

4.5. Ökoszisztémát károsító talajremediálási technológiák

Gruiz Katalin

Ebben a fejezetben a teljesség és az összehasonlítás kedvéért a talaj (üledék) ökoszisztémáját károsító fizikai-kémiai műveleteken alapuló talajremediálási módszereket is ismertetjük. A csoportosítás egyezik az enyhe beavatkozásnál használttal, külön tárgyaljuk a mobilizáción és az immobilizáción alapuló remediációs technológiákat.

4.5.1. A szennyezőanyag mobilitását növelő technológiák

A szennyezőanyag mobilitását egy sor fizikai-kémiai és termikus módszerrel tudjuk növelni, ezek közül azokat tárgyaljuk a következőkben, melyek a talaj ökoszisztémájában drasztikus változásokat, károsodást okoznak, ezért a kezelés eredményeképpen kapott anyag nem tekinthető talajnak.

Ez nem jelenti azt, hogy nem lesz értékes vagy értékesíthető a kezelés utáni termék, törekedni kell arra, hogy lehetőleg hasznosítható vagy kimondottan értékes terméket nyerjünk. Ez a követelmény gyakran a remediációs technológiának egy termékképzési technológiához kapcsolását jelenti.

Az is lehetséges, hogy a talajban okozott káros változás nem teljesen irreverzibilis, a talajkezelés után könnyen regenerálható, revitalizálható. Ilyen esetben a talajkezelési technológia részét képezheti a revitalizáció is.

Itt tárgyaljuk a szennyezett talaj előkezelését, aprítását, osztályozását, homogenizálását szolgáló technológiákat is.

Szennyezett talaj előkezelések

Ezek az előkezelési technológiák általában közvetlenül nem érintik a szennyezőanyagot, a talaj állapotát, állagát változtatják meg, vagy a talaj szemcseméret szerinti szétválogatását jelenthetik, a szennyezőanyag dúsítása céljából, hogy a drága technológiát minél kisebb talajmennyiségre kelljen alkalmazni.

Előkezelés frakcionálással

Mivel mind a szerves, mind pedig a szervesen szennyezőanyagok a $63\ \mu\text{m}$ -nél kisebb szemcseátmérőjű, kolloid méretű, szerves és szervesen részecskékből álló talajfrakcióban (agyag, humusz) dúsulnak fel, így előkezelésként célszerű szemcseméret szerinti frakcionálást alkalmazni. A jelentős térfogat csökkentéssel hatékonyságnövelést és költségcsökkentést érhetünk el. Az előzetes frakcionálás jó vízáteresztő homoktalajok és üledékek esetén alkalmazható a legjobb eredménnyel, az agyagtartalom növekedése rontja a hatásfokot. Természetesen szükséges az eljárásban felhasznált mosóvíz külön ágon történő kezelése.

A szemcseméret szerinti frakcionálás történhet vizes talaj- vagy üledékszuszpenzióból ülepítéssel, áramoltatásos ülepítéssel, hidrociklonos elválasztással vagy flotálással. A nedves frakcionálás mellett létezik a száraz talaj szitálással történő frakcionálása, de ebben az esetben a finom frakciók kinyerését célozva a szitálást meg kell előznie a talaj másodlagos szerkezetének szétroncsolása.

Előkezelés pneumatikus fellazítással

A szennyezett talaj rosszul áteresztő rétegeinek fellazításáról van szó, melyhez sűrített levegőt használnak. A sziklás vagy kötött talajba lyukakat fúrnak, a furatokat a légkör felé lezárják, majd nagynyomású levegőt juttatnak beléjük. Ily módon mesterségesen repedéseket, járatokat hoznak létre, szétroncsolják a talaj eredeti kötött szerkezetét. Ez a technológia csupán előkezelése a talajnak, hiszen a szennyezőanyag ezalatt átalakulás nélkül van jelen, de a főtechnológia hatékonyságát megnövelheti ez a repesztéses előkezelés köves-sziklás vagy nagyon összetapadt szerkezetű talajoknál. Fontos, hogy a szennyezett terület előzetesen feltárásra kerüljön. Hátránya a technológiának, hogy az ily módon bekövetkezett üregképzés egyes szennyezőanyagok nem kívánatos transzportját idézheti elő, tehát átmenetileg megnöveli a szennyezőanyag kockázatát.

Fizikai-kémia talajkezelési technológiák

Ebben a fejezetben az enyhe beavatkozások között nem említett eljárások kerülnek előtérbe, de ismétlődés is lehetséges, amennyiben egy-egy műveletnél a technológiai paraméterek folyamatosan változó skáláját alkalmazhatjuk, például a hőmérséklet 1-2 foktól több száz fokig is emelhető, vagy a pH a biológiailag előnyös tartományból fokozatosan átmehet a mikrobákat már gátló vagy pusztító tartományba. A technológiák ismertetése nem részletes és teljességre sem törekszünk, inkább csak a legfontosabbakat említjük.

Talajmosás

A talaj vizes mosása önmagában is károsíthatja a talajt, amennyiben ismételt mosásokkal a végletekig kilúgozhatja azt, végül terméketlen, holt talajt, podzolt hagyva hátra.

Savas mosás

A fémeket a talajszemcsék felületéről töményebb ásványi (sósav, kénsav), vagy szerves savakkal (ecetsav, citromsav) oldják le. A szerves savak kevésbé károsítják a talajt, mint az ásványiak. A savak is a kilúgzás mértékét növelik, amely egy bizonyos mértéket elérve a talaj elöregedéséhez, podzolosodásához vezethet.

A savas mosás időszükséglete és költségigénye jelentős és a talajban maradt oldószer okozta kockázattal is számolni kell. Kizárólag *ex situ* technológiaként alkalmazzák.

A gyakorlatban alkalmazott technológiánál a sűrű talajszuszpenzióhoz vizet és sósavat adagolnak lassan és folyamatosan. Vigyázni kell azonban, hogy a pH ne süllyedjen 2 alá, mert ez károsítja a talajmátrixot. Az extrakció során vízdoldható nehéz- és nem nehézfémek keletkeznek. Az extrakció befejeztével a talajt alaposan átmosják vízzel, mésszel semlegesítik és víztelenítik. A mosófolyadékot összegyűjtik és külön technológiai ágon kezelik, a megtisztított vizet pedig visszavezetik a rendszerbe. A technológia a szennyeződés 95-98 %-át képes eltávolítani ionos kötésű fémszennyezettség esetén. Az USA-ban nagykapacitású berendezések is léteznek, melyek: 30 t/h talaj kezelésére alkalmasak.

Saját tapasztalataink azt mutatják, hogy a molekula- és atomrácsba épült, kőzetekben (ércekben) kötött fémtartalom nem vagy csak hosszú idő elteltével (többszöri extrakció vagy extrém tartózkodási idők) vagy egyáltalán nem is extrahálhatóak ki a talajból. Az ólom mobilizálása a legnehezebb, de a króm, a nikkel és a réz sem mosható ki könnyen a szennyezett talajból.

Szerves oldószeres extrakció

Szerves oldószerben oldható szerves szennyezőanyagok esetében szerves oldószer alkalmazásával lehet kioldani a szennyezőanyagot a talajt. Mivel az oldószer egy része a talajban marad, így fontos szempont az oldószer toxicitása, illetve eltávolíthatósága: gázelszívással, termikus deszorpcióval, biodegradációval.

Dehalogénezés

Az eljárást halogénezett szerves szennyezőanyagok esetén alkalmazzák. Az *ex situ* technológia alkalmazása során a szennyezőanyagok halogén atomjainak szubsztitúciója, vagy a vegyület szétbomlása és részleges kipárolgása következik be.

Halogénezett aromás vegyületek esetében alkáli-polietilén-glikolátot alkalmaznak dehalogénezőszerként. A kémiai reakció során a polietilén-glikol épül a halogén atom helyére. Leggyakrabban kálium-polietilén-glikolátot, KPEG-t adnak fűtött reaktorban a szennyezett talajhoz. A szennyeződés toxicitása lecsökken, alkáli fémsó és glikol-éter keletkezik.

Egy harmadik eljárás szerint a szennyezett talajt szitálják, őrlik, majd összekeverik nátrium-bikarbonáttal, s 330°C-os forgó reaktorba helyezik, ahol megtörténik a bontás, a halogén vegyületek részben illóvá alakulnak, így a gázok kezelésére külön technológiát kell alkalmazni.

Elektrokinetikaik eljáráások

Az elektrokémiai eljárásoknál a talajba helyezett elektródák között egyenárammal potenciálkülönbséget hoznak létre, mely mobilizálja a töltéssel rendelkező részecskéket. A pozitív ionok (pl. a fémionok) a katód, a negatív ionok az anód felé vándorolnak. Az eljárás végén az elektródokon felhalmozódott szennyezőanyagot eltávolítják. Nem szabad fémes elektródákat használni, mert azok oldódhatnak az elektrolízis során, s ezáltal korróziós anyagok juthatnak a talajba. Semleges elektródákat (szén, platina, grafit) kell alkalmazni, hogy szennyezés ne történjen a talajban.

Az Egyesült Államokban elterjedt technológia, főleg fémek eltávolítására alkalmazzák. Olaszországban és az oroszoknál is népszerű technológia. Elsősorban a villamosenergia áráról függ a gazdaságossága. Szikes talajok javítására is szolgálhat.

A módszerrel rossz áteresztő képességű talajokat is (főleg agyag) lehet remediálni. Rosszabb hatásfokú, mint a talajmosás, de *in situ* alkalmazásban prioritást élvezhet. Mélyebb talajrétegek kezelése is könnyűszerrel megoldható az elektródák megfelelő szintre juttatásával.

Költséigénye jelentős, időszükséglete átlagos.

Termikus eljáráások

A termikus eljárások tulajdonképpen a fizikai-kémiai kezelések közé tartoznak, mégis érdemes őket külön csoportban tárgyalni a speciális előkészületek és alkalmazások, valamint a technológiai kockázatok hasonlósága miatt. Leggyakoribb eljárások a termikus deszorpció, az égetés, a pirolízis és a vitrifikáció.

Ezek közül az alacsony hőfokú termikus deszorpció az a technológia, amelyiknél a hőmérsékletemelés széles skálája megengedi, hogy a technológia akár az ökoszisztémát nem károsító eljárások között is felmerüljön, hiszen pl. az *in situ* 5-10 °C-al megemelt

talajhőmérséklet nagymértékben megnövelheti a deszorpciót és emellett a talaj biológiai aktivitásának is kedvez. Mindazonáltal a klasszikus alacsony hőfokú termikus deszorpció technológia egy *ex situ* technológia, amelynek hőmérséklete 100 és 300 °C között mozog. A magas hőmérsékletű 300 °C-tól akár 600 °C-on is folyhat a szennyezőanyag forrásponjtjától függően.

Alacsony hőfokú deszorpció

100-300 °C-on történik a víz és a szerves szennyezőanyagok elpárologtatása a szennyezett talajból. Tulajdonképpen a szennyezőanyag ledesztillálását jelenti a szilárd felületről. Ha nedves a talaj, akkor vízgőzdesztilláció folyik.

A termikus deszorberben nem történhet égés (túl alacsony a hőfok, emiatt veszélyes égéstermékek keletkezhetnek és robbanásveszély is fennáll), ezért inert gázáramra és indirekt fűtésre van szükség.

Az elszívott gőzöket a deszorberből a gőzkezelő rendszerbe a vivőgáz vagy a vákuumrendszer továbbítja. A gőzök kezelő rendszerében a szerves szennyezőanyagok leválasztására ciklonokat, aktív szenes vagy más töltetű adszorbereket, szűrőket, nedves elnyeletőket alkalmaznak, elégethetik vagy biológiailag bonthatják a deszorbeálódott szerves szennyezőanyagokat. Nagyobb mennyiség lepárlása esetén a szennyezőanyag újrahasznosítása is lehetséges.

A gyakorlatban két eljárás ismeretes: a forgó dobos kemence és a termikus szalagspirál.

A forgó dobos deszorber egy vízszintes vagy ferde helyzetű henger, melyet kívánatos közvetve fűteni. A csökemencét forgatják. A kezelőtér izolációja a külső tértől igényes megoldást követel.

A termikus szalagspirál egy zárt hengerben forog, miközben továbbítja a szállítandó anyagot. Hasonló izolációra és fűtőrendszerre van szükség, mint a forgódobosnál. A szalagspirál üreges szárában keringtetett forró olaj vagy gőz közvetve fűti a szállított anyagot, a szennyezett talajt.

Az eltávozó gőzök további kezelése a technológia lényeges pontja, minden esetben szükséges.

Az alacsony hőfokú deszorberből kikerült talaj az alkalmazott hőmérséklettől függően kisebb-nagyobb mértékben károsodik. Tudnunk kell, hogy a talaj hőmérséklete mindig alacsonyabb, mint a kemence légterének hőmérséklete. Emiatt még a 350 °C-on kezelt talaj is tartalmaz élő sejteket, és a talaj élettelen része nem bomlik, nem károsodik, könnyen revitalizálható, pl. kevés (kb. 10%) jó minőségű talaj hozzákeverésével.

A termikus deszorberből kikerülő, szennyezőanyagot már nem tartalmazó talaj steril talajként is hasznosítható, steril talajt igénylő mezőgazdasági technológiákban vagy biotechnológiákban (steril növények tenyésztése, kontrollált talajoltóanyaggal oltott talaj rhizoszféra kialakításához, stb.)

Magas hőfokú deszorpció

300-540 °C-on történik, indirekt fűtéssel. Inert gázáramot vagy vákuumot alkalmaznak, hogy a szennyezőanyag ne gyulladjon be. A többi jellemzője megegyezik az alacsony hőfokú deszorpciónál tárgyaltakkal.

Égetés

870-1200 °C-on történik a szerves komponensek elpárologtatása és égetése oxigén jelenlétében. A talajégetés során a kitermelt szennyezett talajból a 40-50 mm-nél nagyobb átmérőjű részeket szitálással eltávolítják, majd a talajt aprítják. A megfelelő égetés gyakran csak kiegészítő fűtőanyaggal biztosítható. Az eltávolítás határfoka megfelelően működtetett égetőben meghaladhatja a 99,99%-ot. A távozó gázok és a salak kezelése általában szükséges. Veszélyes szennyezőanyagok esetében különleges óvintézkedésekre, többlépcsős füstgázkezelésre is szükség lehet.

Gyakran kapcsolják más magas hőmérsékletű égetési technológiákhoz, például kerámiakészítés, tégláégetés, cementgyártás. Ezen technológiák égetőkemencéit és szűrőberendezéseit nem mindig lehet a szennyezett talajhoz módosítások nélkül alkalmazni. Megfelelően előkészített, frakcionált, például csak agyagot és humuszt tartalmazó, szerves anyaggal szennyezett talajfrakciók felhasználhatóak téglá vagy kerámiagyártásra, mint alapanyag is.

A talajégetéssel gyakorlatilag valamennyi talajtípusból valamennyi szerves szennyezőanyag eltávolítható, de a keletkezett elégetett talaj korlátozottan használható, talajnak már nem tekinthető anyag, melynek revitalizálására sem mindig van mód, hiszen annak minden értékes része elégett, elbomlott, tönkrement.

Pirolízis

Pirolíziskor a szerves szennyezőanyagok lebontása magas hőfokon oxigén jelenléte nélkül történik meg. A szerves anyagok különböző gázokra és szilárd anyagokra bomlanak. A gyakorlatban a teljesen oxigénmentes környezet biztosítása nem lehetséges. Ez a kevés oxigén bizonyos mértékű oxidációt is eredményez. A pirolízis során keletkező gázok éghetőek. A pirolízis általában nyomás alatt, 430 C° feletti hőmérsékleten történik. A keletkező gázok további kezelést igényelnek. A hagyományos termikus talajkezelési módszer berendezései, mint pl. forgó kemence használatosak a pirolízis során is.

4.5.2. A szennyezőanyag immobilizálásán alapuló technológiák

Ebben a részben azokat az immobilizálási eljárásokat tárgyaljuk, amelyek ártalmatlanítják a talajszennyező anyagokat, de a talajt is megszüntetik talajnak lenni.

Fizikai-kémiai eljárások

Stabilizáció

Az eljárás során a szennyezőanyagot nem vonják ki a talajból, hanem a hozzáférhetőségét csökkentik. Kémiai stabilizálás során a szennyezőanyagot kémiailag stabilisabb, kevésbé mobilis formává alakítják át, míg szilárdításkor fizikailag rögzítik egy szerkezetileg stabil anyaghoz. Stabilizátorként leggyakrabban cementet, meszet, hőre lágyuló anyagokat (aszfalt, bitumen), szerves monomereket (poliészter gyanták) használnak.

- Bitumen: a szennyezett talajt forró bitumenbe ágyazzák. *Ex situ*.
- Aszfalt emulzió: aszfaltcseppeket diszpergálnak vízben, majd az emulzióhoz keverik a szennyezett talajt. Az emulzió megszilárdulása után a szennyezőanyag az aszfalt mátrixba ágyazva lesz jelen. *Ex situ*.
- Polietilén: a szennyezett talajt PE-nel extrudálják.

- Vitrifikáció: a talaj szilikátjainak megolvasztása, üvegesítés
- A mikropórusos anyagok, mint például a vas-oxidok, a mangán- és vas-hidroxidok a szennyezőanyagokat szelektíven adszorbeálva csökkentik azok hozzáférhetőségét (például az As-t a vas-oxidok adszorbeálják legnagyobb mértékben).
- Oxidáció, redukció: kisebb oldhatóságú, kicsapódó forma létrehozása a cél.

A környezeti hatások befolyásolhatják a hosszú távú immobilitást, hosszú távon mobilizálódásra számíthatunk tehát ennek kockázatával számolni kell. Az immobilizálással ártalmatlanított talajú területek esetében hosszú távú monitoringrendszert kell tervezni és üzemeltetni. Jogi háttér, törvényi szabályozás, regisztráció és nyilvántartás szükséges az immobilizált szennyezett talajokról és más hulladékokról. Ennek feltételei még nem teremtődtek meg Magyarországon. Nagy szükség lenne pedig rájuk, hiszen a veszélyes hulladéklerakás és főleg az illegális hulladéklerakás reális alternatívájaként komoly környezeti kockázat csökkentő hatásuk lehetne.

Kémiai oxidáció vagy redukció

Az eljárás során olyan polimerizációs vagy kondenzációs reakciókat alkalmaznak, melyek során az adott szennyezőanyag mobilitása csökken, s így toxicitása is. A leggyakoribb oxidálószer az ózon, a peroxid, a klór, a klór-dioxid. A talajszennyező-anyag típusa határozza meg a kémiai reakciót. Ezt az *ex situ* technológiát gyakran alkalmazzák ivóvíz és szennyvíztisztításban, illetve cianiddal szennyezett hulladékok kezelésére. Fontos, hogy a reakció teljes legyen, mert ha csupán részleges, akkor átmeneti vegyületek képződnek, s ezek szintén toxikus hatásúak lehetnek a talaj mikroflórájára. Ugyanakkor nagyfokú szennyezés esetén gazdaságilag nem éri meg ez a technológia, hiszen nagy mennyiségű oxidálószerre van szükség.

Vitrifikáció

A szennyezett talajt talajmosás és frakcionálás után magas hőmérsékleten megolvasztják, hogy a szilikátokból amorf vagy kristályos szerkezetű, üvegszerű anyag keletkezzen. A benne levő szennyezőanyag oldhatósága igen kicsi lesz. Az eljárás során 1200 °C-os vagy annál magasabb hőmérsékletet alkalmaznak, melyet fosszilis tüzelőanyagok elégetésével vagy elektromos úton állítanak elő. A villamos kemencénél kisebb a káros anyag emisszió. Az eljárás akkor eredményes, ha a szerves szennyezőanyagok a magas hőfokon deszorbeálódnak és/vagy elégnak vagy pirolizálódnak, a toxikus fémek pedig teljesen immobilisakká válva beépülnek az üvegszerű szerkezetbe. Ily módon a nehézfémek és radioaktív anyagok toxikus hatása és mobilitása megszűnik, az oldadékok fémtartalmától függően fel lehet használni (útalap, kerámiatermékek, cserepek, stb.) vagy veszélyes hulladéklerakóban lehet elhelyezni, a maradék fémtartalomtól függően. A fémtartalom savas kezeléssel eltávolítható az értékesebb termékekből.

Fontos kritérium, hogy a talajüvegesítési eljárás során ne szabaduljanak fel mérgező gázok a szennyezett talajokból illetve, ha ilyenek keletkeznek, akkor kezelésükről gondoskodni kell. Mind *ex situ*, mind *in situ* technológiaként alkalmazható, talaj és üledékek mélyebb rétegeiben, hozzáférhetetlen helyeken is.

Ha a talaj kitermelése nem megoldható, akkor a vitrifikációs technológia a helyszínen is alkalmazható.

Grafit elektródákat helyeznek a talajba néhány cm mélyen és örölt üvegeképző keveréket (ún. fritet) kevernek hozzá, majd elektromos áram segítségével megolvasztják a talaj

szilikátjait. Ily módon a szennyezett talaj akár 6-30 m mélységig is megszilárdítható. A fenti folyamat lejátszódását a talajvíz magas szintje, illetve a magas olvadáspontú talajalkotók (kőzetek) jelenléte gátolja. Mivel a szennyezett talaj térfogata az eredeti térfogat 70%-ára csökken a talaj felszíne tiszta talajjal feltölthető.

A legnagyobb kapacitású *in situ* vitrifikáló berendezések egy-egy kezelésre 10-50 m³ talaj kezelésére képesek. Villamos energia igénye igen nagy, költsége a villamos energia árától függ. Az USA-ban igen népszerű technológia. Hollandiában és Németországban elsősorban kerámiatermékek, tetőfedő cserép és kültéri burkolólapok valamint gyöngykavics-szerű kerámiaanyag készítésére használják ennek a technológiának az *ex situ* változatát. A szennyezett talajt és üledéket, majdnem mindig frakcionálásos előkezelés után használják, tehát annak agyagtartalmát hasznosítják. A szerves szennyezőanyagok a vitrifikálás közben elégnak, a agyagásvány szilikátjai megolvadnak és üvegesednek, az égésterméként keletkező füstgázokat kezelik.