

Reaktorszemlélet

Technológiák ellenőrizhetőségi és szabályozhatósági lehetőségeinek áttekintése és megvalósítása *ex situ* és *in situ* talajremediáció során

Gruiz Katalin

1. Bevezető

A mérnöki tudományok fejlődésében jókora idő telt el, amíg a biotechnológiákat (fermentáció) és a környezetvédelmi biotechnológiákat, (például a biológiai szennyvíztisztítás vagy a komposztálás) valódi mérnöki technológiaként kezdték és tudták kezelni: megismerték az alapfolyamatok kinetikáját és anyagmérlegét, és ezek alapján tervezték, kiviteleztek, követték, ellenőrizték és szabályozták a technológiát.

A biotechnológiák műveleteinek, reaktorainak és technológiai paramétereinek méretezésekor és tervezésekor a biotechnológia középpontjában álló az élő, működő mikroorganizmusok által végzett biokatalízisnek kell optimális működési feltételeket teremteni. A talajban működő mikroorganizmus közösség, a „cell factory” bonyolultsága miatt különösen nehéz helyzet elé állíthatja a tervezőt. A talajban lejátszódó folyamatok és az azokat befolyásoló beavatkozások (technológiák) modellezése csak nagy bizonytalansággal oldható meg, nem véletlenül alakult ki jó a gyakorlatban a mikrokozmosz, a laboratóriumi és félüzemi technológiai kísérletek eredménye alapján történő tervezés.

A bioreaktorban lejátszódó folyamatok kinetikájával foglalkozó tudományág sokat fejlődött, de a mai napig is csak a homogén szakaszos és folyamatos rendszereket tudják a matematikai modellek viszonylag jól leírni. A töltött oszlop típusú reaktorok töltetéhez kötődő mikroflóra növekedési és termékképzési kinetikájának leírása és technológia-tervezésben való figyelembe vétele még nem érte el a gyakorlati alkalmazhatóság szintjét, elsősorban a diffúziós folyamatok, a folyamatosan növekvő, leváló és megújuló biofilm és az egyensúlyokat befolyásoló kísérő folyamatok bonyolultsága miatt. Ezért is alakult ki a bonyolult töltött oszlopok, mint a talaj, fekete dobozként történő megközelítése.

A talajremediáció gyakorlatában még a többi biotechnológiához képest is sokkal rosszabb a helyzet: a magyar gyakorlatban egyáltalán nem alkalmaznak mikrokozmosz vizsgálatokat vagy technológia-modellezést, amiből a fekete doboz viselkedésére vonatkozó és a tervezéshez felhasználható információt kaphatnánk. A legtöbb talajremediációval foglalkozó elméleti munkában nincsenek elkülönítve a talaj fázisai szerinti technológiák, a kezelési folyamat típusa szerinti (fizikai, kémiai és biológiai) és a kezelés helye (*in situ* vagy *ex situ*) szerinti technológiák. Sem az osztályozásra, sem a technológiaválasztás indoklására nem fordítanak elég gondot, feltehetően az ismeretek hiánya miatt.

Különösen hátrányos helyzetben vannak az *in situ* biotechnológiák, melyeket a mérnöktársadalom szinte egyöntetűen nem tekint „igazi” technológiának és a kezelés alatt álló, a mérnöki beavatkozás által érintett talajtérfogatot nem kezeli reaktorként.

A szennyezett talajok kezelésére alkalmazott módszereket a modern környezettechnika munkák az alábbiak szerint osztályozzák:

1. **Rendezett biztonságos lerakás** vagy izolált tárolás (containment): hulladékártalmatlanításra kidolgozott módszereket alkalmaz a szennyezett talajtérfogat *ex situ* vagy *in situ* kapszulálására, mely a környezettől való „tökéletes” és hosszútávon is hatékony elszigetelését jelent. A szennyezett talaj tehát nem semmisül meg, veszélyessége teljes egészében megmarad, csak a környezettel való találkozás

lehetőségéből adódó kockázata csökken le. Ennek az igen drága „ártalmatlanítási” eljárásnak korlátozott ideig van csak garantáltan nulla kibocsátása, ezen szavatossági idő lejártával az eljárást meg kell ismételni.

2. **Ex situ talajkezelési technológia**, a talaj eredeti helyéről való eltávolítása utáni kezelését jelenti. Ez a háromfázisú talaj esetében általában a teljes talaj, a talaj telített zónája esetén a talaj szilárd fázisának kitermelését és felszíni kezelését jelenti. Precízebb meghatározás szerint az egyes talajfázisok eredeti helyszínéről való eltávolítása utáni kezelését is az ex situ technológiák közé kell sorolnunk, például a kiszívott talajgáz és talajpára vagy a kiszivattyúzott talajvíz felszínen történő kezelését. Gyakori, hogy az ex situ és *in situ* megkülönböztetést csak a talaj szilárd fázisára értik, holott a mobilis talajfázisok kezelése a szilárd fázistól függetlenül történhet ex situ vagy *in situ*. A három- vagy kétfázisú, tehát szilárd fázist is tartalmazó talajok kezelése kezelő telepen vagy a helyszínre telepített technológia segítségével történhet. Utóbbit on site technológia névvel illetik a szakkönyvek és gyakran külön kategóriába sorolják. Ebben a tanulmányban a talaj összes fázisát a talaj integráns részének tekintjük.
3. **Az on site talajremediációs technológiák**, – melyek a környezetmenedzsmentben talán jogosan alkotnak külön kategóriát, de technológiai szempontból nem sok különbséget mondhatunk el az ex situ technológiákhoz képest – a talajszennyezettség helyszínéhez közeli kezelést jelentenek, a kitermelt talajfázisok (gáz, víz, szilárd fázis) kezelése helyben, de nem az eredeti felszín alatti térfogatban történik. Megkülönböztetése az ex situ-tól a kapcsolódó műveletek és a rendelkezésre álló időtartam miatt lehet fontos (szállítás, visszatöltés, recirkuláltatás, stb.), továbbá azért, mert összetett kezelő üzemek, kezelőtelepek nem mobilisak.
4. **In situ talajremediációs technológiák** alkalmazása esetén a fentiekől eltérően nem távolítjuk el a kezelendő talajfázisokat; vagy egyiket sem vagy csak a szilárdat nem. Az eredeti helyén maradó talaj kezeléséhez szükséges technológiát a talajba helyezzük bele, a műveleteket is a talaj eredeti térfogatában végezzük és a kezelés által érintett talajtérfigatot tekintjük a reaktornak. Ez egy olyan kvázi reaktor, melynek nincsenek falai, minden irányban nyitott, közvetlen kapcsolatban áll a környező, nem szennyezett talajjal, felülről pedig a légköri levegővel.

Az *in situ* „reaktor” nyitottsága természetesen mást jelent az egyes talajfázisok szempontjából, hiszen más transzportfolyamatok érvényesülnek a talajgáz (ha nincs nyomáskülönbség, akkor főleg megoszlás és diffúzió), a talajvíz (főleg áramlás) és a talaj szilárd fázisa (megoszlás és diffúzió) esetén.

A minden irányban nyitott reaktor faltalan, de nem végtelen. Végességét a szennyezettség kiterjedése és a kezelési technológia, a műveletek hatótávolsága szabja meg. A szennyezettség kiterjedése és a technológia hatástérfigata nem okvetlenül egyezik meg, lehet azonos, de lehet a kezelt térfogat kisebb is és nagyobb is, mint a szennyeződés kiterjedése.

Az *in situ* technológiáknál további megkülönböztetést lehet tenni aszerint, hogy egy zavartalan talajtérfigatot kezelünk-e vagy sem. Itt is teljes a skála a nagymértékben zavartalan rendszerektől, azokon keresztül, amelyekben csak a talajgázt vagy a talajvizet mozgatjuk, pl. cirkuláltatjuk, irányítjuk, egészen azokig, amelyeknél a szilárd fázist is megbolygatjuk, akár kismértékben (pl. pneumatikus fellazítás), akár nagymértékben (pl. *in situ* feliszapolás utáni kezelés).

Technológiai, műveleti és az ártalmatlanítás alapfolyamatát tekintve tehát nem jogos és nem is szükséges az osztályozási szempontok között az *in situ* vagy ex situ megkülönböztetés

első helyre tétele, hiszen legtöbb technológiafajta (néhány ritka kivétellel) mind *in situ*, mind *ex situ* kivitelben megoldható és lényegük is azonos. Általában azokat a beavatkozásokat nehézkes *in situ* megoldani, melyhez nagymértékű homogenizálás szükséges és/vagy iszapfázisban kell végezni (de ezek *in situ* megoldásaira is van példa), esetleg extrém magas hőmérsékletet kell alkalmazni, bár ezek között is van ellenpélda (*in situ* vitrifikáció) vagy olyan kémiai reagenseket, adalékokat, melyek *in situ* alkalmazása igen nagy kockázattal járna a reaktor nem zárt volta miatt.

A biológiai technológiák esetében – amint azt a természetes kockázatsökkentő eljárások összegzésénél már láttuk – a mérnöki beavatkozás mértékétől függő osztályozás is létezik, hiszen a bioremediáció általában természetesen is létező folyamaton alapul, amit a mérnök vagy egy szerűen csak figyel és követ (monitorozott természetes szennyezőanyag-csökkenés), vagy a szűk keresztmetszetek felderítése után igyekszik intenzifikálni. Az intenzifikálás céljából történő beavatkozás mértéke és fajtája is különböző lehet. Enyhe beavatkozások például a nedvesítés, a levegőztetés, a pH állítása, a tápanyagpótlás. Erősebb beavatkozás, a helyi közösségeket erőteljesebben befolyásoló, a hőmérsékletváltoztatás, a hozzáférhetőséget növelő adalékok vagy a mikrobiális oltóanyagok alkalmazása.

Folyamatos skálára helyezhetőek a biotechnológiák a beavatkozás mértékének és minőségének függvényében, de még a legdrasztikusabbak sem semmisítik meg a talajt, mint élő anyagot és élőhelyet, ellentétben a fizikai-kémiai beavatkozások egy részével, melyek eredményeképpen kapott anyag csak további revitalizációs kezelések után használható ismét, mint talaj.

A természetes folyamatokon alapuló talajremediációs technológiák beavatkozás mértékétől függő osztályozása a beavatkozás mértékétől függően megkülönböztethető kategóriák az alábbiak.

NA: Natural Attenuation: természetes szennyezőanyag csökkenés

MNA: Monitored Natural Attenuation: monitorozott természetes szennyezőanyag-csökkenés

ENA: Enhanced Natural Attenuation: gyorsított (intenzifikált) természetes szennyezőanyag-csökkenés

In situ bioremediáció

Ex situ bioremediáció.

2. A remediációs technológiák talajfázisok szerinti osztályozása

Az *in situ*/*ex situ* osztályozást amiatt is újra kell értelmezni, mert az egyes talajfázisok kezelése ilyen szempontból eltérő módon történhet, egy időben, egymással párhuzamosan. Minden talajfázist lehet egyenként, egymástól függetlenül is *in situ* vagy *ex situ* kezelni. Ha viszont az egyik talajfázist már kezeljük *in situ* vagy *ex situ* módon, akkor nem választhatjuk meg teljesen szabadon a másik két talajfázis (vagy az esetenként előforduló negyedik szennyezőanyagfázis) kezelésének módját.

Az alábbi mátrix (1. táblázat) a párhuzamosan kezelendő talajfázisok reális *in situ* és *ex situ* kombinációit tünteti fel.

A táblázat értelmezéséhez tudnunk kell, hogy a talajban akkor is folynak fizikai-kémiai és biológiai folyamatok, ha azt a technológus nem akarja, vagy ha nem arra alapozza a remediációs technológiát.

1. táblázat: Technológiakombinációk fázisoktól és a kezelés helyétől függően

		<i>In situ</i>			
		Talajlevegő	Talajvíz	Szilárd fázis	Teljes talaj
Ex situ	Talajlevegő	+	+	+	+
	Talajvíz	+	+	+	+
	Szilárd fázis	-	+	-	-
	Teljes talaj	-	+	-	-

Ezért, ha a talajgázt vagy a talajvizet ex situ kezeljük (akár biológiai, akár fizikai-kémiai módszerekkel), attól még a talajban lévő talajgáz-és talajvízhányad (beleértve a talajnedvességet) „kezelése” *in situ* folyik a talaj belsejében, hiszen a szilárd fázis *in situ* kezelése teljes talaj (3 fázisú talaj) formájában történik.

2.1. A szennyezőanyag által meghatározott szempontok és technóloiaosztályozás

A talajremediációs technológiákat a szennyezőanyag szerint is csoportosíthatjuk. Alapvetően meghatározzák a technológiát a szennyezőanyag fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai, hogy illékony-e, vízzoldható-e vagy azzá tehető, erősen szorbeálódó, biodegradálható vagy éppen biológiai úton immobilizálható-e.

A technológiát alapvetően meghatározza, hogy a szennyezőanyag egykomponensű vagy többkomponensű-e és hogy ezek a komponensek egymáshoz hasonlóak-e vagy teljesen eltérőek, esetleg egy sorozatot alkotnak fizikai-kémiai-biológiai tulajdonságaikat tekintve.

Egyetlen szennyezőanyag esetében is előfordulhat, hogy az egyes talajfázisokra eltérő technológiai megoldásokat kell alkalmaznunk, de még az is, hogy ezen technológiák alapja is eltérő (pl. a szilárd fázisból mobilizációval távolítjuk el, de a folyadékfázisból immobilizációval vagy fordítva).

A technológiaválasztást alapvetően befolyásolja a szennyezőanyag–környezet kölcsönhatását jellemző megoszlás, vagyis a szennyezőanyag talajfázisok közötti **megoszlása**. Ez a szennyezőanyag fizikai-kémiai tulajdonságai és a talaj jellemzői alapján megbecsülhető. Ha a becslés bizonytalansága nagy, akkor laboratóriumi modellkísérlettel kell meghatározni a megoszlási hányadosokat, illetve a megoszlás állapotfüggését, mert a technológia tervezése és alkalmazása során erre az adatra szinte mindig szükség van, akár fizikai-kémiai, akár biológiai kezelést végzünk vagy a hozzáférhetőséget és a toxicitást akarjuk megítélni.

2.2. Technológiák csoportosítása a szennyezőanyag mobilizálása/immobilizálása alapján

További csoportosítást jelent a szennyezőanyagon végbemenő változások szerinti csoportosítás. A legfőbb változás, ami remediáció során történhet a szennyezőanyaggal annak érdekében, hogy a kockázata csökkenjék, vagy az eredeténél mobilisabbá, mozgékonyabbá (illékonyabbá, vízzoldhatóbbá, biológiailag felvehetőbbé, deszorbeálódóbbá) tétele, vagy teljes immobilizálása, vagyis olyan állapotúvá alakítása, hogy káros hatása ne nyilvánulhasson meg, ne legyen képes elillanni, vízbe oldódni, a szilárd fázisból továbblépni vízbe vagy gázba vagy növénybe vagy állatba.

Aszerint, hogy a remediációs technológia során a szennyezőanyag immobilizálódik-e vagy mobilizálódik, a 2. és 3. összefoglaló táblázatok szerint csoportosíthatjuk a technológiákat.

2. táblázat: A szennyezőanyag mobilizációján alapuló technológiák

Szennyezőanyag kémiai tulajdonsága	Szennyezett közeg		
	Talaj szilárd fázis	Talajvíz	Talajlevegő
Illékony	Biodegradáción alapuló rem. Talajgőz kiszívása és felszíni kezelése Termikus deszorpció	Biodegradáción alapuló rem. Sztrippelés	Biodegradáción alapuló rem. Talajgáz kiszívása és felszíni kezelése
Vízoldható	Biodegradáción alapuló rem. Fitoremediáció Talajmosás Elektrokinetika eljárások	Biodegradáción alapuló rem. Fitoremediáció Talajvíz kiszívás és felszíni kezelés Aktív résfalak beépítése	Biodegradáción alapuló rem. Talajgőz kiszívása és felszíni kezelése
Szorbeálódó	Biodegradáción alapuló rem. Biológiai kioldás Fitoremediáció Talajból történő extrakció Szemcseméret szerinti frakcionálás Termikus deszorpció Talajégetés Pirólízis Vitrifikáció Elektrokinetika eljárások	Biodegradáción alapuló rem. Talajvíz kiszívás és felszíni kezelés	Biodegradáción alapuló rem. Talajgáz kiszívása és felszíni kezelése

3. táblázat: A szennyezőanyag immobilizációs folyamatai, melyeken technológia alapulhat

Szennyezőanyag kémiai tulajdonsága	Szennyezett közeg		
	Talajlevegő	Talajvíz	Talaj szilárd fázisa
Illékony	Izoláció Kémiai immobilizáció	Biológiai immobilizáció Kémiai immobilizáció	Gázadszorpció szilárd fázison Kémiai immobilizáció
Vízoldható	Izoláció Fizikai-kémiai immobilizáció (kicsapás, szorpció növelése)	Biológiai immobilizáció Rhizofiltráció Szorpció növelése Kicsapás, oldhatóság csökk. Kémiai oxidáció/redukció	Biológiai immobilizáció Fitostabilizáció Szorpció növelése Kémiai oxidáció/redukció Fizikai-kémiai stabilizáció
Szorbeálódó		Biológiai immobilizáció Rhizofiltráció Szorpció növelése Kicsapás, oldhatóság csökk. Kémiai oxidáció/redukció	Biológiai immobilizáció Fitostabilizáció Szorpció növelése Kémiai oxidáció/redukción Fizikai-kémiai stabilizáció Vitrifikáció, kerámiába ágyazás

A technológiák ilyenfajta, funkcionális csoportosítása azért is fontos, hogy rendet tegyünk a szakirodalomban felhalmozott rengeteg technológia között, melyek teljes rendszertelenségben kerülnek a nem szakértő tulajdonosok, megrendelők és egyéb döntéshozók elé. Mivel nem a kezelt talajfázis szerint osztályoznak, hanem általában aszerint, hogy *ex situ* vagy *in situ*-e a szilárd fázis kezelése, sok a félreértés. A másik ok a

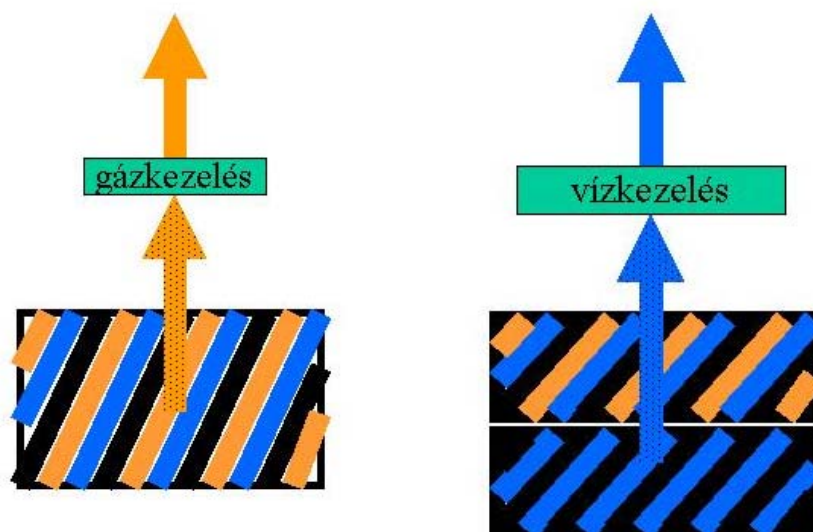
félreértésekre, hogy a technológiákat és a műveleteket keverik, ilyesmit adnak meg technológiának, hogy "talajvízszivattyúzás", "biodegradáció" vagy "pneumatikus fellazítás", stb. Tehát műveleteket, folyamatokat vagy segédtechnológiákat adnak meg talajremediálási technológiaként.

Azt is figyelembe kell venni a remediációs technológiák tervezésénél és a megfelelő kombinációk kiválasztásánál, hogy nemcsak a szennyezőanyag mobilitása, illetve mobilizálhatósága tér el egymástól, hanem a talajfázisok mobilitása is nagymértékben különbözik: a talaj szilárd fázisa nem mobilis és nem is mobilizálható egykönnyen, a víz és gázfázis viszont igen. Egy ventilátor vagy egy szivattyú könnyedén megmozgatja a talaj belsejében lévő összefüggő vízréteget vagy a háromfázisú talaj hézagterfogatait kitöltő levegőt.

2.3. Fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon alapuló talajkezelési technológiák

A talajremediációs technológiákat aszerint is csoportosíthatjuk, hogy az előbbieken említett mobilizációt vagy immobilizációt fizikai, kémiai vagy biológiai módszerekkel érjük-e el. Tisztán biológiai folyamatokat is alkalmazhatunk (NA), de az intenzifikálás során gyakran szükséges fizikai-kémiai, esetleg termikus technológiák alkalmazása, kombinálása a biológiai folyamattal.

A leggyakoribb **fizikai talajkezelési** technológiák a szennyezett talajgáz elszívása és a víz kiszivattyúzása a talajból és felszíni kezelése. Egy ilyen egyszerű fizikai művelet, mint a talajgázelszívás vagy a talajvíz kiszivattyúzása kémiai és biológiai folyamatok tucatjait vonja maga után: az eltávolított fázisok helyét új (friss) szennyezett vagy kevésbé szennyezett levegő vagy víz tölti ki, a víz helyét akár levegő is kitöltheti, tehát új egyensúlyi helyzet alakul ki, mely a korábban beállt egyensúlyokat megbontja, szorpciós-deszorpciós, oldódás-kicsapódás, elpárolgás-gőzfázisból történő lecsapódás, stb. folyamatokat indít be a folyamatpár új egyensúlyhoz vezető összetevőjének segítségével. A talajgáz kiszívása és helyére friss talajgáz (talajlevegő vagy légköri levegő) kerülése nemcsak az elpárolgást és a deszorpciót növeli, de a talajban élő mikroorganizmusok friss levegővel ellátását is eredményezi, vagyis életműködésük felpozícióját, aktivitásaik megnövekedését okozza. Különösen nagy változást jelent a talajmikroflóra számára, ha a talajvíz-szivattyúzás miatt bekövetkező talajvízszint-csökkenés az eredetileg telített talaj egy rétegét telítetlenné változtatja, vagyis a korábban uralkodó anoxikus körülményeket aerobbá.



1. ábra: A talajgáz elszívás háromfázisú talajból és a talajvíz kiszivattyúzása telített talajból. A magyarázóábrák jelölésmódja

Az 1. ábra mutatja a tanulmányban alkalmazott szemléltető ábrák szimbólumrendszerét. A talajlevegőt sárga, a talajvizet kék, a talaj szilárd fázisát fekete színnel jelöljük, emiatt a háromfázisú talaj három színnel sraffozott, a telített talaj kettővel. A kiszivattyúzott mobilis talajfázis útját nyilak mutatják. A nyilak vastagságával a mennyiségi viszonyokat is jellemezhetjük.

Kémiai reakciókat kiterjedten alkalmazunk a szennyezőanyagok kezelésében, elsősorban a talajvízben oldott és a szilárd talajfázishoz kötött, szorbeált formában jelenlévő szennyezőanyagokra. A kémiai átalakítás célja lehet: a mobilitás növelése (illékonytá tétel, vízoldhatóvá tétel, biológiai hozzáférhetőség növelése), immobilizálás (oldhatatlanná tétel, kicsapás), teljes vagy részleges bontás, toxikusság csökkentés, toxicitásért felelős csoportok elbontása, lecserélése (pl. deklórozás). Az alkalmazott kémiai reakciók a hidrolízis, az oxidáció, a redukció, a szubsztitúció, a kondenzáció, a polimerizáció, stb.

Elterjedten alkalmazottak a **termikus eljárások** a kismértékű hőmérsékletemeléstől (néhány °C) a közepes, a magas és az extrém magas hőfokokig, gőz, meleg levegő, elektromos erőter, rezgések segítségével. A hőmérséklet kismértékű emelése (60 °C-ig) intenzifikálja a biológiai folyamatokat, és egyben növeli az illékonytágot, a nem gázok vízoldhatóságát és a deszorpciós folyamatokat valamint minden kémiai és biokémiai folyamatot a talajban. *In situ* akár 100 °C-ig felmelegíthető a talaj hosszabb-rövidebb időre, gőz vagy forró levegő bevezetésével a deszorpció *in situ* intenzifikálása, a szennyezőanyagok hozzáférhetőségének növelése érdekében. Az időszakosan rövid ideig alkalmazott felmelegítés a tapasztalatok szerint nem teszi tönkre a talaj mikroflóráját. További hőmérsékletnövelés már gátlón hat a biológiai folyamatokra, viszont növeli a fizikai-kémiai folyamatok sebességét. Főleg a deszorpció intenzifikálására használatos a 100–600 °C hőmérséklettartomány, elsősorban *ex situ* technológiai megoldásokban, zárt reaktorokban, levegő kizárásával, tehát az égési folyamatok megakadályozásával. Az égetés és a pirolízis is használható eljárások, elsősorban *ex situ*, de talaj vagy felszíni vízi üledékek mélyebb rétegeiben is megoldható, egészen a szilikátok megolvadásához vezető magas hőfokig (1200 °C: vitrifikáció). Ezek a drasztikus fizikai-kémiai eljárások a talajt élettelen anyaggá változtatják, ilyenkor a talajt sokkal inkább veszélyes hulladékként kezelik és ártalmatlanítják, semmint talajként.

Biotechnológiák mind a talajgázra, mind a talajvízre, mind pedig teljes talajra alkalmazhatóak.

2.4. Talajgáz kezelése

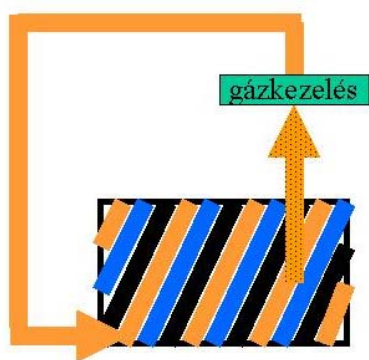
A gáz/gőzhalmazállapotú talajszennyező anyagokat a talajlevegőből lecsaphatjuk, beoldhatjuk folyékony fázisba, szorbeáltathatjuk, elégethetjük (katalizátor mellett is) vagy biodegradáltathatjuk megfelelő kezelési technológiákkal és reaktorokkal.

A szennyezett **talajgázt** biológiai szűrőn átvezetve történik meg a gáz- és gőzhalmazállapotú szennyezőanyagok biodegradációja. *Ex situ* megoldásban ez egy *on site* elhelyezett bioszűrőt igényel. *In situ* megoldás azt jelenti, hogy a teljes talaj részeként kezeljük. A gáz, illetve gőzfázisban lévő szennyezőanyag a talajfázisok közti megoszlás révén a biofilmbe oldódik, illetve diffundál. A biodegradáció csökkenti a biofilmben lévő szennyezőanyag-koncentrációt, ezzel növeli a diffúzió hajtóerejeként működő koncentrációkülönbséget a gáz/gőzfázis és a biofilm között. A gáz/gőzfomájú szennyezőanyagok

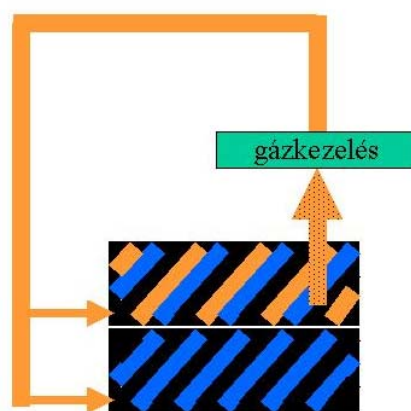
biofilmbe diffundálásának és biodegradációjának mértékét a talajgáz recirkuláltatásával is növelhetjük. Ilyenkor a bioszűrő maga a talaj. A gázok talajba juttatása injektorokon vagy perforált csőrendszeren keresztül, túlnyomás vagy a másik oldalon történő szívás segítségével történhet. Az sem mindegy, hogy a talaj melyik rétegébe és milyen mélységbe juttatjuk be és milyen mértékben oszlatjuk el a gázokat: ez történhet vízszintes, ferde vagy függőleges csőhálózattal vagy eltérő mélységben elhelyezett injektorokkal.

Az *ex situ* kezelt talajgázt (talajlevegőt) kiengedhetjük az atmoszférába vagy teljes mennyiségét vagy egy részét visszavezethetjük a talajba (2. ábra) levegőztetés, utótisztítás vagy gáz/gőzhalmazállapotú anyagok bejuttatása céljából. Leggyakrabban oxigén vagy hő bejuttatására használjuk a talajlevegő-recirkuláltatást. Ha a talajtérfogatot *in situ* melegítése a technológia részét képezi, akkor a célszerű a kiszívott talajgáz kezelését termikus módszerrel, pl. égetéssel megoldani és a keletkező hőt a talaj melegítésére felhasználni (27. ábra).

A kezelt talajgáz (talajlevegő) visszavezetése történhet a telítetlen zónába vagy a telítettbe, a talajkezelési koncepciótól függően: 2. és 3. ábra.



2. ábra: Talajlevegő recirkuláltatása a talaj telítetlen (háromfázisú) rétegébe



3. ábra: Talajlevegő recirkuláltatása a talajvízzel telített és telítetlen rétegekbe

Az *in situ* gázelszívás eredményeképpen a kvázireaktor egyik oldalán a szívás miatt depresszió alakul ki, a másik oldalon, a beinjektálás, befúvás hatására túlnyomás. A két oldal közötti nyomáskülönbség a levegő áramlását idézi elő a háromfázisú talaj hézagterefogatában.

2.5. Talajvíz kezelése

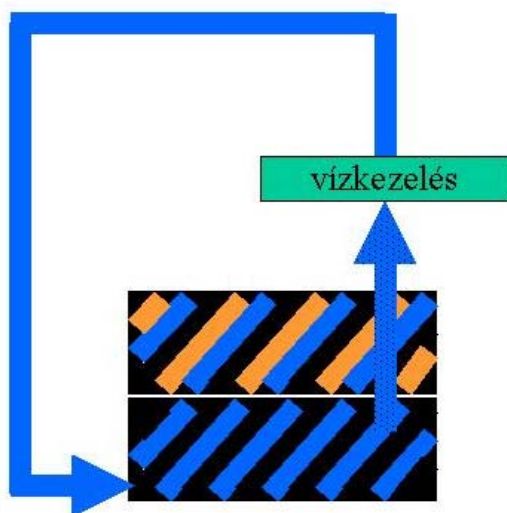
A szennyezett **talajvíz** kezelése kiszivattyúzás után úgy történik, mint bármelyik szennyvízé. Általában on site telepített technológiákat alkalmazunk, mely lehet fázisszétválasztás, ülepítés, szűrés, fizikai szorpció, kemiszorpció, oldatból való kicsapás, egyéb kémiai átalakítás, oxidáció, redukció, gyakori a sztrippelés (folyadékból történő gáz vagy gőzkihajtás) vagy a termikus kezelés az illékony szennyezőanyagok kihajtására, a magas hőmérsékletű termikus kezelés a szerves anyagok bontására (nedves oxidáció, pirolízis), elektrokinetika módszerek és biodegradáción alapuló eljárások vagy az eddig említettek vélszerű kombinációi.

A talajvíz *in situ* kezelés történhet a kétfázisú talaj kezelésével egyetlen technológia keretében (a kétfázisú talaj levegőztetése, adalékok alkalmazása, stb.), de történhet a felszínre szivattyúzás nélkül, a talaj belsejében, külön fázisként, például speciálisan kiképzett víznyerőkutakban, ilyenek a sztrippelő kutak, a lefőlöző kutak, a kémiai kezelésre alkalmas kutak. A kutak mellett egy másik lehetőség a felszín alatti résfalak alkalmazása, amelyek az

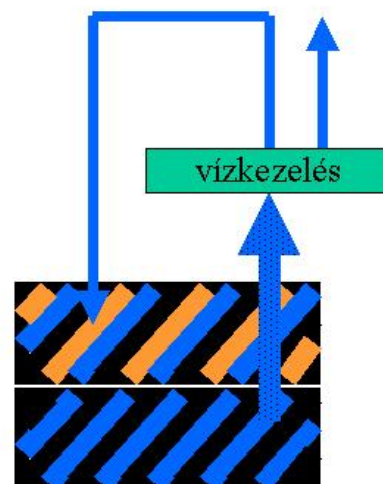
áramló talajvíz útjába helyezett szűrőfalak, a szennyezőanyagoknak megfelelő töltettel (adszorbens, bioszűrő, oxidáló fal, stb.) és a szükséges tartózkodási időt biztosító méretezéssel.

Szükség lehet az *ex situ* kezelt talajvíz teljes vagy részleges recirkuláltatására: a kezelt talajvíz talajba visszajuttatása több módon történhet, attól függően, hogy a telített vagy a telítetlen talajzónába óhajtjuk-e bejuttatni. A telítetlen zónába bejuttathatjuk a felszínről beszivárogtatással, sekély vagy mélyebb szivárogtató árkok segítségével. A felszín alá injektorok, perforált csövek vagy csőhálózat alkalmazásával juttathatunk vizet. A csövek elhelyezkedése lehet függőleges, vízszintes vagy ferde, sűrűségük és perforációjuk a talaj áteresztőképességétől és a bejuttatandó vízmennyiségtől függ. A telített talajzónába a víznyerő kutakon vagy csőrendszeren keresztül vagy injektorok segítségével juttathatjuk a vizet. A telítetlen zónán keresztül szivárgó nagymennyiségű víz nemcsak a szennyezőanyagok kimosásáért de minden tápanyag és hasznos talajalkotó kimosásához is elvezethet, ezért hosszú időn keresztül alkalmazása a talaj kilúgzásához, elszikesedéséhez, tönkremeneteléhez vezethet. A vízzel szennyezőanyagok talajvízbe mosása is csak korlátozott körülmények között elfogadható, a kibocsátás tökéletes kontrolljára van szükség.

Az *in situ* szilárd fázis kezeléssel kombinált *ex situ* vízkezelési módszerek leggyakoribb elvi megoldásait a 4. és 5. ábra mutatja. Az *in situ* megoldások elvi vázlata a 6. és 7. ábrán látható. Az **xx. és yy. ábra** konkrét *in situ* sztrippelő és résfalas kezelési technológiát mutat.



4. ábra: Ex situ vízkezelés recirkulációval: injektálás a telített zónába



5. ábra: Ex situ vízkezelés recirkulációval: szivárogtatás a telítetlen zónába

A szennyezett talajvíz kezelését *in situ* leggyakrabban kutakban és aktív résfalak segítségével oldjuk meg. Elvileg a kettő kombinációja is elképzelhető, gyakorlati megvalósításával még nem találkoztunk.

A kutas kezelés lényege, hogy a kútban nyomáscsökkenést okozunk, de a vizet nem szivattyúzzuk fel a felszínre, tehát a kútban megemelkedik a vízszint. A kútát úgy perforáljuk, hogy a megemelkedett vízszint a telítetlen zónáig érjen és ott a víz a kútból a telítetlen talajba szivárogoz. Így a kút alja és a perforált rész között áramlás indul a kúton kívüli talajban. Ilyenkor maga a kút a reaktor, a vízkezelés tere. Kútban sztrippelhetünk (talajvízből

gázkihajtás), melegíthetjük is, adalékokat, kémiai reagenseket, juttathatunk a kútba. A kút a kezelőreaktor szerepét tölti be. Leginkább egy csőreaktorhoz hasonlít, de szakaszos szivattyúzással akár szakaszos kevert reaktorhoz hasonló kezelőtérre is változtathatjuk. Természetesen a kúton keresztül a talajba is juttathatunk tápanyagokat és más adalékokat.

Ha a kút egy kevert reaktor vagy függőleges csőreaktor, akkor az aktív résfal egy töltött oszlop, szilárd fázisú reaktortér. A szilárd hordozó felületéhez kötött reagens és a lejátszódó reakció alapján lehet adszorpció, abszorpció, oxidáció, redukció, bármilyen más kémiai reakció, vagy biológiai átalakítás, beleértve a biodegradációt. A töltött oszlopreaktoron a szennyezett talajvíz folyamatosan halad át a természetes talajvíz áramlási viszonyoknak megfelelően. Ezeket a természetes áramlási viszonyokat befolyásolhatjuk a nyomásviszonyok mesterséges manipulálásával.



6. ábra: Szennyezett talajvíz *in situ* kezelése kútban

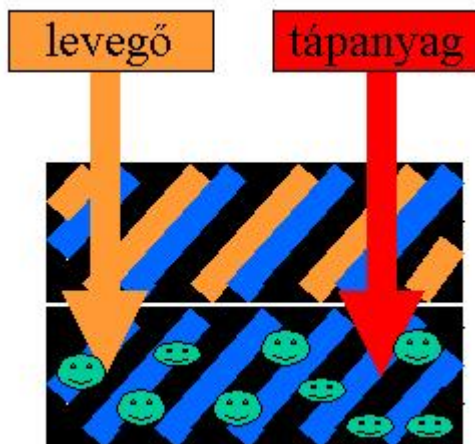


7. ábra: Szennyezett talajvíz *in situ* kezelése aktív résfal segítségével

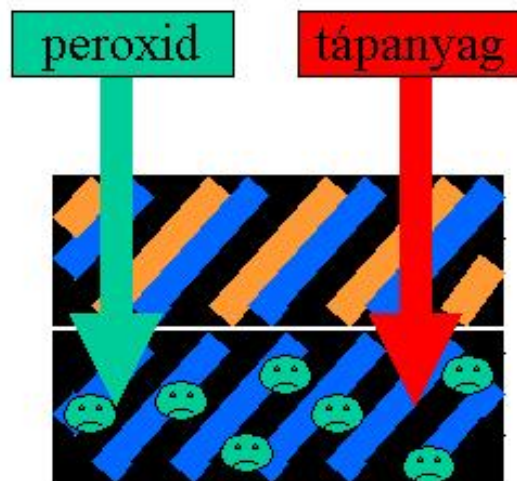
A talajvíz *ex situ* **biológiai** kezelésére a szennyvízkezelésből ismert valamennyi technika alkalmas. A megfelelő biológiai víztisztítási módszer kiválasztását a szennyezőanyag minősége, mennyisége és a talajvíz mennyisége szabja meg. Gyakoriak a többlépcsős eljárások, melyek leggyakrabban a szennyezőanyag-komponensek és a redoxviszonyok szerinti lépcsőket jelentenek, a konkrét biológiai folyamat optimumán működtetve. Az *ex situ* talajvízkezelési technológiák közül említésre méltóak az aerob és anaerob reaktoros technológiák, a csepegtetőtest, a tavas kezelés, a gyökérszónás szennyvízkezelés növények segítségével és a két utóbbi modern kombinációja, az élőgépes vízkezelés.

A talajvíz *in situ* biológiai kezelésére a talaj telített zónájában történő biológiai kezelés szolgál. Ezekben a mélyebb rétegekben általában csökkent a redoxpotenciál, ezért két lehetőségünk van: vagy eltoljuk a redoxviszonyokat az intenzívebb aerob biodegradáció irányába, vagy megtartjuk az eredeti redoxpotenciált és az azon működő biológiai folyamat hatékonyságát növeljük meg a biotechnológia segítségével.

A telített zóna aerobbá tétele levegőbevezetéssel vagy oxigént szolgáltató adalékok (hidrogénperoxid, magnéziumperoxid, stb.) adagolásával történhet. Mivel a hidrogénperoxid toxikusan hat a talajmikroflórára nem szabad túlterhelni vele a talajt, finoman szabályozott adagolásra van szükség. A rosszul oldódó peroxidszármazékok lassan bomlanak, kevésbé mérgezőek, így hosszú időn keresztül szolgáltathatnak oxigént az aerob mikroorganizmusok számára.

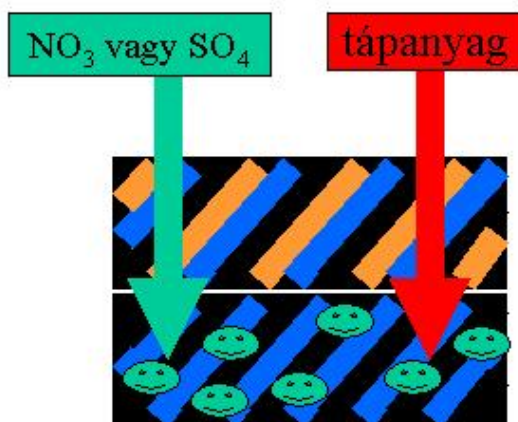


8. ábra: *In situ* biológiai talajvízkezelés: levegő és tápanyagok injektálása a talaj telített zónájában

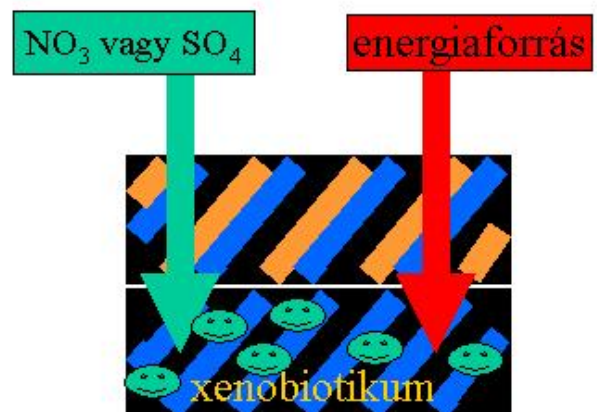


9. ábra: *In situ* biológiai talajvízkezelés: oxigéndonor vegyület injektálása a talaj telített zónájába

A talaj telített zónájában elhelyezkedő szennyezett talajvíz *in situ* kezeléséhez tetszőleges adalékokat adhatunk, attól függően, hogy milyen típusú biodegradáció folyik és annak mi a szűk keresztmetszete. Hatékony technológiavezetéshez tehát részletes monitoringot kell alkalmazni. A negatív redoxpotenciálon folyó biológiai bontáshoz a mikroorganizmusok alternatív légzésformákat használnak, így a nitrátlégzést és a szulfátlégzést (fakultatív anaerobok), az obligát anaerob mikroorganizmusok pedig karbonátlégzést folytatnak. A telített zónában folyó biodegradációt tehát a megfelelő H-akceptor (elektron donor) adagolásával lehet intenzifikálni. Amennyiben a szennyezőanyagot a talajmikroflóra nem képes közvetlenül energiává alakítani, hanem kometabolizmussal bontja, akkor energiaforrás adagolása is szükséges.



10. ábra: *In situ* biodegradáció az anaerob zónában: nitrát vagy szulfát a H-akceptor



11. ábra: *In situ* biodegradáció az anaerob

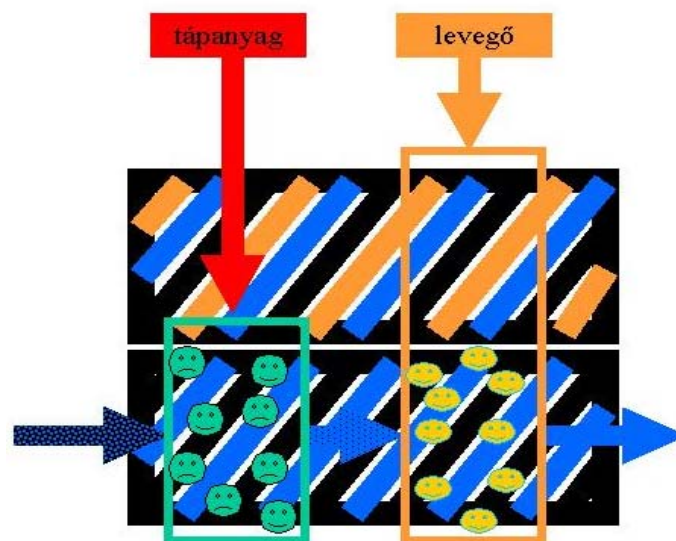
zónában: a kometabolizmussal bontható xenobiotikum mellé energiaforrás is kell

A redoxpotenciál változtatása nélküli *in situ* talajvízkezelési biotechnológiák tehát a kiegyensúlyozott anaerob bontáshoz szükséges optimális körülményeket igyekeznek megteremteni. A biodegradáció szűk keresztmetszetének azonosítása után az optimalás a hiányzó anyagok vagy csökkent paraméter pótlását jelenti. Legtöbbször az oxigén (nem levegőből) hiánya limitálja az anaerob bontási folyamatokat, azután a szénhidrogén típusú szennyezőanyagok egyoldalú tápanyag volta. A hidrogén akceptorul szolgáló oxigén a fakultatív anaerob mikroorganizmusoknál a nitrát vagy a szulfát lehet (nitrátlégzés, szulfátlégzés), ezek vegyületek talajvízbe adagolása nagymértékben megnövelheti a fakultatív anaerob bontó mikroflóra aktivitását. Ha obligát anaerobok munkájára alapozzuk a technológiát, akkor a karbonátlégzéshez szükséges hidrogén-akceptorra van szükség a szennyezőanyagbontás során lejátszódó acetogenezishez vagy metanogenezishez. Ha kometabolizmussal bontható szennyezőanyagról van szó, akkor megfelelő energiaforrást kell a talajvízbe juttatni a biodegradáció optimalására.

Az *ex situ* végzett talajvízkezeléshez hasonlóan a talaj belsejében is kialakíthatunk többlépcsős vízkezelési folyamatot. Ezek a lépcsők eltérhetnek minden külső körülményben, de akár egyik vagy másik környezeti paraméter térbeli gradiensét is kialakíthatjuk a talaj belsejében. Míg az *ex situ* talajvízkezelés technológia szakaszait egymás után kapcsolt, de egymástól független reaktorokban oldjuk meg, addig *in situ* a talaj kijelölt térfogatait tekintjük más-más optimummal működő reaktoroknak. Ily módon egy anaerob talajvízkezelési lépés (a tartózkodási időt a talajtérfogat áramlási iránnyal azonos mérete fogja megadni) után kapcsolhatunk egy aerob szakaszt úgy, hogy a talajtérfogat egy részét levegőztetjük vagy más módon oxigénnel látjuk el.



12. ábra: Kaszkádelrendezés *ex situ* biológiai talajvízkezeléshez



13. ábra: Kaszkádelrendezés *in situ* biológiai talajvízkezeléshez az anaerob lépcsőt egy aerob követi

A talajvízben *in situ* folyó biodegradáció intenzitásának növelésére alkalmas a talajvíz áramoltatása, vagy áramlási sebességének megnövelése folyamatos vagy szakaszos recirkuláltatással. Ilyenkor a talajvizet vagy a felszínre szivattyúzzuk és folyamatosan elszikkasztjuk vagy visszainjektáljuk. Az is lehetséges, hogy nem egy felszíni egységen keresztül oldjuk meg a talajvízcirkuláltatást, hanem speciálisan kiképzett kutak segítségével, olyanokéval, amelyek a talaj mélyebb rétegéből kiszívott vizet a talaj felső (telítetlen) rétegébe nyomják ki vagy a talaj belsejében elhelyezett kutak és csőrendszer segítségével cirkuláltatják a talajvizet (6. ábra szerinti elrendezés).



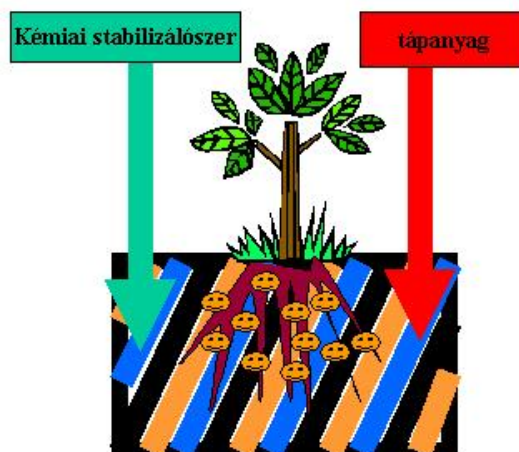
Az *in situ* talajvízkezelés további lehetőségeit adják a növényi szervezeteket felhasználó eljárások, a mesterséges lápok, az *in situ* gyökérzónás kezelés, melynek lényege általában az, hogy a biodegradálható szennyezőanyagokat a gyökérzóna mikroorganizmusai elbontják és a növények számára felvehető, mineralizált állapotba hozzák, a nem bonthatóakat pedig immobilizálják. A gyökérzónás kezelés folyhat szakaszosan elárasztott, láphoz hasonló körülmények között és a felszín alatt áramló vízben. Utóbbi esetben a talaj jó vízáteresztőképességének fenntartásáról gondoskodni kell.

14. ábra: A gyökérzónás talajvízkezelés és a mesterséges láp szimbolikus ábrázolása a mineralizációt végző mikroorganizmusokkal

A növények közreműködésével spontán is bekövetkezik, de a technológus is gyorsíthatja a szennyezett talaj szél- és vízeróziójának csökkentését a szennyezett terület növényi borítottságának növelésével (15. ábra). Természetes, hogy egy ilyen területet fokozott ellenőrzés alatt kell tartani. Nagyterjedésű területeknél szinte ez az egyetlen megoldás. Olyan növényt kell választani, mely nem veszi fel, nem építi be szöveteibe a szennyezőanyagot, így az a talajból nem kerül át a táplálékláncba. A növényi felvételt a növény helyes megválasztásával és a szennyezőanyag biológiai hozzáférhetőségének csökkentésével érhetjük el. Ha a növénytelepítést megelőzően kémiai stabilizálószeret juttatunk a talajba, akkor visszaszorítjuk a szennyezőanyag valamennyi transzportfolyamatát: növényi felvétel, vízzel történő transzport (16. ábra).



15. ábra. Fitostabilizáció

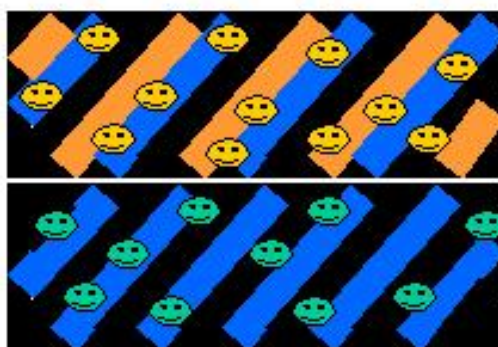


16. ábra: Kémiai stabilizációval kombinált fitostabilizáció

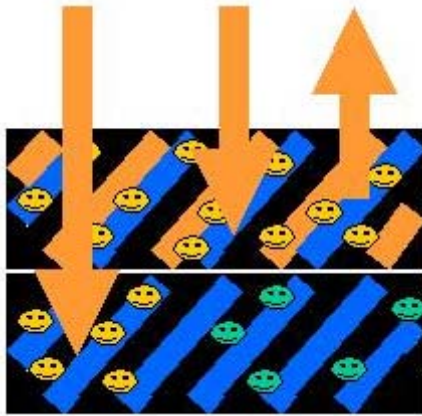
A szennyezőanyagtól függően kémiai stabilizálószer lehet minden olyan anyag, amely a szennyezőanyag mobilitását csökkenti, vagyis a nem ionos, az oldhatatlan, az adszorbeálódó, a kovalensen beépülő formákat, lehetőleg irreverzibilisen. Ez utóbbira nincs garancia a magárahagyott talajban, ezért ezt a technológiának kell hosszútávon biztosítania.

2.6. Teljes talaj kezelése

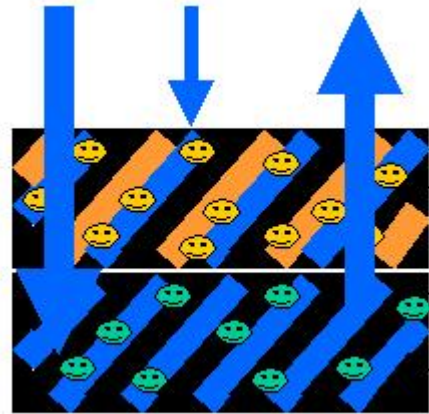
A teljes talaj kezelése történhet a mobilis talajfázisok külön kezelése nélkül vagy azzal kombinálva. A teljes talaj kezelését végezhetjük az eredeti helyéről történt eltávolítás után, *ex situ*, vagy eredeti helyén. *In situ* talajkezelésnél további megkülönböztetést igényel a telített és telítetlen talajzóna, az hogy mindkettőt vagy az egyiket kell-e kezelnünk. Az *in situ* talajkezelés történhet teljesen zavartalan talajtérfogatban (analóg a szakaszos reaktorral: 17. ábra), de történhet a mobilis talajfázisok recirkuláltatása (analóg a visszatáplálásos reaktorral) a talaj szilárd fázisának bolygatatlansága mellett (töltött oszlop típusú reaktorral analóg 18. és 19. ábra). A visszatáplálás történhet mind a telített, mind a telítetlen talajrétegbe.



17. ábra: Teljes talaj *in situ* biológiai kezelése a mobilis talajfázisok bolygatása nélkül



18. ábra: Teljes talaj *in situ* kezelése talajlevegő kiszívással és/vagy recirkuláltatással



19. ábra: Teljes talaj *in situ* kezelése talajvíz kiszívással és/vagy recirkuláltatással

A gyakorlatban elterjedtek a szilárd fázis bolygatásával, fellazításával, keverésével, iszapállagúvá tételével járó *in situ* technológiák. Ezek már átvezetnek az *ex situ* on site technológiákhoz, azzal a különbséggel, hogy nem távolítjuk el a talajt eredeti helyéről, hanem saját magából alakítjuk ki azt a leginkább földmedencéhez hasonlítható alkalmasítást, amelyet a kezeléshez „reaktorként” alkalmazunk (20. ábra).



20. ábra: Talajban *in situ* kialakított homogén tankreaktor

A teljes talaj fizikai és kémiai kezelési módszerei között első helyen állnak a szennyezőanyag mobilizációján alapuló módszerek:

Talajgáz elszívás, melynek hatásai a teljes talajra illékony komponensek eltávolítása, deszorpció növelése, mikroflóra aktiválása, történhet *ex situ* vagy *in situ*.

Talajvíz kiszivattyúzás, a talaj eltávolítása nélkül, melynek hatásai a teljes talajra a szennyezőanyag eltávolítása, a vízbe oldódás és a deszorpció növelése, tápanyagtranszport. Ennek *ex situ* változata a szilárd fázisú, a szennyezett talajjal töltött reaktorban történő talajmosás. Ezt ritkán alkalmazzuk, mert az alternatív talajmosási eljárások sokkal hatékonyabbak.

Ex situ talajmosás a talaj szilárd fázisának vízzel történő mechanikai és/vagy kémiai mosását jelenti, olyan szennyezőanyagok esetében alkalmazzuk, melyek vízzoldhatóak vagy azzá tehetőek. A mechanikai mosás egyik változata a nyírófeszültség alkalmazásával, a gőzborotva elvén működő erős vízszugárral történő mosás, amikor is a talajszemcsék mikroszemcséinek felületéről nem csak a vízzoldható szennyezőanyagok távolíthatók el, hanem az adszorbeálódott nem vízzoldhatóak is.

A **jól megválasztott detergens**ek, felületaktív anyagok alkalmazása növeli a mosás hatékonyságát, ugyanakkor károsan hathat a talaj élővilágára, *in situ* alkalmazva környezeti kockázata nagy, alkalmazása kockázatfelmérés és mérlegelés kérdése. Természetes eredetű szolubizáló hatású szerek, tenzidek vagy komplexképzők alkalmazása inkább ajánlható.

A talaj intenzív mosása – detergensekkel vagy anélkül – mindenképpen talajkárosodáshoz vezethet, hiszen a szennyezőanyag mellett a hasznos talajalkotók is kimosódhatnak, eltűnhetnek a talajból, tehát a mosást követően a talaj revitalizációjára általában szükség van.

Az **ex situ talajmosást** ma már talajkezelő üzemekben végzik és egy sor fizikai és kémiai kezelési módszerrel kombinálják, így módon többféle szennyezett talaj fogadására és kezelésére is mód van egy ilyen flexibilisen a talaj szennyezettségéhez és típusához alkalmazkodó üzemben. A mosással kombinált talajkezelési műveletek: homogenizálás, szemcseméret szerinti osztályozás, üleptetés, flotálás, vizes mosás, mosás adalékokkal, extrakció, kémiai reakciók kivitelezése, levegőztetés, biológiai kezelés. Az egyes kezelendő vagy már kezelt fázisok szétválasztására, szitákat, üleptítőket, centrifugákat, ciklonokat, szűrőket használnak, a kezelendő talaj szállítására szállítószalagokat, szállítócsigákat. Ezek a talajkezelő üzemek a talajt vizes zagy formájában kezelik és a kezelést követően víztelenítik. Ugyanezek az üzemek zagy formában érkező kikutort vízi üledékek és zagyformájú vagy iszapállagú szilárd hulladékok kezelésére is alkalmasak (ld. 23. ábra).

A **talaj vizes mosása in situ** is történhet, ilyenkor a talajból vízzel vagy mosószeres vízzel kimosott szennyezőanyagot az egybefüggő vízréteg, a talajvíz felszínre szivattyúzása után tudják ártalmatlanítani, vízkezelési technológiával. Az *in situ* vizes mosás érintheti a talaj telített zónáját, ilyenkor a mosóvíz-recirkuláltatás a talajvízbe történő vízbevezetéssel és áramlásirányú elvétellel van megoldva. Ha a vizes mosást a talaj telítetlen zónájára (is) kiterjesztjük, akkor a mosóvizet a szennyezett telítetlen talajtérfogaton kell átáramoltatni (beszivárgás felszínről, árokból, perforált csőrendszerből vagy injektlás), a talajvíz rétegben összegyűjteni és onnan kiszivattyúzni. Ez a művelet nagy környezeti kockázattal jár, hiszen a talajvíz szennyezését okozza, emiatt csak olyan esetben ajánlatos, amikor a talajvíz már úgyis szennyezett és ha megnyugtatóan meg tudjuk oldani a terjedés korlátozását, pl. a szennyezett területen történő állandó depresszió (állandóan működő víznyerőkutak) fenntartásával vagy a kezelt terület felszín alatti részfállal történő izolálásával. További alapkövetelmény, hogy a szennyezőanyag vízzoldható legyen, tehát a mosóvízből ne „végtelen” mennyiség kelljen a szennyezőanyag talajból való eltávolítására. Az arányokat nem egyszerűen csak a szennyezőanyag vízzoldhatósága határozza meg, hanem a talaj tulajdonságaitól is függő szilárd fázis és talajvíz közötti megoszlási hányadosa, melynek meghatározása minden ilyen művelet tervezésénél alapvető. Tiszta szerves anyagoknál a K_{ow} -ból is számítható, de a helyspecifikusság és a környezeti realitás érdekében legmegbízhatóbb a mérési adat.

Maga a **talajfrakcionálás** is lehet az ártalmatlanítás alapja, hiszen a szennyezőanyagok nagy része a talaj kis hányadát, általában nem több mint 5–10%-át kitevő szervesanyaghoz (humusz) vagy agyagfrakcióhoz kötődik. Ha ezeket a szennyezett frakciókat sikerül szemcseméret vagy sűrűség alapján különválasztani, akkor a talaj nagy része ártalmatlan lesz, a maradék humusz vagy agyag pedig további kezelésre kerül.

Extrakcióhoz víz helyett bármilyen oldószer alkalmazható, amely oldja a szennyezőanyagot és elviselhető mértékben károsítja a talajt (ez az elviselhető mérték függ a szennyezettség kockázatától). A savas, lúgos vagy szerves oldószeres extrakciók gyakorlatilag csak ex situ módon kivitelezhetők a műveleti igény és a kibocsátás nagy kockázata miatt.

Igen hatékonyak a teljes talaj kezelésében a **termikus módszerek**. A **néhány fok hőmérsékletemelés** növeli az illékonyságot, az oldhatóságot, a deszorpció mértékét, ezzel növeli a szennyezőanyag eltávolíthatóságát vagy biológiai hozzáférhetőségét. Megváltoztatja a szennyezőanyag eloszlását, azt egyenletesebbé teszi. Aktiválja a mikroorganizmusokat. A melegítés mint ex situ, mind *in situ* talajkezelés esetén alkalmazható, megoldható meleg levegő, gőz, forró víz beinjektálással vagy átszívással, esetleg elektródokkal, különböző frekvenciájú rezgésekkel történő felmelegítéssel. A hőmérsékletemelés tervezésekor okvetlenül meg kell vizsgálni a biodegradációt végző mikroorganizmusok hőmérsékletoptimumát. Sok talajban élő közösség nem kedveli a talajban szokásos 12–15 °C fölötti hőmérsékletet, és akkor hiába növeljük meg a szennyezőanyag biológiai hozzáférhetőséget, ha közben inaktíváljuk a mikroflórát. Emiatt bizonyultak hatékonynak az időszakos felmelegítést alkalmazó in situ remediációs technológiák: hirtelen felmelegítéssel deszorbeáltatjuk a szennyezőanyag egy adagját, majd néhány napig hagyjuk a mikroflórát dolgozni, aztán megismételjük a mobilizáló hőkezelést.

A biológiai rendszerek által elviselhető hőmérsékletnél **magasabb hőmérsékleteket** többnyire ex situ alkalmazzuk. Az alacsony (180–350 °C) és magas hőmérsékletű (400–800 °C) deszorpciót gravitációs vagy belső szállítószalaggal vagy csigával ellátott (forgó) kemencékben végzik a levegő kizárása mellett, indirekt fűtést alkalmazva. A magas hőfokon elpárologtatott szennyezőanyagot a gőzfázisból távolítják el. A technológiából kiengedett gázokat több lépcsőben kezelik. Ha jól működik a termikus deszorpció, akkor égés nem történik, égéstermékek, füstgázok nem keletkeznek. A talaj elviselhető mértékben károsodik, a szerves talajalkotókat stabilizálja, a humuszanyagok nem károsodnak végzetesen, az alacsony hőfokú deszorpciót még a mikroorganizmusok egy része is túléli, revitalizálható. Steril talajként hasznosítható.

Az **égetéshez**, vagyis a hő hatására bekövetkező tökéletes kémiai oxidációhoz nagyobb hőmérséklet szükséges, mint a deszorpcióhoz. Katalizátorok alkalmazása is megoldás lehet. A talaj égetése a talaj alapvető jellegzetességeit szünteti meg, égetés után holt anyag, gyakran revitalizációval sem életre kelthető anyag keletkezik. A talaj saját szerves anyaga is elég. Ez az anyag semleges töltőanyagként, statikai tulajdonságaitól függően jól felhasználható.

A talajszennyező anyagok levegő kizárásával történő kémiai bontása a talaj **pirolízisével** vagy nedves oxidációjával érhető el.

A **vitrifikáció** (üvegesítés) ex situ kivitelben hasznosítható termék (kerámia) előállításával párosítható, *in situ* viszont leginkább az ellenőrzött és rendezett larakáshoz hasonlítható eredményhez vezet. Talajok vagy üledékek mélyebb rétegeiben, hozzáférhetetlen helyeken előforduló, helyben immobilis formában ártalmatlanítható, nagyon veszélyes talajszennyező anyagok esetében alkalmazható. A szerves szennyezőanyagok immobilizálódnak, beépülnek az üvegszerkezetbe, a szervesek viszont jelenlévő oxigén mennyiségétől függően elégnak vagy levegő kizárása melletti kémiai bomlást szenvednek (pirolízis). A keletkező füstgázok sorsát, életciklusát vizsgálni kell. Ex situ érdemes a szemcseméret szerinti frakciókra szétválasztott talaj egyes frakcióinak vitrifikációjára korlátozni ezt a drága eljárást: a kolloid méretű szemcsékből álló talajfrakciók (humusz, agyag) tartalmazzák a szennyezőanyagokat, tehát a talaj kis hányadának kezelése árán ártalmatlaníthatjuk a teljes talajmennyiséget. Ráadásul az egyes frakciók hasznosítása is kifizetődőbb: tiszta kavics, homok, kezelt agyag értékesíthető.

Az **elektrokinetikai** eljárások olyan országokban terjedtek el, ahol olcsó az energia. Az elektrokinetikai eljárás alkalmas egyes ionos és a talajvízzel mozgó talajszennyező anyagok eltávolítására. Kombinálható talajvíz felszínre szivattyúzásával, biológiai kezeléssel és termikus kezelésekkel is. Elsősorban in situ alkalmazzák, de nem lehetetlen az ex situ kezelés sem, de a technológia alkalmazása szempontjából ennek nincs is különösebb jelentősége. A minél tökéletesebb anyagtranszport érdekében a talajvízszintek célszerű beállítását és annak változtatásait tervezni kell.

3. Biológiai átalakításon alapuló remediációs módszerek

A teljes talajra alkalmazható biológiai eljárások alapja vagy a biodegradáció vagy a biológiai kioldás vagy olyan biológiai átalakítás, amely a szennyezőanyagot mobilizálja, immobilizálja vagy hatástalanítja. Ezek az átalakítások történhetnek a biológiai szervezet részéről molekuláris szinten, sejtszinten, a közösség szintjén, és hatásuk is megjelenhet molekuláris szinten, sejtszinten vagy a közösség szintjén, de még a teljes talaj szintjén is akár egyszerű fizikai formában (pl. talajstabilizálás növények segítségével, az erózió korlátozásával).

A legtöbbet a **biodegradáción** alapuló folyamatokkal foglalkozunk, nem véletlenül, hiszen a mikroorganizmusok biodegradációs folyamatai képesek a szennyezőanyagot egyszer s mindenkorra eliminálni a környezetből. Erre igen kevés más módszer képes, tulajdonképpen drasztikus kémiai bomlások és az égetésen kívül valamennyi módszer a szennyezőanyag fázisok közötti átcsoportosítását, jó esetben koncentrációját jelenti. A biodegradáció ugyanakkor ártalmatlan végtermékek keletkezése mellett, biológiai viszonyok, enyhe hőmérséklet, pH és nyomásviszonyok között érheti el a teljes eliminálást, a végleges megoldást, legalábbis szerves szennyezőanyagok esetében. Ahhoz, persze, hogy valóban teljes bomlás, tökéletes mineralizáció történjék, káros végtermékek és maradékok nélkül (minimális maradékkal), segítség szükséges a talaj természetes élő közösségének, jól vezetett biotechnológiára van szükség, optimális technológiai paraméterekkel.

A szennyezőanyag biológiai bontását egy vagy több mikroorganizmus faj működése eredményezi. Természetes anyagok vagy azokhoz hasonló szennyezőanyagok bontása talajmikroorganizmusok vagy közösségek amúgy is létező biokémiai apparátusa segítségével történhet. Ilyenkor a bontás a már létező aktív vagy inaktív, de a szennyezőanyag hatására bekapcsoló gének termékei (enzimek) segítségével történik. Az adaptáció másik alapja, hogy a talajban élő közösség fajeloszlását flexibilisen tudja változtatni: a szennyezőanyag bontó és hasznosító fajok részaránya a közösségben rövid idő alatt képes megnőni. Az adaptív enzimek termelése és a fajeloszlás változása a talajban élő közösségekben amúgy is folyamatosan megvan, ezzel alkalmazkodik a talaj mikroflórája a szezonális változásokhoz és tápanyagellátottsági viszonyokhoz. A természetidegen anyagok bontásához viszont olyan adaptációra van szükség, amely egy addig ismeretlen anyag bontására és hasznosítására teszi alkalmassá a közösséget, illetve annak egyes tagjait, vagyis új genetikai kombinációkra, addig nem létezett gének megjelenésére. A szennyezőanyagok hatására megnövekedett mutációs ráta az átlagnál nagyobb számú mutációt eredményez, ehhez még beindulnak a horizontális géntranszfer mértékét növelő folyamatok. A kettő együtt már elég nagy valószínűséggel eredményez olyan mutánst vagy rekombinánt, mely az illető xenobiotikumot bontani képes. Amennyiben a biotechnológus rendelkezik a xenobiotikum biodegradációjára képes mikroorganizmussal, annak talajba juttatása is megoldás lehet, feltéve, hogy az idegen be tud illeszkedni a talaj már meglévő közösségébe és alkalmazkodni az adott körülményekhez. Összetett szennyezőanyag esteében mikroorganizmusok mesterségesen összeállított keveréke több eséllyel kecsegtet, de az őshonos mikroflórával való kölcsönhatása és ennek hosszútávú

következményei általában a természetes mikroflóra működésének hátrányos befolyását jelentik.

A szennyezőanyagok legnagyobb része összetett, nem egykomponensű. Az ilyen összetett szennyezőanyagok bontására minden esetben megfelelő összetételű közösségre van szükség, melyek működése egymásra épül. Egy ilyen kiegyensúlyozott működésű közösség mesterségesen nem vagy csak megalkuvásokkal hozható létre, tehát ilyen szennyezőanyag esteében a természetes adaptációs folyamatokat kell a technológusnak támogatnia. Ez a megoldás azért is előtérbe kerül, mert a keverék-szennyezőanyagok általában természetes eredetűek, tehát nem xenobiotikumok (kőolajszármazékok, PAH-ok).

A biológiai átalakítási folyamatok nem okvetlen jelentenek teljes biodegradációt vagyis mineralizációt. A biológiai átalakítás megállhat félúton, bonthatatlan metabolitokat eredményezve. A bontás mechanizmusát és végtermékeit meg kell ismerni a technológiatervezéshez és monitorozni kell a technológia alkalmazása során.

A szervesetlen vegyületeket, toxikus elemeket tartalmazó vegyületeket is képesek átalakítani, ártalmatlanítani a talaj élőlényei. Ilyenkor biológiai közvetítéssel zajló szennyezőanyag mobilizálódásról vagy immobilizálódásról van szó. A biológiai közvetítés eredményeképpen kémiai mobilizált (biológiai kioldás) alakot ölthet vagy fizikai (erózió megakadályozása), kémiai (oldhatatlan kémiai forma, pl. FeS) vagy biológiai (bioakkumuláció) immobilizáláson eshet át a szennyezőanyag.

3.1. A bioremediáció reakciókinetikai alapjai, szaporodáskinetikája

A biotechnológiák alapjául szolgáló folyamatokat sikerült visszavezetni elemi kémiai vagy biokémiai, elsősorban enzimkinetikai reakciókra. Mérnöki tervezés céljára leegyszerűsített modelleket használnak. Ezek annál inkább képesek megközelíteni a valóságot, minél egyszerűbb, minél kevesebb komponensből álló rendszert kívánunk a matematikai apparátussal leírni. Mikroorganizmusok tiszta tenyészetének szaporodási és termékképzési kinetikáját például enzimkinetikai modell (segítségével sikerült viszonylag jól leírni. Itt olyan biotechnológiákról van szó, amelyek központi katalizátora egy mikrogomba vagy egy baktérium és a szubsztrátból termék keletkezése is viszonylag egyszerűen leírható, mert van egy, a technológia szempontjából főfolyamatnak tekinthető reakció.

A szennyezett talaj esetében bonyolultabb a helyzet. Nem csak arról van szó, hogy az átalakító tevékenységet végző központi katalizátor nem egyetlen mikroorganizmus, hanem egy közösség, egy bonyolult összetételű és dinamikájú közösség, mely egy pillanatig sem állandó, sem mennyiségi sem minőségi szempontból.

Egy másik talajra jellemző tulajdonság, hogy saját evolúciója van, mely irreverzibilis folyamatláncolatot jelent a genetikai alapoktól az anyagcsere jellemzőkig.

A talajban állandóan, szezonális periodicitással zajló bonyolult folyamatgyűttesre rakódik rá a szennyezőanyag átalakítását jelentő szintén bonyolult folyamatgyűttes.

A biodegradáción alapuló talajremediációs folyamatokban a talajban élő mikroorganizmus közösség ártalmatlan végtermékké alakítja a szennyezőanyagot. Bizonyos biokémiai folyamatoknak tehát szubsztrátja a szennyezőanyag és belőle a talaj mikro- vagy makroflóra esetleg fauna anyagcsere-folyamataiban átalakult termék keletkezik.

A bioremediáció alapját képező biológiai folyamatok mint minden fermentációnál két részből állnak: a biomassza felszaporodásából és termékképzésből.

3.2. A biomassza növekedés, a sejtek szaporodása a szennyezett talajban

A biomassza felszaporodása, mint említettük nem egyetlen sejtípus számbeli növekedését jelenti, hanem egy bonyolult közösségben bekövetkező változásokat. Ezek a változások nem okvetlenül jelentenek számbeli növekedést, bár a biodegradáción alapuló leggyakoribb esetben, amikor a szennyezőanyagot szubsztrátként hasznosítja a közösség, akkor okvetlenül számíthatunk a populációk számbeli növekedésére, tehát a biomassza megnövekedésére és ezzel együtt bizonyos biogén elemek vagy akkumulálódó elemek és vegyületek sejtbe épülésével.

Ugyanakkor rendkívüli fontossággal bír a mikroflóra minőségi változása, a diverzitás, a fajok egymáshoz viszonyított arányának megváltozása, a szubsztrát, mint szelekciós nyomás hatására. Ez a fajeloszlás változás kedvez a szubsztrátot vagy annak átalakulási termékeit hasznosító organizmusoknak és a rájuk épülő tápláléklánc tagjainak.

A szennyezőanyag hatására kétségkívül bekövetkező fajeloszlás változás követése a talajban nem egyszerű, már csak azért sem, mert egyáltalán nem megoldott a talajban élő mikroorganizmusok jó környezeti realitással bíró kimutatása, ezért nem ezt az utat, hanem, ha lehetséges indikátorszervezetek kimutatását célszerű választani a közösségben létrejött folyamatok követésére.

Mi a saját gyakorlatunkban a szennyezőanyagra specifikus, azt bontani vagy más módon hasznosítani képes mikroorganizmusok elektív táptalajon való kimutatását és számszerű meghatározását alkalmazzuk, például szénhidrogénbontó sejt koncentráció.

A biomassza mennyiségi növekedését nem csak az élősejtszámok, de a sejtekhez kötődő, mennyiségükkel arányos életfolyamataik alapján is mérhetjük, például a légzés vagy a dehidrogenáz vagy más enzim aktivitása alapján.

A biomassza felszaporodásának követése nehézségekbe ütközik és szennyezőanyagonként és talajonként is eltér, ezért a mérési adatok alapján leírható kinetika a mai napig nem született meg talajra. Mindezek ellenére a sejtszámok növekedése alapján kalkulált biomassza-növekedéshez szükséges biogén elem (C, O, N, P) és mikroelem mennyiséget meg tudjuk becsülni és ezt a becsült mennyiséget a bioremediáció során biztosítani, a talajban, ha a talaj maga nem képes biztosítani. Becsléssel történő meghatározás azért is elegendő, mert ezen elemek mikroorganizmusok általi hozzáférhetősége és elérhetősége szintén nem hasonlítható a fermentorban elérhető hasznosítási hatékonysággal, ráadásul nem ismert értékről van szó. A talajban a heterogenitásokat, a nedvességgel történő transzportot és a mikroorganizmusok által lakott tereket is figyelembe véve úgylis sokszoros felesleggel kell dolgoznunk.

A talaj mikrokapillárisainak biofilmjében élő mikroorganizmusokhoz amúgy is diffúzióval jutnak el az oldott anyagok, tehát bármilyen koncentrációértékek léteznek, a folyamatok limitáló tényezője a diffúzió lesz. Ezt a diffúziós sebességet valamennyire meg lehet növelni a hajtóerőül szolgáló koncentrációkülönbségek növelése által, de ezek a koncentráció-növekedések is rendkívül korlátozottak a talaj bonyolult fizikai-kémiai egyensúlyi rendszerének működése miatt. Ha valamiből az egyensúlyi koncentrációnak megfelelőnél sokkal több van a talajban pl. oldott állapotban, az azonnal szorbeálódik, mi több, elindul az immobilizáció, beépülés vagy lebomlás útján, tehát hasznosíthatatlanná válik, hosszú távon irreverzibilisen kikerül az anyagkörforgalomból.

3.3. Termékképzés

A biokémiai reakció típusa szerint a bioremediációs folyamat alapja többféle lehet. Legnépszerűbb a biodegradáción alapuló talajremediáció, ami jelentheti a szennyezőanyag mint energiatermelésre alkalmas szubsztrát hasznosítását, ideális esetben teljes

mineralizációval. Ugyanakkor, főleg nagyobb szervesanyag mennyiség talajba kerülésével előálló egyensúlyi viszonyok egy másik talajfolyamatot is intenzívebbé tesznek, nevezetesen a humuszképződést. A mineralizáció – humuszképződés aránya a mikroflóra mennyiségétől és aktivitásától és a külső körülményektől egyaránt függ. A technológusnak a mineralizáció irányába kell eltolnia az egyensúlyt. Ez meg is oldható egyetlen talajszennyező vegyület esetén, de sokkal bonyolultabbá válik a helyzet, ha a szennyezőanyag egy összetett keverék, például kőolajszármazék, aminek rövid szénláncú alifás összetevői könnyen biodegradálódna, de a szénatomszám növekedésével se bonyolultabbá válásával, aromás gyűrűk jelenlétével párhuzamosan egyre nehezebb. Ilyenkor a technológusnak a bioremediáció elején, amikor még sok a könnyen biodegradálható komponens a mineralizáció irányába kell eltolnia az egyensúlyt a vége felé viszont, a humuszképződés irányába, melynek segítségével a már nem bontható kőolajkomponensek immobilizálódhatnak. Ilyenkor az is feladat, hogy ez az immobilizáció lehetőleg irreverzibilis legyen.

A biodegradációs szakasz önmaga is többlépcsős. Ha a biomassa növekedési görbáját képzeljük magunk elé, akkor olyan összetett szubsztrátok esetében, mint egy kőolajszármazék, többlépcsős görbét kell kapjunk, hiszen, amikor a könnyebben hasznosuló szubsztrát elfogy, akkor az előzőt hasznosító fajoktól eltérő fajok fognak felszaporodni egy újabb szennyezőanyag-csoport, mint szubsztrát hasznosítása mellett.

A termékképződési kinetika ennek megfelelően egyre kisebb sebességi állandóval (egyre nehezebben biodegradálódó komponensek), időben egymást követő, átfedéssel vagy anélküli (az adaptációs időszak hosszúságától függően) görbéket fognak eredményezni.

A talajremediáció alapjául szolgáló mikrobiális biokémiai reakciók száma és fajtája végtelen, a mikroorganizmusok végtelen genetikai és biokémiai potenciáljának köszönhetően és a sokféleségükből adódó kombinációk jóvoltából. Ezeket a folyamatokat nem csak a talajremediáció, de a víztisztítás (ivó- és szennyvíz) valamint a levegőtisztítási technológiák is hasznosítják.

Néhány a mikroorganizmusok segítségével a bioremediációban hasznosítható anyagcserefolyamat:

Kemotrófok körében: légzés, nitrátlégzés, szulfátlégzés, erjedési folyamatok, metánoxidáció.

Kemolitotrófok körében: nitrifikáció, kénoxidáció, vasoxidáció, hidrogénoxidáció, metánképzés, acetogenezis.

Fototrófok körében: fotoszintézis eltérő módoszatai.

Az energiatermelés és a szintetizáló folyamatok un. kapcsolt reakciók, a szintézishez az energiatermelés szolgáltatja a szükséges energiát.

Szintézisek közül általánosan elterjedt a talajmikroflóra saját sejtanyagának szintézise. Növényekkel szimbiózisban légköri nitrogén fixálása és a növények számára mineralizált tápanyagok előállítása, többek között biológiailag felvehető foszforé. Elsődleges és másodlagos metabolitok szintézise, kiemelendők az enzimek.

Bontási folyamatok: energiatermelés céljából vagy kometabolizmussal folyhat. Ez utóbbi esetébe az energiát szolgáltató szubsztrátra is szükség van. A mikroorganizmusok azonos módon bontják a természetes szerves anyagokat és a nem természetidegen szennyezőanyagokat. Ettől eltérhetnek viszont a xenobiotikumok bontásában szerepet játszó anyagcsereutak.

Biodegradáció alatt általában a szerves anyag komplexitásának csökkenését értjük. A biodegradáció általában biológiai oxidáció val jár együtt. Ez lehet energiatermeléshez kötött

vagy kometabolikus, azaz energiatermeléssel nem járó folyamat. Mineralizáció alatt a szerves molekulák tökéletes lebontását értjük, melynek végterméke CO_2 és víz a szén tekintve és szervesetlen végtermékek a többi elemet tartalmazó szerves vegyület mineralizációjának eredményeképpen.

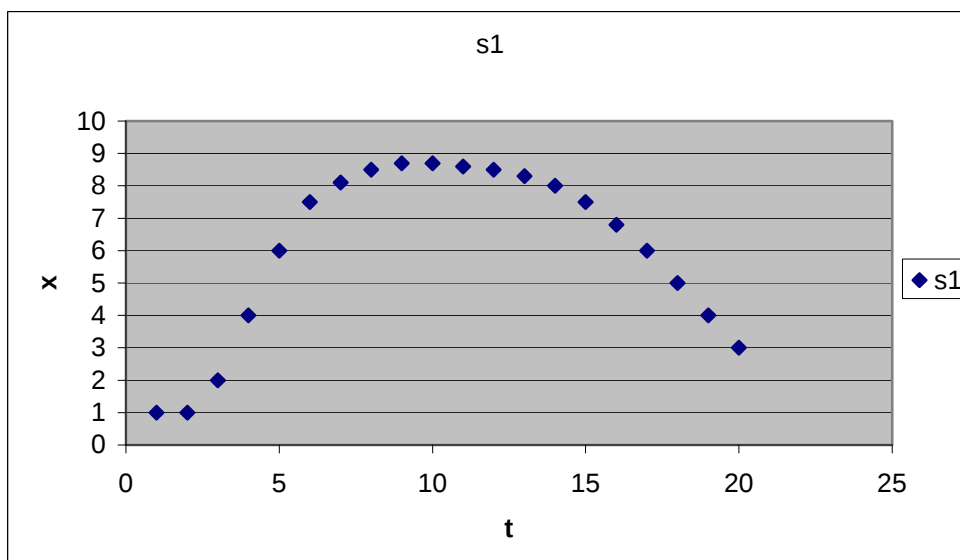
A talajban történő biodegradáció két fontos kísérőjelensége a biológiai hozzáférhetőség és a toxikusság. Ezek nagymértékben limitálhatják a biológiai folyamatokat.

A talajban a bioszintézissel és biodegradációval párhuzamosan folyó folyamat a humuszképződés, amely fizikai-kémiai folyamat. Az egyensúlyi folyamatokban felhalmozódó szerves bontási közttermékek kondenzációs és polimerizációs reakciókban alakulnak egyre növekvő és a kolloid mérettartományt is elérő humuszmolekulákká, melyek a talaj fontos alkotóelemei: részben táphumusz, részben szerkezeti humusz formájában. A táphumusz lassú folyamatban ismét bekerülhet a talaj tápanyag-körforgásába és mineralizálódhat, egy része viszont hosszútávon kivonódik a körfolyamatokból.

A talajban folyó anyagsere-folyamatok szabályozásában ugyanazok az ismert mechanizmusok vesznek részt, mint a mikrobiológiai folyamatokban általában, csak a három talajfázis és diffúziólimitált helyzet miatt igen bonyolult módon. Induktív enzimek működnek, az indukcióhoz szükséges minimális koncentrációt itt is el kell érnie a szubsztrátnak, működik a katabolit-represszió, a szubsztrátspecifikus és kevésbé specifikus enzimek. Ezekhez a szokásos anyagsere-szabályozási módokhoz nagyban hozzájárulnak a szennyezett talajokban jellemző genetikai módosulások, a provokált és a szennyezőanyag által irányított evolúciós folyamatok (modifikációt követő szelekció), a fajok eloszlásának megváltozásától az ugráló gének és más mobilis genetikai elemek működésbe lépéséig, vagyis a horizontális géntranszfer által létrehozott új genetikai rekombinációkig.

Említésre méltóak még a talajra igen jellemző mikrobiális együttműködések: mind az ellentétesek, mint pedig az együttműködések. Konzorciumok, szintrófia és szukcesszió nélkül nincsenek talajmikrobiológiai folyamatok. Igen jellemzőek a konkurrencia, a kompetíció, az amenzalizmus, a parazitizmus, a ragadozás vagy a pozitív együttműködések közül a kommenzalizmus és a szimbiózis.

Nagyon fontos a talajban élő lassú növekedésű és alkalmasint kis koncentrációban jelenlévő cellulóz és humuszbontó mikroorganizmusok szerepe, melyeket könnyen tönkretelhetünk könnyen bontható szubsztrátok és gyorsan növekvő és könnyen „hízó” mikroorganizmusok talajba adásával. Szerencse, hogy ezek általában visszafordítható folyamatok, de toxikus szennyezőanyagok egyidejű jelenlétében egy rosszul vezetett technológiával könnyen elérhetjük végleges kiirtásukat és ezáltal a talaj mikrobiológiai egyensúlyának felborulását.



21. ábra: Szaporodáskinetika egykomponensű biodegradálható szennyezőanyag esetén: s1 szubsztrátot hasznosító biomassza növekedése az időben

A 21. ábrán bemutatott szaporodási görbe a talajban élő mikroorganizmus mennyiségét (x: biomassza) ábrázolja az időben, s1 szubsztrátkoncentráció mellett. S1 a mi esetünkben a biodegradálható talajszennyezőanyag.

A szennyezőanyagot bontó mikroorganizmus egy adaptációs periódus után (a görbe kezdeti vízszintes szakasza) kezd növekedni. Az adaptációs szakaszban a mikroorganizmus nem szaporodik ugyan, de a körülményektől függő intenzitással folyik a genetikai-biokémiai háttér kialakulás a sejtekben. Ha ez megtörtént, akkor a talajmikroorganizmus készen áll a szennyezőanyag, mint szubsztrát hasznosítására. Ezt előbb lassan, majd állandó sebességgel teszi, miközben állandó generációs idő mellett szaporodik (a görbe meredeken felfele ívelő szakasza). A görbén az 5 időérték körül egy inflexiós pont található, mely a szaporodási sebesség lassulását jelzi előre, amely a szubsztrát fogyásával előbb-utóbb bekövetkezik. Tehát a szennyezőanyag bontására képes mikroorganizmus faj szaporodását a szennyezőanyag (szubsztrát) limitálja. A bontó faj egyedeinek szaporodása közben elfogy a talajból a szennyezőanyag. A felszaporodott sejt tömeg pusztulni kezd, a talaj holt szerves anyagaival azonos úton-módon vagy mineralizálódik vagy beépül a talaj humuszanyagába.

A biodegradáló mikroorganizmusok tehát kétféleképpen hasznosítják a szennyezőanyag molekulákat: lebontják, oxidatív folyamatok közben elemeire bontják és energiát állítanak elő belőle. Az energiát az élethez, a bioszintézishez használják fel. A szerves szennyezőanyagból nyert biogén elemeket pedig beépítik a saját sejtjeikbe. A két folyamat aránya fontos tényező lehet a technológus szempontjából: bioremediációban, általában biodegradáción alapuló környezetvédelmi technológiákban az a jó mikroorganizmus, amely intenzíven bont, de kevés sejt tömeget termel, tehát, amelyeknél az energiatermelésen van a hangsúly, nem a bioszintézisen. Ez főleg olyan technológiáknál érdekes, ahol a keletkezett sejt tömeg kezeléséről külön gondoskodni kell, tehát elsősorban a vízkezelési technológiáknál, a teljes talaj esetében kevésbé. Viszont a talaj esetében sem előnyös, ha a szennyezőanyag, mint szubsztrát egyoldalú tápanyagellátást biztosít: ilyenek a szénhidrogének, amelyeknek neve is mutatja, hogy szénből és hidrogénből állnak, emiatt a sejt tömeg felépítéséhez szükséges N, P, S stb. elemeket a technológusnak kell megfelelő arányban biztosítani, ami részletes monitoringot és tápanyagpótlást, tehát költségeket jelent a technológia vezetése során.

A szennyezőanyagból, mint szubsztrátból a talajmikroorganizmusok által előállított energia és sejt tömeg sztöchiometriai arányait mérési eredmények alapján le is írhatjuk. Egy átlagos szénhidrogén aerob biodegradációjának tervezésekor az alábbi sztöchiometriai egyenletből szoktunk kiindulni.



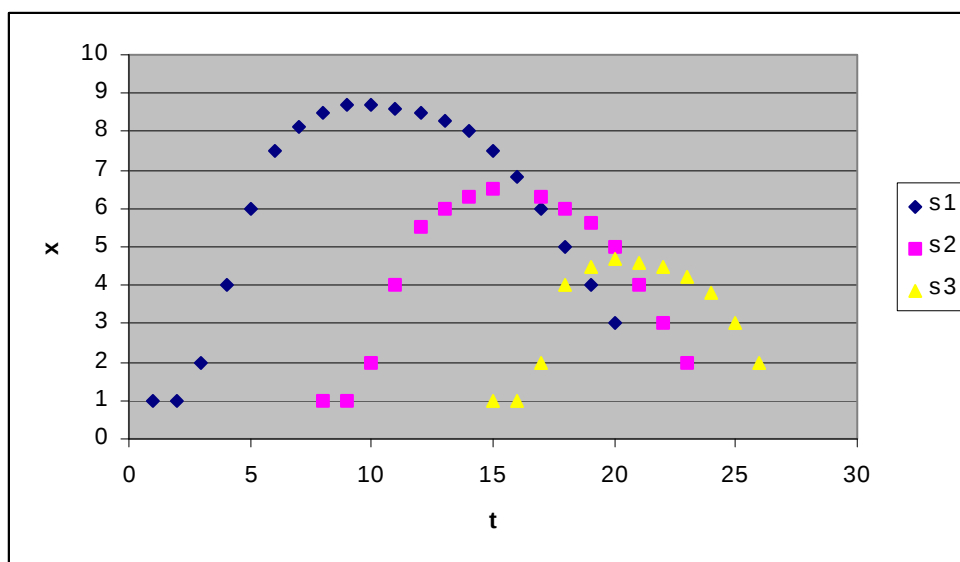
Mólsúlyok	96	160	14	113 (sejttömeg)
------------------	-----------	------------	-----------	------------------------

Természetesen ennek az egyenletnek a sztöchiometriája függ a szénhidrogén molekulaszúlyától és szerkezetétől és a mikroorganizmus azon képességétől, hogy milyen arányban termel energiát és sejt tömeget. Az egyenletből az is látszik, hogy az aerob biodegradációhoz nagymennyiségű oxigénre van szükség: 100 g szénhidrogénhez mintegy 160 g oxigénre, ami 800 g levegőnek felel meg. A bioremediáció során alkalmazott

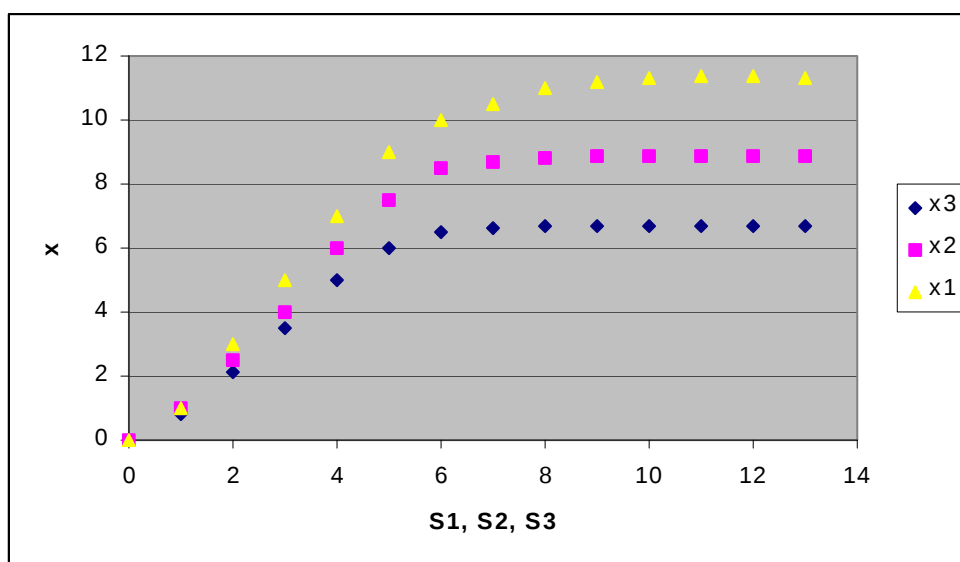
levegőztetés tervezésekor a számított mennyiséghez képest legalább ötszörös felesleggel számolunk a talaj heterogenitása éterjedés diffúziólimitáltsága miatt.

A reakciókinetikai megközelítést tovább bonyolítja, hogy a talajszennyezőanyagok általában összetett anyagok, különböző mértékben biodegradálódó komponensekből állnak, melyek vagy folyamatos sorozatot alkotnak vagy biodegradálhatóság szerint csoportokat. A 22. ábrán látható talajszennyező anyag 3 eltérő biodegradálhatóságú csoportba osztható komponensekből áll. S1: könnyen biodegradálható, S2: közepesen biodegradálható, S3: nehezen biodegradálható. Általában van egy utolsó, nem biodegradálódó frakció is, amely maradékként jelenik meg a talajban, és bekerül a humuszképződési és fosszilizációs folyamatokba.

Összetett talajszennyezőanyag esetén a szaporodási görbe több (ebben az esetben három) egymásba integrálódó görbéből áll. A sejtkonc mérése alapján felvett görbe ezek burkológörbéje. Amikor S1 fogyni kezd, akkor a közösség S2 biodegradációjára képes része felszaporodik és amikor elvégezte a dolgát, pusztulni kezd majd előtérbe kerül a harmadik csoport. A folyamatot egyre nehezebben biodegradálható szubsztrátok, egyre lassabban szaporodó és kisebb sejttömeget elérő biomassza jellemzi.

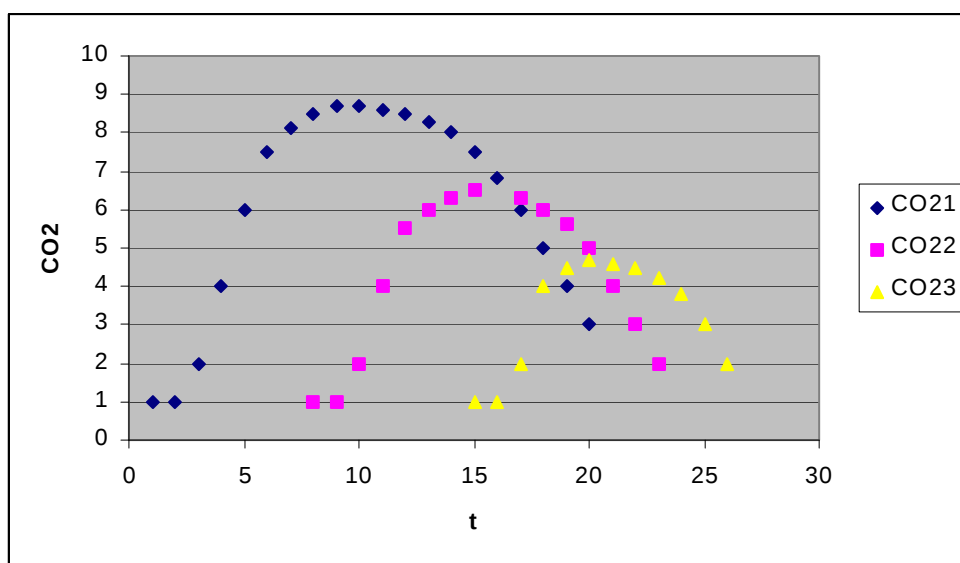


22. ábra: Szaporodási görbék összetett talajszennyezőanyag esetén



23. ábra: A talajban felszaporodó sejtömeg a szubsztrátként hasznosított szennyezőanyag koncentráció függvényében

A 23. ábrán látható, hogy a szubsztrát limitálja az egyes specifikus bontóképességű konzorciumokat a növekedésben. A három biomassza növekedési görbéje időben konszekutíve jelentkeznek.



24. ábra: Összetett szubsztrát biodegradációjának követése a végtermék (CO_2) mérésével

Az aerob biodegradáció fő terméke a széndioxid. Ez jól mérhető a talajban, a technológia követésére alkalmas paraméter. A termékképződés kinetikája hasonló a sejtömeg keletkezést leíró görbéhez (24. ábra). A méréssel megállapított széndioxidtermelés a burkológörbét adja. A burkológörbe alatti lépcsők az egyes, bonthatóság szerinti szennyezőanyag-csoportokhoz tartozó csökkenő mértékű biodegradációból adódó egyre kisebb széndioxidtermelést mutatják.

3.4. Anyagmérlegek

Az anyagmérleg a reakciókinetika és a reaktor között áll, hiszen a kinetikán alapul, de figyelembe veszi a reaktor felépítését, elrendezését is.

A szennyezőanyag-koncentrációváltozás vektora a következőképpen adható meg:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{\text{bio}} + \mathbf{F}_{\text{be}} + \mathbf{F}_{\text{ki}} \quad (2)$$

$\mathbf{r}_{\text{bio}}$ = a biológiai reakciósebességi vektor

$\mathbf{F}_{\text{be}}$ = anyagbeviteli tömegáram vektora

$\mathbf{F}_{\text{ki}}$ = anyagkiviteli tömegáram vektora

Az egyenletben szereplő $\mathbf{r}$ kifejezhető a biotomassza keletkezés sebességében, a szubsztrátfogyásban, az oxigénfogyásban, vagy bármelyik anyagcseretermék keletkezésében, a reakciókinetikai ábrák alapján.

Magárahagyott rendszer esetén: $\mathbf{F}_{\text{be}} = \mathbf{F}_{\text{ki}} = 0$, nincs anyagáram, tehát a szennyezőanyag-csökkenés egyedül a spontán biodegradáció sebességétől függ.

Technológiai beavatkozás esetén valamilyen anyagáramot indítunk. Ez lehet, pl. levegőztetés, levegő elszívás és friss levegő bejuttatás. Ilyenkor az anyagmérleg a levegőáramból fogyott oxigénmennyiség vagy a keletkezett széndioxidmennyiség alapján írható fel, ezekből pedig származtatatható a szennyezőanyagfogyás (1) összefüggés használatával.

Az anyagmérleg felírható az eltávolított szennyezőanyag-mennyiség alapján, vagy a a limitáló tápanyag adagolása alapján.

Ha a biológiai folyamatot fizikai-kémiai kezelésekkel kombináljuk, akkor azok anyagáramát is figyelembe kell venni. Például ex situ vízkezeléssel kombinált in situ biodegradáció során a talajvízzel eltávolított anyagmennyiséget is figyelembe kell venni.

További nehézségeket jelenthet, hogy a szerves anyag biodegradációs folyamatait leíró összefüggések oldott állapotú szubsztrátra vonatkoznak. Ezt a talajban limitálja a hozzáférhetőség és a diffúzió. Ezért legjobb, ha a talajban folyó biodegradáció anyagmérlegének leírásához monitoringadatokat használunk.

A talajban a **hozzáférhetőséget** befolyásoló folyamatok integrálódnak a komplex biodegradációs folyamatba. A szennyezőanyag biológiai hozzáférhetőségét meghatározó fizikai-kémiai-biológiai feltételek állandóan változnak a talajban és a technológus is befolyásolhatja azokat. A biológiai hozzáférhetőség függ a talaj hőmérsékletétől és a redoxviszonyoktól valamint a mikroorganizmusok által termelt biotenzidek mennyiségétől és minőségétől. A hozzáférhetőséget jellemző görbe többkomponensű szennyezőanyag esetében hullámzó burkológörbéhez vezet: a mikroflóra adaptálódása eredményeképpen biológiailag hozzáférhetővé vált anyaghányad átmeneti növekedést okoz a hozzáférhető mennyiségben majd biodegradációját követően csökkenést. Ennek a frakciónak az elfogyását követően következik egy másik, nehezebben hozzáférhető anyagcsoport szolubilizálása és biodegradációja.

4. Reaktortípusok

A reaktortípusoknál már nem mindegy, hogy ex situ vagy in situ technológiát választottunk-e, hiszen a reaktor kivitele ennek függvényében nagymértékben eltér. In situ technológia alkalmazása esetén a „reaktornak” nevezett objektum a szó szoros értelmében nem is hasonlít egy szokványos, falakkal, rendelkező reaktorhoz, az lehet egy teljesen nyitott térfogat, lehet egy víznyerő kútnak a belső tere vagy a talaj hézagterfogata, „amiben” alkalmasint a kezelendő talajgáz vagy talajvíz helyezkedik el.

A reaktortípusokat a technológiák részletes tárgyalása után itt most ismét áttekintjük, néhány gyakori alkalmazás konkrét és részletes ismertetésével.

4.1. Reaktorok csoportosításának alapjai

- Talaj fázisa szerint: gáz, folyadék, zagy (iszap), szilárd
- Koncentrációgradiens szerint: kevert homogén tankreaktor, csőreaktor, töltött oszlop
- Párhuzamosan alkalmazott technológiák: a kezelt talajfázisok száma szerint:
- Egymást követő technológiák száma: egylépcsős, többlelépcsős (sorosan kapcsolt, párhuzamosan kapcsolt, kaszkád)
- A reaktorból való anyagtávozás szempontjából: zárt, félig nyitott, nyitott
- Időbeli koncentrációváltozások: szakaszos, folytonos, kvázifolytonos
- Anyagáramok szempontjából: csak elvétel, csak betáplálás, recirkuláció
- Redoxpotenciál szempontjából: aerob, anaerob és anaerobitás foka
- Leggyakoribb kombinációk: ld. a konkrét talajkezelési technológiák leírásánál.

4.2. Az ex situ talajkezelési technológiák konkrét reaktorai

Ex situ gázkezelő reaktorok: égetőtér, katalizátoros égetőreaktor, folyadékfázisú gázelnyelő, gázmosó, töltött oszlop, pl. fizikai-kémiai adszorber vagy biológiai szűrő lehet. Ezek a reaktorok általában folytonos, vagy recirkulációval ellátott szakaszos működésűek.

Ex situ talajvízkezelő reaktortípusok: azonosak a szennyvízkezelés reaktoraival, melyek állhatnak ülepítőből, kevert reaktorokból, levegőztetőreaktorokból, maga a kezelés alapulhatnak fizikai-kémiai, biológiai vagy ezek kombinációját jelentő módszereken. Leggyakoribb biotechnológiák az eleveniszapos aerob szennyvízkezelés, a csepegőtestes szennyvízkezelés, az anoxikus eljárások, az anaerob biodegradáción alapuló rothasztási technológiák. A felszaporodott sejtömeg kezelésére további biotechnológiákat kell alkalmazni (aerob iszapstabilizálás, komposztálás, anaerob iszaprothasztás). Hasznosítható termékek is keletkezhetnek (biogáz)

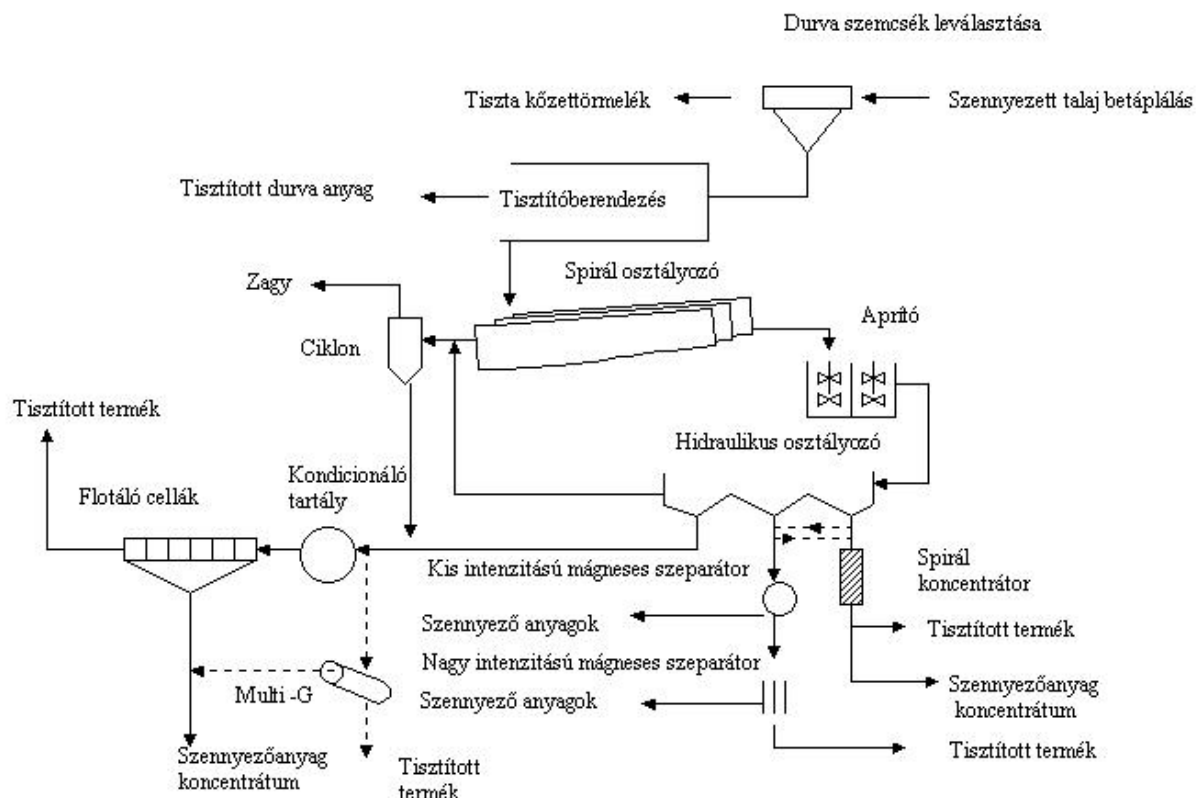
Ex situ szilárd fázist vagy teljes talajt kezelő reaktorok háromfázisú vagy kétfázisú rendszerek lehetnek. A kétfázisúaknál is eltérő sűrűségű zagyokat kezelhetünk a sűrű zagyoktól, a vízhez hasonlóan kezelhető híg szuszpenzióig. A háromfázisú talajkezelő technológiák alapulhatnak fizikai, kémiai, termikus vagy biológiai folyamatokon, de alkalmazhatjuk ezek kombinációit is.

A fizikai-kémiai folyamatokon alapuló technológiák közül kiemeljük az ex situ talajmosást és az ex situ közepes hőmérsékletű termikus deszorpciót. A biotechnológiák között a leggyakoribbakat tárgyaljuk, így az intenzifikált biodegradáción alapuló vékony talajréteg agrotechnikai kezelését, prizmás kezelését, aerob és anaerob medencékben való kezelést valamint az iszapreaktorokat.

Szennyezett talaj ex situ vizes mosása talajkezelő üzemben

Szerves és/vagy szervesetlen anyaggal szennyezett talaj kezelésére egyaránt alkalmas lehet a talaj komplex vizes mosással kombinált kezelése. A talajból készült vizes szuszpenzióval műveletek sorozatát végezhetjük, ahogy azt a 25. ábra mutatja. Ezeket a műveletek tetszőleges kombinációban alkalmazhatjuk a talajtípus és a szennyezőanyag függvényében. A válogatás, osztályozás, szeparálás, ciklonnal, flotálással különböző sűrűségű szuszpenziókban történik, egyes kezelőreaktorokban kémiai reakciókat is lefolytathatunk a szennyezőanyag átalakítása vagy bontása érdekében. A menetközben keletkező tisztított frakciókat

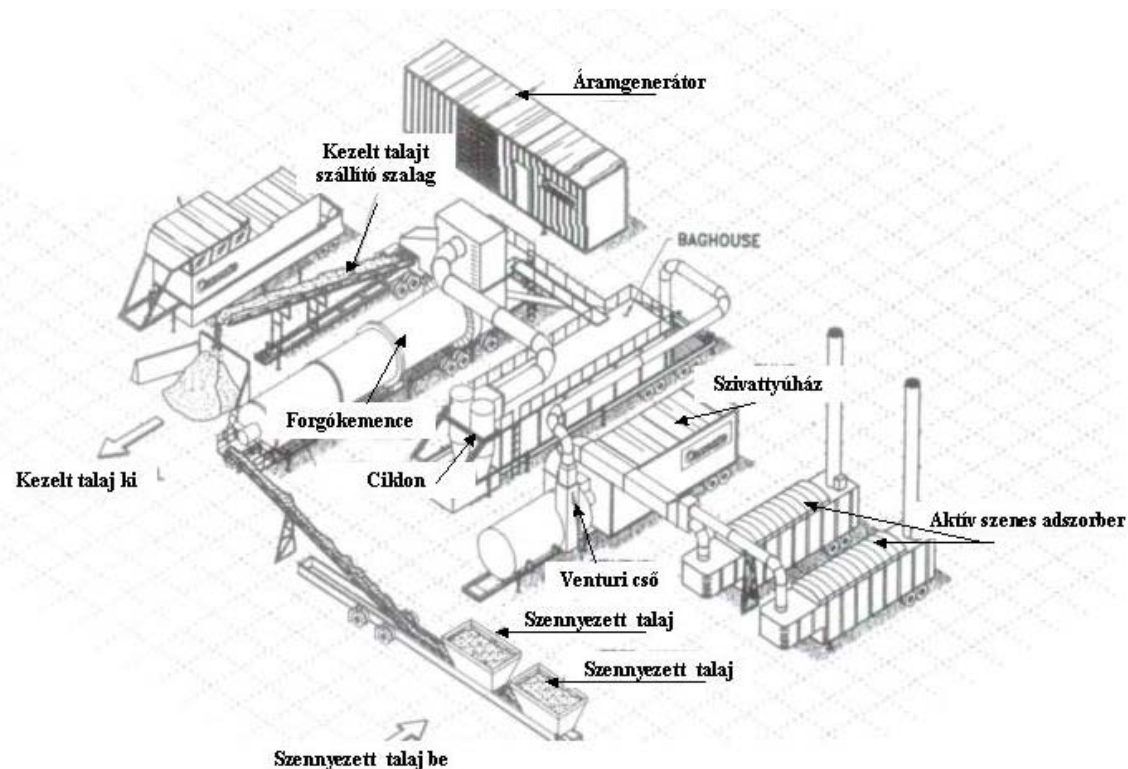
fokozatosan eltávolítjuk, víztelenítjük és ha lehet hasznosítjuk. A szennyezőanyag visszanyerésére is mód van.



25. ábra: Talaj ex situ vizes mosása és komplex kezelése zagy formában

Szerves anyaggal szennyezett talaj ex situ termikus deszorpciója

Az ex situ termikus deszorpció igen hatékony eljárás deszorbeálható szerves szennyezőanyagokkal szennyezett talaj kezelésére. Lényege, hogy a szennyezőanyagot gőz formájában eltávolítjuk a talaj szilárd fázisának felületéről úgy, hogy égés ne történjék (indirekt fűtés, oxigén kizárása). A gőzfázisba átkerült szennyezőanyagot lecsapjuk és visszanyerjük, elégetjük vagy más módon kezeljük. Az elmenő gázokat tisztítjuk, mielőtt a légkörbe engednénk (ld. 26. ábra). Ha nem túl magas a hőmérséklet és rövid a tartózkodási idő a talaj alig károsodik. Revitalizációra szükség lehet.

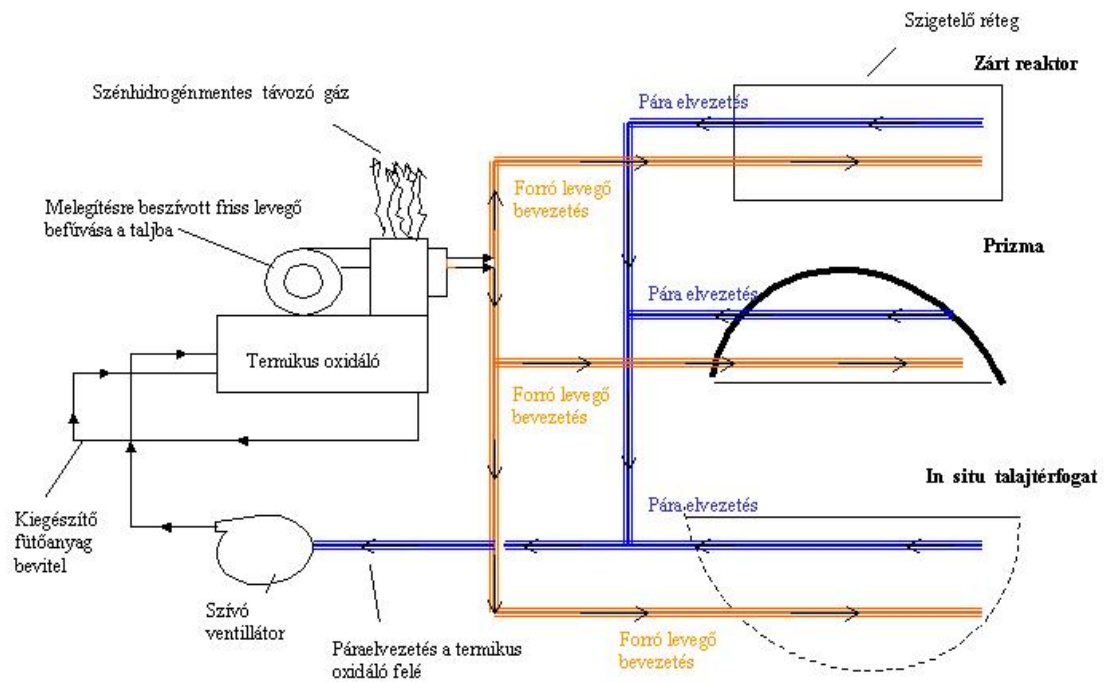


26. ábra: Közepes hőmérsékletű ex situ termikus deszorpció

Hasonló elven működő – vagyis a talaj szilárd fázisára szorbeálódott szennyezőanyag gőzformájúvá alakító – termikus deszorpciót néhány fok hőmérsékletemeléstől (50–100 °C-ra) akár 700 °C-ig történő felmelegítésre is alkalmazhatunk. Nem csak a talajt tehetjük egy fűtött reaktorba (jelen esetben a forgókemencébe), hanem a forró levegőt is bevezethetjük a talajba. A forró levegőt az *in situ* és ex situ talajkezeléshez egyaránt használhatjuk. Biológiai kezeléssel is kombinálhatjuk az alacsony hőfokú termikus deszorpciót, hiszen a mikroorganizmusok általi hozzáférhetőséget is megnövelhetjük a deszorpcióval, nem beszélve arról, hogy bizonyos mikroorganizmus aktiválása is lehetséges a hőmérsékletemeléssel.

Alacsony hőfokú termikus deszorpció ex situ és in situ talajkezeléshez

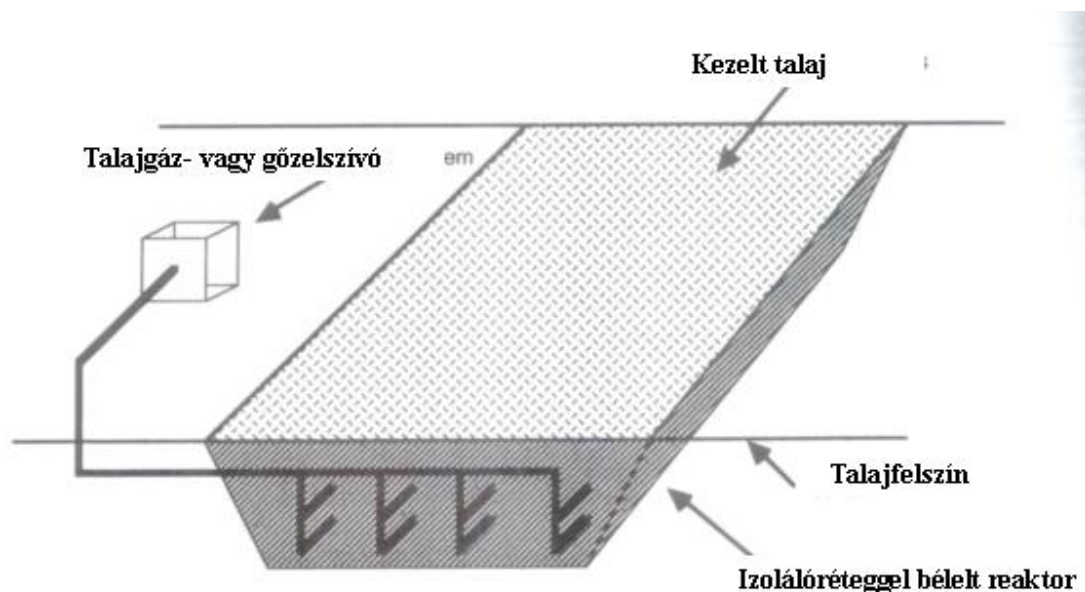
A 27. ábrán bemutatott fűtőrendszer három alternatívát mutat. A mobilis fűtőrendszert akár *in situ* akár ex situ prizmás (félíg nyitott) vagy zárt reaktoros technológiához csatlakoztathatjuk. Külön előnye ennek az elrendezésnek, hogy a talajból kiszívott levegőben lévő gőzöket ugyanabban a kazánban égeti el, mint amelyikkel meleg levegőt állítja elő. A meleg levegőt szolgáltató égetőberendezés egyaránt használható illékony szennyezőanyaggal szennyezett talaj fizikai kezelésére (gőzelszívás), mind biológiai kezelésre (biodegradáció), mind pedig a kettő kombinációjára.



27. ábra: Termikus deszorpció ex situ és *in situ* bioremediációval kombinálva

Bioremediáció felül nyitott tartályreaktorban

A 28. ábra egy egyszerű geofóliával bélelt földmedencét ábrázol, melyben a szennyezett háromfázisú talaj bioremediálása folyik. A tartályban elhelyezett perforált csőrendszer segítségével mind a talajgáz- és gőz elszívása, mind pedig víz vagy vízben oldott anyagok bejuttatása megoldható. A csurgalékvíz gyűjtése és elvezetése is megoldható egy ilyen tartály megfelelő kiképzésével. A tartályreaktor betonból is készülhet. A talaj viszonylag homogenizált állapotban kerül a reaktorba, később a talaj mozgására már nincs mód.



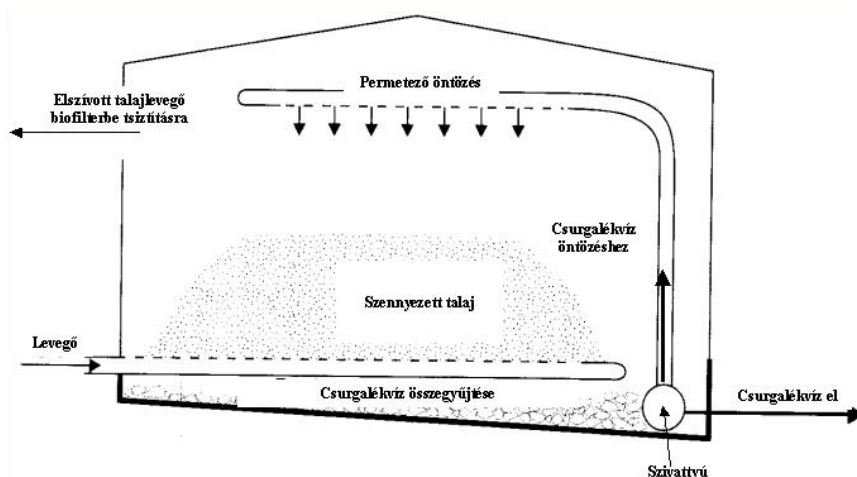
28. ábra: Háromfázisú talaj bioremediáció felül nyitott tartályreaktorban

Ennél a nyitott reaktortípusnál csupán a talaj felszíne érintkezik a környezettel, de amennyiben állandó levegőelszívást alkalmazunk, akkor a prizmából távozó gőzök mennyisége minimális. Ennél lényegesen nagyobb felületen érintkeznek a légköri levegővel a letakaratlan biológiai prizmák és a vékony rétegben szétterített és agrotechnikai eljárásokkal kezelt (szántás, boronálás) talajok. Tehát, amennyiben toxikus illékony anyagok szennyezik a talajt akkor vagy a 26. ábrán látható, állandóan szívott tartályt kell alkalmazni, vagy teljesen zárt reaktort.

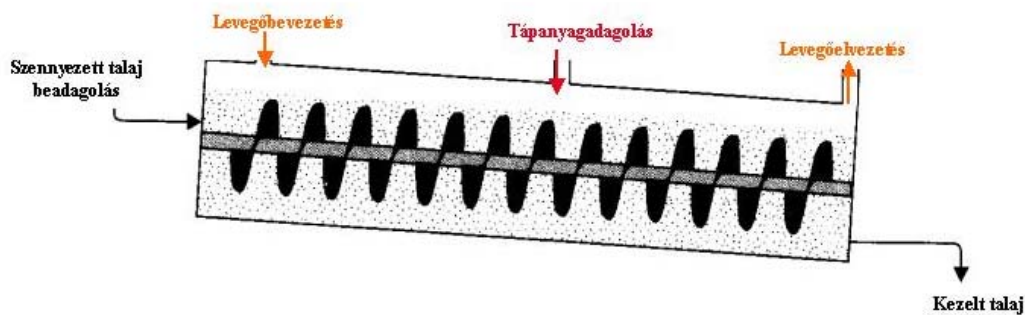
Bioremediáció zárt reaktorokban

Fizikai-kémiai, biológiai vagy kombinált kezeléseket zárt tartályokban is végezhetünk. Ennek előnye, hogy a kibocsátás minimálisra csökkenthető, zagyok, iszapfázisú talajok és üledékek is kezelhetők benne, a technológiai paraméterek jobban kontrollálhatóak és szabályozhatóak, mint a félig nyitott vagy teljesen nyitott in situ kvázireaktorokban. A kezelendő közeg homogenizálási is csak technológia és energiabefektetés kérdése.

A 29. ábrán látható technológia általában épített (beton) tankreaktorokban kivitelezhető. Légnedves háromfázisú talaj vagy annál nagyobb nedvességtartalmú talaj kezelésére egyaránt alkalmas, mert a talaj vízmegkötő-képességén felüli pórusvízmennyiség elvezetése is meg van oldva az a csurgalékvíz-elvezető rendszer beépítésével. A kezelendő talajt homogenizálják és adalékokkal látják el, mielőtt a reaktorba halmozódnak.



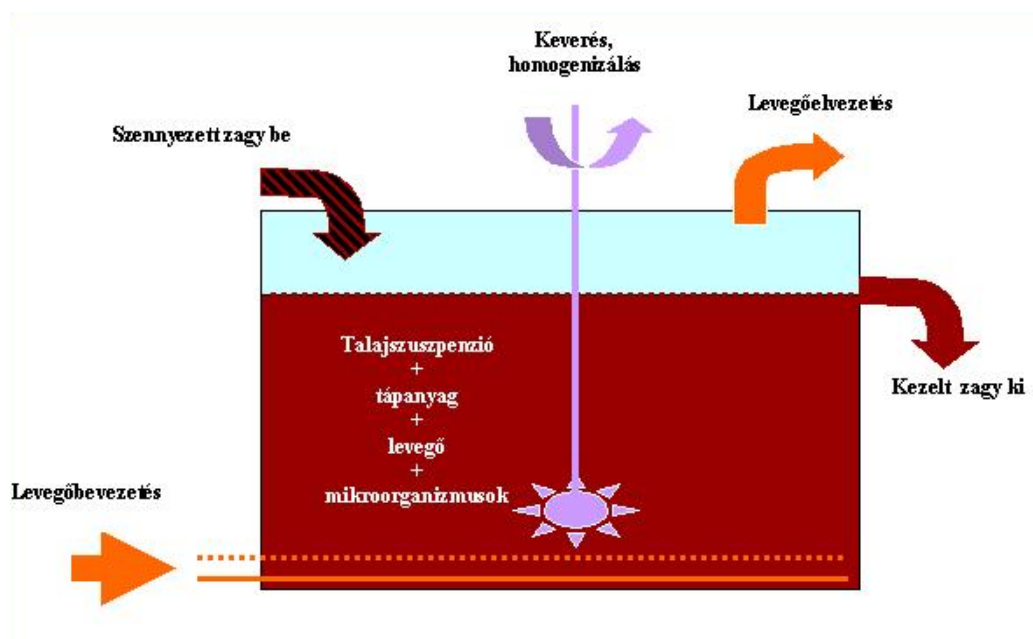
29. ábra: Épített tankreaktor levegőztetéssel, csurgalékkontrollal



30. ábra: Forgótárcsás csőreaktor folytonos biológiai talajkezeléshez

A fekvő csőreaktor (30. ábra) háromfázisú talaj biológiai kezelését teszi lehetővé. Az anyag haladása részben gravitációsan (dőntött helyzet), de főleg a csigaszállítással történik. A biológiai folyamathoz szükséges adalékok és a tartózkodási idő tetszőlegesen változtathatóak. A biológiai kezelés mellet (után) bármilyen fizikai-kémiai kezelést is végezhetünk ugyanebben a csigas csőreaktorban. A talaj nedvességtartalma csak bizonyos határok között növelhető, olyan sűrű zagyok kezelésére alkalmas, amelyeket képes a csigarendszer szállítani.

Ha zagy formában kell kezelnünk a talajt (üledéket), akkor ún. iszapreaktort alkalmazunk (31. ábra). Ezek az iszapreaktorok a szennyvíztisztításban alkalmazott iszapkezelő berendezésekhez hasonlítanak, lehetőség van a benne kezelt szuszpenzió keverésére, levegőztetésére, tápanyagok, egyéb adalékok vagy mikroorganizmusok tetszőleges adagolására, homogén rendszert jelent, mind szakaszosan, mint folytonosan működtethető.



31. ábra: Aerob iszapreaktor

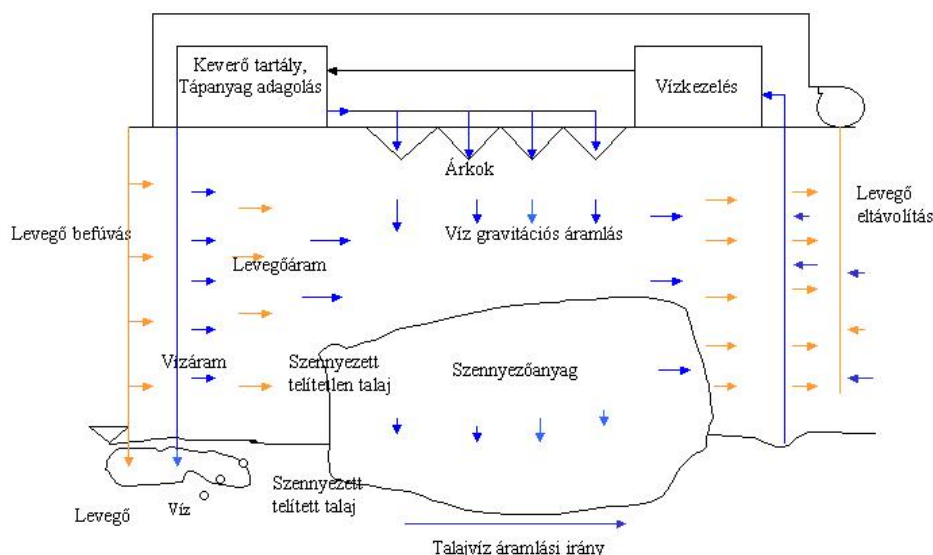
A 31. ábrán látható elrendezésű reaktor zagyok anaerob kezelésére is alkalmas, ilyenkor a zagy feletti teret természetesen nem levegő, hanem inert gáz vagy az anaerob folyamat terméke (metán) tölti ki.

4.3. *In situ* kvázireaktorok

Az *in situ* technológiák közül néhány olyat mutatunk be, ahol nyilvánvaló a talajtérfogat reaktorként kezelése és egyúttal megmutathatjuk a háromfázisú és kétfázisú talaj kezelésében mutatkozó különbségeket, különös figyelmet fordítva az *in situ* talajvízkezelésre. bemutatjuk a biológiai kezeléssel kapcsolatban a talajba helyezhető legfontosabb műveleteket, a levegőztetést, a melegítés különböző módjait, az aerob vagy éppen anaerob kezelési lehetőségeket.

Az in situ talajkezelés általános sémája

A 32. ábrán egy olyan összefoglaló ábrát látunk, amelyen a talaj szilárd fázisának *in situ* biológiai kezelése mellett a talajlevegő és a talajvíz, tehát a mobilis talajfázisok összes mozgatási lehetőségét is feltüntetjük, melyek tetszőleges kombinációban alkalmazhatóak a talaj és a szennyezőanyag tulajdonságainak valamint a talajmikroflóra aktivitásának függvényében.



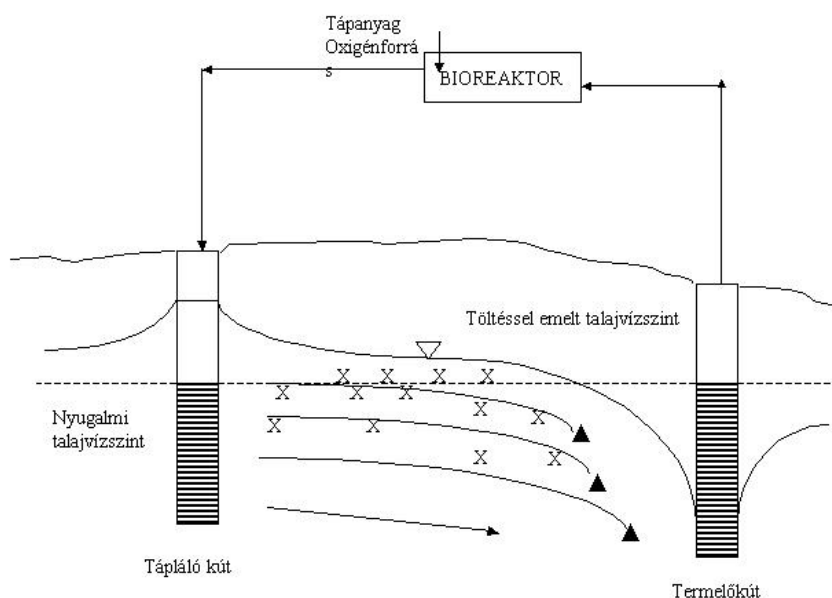
32. ábra: *In situ* talajkezelési lehetőségeket bemutató magyarázó ábra

A 32. ábrán több esetet sűrítettünk, hogy magyarázatot adjunk az *in situ* talajkezelés lényegére és reaktorként kezelésre. A vázlat olyan szennyezőanyag-elhelyezkedést mutat, amely mint a telített, mind a telítetlen zónát érinti, részben a háromfázisú, részben a kétfázisú talajban helyezkedik el. Ha teljes talajt kezelünk, akkor a talajvíz és a talajgáz kiszívására vagy recirkulálására nincs szükség, tehát ezen az ábrán minden opcionális. Az *in situ* szilárd fázis kezeléséhez tartozhat csak talajlevegő kiszívás, felszíni kezeléssel vagy anélkül, a felszíni levegő talajba juttatása történhet atmoszférikus nyomás mellett vagy túlnyomással, a telített zónába vagy a telítetlenbe. A talaj szilárd fázisának *in situ* kezeléséhez kapcsolódhat *ex situ* vízkezelés a levegő kezelés mellett vagy anélkül. A víz összegyűjtése drénrendszerrel vagy kutakkal történik, kiszívása általában szivattyúval. A kiszívott vizet a felszínen történt kezelés után visszajuttathatjuk a talajba, de el is tekinthetünk ettől. A visszajuttatás történhet a felszínről vagy sekély árkokból történő beszívárogztatással a telítetlen zónába, annak nedvességtartalom-pótlására vagy intenzívebb mosására, esetleg időszakos mosás célú elárasztására. A kezelt vizet közvetlenül a talajvízbe is visszajuttathatjuk, elsősorban a talajvízszint emelése és a depressziós kutak irányába történő áramlás provokálása céljából.

A talajvíz recirkulációja és ex situ kezelése

A talajvíz telített zónában történő recirkulációja egy olyan töltött reaktort eredményez, melyben a talajvíz folytonos biológiai kezelése a talajon kötött mikroorganizmusok segítségével folyik, ugyanakkor a szennyezett szilárd fázishoz kötött szennyezőanyagok folyamatos kimosását a víz végzi. A talajban folyó biológiai kezelés a felszínen folyó vízkezeléssel kombinálódik: mindkettő lehet biológiai, de gyakori, hogy az ex situ vízkezelés fizikai-kémiai.

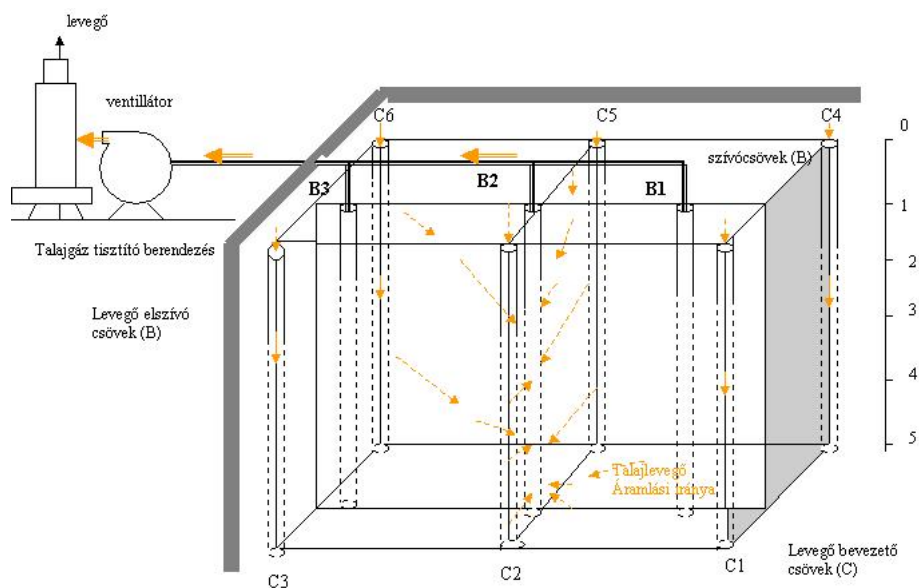
A 33. ábra eltúlozva mutatja a víznyerő és vízvisszavezető (nyelő) kútak okozta nyomáskülönbségeket és azok vízáramlást provokáló hatását. A rajz ex situ biológiai kezelést mutat, a vízkezelő reaktorba vagy utána bármilyen tápanyagot vagy adalékot oldhatunk a kezelt vízbe, hogy a talaj mélyebb rétegébe juttassuk. Ezt az eljárást talajvízszint-emeléssel és a telített zóna elárasztásával, vizes mosásával is kombinálhatjuk. Ez akkor ajánlatos, ha a szennyezőanyag vízoldható és a talajvízbe került veszélyes anyag tarnszeptáját kontrollálni tudjuk a technológia segítségével.



33. ábra. A talaj szilárd fázisának *in situ* kezelése ex situ talajvízkezeléssel és vízrecirkulációval kombinálva

Bioventilláció

Amennyiben nem kimondottan vízoldható a szennyezőanyagunk, akkor egyedül a szilárd talajfázisban folyó biodegradációra alapozunk, ilyenkor csak annyi nedvességet juttatunk a talaj telített zónájában, amennyi az élethez szükséges, a talajmikroflórát friss levegő és kiegészítő tápanyagok biztosításával tartjuk aktív állapotban, a talajvizet legfeljebb azért szivattyúzzuk, hogy a talajvízszint-süllyesztésével megnöveljük a háromfázisú talajréteg vastagságát vagyis a bioventillációval kezelhető talajtérfogatot.



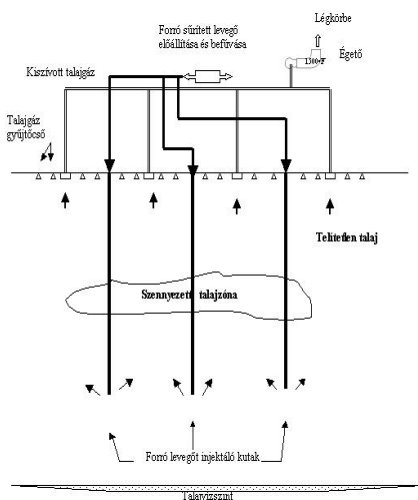
34. ábra: *In situ* bioventilláció és a kiszívott talajgáz felszíni kezelése

A 34. ábra egy olyan megoldást mutat be, ahol a szennyezett 2 fázisú talaj kezelt térfogata, vagyis az *in situ* kvázi reaktor a függőlegesen elhelyezett passzív levegőbevezető kutakon belüli teret jelenti, melyben lévő talaj két fázisa, szilárd és a benne lévő kötött víz, a talajnedvesség zavartalan, a talajlevegő viszont áramlik a pórustérfogatban. A szívott kútsor (B) és a légköri levegőt beengedő passzív kútsorok (C) közötti nyomáskülönbség hatására meginduló légárammal friss levegő, azaz nagyobb oxigéntartalmú és kisebb széndioxidtartalmú levegő jut a működő biofilmek közvetlen közelébe, egyúttal a használt talajlevegő távozik: ez a szellőztetés lényege. Illékony szennyezőanyag esetében a kiszívott gáz *ex situ* kezelése szükséges és hasznos is olyan szempontból, hogy a talajban lévő szennyezőanyag-koncentrációt az is csökkenti, tehát összeadódik a fizikai gáz (gőz) elszívás és a biológiai degradáció hatása.

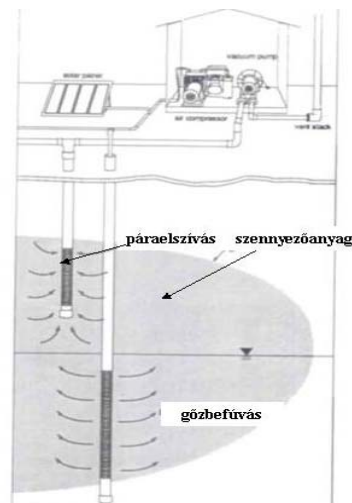
A talaj hőmérsékletének emelése

A szennyezőanyag fázisok közötti megoszlásának gőzfázis irányába történő eltolása a talajhőmérséklet emelésével érhető el. Egy sor talajfűtési technológia terjedt el a gyakorlatban (nem Magyarországon), amely az illó talajszennyező anyagok deszorpcióját hivatott elősegíteni, de a biodegradációra is jótékony hatással lehet. A biodegradáció hő hatására beálló hatékonyság-növekedése a szennyezőanyag hozzáférhetőségének növekedéséből, egyenletesebb eloszlásából és a mikrobaaktivitás növekedéséből adódhat össze, bár ez utóbbi kérdéses. Pakura biodegradációs kísérleteink szerint magának a talaj mikrobaközössége 15 °C körüli hőmérsékleten jobb bontás mutatott, mint 30 °C-on!

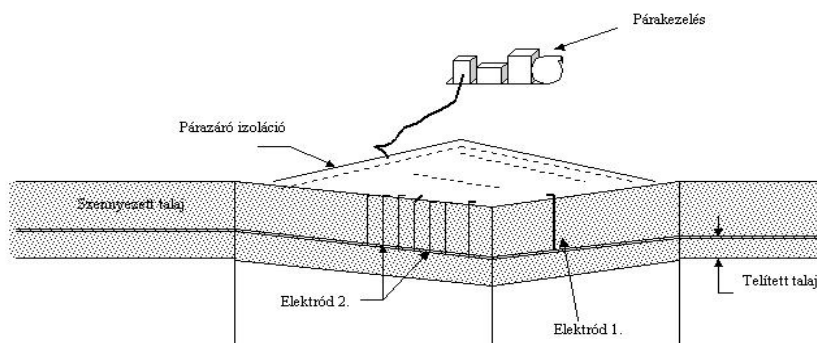
A talaj belsejének hőmérsékletemelésére mutatunk be három különböző módszert, meleg levegő és/vagy gőz bevezetését és a radiofrekvenciás melegítést a 35., 36. és 37. ábrákon.



35. ábra: Telítetlen talaj felmelegítése forró levegő injektálással és elszívással



36. ábra: Forró levegő injektálása a telített talajba, páraelszívás a telítetlenben: forró levegő előállítása napkollektorokkal



37. ábra: radiofrekvenciát alkalmazó talajfűtési eljárás

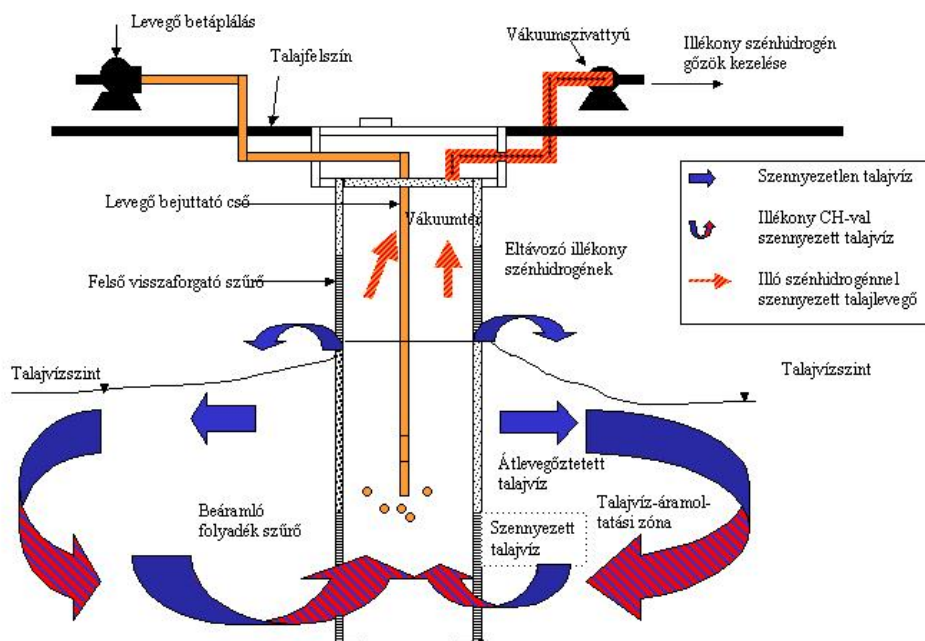
A talaj felmelegítése tehát növeli a szilárd fázisról történő deszorpciót és hasznos lehet a gázelszívással kombinált *in situ* és *ex situ* talajkezelési eljárásoknál.

A talajlevegő manipulálására csak a háromfázisú talajban van értelme, a kétfázisú talaj esetében a pórusokat kitöltő talajvíz külön fázisként kezelésének van értelme, ha a szennyezőanyag talajfázisok közötti megoszlása ezt indokolja, vagyis ha nagyobb része a talajvízben van vagy átvihető a szilárd fázisból. A talajvizet a szilárd fázis *in situ* kezelése mellett akár *ex situ* akár *in situ* kezelhetjük. A talajvíz *ex situ* kezelése, mint láttuk kapcsolódhat kiszíváshoz, bejuttatáshoz (szivárogtatással, injektálással, árasztással) vagy folyamatos recirkulációhoz.

Talajvíz *in situ* kezelése

A talajvíz *in situ* is kezelhető, tulajdonképpen a talaj szilárd fázisától függetlenül. Az *in situ* kezelés történhet kútban (kiszivattyúzás nélkül) vagy aktív résfalakkal. A kutas kezelés felszín alatti tankreaktornak tekinthető, az aktív résfal vízszintes átáramoltatással működő töltött oszlopnak vagy töltött csőreaktornak.

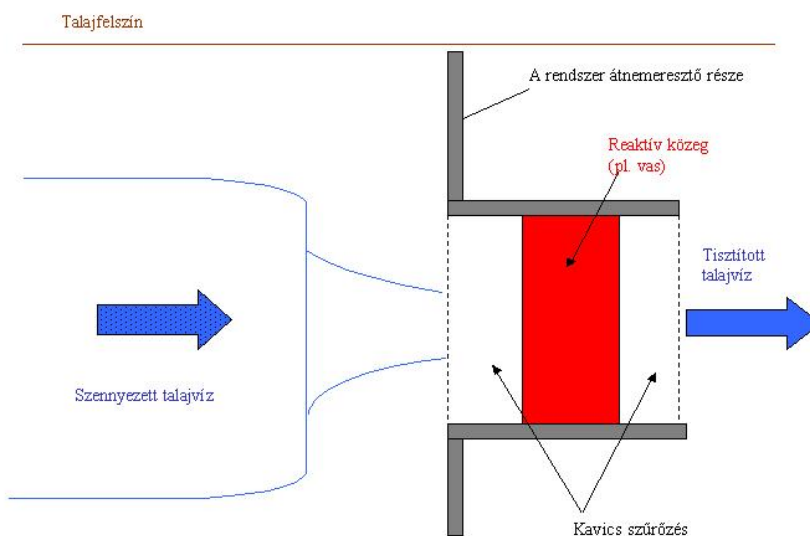
A 38. ábra a talajvízben oldott illékony anyagok *in situ* eltávolítására kifejlesztett módszert mutat. A gőzök kihajtása fizikai-kémiai folyamat, de ugyanebben a kútban lehetséges biológiai vagy kémiai kezelést is végezni, adalékanyagokat alkalmazni, megfelelő tartózkodási időt biztosítani, stb.



38. ábra: Talajvíz kezelése kútban: illékony szénhidrogének kihajtása sztrippeléssel

A talajvíznek a szilárd fázistól független, de a felszínre szivattyúzás nélküli kezelésének másik, napjainkban nagyon terjedő megoldása a felszín alá beépített aktív résfal, amely tulajdonképpen egy átfolyásos reaktor.

A 39. ábra egy, a talajfelszín alá beépített reaktív résfal elrendezését mutatja. A talajvíz természetes áramlási viszonyait kihasználva, annak útjába helyezzük el a szennyezőanyagra specifikus töltettel (adszorbens, kémiai reagens, redox-rendszer, biológiai szűrő, stb.) rendelkező résfalat.



39. ábra: Aktív résfal beépítése az áramló szennyezett talajvíz útjába

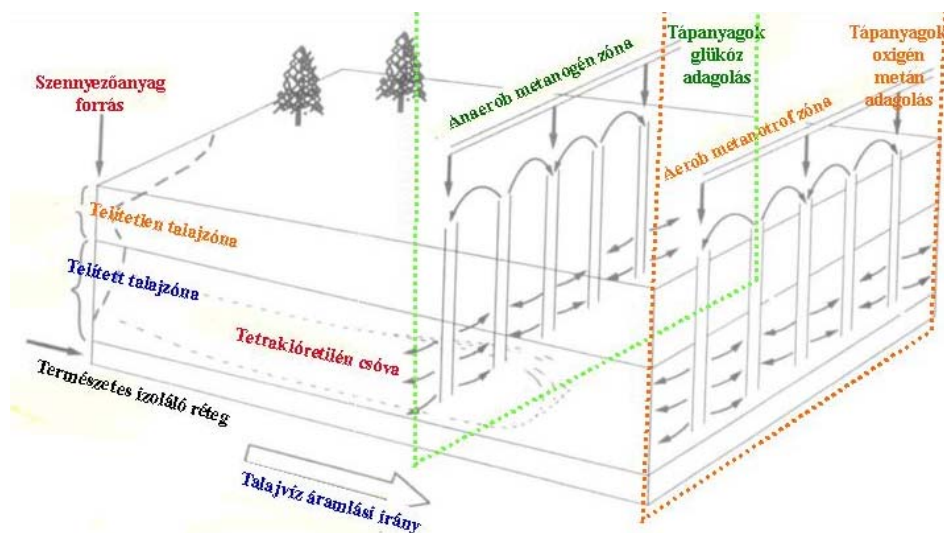
A résfalban vagy magában a kétfázisú talajban végbemenő biológiai folyamatok, elsősorban a biodegradáció, hacsak nem levegőztetjük intenzíven a telítetlen talajt, mindig csökkent redoxpotenciálra mennek végbe: az aerob légzésre jellemző $+0,8$ V redoxpotenciálhoz képest kb. $+0,4$ V értéken folyik a nitrátlégzés, még kisebbben a szulfátlégzés a karbonátlégzés, pedig negatív redoxpotenciálra. A két- és háromfázisú talaj határán, ahol a víznél könnyebb szénhidrogén típusú szennyezőanyagok általában elhelyezkednek, a nitrátlégzés dominál. Ezért, ha a talajvízben vagy a kétfázisú talajban folyó (természetesen megindult) biodegradációt szeretnénk intenzifikálni, azt nitrát adagolásával és kiegyensúlyozott tápanyagellátottság biztosításával érhetjük el. Ezt a biotechnológiát is úgy lehet optimumon vezetni, ha folyamatosan mérjük a talajvíz nitrát- és tápanyagtartalmát, a pH-t és a redoxpotenciált, valamint a biológiai bontás indikátorait. A folyamatos technológiamonitoring teszi lehetővé a technológia szabályozását. Akár automatikus szabályozási megoldások is beépíthetők.

Gyakori, hogy nagyobb mennyiségű kőolajszármazék lencse formájában úszik a talajvíz felületén. Ezen lencsék biodegradációja azért nagyon lassú, mert igen kicsit az olaj-víz határfelület. Ezek remediációját kétféleképpen lehet meggyorsítani (azon kívül, hogy kiszívjuk a lencse fő tömegét): kontrollált függőleges vagy vízszintes irányú elosztatással, hogy minél nagyobb legyen a reaktív felület. A kontroll két dologra terjedjen ki: valóban folyik-e a biodegradáció, nem veszélyeztet-e vízbázist vagy felszíni vizet a szénhidrogén szétterjedése. A függőleges irányú „szétkenést” víznyerőkutak szívásával váltakozó injektálással érhetjük el, a vízszintes elosztatás viszont a talajvízáramlás szívott kutak segítségével történő irányított áramoltatással. Ilyen technológia alkalmazásakor a talaj szilárd részét végtelen töltött reaktornak (adszorpciós és biológiai) tekintjük, és kihasználjuk a talaj szorpciós kapacitását, a talajmikroflóra végtele adaptációs és biodegradációs kapacitását és regenerálódó képességét.

Reaktív zónák

Többlépcsős in situ kvázireaktor

Az *in situ* kezelt talajtérfogat reaktorként kezelésének legszebb példái az *in situ* konstruált többlépcsős vagy kaszkád eljárások. Ezek közül egyet mutatunk be, a perklóretilén *in situ* biodegradációjára kidolgozott kétlépcsős technológia: egy anaerob biológiai lépést egy aerob lépés követ, úgy is felfoghatjuk, hogy egy anaerob reaktorral sorbakötöttünk egy aerobot.



40. ábra: Kétzónás *in situ* bioremediáció a telített talajzónában: tetraklóretilén anaerob degradációját követő aerob lépés

Passzív rendszerek

4.4. Leggyakoribb műveletek *in situ* és *ex situ* talajremediációnál

A biológiai technológiákhoz tartozó leggyakoribb műveleteket nem részletezzük, csak felsoroljuk. Ezek a műveletek megegyeznek a vegyipari technológiákban általában alkalmazott műveletekkel, a megfelelő kapacitását talajremediáció anyagmérlege határozza meg.

Talajgázzal végzendő műveletek: levegőbevezetés, levegőinjektálás, levegőelszívás, talajszellőztetés (ventilláció).

Vizes fázissal végzendő műveletek: víz felszínre szivattyúzása, folyadékinjektálás, elszívárogztatás, recirkuláltatás, telítetlen talaj elárasztása, folyamatos talajvízszint-csökkentés (depresszió biztosítása), talajvízszint-növelés, talajvízbe levegő bevezetés és szétosztás, talajvíz *in situ* kezelése kútban vagy aktív fallal, víz felszíni kezelése (levegőztetés, porlasztás, melegítés, ioncsere, stb.)

Talaj szilárd fázisának műveletei: talaj fellazítása, szilárd talajból zagykészítés, talajhomogenizálás, talajmosás, hőkezelés, elektrokinetikus kezelés, deszorpció, szilárdítás. Talaj és üledékek kitermelés utáni műveletek: szilárd talajok és zagyok szállítása, szilárd fázis szemcseméret szerinti frakcionálása, szilárd fázis mosása, extrakciója, hőátadási műveletek, ioncsere, szorpció-deszorpció, centrifugálás, víztelenítés, stb.

Egyéb műveletek: tápanyagadagolás, vízoldható adalékanyagok talajba juttatása (vízben oldás, adszorpció), vízben szuszpendált anyagok talajba juttatása (szuszpendálás, talaj szűrő hatása), hőmérséklet beállítása, hőmérséklet tervezett növelése a talaj belsejében (meleg levegővel, gőzzel, rádiófrekvenciával), pH beállítás, izolálás, lehatárolás, aktív és passzív résfalak beépítése.

Passzív rendszerek

5. Ex situ és in situ remediáció reaktorszemléletű összehasonlítása

Az összehasonlítás során figyelembe vesszük a reaktor, illetve a konkrét határokkal (falakkal) nem rendelkező kvázireaktor felépítéséből, elhelyezkedéséből következő technológiai különbségeket és kockázatokat. A különbségek feltérképezése és az okok megértése után nyilvánvalóvá válik, hogy a technológiai következmények és környezeti kockázatok sokkal inkább függenek a szennyezőanyag fizikai-kémiai tulajdonságaitól, mintsem a technológia ex situ / in situ voltából. További, kibocsátásra, reaktortípusra vonatkozó információkra van szükség a kockázat megítéléséhez, hiszen az ex situ kezelés általában nem jelent zárt reaktort, sok esetben az ex situ technológia kockázata összehasonlítható az in situéval, amely, mint tudjuk közvetlenül a környezet részének kezelését jelenti.

Vegyünk például egy illékony, toxikus talajszennyezőanyagot. Annak ex situ prizmás biológiai kezelése nagy szabad, atmoszférával érintkező felületet teremt, melyen keresztül toxikus anyag jut a levegőbe. Ugyanez a talaj gázelszívással kombinált in situ bioremediációval és ex situ gázkezeléssel teljesen kockázatmentessé tehető. Természetesen a teljesen zárt reaktorban való kezelés még az in situ kezelésnél is kisebb kockázatot jelenthet kibocsátás szempontjából, bár a talaj kitermelése közbeni kibocsátás ekkor is tetemes lehet, és akkor még figyelembe kell venni a kitermelés és reaktor költségeit, valamint a reaktor korlátozott nagyságából adódó problémákat.

A reaktor határa

Az ex situ reaktorok nagy részének vannak fizikai határai vagyis falai: lehetnek teljesen falakkal határoltak vagy részben. Ezek a határok lehetnek konstruált vagy természetes határok (acél, beton, természetes vízzáró réteg, stb.). In situ kvázireaktornál ritkán van konstruált határfelület, de nem lehetetlen, hogy például felszín alatti résfallal körülvett területet kezelnek in situ. Gyakoribb, hogy egyáltalán nincs vagy csak természetes izoláló rétegek határolják, pl. in situ talajkezelés egy alsó és egy felső vízzáró agyagréteg közötti térben. Ilyenkor csak a víz és a levegő transzportot kell korlátozni vízszintes irányban. Ha semmiféle konstruált határfelület vagy izoláló réteg nincs az in situ kezelt talaj körül, akkor a kvázireaktor határának a műveletek és természetes folyamatok maximális hatótávolságát kell tekinteni.

Nyitottság

A kitermelt talaj ex situ kezelésére használt reaktorok egy része zárt (acélreaktor, izolált földmedence felületi zárással, betonmedence felületi zárással, stb.), másik része félig nyitott (izolált földmedence nyitott felszínnel, betonmedence nyitott felülettel, alulról izolált prizma, alulról izolált vékony talajréteg), de lehet teljesen nyitott is: izolálatlan prizma, izolálatlan vékony talajréteg. Az in situ kvázireaktor esetében is megtalálhatóak ugyanezek a kombinációk, de logikus módon gyakoribbak a fizikailag nyitott reaktorok, melyek nyitottságát (kibocsátását) a természetes izoláció (vízzáró réteg) vagy maguk a műveletek (állandó talajvíz depresszió biztosítása) korlátozzák.

Érintkező környezeti elemek

A reaktor vagy kvázireaktor kialakítása és konstruált vagy természetes határolói korlátozzák, illetve megengedik a szennyezett (kezelt) talajbizonyos környezeti elemekkel való találkozását, így az abba való anyagkibocsátást. A ex situ alkalmazott zárt reaktorok kibocsátása kontrollált, tehát azok spontán nem találkoznak a külső környezettel. Az ex situ reaktorok nagy része nyitott, ezekben szabadon találkozik a szennyezett talaj az

atmoszférával. Az ex situ félig nyitott reaktorokat (vékony rétegben vagy prizmában történő kezelés) is izolálják a talajtól, illetve a talajvíztől, tehát azokkal nem érintkezhet a szennyezett talaj. Izolálatlan prizmák és talajrétegek nem tekinthetők adekvát technológiai megoldásoknak. Az *in situ* kezelt talaj ritkán izolált konstruált vagy természetes izoláló rétegekkel, általában szabadon találkozik az atmoszférával, a talajvízzel, a mélyebben elhelyezkedő réteg vagy karsztvizekkel és a környező két és háromfázisú talajjal.

Kezelt térfogat

Teljesen zárt vagy a légkör felé nyitott reaktor esetében a kezelt térfogat a fizikai határokon belüli gázfázis, folyadékfázis, szilárd fázis vagy zagy. In situ nyitott reaktor esetében a kezelt térfogatot tervezéskor a szennyezettségi határok szabják meg (lehatárolás), a gyakorlatban viszont a műveletek és a szennyeződésterjedés hatótávolsága adja. Tervezéskor biztonságra kell törekedni, a műveletekkel azt a teljes térfogatot el kell érni, amely elviselhetetlenül nagy kockázatot jelent. Mivel a szennyezőanyag kockázata függ annak terjedésétől, az in situ technológiák kezelendő térfogatának meghatározásakor mindig alkalmazni kell a terjedésmodellezést és a terjedésből adódó kockázatok mennyiségi meghatározását.

Anyagkiáramlás módja

A nyitott, félig nyitott és zárt reaktorokból történő kibocsátás módjait talajfázisok szerint tárgyaljuk. **A szennyezett talajgázok és gőzök** jellemzően diffúzióval, esetleg konvekcióval kerülnek a légkörbe vagy a szennyezett talajtérfogatot körülvevő talaj levegőjébe. Ha a talajt szellőztetjük, tehát a levegőfázis áramlását mesterségesen befolyásoljuk, akkor egyrészt provokáljuk a diffúzióval hatékonyabb terjedési folyamatokat, másrészt viszont – feltéve, hogy szívással működtetjük a talajlevegő mozgatását – kontrollálhatjuk a távozó (kiszívott) talajlevegőt, gázokat, gőzöket). A kontroll másik lehetséges módja a szennyezett talajtérfogat felszínének letakarása vagy sátor alatt történő munka, kontrollált sátor-légtérrel. **A szennyezett talajvíz** a talajvíz áramlási viszonyok függvényében tud konvekcióval terjedni, szállítani a benne oldott szennyezőanyagokat. **A szennyezett talajnedvességből és pórusvízből** keveredéssel, diffúzióval vagy megoszlással juthatnak a szennyezőanyagok szennyezetlen vízbe, szilárd talajba vagy talajlevegőbe. Ezek közül legveszélyesebb a szennyezett pórusvíz csapadékkal történő mélyebb talajrétegekbe, talajvízbe illetve rétegvizekbe jutása. A szennyezett szilárd fázis transzportja a légkör felé deflációval (szélerózió) vagy vízerózióval történhet. Az erózióval elszállított szennyezett szilárd talaj szennyezetheti a levegőt, a felszíni vizeket (üledékként) és más talajok felszínét (levegőből kiülepedés, áradás általi lerakódás). A szilárd fázishoz kötött szennyezőanyag nemcsak a szilárd fázissal, hanem a vízfázissal is terjedhet, elsősorban a talajvízzel. A vízfázisba oldással, szuszpendálással, komplexképezéssel, megoszlással (deszorpció, ioncsere, stb.) kerülhet a szennyezőanyag és attól fogva még könnyebben terjed tovább. A szilárd fázisból közvetlenül gázfázisba kerülhetnek, elsősorban az illékony szennyezőanyagok: a célelem lehet az atmoszféra vagy a talajgáz (deszorpció, elpárolgás). A talaj szilárd fázisához erősen kötődő szennyezőanyag csak erőteljes fizikai-kémiai-biológiai folyamatok során válik mozgékonyvá (kőzetek mállása, ásványok átalakulása, humusz képződése illetve szétesése, stb.). Ilyenkor előbb a szilárd fázisból szilárd fázisba vándorol egy mozgékonyabb forma, amely később mozgékony talajfázisokba kerülhet, onnan pedig a környezetbe. Gyakori, hogy a szennyezőanyag külön folyadékfázis formájában szennyezi a talajt. Ezen folyadékok transzportfolyamatait és mozgékonyosságuk igen sokfélék, legjellemzőbbek a talajvíz felszínén úszó, a vízzel korlátoltan elegyedő szénhidrogének, melyek a talajvíz tetején, de attól részben függetlenül terjednek egyre jobban szétterülve a víz felszínén. Ezek lehetnek illékonyak vagy nem illékonyak. Fázisok közötti megoszlásuk alapján az illékonyak a talajlevegőt, talajvizet

és a szilárd fázist egyaránt szennyezik, a nem illékonyak főként a talajvizet és a szilárd fázist. A felúszó szénhidrogénréteg a talajvízzel viszonylag kis felületen érintkezik, így a beoldódás (keveredés, megoszlás) korlátozott, de a talajvízszint-ingadozások miatt a felúszó réteg szétkenődik a talaj szilárd fázisában az ingadozásnak megfelelő rétegvastagságában és így már egy nagyobb felületről kerülhet a talajvízbe.

A felúszótól eltérő módon viselkednek a víznél nehezebb folyadékok, melyek a talajvíz alján, közvetlenül a vízzáró réteg felett helyezkednek el külön fázisként. Kockázatuk sokszoros: rejtve maradnak, a vízbeoldódáshoz kvázi végtelen utánpótlást jelentenek, a vízzáró réteg nem okvetlenül jelent akadályt egyes oldószereknek, elsősorban a klórozott alifás és aromás szénhidrogénekről ismert az a tény hogy vízzáró rétegekben alagútszerű járatokat képes vágni, melyen keresztül könnyedén lejutnak a rétegvizekbe.

Passzív rendszerek

Kezelhető fázisok

A szennyezett talajfázisokat alapul véve, bár egyneként bármelyik talajfázist kezelhetjük *in situ* vagy *ex situ*, de nem választhatunk tetszőleges technológiakombinációt, amint azt a 1. táblázatban láttuk.

Gázok és gőzök mind *ex situ*, mind *in situ* kezelhetőek. *Ex situ* akkor érdemes, ha a gáz elszívásával a teljes talaj megszabadítható az illékony vagy gázhalmazállapotú szennyező-anyagtól. Ha az illékony anyag fázisok közötti megoszlása nincs eltolódva és nem is tolható el mesterségesen (pl. hőmérsékletemeléssel) a gáz (gőz) fázis felé, akkor célszerű a teljes talaj, vagyis a háromfázisú talaj komplett kezelése. Ellenkező esetben célszerű kihasználni a talajgázok mobilizálható, talajból ventillátorokkal, vákuumszivattyúkkal való eltávolíthatóságát.

A **talajvíz** szintén kezelhető a szilárd fázistól függetlenül vagy azzal együtt, akár megosztva is, részben együtt, részben külön. A döntés itt is a szennyezőanyag megoszlásától függ: ha az nagy részt a talajvízben oldva, emulgeálva van vagy abba oldható, akkor érdemes a talajvizet a szilárd fázistól elkülönítve kezelni, kihasználva annak könnyen mozdítható, talajból kiszivattyúzható voltát.

Folyékony szennyezőanyag, mely a víztől elkülönülő fázist alkot, ha csak lehetséges, külön fázisként kezelendő. A felúszót leföldről érdemes eltávolítani eredeti előfordulási helyéről, a talajvíz felszínéről. *Ex situ* is elválaszthatjuk a talajvíztől a felszínre szivattyúzás után. Ha a víznél sűrűbb a víz alá ülepedő fázisról van szó, akkor a megfelelő mélységbe kiszivattyúzhatjuk mint külön fázist vagy vízzel keverve. Azt a megoldást igyekezzünk elkerülni, hogy nem keressük meg a lencsét, hanem anélkül kezdünk vizet kezelni, mert ez esetben a lencse hosszú időn keresztül utánpótlást jelent a talajvíz szennyezésében.

Zagyok és iszapok kezelését ritkán végezzük *in situ*, mivel ezek szállítása, szivattyúzása, tartályba töltése viszonylag egyszerűen megoldható és a tartályokban könnyebben és ellenőrizhetőbben kezelhetőek, mint *in situ*. Ha *ex situ* kezeljük a zagyformájú szilárd környezeti fázisokat, akkor a kezelést megelőző frakcionálás valamint a vizes-zagy formában kivitelezhető fizikai és kémiai módszerek teljes választékát alkalmazhatjuk, tetszés szerint. Különösen előnyös lehet a szemcseméret szerinti osztályozás, amelyet vizes zagyok esetében hidrociklonnal végezhetünk. A szemcseméret szerinti elválasztás eredményeképpen már első lépésben tiszta, hasznosítható durva frakciókat nyerhetünk, a kezeléseket után pedig hasznosítható finom frakciókat. Ennek ellenére előfordul, hogy az iszapfázisú kezelést *in situ* végzik természetesen nem eredeti állapotában, hiszen a talajból homogén zagy készítése a szilárd fázis megbolygatását is jelenti. (Az *in situ* kezelést úgy definiáltuk, hogy a talajt

eredeti helyén kezeljük, és azt is feltételként szabjuk, hogy legalább a szilárd fázis zavartalan állapotban maradjon, tehát a talajlevegő és a talajvíz mobilizálható.)

Szilárd fázis kezelését végezhetjük *ex situ* és *in situ* is, ilyenkor általában a három fázisú talajra gondolunk. *In situ* remediációnál gyakran kombináljuk az *in situ* szilárd fázis kezelését *ex situ* talajlevegő és talajvíz kezeléssel, *ex situ* viszont szinte mindig mind a három fázis kezelését értjük a talajkezelés alatt. A kétfázisú talajt ritkán kezeljük *ex situ*, leggyakrabban az fordul elő, hogy talajvízszint-süllyesztés melletti talajkitermelést végzünk, majd ezután kutas vagy tavas talajvíztisztítást végzünk a teljes talaj *ex situ* kezelése kiegészítéseként.

A kezelendő közeg homogenitása

A valódi, fallal rendelkező reaktorok közül a kevert típusú tankreaktorokban nagyfokú homogenitás érhető el. A talajlevegő és a talajvíz szilárd fázistól független, valamint a szilárd fázis zagy formában történő kezelése történhet homogenizált, kevert reaktorokban, de sok esetben ezeknél sem cél a teljes homogenitás, hiszen a gázokra alkalmas bioszűrők vagy a szennyezett talajvíz kezelésére alkalmas csepegőtestes, esetleg töltött reaktorok hatékonysága éppen heterogenitásukkal, a bennük kialakuló koncentráció- és biológiai gradiensekkel függenek össze. Az *in situ* talajkezelési technológiák mindig heterogén közegben folynak, a gáz és a folyékony fázis ugyan folyamatos cirkuláltatással többé-kevésbé homogénné tehető, de a szilárd fázis nem, hiszen az, megtartja eredeti heterogén eloszlását (hacsak nem készítünk belőle bizonyos mértékig homogén zagyot: pl. *in situ* szilárdítást alkalmazása közben).

Heterogenitás

Nemcsak a talaj heterogenitását kell a technológusnak figyelembe vennie, hanem a szennyezőanyag heterogén elhelyezkedése és összetétele is. A szennyezőanyag heterogenitása összefügghet a szennyeződés módjával, a szennyeződéshez vezető transzportfolyamatokkal, vagy a hosszabb időn keresztül szennyezett területen lejátszódó fizikai-kémiai változásokkal. A szennyezőanyag a talajban mozoghat gravitációsan, diffúzióval, kapilláris erőkkel, megoszlik a fizikai talajfázisok között: a talajvízből szorbeálódik a szilárd fázison, a szilárd fázisról deszorbeálódik és a gáz (gőz) vagy folyadékfázisba kerül. Az időben fellépő kémiai és biológiai változások befolyásolják a szennyezőanyag terjedését, mozgását, fázisváltásait. A talaj szilárd fázisa szűrőként viselkedik, kiszűri a vízben oldott anyagok egy részét, ugyanakkor a vízbe mosódás is előfordul az egyensúlyi viszonyoktól, az éppen uralkodó külső körülményektől függően. Az illékony anyagok a gázfázisban gyűlnek fel, a vízzel oldhatóak a vízfázisban, a szorbeálódóak a szilárd fázisban, de a körülményektől, a talaj típusától és a koncentrációviszonyoktól függően ez nagyfokú és kiszámíthatatlan heterogenitáshoz vezethet. Nagyon fontos szerepük van a szennyezőanyag-forrásoknak, az utánpótlódásnak a heterogenitások kialakulásában. Az elsődleges szennyezőanyag-források mellett másodlagos források is keletkezhetnek a talaj belsejében nem látható felhalmozódások miatt. Ezek a másodlagos felhalmozódások és hatásaik nemcsak a heterogenitások okozói, de a terjedési modellezést is tönkreteszik.

Különösen fontos szerepe lehet a heterogenitásnak, beleértve a mikrobiológiai heterogenitást, a biológiai talajkezeléseknél. A heterogenitás a biológiai rendszerekben, mint amilyen a talaj alapvetően három eredetű köthetőek.

1. A talaj hidrogeológiai heterogenitásával összefüggő heterogenitások: háromfázisú (telítetlen) vagy kétfázisú (telített) talaj, talajvízszint, talajtípus és a talajszelvény rétegei, ezen rétegek szennyezőanyag-megkötőképessége, levegő és víztartalma, szerves anyag (humusz)tartalma, agyagtartalma, stb. Ezek a heterogenitások elsősorban

az *in situ* talajkezelésnél játszanak szerepet és igényelnek átgondolást a technológus részéről.

2. Külső körülmények (környezeti paraméterek) által meghatározott talajheterogenitások általában gradiensek formájában jelennek meg, például a redoxpotenciál szerint a talaj mélységével csökkenő redoxpotenciál, a külső hőmérséklet és bizonyos mélységben kialakuló állandó talajhőmérséklet közötti átmenet évszaktól függően pozitív vagy negatív gradienseként, a nedvességtartalom gradiensei pedig a természetes és mesterséges nedvesítés módjától és mértékétől függő gradiens formájában. Ha felülről öntözzük, ha szivárgó öntözést alkalmazunk vagy ha a talajvízből felszívódó kapilláris víz biztosíthatja a nedvességtartalmat más és más gradiensek alakulhatnak ki. Ezek a gradiensek szilárd fázist tartalmazó reaktorban vagy kvázireaktorban mint *ex situ*, mind *in situ* kialakulnak, csak a teljesen homogén és kontrollált reaktorokban nem.
3. A szennyezettség eloszlásából adódó heterogenitások: a forrásban nagyobb a szennyezőanyag=szubsztrát koncentrációja, nagyobb a toxicitás, a forrástól távolodva csökkenő, a transzportútvonalakban ismét nagyobb, azoktól távolodva kisebb koncentrációk alakulnak ki a terjedés során jellemző hígulás eredményeképpen. Ritkábban feldúsulás is előfordul a transzport során. Ahol több a hasznosítható szubsztrát, ott megnő a talajmikroorganizmusok száma, megnő a termelt széndioxid mennyisége, lecsökken viszont az oxigéné, metabolitok és végtermékek jelennek meg, általában csökken, de előfordul hogy nő a toxicitás (toxikus bontási közti- vagy végtermék). Ezek a heterogenitások elsősorban a szilárd fázist tartalmazó reaktorokban alakulnak ki. Az *in situ* kvázireaktorban az eredeti szennyezőforrásból kiinduló terjedés várható, az *ex situ* reaktorba (kupacba, rétegbe) helyezett szilárd talaj esetében viszont a kisebb léptékű heterogenitások fordulnak elő, mértékük attól függ, hogy milyen volt az eredeti heterogenitás mértéke és mennyire homogenizálták a kitermelt talajt. *Ex situ* talajkezelésnél is számításba kell venni a transzportfolyamatokból adódó heterogenitásokat, azok kialakulását.

Egy statikus prizmás talajkezelés esetében például tipikus gradiensek alakulnak ki a környezeti paraméterek függvényében és a prizmán belüli szennyezőanyag-transzport eredményeképpen. Ezek ismeretében vagy hasznosítjuk ezeket a heterogenitásokat vagy a technológia segítségével megszüntetjük azokat. Statikus prizma hőmérsékletét átszellőztetéssel állandó értéken tarthatjuk, de a szellőztetés leállításával megengedhetjük a magasabb hőmérsékletet a prizma belsejében. A szellőztetéssel a redoxviszonyokat is befolyásolhatjuk, ha az aerob mikroorganizmusok által uralt szakaszokat fakultatív anaerobok működéséhez ideális csökkent redoxpotenciállal szeretnénk felváltani, akkor ritkábban szellőztetünk, hogy legyen idő a csökkent redoxpotenciál kialakulására és a fakultatív anaerob mikroorganizmus működésbe lépéséhez. A tápanyagellátásban bekövetkező gradienseket megfelelő helyre történő, megfelelő mennyiségű tápanyag injektálásával oldhatjuk meg, a felület kiszáradása ellen sátoztatást, a felszín permetező locsolását alkalmazhatjuk, de a felület kiszáradásával lassíthatjuk az ott folyó mikrobatevékenységet.

Koncentrációgradiens szerinti reaktorok

Szakaszos, homogén tankreaktorban kezelt talajvízben vagy szilárd talajból készült vizes zagyban hely szerinti koncentrációgradiens nincs, időben viszont csökkenő sebességű koncentrációcsökkenés várható.

Szakaszos, nem homogén, szilárd fázisú *ex situ* reaktorban elsősorban a szennyezett talaj homogenizálásának mértékétől függ a heterogenitás, ehhez adódik a külső körülmények és a

technológiai paraméterek hatása. A szilárd fázis zavartalansága mellett működő *in situ* kvázireaktorban a talaj eredeti és a szennyezőanyag időfüggő transzportjának megfelelően kialakult heterogenitások léteznek. Bizonyos mértékben homogenizált *in situ* kvázireaktorban a természeteshez képes csökkentettük a heterogenitásokat (átnemeresztő rétegek fellazítása, zagykészítés, stb.).

A szakaszos reaktorok működhetnek a mozgékony talajfázisok recirkulációjával vagy anélkül, vagy magának a kezelt víznek vagy zagnak a recirkuláltatásával vagy anélkül.

Talajvíz vagy iszapok (zagyok) kezelésére kialakított folytonos reaktorokban a kezelt közeg homogén, de a szennyezőanyag szempontjából hely és idő szerinti gradiens alakul ki pl. egy csőreaktorban közel lineáris a szennyezőanyag koncentrációgradiense.

Folytonosan működő töltött reaktoroknak foghatóak fel az *in situ* vagy *ex situ* talajtérfogatban folyó levegő és/vagy vízrecirkuláció során történő szennyezett talajlevegő és talajvízkezelés. A cirkuláló levegőben és a vízben közel állandó a hely szerinti szennyezőanyag-koncentráció, időben viszont csökkenő. A szilárd fázis heterogén eloszlást mutat a térben is és az időben is, a heterogenitás – amint azt a heterogenitások tárgyalásakor bemutattuk – adódhat a hidrogeológiai viszonyokból, a külső körülményekből és a szennyezőanyag-eloszlásból. *Ex situ* reaktoroknál elsősorban a külső körülményekből adódik a heterogenitás, beleértve a technológiai paraméterek hatását is, *in situ* technológiák esetében a hidrogeológiai és a külső körülmények valamint a szennyezőanyag-terjedés azonos súllyal esik latba a heterogenitások kialakításában.

Reaktorelrendezés: egylépcsős, többlelépcsős, kaszkád

Többlelépcsős lehetnek az *ex situ* szakaszos és folytonos homogén reaktor (víz és zagykezelés) valamint az *in situ* vízkezelés. Az *ex situ* reaktorok több lépcsője eltérő technológiai paraméterek alkalmazását jelenti, *in situ* különböző körülmények által uralt talajtérfogatokon való talajvíz-átáramlást jelent. Az eltérő körülmények vonatkozhatnak a redoxpotenciálra (aerob, anoxikus, anaerob), a tápanyagellátottságra, a hőmérsékletre, a tartózkodási időre, stb. Kaszkád elrendezés esetén a biológiai folyamatokat tovább bontva, több, eltérő technológiai paraméter-együttest alkalmazhatunk egymást követően. Ez főként keverék szennyezőanyagok vagy egymást követő, eltérő igényű enzimes folyamatra épülő technológia esetében fontos.

Levegőztetés

Aerob biodegradációs vagy más biológiai oxidációs folyamatok oxigént igényelnek. Az oxigén származhat levegőből vagy kémiai vegyületekből. Levegő bejuttatására levegőztetési módszereket alkalmazunk.

A levegőztetés műveletei a szellőztetés, a légcseré, a levegőinjektálás, a levegőelszívás, a lebegő benyomás és elszívás két különböző oldalon. Cél mindig az, hogy a nyomáskülönbség légáramot indítson a talaj belsejében a pórustérfogatban. Ennek eredménye, hogy megnő a diffúzió hajtóereje, vagyis a koncentrációkülönbség a biofilmben oldott és a talajlevegőben adott oxigénkoncentráció között. Cél lehet: oxigén bejuttatás, de hasonló alapon a gáznemű anyagcseretermékek eltávolítása vagy illékony gáz- vagy gőzhalmazállapotú szennyezőanyagok eltávolítása. A levegőztetés *ex situ* és *in situ* hasonlóan folyik: telítetlen talajba perforált kutakon keresztül (szívás, nyomás), vagy injektorokon keresztül, a levegő mozgathatásához szükséges nyomáskülönbség előállítása ventillátorral vagy vákuumszivattyúval, esetleg kompresszorral történik. A telített talajba injektorral, porlasztással, vízben oldva lehet bejuttatni a levegőt (oxigént). Talajvízbe oxigént adó kémiai vegyületek juttatása is elterjedt: hidrogénperoxid vagy más peroxidvegyületek.

Redoxpotenciál

Aerob, anoxikus vagy anaerob körülményeket tetszés szerint alakíthatunk a reaktorunkban. Az *ex situ* zárt reaktorokban és a talaj mélyebb rétegeiben mind az aerob, mind az anaerob viszonyok kontrollálhatóak, de a nyitott reaktorokban nem lehet kontrollált anaerob viszonyokat teremteni. Természetesen logikus, hogy nyitott reaktorban vagy *in situ* kezelt talaj felső rétegében az aerob technológiákat preferáljuk, a talaj mélyebb, természetesen anaerob rétegében pedig anaerob technológiát, de a szennyezőanyag függvényében előfordulhat, hogy az eredetileg anaerob talajt aerobbá kell tenni vagy éppen az eredetileg aeroból ki kell zárni a levegőt ahhoz, hogy a kívánatos biológiai bontási vagy átalakítási folyamat lejátszódjék.

Nedvességtartalom és beállítása

A talaj nedvességtartalma igen fontos technológiai paraméter. Bizonyos talajkezelések csak adott nedvességtartalom mellett végezhetőek el (például hőkezelést száraz talajjal, kémiai reakciókat homogén zagy formában érdemes végezni). A biológiai folyamatok szintén nagyban függenek a nedvességtartalomtól. A mikroorganizmusok és a növények vízigénye fajonként eltérő lehet. A bontandó (átalakítandó) szennyezőanyag hozzáférhetősége is nagyban függ a nedvességtartalomtól, hiszen a biológiai hozzáférés az anyagok biofilmbe való bediffundálása által korlátozott. A levegőfázis jelenléte is korlátozza a nedvességtartalmat, de ezen belül a háromfázisú talaj nedvességtartalma széles határok között változhat, egyrészt a talaj vízmegkötőképességével másrészt redoxpotenciáljával összefüggésben. Nem is az abszolút nedvességtartalom, hanem a víz kötöttségétől, illetve biológiai hozzáférhetőségétől vízáktivitástól függenek a biológiai folyamatok.

A háromfázisú talaj nedvességtartalmának beállítása *ex situ* talajkezelés esetén a felszín öntözésével, szivárgó öntözéssel, víz injektálásával (injektorokon vagy perforált csőrendszeren keresztül) történhet. Ezeket a nedvesítési eljárásokat *in situ* is alkalmazhatjuk. Főleg *in situ* nedvesítési megoldás állandó magas talajvízszinttel a kapilláris víz biztosítása valamint a telítetlen talaj időszakos elárasztása.

Adalékok

Ex situ könnyebben tudunk a talajba, talajvízbe, vagy a kezelt zagyba oldott és szuszpendált anyagokat adagolni majd azokat homogénen elosztatni. Mind *ex situ*, mind *in situ* esetben figyelembe kell venni, hogy a szilárd talaj szűrő hatása működik, ezért homogén vagy irányított beadagolás és elosztatás nem egyszerű feladat.

Homogén, kevert szilárd anyagokban korlátozottan lehetséges, de zavartalan szilárd fázissal töltött oszlopként működőeknél nem lehetséges a homogén vagy irányított beavatkozás. Ha az adalékból a terjedésével összhangban kívánunk gradienst kialakítani, azt *in situ* és *ex situ* egyaránt meg lehet oldani. Ha az adalék vízzel oldható, akkor egyszeri elárasztással, a pórustér fogat feltöltésével viszonylag homogén elosztatás érhető el. Ha a vízzel oldható anyagot vízzel permetezzük a felületre, és hagyjuk beszívárogni a felületről vagy mélyebben elhelyezett drénrendszeren vagy kútrendszeren keresztül, esetleg injektáljuk nyomással, mindig számolnunk kell a talaj szorpciós kapacitásával és az ioncserével, melynek következtében az oldott anyag megoszlik a talaj szilárd fázisa és az oldására szolgáló víz között. A szerves és szervetlen adalékanyagok – hacsak nem nagyon polárosak – átlagban 10^2 – 10^6 -szoros koncentrációban kötődnek a talaj szilárd fázisához a vízhez képest. Ez azt jelenti, hogy a vízben oldott adalékanyag a beinjektálás forrásától terjedve igen rövid úton szorbeálódni fog a szilárd felületen, meredek koncentrációgradiens fog kialakulni, vagyis nem lehet a talajt egyenletesen ellátni adalékokkal.

Ha nem vízdíszható az adalék még rosszabb a helyzet. Szilárd, nem oldható anyagokat csak homogén (talajvíz, zagy) reaktorokba tudunk homogéne bejuttatni. Szilárd talajjal töltött reaktorba (ex situ vagy in situ) nagy sűrűségű injektálással oszthatjuk el a szuszpendált adalékot vagy elárasztjuk az adalékot tartalmazó vízzel a háromfázisú talajt. A hirtelen elárasztás során nem tud a szorpció és a megoszlás pillanatszerűen lejátszódni.

Az adalékok talajba juttatásakor, főleg in situ remediációnál figyelembe kell venni a már létező heterogenitásokat és a technológia okozta transzportfolyamatokat.

Anyagelvétele talajból

A mozgékony fázisok elvételének módja részben megegyezik az ex situ és az in situ technológiáknál, részben különbözik.

Talajlevegőt ventilátorral vagy vákuumszivattyúval szívhatjuk ki, függőlege, vízszintes vagy ferde perforált csőrendszeren keresztül gyűjthetjük össze. In situ a víznyerőkutakhoz hasonló kiképzésű levegőelszívó kutakat is alkalmazhatunk. Az elszívott levegő kontrolláltan kezelhető szennyezőanyag-tartalmának megfelelően.

Talajnedvességet drénrendszer, perforált függőlegesen, vízszintesen vagy ferdén elhelyezett perforált csőrendszer vagy árokrendszer képes összegyűjteni, ahonnan a mélység és a hozzáférhetőség függvényében szivattyúzzuk (in situ) a vizet vagy vezetjük gravitációsan (ex situ) a kezelés helyszínére. A csurgalékvizet ex situ talajkezelésnél árokrendszerbe gyűjtjük az izoláló réteg fölötti térben.

A telített talajzónából a talajvizet víznyerő kutak segítségével szívjuk ki: a kutakat vagy kútsorokat bűvárszivattyúval vagy a felszínen elhelyezett szivattyúval látjuk el, eszerint, lehet szabad felszínű depressziós kút vagy vákuumos kút.

A mobilis vagy mobilizálható szennyezőanyag eltávolítása a talajgázzal vagy a talajvízzel együtt történhet, külön fázist alkotó szennyezőanyagot a talajvíz tetejéről vagy aljáról külön fázisként is kiszívhatjuk. Gőzök és gázok elszívása ex situ és in situ gyűjtőcsőrendszeren keresztül történik ventilátorral vagy szivattyúval. Ha a szennyezőanyag robbanékony, robbanásvédezt berendezéseket kell alkalmazni. Ha terjedéssel vagy diffúzióval is képes a talajból távozni, akkor a talaj fölötti légteret is kontrollálni kell. Talajnedvességben vagy talajvízben oldott szennyezőanyagokat a talajnedvességgel vagy -vízzel együtt távolítjuk el a talajból, és a szennyezőanyagnak megfelelő kezelésnek vetjük alá.

A szennyezőanyag elkülönülő fázisát bűvárszivattyúval és/vagy ún. scavenger-szivattyúval szívjuk le a talajvíz tetejéről vagy aljáról. A bűvárszivattyú az elhelyezkedésének megfelelő réteget fogja kiszívni, tehát, amikor már vékony a szennyezőanyagfázis, akkor talajvízzel kevert szennyezőanyagot fog a felszínre szivattyúzni, melyet pl. fázisszétfasztással kell kezelni. A scavenger-szivattyúban hidrofób szűrőbetét van, melynek segítségével képes a határfelületen úszó szivattyú a fázisokat elkülöníteni, és csak a szerves fázist kiszívni. Milliméter vékonyságú réteg is lefölközhető. Szabad felszínű kutak, árok vagy tavak vízfelszínéről a felúszó réteget mechanikusan vagy adszorbensek felhasználásával is le lehet fölközni.

Recirkuláció

Háromfázisú talajban:

Talajgáz teljes mennyiségének vagy egy részének recirkuláltatása

Talajgáz kiszívás utáni kezelése, majd a kezelt gáz recirkuláltatása

Talajgáz kiszívása és friss (atmoszférikus) levegő bejuttatása

Talajlevegő kiszívása és adalékokkal dúsított levegő bejuttatása

Kétfázisú talajban

Talajvíz teljes mennyiségének vagy egy részének recirkuláltatása

Talajvíz kiszívás utáni kezelése, majd a kezelt víz recirkuláltatása

Talajvíz kiszívása és adalékokkal dúsított víz talajvízbe juttatása

Talajvíz kiszívása és adalékokkal dúsított víz telítetlen talajba juttatása: elárasztás, átmeneti vízszintemelés

Zagyban

A teljes zagy recirkuláltatása vagy csak a víz recirkuláltatása fázisszétválasztás közbeiktatásával (ülepítés, szűrés, ciklon, stb.).

Mikroflóra és annak módosítása

A talaj mikroflórájának 99 %-a a szilárd fázis felületén, a mikropórusokban, és mikrokapillárisokban kialakuló biofilmekben él, szorosan rögzített állapotban. A mikroorganizmusok igen kis hányada található a talajvízben, ezek vagy eleve a szabad vízben élő típusok vagy a biofilmmel leváló sejtekből adódik. A háromfázisú talajban főleg aerob és fakultatív anaerob baktériumfajok, gombák, egysejtű növények és állatok élnek. A kétfázisú talajban a redoxviszonyoktól függően főleg fakultatív anaerob vagy obligát anaerob baktériumok élnek és tevékenykednek.

Ha a talajkörülmények megváltoznak, akkor a mikroflóra is megváltozik, elsősorban diverzitása, a fajok egymáshoz viszonyított eredeti arányának elcsúszása révén. Ilyen szempontból változásnak számít a talaj kitermelése, homogenizálása, levegőztetése, nedvesítése, adalékokkal való ellátása, szennyeződése, stb. Tehát bármit is csinálunk a talajjal, az kihat a mikroflórára.

Az irányított változásoknak bioremediáció esetében a szennyezőanyag hatékony ártalmatlanítását kell szolgálnia. Ha aerob mikroorganizmusok működésére bázisozzuk a technológiát, akkor lehetőleg a háromfázisú talaj intenzív levegőztetését választjuk, ne a zagyformában (iszapállagban) történő talajkezelést, ahol a redoxviszonyok a fakultatív anaeroboknak kedveznek és ahhoz hogy az aerobok működni tudjanak a zagyot kell rengeteg energiabefektetés árán levegőztetni. Hasonló elvek vezéreljenek, amikor *in situ* remediációnál a talajvízszint emelésével vagy csökkentésével manipulálunk: sose borítsa víz hosszabb időn keresztül az aerob közösséget és fordítva, ne levegőztessük az anaeróbokat.

A kiegyensúlyozott természetes mikroflóra egy bonyolult összetételű és bonyolult módon együttműködő közösség. Ha már adaptálódott a meglévő körülményekhez és szennyezőanyagokhoz és ezáltal minden előforduló szerves szennyező és nem szennyezőanyagot fel tud használni szubsztrátként, akkor ne becsljük le ezt a képességet, hanem használjuk a remediáció központi átalakító folyamataként, technológusként biztosítsuk az optimális körülményeket a működésükhöz (intenzifikált természetes biodegradáció). A nehézséget az jelenti, hogy minden talajnak saját evolúciója van, és ahogy halad előre a remediáció más és más optimumról kellene gondoskodni. Ezért fontos a folyamatos monitoring, azon indikátorok monitorozása, melyek a remediáció állását és a mikroflóra igényeit jól mutatják.

Ex situ technológiákban tetszőlegesen változtathatjuk a mikroflórának megfelelő körülményeket, tulajdonképpen a mikroflórát is, például azáltal, hogy egy eredetileg háromfázisútalajból vízzel elárasztott kétfázisút vagy zagyot készítünk.

A mikroflóra manipulálása úgy is történhet, hogy mesterségesen felszaporított mikroorganizmusokat keverünk a talajba, az őshonosak mellé. A mesterségesen előállítás célja lehet a mennyiségi növelés, ilyenkor a talajból izolált mikroorganizmusokat adjuk vissza, izoláltan történt felszaporítás után, de cél lehet a minőségi változtatás is, ilyenkor a talajban nem őshonos, azoktól eltérő, idegen mikroorganizmusokat adunk a talajba.

A mikroorganizmus szilárd talajba juttatásának ugyanazok a problémái, mint a nem vízdoldható szilárd anyagokénak. Nehéz homogénen eloszlatni a talajban. A talaj szűrő hatása nem engedi messzire jutni őket.

Idegen mikroorganizmusok a talajban élő közösséget esetleg előnyösen kiegészíthetik, de könnyen előfordulhat, hogy kompetíció, versengés indul az őshonosak és a jövevények közöttük. Ha az őshonosak győznek felesleges volt az adagolás, de ha az idegenek, akkor hosszútávon kár származhat az őshonosok elvesztéséből egyoldalú fajösszetételből. Erre jó példa gyorsan működő, agresszív szénhidrogén-hasznosítók adagolása kőolajszármazékokkal szennyezett talajokba. A laboratóriumi táptalajokhoz szokott, izolált és mesterségesen tenyésztett fajok általában dús táptalajokat igénylő, gyorsan növekvő és hízó baktériumok. Ezek a talajba kerülve gátlástalanul elfogyasztják a könnyen hasznosítható tápanyagokat és könnyen bomló szennyezőanyagokat a többiek elől, felborítva az előzőleg kialakult kommenzalizmust, egy kiegyensúlyozott táplálkozási közösséget, ahol igazságosan megosztottak és minden „maradékot” elfogyasztottak az arra szakosodott fajok. Ennek technológiai következménye az lesz, hogy a könnyen bontható szennyezőanyagok ugyan gyorsabban fognak lebomlani, de több és nehezebben bontható maradékkal kell számolnunk, mint oltóanyag használata nélkül.

Idegen mikroorganizmusok gyakran életképtelennek bizonyulnak a talajban, de génjeik haláluk után is fennmaradhat és a horizontális géntranszferrel őshonos mikroorganizmusokba kerülhetnek. Ezeket a folyamatokat még nem tudják kontrolláltan alkalmaznia bioremediáció hatékonyságának növelésére.

Saját evolúció

Az élő talajnak, akár *ex situ* kezeljük, akár *in situ* saját, minden mástól eltérő evolúciója van. Az eredeti evolúciós folyamatokat először a szennyezőanyag megjelenése változtatja meg. A szennyezőanyagot tűrő és hasznosítani képes fajok előnyhöz jutnak, relatív feldúsulásuk mellett az érzékenyek visszaszorulására, esetleges teljes pusztulására kell számítanunk. A megváltozott fajeloszlás kihat a teljes közösség együttműködésére, de – hacsak nem erősen toxikus az szennyezőanyag – a szennyezett talajban tovább élnek a mikrobaközösségek. A talaj saját evolúcióját befolyásoló második szakasz a technológiai beavatkozás. Megbolygatjuk, megváltoztatjuk a külső körülményeket, emiatt átalakul elsők a fajeloszlás, ehhez adaptív mechanizmusok beindulása, mutációk és azt követő szelekció és horizontális géntranszfer is járul. A saját evolúcióba való beavatkozás *ex situ* technológiáknál nagyobb lehetőséget kap és a megtartás igénye sem akkora, mint *in situ* kezelésnél. Az eredeti biológiai állapot megtartása ott merül fel legélesebben, ahol a területhasználat nem változik meg vagy igényesebbé válik, mint korábban volt (természetes, mezőgazdasági, szabadidős tevékenység területeinek talaja).

Hozzáférhetőség és növelése

A biodegradációt limitáló tényező a talajban gyakran a szennyezőanyag biológiai hozzáférhetősége. A biológiai folyamatok a mikrofelületeken kialakult biofilmek, alapvetően vizes fázisában folynak, ahová a tápanyagok és az oxigén diffúzióval jut be. Az apoláros szerves szennyezőanyagok ezekbe a biofilmekbe igen korlátozottan jutnak be, mert nem vízdoldhatóak, nem szolubilizálódnak. A mikroorganizmusokhoz való eljutás két legfontosabb

lépése 1. a fázisok közötti megoszlás: az eredetileg a szilárd fázishoz (humusz) vonzódó szerves szennyezőanyag egyensúlyi megoszlását a talaj vízfázisa felé kell eltolni. Ez történhet, detergenssekkel (felületaktív anyagok=tenzidek, nedvesítőszer, mosószer, szappanok, emulgeáló szerek) polaritást növelő vagy micellaképzők anyagokkal, komplexképzőkkel, oldószerrel, molekuláris kapszulálószerrel. Az itt említett anyagok lehetnek természetes eredetűek és származhatnak a talaj saját mikroflórájától. Ha van biotenzid-termelés a talajban, azt a technológus intenzifikálhatja is. Ha az őshonos mikroorganizmusok nem képesek megfelelő mennyiségű és minőségű biotenzid képzésére és hozzáférhetőség-növelésre, akkor a remediációs technológia részét kell képezze a hozzáférhetőség-növelés.

Revitalizálás

A talaj revitalizálása alatt a kezelt talaj életképességének, termőképességének visszaállítását vagy a jövőbeni talajhasználat által megkövetelt biológiai aktivitás elérését értjük. Mivel az ex situ beavatkozások erőteljesebbek, ezért az ex situ kezelt talajok revitalizálására gyakrabban van szükség. A talajmikroflóra felborulása több okra is visszavezethető: maga a szennyezőanyag is kipusztíthat esszenciális mikroorganizmusokat, de a remediációs technológia körülményei sem mindig kedveznek a tiszta talajt jellemző őshonos közösség valamennyi fajának. Tápanyaghiány is okozhatja bizonyos fajok visszaszorulását, vagy az, hogy a technológia nagyobb nedvességtartalom mellett folyik, mint amekkora a normális működés igénye. Ex situ kezelt talajhoz a kezelés befejeztével a kezelőreaktorban keverhetjük a revitalizáláshoz szükséges adalékokat, tápanyagokat, holt szerves anyagot, kiegyensúlyozó adalékokat, lazítószer vagy mikroorganizmusokat. In situ kezelt talaj revitalizálása szintén körülmények, adalékok és mikroorganizmusok kérdése, a bejuttatás nehézségeiről már szoltunk.

3. táblázat: Ex situ és in situ talajremediáció reaktorszemléletű összehasonlítása

Reaktor tulajdonság	Ex situ zárt reaktor	Ex situ nyitott reaktor	In situ felszíni talajréteg	In situ mélyebb talajréteg	In situ talajvíz, ill. telített talaj
Határok	Konstruált vagy termész. határok	Konstruált / természetes határok / felülről nincs fizikai határolás	Természetes határok / nincs fizikai határolás	Természetes határok / nincs fizikai határolás	Konstruált (részal) / term. határok / nincs fizikai határolás
Nyitottság	Zárt	Félig nyitott, nyitott,	Nyitott, félig nyitott, zárt	Nyitott, félig nyitott, zárt	Nyitott, félig nyitott, zárt
Kezelt térfogat	Fizikai határokon belüli térfogat	Fizikai határokon belüli térfogat	Műveletek hatótávolságán belüli térfogat	Műveletek hatótávolságán belüli térfogat	Műveletek hatótávolságán belüli / részalon belüli tf.
Érintkező környezeti elemek	Nincs	Atmoszféra, talajfelület (talajvíz)	Atmoszféra, talajvíz, rétegvíz, környező talaj	Talajvíz, rétegvíz, környező talaj	Talajvíz, rétegvíz, környező talaj
Kezelhető fázisok	L, V, Z, 2T, 3T	V, Z, 2T, 3T	L, 3T	L, V, 3T	V, 2T
Anyagkiáramlás módja	Kontrollált	Gázok és gőzök atmoszférába Csurgalékvízzel felszíni vízbe, talajvízbe, talajba Szilárd formában: erózió, defláció	Gázok és gőzök atmoszférába / talajlevegőbe Talajvízbe, azzal közlekedő felszíni vízbe Szilárd formában: erózió, defláció	Gázok és gőzök talajlevegőbe Talajvízbe, azzal közlekedő felszíni vízbe	Gázok és gőzök talajlevegőbe Talajvízbe, azzal közlekedő felszíni vízbe
Homogenitás	Homogén: L V Z	Homogén: LVZT	Kvázi homogén:	Kvázi homogén:	Kvázi homogén: víz

	T Heterogén: T	Heterogén: T	L V Heterogén: 3T	L V Heterogén: 3T	Heterogén: V 2T
Teljes talaj heterogenitása	Homogén zagy Teljes talaj: külső körülményektől szennyezőanyag eloszlástól függő	Teljes talaj: külső körülményektől és szennyezőanyag eloszlástól függő	Hidrogeológiai és környezeti paraméterektől függő Szennyezőanyag eloszlástól függő	Hidrogeológiai és környezeti paraméterektől függő Szennyezőanyag eloszlástól függő	Hidrogeológiai és környezeti paraméterektől függő Szennyezőanyag eloszlástól függő
Elrendezés	Egylépcsős: V TZ Többlépcsős: V Z Kaskád: V Z	Egylépcsős: V TZ Többlépcsős: V Z Kaskád: V Z	Egylépcsős: T	Egylépcsős: T	Egylépcsős: V T Többlépcsős: V Kaskád: V
Koncentráció gradiense szerinti	Homogén szakaszos tankreaktor Heterogén szakaszos tankreaktor Homogén tank recirkulációval Heterogén tank recirkulációval Folyt. homogén	Homogén szakaszos tankreaktor Heterogén szakaszos tankreaktor Homogén tank recirkulációval Heterogén tank recirkulációval Folyt. homogén	Heterogén szakaszos tankreaktor Heterogén tank recirkulációval L	Heterogén szakaszos tankreaktor Heterogén tank recirkulációval L	Heterogén szakaszos tankreaktor Heterogén tank recirkulációval LV
Levegőztetés	Szellőztetés: szívással/nyomással Injektálás Kémiai	Szellőztetés: szívással/nyomással Injektálás Kémiai	Szellőztetés: szívással/nyomással Injektálás	Szellőztetés: szívással/nyomással Injektálás	Injektálás Kémiai
Redoxpotenciál	Aerob Anoxikus Anaerob	Aerob Anoxiku	Aerob Anoxikus	Aerob Anoxikus	Aerob Anoxikus Anaerob
Nedvességtartalom	3T: beszivárogatás, injektálás, elárasztás Kétfázisú: - Zagy: -	3T: permetezés, beszivárogatás, injektálás, időszakos elárasztás Kétfázisú: - Zagy: -	3T: permetezés, beszivárogatás, injektálás, időszakos elárasztás	3T: permetezés, beszivárogatás, injektálás, időszakos elárasztás	2T: nem szükséges Vízszintemelés
Adalékok	Homogén reaktorba: vízdoldható, szilárd Heterogénbe: vízdoldható	Homogén reaktorba: vízdoldható, szilárd Heterogénbe: vízdoldható	Vízdoldható	Vízdoldható	Vízdoldható
Elvétel	Talajlevegő Talajnedvesség Talajvíz Zagy Szennyezőanyag	Talajlevegő Talajnedvesség Talajvíz Zagy Szennyezőanyag	Talajlevegő Talajnedvesség Talajvíz Szennyezőanyag	Talajlevegő Talajnedvesség Talajvíz Szennyezőanyag	Talajvíz Szennyezőanyag
Recirkuláció	Talajlevegő Talajvíz Zagy	Talajlevegő Talajvíz Zagy	Talajlevegő	Talajlevegő Talajvíz	Talajvíz
Mikroflóra	Aerob: V 3T Fakultatív anaerob: V T Z Anaerob: V 2T Z	Aerob: V 3T Fakultatív anaerob: V T Z Anaerob: V 2T Z	Aerob: 3T Fakultatív anaerob: V 2T	(Aerob): 3T Fakultatív anaerob: V 2T	Fakultatív anaerob V 2T Anaerob: V 2T
Mikroflóra módosítása	Technológiai paraméterekkel Oltóanyaggal	Technológiai paraméterekkel Oltóanyaggal	Technológiai paraméterekkel Oltóanyaggal	Technológiai paraméterekkel Oltóanyaggal	Technológiai paraméterekkel Oltóanyaggal
Evolúció	Módosított Provokált	Módosított Provokált	Saját Módosított Provokált	Saját Módosított Provokált	Saját Módosított Provokált
Revitalizálás	Spontán	Spontán	Spontán	Spontán	Spontán

	Mesterséges	Mesterséges	Mesterséges	Mesterséges	Mesterséges
Biol. hozzáférhetőség	Adagolás reaktorba	Adagolás reaktorba	Injektálás talajba Elárasztással	Injektálás talajba elárasztással	Injektálás talajvízbe
Monitoring	Talajlevegő Talajnedvesség/víz Z Teljes talaj	Talajlevegő Talajnedvesség/víz Z Teljes talaj	Talajlevegő Talajnedvesség/víz Z (Teljes talaj)	Talajlevegő Talajnedvesség/víz Z (Teljes talaj)	Talajnedvesség/víz (Teljes talaj)
Szabályozás	L, V, Z, T alapján	L, V, Z, T alapján	L, V alapján	L, V alapján	L, V alapján
Utó-monitoring	Minőség-ellenőrzés	Minőség-ellenőrzés	Minőség-ellenőrzés Környezet-monitoring	Minőség-ellenőrzés Környezet-monitoring	Minőségellenőrzés Környezet-monitoring

L: levegő

V: víz

T: talaj

Z: zagy

2T: kétfázisú talaj

3T: háromfázisú talaj

6. Technológia-monitoring

A talaj felmérése, a talajban lejátszódó folyamatok megfigyelése és időbeni követése a tudomány egyik nagy feladata. Ma még a mintavétellel és a fizikai-kémiai vizsgálati módszerekkel is problémák vannak, nincs egységes metodika. A biológiai állapot, a szennyezőanyagok hatásai, a hozzáférhetőség, a kockázatok és a technológiaváltoztatást megalapozó vizsgálatok pedig – sajnos tagadhatatlan, – gyerekcipőben járnak. Európai projektek foglalkoznak a talaj, mint környezeti elem monitorozásával, a remediációs technológiák követésére pedig egyre többen ajánlanak integrált metodikákat. Az OM támogatással és BME közreműködéssel született meg a TaljTesztelőTriád elnevezésű integrált metodika, melynek a talajremediáció, elsősorban a bioremediáció követése is részét képezi.

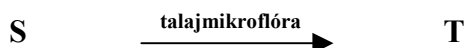
Nem csak a metodikák nincsenek kifejlesztve, de a mérési eredmények értékelése és interpretálása sem. Erre született javaslat és a gyakorlatban is kipróbált és bizonyított integrált eljárás lényege, hogy a fizikai-kémiai analitikai eljárások mellé biológiai és környezet-toxikológiai eljárásokat is alkalmazunk.

Ex situ talajremediációnál kisebb problémával állunk szemben, hiszen a többé-kevésbé homogén talajt tartalmazó reaktor hozzáférhető, abból a mintavétel könnyűszerrel megoldható, ritkán követelmény a zavartalan szilárd fázis megmaradása. Tehát megfelelően átgondolt, a heterogenitásokat, gradienseket is figyelembe vevő mintavételi terv jó kilátásokkal kecsegtet, a technológia követése mind a gáz, mint a talajnedvesség vagy talajvíz, mind pedig a teljes talaj elemzésén keresztül megoldható, feltéve, hogy ismerjük és alkalmazzuk a modern biológiai és környezetttoxikológiai tesztmódszereket.

In situ remediációnál viszont két alapvető nehézségbe ütközünk, ha teljes talajból akarunk mintát venni. 1. A talaj mag és a szennyezőanyag eloszlása is heterogén. Ezek a térbeli heterogenitások sokszorosan felülmúlhatják az időbeni szennyezőanyag csökkenést. 2. Gyakori, hogy a szilárd fázis zavartalansága mellett szeretnénk dolgozni a talajlevegő és talajvíz áramlási viszonyainak beállítása után. Magminta vétele fűrésszel, a talajlevegő és víz áramlási viszonyainak megváltozásával jár. *In situ* talajremediáció követésére tehát célszerű a mobilis talajfázisok, a talajlevegő, a talajnedvesség és/vagy a talajvíz mintázása és analízise. A problémát ebben a koncepcióban az jelenti, hogy a levegő és víz adataiból kell következtetnünk a talajban lejátszódó mikrobiológiai folyamatokra. Ez akkor lehetséges, ha ismerjük a „cell factory” működését, a mérhető paraméterek jelentését. Azzal is tisztában kell lennünk, hogy a mozdítható talajfázisok a teljes kezelt térfogat átlagát reprezentálják, tehát a belső heterogenitásokra nem kapunk választ, azokat nem tudjuk követni.

A talaj bioremediációjának követésére, más biotechnológiák követésére a átalakító tevékenység alapján a következő lehetőségek adódnak: az átalakítás lényege, hogy a

szennyezőanyagból, mely szubsztrátként hasznosul a mikroorganizmusok ártalmatlan terméket állítanak elő.



Fenti egyenlet alapján a biotechnológiai folyamatok követésére alkalmas a szubsztrát fogyasztásának, a termék keletkezésének vagy, ha létezik a közttermék keletkezésének kimutatása. Harmadik lehetőségünk magának a mikroflórának a monitorozása. Monitorozhatjuk a mikroflóra egészét fiziológiai jellemzőjük, általánosan elterjed enzimek (légzési lánc enzimek, denitrifikáció, nitrogénfixálás, cellulázaktivitás alapján) aktivitása alapján vagy valamilyen specifikus bontó- vagy tűrőképességgel rendelkező indikátorfaj mennyiségének követése révén. A végpont ilyenkor lehet az indikátorfaj jellemző génje, enzime vagy egyszerűen csak elektív-, szelektív- vagy differenciáló táptalajon való növekedése.

Talajremediációval kapcsolatban alkalmazható mérési végpontok az alábbiak:

Szubsztrátfogyás oldalról:

Talaj és/vagy talajvíz extrahálható szervesanyag tartalma (C-forrás)

Talaj és/vagy talajvíz szennyezőanyagtartalma (C-forrás)

Talaj és/vagy talajvíz nitrogén és foszfortartalma (N- és P-forrás)

Oxigénforrás fogyása (légtér O_2 , NO_3 , SO_4 , Fe^{3+})

Termékkeletkezés oldalról:

A biodegradáció közti- és végtermékei, (NO_2 , HCl, stb.)

beleértve a mineralizáció végtermékeit (CO_2 , NH_4^{2+} , stb.)

Átalakítást végző mikroorganizmusok oldaláról:

Sejtkoncentráció (talaj összes sejszáma: (aerob baktériumok, gombák, stb.)

Specifikus bontóképességű sejtek koncentrációja (szénhidrogénbontó, PAH-bontó, stb.)

Speciális tűrőképességgel rendelkező mikroorganizmusok száma(fémtűrők)

Genetikai markerek (indikátorgének)

Biokémiai markerek (specifikus tulajdonságért felelős enzimek)

Szabályozás

A viszonylag homogén mobilis talajfázisokból származó mintákban kimutathatjuk a bontás végtermékeit vagy a bontatlan maradékot, a tápanyag és levegőellátottságot, a hőmérsékletet és a nedvességtartalmat. Tehát a mért paraméterek alapján szabályozni is tudunk, a kívánatos értéken tudjuk tartani a technológia körülményeket, biztosítani a talajmikroorganizmusok számára szükséges optimumot. A kimutatható termékek közül az illóak vagy vízzoldhatóak megfelelőek, amelyek megoszlással bekerülnek a mobilis talajfázisokba, a szilárd talajfázishoz kötött szennyezőanyagok vagy termékek csak talajmintavétel után elemezhetőek és pontatlan eredményt adnak, a hely szerinti heterogenitás sokszorosan meghaladhatja az időbeli változások eredményét.

Utómonitoring

Ex situ talajremediációnál az utómonitoring általában befejeződik a kezelt talaj minősítésével. Környezetmonitoringra csak akkor van szükség, ha a talaj kezelése után is

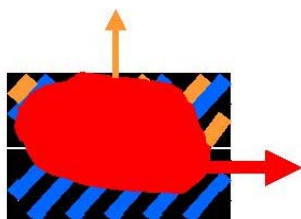
nagy kockázattal rendelkezik, mégis kihelyezik a környezetbe. A minősítéshez integrált metodika (fizikai-kémiai +biológiai-környezettoxikológiai tesztelés) szükséges és ismerni kell a talaj jövőbeni használatát, hogy az azzal kapcsolatos megengedhető kockázathoz hasonlíthassuk az eredményeket. Kevésbé, in situ kezelést követően szigorúbb követelmények lépnek fel, mert nem csak a kezelt talajtérfogatnak kell megfelelnie a használat minőségi követelményeinek, hanem az egész területnek, a kezelt talajtérfogatot körülvevő területnek, az ottani környezeti elemeknek. Pontosan azért, mert nem látunk tökéletesen bele a kezelt talajtérfogat fekete dobozába, nem tudunk minden kilogramm talajrészletet egyenként megvizsgálni, csak a hosszú időn keresztül bizonyított negatív kibocsátás bizonyíthatja a terület ártalmatlan voltát.

7. Esettanulmányok

A reaktorszemléletű tárgyalást a kutatásban szereplő két szennyezettségi eseten is bemutatjuk: 1. a szénhidrogénekkal szennyezett mezőgazdasági talaj *in situ* bioremediációja (Kaba, Kutricamajor) és 2. a toxikus fémekkel szennyezett néhai ipari/bányaterületek talajának *in situ* kémiai+fitoremediációja (Gyöngyösoroszi és a Toka patak völgye, valamint Soroksár).

7.1. Kaba-Kutricamajor

A területen a háromfázisú és a kétfázisú talaj, valamint a talajvíz is szennyezett fáradt motorolaj+dízelolaj típusú szénhidrogénnel. A szennyeződés kockázata elviselhetetlenül nagy, mert a kibocsátás, elsősorban a talajvízzel való terjedés vízbázisokat veszélyeztet.



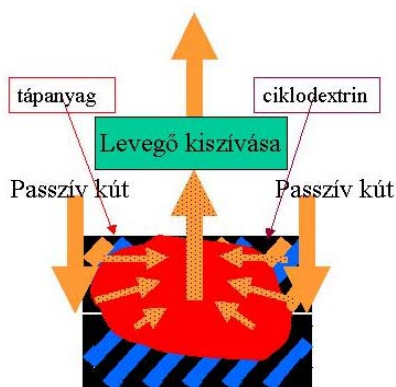
A **kiindulási helyzetet** a 41. ábra szemlélteti. A szennyezettség mind a háromfázisú, mind a kétfázisú talajt és ezzel a talajvizet is elérte. A fő kockázat a talajvízzel történő szennyezőanyag-transzportból adódik. A szennyezettség egy része felszín alatti tartályból (üzemanyagtárolás), másik része a felszínről ered (üzemanyagtöltés, olajcsere)

41. ábra: Kaba: kiindulás



A talajt kitermelés nélkül *in situ* kezeljük, de a szennyezett **talajvíz tisztítása ex situ történik a felszínre szivattyúzás után**. A víznyerő kutat a szennyeződés centrumában helyeztük el. A bűvárszivattyú a vízszint érzékelése alapján kapcsol ki, illetve be, ezzel állandó vízszintet és szakaszosan csökkent nyomást eredményez, ezzel a kút környéki vízre szívó hatást gyakorol. Ezzel a szennyezett talajvíz tovaterjedését korlátozzuk, illetve megakadályozzuk, viszont elősegítjük a kezelt talajtérfogaton kívüli talajvíz területre érkezését (ebből adódott a megvalósítás során az idegen szennyezőanyag megjelenése)

42. ábra: 1. technológiai lépés



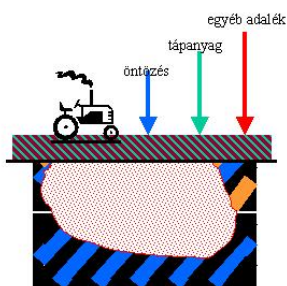
A víz kiszivattyúzásának és ex situ kezelésének megkezdése után néhány hónappal indult a vízszintsüllyesztéssel megnövekedett háromfázisú talaj **bioventillációja**. A háromfázisú talajban élő aerob mikroorganizmusokról bizonyítottuk, hogy adaptálódtak a szennyezőanyaghoz és képesek annak bontására, tehát a szennyezőanyag ártalmatlanítása alapulhat a biodegradáción. Ehhez a mikroorganizmusokat oxigénnel és tápanyagokkal kell ellátni. A ciklodextrin a régi szennyeződés biológiai hozzáférhetőségét növeli. A telítetlen talaj biológiai kezelése párhuzamosan folyik a talajvíz kezelésével.

43. ábra: 2. technológiai lépés



A folyamatosan végzett bioventilláció és ex situ vízkezeléshez egy időszakos technológia is társul: ez a háromfázisú talaj **időszakos átmosása hozzáférhetőséget növelő adalékot tartalmazó vízzel**. Ilyenkor a központi kút szívását leállítjuk és a szívott és passzív kutakba egyaránt ciklodextrines vizet töltünk, hirtelen, hogy maximálisan megemelkedjék a talajvízszint. Ez az egyszeri vizes elárasztás mobilizálja és eloszlatja a szennyezőanyagot a kisebb-nagyobb lencséből és minden olyan helyről, ahol a mikroorganizmusok korábban nem értek hozzá. A mobilizálás és elosztatás nem csak a biológiai hozzáférhetőséget növeli, hanem a vízdíszhatóságot is, melynek eredményeképpen a szennyezőanyag jelentős hányada a vizes fázisba megy át és a vízzel kiszivattyúzható.

44. ábra. 3. technológiai lépés



Ha már az első három technológiai lépés előrehaladott állapotban van, akkor következik a 4., a **felszíni talajréteg agrotechnikai kezelése**. Ezt a kezeléseket eddigi lépései nem befolyásolták jelentősen, mert a felszín közelében egy vékony izoláló agyagréteg helyezkedik el, amely elválasztja az in situ bioventillációval kezelt teret a légkörrel közvetlenül érintkező felszíni, kb. 30–40 cm-es rétegtől.

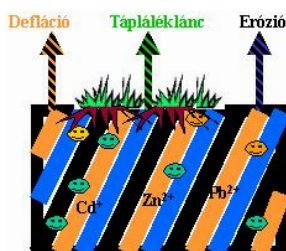
A felszíni réteg agrotechnikai kezelése az izoláló réteg feltörésével, az eddig közel izolált kapszula felfele megnyitásával jár.

45. ábra: 4. technológiai lépés

A teljes anyagszámleget a kezelés befejeztékor állítjuk fel és ismertetjük.

7.2. Toxikus fémekkel szennyezett talaj a Toka patak völgyében

A Gyöngyösorsoszi területen integrált metodikával történt részletes felmérésünk alapján kétféle kockázattal kell számolnunk: 1. a talaj és üledékek mobilis fémtartalmából adódó „aktuális” kockázattal, a pillanatnyilag hozzáférhető (mozgékony) fémek nagy valószínűséggel realizálódó káros hatásával és 2. a talaj és üledékek nem mobilis (teljes–mobilis) fémtartalmából adódó, csak hosszútávon, a mállási folyamatok előrehaladtával lassan mobilizálódó fémtartalom kockázatával. Az aktuális kockázatot a talajban mind mobilizációval, mind immobilizációval lehet csökkenteni, a hosszútávút immobilizációval (stabilizációval). Előző két típus összefügg a területen jellemző szulfidos közeg savas mállásával is, tehát a talajok kockázatát befolyásoló két alaptényező: a fémtartalom és a savanyodási hajlam.



A kiindulási állapotot a 46. ábra jellemzi. A toxikus fémek részben ionos, részben atomtrácsba vagy molekularácsba kötve fordulnak elő. A borítatlan felszínről szél- és vízerózióval transzportálódhat a szennyezett szilárd anyag és az oldott toxikus fémtartalom. Spontán vegetáció létezése esetén a fémtanszport egyik legveszélyesebb útvonala, a tápláléklánc is megnyílik, a növényi bioakkumulációtól a tápláléklánc

többi tagjában történő hatványozott feldúsulásig.

46. ábra: Fémmel szennyezett talaj: kiindulási állapot

A teljes Toka völgyében három technológiatípus alkalmazására lehet szükség a szennyezőanyag típusa, elhelyezkedése és a hidrogeológiai viszonyok függvényében.

1. Stabilizáció a növényi borítás teljessé tételével: defláció és erózió korlátozás kis fémtartalmú, enyhén savanyodó hulladékoknál.
2. Stabilizáció kémiai stabilizálószer és növények kombinált alkalmazásával: defláció, erózió és táplálékláncba jutás korlátozása nagyobb nem mobilis fémtartalmú és savanyodásra hajlamos szennyezőanyagoknál
3. Fitoextrakció: fém eltávolítása a talajból főleg mobilis (ionos) fémtartalom esetén.



A fitostabilizáció kémiai stabilizációval vagy anélkül általában a szennyeződést tűrő, jól borító fajok együttesét jelenti. Mesterséges beültetésre az adott körülményeket tűrő fajokat érdemes használni. A tűrőképesség növelése mikorrhiza gombák vagy más gyökér–mikroorganizmus-társulások alkalmazásával is elérhető. Mind a növény védelme, mind a még fennmaradó transzportútvonalak (megoszlás, kimosódás) korlátozására célszerű a fitostabilizáció mellé kémiai stabilizációt alkalmazni.

47. ábra: Kémiai- és fitostabilizáció kombinációja

A kémiai stabilizálószer tulajdonképpen a toxikus fémtartalmú közet és hulladék kémiai mállásának visszafordítását, a mállási folyamatokkal ellentétes kémiai folyamatok alkalmazását jelenti. Ilyen értelemben lehetnek pH pufferoló anyagok, az oldás-kicsapódás egyensúlyát eltoló szerek, a redoxformák egyensúlyát eltoló szerek, a talaj szerkezeti szerves anyagába (szerkezeti humusz) való stabil beépülést és a szilikátokba való beépülést elősegítő adalékok.

Bármilyen hatékony is a stabilizáció, azt tudnunk kell, hogy a toxikus fém a talajban marad. Ahhoz hogy hosszútávon megmaradjon a toxikus fémek stabilizált állapota, hozzáférhetetlensége (fizikai, kémiai és biológiai), ahhoz a kezelt területet állandó megfigyelés és szükség esetén kezelés alatt kell tartani. Mindezen kényelmetlenségek ellenére kiterjedt és diffúzan szennyezett területeknél nincs más megoldás.



Alapvetően különbözik a stabilizációtól a fitoextrakciós stratégia. Ezzel a fémek végleges eltávolítására törekszünk; egy másik „fázisba”, a növénybe való átvitel segítségével. Ez a technológia akkor hatékony, ha a fém biológiailag hozzáférhető formájú vagy azzá tehető, ha a növény nagy hozamú és hiperakkumuláló. További feltétel, hogy elég idő (esetleg több évtized) álljon rendelkezésünkre és a technológia alkalmazása közben is legyen megoldható a kibocsátás-korlátozás. A fémtartalmú növény ritkán hasznosítható, kontrollált ártalmatlanításra van szükség.

48. ábra: Fitoextrakció

Tartalomjegyzék

1. Bevezető.....	1
2. A remediációs technológiák talajfázisok szerinti osztályozása.....	3
2.1. A szennyezőanyag által meghatározott szempontok és technológiaosztályozás.....	4
2.2. Technológiák csoportosítása a szennyezőanyag mobilizálása/immobilizálása alapján.....	4
2.3. Fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon alapuló talajkezelési technológiák.....	6
2.4. Talajgáz kezelése.....	7
2.5. Talajvíz kezelése.....	8
2.6. Teljes talaj kezelése.....	14
3. Biológiai átalakításon alapuló remediációs módszerek.....	18
3.1. A bioremediáció reakciókinetikai alapjai, szaporodáskinetikája.....	19
3.2. A biomassza növekedés, a sejtek szaporodása a szennyezett talajban.....	20
3.3. Termékképzés.....	20
3.4. Anyagmérlegek.....	25
4. Reaktortípusok.....	26
4.1. Reaktorok csoportosításának alapjai.....	27
4.2. Az ex situ talajkezelési technológiák konkrét reaktora.....	27
Szennyezett talaj ex situ vízes mosása talajkezelő üzemben.....	27
Szerves anyaggal szennyezett talaj ex situ termikus deszorpciója.....	28
Alacsony hőfokú termikus deszorpció ex situ és in situ talajkezeléshez.....	29
Bioremediáció felül nyitott tartályreaktorban.....	30
Bioremediáció zárt reaktorokban.....	31
4.3. In situ kvázireaktorok.....	33
Az in situ talajkezelés általános sémája.....	33
A talajvíz recirkulációja és ex situ kezelése.....	34
Bioventilláció.....	34
A talaj hőmérsékletének emelése.....	35
Talajvíz in situ kezelése.....	36
Töblépcsős in situ kvázireaktor.....	38
4.4. Leggyakoribb műveletek in situ és ex situ talajremediációnál.....	39
5. Ex situ és in situ remediáció reaktorszemléletű összehasonlítása.....	40
A reaktor határa.....	40
Nyitottság.....	40
Érintkező környezeti elemek.....	40
Kezelt térfogat.....	41
Anyagkiáramlás módja.....	41
Kezelhető fázisok.....	42
A kezelendő közeg homogenitása.....	43
Heterogenitás.....	43
Koncentrációgradiens szerinti reaktorok.....	44
Reaktorelrendezés: egylépcsős, töblépcsős, kaszkád.....	45
Levegőztetés.....	45
Redoxpotenciál.....	46
Nedvességtartalom és beállítása.....	46
Adalékok.....	46
Anyagelvétel talajból.....	47
Recirkuláció.....	47
Mikroflóra és annak módosítása.....	48
Saját evolúció.....	49
Hozzáférhetőség és növelése.....	49
Revitalizálás.....	50
6. Monitoring.....	52
Szabályozás.....	53
Utómonitoring.....	53
7. Esettanulmányok.....	55
7.1. Kaba-Kutricamajor.....	55
7.2. Toxikus fémekkel szennyezett talaj a Toka patak völgyében.....	56