

4.1. A szennyezőanyag mobilizálásán alapuló technológiák részletes leírása

Gruiz Katalin

4.1. A szennyezőanyag mobilizálásán alapuló technológiák részletes leírása	1
4.1.1. Fizikai-kémiai eljárások	2
Talajgáz és gőz kiszívása és felszíni kezelése	2
Sztrippelés	3
Talajvíz kinyerése és felszíni kezelése	3
Talajmosás vízzel	4
4.1.2. Biológiai eljárások	5
Természetes szennyezőanyag csökkenés, mint a remediálási technológia alapja	5
A természetes biodegradáció és annak intenzifikálása enyhe beavatkozásokkal	5
Bioventilláció	7
<i>Ex situ</i> talajkezelés agrotechnikai módszerekkel	8
Háromfázisú talaj prizmás kezelése	8
Háromfázisú talaj biológiai kezelése reaktorokban	8
Izapfázisú talaj vagy üledék biológiai kezelése reaktorokban	9
Fitoremediáció	9
Biológiai kioldás (bioleaching)	10
4.1.3. Mobilizációs biotechnológiák alapját képező biológiai folyamatok fémekkel szennyezett talajok esetén	10

Ebben a fejezetben azokat az enyhe beavatkozást jelentő technológiákat tárgyaljuk, amelyek nem károsítják a talaj ökoszisztémáját. Külön alfejezetben szerepelnek a fizikai-kémiai, a termikus és a biológiai eljárások

4.1.1. Fizikai-kémiai eljárások

A fizikai-kémiai eljárásokat alkalmazhatjuk önmagukban, termikus vagy biológiai módszerekkel kombinálva. Ha önmagukban alkalmazzuk őket, akkor is hatnak a talaj biológiai rendszerére, a behatás a kezelés idejétől függően dominánsan vagy kevésbé.

Talajgáz és gőz kiszívása és felszíni kezelése

A szennyezett talajba furatokat vagy csőrendszert építenek ki. A perforált csöveken keresztül vákuummal elszívják az illékony, gáz vagy gőzalakú szerves vagy szervetlen szennyezőanyagokat. Ez a módszer a talajgáz(gőz) *ex situ* kezelését jelenti, melyet kombinálhatunk a szilárd talajfázis akár *ex situ*, akár *in situ* kezelésével.

Ex situ esetben a talajprizmák vagy a kezelendő talajréteg alá célszerű helyezni a perforált csőrendszert, melyen keresztül szívják a szennyezett talajlevegőt. *In situ* esetben a talajba mélyített függőleges, esetleg vízszintes, vagy ferde perforált csőrendszeren keresztül történik a levegő kiszívása.

A kiszívott szennyezett talajlevegő helyét friss levegő foglalja el. A kialakult meredekebb koncentrációgradiens lesz a hajtóereje a folyadékfilmben vagy a szilárd felületeken adszorbeált gőzök gázfázisba kerülésének és minél teljesebb eltávolításának. Az illékony szennyezőanyagok a talajrészecskékről leválnak, illetve a pórusvízből a póruslevegőbe mennek át. A szennyezett levegőből a szennyezőanyagokat a felszínen leválasztják, a kiszívott levegőt kezelik.

A talajlevegő kiszívásával nemcsak a szennyezőanyagokat, de a talajlevegőben felgyűlt anyagcseretermékeket is (pl. CO₂) elszívjuk, így a használt talajlevegő helyébe friss atmoszférikus levegő kerül. A talaj átszellőztetésével a helyi mikroflóra aktiválása is megindul, így ez az eljárás sosem tisztán fizikai módszer.

A gyakorlatban a talajszellőztetést illékony vagy biodegradálható szennyezőanyagok esetében alkalmazzák. Nagy kiterjedésű szennyezett területek esetén is alkalmazható. A gáz/gőzelszívást leggyakrabban a szilárd illetve folyadékfázis *in situ* biológiai kezelésével kombinálják, ezt nevezik bioventillációnak.

A felszínre szívott gáz/gőz kezelése történhet gázszeparátor segítségével, katalitikus oxidációval, adszorpcióval vagy bioszűrővel (ld. talajgáz-kezelési módszerek).

Néhány °C hőmérsékletemeléssel nagymértékben fokozható a deszorpció és a párolgás mértéke, ezért a gázelszívást a talaj hőmérsékletének emelésével is szokták kombinálni. Az enyhe (a biológiai rendszer és a szennyezőanyag együttes szempontjából optimális) hőmérsékletemelés meleg levegő vagy gőz talajba injektálásával érhető el, ez mind *in situ*, mind *ex situ* kezelt talaj esetében megoldható. Nagyobb mértékű hőmérsékletemelés (350 °C-ig) a termikus deszorpció fogalomkörbe tartozik, mely igen hatékony technológia, tárgyalására a talajökoszisztémát károsító technológiák között kerül sor.

A talajlevegő kiszívásával és friss, atmoszférikus levegő talajba juttatásával a szilárd-gázfázis közötti egyensúly is eltolódik a gőzfázis felé, tehát a módszer az adszorbeált szennyezőanyagok eltávolítására is alkalmas.

A talaj *in situ* levegőztetésére leggyakrabban felhasznált berendezés a **levegőztető kút**. A levegőztető kutak a szennyezett talaj *in situ* bioremediációjához szükséges levegőnek a mélyebb talajrétegekbe juttatására szolgáló kutak (bioventilláció). Általában egyszerű, 5–100 mm átmérőjű, perforált műanyag bélésű csővel ellátott kutak. A bélésű cső perforációja a levegőztetendő mélységhez igazodik, a lyukak mérete 0,5–0,75 mm. A bélésű cső körül szűrőkavicsolást alkalmaznak, a felszínhez közel pedig betongallért. A kútfejet zárhatóan alakítják ki úgy, hogy a levegőztetéshez szükséges szerelvények csatlakoztathatóak legyenek. A levegőztető kutak elhelyezkedését és sűrűségét a talaj hézagterefogatának és légáteresztő képességének ismeretében lehet tervezni. A telítetlen talajt célszerű a kutakhoz csatlakoztatott ventilátor segítségével, szívással levegőztetni. Egy jól bevált eljárásban a ventilátorral szívott kútsort ún. passzív kútsor követi, melynek szerepe a légköri levegő bevezetése a talaj mélyebb rétegeibe. A levegőztető kutakat adalékanyagok talajba juttatására is fel lehet használni. A szívott, a passzív és/vagy a nyomás alatt lévő levegőztető kutak elrendezését a terület hidrogeológiai viszonyainak, a szennyezőforrás elhelyezkedésének, a szennyezőanyag terjedésének ismeretében kell tervezni: lehet koncentrikus, egyenletes háló vagy a szennyezőanyag terjedésétől függő, specifikus elrendezésű. A telített talaj levegőztetése is történhet a talajvízszint alá nyúló, perforált bélésű csöves levegőztető kutakkal, de itt mindig levegő befúvást vagy injektálást alkalmazunk, kompresszor segítségével.

Sztrippelés

A talajt szennyező gázok, illékony, vagy vízgőzzel illó szerves szennyezőanyagok eltávolítása talajvízből sztrippeléssel történhet. A sztrippelésnek van *in situ* és *ex situ* megoldása is, tehát alkalmazható akár a felszínre szivattyúzott talajvíznél, akár a ki nem szivattyúzott talajvíznél, a talajfelszín alatt.

A sztrippelés tehát illékony szerves szennyezőanyagok folyadékból történő eltávolítására szolgál, eredetileg kőolajipari technológia. A szennyezett talajvízben, vagy mosófolyadékban a víz–gáz határfelületet növelik meg, intenzív levegőztetéssel.

Alkalmazzák ipari szennyvizek, szennyezett felszíni és felszín alatti vizek kezelésére.

Ex situ megoldás esetén a kiszivattyúzott kezelendő szennyezett vizet levegőztető (sztrippelő) toronyba vagy tartályba vezetik, ahol diffúz, tálcás vagy esőztető levegőztetéssel növelik meg az illékony komponenseket magával ragadó levegő érintkezési felületét és sebességét. A tartózkodási időt az oszlop kivitelűeknél töltettel, a tartályoknál terelőlemezekkel növelik. A levegőztető berendezéseknek van fix és mobilis formájuk, működtethetőek szakaszosan, vagy folytonosan. Alternatív megoldásként meleg levegőt vagy gőzt is alkalmaznak. A sztrippelőtorony működése: a torony tetején fúvókán porlasztják be a kezelendő vizet, ez gravitációsan lefelé csurogva találkozik a kompresszor által alulról befúvott ellenáramú levegővel.

In situ sztrippelésre is van megoldás, ilyenkor a talajvizet a talaj felszíne alatt, eredeti helyén kezelik. Speciálisan kiképzett kútban történik a szennyezett talajvíz kezelése. A két szinten szűrőzött vákuumkút vizébe levegőt injektálnak. Az illékony komponens gázfázisba kerülése a kútban játszódik le. A talajvíz az alsó és a felső szűrő között cirkulál, a kezelt víz a légbefúvás miatt megemelkedett vízszint hatására a felső szűrőn keresztül jut vissza a vízadóba. A levegőinjektor más adalékanyagok bejuttatására is használható.

Talajvíz kinyerése és felszíni kezelése

A szennyezett talajvizet, szabad felszínű gödrökből vagy kutakból szivattyúzott víznyerő kutakból vagy drénrendszer segítségével nyerhetjük ki a talajból, a célból, hogy a felszínen

kezeljük. Ez tehát, a talajvíz *ex situ* kezelése, a szilárd fázis *in situ* kezelésével kombinálva, esetleg kezelés nélkül hagyva azt.

A víz kinyerése függ a talaj hidrogeológiai jellemzőitől, a vízáradékapességtől. A kutak számát, sűrűségét, kiosztását a helyi hidrogeológiai viszonyok és a szennyezőanyag elhelyezkedése szabja meg.

Depressziós kutak nem csak a szennyezett víz kinyerését, hanem a talajvízben oldott szennyezőanyagoknak a talajvízzel történő tovaterjedés megakadályozását is szolgálják.

A víznyerő kutakat a talajvíz felületén elkülönülő fázisként úszó, folyadékfázisú szervesanyag kinyerésére is használhatjuk, a felúszó réteg vastagságától függően, akár a szennyezőanyag lefőlézésére, akár a vízzel együtt történő kinyerésre, amit felszíni fázisátválasztás követ. Természetesen a felúszó réteget alkotó vegyi anyag fizikai-kémiai tulajdonságai függvényében kell a biztonságos szivattyút és kútrendszert megtervezni, illetve kiválasztani.

Telítetlen talaj szennyezett talajnedvességének gyűjtésére a talajba helyezett drénrendszer szolgál. A gyűjtőzsombból szivattyúk segítségével vagy gravitációsan kerül ilyenkor a víz a vízkezelő rendszerbe.

A kiszivattyúzott szennyezett vizet a szennyezőanyag minőségének függvényében a jól ismert víz- és szennyvízkezelési módszerekkel kezelhetjük a felszínen: sztrippelés, fázisátválasztás, szűrés, ülepités, extrakció, fizikai-kémiai átalakítás, oxidáció, stb. A biodegradáción alapuló talajvíz-kezelési technológiák lehetnek: eleveniszapos aerob kezelés, csepegtetőteszt aerob kezelés, anaerob reaktorok vagy töltött oszlopok, bioszűrés, stb.

A talajvíz kiszivattyúzását szolgáló leggyakoribb berendezés a talajvízszint-süllyesztő kút, mely a víz felszínre szivattyúzásával együtt süllyeszti a talajvíz szintjét. Ezek általában ideiglenes, egyszerű szerkezetű kutak. Erre a célra ritkán készül nagy teljesítményű egyedi kút, inkább egymáshoz gyűjtőcsővel kapcsolt kútsorokat v. kúthálózatot hoznak létre. Egyedi kutakból a vizet búvárszivattyúval v. a felszínen elhelyezett szivattyúval emelik ki; a *kútsorokat* összekötő gyűjtővezeték lehet a szivattyú (centrifugálszivattyú) közös csöve is, amely minden kút csövével légmentes kötéssel kapcsolódik. A kutak működése két fő elven képzelhető el: – **1.** a depressziós kutaknál a kút vize szabad felszínű; – **2.** a vákuumos kútból a víz a benne lévő szívás miatt a talajfelszínen elhelyezett vákuumtartályba emelkedik. Szennyezett talajvizet csak megfelelő kezelés után, de szennyezetlen talajból kiemelt vizet is csak előzetes minőségi vizsgálatok után, az engedélyezési előírások betartásával szabad elhelyezni: csatornába, élővízbe, vagy talajvízbe.

Talajmosás vízzel

Talajmosás a talaj szilárd fázisának vizes oldatokkal vagy emulziókkal történő mosását jelenti. Ilyenkor a talajvíz és a szilárd fázis között megoszló, de dominánsan a szilárd fázishoz kötődő szennyezőanyag mobilizálásáról van szó.

Az *in situ* talajmosásnál tulajdonképpen a szennyezőanyagot a talaj szilárd fázisából a talajvízbe mossák, amit aztán kiszivattyúznak, és a felszínen kezelnek, tehát a talajvíz *ex situ* kezelése a talaj szilárd fázisának *in situ* kezelésével van kombinálva. A mosást vízzel vagy vízben oldott adalékanyagokkal (híg sav, híg lúg, detergens, komplexképzők, egyéb mobilizáló anyagok) végzik. Az eljárás csak akkor ajánlható, ha a talajvíz már eleve szennyezett, olyankor is meg kell akadályozni a talajvízzel való tovaterjedést: állandó depresszió vagy részalak alkalmazásával.

A talaj *in situ* vizes mosását is lehet kombinálni a talaj vagy a mosóvíz hőmérsékletének emelésével, amely megnöveli a deszorpciót és az oldhatóságot.

Ex situ talajmosás alkalmazásakor az eredeti helyéről kiemelt talajt mossák. A szennyezőanyagokat a talajszemcsék felületéről vízzel, savas vízzel, felületaktív anyagokkal vagy kelátképzőkkel mossák le, általában reaktorokban. A kezelőreaktor lehet talajjal töltött oszlopreaktor vagy iszapreaktor, melybe a talaj vizes szuszpenziója kerül. A mosó reaktor a helyszínen is felállítható, így kezelés után a talaj azonnal visszatölthető eredeti helyére.

A talaj mosásánál a szennyezőanyagot a szilárd fázisból a vizes fázisba visszük át. A szennyezőanyag oktanol-víz, vagy szilárd-folyadék megoszlási hányadosától függően igen nagy mennyiségű mosófolyadék is keletkezhet, mely természetesen szintén kezelést igényel, amely külön technológiai ágon történik.

Gyakran alkalmaznak nyírófeszültséget a talajszemcsék felületéről történő szennyezőanyag lemosásához. A nagy sebességű vízszugár, vagy gőzborotva lesodorja a szilárd szemcsék felületére tapadt (adszorbeálódott, ionosan kötődött, stb.) szennyezőanyagot. A különválasztott mosóvizet alkalmas technológiával kezelni kell.

Az *ex situ* vizes mosást elsősorban üledékek és más szuszpenzió formájú hulladékok, iszapok, iszapállagú talajok kezelésére célszerű alkalmazni.

4.1.2. Biológiai eljárások

Az enyhe beavatkozásoknál nem könnyű szétválasztani a fizikai-kémiai és biológiai beavatkozásokat, hiszen azok nem függetlenek egymástól. A gázelszívás felfogható levegőztetésnek, a vizes mosás ugyancsak stimulálhatja a talajmikroflórát, tehát a fizikai módszerek alkalmazásának is vannak biológiai következményei, amivel vagy számol, vagy nem számol a technológus. Célszerű számolni velük, egyrészt, mert hasznos folyamatokról van szó, másrészt, mert a talaj mikroflórájának működése tetemes mértékben befolyásolhatja a talajfolyamatokat és az alkalmazott technológiát.

Természetes szennyezőanyag csökkenés, mint a remediálási technológia alapja

A szerves és/vagy szervesetlen szennyezőanyagokkal szennyezett talajokban élő mikroorganizmus-közösség a szennyezést követően egy sor változáson megy keresztül. Előnybe kerülnek a szennyezőanyagot hasznosítani vagy túrni képes fajok, megindul a biodegradációra képes és/vagy túróképes mikroorganizmusok természetes szelekciója és dúsulása.

A mobilis szennyezőanyag a talajgázba vagy a talaj folyadék fázisba (talajnedvesség, talajvíz) kerül, ezzel jó feltételeket biztosít a természetes szennyezőanyag csökkenéshez, melyek közül a hígulás és a terjedés nem egyértelműen hasznos folyamat, a biodegradáció viszont igen.

A legtöbb szerves- és számos szervesetlen anyag immobilizálódhat is a talajmátrixban. Így ezek bontása nehézkessé válik, a szervesetlen fémek teljes egészében megmaradhatnak eredeti helyükön.

A természetes biodegradáció és annak intenzifikálása enyhe beavatkozásokkal

A természetes mikroflóra működésének optimálására, aktivitásának növelésére oldott oxigént, különféle tápanyagokat, igény szerint a biológiai aktivitást és a szennyezőanyag mobilitását, biológiai hozzáférhetőségét növelő adalékokat juttatnak a talajba.

Rengeteg technológia szerepel a szakirodalomban és a gyakorlatban, amely *in situ* vagy *ex situ* módon igyekszik intenzifikálni a biodegradációt a talajban. Mindazonáltal, szeretnénk hangsúlyozni, hogy a talaj saját biodegradációján alapuló technológiáknak helyszínspecifikusnak kell lenniük, vagyis figyelembe venniük a helyi adottságokat, a szennyezőanyag, a talajmátrix és a már adaptálódott mikroflóra jellemzőit és kölcsönhatásait.

A helyspecifikusság nemcsak azt jelenti, hogy a biotechnológia paramétereit kell helyszínspecifikussá tenni, hanem a műveleteket is, amelyek ezeket a paramétereket biztosítják. Emiatt ritkán lehet két technológia teljesen azonos és a tervezett technológia alkalmasságát kísérletesen is bizonyítani kell. Tehát a technológia-tervezésnek mindig részét kell képeznie a laboratóriumi vagy félüzemi technológiai kísérletek.

A leggyakrabban alkalmazott beavatkozások az alábbi környezeti paraméterek változtatását célozzák: oxigénellátás, tápanyagellátás, hozzáférhetőséget növelő adalék, egyéb stimuláló adalék, mikrobiális oltóanyag.

Az oxigénigény kielégítése történhet légköri levegő bevezetésével, illetve elszívásával (bioventilláció), vagy oxigént szolgáltató oldott anyagok talajba vagy talajvízbe juttatásával (peroxid oldat, oxigént szolgáltató immobilis peroxidvegyületek, pl. Mg-peroxid, nitrát vagy szulfát az alternatív légzésformák kiszolgálására a talaj anaerob telített zónájában, stb.).

A tápanyagok és adalékanyagok bejuttatása általában oldott formában történik, mélyebb rétegekbe injektálással, injektáló kutak vagy szondák segítségével, vékony talajréteg esetén talajra locsolással.

Nagy befolyás gyakorolható a talajban működő biodegradációra a talaj szervesanyag-tartalmának kontrollálásával. A talajba kevert holt szerves anyag (hulladékok) hatására megindul a holt szerves anyag bontását végző közösség aktiválódása, ezzel olyan anyagcsereutak lépnek működésbe, melyek a szennyezőanyagok bontására is képesek. A szerves anyagok mineralizációján kívül a körülményektől függően humuszképződés is lejátszódik, mely a szennyezőanyagoknak a humuszba épülését is eredményezheti.

A talaj hőmérsékletének kismértékű (mikrobák számára optimális és a deszorpciót is növelő) emelése ugyancsak növeli a biodegradáció hatékonyságát. A nehezen biodegradálható anyagok kémiai reakcióit, pl. polimerizáció, oxidáció szintén megnöveli, tehát a humuszba épülést és a stabilizációt is elősegítheti abban a stádiumban, amikor már biológiailag bontható szubsztrát (szennyezőanyag) kevés van vagy nincs a talajban.

Bizonyos szennyezőanyagok esetében mikrobiális oltóanyag alkalmazása is eredményre vezethet: pl. speciális enzimeket igénylő xenobiotikumok esetében.

A kometabolizmus vagy kooxidáció számos mikroorganizmus anyagcseréjében megfigyelhető jelenség, melynek során a mikroorganizmus számára tápanyagul nem szolgáló szubsztrát (az ún. kosubsztrát) biotranszformációja, módosulása, lebontása történik, gyakorta egy másik, tápanyagul szolgáló szubsztrát átalakulásával egybekötve. A kosubsztrátból kooxidációval nyert terméket a mikroorganizmus nem hasznosítja. A jelenség bizonyos enzimek tágabb szubsztrátspecificitásán alapul, vagyis azon, hogy az enzim a szokásos szubsztrátján kívül hasonló térszerkezetű és méretű idegen anyagot is elfogad, elvégzi rajta az átalakítást, de a keletkezett termék nem jut tovább az anyagcsere kapcsolódó reakcióiba (energiatermelés, bioszintézis). Igen sok xenobiotikum biodegradációjának bevezető lépése kometabolikus folyamat. A kometabolizmus folyamatát környezetvédelmi biotechnológiákban hasznosítjuk xenobiotikumokkal szennyezett talajok vagy hulladékok vagy más szennyezett környezeti elemek (pl. talaj, talajvíz, üledék) remediációjára. Jól ismert kometabolikus folyamat a klórfenolok, pl. 3,4-diklórfenol bontása

Penicillium frequentans fonalas gombával, fenol jelenlétében, vagy a 2,4,6-trinitro-toluol (TNT) többlépéses kometabolizmussal történő bontása. Ezek a kometabolikus folyamaton talajvízkezelési technológiák is alapulnak.

A környezetben folyó spontán biodegradációban és veszélyes anyagokkal szennyezett környezeti elemek bioremediációjában egyaránt nagy szerepük van a biotenzideknek, melyek baktériumok vagy gombák által szintetizált felületaktív anyagok. Lipofil molekulák szubsztrátként történő hasznosításának alapfeltétele, hogy a mikroorganizmusok hidrofil felülete érintkezésbe kerülhessen a víztaszító molekulával. A fázishatárok áttörésére biotenzideket szintetizálnak, melyekkel a lipofil anyag mikrocseppjeit körülveszik, abból olyan biotenzid-micellát képeznek, amely már képes átjutni a sejthatároló felületen. A biotenzid alkalmazását a mikrobasejt gyakran kombinálja a hidrofób anyaghoz, pl. olajcseppekhez való adhézión kötődéssel is, melyet a sejthatároló képletek lipofil molekulái tesznek lehetővé. A mikroorganizmusok biotenzidjeik segítségével szénhidrogénekből emulziót tudnak képezni. A biotenzid felépítése a szintetikus tenzidekhez hasonlóan kettős; van egy hidrofób és egy hidrofil komponensük, melyek pl. egy olajcsepphez kapcsolódva csökkentik a felületi feszültséget. A sejtmembránnal érintkező hidrofób szubsztráton ekkor a biodegradáció első lépését már el tudják végezni a – célszerűen a sejtmembránban elhelyezkedő – oxigenáz enzimek. Ismert biotenzid a *Pseudomonas* baktériumok ramnolipidje vagy a *Torulopsis* gombák szoforózlipidje..

Bioventilláció

A szennyezett talajban leggyakrabban az oxigénhiány akadályozza a mikroorganizmusok szaporodását és légzését. A talaj ventillátoros átszellőztetésének a talaj hézagterefogatában akkora oxigénkoncentrációt kell biztosítani, mely a biofilmbe – a mikroorganizmusok élőhelyébe – diffúzióval történő oxigénbejutás hajtóerejeként működőképes.

Egyes eljárások során atmoszférikus levegő befúvatásával biztosítják a talajban jelenlévő mikrobák folyamatos oxigénellátását. A technológia kapacitása függ a levegőbevezető nyílások számától, a levegőpumpától és a talaj tulajdonságaitól, elsősorban a porozitásától. A talajban történő levegőáramlás jellegzetességeit figyelembe véve, a légbefúvásnál előnyösebb megoldás a levegő kiszívása. Az enyhe szívás kevésbé teszi tönkre a talaj másodlagos szerkezetét, mely a hézagterefogatot stabilizálja. A nyomással történő légbefúvás könnyebben okoz repedéseket a talajban, ami a levegő megszökését eredményezheti.

A BME-n kidolgozott *in situ* eljárás szerint a használt talajlevegőt csőrendszeren keresztül ventillátorral szívják ki, a friss, atmoszférikus levegőt pedig célszerűen elhelyezett cső- vagy árokrendszeren keresztül juttatják a talaj belsejébe, mélyebb rétegeibe. Ugyanezt a csőrendszert tápanyagok, adalékanyagok és mikroorganizmusok talajba juttatására is használják.

A bioventilláció *ex situ* kezelt talaj prizmaiban, kiterített talajrétegben vagy reaktorokban is alkalmazható, megfelelően elhelyezett levegőztetőrendszer segítségével, szívott vagy befúvatott levegő segítségével. A szívás a talaj szerkezetéhez adekvátabb megoldásnak bizonyult, mint a légbefúvás. Ennek áramlástechnikai okai vannak, nevezetesen az, hogy a levegő áramlása konvekcióval csak a nagyméretű talajhézagokban folyik, a mikropórusokba és mikrokapillárisokba, ahol felhasználásra kerül, diffúzióval jut, tehát azon az áramlás sebessége nem változtat, csak a koncentrációkülönbség számít, mint a diffúzió hajtóereje. A szívóhatás a mikropórusokból kifelé történő diffúziót segíti elő, melynek okvetlenül meg kell előznie a bediffundálást.

Ex situ talajkezelés agrotechnikai módszerekkel

A szennyezett talajt 0,5–0,8 m rétegvastagságban vízzáró (agyag, beton, geofólia) rétegre hordják, majd mezőgazdasági gépekkel, markolókkal, lapátos rakodókkal forgatják vagy szántják, hogy levegőzzön.

A szerves szennyezőanyagok eltávolítása a talajból mikrobiológiai bontással valósul meg. A degradáció sebességét döntően a talaj szennyezőanyag-bontó aktivitása szabja meg. Ez a jelenlévő mikroorganizmusok számától, a tápanyag- és levegőellátottságtól, a talaj emulgeáló képességétől és a szennyezőanyag fázisok közötti eloszlásától függ. Optimális körülmények biztosítását a mezőgazdasági gépekkel oldják meg, a talajt lazítják, felületét boronálják, nedvesítik, adalékanyagokkal látják el.

A kezelőterületet a megfelelő vízzárást biztosító izoláción kívül drénrendszerrel és csurgalékvíz elvezető rendszerrel kell felszerelni. Ez lehet egy egyszerű övárok, vagy szivárogtató gyűjtőrendszer, a kezelt talaj sátorral történő lefedése is jó megoldás lehet.

Háromfázisú talaj prizmás kezelése

A szerves anyagokkal szennyezett talajt kiemelik, s csurgalékvezető rendszerrel ellátott vízzáró szilárd felületre hordják. A technológia komposztprizmákhoz hasonló, 1,5–2,0 méter magas, "végtelenített" vagy véges hosszúságú prizmákat alkalmazhat. A mikrobiológiai bontás hatékonyságának növelése érdekében a nedvességtartalmat, pH-t, hőmérsékletet, oxigén- és tápanyagellátást kontrollálják. A talaj lazítására lazító anyagokat (faforgács) juttatnak a kezelendő talajtréfogathoz. Ezek lehetnek mikrobiológiailag bonthatóak vagy bonthatatlanok.

A prizmák, a komposztáláshoz hasonlóan, lehetnek kevert vagy statikus prizmák. A kevert prizmák általában kisebb magasságúak, ezek levegőztetését és a hőmérséklet stabilizálását áthalmozással (lapátolás, forgatás markológépekkel, stb.) oldják meg. A forgatás gyakorisága a biológiai folyamatok intenzitásától, a mikroflóra levegőigényétől függ. A statikus prizmákba perforált csőrendszereket helyeznek a levegőztetés, az oldott tápanyag bejuttatás és a csurgalékvíz-elvezetés megoldására. Ez lehet egyetlen csőrendszer, de lehet kettő vagy három egymástól független csőrendszer.

A módszer előnye, hogy kisebb helyet igényel, mint az agrotechnikai eljárás. A végtermék, ha környezettoxikológiai szempontból megfelel, akkor talajjavítóként hasznosítható a mezőgazdaságban.

Hasonló prizmás elrendezés biológiai kioldásra (pl. bioleaching) és fizikai-kémiai mobilizáción alapuló talajkezelésre (pl. vizes mosás) vagy stabilizációra is alkalmazható. Ilyenkor fokozott figyelmet kell szentelni a csurgalékvíz gyűjtésére és kezelésére.

Háromfázisú talaj biológiai kezelése reaktorokban

A kiemelt szennyezett talajt izolált felület helyett tartályokba vagy reaktorokba is tölthetik. Ilyen célra használaton kívüli mezőgazdasági (pl. silókat) vagy szennyvíztisztító berendezéseket, (pl. ülepítőket) szoktak használni. A prizmás kezeléshez hasonlóan vagy forgatják, és a forgatással együtt végzik az adalékanyagok bejuttatását vagy csőrendszerrel látják el a reaktorokba halmozott talajt és azon keresztül szívják el a használt levegőt és juttatják be a friss levegőt és az oldott tápanyagokat. Drénrendszer vagy más szivárogtató réteg telepítése szükséges a tartály aljára, hogy az ott felgyülemlt fölös nedvesség (víz) ne pangjon, elvezethető legyen.

A talajjal töltött tartályokat oszlopreaktorként is működtethetjük, folyamatosan átszivárogtatott oldott anyagokkal, esetleg mosóvizekkel kezelve a talajtérfogatot. A szivárogtató és gyűjtőrendszer jó kiépítése és eldugulásának megakadályozása ilyenkor alapvető fontosságú. Ezt megfelelően megválasztott rétegsor biztosíthatja a talaj alatt, pl. homok, kavics, durva kavics.

Reaktorokban történő biológiai kezelés nem csak aerob biodegradáción alapuló technológia lehet, de lehet anaerob biológiai degradáción vagy biológiai kioldáson alapuló is (bioleaching). Hasonló reaktorokban nem biológiai, tehát fizikai-kémiai talajkezelés is folyhat: mind mobilizáción, mind immobilizáción alapuló.

Iszapfázisú talaj vagy üledék biológiai kezelése reaktorokban

Ennek a technológiának az alkalmazása során az üledéket, az iszapot, vagy a vízzel felszuszpendált szennyezett talajt keverőberendezéssel és aerob kezelés esetén levegőztetéssel ellátott reaktorokba viszik. A biológiai kezelés lehet aerob vagy anaerob, a szennyezőanyag bonthatósága szerint.

Az iszapreaktorban gyakorlatilag vizes fázisban zajlanak a folyamatok, a talaj másodlagos szerkezete szétesik, nem játszik már szerepet, a mikroorganizmusok sem a talaj mikropillárisaiban dolgoznak, hanem a vizes szuszpenzióban. Nagymértékben homogén rendszerről van szó.

A levegőt az aerob folyamatokhoz vagy a vízben oldott oxigén vagy oxigént szállító vízzel oldható anyagok (hidrogénperoxid, Mg-peroxid) biztosítják. A reaktor anoxikus körülmények között is működőképes, ilyenkor nitrát, Fe III, vagy szulfát biztosítja az alternatív légzéshez az elektronaceptort.

A talajszuszpenzió sűrűsége tág határok között változtatható a szennyezőanyag és a mikrobiológiai aktivitás függvényében. Lassú keveréssel biztosítják a homogenitást és akadályozzák meg az ülepedést.

Egyszerűen megoldható a tápanyagellátás, tápanyagpótlás, adalékanyagok bejuttatása vagy a mikroorganizmusokkal való beoltás.

A biológiai bontás után a fázisokat szétválasztják, a kezelt talajt víztelenítik, a vizes fázist, ha szükséges tovább kezelik.

Az iszapreaktor ideális berendezés a kombinált technológiák, pl. fizikai-kémiai előkezelés utáni biológiai bontás vagy biológiai bontást követő kémiai kezelés, vagy a biodegradációval egybekötött vizes mosás, stb. alkalmazására.

Fitoremediáció

A fitoremediáció olyan környezetvédelmi biotechnológia, mely növények felhasználásával csökkenti elfogadható mértékűre a vegyi anyagokkal szennyezett terület, környezeti elem vagy fázis környezeti kockázatát. A fitoremediáció a szennyezőanyag és az elérendő cél függvényében lehet:

1. Fitostabilizáció: szennyezőanyagot, pl. toxikus fémeket tűrő növényekből álló takaróréteg fizikai jelenlétével megakadályozza szennyezett talaj levegőbe jutását (csökkenti a deflációt, porzást), felszíni, vagy felszín alatti vízbe jutását (csökkenti az eróziót és a kioldást).
2. Fitodegradáció során a növény maga vagy gyökerének mikroflórája teljesen elbontja, mineralizálja, mobilizálja (illékonyá teszi, pl. higany) vagy csökkent kockázatú anyaggá

alakítja a biodegradálható vegyi anyagokat. Szennyezett talaj vagy szennyezett víz (élőgép) kezelésére alkalmazható.

3. Fitoextrakciót elsősorban toxikus fémekkel szennyezett talajnál alkalmaznak hiperakkumuláló növényfajok felhasználásával. A szennyezett területeken adaptáció során k szelektálódott vagy géntechnikákkal előállított, nagy biokoncentrációs faktorról (BCF) rendelkező növényt szemben további követelmények: nagy hozammal rendelkezzen, föld feletti részében akkumulálja a szennyezőanyagot, könnyen kezelhető, betakarítható legyen. A betakarított növényi anyag ellenőrzött feldolgozására van szükség, pl. égetése és hamujának veszélyes hulladékként kezelése. Egyetlen fémot szelektíven akkumuláló növényből a fém visszanyerése gazdaságossá tehető. A fitoremediáció több évtizedig tartó folyamat is lehet, a szennyezőanyag koncentrációjától függően. Érclelőhelyek közeléből olyan cink, kadmium, kobalt, króm, mangán, nikkel, réz és ólom akkumuláló növényeket (keresztesvirágúak, kutyatejfélék, akácfélék, kender, torma, stb.) izoláltak, melyek a talajban lévő szennyezőanyag-koncentrációt több százszorosára képesek koncentrálni.
4. A rizofiltráció során a növényi gyökér és a gyökéren kötött mikroorganizmusok együttműködésben kötik meg, szűrik ki, csapják ki és bontják el, elsősorban a szennyezett víz oldott szennyezőanyagait (pl. élőgépes szennyvíztisztítás).

A technológia a fitoextrakció és a rizofiltráció esetében tulajdonképpen két részből áll:

1. A növény kiválasztása, telepítése, működésének biztosítása
2. A feladatát elvégzett növény feldolgozása, ártalmatlanítása.

A fitoremediációs technológiák elterjedésének akadálya ez utóbbi, vagyis a szennyezett növényi anyag kezelésének megoldatlansága. A szennyezett növényi anyagot égetéssel lehet megsemmisíteni: a hamut annak szennyezőanyag-tartalmától függően kell elhelyezni, veszélyes hulladéklerakóba vagy esetleg újrahasznosítani.

Biológiai kioldás (bioleaching)

A biológiai kioldáson alapuló technológia alatt általában fémek kioldódását értjük mikroorganizmusok segítségével. A mikrobák energiaigénye csekély, hatékonyak, kevés környezetvédelmi problémát okoznak. Az üzemeltetési költség alacsony, bár nehézségekkel jár a megfelelő lépések üzemeltetése.

A *Thiobacillus* baktériumok a szulfidásványok oxidálásával (szulfid => szulfát) segítik elő a fémek mobilizálását a termelt kénsav kioldó hatásán keresztül.

A *Thiobacillusok* tevékenységén alapuló kioldást nemcsak szennyezett talaj vagy kőzetek kezelésére, de ércekből való fémkioldásra, tehát bányászati technológiaként is alkalmazzák. A Föld réztermelésének mintegy 60%-a ilyen biotechnológián alapul.

4.1.3. Mobilizációs biotechnológiák alapját képező biológiai folyamatok fémekkel szennyezett talajok esetén

Érdekes lehet a mobilizációs biotechnológiák alapját képező biológiai folyamatokat olyan szempontból is megnézni, hogy azt mikroorganizmusok vagy növények végzik-e, és hogy a természetes folyamattól miben tér el a biotechnológiában alkalmazott, megregulázott folyamat.

1. A biológiai kioldás során a *Thiobacillus* baktériumok a fém-szulfidok szulfáttá történő oxidációját katalizálják. Eközben kénsav szabadul fel, mely elősegíti a fémek ionos formába kerülését, s így mobilizációját is. A folyamat spontán lezajlásakor a szennyezett terület

fokozatosan megtisztul, míg környezete elszennyeződik. Technológiaként alkalmazva a természetes környezettől izoláltan (izolált prizmákban, töltött oszlopokban, egyéb aerob talajreaktorokban történő savtermelés, kioldás és a csurgalék kontrollált összegyűjtése és kezelése) a szennyezett talaj megtisztítását káros környezeti következmények nélkül végezhetjük el.

2. A növények által termelt gyökérsavak a pH csökkentésével mobilizálják a fémeket: ez a folyamat a fitoextrakció. A mikorrhiza mikrobák által termelt anyagok még inkább mobilizálják a talajban kötött fémeket, ezért a növényi felvétel tovább növekszik. Ha a természetben spontán lezajló folyamatként értékeljük ezt a folyamatot, akkor nem örülhetünk a talaj fémtartalmának csökkenése miatt, sokkal inkább meg kell rettennünk a bioakkumulációt végző növények táplálékláncaba kerülésétől. A természetes környezettől izoláltan, kontrolláltan végzett fitoextrakción alapuló technológia viszont a kontrolláltan és izoláltan kezelt növényi felhalmozással, tehát a környezetre veszélyt alig jelentő tevékenységgel párhuzamosan csökkenti a talaj fémtartalmát.

3. Mikrobák alkilező tevékenysége során egyes fémek illékonyvá válnak.