok-Iszap
0	325,41	325,89	326,84	224,19	224,94	226,38
100	210,1	293,28	409,33	210,01	312,39	416,14
200	202,53	313,03	428,02	212,73	326,31	380,57
300	203,87	341,98	435,98	217,07	335,21	335,76
400	209,38	378,26	321,37	222,27	343,28	253,07
500	217,81	375,1	259,69	228,1	329,499	196,59
600	228,82	328,99	212,78	234,49	282,89	155,47
700	242,4	292	175,5	241,38	245,94	124,2
800	258,59	261,32	144,9	248,74	215,7	99,66
900	276,73	235,23	119,18	256,36	190,36	79,92
1000	290,02	212,59	97,13	262,67	168,73	63,73

7. táblázat: Vízáró rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2100)

Réteg	Vízáró réteg					
Időpont	2100					
Forrástól mért távolság [m]	Kavics-Agyag	Homok-Agyag	Finom homok-Agyag	Kavics-Iszap	Homok-Iszap	Finom homok-Iszap
0	32,3	32,35	32,45	22,11	22,1	22,33
100	20,16	27,39	40,69	20,39	18,75	49,14
200	18,61	26,99	41,84	20,19	18,35	50,72
300	17,86	26,95	42,46	20,12	18,19	50,45
400	17,43	27,06	42,88	20,1	18,11	49,55
500	17,15	27,24	43,21	20,11	18,07	48,38
600	16,97	27,48	43,47	20,12	18,07	47,11
700	16,86	27,75	43,7	20,16	18,08	45,79
800	16,78	28,05	43,9	20,2	18,11	44,62
900	16,74	28,38	44,09	20,25	18,15	43,2
1000	16,72	28,73	44,26	20,3	18,2	41,96

A vízáró rétegben kapott koncentráció értékek alakulását a forrásterület felszámolását követő 10. és 100. évben a jobb szemléltetés érdekében a 24. és a 25. ábrán mutatom be.

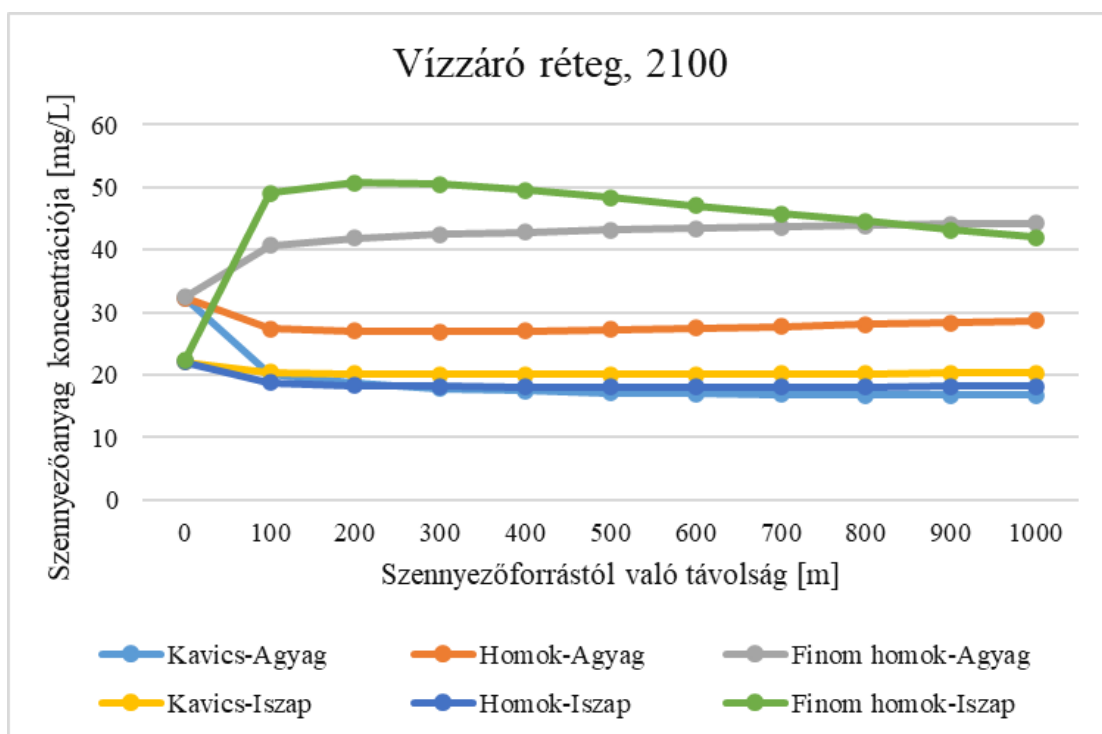


24. ábra: A vízáró rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2010-ben

A grafikus ábrázolásnál jól látható, hogy a forrásterület felszámolását követő 10. évben még minden rétegekombináció esetében, a vízáró rétegben a TCE koncentrációja meghaladja a B szennyezettségi (30 µg/l) határértéket. Legmagasabb koncentráció értékek a forrásterülettől számított 100 m és 500 m közötti távolságokban jelennek meg.

Az is szembevetendő, hogy 10 év elteltével azon rétegpárok esetében, ahol a vízvezető réteg szivárgási tényezője alacsonyabb, a vízáró rétegben a szennyezőanyag koncentrációk jóval magasabb értékűként jelentkeznek. Továbbá az is látható, hogy a szennyező csóva előrehaladása jóval kisebb ezen scenáriók esetében, így a forrásától számított nagyobb távolságokban viszont a vízáró rétegben a szennyező mennyisége jóval kisebb.

A 25. ábrán a szennyező forrás felszámolását követő 100. évben a vízáró rétegben kialakult koncentráció értékeket szemléltetem. Itt már jól érzékelhető koncentráció csökkenés figyelhető meg a kis transzmisszivitású rétegben. Két esetben (finom homok-agyag, finom homok-iszap) viszont még mindig a (B) szennyezettségi határértéket meghaladó koncentrációk vannak jelen a forrástól számított 1000 m-es távolságig, minden vizsgált pontban. A jelentős szennyezőanyag koncentráció csökkenés a vízáró rétegben, a rediffúziós folyamat következtében alakult ki, de jól látható, hogy akár egyes esetekben még 100 éves időtávlatban is határérték túllépést eredményezhet.



25. ábra: A vízzáró rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2100-ban

Annak érdekében, hogy a vízzáró rétegben kialakuló szennyezőanyag koncentrációk alakulását még jobban megértsük, a modell futtatások során a vízáadó rétegben kialakuló koncentráció viszonyokat is figyelembe kell venni.

A 8. és 9. táblázatba gyűjtöttem ki a vízáadó rétegben a szennyezőanyag koncentráció alakulását ($\mu\text{g/l}$) a forrásterület felszámolását követő 10. és 100. évben, különböző réteg kombinációk esetében.

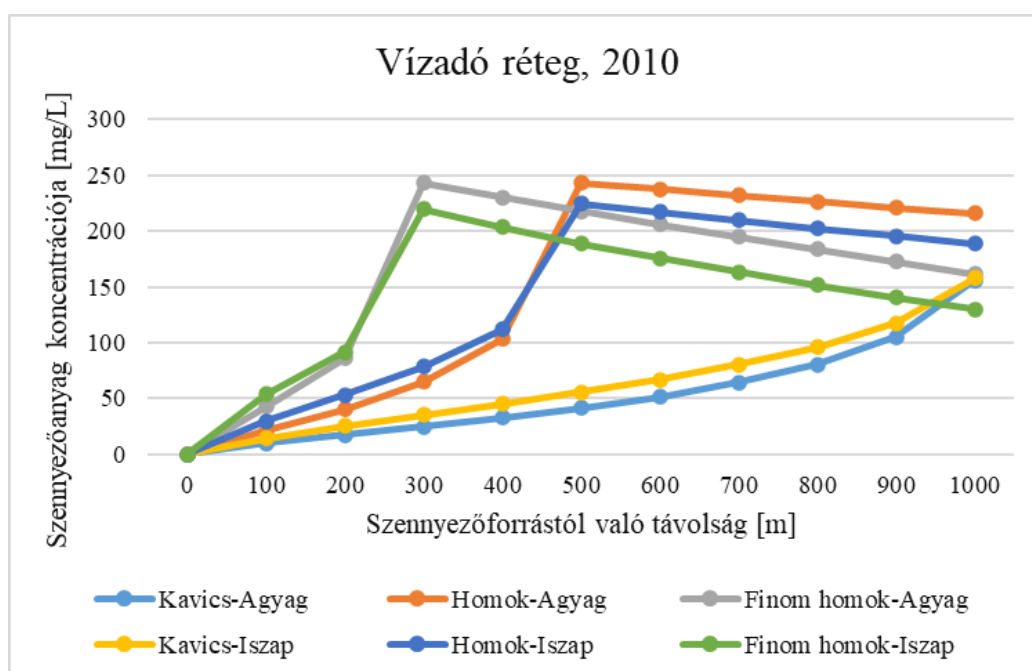
8. táblázat: Vízadó rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2010)

Réteg	Vízadó réteg					
Időpont	2010					
Forrástól mért távolság [m]	Kavics-Agyag	Homok-Agyag	Finom homok-Agyag	Kavics-Iszap	Homok-Iszap	Finom homok-Iszap
0	0	0	0	0	0	0
100	9,86	21,1	42,71	14,49	29,77	53,6
200	17,4	40,52	85,94	25,1	53,42	91,29
300	24,77	64,86	242,94	34,98	78,64	219,62
400	32,57	103,5	229,97	44,93	112,14	203,3
500	41,3	243,17	217,88	55,42	224,79	188,81
600	51,53	237,43	206,33	66,94	216,97	175,61
700	64,13	231,89	195,1	80,14	209,57	163,35
800	80,74	226,47	184,02	96,15	202,47	151,76
900	105,28	221,12	172,92	117,57	195,61	140,65
1000	156,2	215,79	161,65	157,56	188,92	129,83

9. táblázat: Vízadó rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2100)

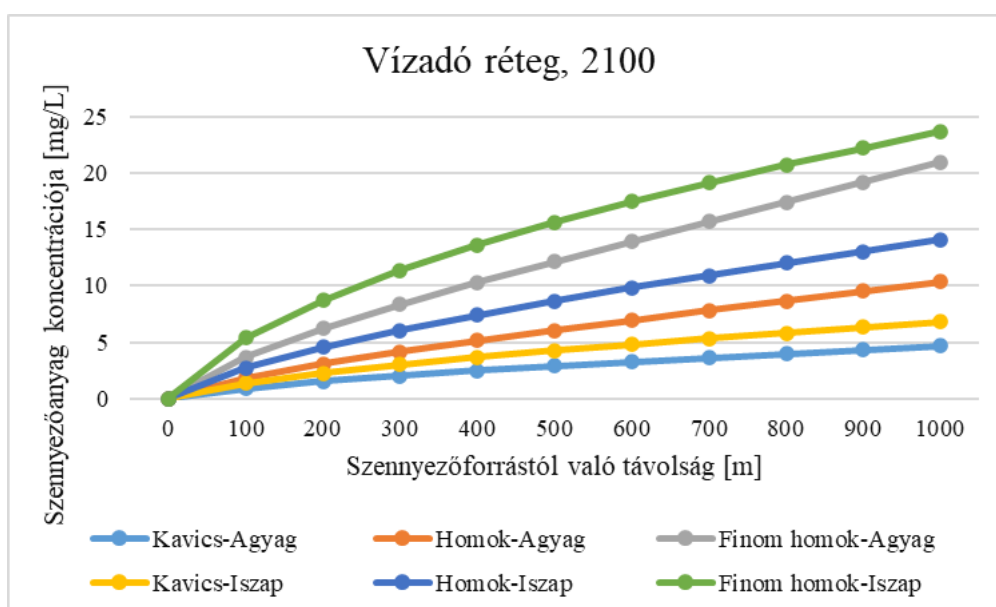
Réteg	Vízadó réteg					
Időpont	2100					
	Kavics-Agyag	Homok-Agyag	Finom homok-Agyag	Kavics-Iszap	Homok-Iszap	Finom homok-Iszap
0	0	0	0	0	0	0
100	0,91	1,85	3,69	1,36	2,73	5,36
200	1,52	3,09	6,19	2,25	4,54	8,72
300	2,02	4,16	8,33	2,99	6,05	11,38
400	2,47	5,13	10,28	3,65	7,4	13,64
500	2,88	6,05	12,12	4,24	8,63	15,64
600	3,27	6,94	13,91	4,8	9,8	17,45
700	3,64	7,8	15,66	5,33	10,92	19,12
800	3,99	8,66	17,41	5,83	12	20,69
900	4,34	9,51	19,16	6,32	13,05	22,19
1000	4,67	10,37	20,94	6,79	14,08	23,65

A vízadó rétegben kapott koncentráció értékek alakulását a forrásterület felszámolását követő 10. és 100. évben a jobb szemléltetés érdekében a 26. és a 27. ábrán mutatom be.



26. ábra: A vízádó rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2010-ben

A vízádóban kialakuló szennyezőanyag koncentráció értékek alakulása a szennyezőforrás felszámolását követő 10. évben hasonlóan a vízzáró rétegben meghatározott értékekhez elég magasak, majdnem minden rétegpár esetében, illetve meghaladják a (B) szennyezettségi határértéket. Ez alól kivételt képez az a két modell, ahol a vízádó réteg kavicsként volt definiálva. Ebben a két esetben az látható, hogy a szennyező csóva a forrástól vizsgált 1000m-es távolságot már részben elhagyta, míg a további 4 modell esetében a csóvafront 200m és 500m között tart.



27. ábra: A vízádó rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2100-ban

A 27. ábrán a vízadó rétegben a forrás felszámolását követő 100. évben figyelhető meg a szennyezőanyag koncentráció változása a forrástól való távolság függvényében. 100 év elteltével a vízadóban is jelentős koncentráció csökkenés figyelhető meg minden rétegpár és vizsgált forrástávolságban. Sőt itt már minden esetben a (B) szennyezettségi határérték alatt marad a TCE koncentráció értéke. Ezen eredmények viszont csak a vizsgált forrástávolságig igaz, ettől függetlenül a szennyező csóva nagyobb távolságokban okozhat problémát, de jelen kutatásom során nem ezt vizsgáltam.

A 12 modellem futtatása során a vízadó és a vízzáró rétegekben kialakult TCE koncentráció eloszlások részletesebb felbontásban történő bemutatását az 1. sz. mellékelt tartalmazza.

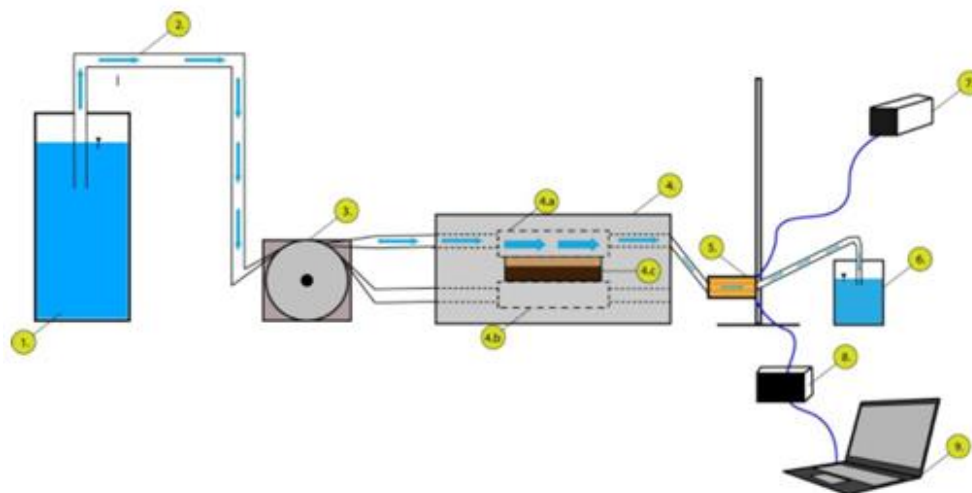
7. DKS- permeabiméter felépítése és működési alapelve

A DKS- permeabiméter (Diffusion coefficient Conductivity Sorption) a Ruhr Egyetem Talajmechanika-i tanszéke által az 1990-es években fejlesztett eszköz, amely képes az anyagtranszport folyamatok (diffúzió, konvekció, szopció) mérésére. Eredetileg hulladéklerakók természetes szigetelő rétegének anyagtranszport folyamatainak vizsgálatához készítették és az első mérések a Jessberger-Onnich páros nevéhez köthetők. A DKS- permeabiméter egy tesztcella, amely segítségével laboratóriumi körülmények között meg tudjuk határozni a talajminták transzport paramétereit. A Miskolci Egyetem Víz- és Környezetgazdálkodás Intézetében folyó, a rediffúzió jelenségének vizsgálatához, a DKS- permeabimétert kisebb átalakításokkal, valamint méréstechnológiai módosításokkal újra gondolták. [22] [23]

A 28. ábrán látható a rediffúzió laboratóriumi vizsgálatára kialakított mérési elrendezés. A DKS- permeabiméter mintatároló elemébe kerül elhelyezésre a mesterségesen elszennyezett talajminta, ami fölé az áramlási elembe pedig egy szűrőlemez, amiben a desztillált víz áramlását egy perisztaltikus pumpa segítségével végezzük.

A szűrőlemezen átfolyó és közben a szennyezett közeggel érintkező oldatot egy átfolyó rendszerű küvettába vezetjük, ahol a sugráforrásból érkező fénysugarak áthaladnak a folyadékon, amelyet a spektrofotométer detektál, és tovább küldi az adatokat a

számítógépre, ahol a megfelelő szoftver segítségével rögzítésre valamint valós idejű ábrázolásra kerülnek az értékek



28. ábra: Lehetséges mérési elrendezés [26]

(1.Tartály, desztillált vízzel 2. Desztillált víz áramoltatása csövön keresztül 3. Perisztaltikus pumpa 4. DKS-permeabiméter 4.a Felső áramlási lemez (aktív) 4.b Alsó áramlási lemez (inaktív) 4.c Talajminta elem 5. Küvetta 6. Szennyezett víztárolóegység (végtermék) 7. Sugárforrás 8. Spektrofotométer 9. MÉRŐÁLLOMÁS (PC))

Ennek a mérési kialakításnak köszönhetően számos, a rediffúzió jelenségét befolyásoló paraméter (hőmérséklet, porozitás, áramlási sebességek, szennyezőanyag koncentráció) laboratóriumi környezetben vizsgálhatóvá válik.

Dolgozatomban a DKS- permeabimétert csak, mint a további kutatási terveimben szereplő eszközt ismertettem. Kutatómunkám terveiben szerepel, hogy a jelen tanulmányban modellezett, különböző áteresztő képességű anyagok között lejátszódó taranszportfolyamatokat, laboratóriumi környezetben is vizsgáljam.

8. Összegzés, célkitűzések

Napjainkban az ipari beruházások és a barnamezős területek használatba vétele kedvező hatással van a korábban elszennyezett területek kármentesítésére. Annak érdekében, hogy a kialakításra kerülő műszaki beavatkozások hatásfoka a lehető legjobb legyen, a felszín alatti közeg és a szennyező tulajdonságainak ismerete mellett elengedhetetlen a lejátszódó transzportfolyamatok ismerete az idő függvényében.

Dolgozatomban a hazai kármentesítési gyakorlatban kevésbé használt Mátrix Diffusion Toolkit szoftver alkalmazási lehetőségeit és használatát mutattam be. Ez szoftver egy hasznos eszköz a kármentesítési munkát előkészítő és tervező szakemberek számára a döntéshozatalokat alátámasztó, vagy segítő kérdésekben. Természetesen önmagában nem elegendő az alkalmazása a szennyezett területek kármentesítése során.

A Mátrix Diffusion Toolkit bemutatása mellett, vizsgáltam a különböző áteresztőképességű rétegek között lejátszódó rediffúzió intenzitását. Ennek érdekében összesen 12 db modell futtatást végeztem és értékeltem ki. A kapott eredményekből jól látható volt, hogy a vízzáró és vízrekesztő rétegek közötti áteresztő képesség különbségek nagymértékben befolyásolták a szennyezéssel érintett terület környezetében lecsengő szennyezőanyag transzportot.

A kutatásom folytatásaként szeretném további modellezésekkel vizsgálni, más paraméterek (áramlási sebesség, effektív diffúziós tényező, szennyezőanyag koncentráció) hatásait is a rediffúzió jelenségére a Mátrix Diffusion Toolkit szoftverrel, illetve más hidrogeológiai és transzport modellező szoftver segítségével.

A szennyezőanyag transzport modellezések mellett a további kutatási terveimben szerepel egy laboratóriumi mérésorozat végrehajtása a DKS-permeabiméterrel, ahol a dolgozatomban is vizsgált áteresztőképesség különbségek rediffúzióra gyakorolt hatását kívánom vizsgálni.

9. Köszönetnyilvánítás

A dolgozatomban bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

10. Irodalomjegyzék

1. **Lauer J.** Szénhidrogén származékokkal szennyezett talajok, talajvizek, iszapok ártalmatlanítása, mentesítése
2. **Puzder Tamás, Dr. Csáki Ferenc, Dr. Gruiz Katalin, Dr. Horváth Zsolt, Márton Tibor, Sajgó Zsolt:** KÁRMENTESÍTÉSI KÉZIKÖNYV 4 Kármentesítési technológiák (2.3. bekezdés)
3. **Tóth J.:** Szénhidrogén-szennyeződések modellkísérleti eredményeinek geokémiai és környezetföldtani szempontú értékelése, Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar, 2008
4. **Kovács B.:** Hidrodinamikai és transzportmodellezés (Processing MODFLOW környezetben) I, Első kiadás 2004.
5. https://www.itrcweb.org/DNAPL-ISC_toolselection/Content/2%20Types%20of%20DNAPLS%20and%20DNAPL.htm
6. **Zákányi Balázs** PhD értekezés, 2013, Miskolc, A DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) típusú szennyeződések felszín alatti transzport-folyamatainak szimulációja, 14. oldal
7. **Izig I.:** Szabad fázisú szennyezőanyagok migrációjának modellezése, Golder Associates (Magyarország) Zrt. 2012, Magyarország
8. <http://www.biofizika.aok.pte.hu/data/2015/0902/298/DIFF%C3%9AAZI%C3%93handout.pdf>
9. http://biofizika2.aok.pte.hu/tantargyak/files/szeminarium1/2013-2014/szeminarium1_2013-2014_07.pdf
10. **Minjune Yang Michael, D. Annable James, W. Jawitz** Back Diffusion from Thin Low Permeability Zones
11. **N. Poczok, I. Székely, T. Madarász** Vízrekesztő rétegből történő szennyeződések rediffúziós jelenségének laboratóriumi vizsgálata
12. <https://slideplayer.hu/slide/2088769/>

13. https://www.enviro.wiki/index.php?title=Matrix_Diffusion
14. **Fabio Tatti - Marco Petrangeli Papini - Giuseppe Sappa – Massimo Raboni - Firoozeh Arjmand - Paolo Viotti:** Contaminant back-diffusion from low permeability layers as affected by groundwater velocity: A laboratory investigation by box model and image analysis, *Science of the Total Environment* 622–623 (2018) 164–171
15. **Liu C. és Ball W. P. (2002):** Back Diffusion of Chlorinated Solvent Contaminants from a Natural Aquitard to a Remediated Aquifer Under Well-Controlled Field Conditions; Predictions and Measurements. *Ground Water*. Vol. 40, No. 2, 175-184.
16. **Chapman S. W. és Parker B. L. (2005):** Plume persistence due to aquitard back diffusion following dense nonaqueous phase liquid source removal or isolation. *Water Resources Research*. Vol. 41, W12411
17. <https://www.gsienv.com/software/serdp-and-estcp-tools/matrix-diffusion-toolkit/>
18. **Farhat S.K. – C.J. Newell – M.A. Seyedabbasi – J.M. McDade – N.T. Mahler – T.C. Sale – D.S. Dandy – J.J. Wahlberg (2012):** Matrix diffusion toolkit, User's manual, Version 1.0, GSI Environmental Inc. Houston, Texas and Colorado State University, Fort Collins, Colorado
19. <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gwmr.12373>
20. https://fava.hu/kvvm/www.kvvm.hu/szakmai/karmentes/kiadvanyok/karmutmutato7/kmu7_m4.htm
21. **Székely I. – Trauer N. - Érsok B. - Madarász T.:** A lignit töltetű reaktív gát méretezésétől a diffúziós cella fejlesztéséig, *Műszaki Földtudományi Közlemények* 84. kötet 1. szám
22. **Koll A.:** Anwendung von DKS- Permeametern zur Untersuchung von chromkontaminiertem Boden, Masterarbeit, Leoben (2011)
23. **Székely I.:** A reaktív gátak tervezését támogató méretezési protokoll kidolgozása és kapcsolódó eszközfejlesztési és labormérési program bemutatása, Diplomaterv, Miskolci Egyetem (2013)
24. **Demián Szabolcs:** Laboratory testing of rediffusion from contaminated double porosity layers, Diplomaterv 2018
25. **Kovács Virág:** Investigation and quantification of parameters influencing back diffusion, Thesis, 2018, Miskolc

26. **Poczok Noémi:** Vízrekesztő rétegből történő szennyeződések rediffúziós jelenségének laboratóriumi vizsgálata, Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat 2019.

11. Ábrajegyzék

1. **ábra:** Szénhidrogén szennyeződések fázisai talajban
2. **ábra:** LNAPL típusú szennyeződések mozgása a talajban
3. **ábra:** Földtani közegben lévő DNAPL típusú szennyeződések mozgása
4. **ábra:** A vízáadó réteg rekonstrukciója
5. **ábra:** Fluoreszcencia kioldódása (a: nyugalmi állapotban; b: víz áramoltatása közben)
6. **ábra:** Matrix Diffusion Toolkit nyitóképe
7. **ábra:** Modul választó felület
8. **ábra:** SRM adatbeviteli felülete
9. **ábra:** Analízis típusa
10. **ábra:** Forrás zóna analízis
11. **ábra:** Kút analízis
12. **ábra:** Reaktív gát analízis
13. **ábra:** Hidrogeológia paraméterek beviteli pontja
14. **ábra:** Darcy együttható paramétereinek beviteli felülete
15. **ábra:** Transzportfolyamatok megadandó paraméterei
16. **ábra:** Retardációs faktor számításához szükséges paraméterek
17. **ábra:** Kútkarakterisztika paraméterek
18. **ábra:** Általános adatok
19. **ábra:** Terepi adatok összehasonlításához
20. **ábra:** DSM beviteli felülete
21. **ábra:** Beviteli útmutató
22. **ábra:** Csóva mérete
23. **ábra:** Vizsgált terület mérete
24. **ábra:** A vízzáró rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2010-ben
25. **ábra:** A vízzáró rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2100-ban
26. **ábra:** A vízáadó rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2010-ben

27. ábra: A vízadó rétegben kapott koncentráció értékek alakulása 2100-ban

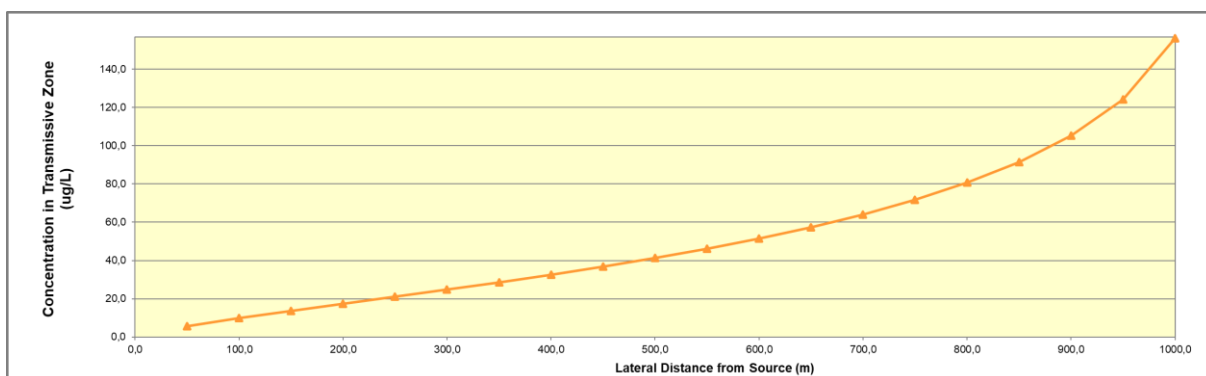
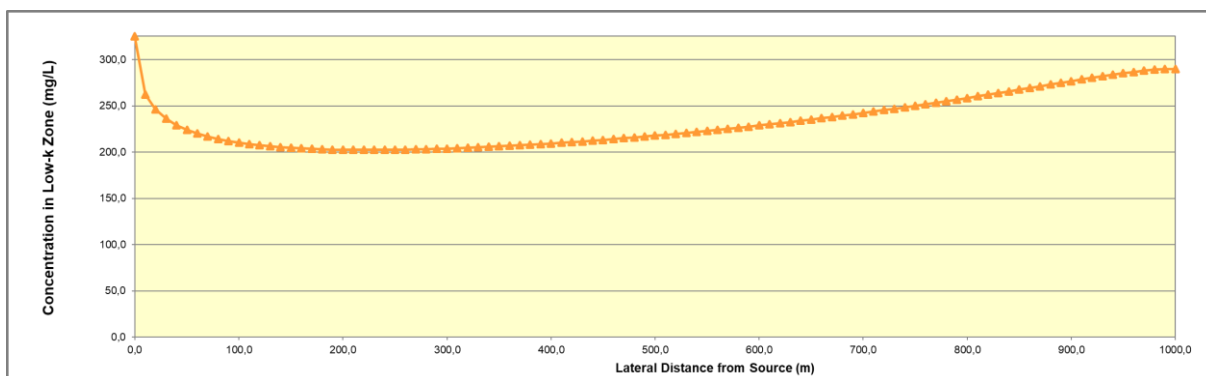
28. ábra: Lehetséges mérési elrendezés

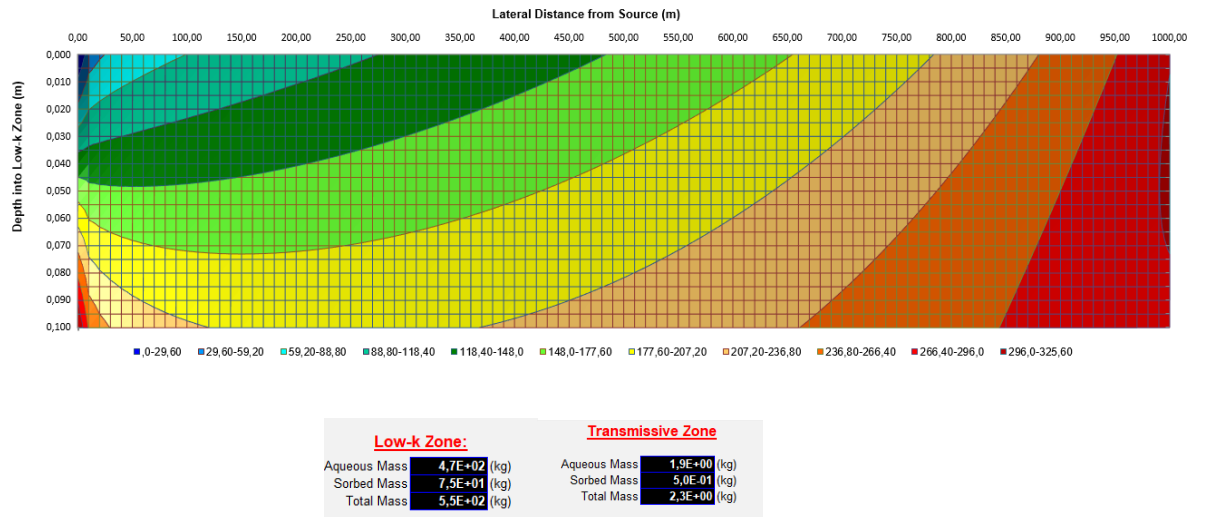
12. Táblázatjegyzék

- 1. táblázat:** Szénhidrogén termékek legfontosabb paraméterei
- 2. táblázat:** Az effektív-diffúziós állandó meghatározása
- 3. táblázat:** Modell választás a Matrix Diffusion Toolkit rendszerében
- 4. táblázat:** Állandó paraméterek
- 5. táblázat:** Változó paraméterek
- 6. táblázat:** Vízáró rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2010)
- 7. táblázat:** Vízáró rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2100)
- 8. táblázat:** Vízadó rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2010)
- 9. táblázat:** Vízadó rétegben kapott szennyezőanyag koncentrációk (2100)

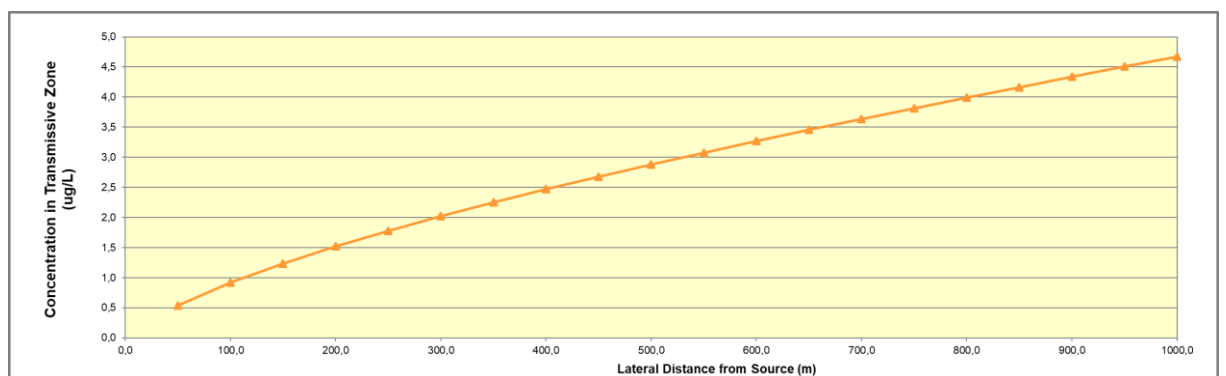
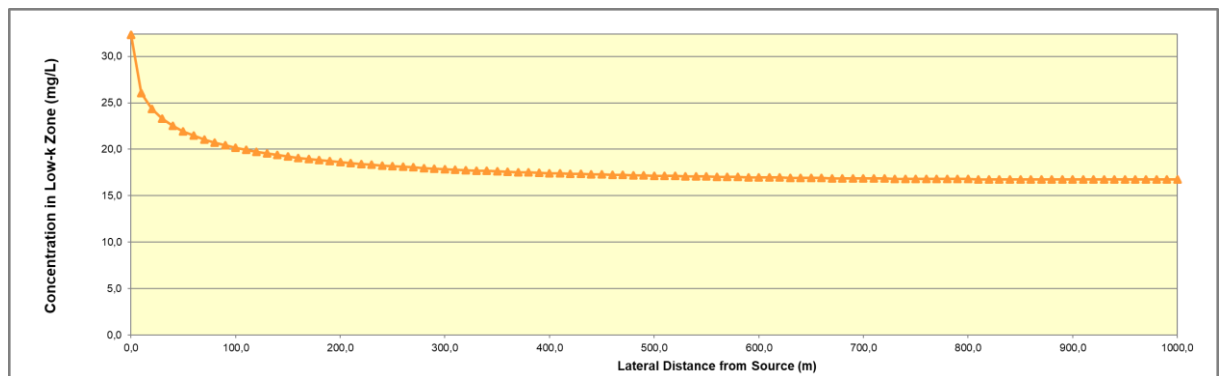
13. Mellékletek:

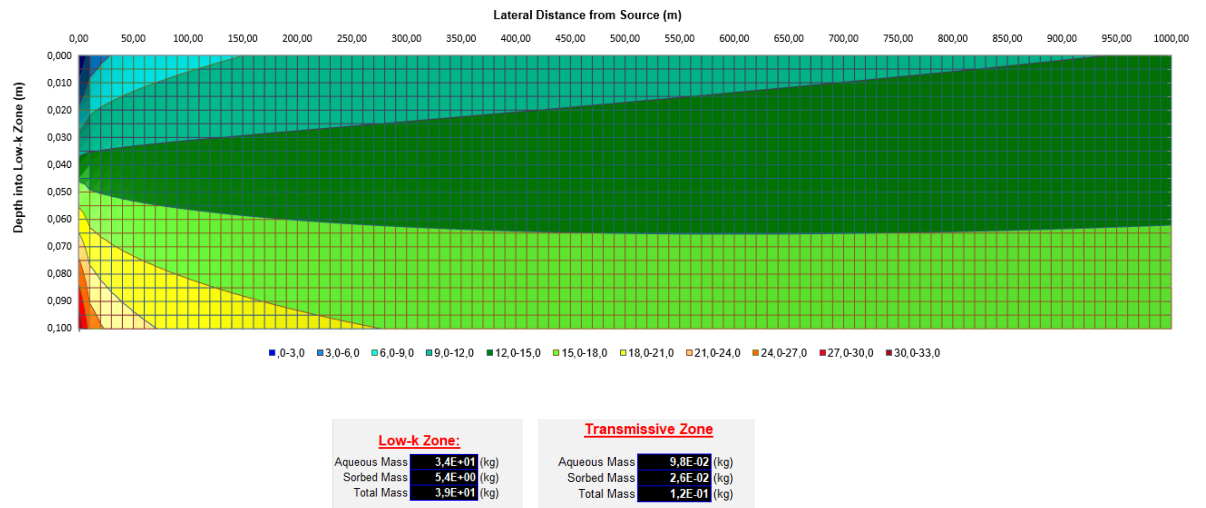
1. Kavics, Agyag 2010



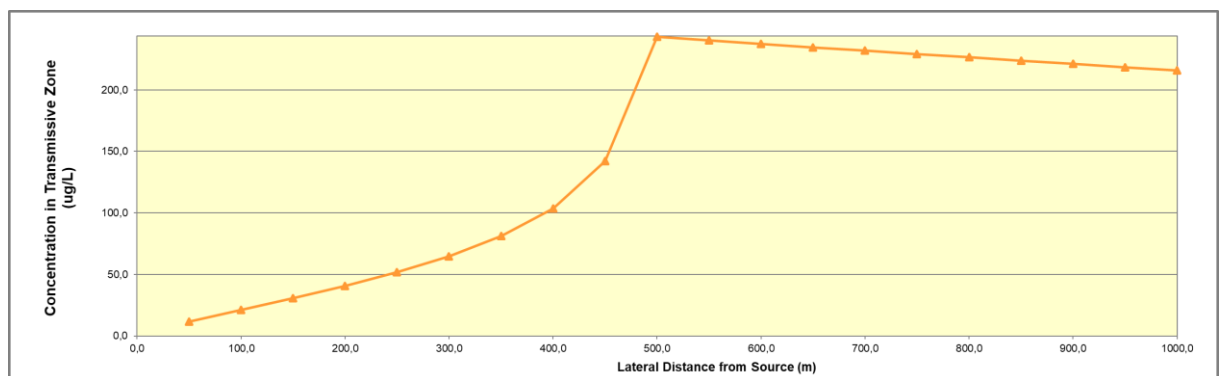
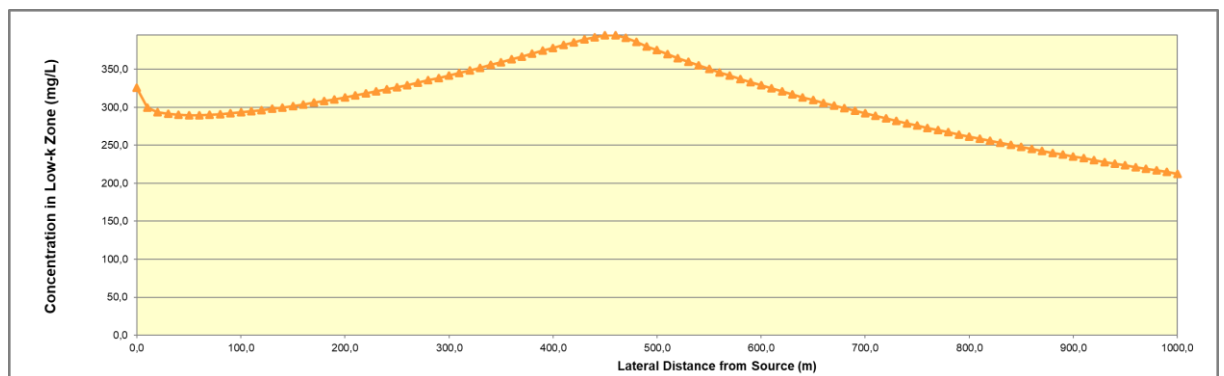


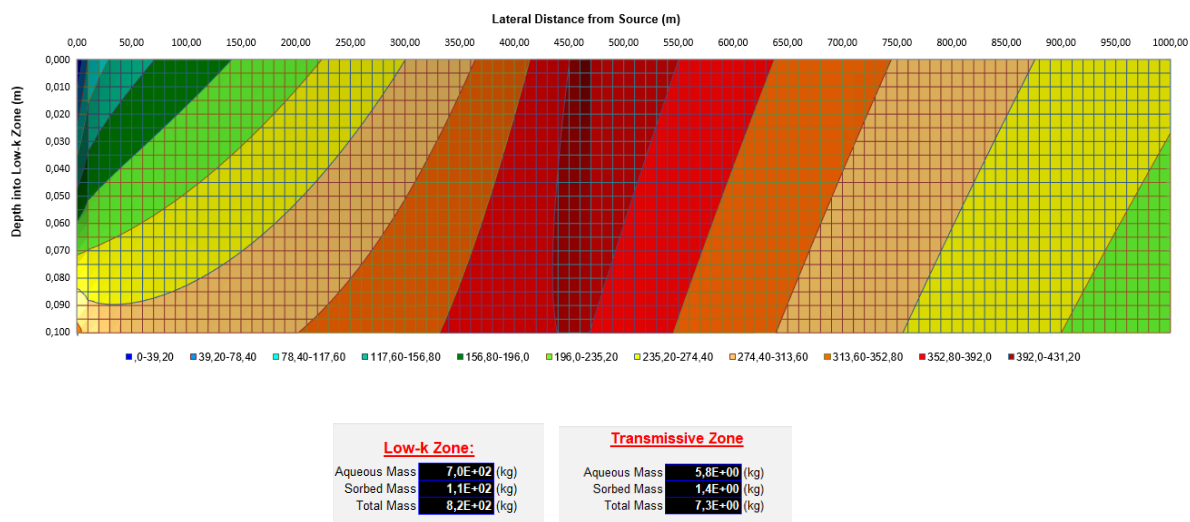
2. Kavics, Agyag 2100



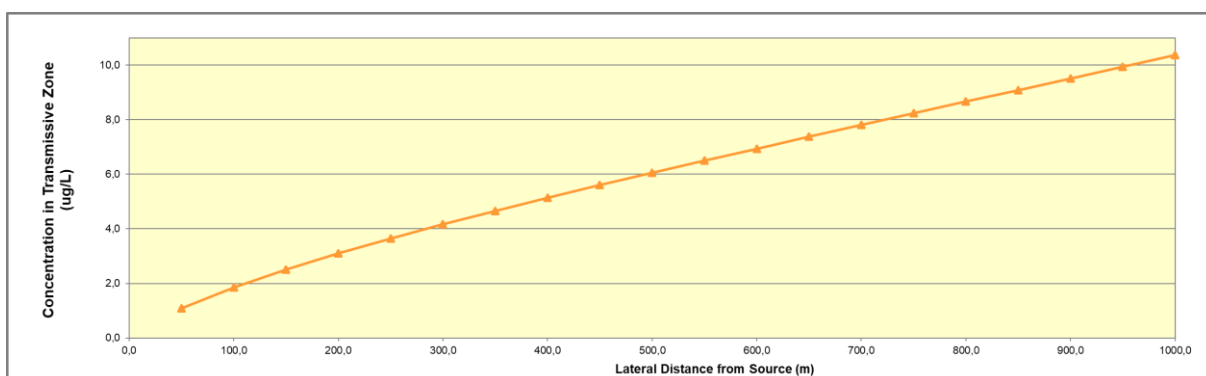
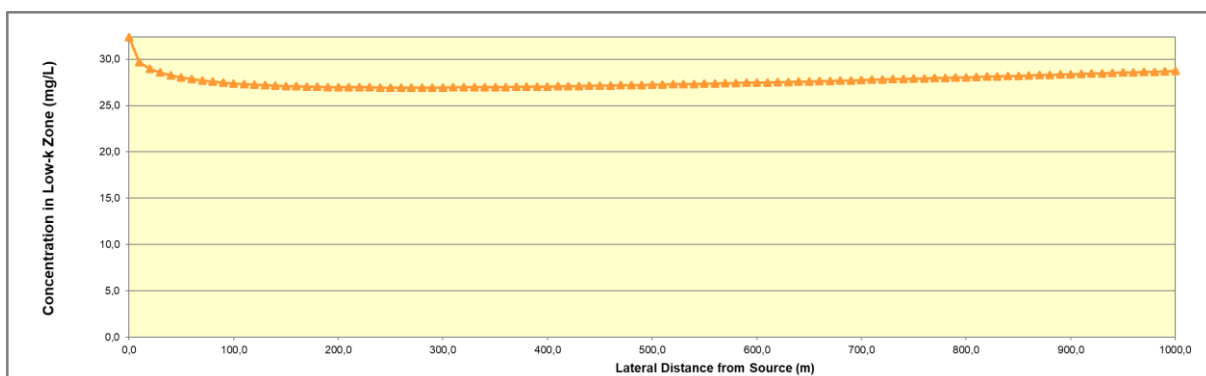


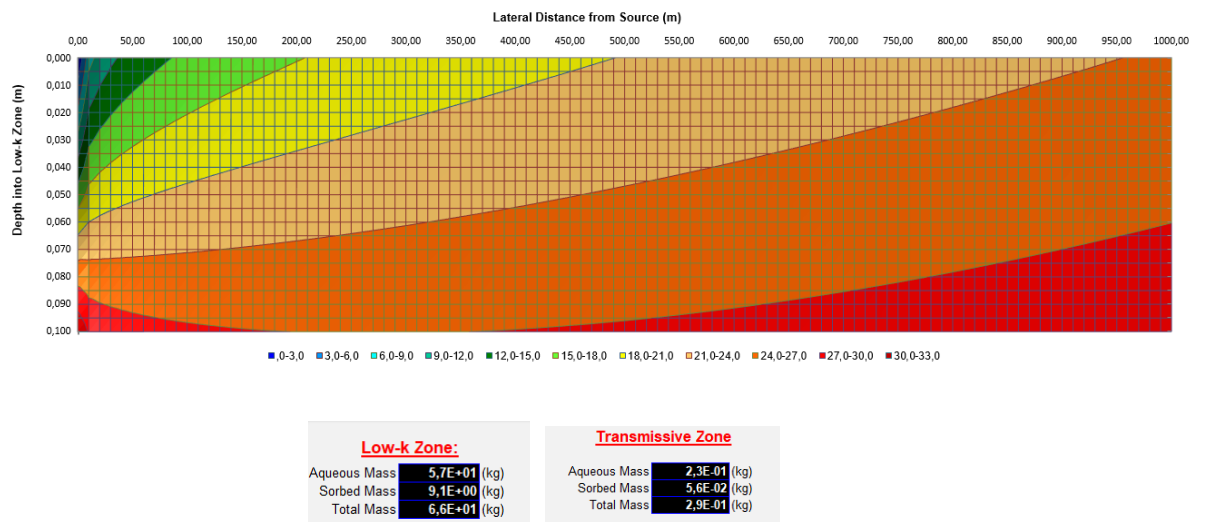
3. Homok, Agyag 2010



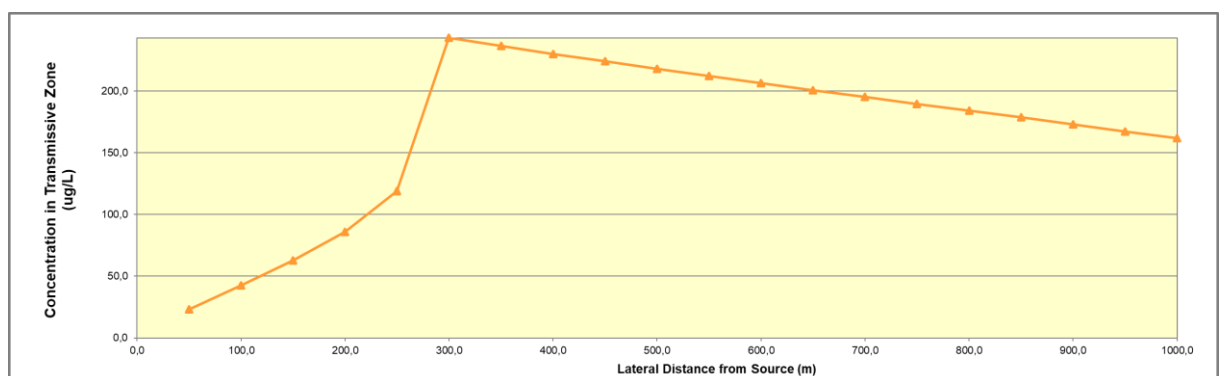
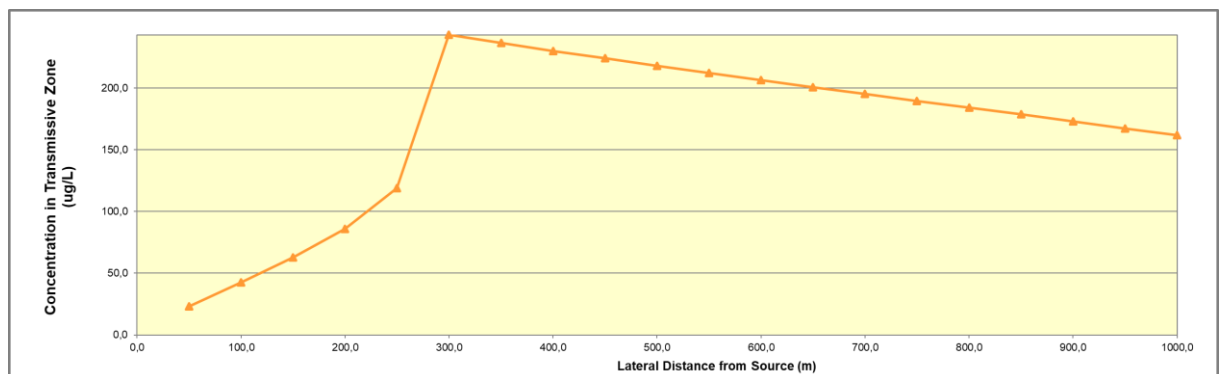


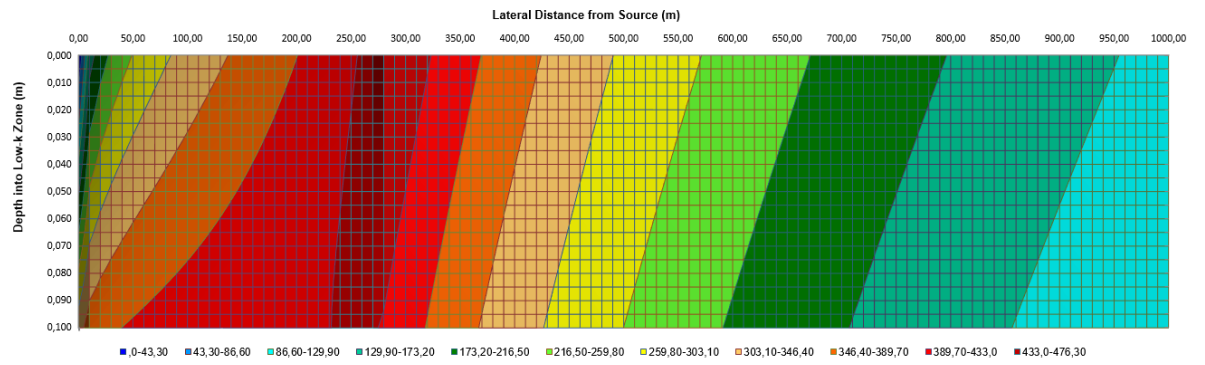
4. Homok, Agyag 2100





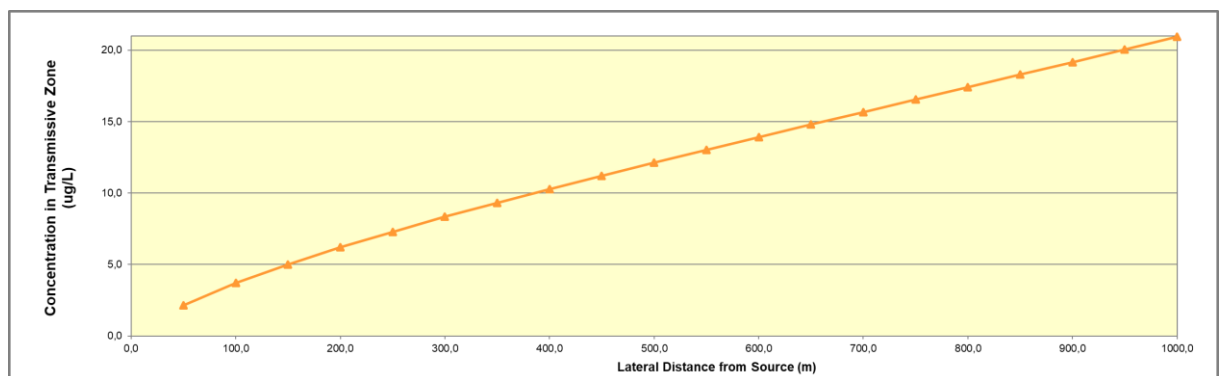
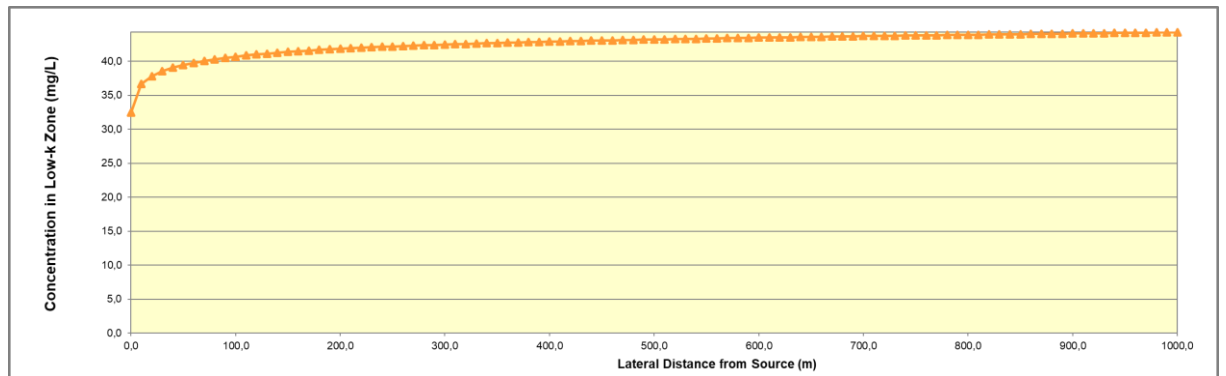
5. Finom homok, Agyag 2010

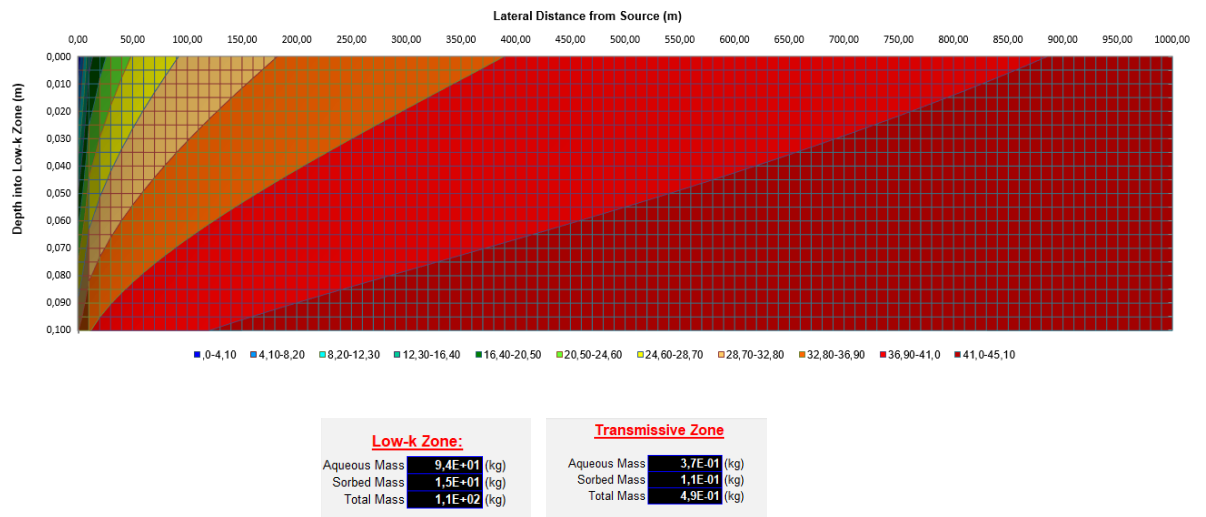




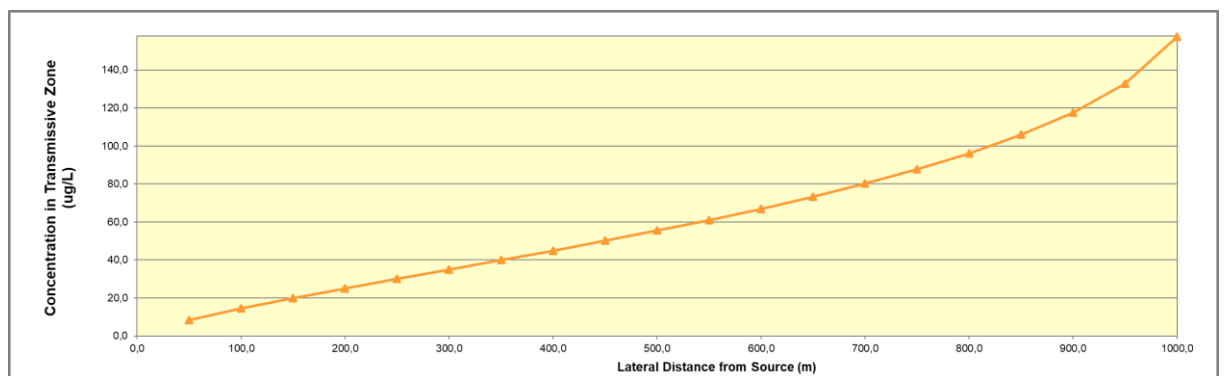
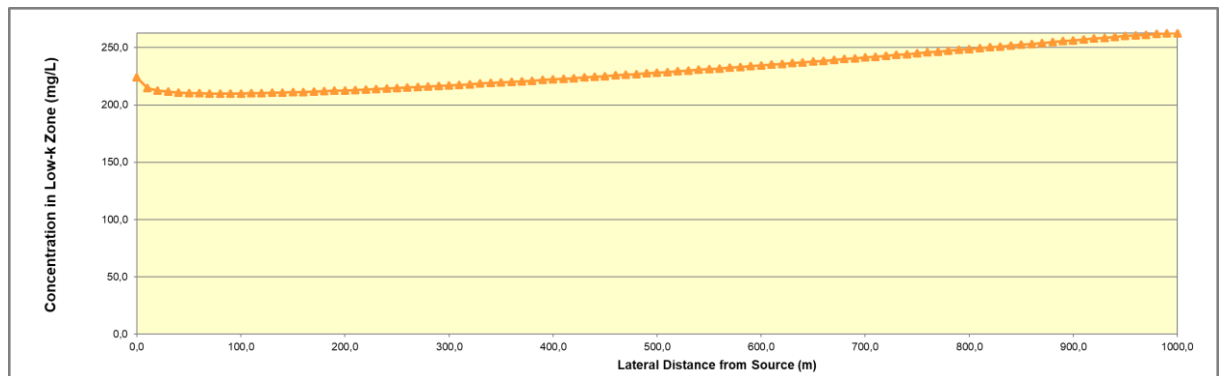
Low-k Zone:		Transmissive Zone	
Aqueous Mass	6,4E+02 (kg)	Aqueous Mass	5,1E+00 (kg)
Sorbed Mass	1,0E+02 (kg)	Sorbed Mass	1,5E+00 (kg)
Total Mass	7,4E+02 (kg)	Total Mass	6,6E+00 (kg)

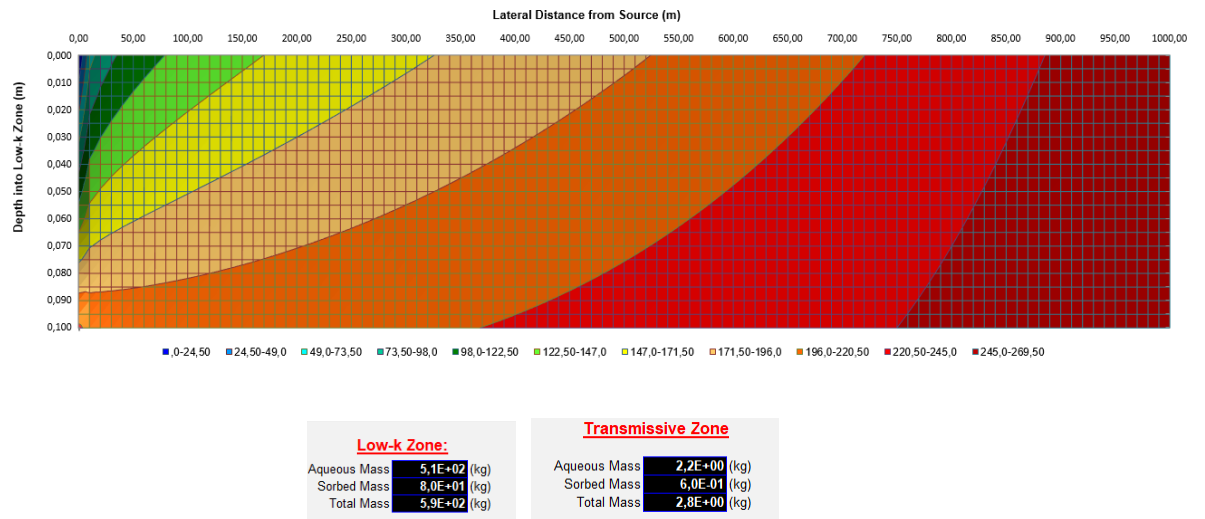
6. Finom homok, Agyag 2100



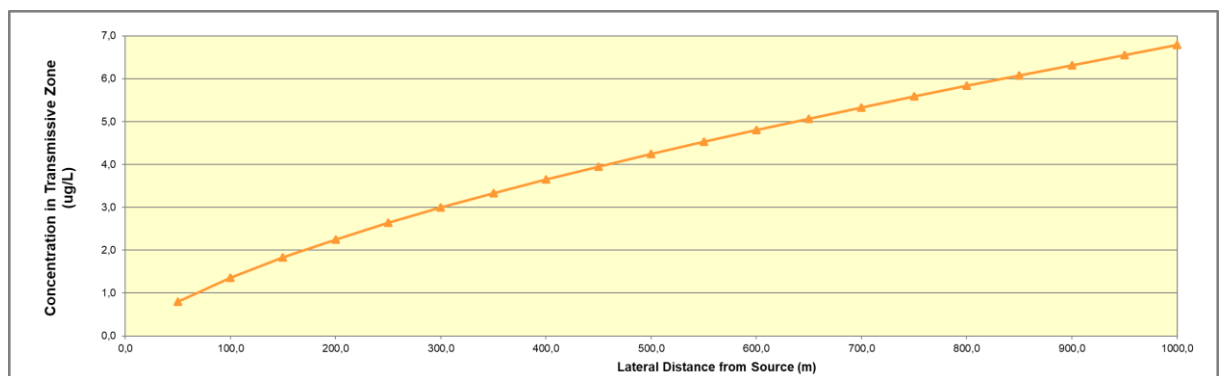
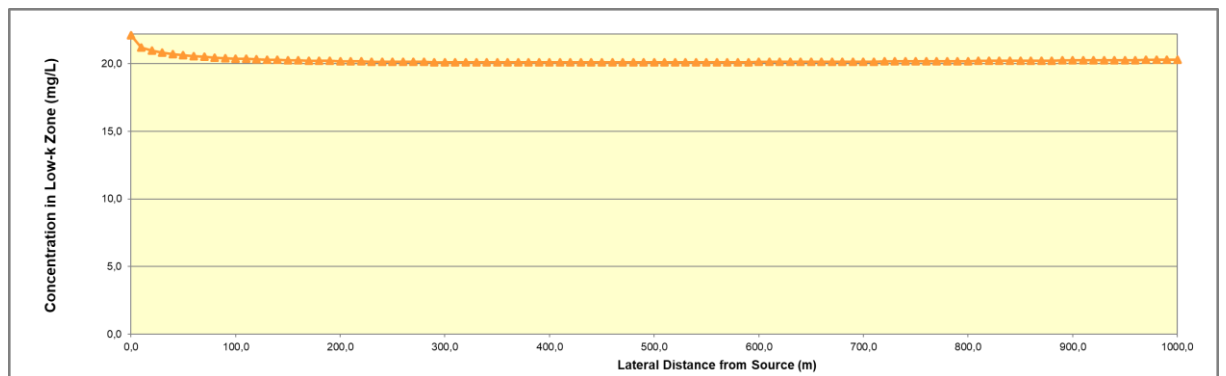


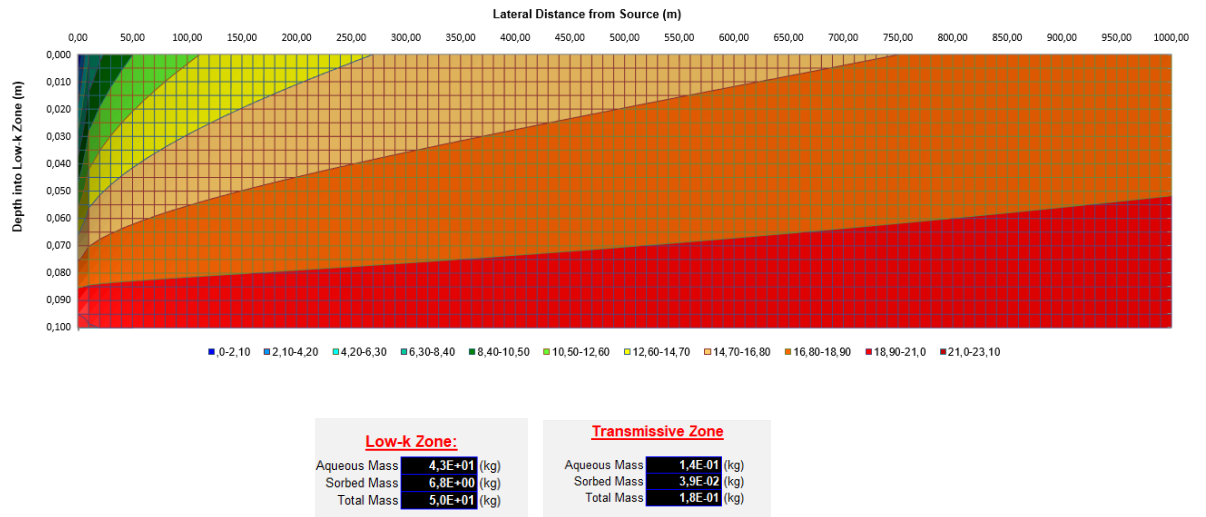
7. Kavics, Iszap 2010



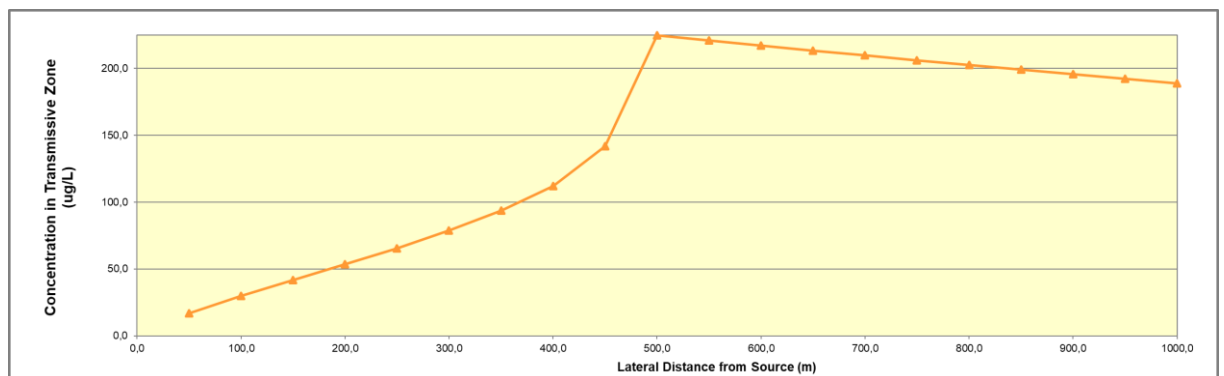
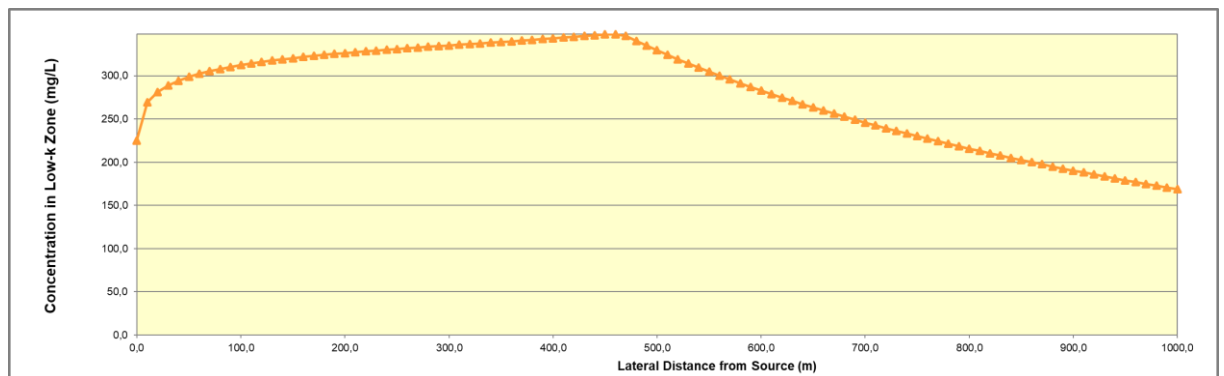


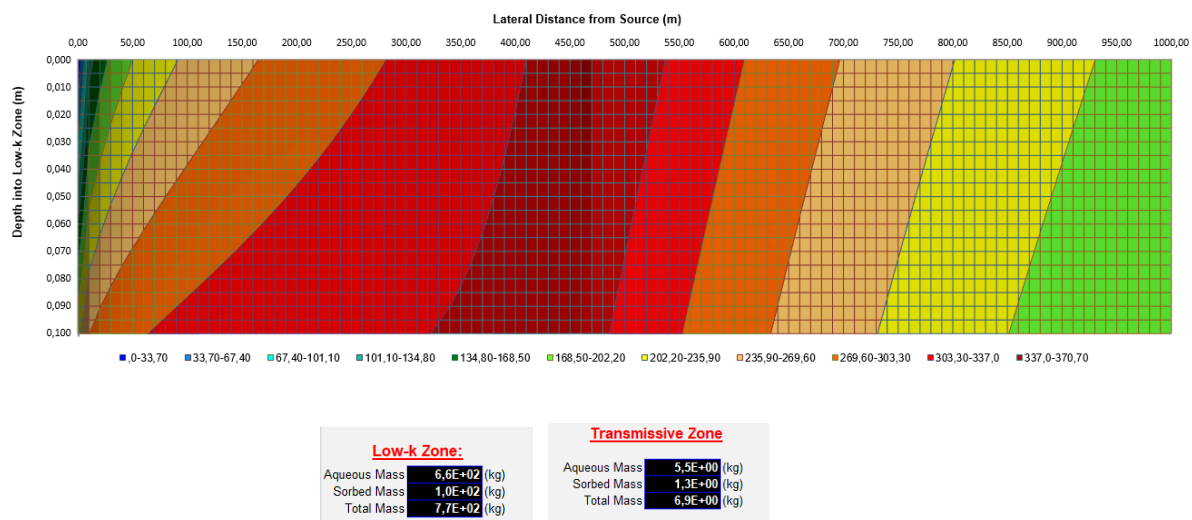
8. Kavics, Iszap 2100



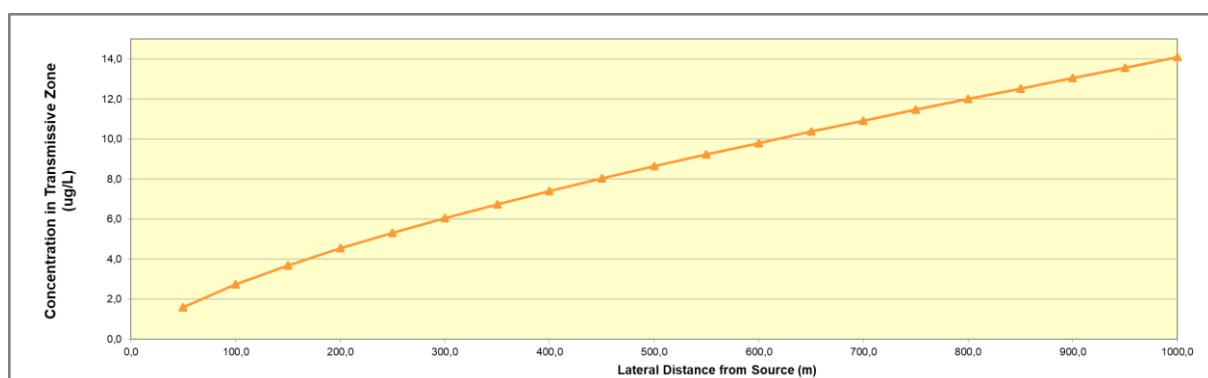
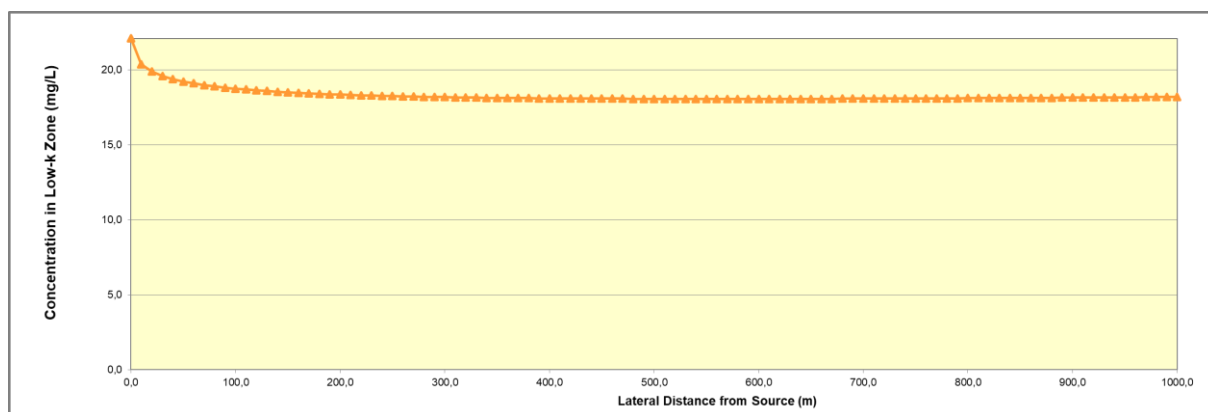


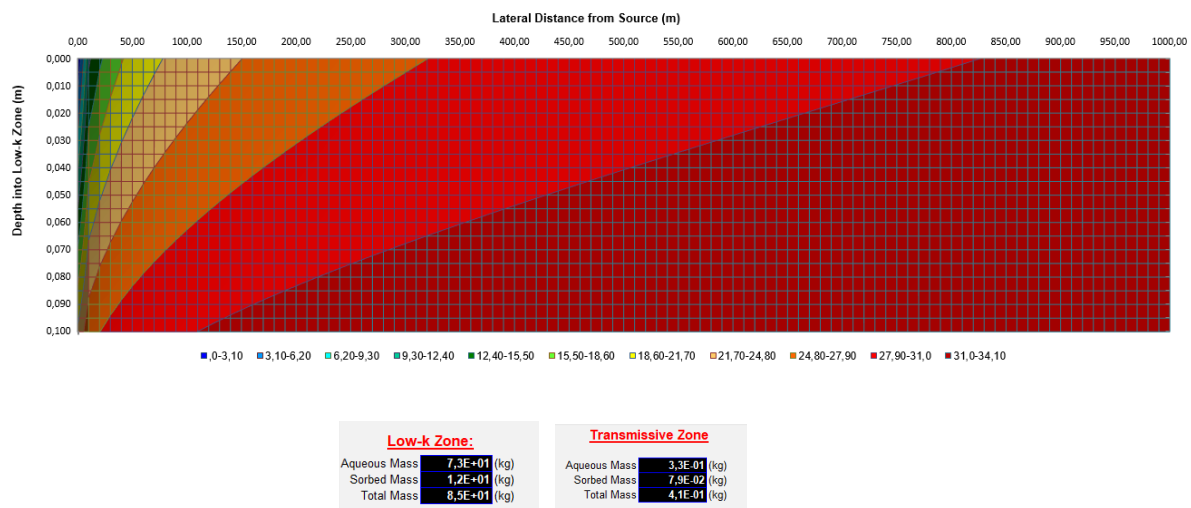
9. Homok, Iszap 2010



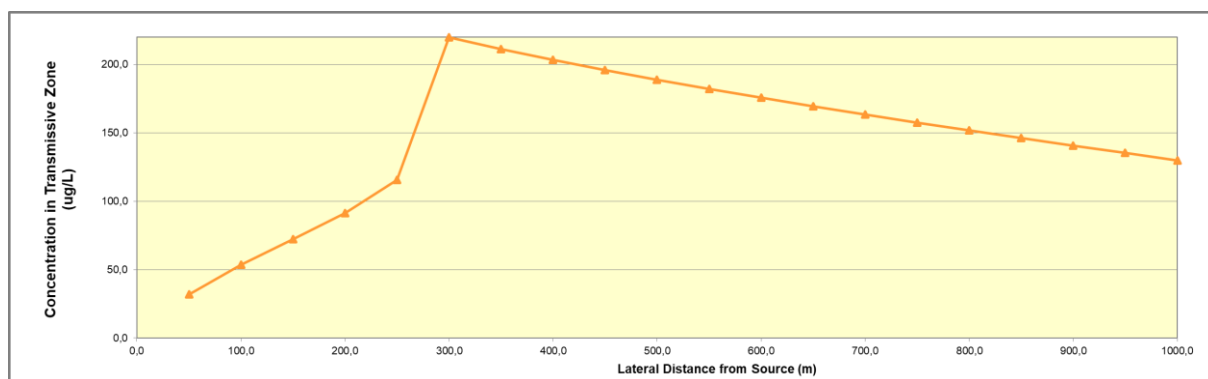
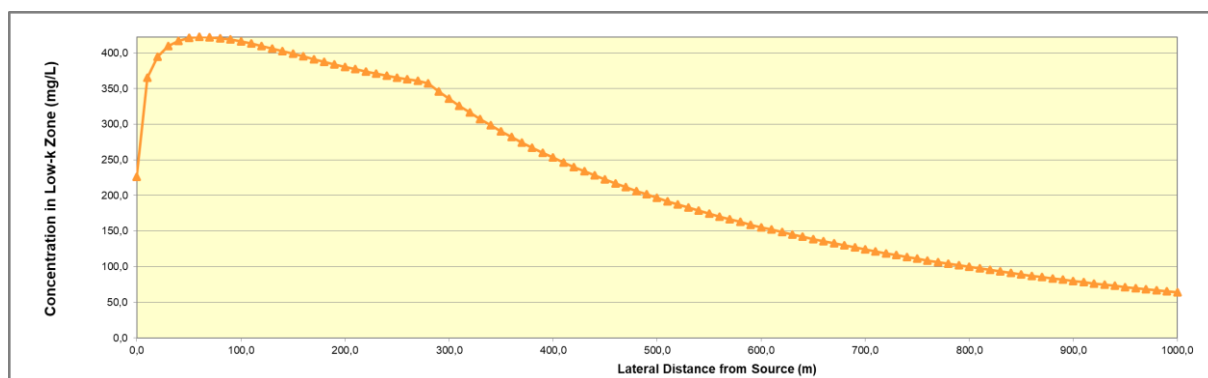


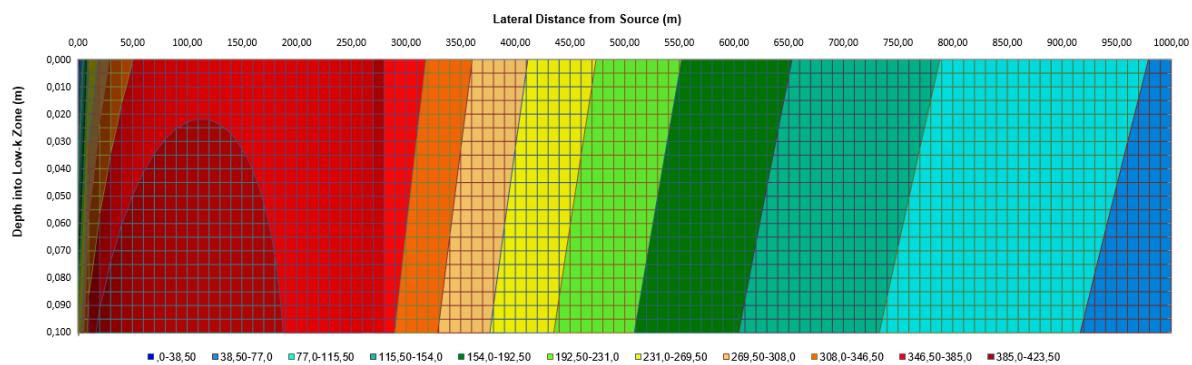
10. Homok, Iszap 2100





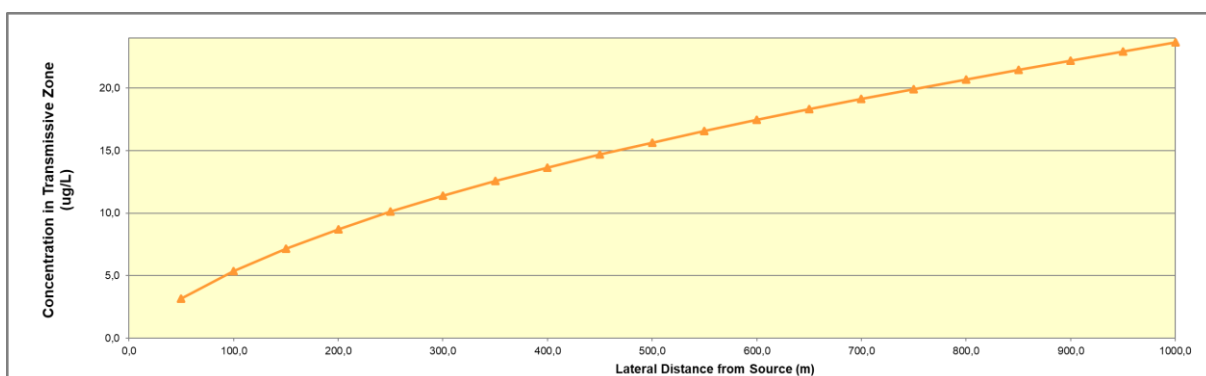
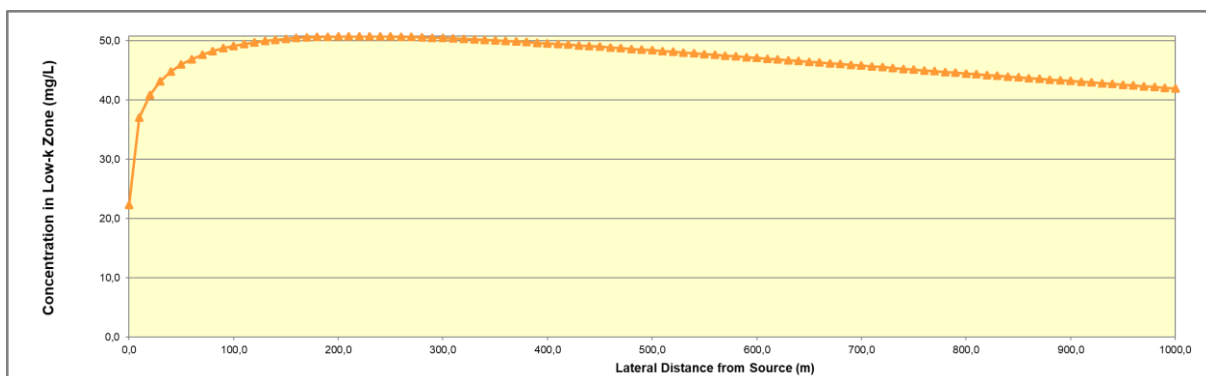
11. Finom homok, Iszap 2010

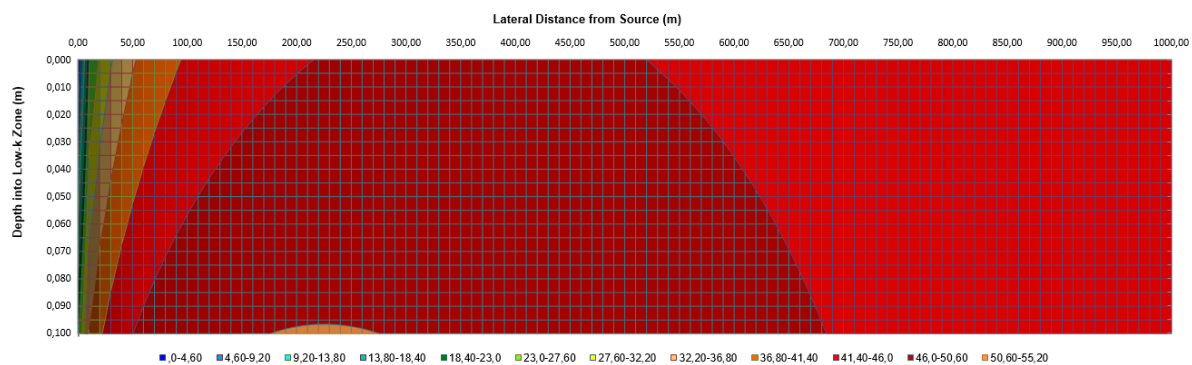




Low-k Zone:		Transmissive Zone	
Aqueous Mass	5,5E+02 (kg)	Aqueous Mass	4,5E+00 (kg)
Sorbed Mass	8,6E+01 (kg)	Sorbed Mass	1,3E+00 (kg)
Total Mass	6,3E+02 (kg)	Total Mass	5,8E+00 (kg)

12. Finom homok, Iszap 2100





Low-k Zone:		Transmissive Zone	
Aqueous Mass	1,1E+02 (kg)	Aqueous Mass	4,6E-01 (kg)
Sorbed Mass	1,7E+01 (kg)	Sorbed Mass	1,4E-01 (kg)
Total Mass	1,3E+02 (kg)	Total Mass	6,0E-01 (kg)