

4.2. A szennyezőanyag immobilizálásán alapuló talajremediációs technológiák

Gruiz Katalin

Az immobilizáció azért lehet megoldás, mert csökkenti a ható (oldható, mozgékony, biológiailag felvehető) szennyezőanyag mennyiségét.

Az immobilizáció általában a mozgás, mozgékonyság megszüntetését jelenti a biotechnológiákban: enzimek, reagensek, vegyi anyagok, szennyezőanyagok szilárd felülethez, pl. hordozóhoz kötését, szilárd mátrixba ágyazását vagy olyan fizikai és/vagy kémiai átalakítását, mely az illékonyságot, oldhatóságot, deszorpciós képességet csökkenti, ezzel megakadályozza a környezetben való terjedést és a fizikai-kémiai és biológiai hozzáférhetőséget.

Immobilizáción alapuló környezetvédelmi technológiák bármely szennyezett környezeti elem és fázis esetében alkalmazhatóak. Levegő, és vízszennyezettség esetében a szennyezőanyag immobilizáció a, pl. szilárd fázison való megkötése szűrővel vagy kicsapása hűtéssel, egyúttal a levegőből, ill. a vízből való eltávolítást eredményezi. Szennyezett talajra mind *in situ*, mind *ex situ* remediációs technológiaként alkalmazható.

Talajnál az immobilizáció nem mindig jár a szennyezőanyag eltávolításával, de a környezeti kockázat lényegesen csökkenthető: a továbbterjedés valószínűsége csökken és a biológiai hozzáférhetetlenség eredményeképpen a hatás kifejtése lehetetlenné válik.

Immobilizáción alapuló talajkezelési technológia célja annak elérése, hogy az immobilizáció nagy valószínűséggel irreverzibilis legyen. Leggyakrabban toxikus fémekkel és perzisztens szerves anyagokkal szennyezett talaj kezelésére alkalmazzák.

Technológiai megoldások:

1. Fizikai-kémiai stabilizálás: szilárdítással, beágyazással, pl. beton, gipsz, bentonit, bitumen, polimerek felhasználásával;
2. Kémiai stabilizálás: oldhatatlan kémiai forma létrehozása a pH beállításával, pl. meszezés, CaCO_3 talajra alkalmazása; oxidációval, pl. ózon, hidrogénperoxid hatására szerves szennyezőanyagok kondenzációja, polimerizációja, oldhatóságuk csökkentése; redukzív körülmények biztosításával, pl. fémből oldhatatlan szulfid létrehozása;
3. Termikus immobilizáció: kerámiába, téglába ágyazás vitrifikációval;
4. Biológiai stabilizálás: növényzet fizikai hatása erózió és defláció ellen, növények kémiai hatása, pl. gyökerek által kiválasztott stabilizáló vegyületek; növények biológiai folyamatai során a sejtekben történő immobilizáció, pl. bioakkumuláció; mikrobiológiai tevékenység, pl. szulfátredukció.

Környezeti elemek szilárd fázisában fizikailag, kémiailag vagy biológiailag immobilizált szennyezőanyagok újramobilizálódása monitorozást (kioldási teszt) és megelőzést igényel. A remobilizálódás elfogadhatatlanul nagy kockázatát a *kémiai időzített bomba* kifejezéssel szokták jellemezni.

4.2.1. Stabilizálás

A szennyezett talajhoz különböző adalékanyagokat adva lecsökkenthető a szennyezőanyagok mozgékonysága, hozzáférhetősége. A stabilizálás történhet fizikai, kémiai

vagy biológiai módszerekkel, főleg a szilárd fázisok (talaj, üledék, szilárd hulladék) esetében alkalmazható.

A stabilizálás történhet *in situ* vagy *ex situ* megoldással és a stabilizált mátrix lehet koncentrált vagy diszperz. Ez alatt azt kell érteni, hogy a stabilizált termék lehet egy betontömb, egy kerámia-anyag, egy aszfaltút, stb., tehát tömör és koncentrált anyag, de lehet a stabilizált termék mikroszemcsés, talajba kevert vagy keveredő anyag is, ezt az eljárást diszperz stabilizálásnak nevezzük.

Fizikai-kémiai stabilizálás

Ebben a fejezetben csak a talajökoszisztémát nem károsító, meg nem szüntető ún. diszperz stabilizálást tárgyaljuk, a drasztikus fizikai-kémiai vagy hőhatásokkal járó szilárdítást vagy tömbösítést az ökoszisztémát károsító eljárások között szerepeltetjük.

In situ a talajba kevert porózus anyagok, mint például a természetes és mesterséges zeolitok, a bentonitok vagy a kalcit immobilizálják a szennyezőanyagokat, azáltal, hogy növelik adszorpciójukat. A zeolitok szilikát ásványok, melyek jelentős kationcserélő aktivitással rendelkeznek, így a különböző nehézfémeket szelektíven képesek alkáli- és alkáliföldfémekre cserélni.

A pernye, hamu, humuszanyagok és agyagásványok is jó hatásfokkal adszorbeálják a szennyezőanyagokat.

Ex situ megoldásként keverő reaktorban a szennyezett talajhoz puzzolán anyagokat (szilícium, alumínium és kalcium ásványok) keverhetünk. A szilikát mátrixhoz a szennyezőanyagok fizikailag és kémiaileg is kötődhetnek. Kezelés után a stabilizált anyag talajfeltöltésre is alkalmazható. Elsősorban petróleum és nehézfém szennyezéseknél alkalmazható.

Kémiai stabilizálás

A kémiai stabilizálás jellemző módon diszperz formában történik a talajban, mind *in situ*, mind *ex situ* megoldásai vannak. Az alapul szolgáló kémiai reakciók a szennyezőanyagtól függően szinte végtelenül sokfélék lehetnek, a lényeg az, hogy a talajban a szennyezőanyag és a segédanyag, reagens, adalék között lejátszódó kémiai reakció eredményeképpen csökkenjen vagy szűnjön meg a szennyezőanyag mozgékonyasága, vízoldhatósága, biológiai hozzáférhetősége, végeredményben tehát káros hatása (toxicitása, mutagenitása, teratogenitása, stb.).

Meszezés

Oldható foszfátok illetve mész adagolásával növelhető a talaj pH-ja, s ennek következtében csökken a szennyezőanyagok oldhatósága, mozgékonyasága, hozzáférhetősége is.

A gyakorlatban nehézfémekkel szennyezett talajra az alábbi eljárásokat alkalmazzuk leggyakrabban.

1. Pufferoldatot és foszfátot adagolhatunk, ezzel érhetjük el a szennyezőanyagok stabilisabb, kevésbé veszélyes formájává történő átalakulását.
2. Meszezést is alkalmazhatunk, talajra, savas felszíni vagy felszín alatti vizekre. Arra kell ügyelni, hogy a szennyező fémek oldhatósága, illetve kicsapódása egymástól eltérő pH és redoxpotenciál értékeken történik. A fémösszetételtől függően kell egy

vagy többlépéses meszezést tervezni, vagy más immobilizáló eljárással kombinált megoldást.

3. Vizes mészpép helyett szilárd fázisú mészkőport is alkalmazhatunk, azt a lehető legegyszerűbb agrokémiai eljárásokkal lehet a talajba keverni.
4. További lehetőség a talaj vagy a felszíni vízi üledék redoxpotenciáljának mesterséges megváltoztatása, a szennyezőanyag kémiai formájának függvényében a kevésbé oldható kémiai forma irányába. Például, hosszútávon is hatékony megoldás a szennyezett lápok anaerobitálásának megtartása vagy vizek és talajok mélyebb rétegeiben a redoxpotenciál csökkentése. Ezen módszerek egy része már átvezet a mikrobiológiai stabilizáláshoz, hiszen a redoxpotenciál csökkentésében maguknak a talaj (üledék) mikroorganizmusoknak is fontos szerepük van.

A kémiai immobilizációs technológia egyaránt alkalmazható *ex situ* és *in situ* módon. *In situ* esetben általában agrokémiai eljárásokat alkalmazunk: keverésre, homogenizálásra szántás, mélyszántás és boronálás, oldott adalékanyagok bejuttatására, öntözés, stb.

Az *ex situ* technológia a szállítóeszköztől függően lehet szakaszos vagy folyamatos. Az on site (az eredeti helyszínhez közel) megoldásnál csak egy egyszerű keverő berendezés (pl. betonkeverő) szükséges a helyszínen történő vegyszer-talaj keverék előállításához. Ezután a talajt visszatöltik.

4.2.2. Biológiai immobilizáció

A biológiai immobilizáció alapvetően kétféle lehet:

1. Maguk a növények vagy a mikroorganizmus sejtek vagy szervezetek immobilizálják a szennyezőanyagot a sejtjeikben vagy szöveteikben. Ez a biológiai lekötés az organizmus élettartamára terjed ki, utána visszakerül az elemkörforgalomba. Ha szegregálni, és kiküszöbölni szeretnénk a szennyezőanyagot, akkor a biomasszát külön kell választanunk a környezeti elem kezelt fázisától.
2. A biológiai immobilizáció másik fajtája az eredményét tekintve tulajdonképpen nem különbözik az enyhe fizikai-kémiai immobilizációtól, de a stabilizációhoz szükséges vegyületeket és/vagy külső körülményeket nem fizikai-kémiai ágensek, hanem maguk a mikroorganizmusok vagy a növények állítják elő. Ezek az élőlények lehetnek őshonosak vagy a technológia kedvéért betelepítettek.

Mikrobiológiai és növényi immobilizáció és/vagy stabilizáció

Mikroorganizmusok és növények is képesek szerves és szervetlen szennyezőanyagok immobilizálására, stabilizálására. Az immobilizáció történhet az élőlény szervezetében vagy a magában a talajban.

1. Az immobilizáció egyik formája tulajdonképpen az, amikor az élőlények sejtjeikbe építik be a szennyezőanyagot (miután kivonták a talajból, üledékből). Ez a folyamat a természetben izolálatlanul nem hasznos, hiszen a szennyezőanyag az élőlény pusztulásával visszakerül a körforgalomba, de még káros is lehet, ha körforgása közben bekerül a táplálékláncba. Mesterségesen izolálva viszont hasznos technológia válhat belőle: ezen alapul a fitoextrakció és a rizofiltráció: ilyenkor a növényben immobilizált fémek egy kapcsolódó technológiában ártalmatlaníthatóak.
2. Spontán is lejátszódó, de akár tudatosan használható és irányítható folyamat a redoxpotenciál csökkentése a levegő elhasználása révén. Mesterséges adalékként talajba juttatott energiaforrás mindig aktiválja a helyi mikroflórát. Ha nem

gondoskodunk levegőztetésről, akkor először elfogy a talajlevegő oxigénje, majd az alternatív légzési formák beindultával elfognak az egyéb oxigénforrások (nitrát, szulfát), végül teljesen anaerob körülmények teremődnek. A negatív redoxpotenciál mellett eltolódnak a kémiai formák egyensúlyai, mely bizonyos szennyezőanyagoknál, pl. toxikus fémeknél kémiai immobilizációhoz, mozgékonyágcsökkenéshez, biológiai hozzáférhetetlenséghez vezet.

3. A növények extracelluláris anyagot termelve képesek bizonyos szennyezőanyagok rhizoszférában történő kicsapására.
4. Egyes mikroorganizmusok extracelluláris poliszaccharidokat termelve csapják ki a fémekeket a sejten kívüli térben. Vízkészítés, vagy *in situ* talajkezelés során hasznosíthatjuk ezt a folyamatot, ha a fémekeket megkötő növényzetet el tudjuk távolítani (gyökerestől) a környezeti elemből.
5. Más mikroorganizmusok a sejten belül kötik meg, majd a sejtfalba és a membránba építik be a szennyezőanyagokat, ezáltal védve saját magukat a szennyezőanyag toxikus hatásától. A környezetben a védekező organizmustól eltekintve haszontalan folyamat akkor használható technológiaként, ha a sejtek elkülöníthetőek a szennyezett környezeti elemtől, tehát elsősorban vizek kezelésére ajánlható.
6. Szennyezett vizek üledékének felületén egy idő után humuszréteg alakul ki a behullott szerves anyagoktól (humuszlepeny), mely kettős hatású. Egyrészt fizikailag izolálja az alatta lévő szennyezett réteget, másrészt az így létrejövő anaerob körülmények közt a redoxpotenciál megváltozásával a fémekek oldhatatlan szulfid formába (MeS) kerülnek. Utóbbi állapotot stabilizálhatják a szulfátlégzést alkalmazó baktériumok, melyek vagy honosak vagy oltóanyagként betelepíthetőek a szulfátveszélyt jelentő talajokba vagy üledékekbe, az izoláció alá.

A *Thiobacillus*ok tevékenységének megakadályozására szulfátredukáló baktériumok telepíthetőek a szennyezett területre, a talajba vagy az üledékbe. Ilyen mikroorganizmusok az obligát anaerob *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfuromonas autooxidans*, amelyek a szulfátot oldhatatlan szulfiddá alakítják. A baktériumok működéséhez anaerob körülményekre van szükség, tehát ez vagy felszíni vizek mélyebb rétegeiben, mocsaras területeken vagy légmentesen lezárt talajokban alkalmazható mikrobiológiai stabilizálási módszer.

Fitostabilizációs megoldások

Fitostabilizáció céljából a területet a szennyezőanyagot tűró növényfajokkal ültetik be, megakadályozva ezzel a szennyezőanyag szél vagy víz útján történő továbbterjedését.

Rhizofiltráció esetén a felszíni vizekből és/vagy a vízzel elárasztott talajból a gyökérszóna kiszűri, felveszi, elbontja vagy megkötöti a szennyezőanyagot.

A szennyezett üledéket talajra is hordhatják és fémekeket akkumuláló növényeket ültethetnek rá. A szerves és szervetlen szennyezőanyagok megkötése, átalakítása, eltávolítása ilyenkor tehát növények segítségével történik. A növények gyökérrendszere igen nagy területet hálóz be, nagy felületet biztosít a fémekek felvételéhez és a szerves anyagok lebontásához. A fémakkumuláló növényeket betakarítják, elégetik, a hamut pedig veszélyes hulladéklerakóban helyezik el, más módon ártalmatlanítják vagy hasznosítják. A hamuból a fémtartalom kioldható vagy stabilizálható.