

A természetes szennyezőanyag-csökkenés
A szennyezett talajok kezelésére alkalmas ökológiai technológiák
A természetes szennyezőanyag-csökkenés környezeti kockázata

Dr. Gruiz Katalin

1. A természetes szennyezőanyag-csökkenés és a szennyezett talajok kezelésére alkalmas ökológiai technológiák	1
2. Szennyezőanyagok sorsa a talajban	3
3. A természetes folyamatok követésének metodikai háttere.....	5
4. Természetes szennyezőanyag-csökkenés és annak intenzifikálása szerves szennyezőanyagokkal szennyezett talaj esetében	11
5. Szerves szennyezőanyaggal szennyezett talajok intenzifikált biodegradációja	13
6. Természetes folyamatok szerves szennyezőanyagokkal szennyezett területen.....	34

1. A természetes szennyezőanyag-csökkenés és a szennyezett talajok kezelésére alkalmas ökológiai technológiák

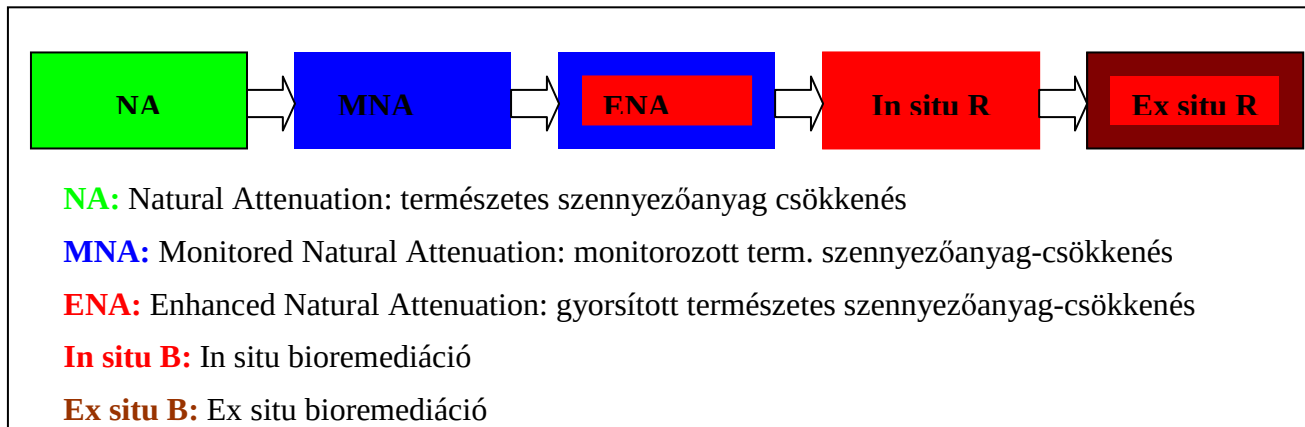
A talajban lejátszódó természetes szennyezőanyag-csökkenési (Natural Attenuation) folyamatok közül a környezeti kockázat csökkentését eredményezőket veszi alapul az ökomérnök, hogy a talajban már kialakult vagy eleve meglévő kockázatcsökkentő potenciálra alapozva, környezetbarát technológiákat tervezzen és alkalmazzon. A talaj saját átalakító tevékenységéért felelős közösséget állítja a technológia középpontjába (cell factory). A technológiai paramétereket úgy választja meg, hogy azok kedvezzenek a kockázatcsökkentést végző élőlény-közösségeknek, hogy ne károsítsa a kezelt talaj ökoszisztémáját és ne növelje a veszélyt, még átmenetileg sem, a kezelt talajtérfogaton kívüli környezetben. Az optimális működési körülményeket megfelelő méretű és elrendezésű természetes vagy mesterséges ökoszisztémákkal, valamint célszerűen megválasztott és szabályozott technológia paraméterekkel (áramlási viszonyok, tartózkodási idők, hőmérséklet, pH, ozmózisnyomás, tápanyag- és oxigénellátottság, speciális adalékok, biológiai és ökológiai paraméterek, pl. fajeloszlás stb.) biztosítja. Az ökomérnökség az ökológia, a biológia, a biokémia, a genetika, a mérnöki tudományok – elsősorban a biomérnökség és a számítástechnika – integrált felhasználását jelenti. Alkalmazási területei:

1. Környezetvédelmi, hulladékkezelő, és -hasznosító technológiák, pl. állandó nagy terhelésnek kitett, szennyezett felszíni vizek és talajok megfelelő állapotban tartása, szennyvizek kezelése, szennyvizek és szennyvíziszapok talajra alkalmazása;
2. Szennyezett területek öngyógyításának befolyásolása, a természetes bioremediáció és a fitoremediáció hatékonyságának növelése;
3. Az antropogén hatások és az ökoszisztémákban uralkodó trendek összehangolása, az ökoszisztémák működésével és a *fenntartható fejlődéssel* kapcsolatos kutatások;
4. Legtágabb értelemben az ökológia szempontjainak bevitele minden mérnöki tevékenységbe, a technológiaválasztási, -tervezési és -alkalmazási folyamatokba;
5. Az ökológiai kockázatok és ökológiai jellemzők mérése és számszerűsítése.

A természetes kockázatcsökkenés tehát igen fontos eszköz a szennyezett területek, főleg az elhagyott, régi szennyezett talaj és üledék kockázatának kezelésében. Magyarországon még ma is rengeteg, évtizedek óta szennyezett és a mai napig nem remediált terület létezik, állandóan változó tulajdonosokkal, monitoring és beavatkozás nélkül, az időre bízva. Az "idő"

sok esetben megteszi a magáét, hiszen a természet hihetetlen erőket képes mozgósítani a túlélés érdekében, a megváltozott körülményekhez, így a toxikus szennyezőanyagok jelenlétéhez való alkalmazkodás, az új egyensúly megteremtése érdekében.

A szennyezett területeken lezajló természetes folyamatok tudatos alkalmazásának fokozatait az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A természetes folyamatok mérnöki alkalmazásának fokozatai szennyezett talaj remediálásában

Az évtizedek óta elhagyott, elhanyagolt szennyezett területek kockázatának kezelésében nagy szerepet kaphatna (kaphatott volna már eddig is) a természetes kockázatsökkentés ökomérnöki alkalmazása, de sajnos Magyarországon nem népszerűek az ökológiai technológiák, ahogy a környezettel, a természettel kapcsolatos alázatos gondolkodás és mérnöki tevékenység sem.

A természetes kockázatsökkentő folyamatokon alapuló ökológiai technológiák alkalmazásának elterjesztéséhez az alábbiakra van szükség:

1. A természetes szennyezőanyag-csökkentő folyamatok megismerése, felmérése, modellezése, a kockázatot csökkentő folyamatok megkülönböztetése a kockázatot nem csökkentő vagy növelő folyamatoktól, monitoring és a kockázat mennyiségi értékelése alapján.
2. A tulajdonosok, környezetvédelmi politikusok, menedzserek és más döntéshozók, valamint a technológusok tudásszintjének növelése.
3. A szennyezett területekkel kapcsolatos politika és irányítás megváltoztatása: az akut problémák megoldásán túl hosszú távú gondolkodás és tervezés. Tűzoltás helyett (eladás vagy hasznosítás előtt, rövid idő alatt), a szennyezett területek monitoringja és folyamatos kezelése olcsó és hatékony módszerekkel.
4. Kockázaton alapuló területhasználatok dinamikus rendszerének bevezetése, hogy a kezelés alatt lévő csökkenő mértékben szennyezett területek is hasznosíthatóak legyenek.
5. A remediációs technológiák piaci keresletének és kínálatának megváltoztatása, hogy az olcsó, ökomérnöki talajkezelési technológiákat is lehessen, érje meg "eladni", hogy háttérbe szoruljanak a költséges, de nagy hasznot hozó fizikai-kémiai technológiák és a sokszor indokolatlan talajcserék.

2. Szennyezőanyagok sorsa a talajban

A szennyezőanyagok sorsát a környezetben alapvetően két dolog határozza meg: a vegyi anyag fizikai-kémiai tulajdonságai és a környezet fizikai-kémiai-biológiai állapota és jellemzői. A környezeti elemeken – levegő, felszíni víz, talaj és felszín alatti víz – kívül a biotát, mint alapvető fontosságú résztvevőt is figyelembe kell venni.

A környezetbe kikerült szennyezőanyagok kémiai és biológiai folyamatok eredményeképpen átalakulhatnak a környezetet nem károsító vagy a kiindulásnál kevésbé káros anyagokká, egyes esetekben azonban az átalakulások a korábbinál veszélyesebb helyzetet is eredményezhetnek.

A szennyezőanyagok koncentrációja az adott területen csökkenhet a terjedés során fellépő hígulással vagy fázisváltással, ez a koncentrációcsökkenés azonban nem jelent okvetlen kockázatcsökkenést, sok esetben a kockázat konkrét növekedését is okozhatja, például ha a talaj szilárd fázisából megoszlással átkerül a talajvízbe és ezzel egy érzékenyebb területhasználatot (vízbázis) veszélyeztet. A talajban kötött és csak kis kockázatot jelentő hidrophil szennyezőanyag a vízbe átkerülve, abban elviselhetetlenül nagy kockázatot eredményező koncentrációt érhet el. További veszély, hogy a felszín alatti vízzel tovaterjedve érzékenyebb területekre is eljuthat, felhalmozódhat vagy belőle toxikus bomlási vagy átalakulási termékek jöhetnek létre. Végül fel kell hívnunk a figyelmet a hígulós koncentrációcsökkenést kísérő területnövekedésre, amely ha nem is elviselhetetlen, de a területen emelkedett kockázati szintet jelent, és globálisan is a háttértértekek megemelkedéséhez vezet, mely az ökológiai trendek katasztrofális felgyorsulását eredményezheti.

Ezért is nagyon fontos, hogy talajszennyezettség megítélése esetében ne csak a koncentrációt, hanem a környezetbe kikerült egész mennyiséget vegyük alapul. Valódi mennyiségcsökkenéssel járó természetes átalakulás a szennyezőanyag bomlása (fizikai, kémiai, biológiai) és a hozzáférhető mennyiség csökkenése (fizikai-, kémiai- biológiai immobilizáció). Ezek a folyamatok akkor jelentenek valódi kockázatcsökkenést, ha a mennyiségcsökkenés a potenciális káros hatások csökkenését is jelenti: bomláskor nincs toxikus közti- vagy melléktermék, és az immobilizáció irreverzibilis.

2.1. A talajban lejátszódó folyamatok

Tekintsük át a szennyezőanyagokkal a talajban lejátszódó legfontosabb folyamatokat fizikai-kémiai és biológiai folyamatokra osztva.

1. Fizikai-kémiai folyamatok a talajban:

- Mechanikai terjedés
- Párolgás-lecsapódás
- Oldódás-kicsapódás, hígulás
- Diffúzió
- Szorpciós-deszorpciós folyamatok, fázisok közötti megoszlások
- Abiotikus reakciók (fotokémiai, hidrolízis, oxidáció-redukció, stb.)
- Kőzetek mállása, talajképződési folyamatok
- Humuszképződés és fosszilizáció
- Humusz szétesés és podzolosodás

3. Biokémiai és biológiai folyamatok

- Az ökoszisztéma, a mikroorganizmusok adaptálódása
- Extracelluláris enzimes folyamatok
- Mikrobiológiai átalakítás, mineralizáció, kometabolizmus
- Bioakkumuláció, biomagnifikáció

A talajban lejátszódó folyamatok egy része tulajdonképpen folyamat-pár, amely az egyensúlyi viszonyoktól függően egyik vagy másik irányba eltolva fejtik ki hatásukat, egy homeosztatikus plató beállítására törekedve. Ezeket a folyamatokat az egyensúlyt befolyásoló paraméterek segítségével lehet irányítani. Az ellentétpár nélküli, vagy eleve egyik irányba eltolódott, főleg terjedési és hígulási folyamatok esetében a forrás megszüntetése és a fizikai-kémiai gátak jelenthetnek elsősorban megoldást.

A természetes folyamatok eltérő jellegzetességeket mutatnak a degradálható (főleg szerves) és a nem degradálható (pl. toxikus fémek) szennyezőanyagok esetén. Érdeemes megkülönböztetni a telítetlen, háromfázisú talajban és a vízzel telített kétfázisú talajban, illetve az üledékekben lejátszódó folyamatokat, hiszen azokban az eltérő redoxpotenciál miatt más jellegű fizikai-kémiai és biológiai folyamatok dominálnak.

A természetes folyamatok legtöbbje ambivalens a környezeti kockázat szempontjából, szerencsés esetben csökkentik, de növelhetik is a környezeti kockázatot. A monitorozásnak és az emberi beavatkozásnak a hasznos folyamatok felgyorsításán kívül a kockázatot növelő folyamatok visszaszorítása is célja. A természetes folyamatok közül kiemelendő a mobilizálódás, mely a szennyezőanyag-csökkenésnek és a legtöbb bioremediációs technológia alkalmazásának előfeltétele, ugyanakkor kockázatot előidéz, illetve növelő tényező. Ezért a természetes folyamatok, köztük a mobilizálódás megítélésének mindig kockázatfelmérésen kell alapulnia.

2.2. A mobilizáció

- A mobilizációval kapcsolatban mindig felmerülnek az alábbi kérdések:
- Mobilizálható-e a szennyezőanyag és milyen mértékben?
- Történik-e mobilizáció a szennyezett területen?
- Egyensúlyt tart-e az immobilizáció a mobilizációval?
- A terület ökoszisztémája szempontjából káros-e vagy hasznos-e a mobilizáció, illetve a károk és hasznok hogyan viszonyulnak egymáshoz?
- A területet használó ember szempontjából káros mértékű-e a mobilizáció?
- Képezheti-e a mobilizáció a területspecifikus remediációs technológiák alapját?
- Képezheti-e az immobilizáció a területspecifikus remediációs technológia alapját?
- Fizikai-kémiai vagy biológiai mobilizáció dominál-e?
- *In situ* technológia esetében jelent-e kockázatot a technológia alkalmazás során?
- Mérhető-e a mobilizáció mértéke, az állandó-e, csökkenő vagy növekvő tendenciájú?
- Milyen műveletekkel, adalékokkal növelhető vagy csökkenthető a mobilizáció a szóban forgó területen?

A mobilizáció összetett folyamat, része a párolgás, az oldódás, a megoszlás, a legtöbb transzportfolyamat és a biodegradáció, hozzájárul a szennyezőanyag kémiai formájának megváltozása, amely viszont a külső körülmények függvénye.

A mobilizáció gyakran spontán lejátszódik egy szennyezett területen, de előfordul az ellenkezője is, vagyis a spontán immobilizáció.

A spontán lezajló mobilizálódás befolyásolható a külső körülmények megváltoztatásával (pH, redoxpotenciál, szorpciós viszonyok) és csökkenthető fizikai vagy hidrogeológiai gátak létesítésével (talajvízszint-csökkentés, résfalak kialakítása) vagy kémiai immobilizálással.

A mennyiben a mobilizáció káros, a kockázat mértékének felmérése után intézkedésekkel vagy segédtechnológiákkal mértékét csökkenteni kell.

Amennyiben a mobilizáció hasznos és a remediációs technológia alapját képezi, akkor mértékének felmérésére és növelésére van szükség.

A mobilizáció lehet hasznos és káros egyszerre, ezért mérésére és befolyásolására megfelelő módszereket kell kidolgozni és alkalmazni.

3. A természetes folyamatok követésének metodikai háttere

Ebben a fejezetben, mielőtt néhány konkrét, laboratóriumi és szabadföldi kísérlet példáján mutatnám be a természetes folyamatokat és azt, hogy azok hogyan csökkenthetik, vagy esetleg növelhetik a talaj szennyezőanyagainak környezeti kockázatát, annak a metodikának az ismertetésére térek ki, mely szükséges és lehetővé teszi a talajban lejátszódó természetes folyamatok tanulmányozását, a terület egészének és a talaj működésének megértését és az eredmények helyes feldolgozását és interpretálását.

Az ismertetendő kísérletek és a környezetben folyó folyamatok megítéléséhez alapvető fontosságú a koncepció és a metodika, amelyet a szennyezőanyag kockázatának megítéléséhez és felméréséhez használunk. Az **integrált kockázati modell** egyesíti a szennyezőanyag forrásból kiinduló terjedésének modelljét és a szennyezett területre jellemző területhasználatokból adódó expozíciós útvonalakat (1). **Integrált módszeregyütttest** alkalmazunk mind a szennyezett terület felmérésében, mind a technológia- mind pedig az utómonitoringban (2). Ennek lényege, hogy a hagyományosan ismert és alkalmazott fizikai-kémiai analitikai eredményeket biológiai és ökotoxikológiai eredményekkel egészítjük ki, hogy teljesebb képet kapjunk a szennyezett talaj fekete dobozáról, erről a komplex rendszerről, melyben a szennyezőanyag sokkomponensű keveréke kölcsönhatásba kerül a talaj fizikai fázisaival és a talaj élővilágával, ezzel a folytonosan változó, flexibilis és adaptív közösséggel, mely a túlélés érdekében gondoskodik a szennyezőanyag energiává alakításáról vagy stabilizálásáról, semlegesítéséről.

Az integrált módszeregyüttessel nyert eredmények interpretálására egyik legjobb eszköz a **kockázati profil**, vagyis a környezeti kockázat időbeni változását mutató görbe felvétele (3). A környezeti kockázat $RQ = PEC/PNEC$ (az előrejelezhető környezeti koncentráció és az előrejelezhetően károsan még nem ható koncentráció hányadosa) definíciójából következően időben változó mértékű lesz, melynek előrejelzése mind a teendők, mind a hosszú időt igénybevevő kezelés közbeni területhasználatok tervezését lehetővé teszi. De még ennél is többre használható, ha figyelembe vesszük, hogy pl. terjedési modellezéssel az időskálának megfelelő térbeli koordináta-rendszert is alkalmazhatunk és ezzel a kockázat időbeni változásán kívül a térbeni eloszlást is feltérképezhetjük, vagy fordítva a térbeli eloszlásból következtethetünk az időbeni kockázati profilra.

Az integrált kockázati modellt a terület és a szennyezőanyag alapos ismeretében tudjuk felvenni. Egyesíti a terjedési és az expozíciós modellt. Azonos modell szükséges a kvalitatív és a kvantitatív kockázatfelméreéshez. Koncepció-s modellnek is nevezik, pedig nem a mi koncepció-nkat kellene tükröznie, hanem a szóban forgó területet, a szennyezőanyagot és a kettő kölcsönhatásait.

Az integrált mérési metodika azt jelenti, hogy nem elegendő a terület felmérése és a folyamatok követése (terület és a technológia monitoringja) során a fizikai-kémiai analízis kapott eredményeire alapozni, de központi szerepet kell kapniuk a megítélésben a talaj biológiai állapota, a „cell factory”, a talaj mikroflórájának működésére vonatkozó információk és a környezetoxikológiai eredmények, melyek a szennyezőanyag hatását tükrözik. A hatásról ma már tudjuk, hogy sokban független a fizikai-kémiai mérési eredményektől, hiszen mérhetetlenül kis koncentrációban jelen lévő szennyezőanyagok is lehetnek elviselhetetlen mértékben káros hatásúak, és a szennyezőanyagok nagy részét be sem

tervezzük az analitikai programunkba. Tovább bonyolítják a képet az egyes szennyezőanyagok egymással és a talajmátrixszal lehetséges kölcsönhatásai, melyek lehetnek egymást erősítő, gyengítő vagy akár kioltó hatások, előre nem jelezhető bonyolult kölcsönhatások eredményeképpen.

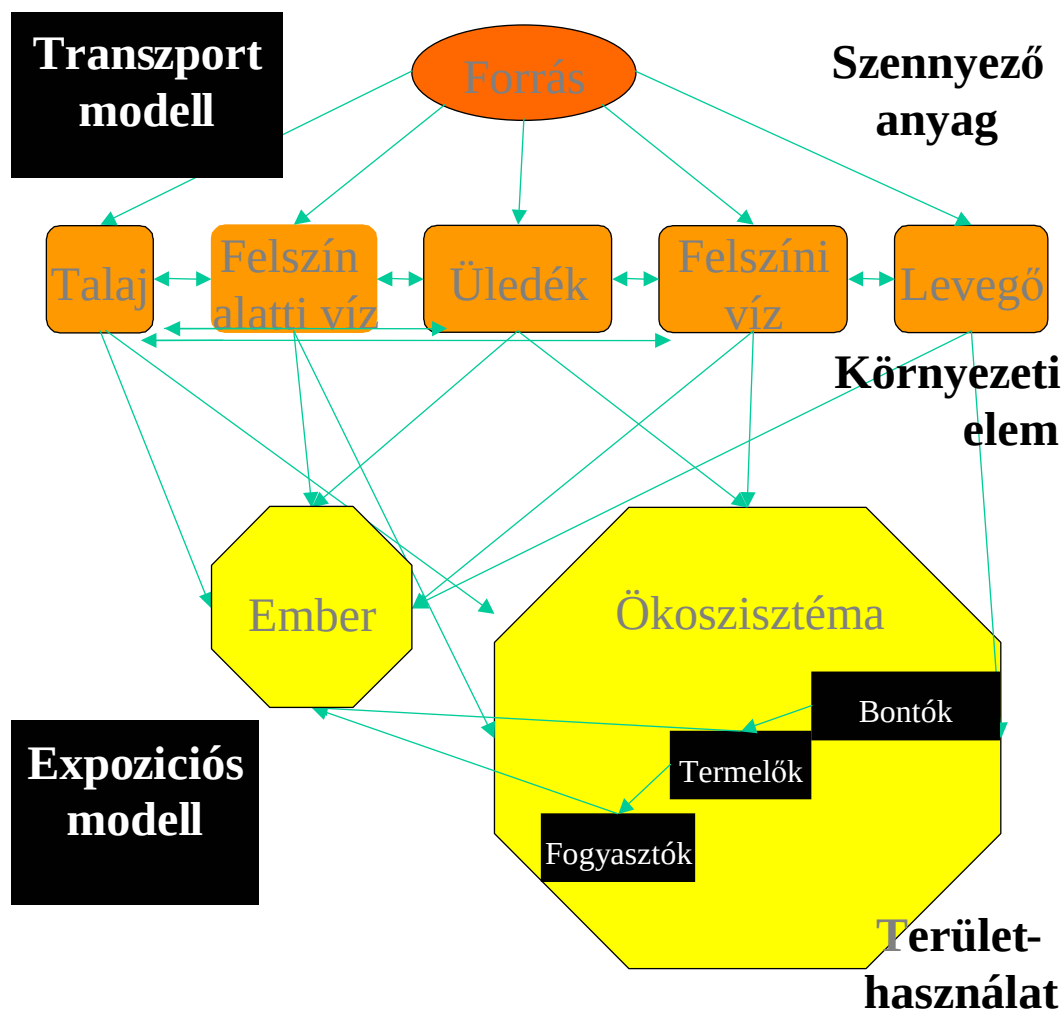
Az integrált metodikával kapott koncentráció és hatás eredményekből meghatározható a kvantitatív környezeti kockázat, melynek időbeli változása a **kockázati profil**, melynek felvétele a szennyezett területek menedzsmentje során szükséges döntések közvetlen alapját képezheti.

3.1. Az integrált kockázati modell.

Integrált Kockázati Modell

Elvi felépítés

(lehet általános vagy helyszín)



2. ábra: Az integrált kockázati modell

Az integrált kockázati modell egyesíti a terjedési modellt és az expozíciós modellt. A forrásból kiindulva modellezi a szennyezőanyag terjedését, megadva az anyag által elérhető környezeti elemeket. A nyílak vastagsága arányos az anyagáramokkal. A szennyezett környezeti elemek használatából adódó kitettséget az expozíciós modell mutatja, melyen az ökoszisztéma tagok és az ember egyaránt szerepel, mint kockázatviselő célszervezet (receptor). Az integrált kockázati modell a kölcsönhatások feltüntetését is lehetővé teszi, mind a környezeti elemek, mind pedig a receptorok esetében. A területspecifikus kockázati modell helyi hidrogeológiai, meteorológiai, klimatikus jellemzőkkel, a helyszínen azonosított szennyezőanyaggal és kölcsönhatásokkal dolgozik. Különösen fontos a vízrendszer jellemzése, a felszíni és felszín alatti vizek elhelyezkedése, szintje, az áramlási viszonyokat meghatározó talaj- és talajvízjellemzők. Felméri a helyi területhasználatokat, különösen koncentrálva a vízhasználatokra, a veszélyeztetett ökoszisztémát, a helyi lakosság összetételét, a helyi lakosság fogyasztási szokásait, életmódját, stb.

3.2. Az integrált metodika

Az integrált módszeregyüttes olyan összetett információt ad a szennyezett terület vagy környezet állapotáról, amely közvetlenül kapcsolatba hozható a szennyezett terület *környezeti kockázatával*. Többletinformációt ad mind a kémiai analitikai, mind a biológiai vagy ökotoxikológiai eredményekhez képest.

Kémiai analitikai módszerek önmagukban

- A szennyezőanyagok feltárás és kivonás után mérhető koncentrációját határozzák meg.
- Az analitikai programban szereplő komponensek koncentrációját mérik.
- Nem mérik a biológiai hozzáférhetőségtől függő aktuális toxicitást.
- Nem következtethetünk az ökoszisztémára gyakorolt (káros) hatásra.
- Nem veszik figyelembe az esetleg jelenlévő egyéb vegyi anyagokat és kölcsönhatásokat (antagonista, additív, szinergikus).

Biológiai-ökotoxikológiai módszerek

- Kiegészítik a kémiai felmérést és monitoringot.
- Többletinformációt szolgáltatnak a szennyezőanyagok káros hatásáról, biodegradálhatóságáról, bioakkumulációjáról, valamint a kölcsönhatásokról.

eredménye együttes biológiai $K = B$

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1) Mindkettő kis értéket ad | A terület környezeti kockázata kicsi |
| 2) Mindkettő nagy értéket ad | A környezeti kockázat nagy |

$K > B$

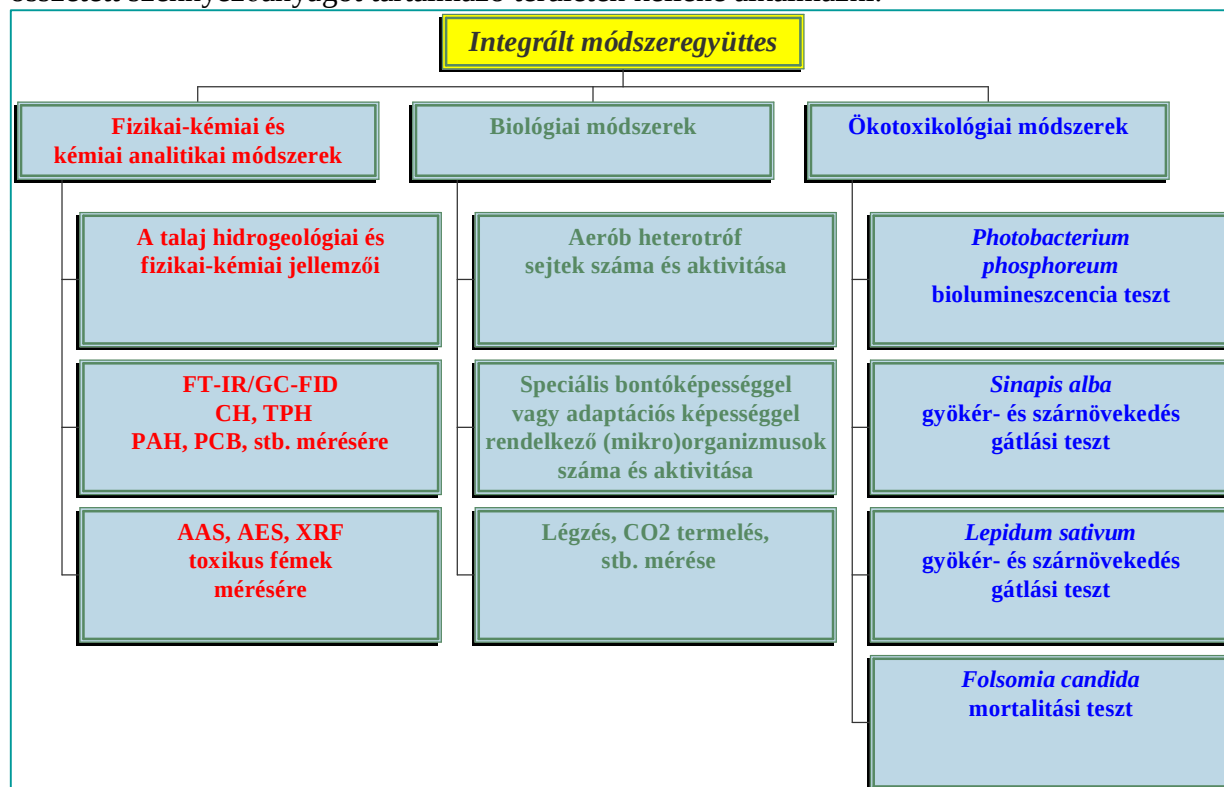
- | | |
|---|--|
| 1) A vegyi anyagnak nincs káros hatása, | Kevésbé kockázatos szennyezett terület |
| 2) Biológiaiilag nem hozzáférhető anyag | Kémiai időzített bomba! Nagy kockázat |
- A hozzáférhetőséget befolyásoló mechanizmusok ismerete fontos!

$K < B$

- 1) Régi szennyezett területek felmérésekor nincs azonosítva az összes biológiai hatással rendelkező vegyi anyag

2) Toxikus metabolitok keletkeztek

Ilyenkor az ökotoxikológiai eredménye az indikátor. Minden régi, ismeretlen, vagy összetett szennyezőanyagot tartalmazó területen kellene alkalmazni.

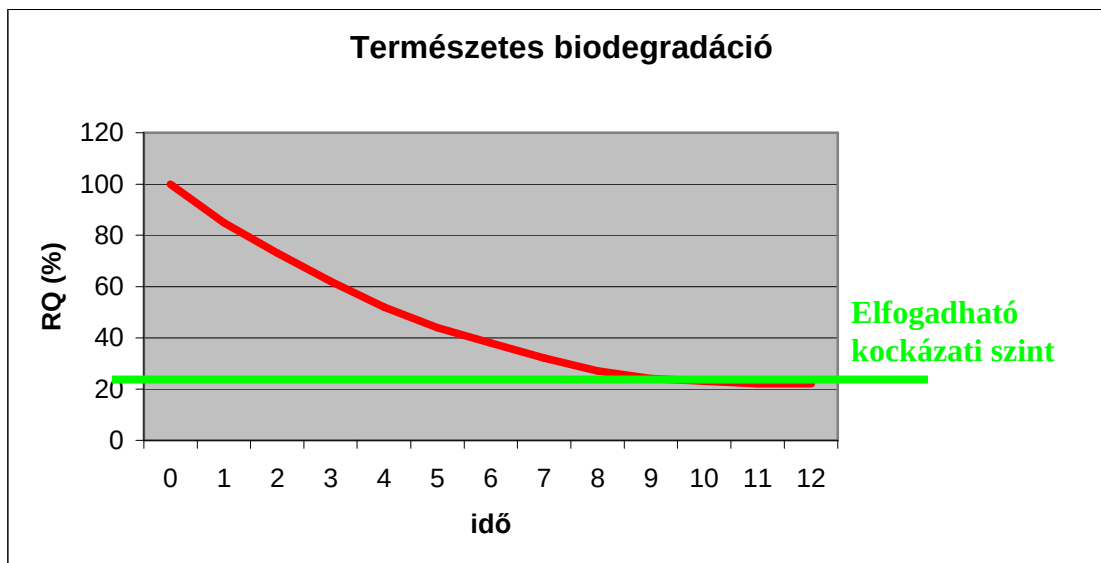


Kockázati profil a környezeti kockázat időbeli változását mutatja (3). Előrejelzésről van szó, mint a kockázat esetében mindig. Vagyis arról, hogy az előre jelezhető kár nagysága hogyan változik, csökken vagy nő az időben.

A kockázat kvantitatív változásának időbeli lefutását mutatja. A kvantitatív kockázatot a PEC/PNEC tört alapján jellemzzük, vagyis az előre jelezhető környezeti koncentráció és az előre jelezhetően károsan még nem ható koncentráció hányadosaként (4).

A kockázat időbeni lefutása mutathat egyenletesen csökkenő vagy növekvő kockázatot, ugrásszerű vagy átmeneti változásokat.

Szerves szennyezőanyagok természetes biodegradációja és megfelelő technológiai paraméterekkel gyorsított biodegradáció előbb-utóbb kockázatcsökkenéshez vezet (5). Ideális bontó mikroflóra esetében (talaj, talajvíz, üledék) egyenletesen csökkenő kockázatot is el lehet érni, amint azt a 4. ábra szemlélteti, de ha toxikus köztitermékek vagy végtermékek keletkezésével kell számolnunk, akkor átmenetileg nőhet is a kockázat csökkenő trendre szuperponálódva.

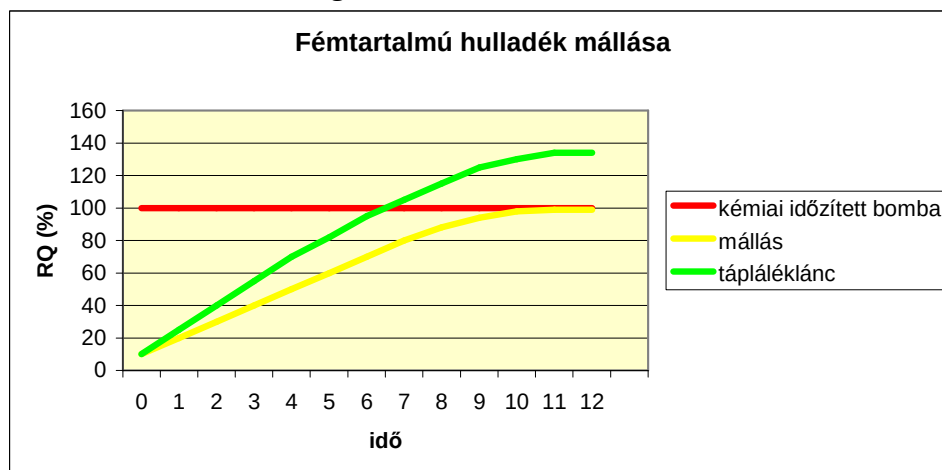


4. ábra: A kiegyensúlyozott természetes biodegradáció kockázati profilja

Tipikus kockázatonövekedést mutató görbét eredményeznek a toxikus fémeket tartalmazó szennyezőforrások, hulladékok, közetek, üledékek, mert ezek feltáródása, mállása a bennük lévő fémek fokozatosan növekvő mobilitását eredményezik (8). Hiába csökken a fémkoncentráció a forrásban növekvő kockázatot fog eredményezni a forrás környezetében, mert a fém megváltoztatja mobilitását, hozzáférhetőségét. A kockázati görbe ilyenkor a forrásban előforduló maximális fémtartalomtól adódó, annak teljes mértékben hozzáférhetővé válása alapján kalkulált, maximális kockázat értékéhez tart (kémiai időzített bomba), amint azt az 5. ábra mutatja.

A 5. ábrán zölddel jelölt görbe a biomagnifikációból, vagyis a szennyezett terület ökoszisztémájának tápláléklánca mentén megjelenő hatványozódó bioakkumulációból adódó kockázatot is magába foglaló profilt mutatja, amely a talajban maximálisan megjelenő kockázathoz képest további növekedést eredményezhet.

A kockázati profil változása alapján tervezhetjük meg a szükséges technológiai beavatkozást, a monitoringrendszert és a megengedhető területhasználatot. Ezek együttesen pedig kiadják a remediációs technológia költségeit, illetve a hasznokat. A kockázati profil tehát közvetlenül felhasználható a költségek becslésére is.



5. ábra: Fémtartalmú bányászati hulladék mállása során kialakuló kockázati profil

Miből tevődik össze a remediáció költsége?

1. A berendezés létrehozásának, telepítésének vagy bérelésének árából.
2. Az alkalmazandó technológia paraméterei és a rendelkezésre álló idő egyértelműen megszabják a technológia működtetési költségeit.
3. Az alkalmazandó technológia saját kockázatának csökkentése is költségtényező.
4. A költségek tetemes részét képezheti a technológia monitoring.

Miből adódnak a hasznok?

1. A szennyezettség megszüntetéséből adódó értéknövekedés.
2. A remediáció során megengedett területhasználat.
3. A remediáció utáni értékesebb területhasználat.
4. A szennyezőanyag hasznosítása.

Valamennyi költségnövelő és költségcsökkentő tényező befolyásolható és optimálható. Az eszközök a környezetmenedzsment eszközeivel azonosak: kvantitatív felméréseken (kockázat, költség-haszon) alapuló döntéseket követő intézkedések, korlátozások, technológiák alkalmazása, területhasználatok és tulajdonviszonyok megváltoztatása.

Költségek befolyásolása:

Az 1. ábrán bemutatott beavatkozások fokozatai balról jobbra növekvő költségeket, ugyanakkor az időigény csökkenését jelentik. A fokozatok megfelelő megválasztásával és szükség esetén megváltoztatásával befolyásolhatjuk a költség- és az időigényt.

A célérték is jelentősen befolyásolja a költségeket, de egyben a jövőbeni területhasználatot is: kisebb célérték nagyobb költséget, hosszabb időt, stb. igényel, de értékesebb terület-használatot tesz lehetővé. Ennél a döntésnél a mérleg nyelvét a jövőbeni területhasználat fogja elbillenteni. Ha értékes területhasználat van kilátásban nagyobb költséget is elbír a terület, és fő cél lehet, hogy minél előbb sor kerüljön az értékes(ebb) területhasználatra.

Ezt a gondolatot meg is lehet fordítani, és sokszor meg is kell: ha sokba kerül egy terület remediációja tervezzünk rá értékes használatot, hogy legyen haszon, amire megelőlegezhetőek a költségek. Ezt a területfejlesztést tervezőknek kell a kockázatmenedzsmenttel közösen meghatározniuk.

Egy remediációs technológiának magának is van környezeti kockázata, hiszen a szennyezett terület megbolygatása, a szennyezőanyag mobilizálása, ha csak átmenetileg is, de szükséges műveletek lehetnek. A technológia saját kibocsátásának mérése (monitoringrendszer) és kockázatának követése minden remediációhoz kötelezően kapcsolandó tevékenység, még a természetes remediációs, öngyógyító folyamatokra alapozó technológiáknál is (monitorozott természetes szennyezőanyag-csökkenés: MNA).

A szennyezett terület kockázatának átmeneti növekedése több tényezőtől is függ, így a terület hidrogeológiai jellemzőitől, a szennyezőanyag változásain keresztül a beavatkozás típusáig. A rendszer összetettsége miatt a kvantitatív előrejelzés nem könnyű feladat, ezért az automatikus kibocsátás-megelőzés szokott a megoldás lenni, ami esetenként túlbiztosítást, emiatt többletköltséget eredményezhet.

A technológiamonitring jelentős költséget tehet ki abszolút értékben is, de a remediációs technológiához viszonyítva annál nagyobb, minél olcsóbb technológiát alkalmazunk, tehát relatíve a MNA-nál lehet a legnagyobb. *In situ* bioremediációnál az utómonitoringgal azonos elrendezésű monitoringrendszer felállítása nem jelent többletkiadást csak a működtetését kell számításba venni.

A költségeket csökkentő vagy hasznot hozó gazdasági tényezőkre koncentrálva ki kell emelni a remediáció során történő területhasználatot, amely valószínűleg nem teljes értékű vagy nem a végleges területhasználat, hanem egy átmeneti, kisebb igényű területhasználat, mégis jelentős hasznot eredményezhet.

A kataszterbe bejegyzett szennyezettség direkt értékcsökkentő tényező, mely bejegyzés a terület remediálása után megszűnik, a terület visszanyeri eredeti területhasználatához tartozó értékét. Amennyiben a területhasználat megváltozik, az érték az új használat szerinti értéken lesz nyilvántartva és jelenik meg a piacon. Ennek természetesen feltétele, hogy a terület az új területhasználatához illeszkedő remediációs célértéket érje el a kezelés után.

A hasznok oldalát növelheti a remediáció során keletkező termék hasznosítása is. Ez lehet a kinyert vagy átalakított szennyezőanyag, pl. leföldrött és tisztított olaj, vagy a kezelt talajból esetleg annak valamely részéből előállított termék, pl. homok, vagy más építőanyag, steril talaj, stb.

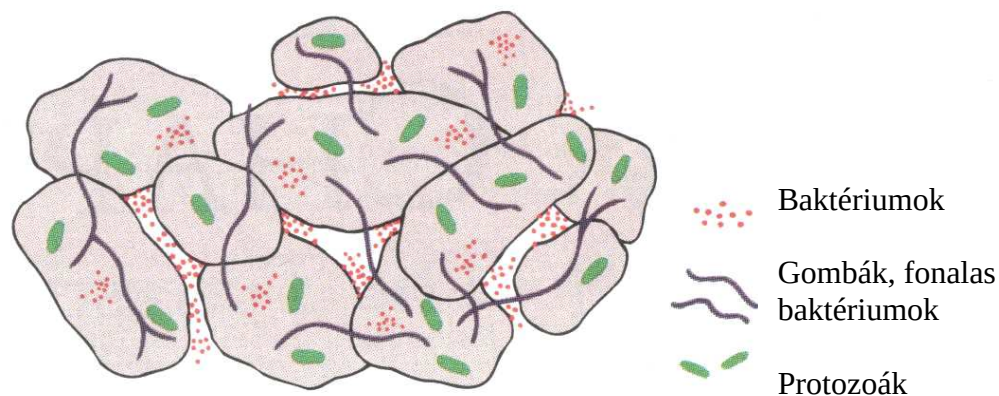
4. Természetes szennyezőanyag-csökkenés és annak intenzifikálása szerves szennyezőanyagokkal szennyezett talaj esetében

A talajban lejátszódó fizikai-kémiai és biológiai folyamatok együttes eredménye szerves anyagokkal szennyezett területeken leggyakrabban a kockázat csökkenését eredményezi. Alapvető fontosságú folyamatok a szennyezőanyag mobilizálódása, azon belül is a fázisok közötti megoszlása és biodegradációja. Természetes kísérőfolyamatként mindig jelent van a terjedés és a hígulás, melyeket szintén figyelembe kell venni a modellezésnél és a számításoknál. A mobilizálás/immobilizálás és a biotranszformáció / biodegradáció folyamatokban központi szerepet játszik a talaj mikroflórája.

4.1. A talaj mikroflórája

A talaj mikroflórája a „soil cell factory”

- több mikroorganizmus faj egy komplex és flexibilis keveréke, melynek
- hatalmas genetikai és biokémiai potenciálja van,
- magas szintű együttműködésre képes,
- jól fejlett alkalmazkodó képességgel és viselkedéssel rendelkezik.



6. ábra: A talajmikroflóra elhelyezkedése a talaj mikroszemcséin és azok között

A jól jellemzett és monitorozott természetes szennyezőanyagcsökkenés megfelelően szolgálhatja az intenzifikált NA és az *in situ* bioremediáció alapját. Utóbbi kettő már aktív biotechnológia, irányított technológiai paraméterekkel.

- Ezekben a technológiákban a talaj saját mikroflórája játssza a központi szerepet.
- A technológus optimális működési feltételekkel támogatja a talajmikroflóra hasznos tevékenységét.
- A technológus növeli a degradációs aktivitásokat, a mobilizáció vagy immobilizáció mértékét, a fitoextrakció hatékonyságát, stb.
- A technológus csökkenti a remediáció időszükségletét
- Elfogadható szintre csökkenti a terület és a technológia környezeti kockázatát.

Az ökomérnöki technológiák központi törzsét adó élő közösséget a technológus az alábbiakkal támogathatja:

- A technológiai paraméterek optimalizálásával, pl. pH, oxigén- és tápanyag-ellátottság, nedvességtartalom, alternatív elektronakceptorok, stb.
- A szűk keresztmetszetek azonosításával
- A szűk keresztmetszetek megszüntetésével.

A talaj mikroflórájának hatalmas genetikai és biokémiai potenciálját és annak a szennyezőanyagokhoz való folyamatos adaptációját különböző szintű folyamatok biztosítják:

- A közösség fajeloszlásának megváltozása
- Adaptív enzimek, enzimszisztemek bekapcsolása
- Természetes mutációk és azt követő szelekciók
- A mutációs ráta megnövekedése
- Horizontális géntranszfer.

Ezen folyamatok megismerése és felhasználása a ökológiai technológiákban a génmérnökök előtt álló aktuális feladat.

4.2. Az ökomérnöki technológiák előnyei és hátrányai

Előnyök:

Környezeti, ökológiai előnyök

- A szennyezőanyag teljes életciklusa bezárul, alkotóelemei visszakerülnek a földi elemkörforgalomba
- A szennyezőanyag hatástalanodik
- A talajélet csak minimális bolygatást szenved
- Megmarad a talaj élővilága és funkciója
- Viszonylag kis környezeti kockázatot eredményez

Gazdasági előnyök

- Kis költséggel járó technológiák
- A szennyezőanyag a biotechnológia szubsztrátja
- Mind aerob, mind anaerob körülmények között alkalmazhatóak
- A technológiai környezet biológiai, azaz enyhe körülmények jellemzik
- Folyamatosan használható a terület
- Kicsi a környezeti és gazdasági kockázat

Hátrányok:

- Hosszú időtartam
- Maradék szennyezettség és annak megfelelően maradék kockázat előfordulhat
- Tudásunk a talaj mikroflórájának működéséről és a természetes folyamatokról kezdetleges

Ha egy talaj szennyeződik, a talaj mikroflórája azonnal reagál, adaptálódni kezd az új körülményekhez, az idegen anyag jelenlétéhez. Könnyen biodegradálható szennyezőanyag esetében a szennyezőanyag bontásához szükséges adaptív enzimeket termelni képes fajok aktiválódnak, majd feldúsulnak, a közösség fajeloszlása ezek javára megváltozik. Például, a Diesel-olaj könnyen bontható szennyezőanyag. Hatására a talajban élő és olajbontásra képes sejtek száma 10^2 – 10^3 db sejt/g talaj értékről néhány napon belül 10^5 – 10^7 db sejt/g talaj értéket érhet el.

A természetes biodegradáció mértéke nagyban függ a talaj típusától, levegőgazdálkodásától és tápanyag-ellátottságától. Ezen jellemzők könnyen válhatnak limitáló tényezővé a spontán bomlás során, de ha megfelelő időben és megfelelő mennyiségben rendelkezésre állnak, akkor a biodegradálható szerves anyag széntartalmából aerob körülmények között végső soron CO_2 -t és vizet termelnek a felszaporodó, bontásra képes mikroorganizmusok.

5. Szerves szennyezőanyaggal szennyezett talajok intenzifikált biodegradációja

Ebben a fejezetben a szerves szennyezőanyaggal szennyezett talaj természetes mikroflórájának működésén alapuló technológia-alkalmazásokat mutatok be. Az

esettanulmányok elsősorban a telítetlen talajfázis szennyezettségével foglalkoznak, vagyis olyan esetekkel, ahol háromfázisú talajban folyik a biodegradáció.

A telített talajban folyó természetes szennyezőanyag csökkenés viszonylag jobban ismert folyamat, hiszen az abban lejátszódó folyamatok (felmérése, követése, modellezése) a kiszivattyúzott talajvíz kémiai analízisével viszonylag jól követhetőek a szennyezőanyag koncentrációjának csökkenésével párhuzamosan mért hidrogén-akceptorok minősége és mennyisége alapján. Természetesen ott is bonyolultabb a helyzet, mint, amire a vízminták analíziséből következtethetünk, mégis modellezhetjük és kezelhetjük a rendszert, mint egy kvázi vízfázisú kevert reaktort, de finomított modellek a határfelületeken lejátszódó folyamatok megkülönböztetésére is képesek (keveredés modellezése). Mindazonáltal az anyagcseretermékek ismeretében a telített talajban lejátszódó folyamatok negatív redoxpotenciálú oldatokban lejátszódó, viszonylag lassú biodegradációs folyamatok, melyeknél a terjedés és a biodegradáció szerencsés esetben azonos nagyságrendbe esnek, és a biodegradáció kompenzálja vagy kissé túlkompensálja a terjedést, ami a szennyezőanyag vízzel terjedő csóvájának kontrollját jelenti, és a talaj felületétől izolált, mélyebb rétegeit érinti. A forrás utánpótlódásának megszüntetését követően ezek a folyamatok természetes szennyezőanyag csökkenéshez vezetnek. A folyamatok intenzifikálása a talajvízbe injektált adalékanyagok (elsősorban H-akceptor) alkalmazásával viszonylag könnyen elérhető. A talajvízben a pH és a redoxpotenciál is könnyen mérhető, mely orientáló a folyamatok állását és a telített talaj biodegradációs potenciálját illetően.

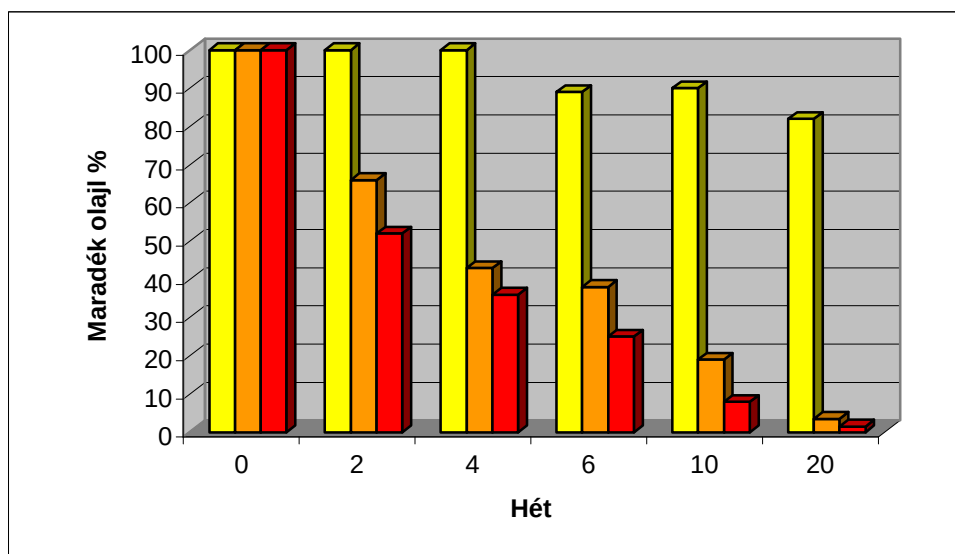
Más a helyzet **a telítetlen talaj** esetében, amikor az oxigén a talajlevegőből származik és a biodegradációs mikrobiológiai folyamatok sebessége nagyságrenddel nagyobb a talajvíz határfelületen lejátszódó folyamatokhoz képest. A telítetlen talajnál a C, N és P anyagcserébe belejátszik mindhárom talajfázis oldott és mobilizálható anyagtartaléka, beleértve a humuszanyagok mobilis és kevésbé mobilis frakcióit is. A folyamatok követésére mindhárom fázis jellemzőit követni kell, így a talajlevegő, a talajnedvesség és a talaj szilárd fázisát. A negyedik fázisról sem szabad megfeledkeznünk: a biotáról, a talaj élővilágáról, mely a telítetlen talajban grammonként milliárdos sejtkoncentráció-nagyságrendet jelent.

5.1. Jól biodegradálható szennyezőanyag spontán biodegradációja telítetlen talajban

Egy konkrét tatabányai Diesel-olaj + motorolaj szennyeződés kapcsán laboratóriumi mikrokozmoszban összehasonlító vizsgálatot folytattunk a levegőztetés és a tápanyag-adagolás intenzifikáló hatásának felmérésére (3), hogy a tervezett szabadföldi kísérletekben a modellkísérlet eredményei alapján választhassuk meg a technológiai paramétereket. A kiindulási szennyezettség 20 000 mg/kg érték volt, az 1. táblázat a kiindulási érték %-ában mutatja a csökkenést.

1. táblázat: Talaj Diesel + motorolaj-tartalma (GC), laboratóriumi kísérlet során

Hét	Maradék olaj (%)		
	Kezelés nélkül	Levegőztetés	Tápanyag + levegőztetés
2	100	66	52
4	100	43	36
6	89	38	25
10	90	19	8
20	82	3,5	1,5

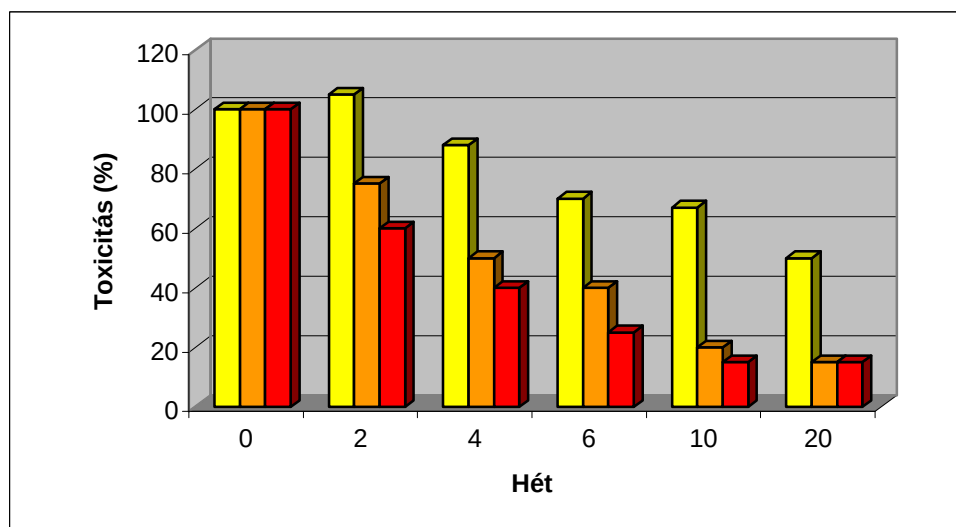


Jelölések:

- Kezelés nélkül
- Csak levegőztetés
- Levegő + tápanyag

7. ábra: Olajtartalom csökkenése intenzifikált természetes biodegradáció során, laboratóriumi mikrokozmosz kísérletben

A talaj adaptálódott mikroflórája és a laboratóriumi technológiai kísérletekben alkalmazott paraméterek jó hatásfokú bontást eredményeztek. A párhuzamosan mért mikrobiológiai aktivitás is alátámasztotta a szénhidrogének bontását, a toxicitás pedig arányos csökkenést mutatott (8. ábra).



Jelölések:

- Kezelés nélkül
- Csak levegőztetés

8. ábra: Intenzifikált természetes biodegradáció: a toxicitás időbeni csökkenése

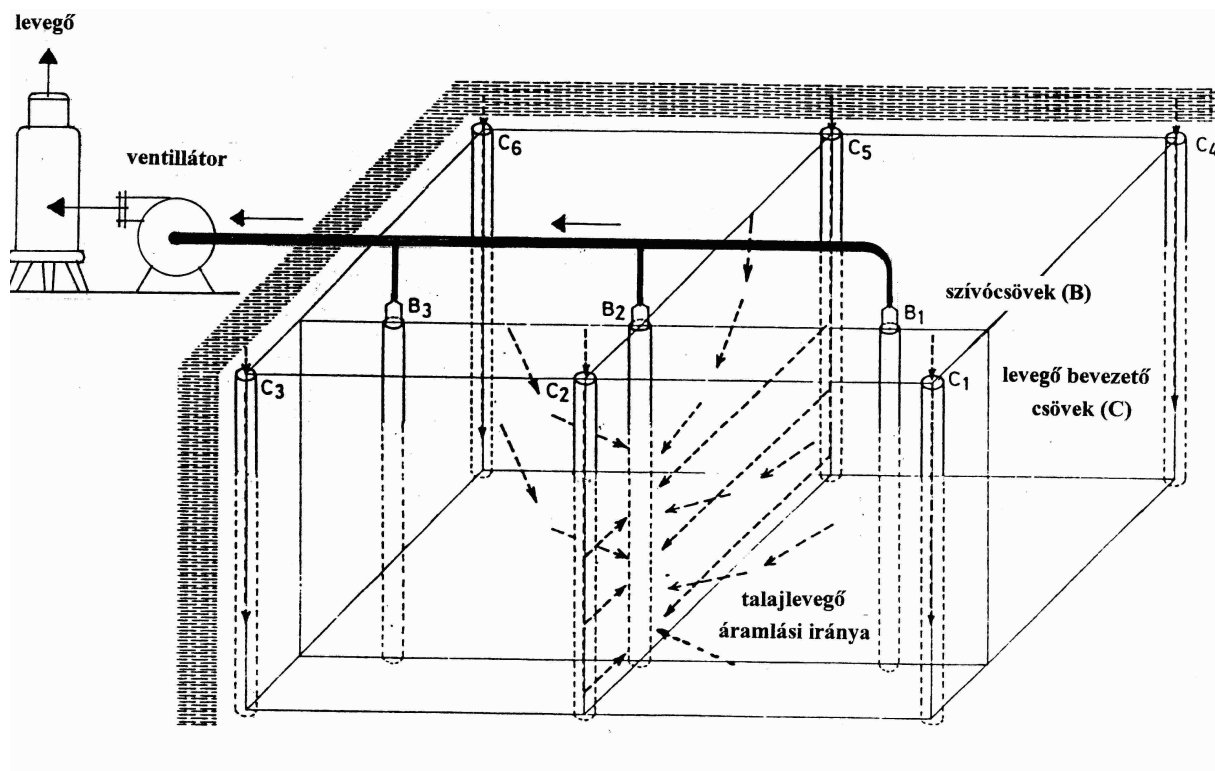
A kísérlet eredményeképpen folyamatosan csökkenő olajtartalmat és folyamatosan csökkenő toxicitást mértünk. A talajmikroflóra jó általános aktivitást és intenzív szénhidrogénbontó képességet mutatott. A szénhidrogénbontó baktériumok száma $10^7 - 10^8$ db / g talaj, tehát magas érték volt.

Ez a kísérlet egy tipikus és pozitív példán mutatja be a talajban spontán folyó biodegradáció kockázatcsökkentő hatását, melyet egyszerű biotechnológiával, a környezetet nem károsító enyhe beavatkozással lehet intenzifikálni, ezzel a kezelés idejét lerövidíteni.

5.2. A bioventillációs technológia

Az eredmények reprodukálhatóak voltak a szabadföldi kísérletben is, ahol *in situ* bioventillációs technológiát alkalmaztunk. Ennek lényege, hogy a telítetlen talaj belsejében, ahol a bontó mikroflóra működését limitáló tényező a légköri oxigén mennyisége, a szennyezett talajtérfogatot enyhe légárammal átszellőztetjük, ezzel a bontó mikroflórát megfelelő mennyiségű oxigénhez juttatjuk, és egyben eltávolítjuk a felgyülemlett széndioxidot. A szellőztetés a kezelt talajtérfogat hézagait kitöltő talajlevegő kiszívását, a hézagterfogatban lévő levegő napi 2–5 cseréjét jelenti, a talajba süllyesztett perforált csőrendszer és szellőztető ventilátor segítségével, amint azt a 9. ábra mutatja.

Talajszellőztetésre alkalmas technológia vázlatát mutatják a 9. ábra valamint a 10 és 11. ábrán látható fotók. A 9. ábra vázlatán látható két levegőztető kútsor segítségével a talaj telítetlen, azaz háromfázisú zónájában cseréljük a levegőt. A középső kútsorból ventilátorral szívjuk ki a használt levegőt. A két szélső sor passzív kútjai a légköri levegő mélyebb rétegekbe vezetéséről gondoskodik. A passzív kútsorok helyett árkot is alkalmazhatunk. A szívott csövekből összegyűjtött levegőt bármilyen gázkezelésnek alávetethetjük, a szennyezőanyag függvényében. Ha nincs illékony szennyezőanyag-komponens, akkor a széndioxid eltávolítása a fő célunk, ilyenkor a kiszívott talajlevegő nem igényel kezelést.



9. ábra: A talajszellőztetés vázlata



10 ábra: Levegőztető kút felszíni csővége és a levegőgyűjtő rendszer

A bioventillációs technológia alkalmazásakor a felszínen megjelenő, a csővégeket és a ventillátorhoz vezető gyűjtő- illetve elosztó rendszert mutatja a 10. ábra. A berendezések célszerű elhelyezése mellett a felszín teljes értékű használata megoldható, hiszen például, átlagos áteresztőképességű talaj esetén, egy 300 m²-es területhez mindössze 6-12 csővég, egy gyűjtőcső és egy ventillátor szükséges. A kutak elhelyezése lehet soros vagy koncentrikus és az elrendezés figyelembe tudja venni a szennyezettség eloszlását, valamint a felszín használatát és elrendezését.

Elmozdíthatatlan műtárgyak alatti kezelés is lehetséges, amint azt a 11. ábrán látható transzformátor alá helyezett bioventillációs technológiáról készült fénykép mutatja.



11. ábra: Bioventilláció egy kiselejtezett transzformátor alatti talajtérfogásban

A perforált béléscsöveket tartalmazó kútrendszer vizes oldatban lévő adalékanyagok talajba juttatására is használhatóak, de meleg levegő és gőzbevezetés is megoldható rajtuk keresztül.

A bioventillációs technológia az 1. ábra osztályozása szerint intenzifikált természetes, *in situ* bioremediációnak tekinthető, tehát az **ENA** (enhanced natural attenuation) és az ***in situ* Bioremediáció** között foglal helyet, a beavatkozás mértékétől függően lehet ENA vagy *in situ* B.

A bioventillációs szabadföldi kísérletek eredménye

A laboratóriumi kísérletek alapján kiválasztott technológiai paraméterekkel végzett szabadföldi kísérletek eredményét a 2. táblázatban foglaltuk össze.

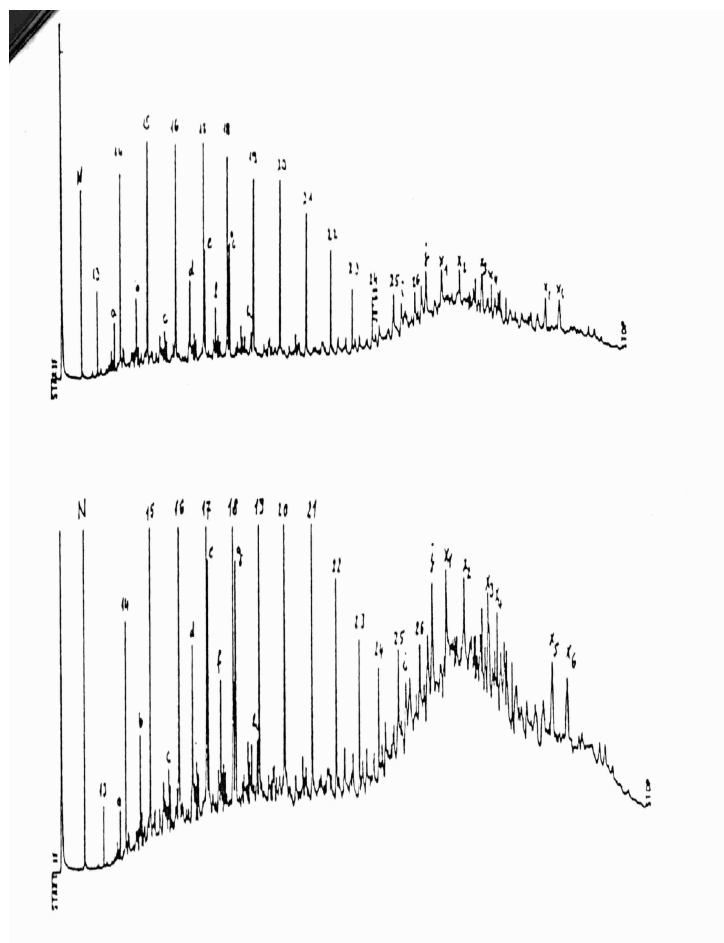
Ez a szennyezési eset és az alkalmazott remediációs technológia pozitív példa arra, hogy a talaj saját természetes mikroflórája tökéletesen alkalmazkodhat a szennyezőanyaghoz, azt

képes energiaforrásként hasznosítani. A technológus enyhe beavatkozásokkal (szellőztetés, N és P műtrágya adagolás) felgyorsíthatja a biodegradációs folyamatot.

2. táblázat: Diesel + motorolaj tartalom a talajban (GC), szabadföldi kísérlet során

Mélység (cm)	C1 pont (mg/kg)		C2 pont (mg/kg)		C3 pont (mg/kg)	
	Indulás	2 hónap	Indulás	2 hónap	Indulás	2 hónap
0–50	3 600	420	6 700	520	650	320
50–100	8 600	1 500	19 500	210	920	310
100–150	12 700	3 360	19 200	540	990	280
150–200	8 800	1 790	18 700	840	960	370
200–250	6 00	1 010	15 000	460	860	110
300–350	3 300	990	400	ny	240	80
350–400	9 600	800	100	ny	650	ny

A szabadföldi kísérletben már két hónap elteltével tetemes olajtartalom csökkenést eredményezett a kezelés. A maradék olaj gázkromatográfiás vizsgálata azt is megmutatta, hogy a szénhidrogén-komponensekben nincs számottevő szelekció, a biodegradáció a mikroflóra természetes adaptációjának köszönhetően, kiegyensúlyozott, emiatt nem dúsultak fel a nehezebben bomtható komponensek,

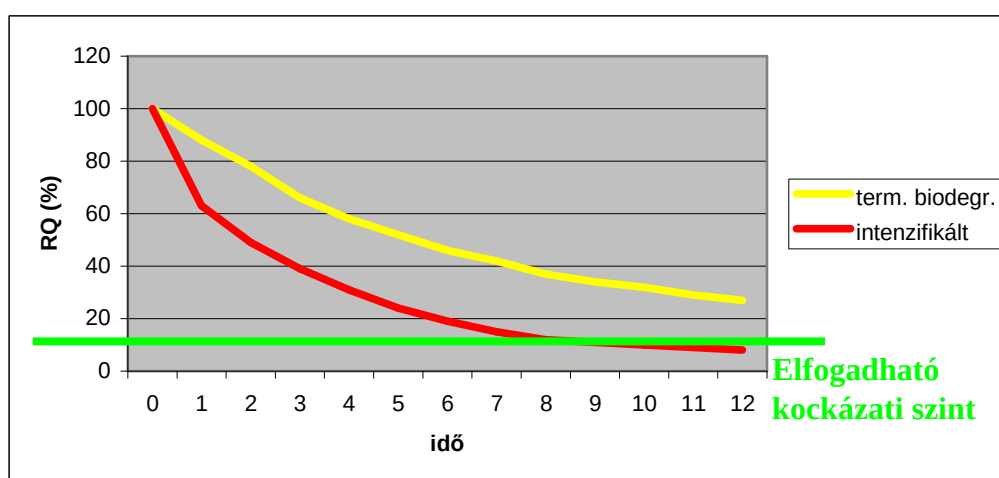


12. ábra: A bioventilláció előtti és utáni szénhidrogén összetétel alig különbözik

A talajban működő mikroflóra kiegyensúlyozott, a sejtkoncentráció nagy, a szénhidrogénkeverék komponenseit azonos sebességgel bontja, a toxicitás folyamatosan csökken. Az eset ideálisnak mondható: megfelelő minőségű és adaptációs képességgel rendelkező mikroflóra enyhe beavatkozás hatására megfelelő intenzitású bontásra volt képes. A beavatkozás a biodegradáció nagymértékű felgyorsulását eredményezte.

5.3. Az intenzifikált biodegradáció kockázati profilja jól biodegradálódó szennyezőanyag és megfelelően adaptálódott mikroflóra esetén

A kockázati profil egyenletesen csökkenő kockázatot mutat, a természetes biodegradáció esetében is, ami a megfelelően adaptálódott talajmikroflórának köszönhető. A természetes biodegradációhoz képest az intenzifikált technológia gyorsabban csökkenő kockázatot eredményez, amit úgy is interpretálhatunk, hogy a levegőztetés és a tápanyagpótlás hatására lényegesen előbb éri el az elfogadható kockázati szintet.



13. ábra: Természetes biodegradáció és intenzifikált természetes biodegradáció kockázati profilja

Az intenzifikálás nélküli természetes biodegradáció kockázati profilja a 13. ábrán látható. Általában csak egészen enyhe csökkenő tendenciát mutat, az elfogadható kockázati szint eléréséhez évekig is szükség lehet.

A kockázat időbeni lefutása csak abban az esetben arányos a koncentrációval, ha a szennyezőanyagból káros hatású melléktermékek vagy végtermékek nem keletkeznek, és ha a szennyezőanyag megoszlási hányadosa és mozgékonyasága nem változik jelentősen a folyamat során. A példaként felhozott esetben a kockázat és az előrejelezhető koncentráció szoros összefüggésben van, ezért vett fel a kockázati profil jellegzetesen exponenciálisan csökkenő, azaz a biodegradációra jellemző alakot.

5.4. A szennyezőanyag biológiai hozzáférhetősége

A levegő- és tápanyagellátottságon kívül gyakran limitáló tényező a szennyezőanyag biológiai hozzáférhetősége. A szennyezőanyag hozzáférhetősége függ

1. a szennyezőanyag talaj szilárd fázisa és a talajnedvesség (biofilm) közötti megoszlási hányadosától,
2. a talaj kötöttségétől és szervesanyag-tartalmától,

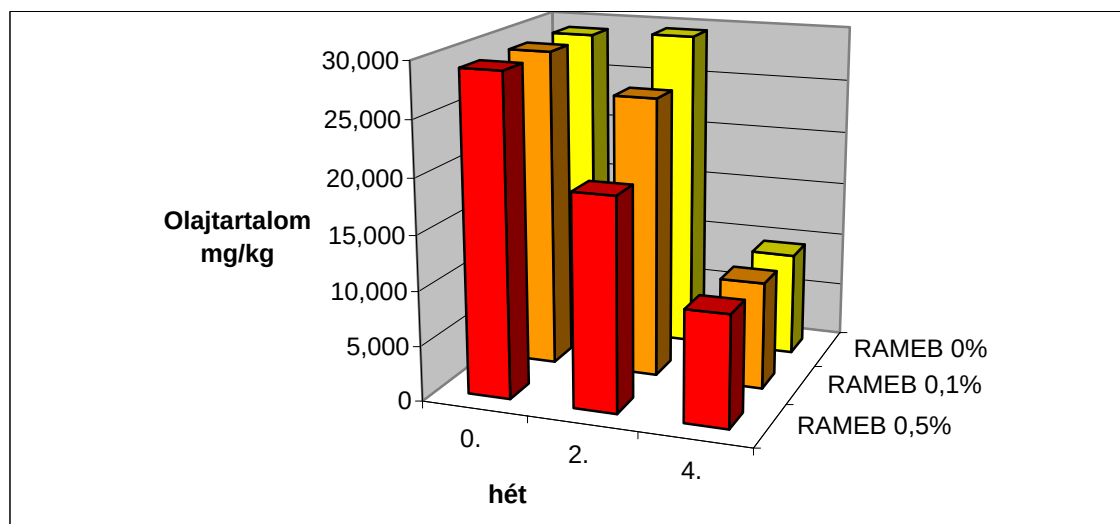
3. a talaj szénhidrogénbontó mikroflórájának bontóképességétől és biotenzid termelő képességétől.

A hozzáférhetőség mesterséges növelése általában a friss és a nagyon régi szennyezőanyagok esetében szükséges. Utóbbiak esetében a talaj szerves mátrixához való erős kötődés korlátozza a biológiai bontást.

Egy laboratóriumi mikrokozmosz kísérletben 30 000 mg/kg koncentrációjú Diesel-olajjal frissen szennyezett talajt vizsgáltunk. Friss szennyezettség esetén a mikroorganizmusok adaptációjához és felületaktív anyag termelésük megindulásához bizonyos időre van szükség. A 3. táblázat azt mutatja, hogy a szennyezőanyag biológiai hozzáférhetőségét növelő random metilezett β -ciklodextrin (RAMEB) talajhoz adagolása (7) a folyamat kezdetén nagymértékű biodegradáció-növekedést eredményezett a kezeletlennel összehasonlítva. Később ez a hatás nem ennyire kifejezett, hiszen a jó minőségű, jól működő talajmikroflóra egy idő után maga is képessé válik a szükséges biotenzidek előállítására, így a RAMEB-bel kezelt talaj előnyét a kezeletlen a 4.–6. hétre behozza (14. ábra).

3. táblázat: Szénhidrogén-tartalom (GC: EPH) változása a Diesel-olajjal szennyezett és RAMEB-bel kezelt talajokban, laboratóriumi bioremediációs kísérlet során

Minta	EPH [mg/kg] 0. hét	EPH [mg/kg] 2. hét	Eltávolítás [%] 2. hét	EPH [mg/kg] 4. hét	Eltávolítás [%] 4. hét	EPH [mg/kg] 6. hét	Eltávolítás [%] 6. hét
RAMEB 0%	29 050	29 450	0	9 480	67	7 840	73
RAMEB 0,1%		25 530	12	9 760	66	7 280	75
RAMEB 0,5%		19 230	34	10 120	65	7 970	73



14. ábra: Friss Diesel-olaj szennyezettség remediálása hozzáférhetőséget növelő adalékkal

A folyamatok háttérében lévő mikrobiológiai változásokat a 4. táblázatban összefoglalt eredmények mutatják. A kezelés 2 hetes adaptációt követően indult meg, ennél a kísérletnél is levegőztetést és tápanyag/adagolást alkalmaztunk. 2 hetes adaptáció után $2,4 \cdot 10^7$ olajbontó sejt/g talaj értéket mértünk, amely azt jelenti, hogy az adaptáció ekkorra már előrehaladott állapotban volt.

4. táblázat: Szénhidrogénbontó sejtek koncentrációja Diesel-olajjal szennyezett talajban

Minta neve	*10 ⁵ sejt/g talaj 0. hét	*10 ⁵ sejt/g talaj 2. hét	*10 ⁵ sejt/g talaj 6. hét
Diesel olaj + RAMEB 0%	240	1 500	150
Diesel olaj + RAMEB 0,1%		11 000	1 100
Diesel olaj + RAMEB 0,5%		4 600	1 500

Ez az igen nagy olajbontó sejtkoncentráció a kísérlet során RAMEB kezelés nélkül még ötszörösre, RAMEB adagolás hatására pedig majdnem 50-szeresre nőtt. A bontható szubsztrát, vagyis a szennyezőanyag fogyasztásával a bontásra képes mikroorganizmusok száma is csökkenni kezdett a 6. hét körül.

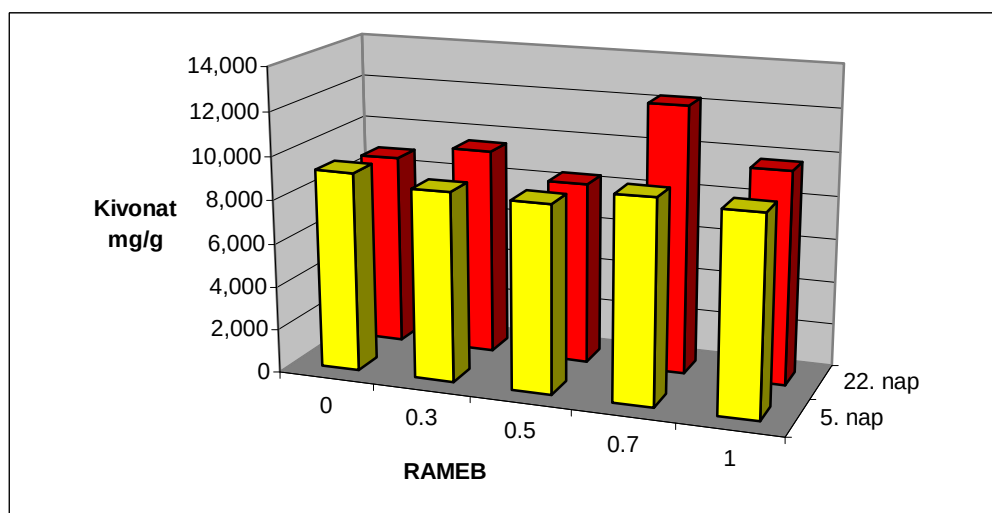
A toxicitási adatok is alátámasztották azt a tényt, hogy kezdetben az apoláros olaj biológiai hozzáférhetetlensége limitálja a biodegradációt. A hozzáférhetetlenség kezdetben a toxikus hatást is limitálta, amely később emelkedett értéket mutatott a megnövelt hozzáférhetőséggel párhuzamosan.

Tehát az olajtartalom valamint a párhuzamosan vizsgált szénhidrogénbontó sejtkoncentráció és toxicitás segített a hozzáférhetőség növekedés és a már hozzáférhető szennyezőanyag biodegradációja megkülönböztetésében. Ez a megkülönböztetés még fontosabb lehet régi, nagyrészt immobilizálódott, erősen kötött szennyezőanyagok esetében, amikor a mobilizálódás különböző mértékű, de jelentős növekedést okozhat mind a kémiai extakcióval kivonható, a biológiailag elérhető, a felvehető és a ható koncentrációkban.

5.5. Pakurával szennyezett talaj intenzifikált bioremediációja

Másik érdekes példa a feltáródás és a biodegradáció szétválására, valamint a kémiai és biológiai hozzáférhetőség különbözőségére a pakuratavak területéről származó, több évtizede pakurával szennyezett humuszos talaj laboratóriumi bioremediációja (9).

A kísérletben a gravimetriásan meghatározott extraktumtartalom mindvégig közel azonos értéket mutatott, azt a képzetet keltve, hogy a talajban nem történik biodegradáció.

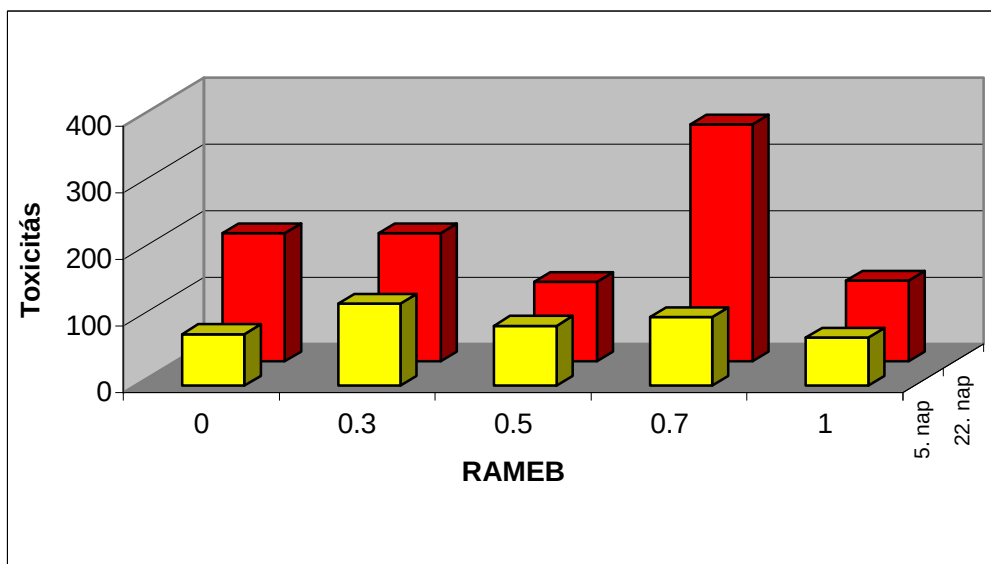


15. ábra: Az extraktumtartalom látszólag nem változik a pakurával szennyezett talaj bioremediációja közben

Az integrált metodika alkalmazásával azonban világossá vált, hogy mi van a háttérben.

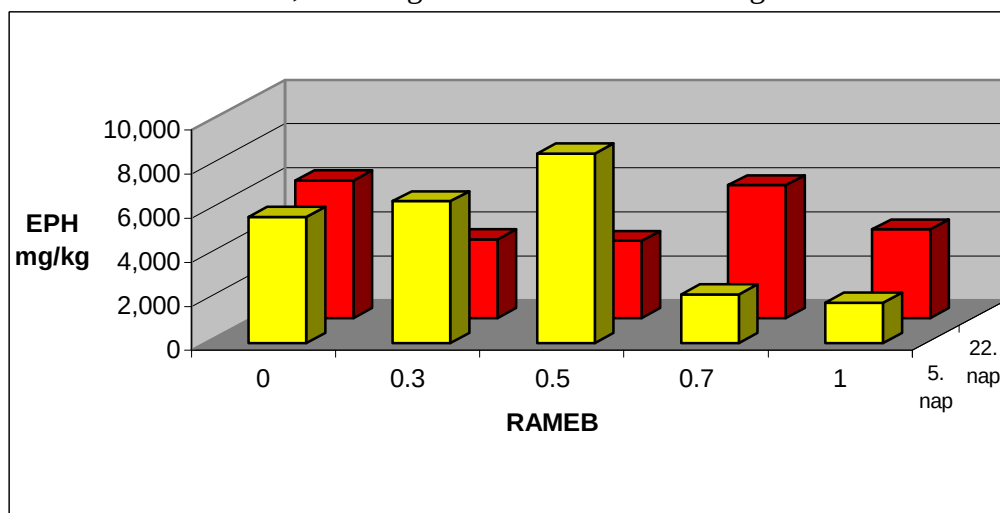
A szénhidrogénbontó mikroorganizmusok jelenléte kimutatható, koncentrációjuk megfelelő volt. Ennek ellenére a pakurával szennyezett talaj toxicitása egyre nagyobb lett a

kísérlet során. Ennek okai a feltáródás mértékének növekedése és a maradék összetétel-változásából adódó egyre toxikusabb volta (16. ábra). A biológiai és ökotoxikológiai vizsgálatok eredményei még konfúzabbá tették a helyzetet, hiszen az extraktumtartalom látszólagos változatlanságának ellentmond mind a szénhidrogénbontó aktivitás, mind a toxicitás növekedése a kiindulási állapottal összehasonlítva.



16. ábra: Pakurával szennyezett talaj toxicitása a remediáció során *Vibrio fischeri* lumineszcencia-gátlási teszttel mérve és rézgyenértékben kifejezve

A magyarázatot a gázkromatográfálható szénhidrogén frakció vizsgálata adta meg, melynek mennyisége ezenközben a szokásos módon csökkent, amint azt a 17. ábrán láthatjuk: a 0,3 és 0,5 RAMEB-kezelés hatására felgyorsult feltáródás (5. nap), majd azt követően felgyorsult biodegradáció volt mérhető (v.ö. sárga és piros). Nagyobb mennyiségű RAMEB már az 5 napon is megnövekedett biodegradációt okozott a könnyű komponensek esetében, feltáródást viszont a nehezebbeknél. A gázkromatográfálható komponensek fogyását egyre nagyobb méretű, nehezebben degradálódó és nem gázkromatográfálható komponensek feltáródása kompenzálja. Ez a – szerencsére legtöbbször csak átmeneti – szennyezőanyag növekedés gyakran megfigyelhető jelenség a biotechnológiákban alkalmazott provokált mikrobiológiai aktivitásnövelés következményeképpen. Ilyenkor a talaj humuszanyagainak szétesésével is számolnunk kell, és utólagos stabilizálásra is szükség lehet.



17. ábra: A gázkromatográfálható szénhidrogének mennyisége

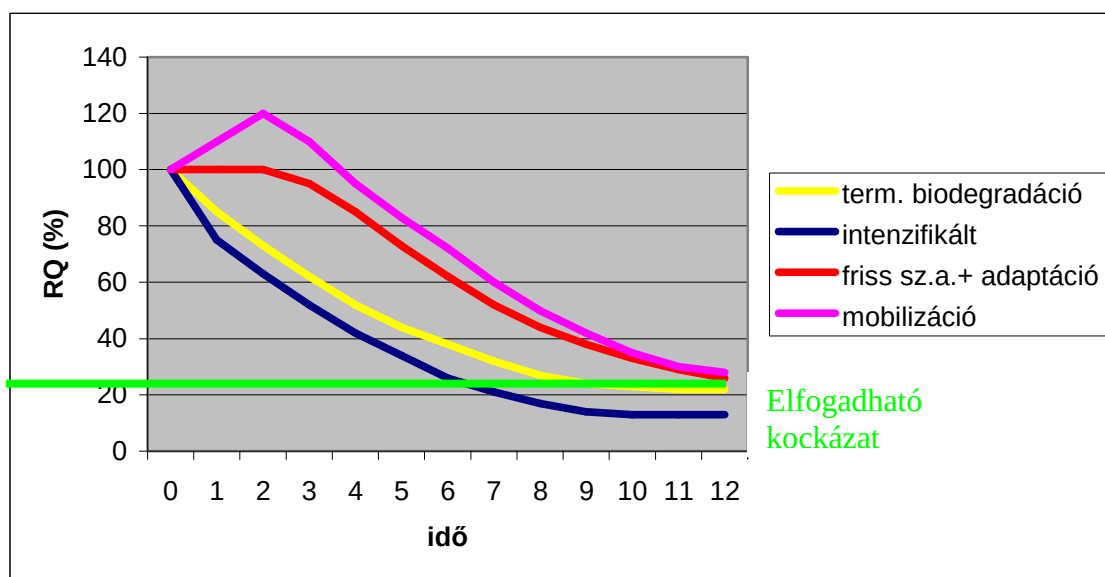
A gázkromatografálható, tehát viszonylag mobilis szénhidrogének változása más képet mutat, mint a teljes extraktum. Csökkenést tapasztalunk már egy hét elteltével a kiindulásihoz képest, legalábbis a kisebb RAMEB koncentrációk mellett. Ha 0,7 %-nál több RAMEB-et alkalmazunk, a mobilizálódás még nagyobb mértékű, a csökkenés emiatt késleltetett.

A kromatogramokon nemcsak a csökkenés, de a szénatomszám szerinti eltolódás is megfigyelhető.

A nehezen bontható szénhidrogénekhez vagy maradékokhoz való alkalmazkodás nem csupán az adaptív enzimek termelésének megindulását és a közösség fajeloszlásának megváltozását jelenti, hanem olyan genetikai rekombinációk megjelenését is, melyek mutációk vagy horizontális géntranszfer útján alakulnak ki. Ezt bizonyítják egyes (itt nem tárgyalt) mikrokozmosz kísérletek, amelyekben az alkalmazott technológiai paraméterektől függetlenül, kiugróan jó degradáció történt, míg másokban alig degradálódott a szennyezőanyag.

A bioremediáció során tehát a biodegradációt kompenzálhatja, sőt túlkompenzálhatja a mobilizálódásból adódó növekedés. A kettő elkülönítése azért fontos, mert főként nagy szervesanyag (humusz) tartalmú talajoknál az intenzifikált biológiai aktivitás a humuszanyagok teljes lebontását eredményezheti. Ugyanakkor szerves anyagok talajhoz keverése növelheti az általános aktivitást, ami a biodegradációnak kedvez, viszont nehezíti a folyamatok követését. A toxicitásvizsgálat áthidalhatja ezt a problémát, hiszen annak eredménye közvetlenül is felhasználható döntések hozatalára (pl. remedáció befejezése, a kezelt talaj vagy terület használata, stb.)

5.6. Az adaptáció és a mobilizáció megjelenése a kockázati profilban



- Biodegradálható szennyezőanyag + adaptálódott mikroflóra
- Friss, biodegradálható szennyezőanyag, késleltetett adaptáció
- Intenzifikált biodegradáció az elfogadható kockázati szintet előbb éri el
- A bontást megelőző mobilizáció átmenetileg növeli a kockázatot
- Elfogadható kockázati szint (RQ = 1 vagy alatta)

18. ábra: Kockázati profilok biodegradálható szennyezőanyag esetén