

A természetes szennyezőanyag-csökkenési folyamatok felhasználására és intenzifikálására alkalmas technológiák áttekintése

Ebben a fejezetben a szennyezett területeken lejátszódó kockázatot csökkentő természetes folyamatok intenzifikálását célzó mérnöki tevékenység alapelveit igyekszünk tisztázni. Azt reméljük, hogy azok lefektetése után világosan kirajzolódnak a tevékenység lépései, a döntési pontokon felvetődő kérdések, a technológiai megoldások közül történő választást indokoló költség, kockázat és hatékonyság-jellemzők, a szennyezett terület felmérése, a technológia-monitoring és az utómonitoring során alkalmazandó stratégia, tehát a megoldások a szennyezett területek menedzsmentjével kapcsolatos összes tevékenység, választás és döntés során.

1. Bevezetés

A kockázatmenedzsment a kockázat felméréseiből és a kockázat csökkentéséből tevődik össze. Összefüggéseit a környezetpolitikával az 1. ábrán láthatjuk.



1. ábra: A környezetpolitika és a környezetmenedzsment feladatai öröklött szennyezett területek esetében

A szennyezett területek kockázatának felméréséhez szükség van a szennyezőforrás és a terület integrált kockázati modelljére, területspecifikus kvantitatív kockázatfelmérési módszerre és integrált felmérési illetve monitoring módszerre.

A kockázat csökkentésének tervezéséhez ismernünk kell a kockázatcsökkentési lehetőségeinket:

- intézkedés,
- megelőzés,
- remediáció.

Ezek közül költség-haszon felmérés alapján kell kiválasztani a legmegfelelőbbet vagy a legmegfelelőbb kombinációt.

Amennyiben a kockázat csökkentését a szennyezett környezeti elemek remediációjával óhajtjuk megoldani, egy döntési sorozaton végighaladva választhatjuk a lehető legjobb technológiát.

Jelen munkában a döntési sorozatot régi, öröklött szennyezett területre dolgozzuk ki, megengedve / feltételezve a természetes szennyezőanyag-csökkenés meglétét a területen.

1.1. A kockázatcsökkentést megelőző feladatok

2. A terület felmérése vagy monitoringja
3. A mérési adatok megfelelő interpretációja, a kockázat felmérése,
4. A kockázatváltozás spontán trendjének megállapítása
5. A kockázatcsökkentési intézkedések (megelőzés, korlátozás, remediáció) költség-haszon felmérése
6. A megfelelő intézkedés vagy intézkedés-kombináció kiválasztása

1.2. Amennyiben remediáció mellett döntünk az alábbi kérdések és feladatok merülnek fel:

1. Mióta szennyezett a terület?
2. Mekkora a szennyezettség kiterjedése?
3. Milyen környezeti elemeket érint?
4. Mik a szennyezőanyagok?
5. A szennyezőanyagok fizikai, kémiai és biológiai jellemzői
6. A szennyezett környezeti elemek és fázisok azonosítása
7. A terület jelenlegi használata
8. A terület hidrogeológiai jellemzői
9. A terület érzékenysége
10. A terület ökoszisztémájának állapota
11. A terület talajának mikrobiológiai állapota
12. A terület jelenlegi kockázata

13. Milyen helyet foglal ez a kockázati érték a kockázati profilban?
14. A beavatkozás sürgőssége
15. A jövőbeni területhasználat megadása
16. A jövőbeni használathoz tartozó célérték
- 17. A választott célértéket teljesíteni képes remediációs módszerek áttekintése: a teljesség igényével készült felsorolás**
- 18. Az elvileg megfelelő remediációs technológiák összehasonlító vizsgálata elérhetőség, költség és haszon szempontjából: a reálisak megtartása**
- 19. A reális technológiai alternatívák összehasonlító értékelés, kipróbálása**
20. A kiválasztott technológia alkalmazása
21. Technológiamonitoring
22. Utómonitoring

Ezen kérdések közül a következőkben részletesen tárgyaljuk a 17., 18. és 19. pontokat régi, öröklött szennyezett területeket feltételezve, olyanokat, amelyek esetleg évtizedek óta szennyezettek, tehát rajtuk a természetes folyamatok azóta is lejátszódtak, csökkentve vagy növelve a terület környezeti kockázatát. A technológiaválasztásnál előtérbe kerülnek azok a technológiák, amelyek képesek célszerűen munkába állítani a talaj saját hasznos aktivitásait, felgyorsítani a kockázatot csökkentőket vagy kockázatcsökkentővé alakítani a spontán lezajlókat.

2. A talajremediálási módszerek bemutatása

A talajremediálási módszereket több szempontból csoportosíthatjuk. Most olyan csoportosítási szempontokat adunk meg, amelyek döntési pontként is megjelennek a technológiaválasztásunk során:

1. A remediáció alapulhat a szennyezőanyag immobilizálásán vagy mobilizálásán.
2. Remediálási módszerek környezeti elemek szerint: levegő, víz, talajvíz, talaj vagy üledékremediálási módszer lehetnek
3. A talajremediálási módszer a talaj fázisai szerint jelentheti a talajlevegő, talajnedvesség, a talajvíz, a talaj szilárd fázisa, a különálló szennyezőanyag fázis vagy több fázis együttes kezelését, pl. talajvíz és szilárd fázis, vagy háromfázisú (telítetlen) talaj kezelését.
4. A remediáció alapulhat a talajban spontán lejátszódó folyamaton.
5. A remediáció lehet *in situ* vagy *ex situ* módszer vagy ezek kombinációja.
6. A talajremediáció alkalmazhat fizikai-kémiai, termikus vagy biológiai módszert.
7. Szükséges technológiamonitoring tervezése
8. A remediálás során megengedhető területhasználat



NA: Natural Attenuation: természetes szennyezőanyag csökkenés

MNA: Monitored Natural Attenuation: monitorozott term. szennyezőanyag-csökkenés

ENA: Enhanced Natural Attenuation: gyorsított természetes szennyezőanyag-csökkenés

In situ R: In situ bioremediáció

Ex situ R: Ex situ bioremediáció

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

3. A szennyezőanyag sorsa a talajban

3.1. Szerves szennyezőanyagok sorsa a talajban

A szerves szennyezőanyagok nagy része a talajban a holt szerves anyagokhoz hasonlóan viselkedik, ezért kötődésükre, terjedésükre, sorsukra, hatásaikra az alábbiak jellemzőek:

1. Előfordulhatnak gáz- vagy gőzformában, vízben oldott vagy emulgeált formában és szilárd formában. A gáz és gőzformájú szennyezőanyag lehet a talajgázban, lehet a talajvízben oldva vagy a szilárd felülethez kötődve, szorpcióval. A folyékony halmazállapotú szennyezőanyagok is előfordulhatnak gőzformában vagy a talajnedvességben illetve a talajvízben oldva, folyadékfilm formájában, a szilárd fázishoz kötődve, vagy különálló fázisként, a talajvíz felületén. A szilárd fázisú szennyezőanyag szemcseméretétől és fizikai-kémiai tulajdonságaitól függően lehet a talajszemcsékhez keveredve vagy a talaj szilárd szemcséinek felületéhez kötve szorpcióval vagy a mátrixba kötődve különféle erőkkel, akár kovalens kötésekkel is, például a humuszba épülve. A talajszemcsék felületén tehát gázok, gőzök, folyadékok és szilárd szennyezőanyagok egyaránt megkötődhetnek.
2. A szerves szennyezőanyagok a talajban mineralizálódhatnak, belőlük energia termelődik, C, N és P tartalmuk pedig ismét felhasználhatóvá válik.
3. Kommetabolizmussal olyan xenobiotikumok bomlanak, amelyeket a talajmikroorganizmusok enzimrendszerei úgy bontanak el, hogy közben nem termelnek belőle energiát.
4. A perzisztens szennyezőanyagok nem bomlanak egyáltalán, vagy csak részlegesen bomlanak le.
5. Egyes szerves szennyezőanyagok vagy metabolitjaik beépülnek a biomasszába, a talajmikroorganizmusok sejtjeibe vagy a növények szöveteibe.
6. Beépülhetnek a táphumuszba, ahonnan bizonyos feltételek között könnyen mobilizálódhatnak.
7. Beépülhetnek a szerkezeti humuszba, ahonnan csak kis valószínűséggel mobilizálódhatnak.
8. Fossilizálódhatnak, ezzel véglegesen kikerülhetnek az anyagkörforgalomból.

9. Szerves szennyezőanyagok természetes koncentrációcsökkenése során az alábbi *kémiai folyamatok* ismeretesek:
- Hidrolízis során a szerves anyag reakcióba lép a vízzel és alkohol képződik.
 - Szubsztitúció során nukleofil ágenssel (anionnal) lép reakcióba a szerves anyag.
 - Elimináció során a szerves vegyület funkcionális csoportjai leszakadnak, majd kettős kötés alakul ki.
 - Oxidáció/redukció során elektron transzport valósul meg a reakcióban résztvevő komponensek között.
10. Biodegradálható szerves szennyezőanyagok természetes koncentrációcsökkenése során a mikrobiológiai folyamatok kerülnek előtérbe.
- A mikroorganizmusok degradáló képessége és hatékonysága függ a vegyi anyag szerkezetétől, összetételétől, illetve a hozzáférhetőségétől.
 - A jelenlévő mikrobaközösség minősége nagyban befolyásolja a degradáció hatékonyságát. Az adott szennyezőanyag biológiailag csak akkor támadható meg, ha az evolúció során már kialakult a bontására képes enzimapparátus. Egyes szennyezőanyagok bontásához gyakran nem szükségesek különleges enzimek, mások viszont speciális enzimrendszerek jelenlétét feltételezik. Gyakran a talajban kis arányban előforduló fajok feldúsulása elegendő a szennyezőanyag szubsztrátként való hasznosulásához, más esetekben specifikus gén, vagy génekombináció szükséges.
 - A szerves vegyületnek fizikailag, kémiailag diszpergálnak kell lennie vízben azért, hogy a mikrobák számára hozzáférhetőek legyenek. Ezt, a mikrobák által szintetizált detergens hatású vegyületek, az ún. biotenzidek biztosítják.
 - Számos környezeti tényező van hatással a bontás intenzitására, például a hőmérséklet, a tápanyagok a pH, és a redoxviszonyok.
 - Az oxigén mennyisége és forrása (levegő, NO₃, SO₄, stb.) meghatározza a légzésformákat. A telítetlen talajban a talajlevegő szolgáltatja a légzéshez szüksége oxigént, a vízzel telített talajban a nitrátlégzés vagy a szulfátlégzés dominál. A vas is szolgálhat elektronakceptorként.
 - A szerves szennyezőanyagok természetes koncentrációcsökkenése során szabad vagy oldott oxigénből 3-4 mg szükséges 1 mg telített szénhidrogén teljes oxidációjához, vagyis a teljes mennyiség CO₂-dá és vízzé alakításához. A szénhidrogének degradációja az oxidáción alapul, oxigén bevitele a molekulába az első lépés, melyet az oxigenáz enzimek végeznek aerob körülmények között. A mikroorganizmusok oxigénhez férhetőségét meghatározza a talaj típusa, a talajvízzel való telítettség, s az egyéb szubsztrátok jelenléte.
 - Szénhidrogének hatására, azok bontása közben a gyorsan aktivizálódó mikroorganizmusok viszonylag rövid idő alatt felélik a mozgósítható foszfor- és nitrogén tápelemkészletet, s ezzel összefüggésben a degradáció mértéke is csökken. E limitáció elkerülése érdekében ammónium-, foszfátsókat, karbamid-foszfátot, N-P-K műtrágyát adagolhatunk a szennyezett talajhoz.

- A hőmérsékletnek azon túl, hogy a mikrobiális bontás mértékét meghatározza, befolyással van a szennyező szénhidrogén fizikai állapotára, összetételére. Talajban folyó biodegradációhoz szükséges hőmérséklet optimuma 20-30 °C, de létezik lebontás igen szélsőséges körülmények között is. Alacsony hőmérséklet esetén megnő az olaj viszkozitása, vízdoldatósága, csökken az illékony frakciók párolgása. A hőmérséklet emelkedésével nemcsak a szennyezőanyag mobilitása növekszik meg, de a mikroorganizmusok aktivitása is nő.
- A talajok pH-ja széles határok között változhat, de a szerves szennyezőanyagok biodegradációja szempontjából a legkedvezőbb a semleges érték körüli pH.

3.2. A szerves szennyezőanyagok sorsa a talajban

A szerves szennyezőanyagok sorsa a növényi tápsók ionjainak sorsával analóg a talajban, ezért kötődésükre, mobilizálódásukra, biológiai felvételükre az alábbiak jellemzőek:

1. Előfordulhatnak atomrácsba, molekularácsba épülve, oxidok és hidroxidok alapján, ionos formában vagy komplexben.
2. Az atomrácsba (molekularácsba) épült fémforma általában korpuzkuláris szennyezőanyagokban vagy még el nem mállott kőzetekben (mint szennyezőanyagban) fordul elő, leggyakrabban a Si, a Fe vagy az Al, esetleg a Ca, Mg vagy a K helyettesítőiként. Innen a mállás során szabadulnak fel, kerülnek ionos formába, és mosódnak be (pl. mélyebb rétegekbe) vagy ki (pl. más környezeti elembe).
3. Az oxidokban és hidroxidokban a Fe és az Al helyettesítőiként fordulnak elő és kőzetek mállásakor, a talaj savanyodásakor mobilizálódnak.
4. Az ionos fémforma lehet a talajvízben vagy a talajnedvességben oldva, vagy a talajkolloidok (agyagásványok, humusz) felületére ionosan kötve, az ionerősségtől függő mértékben kicserélhető formában, innen veszik fel a növények és/vagy a talajlakó egyéb organizmusok.
5. A szerves fémkomplexek a talajban főleg a humuszanyagokhoz kötve fordulnak elő, mobilisak.
6. A fenti fémformák közül az ionos és komplex kötésben lévők mozgékonyak, vízdoldhatóak, kicserélhetőek, biológiailag felvehetőek. Az oxidok és hidroxidokban kötött fémek közepesen, a molekula és atomrácsban lévők nehezen hozzáférhetőek.
7. Az egyes fémformák egymásba átalakulhatnak, a külső körülményektől függ a fém megoszlása az egyes kémiai formák között. Az egyensúlyok illetve az egyensúlyok eltolódása is a környezeti paraméterektől függ. Az egyes fémformák közötti egyensúlyt elsősorban a pH, a redoxpotenciál, a nedvességtartalom, a talaj típusa, ásványi összetétele és szemcseméreteloszlása határozza meg. A fémek nagymértékben hatnak egymásra is, tehát az egyensúlyi koncentrációk függenek a többi fém jelenlététől.

8. Az egyes fémformák elsősorban a pH, a redoxpotenciál és a nedvességtartalom függvényében megoszlanak a talaj egyes fázisai között. A megoszlásokat előkészítő alapfolyamatok a kőzetek mállása és a fémek oldódási illetve kicsapódási folyamatai (pl. a CO₂-vel, illetve annak oldott formájával lejátszódó reakciók).
9. A szilárd formák kialakulásában fontos szerepe van az adszorpciónak és a kemisorpciónak, melyek agyagásványok, vas-, mangán-hidroxidok, szervesanyagok felületén következnek be. Ezen felületek nehézfém megkötő képessége különböző, és a következői sorrendben csökken: mangán-oxid > huminsav > vas-hidroxid > agyagásvány.
A nehézfémek megkötődését vizsgálva különböző agyagásványokban a pH függvényében azt tapasztalták, hogy a Cd²⁺ pl. szilárd állapotban való megjelenése pH = 8,0 alatti tartományban függ az agyagásvány minőségétől, míg pH = 9,0–11,0 tartományban agyagásványtól független.
10. Az akkumulációval együtt járó rezisztencia mechanizmusa lehet:
- a sejtfal komponenseihez való kötődés bioszorpcióval
 - extracelluláris komplexképzés (pl. a *Rhizobium sp.* extracelluláris poliszaccharidok segítségével tudja semlegesíteni a toxikus fémeket,
 - intracelluláris megkötés,
 - plazmidfüggő akkumuláció (pl. a *Ralstonia metallidurans* CH34 baktérium két féle plazmidot tartalmaz, melyek a nehézfém rezisztenciáért felelősek.
A pMOL30, 240 kb plazmid a Cd, Co, Zn, Hg, Tl, Cu, és Pb, míg a pMOL28, 165 kb plazmid a Co, Zn, Ni, Hg, Tl és Cr rezisztenciáért felelős.
 - periplazmás peptidoglikánhoz kötés.
11. A toxikus fém a táplálékláncba elsősorban a növényeken keresztül kerül. A talaj összes fémtartalmának csak egy kis része hozzáférhető a növények számára. Elsősorban a vízoldható és a könnyen kicserélhető forma az, amit a növények képesek felvenni. Így tehát, ha megnő a talajoldat fémtartalma, akkor fémtűrő és fémakkumuláló fajok terjednek el a szennyezett területen. Az adaptációs mechanizmus lehet:
- a rhizoszférában csapja ki, így sem a gyökérben, sem pedig a szárban nem mérhető nagy fém koncentráció (pl. *Epilobium sp.*)
 - a gyökérben raktározza, nem szállítja el a szárba (pl. *Elytrigia repens*, *Poa annula*, *Scirpus holoschenus*)
 - csak a szárban és a levelekben raktározza el (pl. *Inula viscosa*, *Euphorbia dendroides*, *Arundo donax*)
 - a vakuolumokban immobilizálja
 - a sejtfalban immobilizálja
 - mind a gyökérben, mind a szárban raktározza a fémeket az anyagcseréjéből kiiktatva (pl. *Cistus salviifolius*, *Helichrysum italicus*).
12. Tovább bonyolítja a helyzetét a talajban, hogy gyakorlatilag sosem egyensúlyi helyzet, részben mert egyes folyamatok egyensúlyának beállításához évekre sőt évtizedekre van szükség, részint mert állandóan változnak a klimatikus, az éghajlati és a szűkebb környezeti paraméterek.

4. A talajremediációs technológiák csoportosítása

A technológiákat, mint láttuk, többféleképpen csoportosíthatjuk. Az alábbiakban a szennyezőanyag tulajdonságai és a szennyezett közeg illetve fázis szerint csoportosítva foglaljuk össze a lehetséges technológiákat. 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.

1. táblázat: A szennyezőanyag mobilizációján alapuló technológiák

Szennyező- anyag kémiai tulajdonsága	Szennyezett közeg		
	Talajlevegő	Talajvíz	Talaj szilárd fázis
Illékony	Biodegradáción alapuló remediáció Talajgáz kiszívása és felszíni kezelése	Biodegradáción alapuló remediáció Sztrippelés	Biodegradáción alapuló remediáció Talajgőz kiszívása és felszíni kezelése Termikus deszorpció
Vízoldható	Biodegradáción alapuló remediáció Talajgőz kiszívása és felszíni kezelése	Biodegradáción alapuló remediáció Fitoremediáció Talajvíz kiszívás és felszíni kezelés Aktív résfalak beépítése	Biodegradáción alapuló remediáció Fitoremediáció Talajmosás Elektrokinetikai eljárások
Szorbeálódó	Biodegradáción alapuló remediáció Talajgáz kiszívása és felszíni kezelése	Biodegradáción alapuló remediáció Talajvíz kiszívás és felszíni kezelés	Biodegradáción alapuló remediáció Biológiai kioldás Fitoremediáció Talajból tört extrakció Szemcseméret szerinti frakcionálás Termikus deszorpció Talajégetés Pirolízis Vitrifikáció Elektrokinetikai eljárások

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.

2. táblázat: A szennyezőanyag immobilizációs folyamatai, melyeken technológia alapul

Szennyező- anyag 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 csökkentése Kémiai oxidáció/redukció	Biológiai immobilizáció Fitostabilizáció Szorpció növelése Kémiai oxidáció/redukció Fizikai-kémiai stabilizáció
Szorbeálódó		Biológiai immobilizáció Rhizofiltráció Szorpció növelése Kicsapás, oldhatóság csökkentés Kémiai oxidáció/redukció	Biológiai immobilizáció Fitostabilizáció Szorpció növelése Kémiai oxidáció/redukción Fizikai-kémiai stabilizáció Vitrifikáció, kerámiába ágyazás

4.1. A szennyezőanyag mobilizálásán alapuló technológiák részletes leírása

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 felületen 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 gázszeperátor segítségével, katalitikus oxidációval, adszorpcióval vagy bioszűréssel (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 bélésűvel ellátott kutak. A bélésűvel perforációja a levegőztetendő mélységhez igazodik, a lyukak mérete 0,5–0,75 mm. A bélésűvel 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 hézagterfogatának és légáteresztő képességének ismeretében lehet tervezni. A telítetlen talajt célszerű a kutakhoz csatlakoztatott ventillátor segítségével, szívással levegőztetni. Egy jól bevált eljárásban a ventillátorral 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 bélésűvel levegőztető kutakkal, de itt mindig levegő befűvást 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 fűvókán 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 vízadóképességétől. A kutak számát, sűrűségét, kiosztását a helyi hidrogeológiai viszonyok és a szennyezőanyag elhelyezkedés szabja meg.

Depressziós kutak nem csak a szennyezett víz kinyerését, hanem a talajvízben oldott szennyezőanyagok 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 lefölezésére, akár a vízzel együtt történő kinyerésre, amit felszíni fázis-szétválasztás 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, fázissztérválasztás, szűrés, ülepités, extrakció, fizikai-kémiai átalakítás, oxidáció, stb. A biodegradáción alapuló talajvíz-kezelési technológiák lehetnek: eleveniszapos aerob kezelés, csepegtetőtestes 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, detergensok, 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 résfalak 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, melyben a talaj vizes szuszpenziója kerül. A mosó reaktor a helyszínen is felállítható, így a talaj kezelés után azonnal visszahelyezhető 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 tűrőképes mikroorganizmusok természetes szelekciója és dúsulása.

A mobilis szennyezőanyag a talajgázba vagy a talaj folyadék fázisba (talajnedveség, 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 nehezkessé válik, a szervesetlen fémek teljes egészében megmaradhatnak eredeti helyükön.

A természetes biodegradáció és annak intenzifikálása enyhe beavatkozásokkal

A természetes mikroflóra működésének optimalására, 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 helyszín-specifikusnak kell lenniük, vegyis 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 helyszín-specifikussá 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 folyamatok talajvízkezelési technológiák is alapulnak.

A biotenzidok baktériumok vagy gombák által szintetizált felületaktív anyagok. Lipofil molekulák szubsztrátként történő hasznosításának alapfeltétele, hogy a mikroorganizmusok hidrophil felülete érintkezésbe kerülhessen a vízszító molekulával. A fázis-határok áttörésére biotenzidokat szintetizálnak, melyekkel a lipofil anyag mikrocseppjeit körülveszik, abból olyan biotenzid-micellát képeznek, amely már képes átjutni a sejthátároló felületen. A biotenzidok alkalmazását a mikrobasejt gyakran kombinálja a hidrophób anyaghoz, pl. olajcsepppekhez való adhéziós kötődéssel is, melyet a sejthátároló képletek lipofil molekulái tesznek lehetővé. A mikroorganizmusok biotenzidjeik segítségével szénhidrogénekből emulziót tudnak képezni. A biotenzid felépítése a szintetikus tenzidokhoz hasonlóan kettős; van egy hidrophób és egy hidrophil komponensük, melyek pl. egy olajcsepppekhez kapcsolódva csökkentik a felületi feszültséget. A sejtmembránnal érintkező hidrophób 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. A biotenzidoknak a környezetben folyó spontán biodegradációban és veszélyes anyagokkal szennyezett környezeti elemek bioremediációjában egyaránt nagy szerepük van.

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 biofilmben – 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 óvárok, vagy szivárogtató gyűjtőrendszer, a kezelt talaj sátorral történő lefedése is jó megoldás lehet.

Háromfázisú talaj prizmás kezelése

A szerves anyagokkal szennyezett talajt kiemelik, s csurgalékkelvezető 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 talajtér fogathoz. 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 áthalmazással (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 használható 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. ülepitőket) 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 felgyülemlött fölös nedvesség (víz) ne pangjon, elvezethető legyen.

A talajjal töltött tartályokat oszlopreaktorként is működtethetjük, folyamatosan átiszvárogtatott oldott anyagokkal, esetleg mosóvizekkel kezelve a talajtérfigotat. 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 szolgáltató vízoldható 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 (illékonyvá 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 kiszelektálódott vagy géntechnikákkal előállított, nagy biokoncentrációs faktorral (BCF) rendelkező növényvel szembeni 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, akácfélek, 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 nehézséggel 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 fémkiválásra, 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 folyamatból 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 féme- ket: ez a folyamat a fitoextrakció. A mikorrhiza mikrobák által termelt anyagok még inkább mobilizálják a talajban kötött féme- ket, 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 retten- nünk a bioakkumulációt végző növények tápláléklánca- ba 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.

4.2. A szennyezőanyag immobilizálásán alapuló talajremediációs technológiák

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

Az immobilizáció általában a mozgás, mozgékony- ság megszüntetését jelenti a bio- technológiákban: enzimek, reagensek, vegyi anyagok, szennyezőanyagok szilárd felü- lethez, pl. hordozóhoz kötését, szilárd mátrixba ágyazását vagy olyan fizikai és/vagy kémiai átalakítását, mely az illékony- ságot, oldhatóságot, deszorpciós képessé- get csökkenti, ezzel megakadályozza a környezetben való terjedést és a fizikai-kémiai és biológiai hozzáférhetőséget.

Immobilizáción alapuló környezetvédelmi technológiák bármely szennyezett kör- nyezeti elem és fázis esetében alkalmazhatóak. Levegő, és vízszennyezettség esetében a szennyezőanyag immobilizáció a, pl. szilárd fázison való megkötése szűréssel vagy ki-

csapása 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 mozgékonyasága, 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 matrix 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 kémiaiilag is kötődhetnek. Kezelés után a stabilizált anyag talajfeltöltésre is alkalmazható. Elsősorban petroléum 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, vízdoldhatósága, biológiai hozzáférhetősége, végeredményben tehát káros hatása (toxicitása, mutagenitása, teratogenitása, stb.).

Meszezés

Oldható foszfátok illetve mész adagolásával lecsökkenthető 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 formájúvá 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 méspép helyett szilárd fázisú méskőport 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 szervesetlen 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 adalék-ként talajba juttatott energiaforrás mindig aktiválja a helyi mikroflórát. Ha nem gondoskodunk levegőztetésről, akkor először elfogy a talajlevegő oxigénje, majd az alternatív légzési formák beindulával elfogynak 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, mozgékonyságcsökkenéshez, biológiai hozzáférhetetlenséghez vezet.

3. A növények extracelluláris anyagot termelve képesek bizonyos szennyezőanyagok rhizoszférában történő kicsapására.
4. Egyes mikroorganizmusok extracelluláris poliszaccharidokat termelve csapják ki a fémeket a sejten kívüli térben. Vízelézés, vagy *in situ* talajkezelés során hasznosíthatjuk ezt a folyamatot, ha a fémeket 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 elkülöníthetők 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 hatással bír. Egyrészt fizikailag izolálja az alatta lévő szennyezett réteget, másrészt az így létrejövő anaerob körülmények közt a redoxpotenciál megváltozásával a fémek oldhatatlan szulfid formába (MeS) kerülnek. Utóbbi állapotot stabilizálhatják a szulfátlélegzést alkalmazó baktériumok, melyek vagy honosak vagy oltóanyagként betelepíthetők a szulfát-veszélyt jelentő talajokba vagy üledékekbe, az izoláció alá.

A *Thiobacillusok* tevékenységének megakadályozására szulfátredukáló baktériumok telepíthetők a szennyezett területre, a taljba 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 tűrő 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 fémeket 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 fémek 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.

4.3. Szennyezett talajvíz, mosófolyadékok és csurgalékvizek kezelése

A talajremediálással kapcsolatban keletkező és kezelendő vizek esetében gyakorlatilag ugyanazokat az eljárásokat alkalmazzuk, mint a víz- illetve szennyvíztisztításnál.

Ezek az eljárások lehetnek fizikai-kémiai, termikus vagy biológiai eljárások vagy ezek megfelelő kombinációi. A talajvíz kezelése történhet *in situ* vagy *ex situ* módon, az összegyűjtött csurgalékvizeket és mosóvizet általában *ex situ* kezelik, de nem lehetetlen a talajba visszajuttatásuk és *in situ* kezelésük sem.

Fizikai-kémiai vízkezelési eljárások

A fizikai-kémiai víz- és szennyvízkezelési technológiák a talajvizek, mosóvizek vagy csurgalékvizek kezelésére is alkalmasak. A szennyezőanyag halmazállapotától és attól függően, hogy a szennyezőanyag illékony, vízoldható, biodegradálható vagy egyik sem, kell megválasztanunk a megfelelő eljárást vagy több eljárás kombinációját.

Illékony szennyezőanyagok esetében a sztrippelés a legelterjedtebb vízkezelési módszer, oldott anyagok esetén a kicsapás vagy az adszorpció a leggyakoribb, de a kémiai átalakítás is járható út: a szennyezőanyag kémiai mobilizálására (bontás, oxidáció, redukció, hidrolízis, fotodegradáció, stb.) vagy immobilizálására (kicsapás, oxidáció, redukció, polimerizáció, stb.) ismert eljárások léteznek. Ezek nagy része *ex situ*, a kiszivattyúzott vízzel történik, de egyik-másik módszer *in situ* is alkalmazható, például a sztrippelésnek van *in situ* megoldása is, a kémiai reakciók a talajvízbe adagolt reagenssel is lejátszódnak a felszín alatt. Újabban terjednek a talaj felszíne alatt kiépített aktív részfalak. Ez a technológia a talajvíz áramlási irányába épített kezelő berendezés, tulajdonképpen egy átfolyósos reaktor, amelybe beleépített reagenssel reagálva ártalmatlannodik az oldott szennyezőanyag. Az aktív részfalakban leggyakrabban oxidáció vagy redukció történik, a reagens mellé katalizátor is tehető és léteznek biodegradáción alapuló aktív részfalak is.

Szilárd szennyezőanyag részecskéket tartalmazó vizek üleptéssel vagy szűréssel tisztíthatóak, felúszó vagy ülepedő (víznél nehezebb) folyadékfázist tartalmazó vizeket pedig fázissztávlasztással lehet tisztítani.

A talaj- és üledékremediációban leggyakrabban alkalmazott vízkezelési technológiákat a következőkben ismertetjük.

Sztrippelés: gáz/gőzhalmazállapotú szennyezőanyag eltávolítására

Illékony szerves szennyezőanyagok folyadékból történő eltávolítására szolgál. A szennyezett talajvíz, vagy mosófolyadék és az illékony anyagokat tartalmazó gázfázis anyagátadó felületét intenzív levegőztetéssel növeljük meg. Az *ex situ* eljárás eszközei: töltött tornyok, diffúz levegőztetést biztosító tálcás levegőztetők, porlasztásos levegőztető berendezések.

Ez a módszer talajvíz esetében *in situ*, tehát a talaj mélyebb rétegeiben lévő talajvízre is alkalmazható.

Fizikai-kémiai kezelési módszerek folyékony vagy oldott állapotú szennyező anyagokra

A vízben felúszó szennyezőanyag eltávolítása lefölezéssel történik. Ez mind *in situ*, mind *ex situ* megoldható. *Ex situ* esetben egyszerű gravitációs fázisszétválasztást alkalmazhatunk, szintenkénti elvezetéssel, *in situ* a víznyerő kútban kell megoldani a fázishatárt érzékelő berendezéssel és megfelelő mélységben elhelyezett búvárszivattyúval, vagy a határfelületen úszó speciális ún. lefölező szivattyúval, amely belső, hidrofób membránja segítségével érzékeli és különíti el a szervesanyag fázisát a víztől.

Kicsapással az oldott anyagot a víztől elválasztható csapadék formájává alakítjuk kémiai reagenssel, kicsapószerrel vagy a pH illetve a redoxpotenciál megfelelő beállítással.

A fizikai-kémiai (és hasonlóképpen a biológiai) adszorpció lényege az oldott szennyezőanyag szilárd fázisba átkerülése, acélból, hogy a víztől elkülöníthető legyen. Az adszorbenst a rajta kötött szennyezőanyaggal tovább kezelni (ártalmatlanítani) és/vagy regenerálni kell. Szennyezett vizek kezelésére gyakori megoldás az adszorpció aktív szénen. A szennyezett talajvizet, vagy mosófolyadékot aktív szenet tartalmazó szűrőbetéteken áramoltatják át. A szerves szennyezőanyagok ilyenkor adszorbeálódnak az aktív szénen. A telítődött aktív szén szűrőbetétet cserélik, majd regenerálják deszorpcióval, vagy extrakcióval. Ha a szennyezőanyag engedi a szűrésre használt aktív szén el is égethető.

Kémiai reakciók mind a bontást, mind a fázisváltást szolgálhatják, a szennyezőanyagtól függően választhatjuk meg a megfelelő kémiai reakciót és az ahhoz szükséges reagenst. A reagens hozzáadásának célszerű módját, a reakció lejátszódásához szükséges időt, az esetleges reakciót követő elválasztást a reaktor és a technológiai paraméterek biztosítják.

A szennyezett talajvízben és a mosófolyadékban található szerves szennyezőanyagokat ultraibolya sugárzással, ózonnal, és/vagy hidrogén-peroxid alkalmazásával bonthatjuk vékony rétegben szétterítve tartályban, vagy áramoltatva. A reakciótartályból esetleg kilépő gázokat is kezelhetjük ózonnal.

Biodegradáción alapuló vízkezelési technológiák

A csepegtetőtestes, illetve eleveniszapos szennyvíztisztításhoz hasonlóan rögzített vagy szuszpendált formában jelenlévő mikroorganizmus közösségeket használó technológiákkal kezelhetjük a szennyezett talajvizet, csurgalékot vagy mosófolyadékot.

A szuszpendált rendszerekben a szennyezett folyadékot levegőztetett tartályban (reaktorban) cirkuláltatják, ahol a mikroorganizmusok aerob úton bontják a szerves szennyezőanyagokat.

Egyes vízben oldott szennyezőanyagok esetében anaerob biodegradáció jelentheti a megoldást. Ilyenkor a reaktor az O_2 kizárását biztosítja.

A rögzített rendszerekben, mint amilyen a rotációs biológiai kontaktor vagy a csepegtető szűrők, a mikroorganizmusok egy inert rögzített mátrixhoz kötötten, aerob úton bontják a mosófolyadék szerves szennyezőanyagait. A csepegtetőtesten kívül bármilyen töltettel rendelkező biológiai szűrő is alkalmazható a szennyezett víz kezelésére.

4.4. Talajgázok kezelése

Az elszívott talajgázok kezelésére a jól bevált adszorpció, elnyeletés, katalitikus égetés a leggyakoribb megoldások, melyeket általában a gázelszívással kezelt talaj közelébe telepítenek. Biológiai eljárások is alkalmasak folyadékfilmbe vagy szilárd felületre szorpcióval kötött gázok és gőzök kezelésére.

Fizikai-kémiai talajgáz-kezelési módszerek

Adszorpció aktív szénen mind gázok, mind gőzformájú szennyezőanyagok esetében alkalmazható. Az aktív szén (granulált vagy pellet formában) nagy fajlagos felületén megköti a gáz és gőzfázisú szennyezőanyagok molekuláit. A granulált aktív szenet oszlopokba töltjük, majd azon átáramoltatjuk az elszívott gázokat. A szennyezőanyaggal telítődött aktív szén regeneráljuk, és újra felhasználhatjuk, vagy ha a szennyezőanyag engedi, elégethetjük.

A katalitikus oxidációt nem halogénezett vegyületek, vagyis az illékony szerves vegyületek (angol rövidítése VOC = Volatile Organic Carbon) kezelése alkalmazhatjuk. Az égetés a szennyezett levegőáramban, alacsony hőmérsékleten (450 °C) történik, nem halogénezett vegyületekre tervezett katalizátoron.

Katalitikus oxidációt halogénezett vegyületek esetén is alkalmazhatunk, ilyenkor az illékony klórozott vegyületek lebontása a szennyezett levegőáramban alacsony hőfokon (450 °C) történik, halogénezett vegyületekre tervezett katalizátoron.

Termikus oxidációval gáz vagy gőzfázisban lévő szennyezőanyagokat is lebontunk, magas hőmérsékleten (1000 °C), égetőkamrában, ártalmatlan végtermékek keletkezése közben. Amennyiben a füstgáz ártalmas vegyületeket tartalmaz, azt tisztítani kell (szűrő).

Bioszűrők alkalmazása talajgáz-kezelésre

Gőz (gáz) fázisú szerves szennyezőanyagokat olyan tölteten vagy ágyazaton szivattyúzzák át, melyen a szennyezőanyag bontására képes mikroflóra megtelepedését biztosítják (talajágy, csepegőtest, filccel, gyapjúval, fahánccsal, stb. töltött oszlopok). A nagyfelületű adszorbens felületén adszorbeálódnak a szennyezőanyagok ahol a kialakult biofilmben élő mikroorganizmusok lebontják őket. Specifikus baktériumtörzseket is juttathatunk a szűrőre optimális körülmények mellett biztosítva a specifikus vegyületek lebontását. Adalékok alkalmazása és a levegőztetés meggyorsíthatja a műveletet.

4.5. Ökoszisztémát károsító talajremediálási technológiák

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, acélból, a szennyezőanyag dúsítása céljából, hogy a drága technológiát minél kisebb talajmennyiségre kelljen alkalmazni.

Előkezelés frakcionálással

Mivel mind a szerves, mind pedig a szervesetlen szennyezőanyagok a 63 µm-nél kisebb szemcseméretű, kolloid méretű, szerves és szervesetlen 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 átala-

kulás nélkül van jelen, de a főtechnológia hatékonyságát megnövelheti ez a repesztéses előkezelés köves-sziclás 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 vízzeloldható nehéz- és nem nehézfémsók 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 polietil-glikol épül a halogén atom helyére. Leggyakrabban kálium-polietilén-glikolátot, KPEG-t adnak fűtött reaktorban a szennyezett talajhoz. A toxicitása a szennyeződésnek 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. A szeparáció során 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.

Költségigénye 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 amellet 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 forráspontjától 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 vákuum-rendszer továbbítja. A gőzök kezelő rendszerében a szerves szennyezőanyagok leválasztására ciklonokat, aktív szenes vagy más töltetű adszorbereket, szűrőket, nedves elnyelőket 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 csökkenecét 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 használható, 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 hatásfoka 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, fracionált, 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 szilárdításakor 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 talajszennyezőanyag 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 kelet-

kezzék. 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 pirolizálnak, a toxikus fémek pedig teljesen immobilisakká válva beépülnek az üvegszerű szerkezetbe. Ily módon a nehézfémek és radioaktív anyagok toxikus hatása és mobilitása megszűnik, az olvadékok 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.

5. A technológiák összehasonlítása

Technológia alap technológia	Megbízhatóság	Kezelendő melléktermék	Kezelendő szennyezőanyag fajta	Kezelés időtartama	Kezelés költsége (irod. adat)	Alkalmazhatóság	Kockázat
Stabilizáció	jó	szilárd	szervetlen/ szerves	<1év	100-300 USD/t	3	latens maradék
Kémiai oxidáció vagy redukció	jó	szilárd	szervetlen szerves	<1év	100-300 USD/t	3	latens maradék
Vitrifikáció	jó	gőz	szervetlen szerves	<1év	110-300 USD/t	3	kis látens mar. vagy nincs
Talajmosás	közepes	folyadék	szervetlen szerves	>3év	<300 USD/t	4	Maradék és kibocsátás
Dehalogénezés	rossz	gőz	szerves	>3év	<300 USD/t	3	maradék, és kibocsátás
Elektrokinetikaik eljárások	közepes	folyadék	szervetlen	1-3év	100-300 USD/t	3	maradék, és kibocsátás
Termikus deszorpció	közepes	szilárd/ folyadék	szerves	<1év	100-300 USD/t	2	maradék, és kibocsátás
Égetés	közepes	szilárd/gőz	szerves	<1év	<300 USD/t	2	kibocsátás

Pirolízis	közepes	gőz	szerves	<1év	<300 USD/t	2	kibocsátás
Talajlevegő kiszívása és kezelése	jó	gáz/gőz	Szerves / szerves	>3év	<100 USD/t	3	nincs
Talajmosás	közepes	Folyadék/ szilárd	szerves	<1év	100-300 USD/t	4	kis maradék, kibocsátás
Természetes biodegradáció intenzifikálása	jó	nem képződik	szerves	>3év	<100 USD/t	5	kis maradék
Talajkezelés agrotechnikai módszerekkel	jó	nem képződik	szerves	1-3 év	<100 USD/t	5	kis maradék
Bioágyas prizmás kezelés	jó	nem képződik	szerves	1-3év	<100 USD/t	5	kis maradék
Izapfázisú talajkezelés reaktorokban	közepes	mosóvíz	szerves	1-3év	100-300 USD/t	5	kis maradék
Bioventilláció	jó	gáz/gőz	szerves	1-3 év	<100 USD/t	5	kis maradék
Biológiai kinyerés (bioleaching)	közepes	csurgalék	szerves	1-3év	<300 USD/t	5	maradék, kibocsátás
Természetes szennyezőanyag csökkenés	nem értelmezhető	nem képződik	szerves	>3év	<100 USD/t	5	folyamatosan csökkenő
Fitoremediáció	közepes	szennyezett növény	szerves	>3év	<100 USD/t	5	folyamatosan csökkenő
Bioreaktor	közepes	gáz/ csurgalék	szerves	1-3év	100-300 USD/t	5	kis maradék
Sztrippelés	közepes	gáz/gőz	szerves	<1év	100-300 USD/t	4	kis maradék kibocsátás
Adszorpció aktív szénre	közepes	szilárd	szerves	<1év	<300 USD/t	3	kis maradék
UV oxidáció	közepes	nem képződik	szerves	1-3év	<100 USD/t	4	maradék
Adszorpció aktív szénen (gáz/gőz fázis)	jó	szilárd	szerves	nem értelmezhető	<100 USD/t	3	kis maradék kibocsátás
Katalikus oxidáció (nem halogénezett vegyületekre)	jó	gőz	szerves	1-3év	100-300 USD/t	3	kis maradék
Katalikus oxidáció(halogénezett vegyületek esetén)	jó	gőz	szerves	1-3év	100-300 USD/t	3	kis maradék
Bioszűrők alkalmazása	közepes	szilárd/gőz	szerves	1-3év	100-300 USD/t	4	kis maradék

Alkalmazhatóság: 2 nem célszerű, 3 közepes, 4 jó, 5 ajánlott

6. Döntési pontok, döntést támogató rendszerek

Az első kérdés, hogy mit szolgáljon a döntési sorozat? A válasz, hogy a célnak a lehető legjobban megfelelő technológia kiválasztását.

A technológia vagy technológiaegyüttes kiválasztásánál a legfőbb szempont, hogy az alkalmazott eljárás szennyezőanyag és a szennyezett terület együttesét minél jobban kiszolgálja, úgy, hogy a terület ökoszisztémája, a talaj élővilága minél kisebb mértékben sérüljön. Ezzel a követelménnyel gyakran ellentétes az ember rövidtávú érdeke: minél kisebb költséggel, minél gyorsabban elfogadható eredményt elérni, és a területet minél előnyösebben hasznosítani

Fentiek értelmében a döntési folyamatot is érdemes több részre bontani:

1. Technológiai szempontok elsődlegessége mellett kijelölni a szóbaeső technológiai alternatívákat vagy technológia-együtteseket.
2. A döntés második fázisában a technológiai szempontból megfelelő technológia-alternatívákat további szempontok szerint lehet rangsorolni. A további szempontokat is érdemes rangsorolni pl. az ökomérnök az ökológiai szempontokat teheti az első helyre, így a következő prioritási sorrend állítható fel:
 - Az ökoszisztéma és az emberi egészség védelme

- Kockázatkommunikációs és szociális szempontok
- Területfejlesztés, területhasználat
- Gazdasági szempontok, területhasznosítás

A terület tulajdonosa ettől eltérő prioritásokat jelölhet meg, például:

- Gazdasági szempontok: területhasznosítás, bevételszerzés
- Területfejlesztés
- Szociális szempontok, pl. munkahelyteremtés
- Kockázatkommunikáció
- Kockázat csökkentés

Az alábbiakban a technológiaválasztáshoz szükséges legfontosabb döntési pontokat, az ott felmerülő kérdéseket és indokokat foglalom össze az ökomérnöki szemlélet előtérbe helyezésével, tehát az ökoszisztémára és benne az emberre vonatkozó kockázat minimalizálását, az ökoszisztéma háborítatlanságának minél tökéletesebb megtartását tűzve ki elsődleges célul. Ha ezeknek prioritásuk van, akkor a környezeti kockázatkezelés és az életminőség javítása automatikusan prioritást kapnak.

A gazdasági szempontok egy második fázisban lesznek figyelembe véve, mintegy megharcolnak az ökológiai szempontokkal, amennyiben ellentétes érdekek merülnek fel. Mellesleg az érdekellentétek is feloldhatóak megfelelő hosszútávú tervezés és stratégia megválasztása esetén.

A gazdasági szempontoknak a döntés második fázisában történő figyelembe vételéhez szükséges metodika ma még nem áll rendelkezésünkre. Az egész világon vitatéma, hogy számítsunk költségnek és mi haszonnak és hogy hogyan vegyük figyelembe az elmaradt hasznokat vagy a remediáció után elmaradó károk vagy megelőzés költségét. Ehhez szükséges metodika kidolgozásához ebben a munkában a költségek és hasznok fajtáinak azonosításáig igyekszünk eljutni, ezek mennyiségi jellemzése egy következő munkafázis lesz.

A döntések felmerülő sorrendje természetesen esetről esetre változhat és az irányítás szintjétől függően a döntési feladatok sora is eltérhet.

Jelen tanulmányban tárgyaltak tehát a "kockázat csökkentése remediációval" feladatponthoz tartozó döntésekkel kezdődik, a fölötte lévő döntési szituációkat nem tárgyalja (vö. 1. ábra) és a szóba jövő technológiák listázásáig tart, az alatta lévő döntésekhez csak szempontokat ad meg, metodikát még nem.

A döntés meghozatalakor figyelembe veendő szempontok:

- A szennyezőanyag fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai, veszélyessége
- A szennyezett környezeti elem és fázis tulajdonságai, vagyis a matrix,
- A területhasználat, beleértve a jelenlegi és a jövőbeni területhasználatot, esetleg a remediáció alatti, ezektől eltérő területhasználatot és a területhasználatához tartozó remediációs célérték. A terület pénzben kifejezhető értéke is döntő lehet.
- A technológia hatékonysága

- A technológia bonyolultsága, rendelkezésre állása
- A kezelés várható (szükséges) időtartama
- A technológia saját kockázatai
- A technológia beruházási és üzemeltetési költsége
- A remediáció hasznai

Döntési helyzetben az első mindig a helyzet felmérése és a szennyezett terület kockázatának felmérése alapján annak megállapítása, hogy a beavatkozás mennyire sürgős.

Amennyiben nagy a kockázat és ez növekvő trendet mutat, akkor beavatkozás sürgős, un. gyorsintézkedésre lehet szükség, ami nem a tipikus helyzet és a tipikus remediációs eset. A havária jellegű eseteket kizárjuk vizsgálódásunk köréből a továbbiakban, inkább azokat az eseteket vesszük tipikusnak, amikor nem sürgős esetről, hanem többé-kevésbé egyensúlyba került régebbi szennyezettségről van szó.

Amennyiben nincs szükség gyorsintézkedésre, akkor a döntési folyamatunk az elvileg lehetséges összes technológiai alternatíva számbavételével kezdődjék. Ebben a fázisban még ne korlátozzuk magunkat gazdasági vagy szociális szempontokkal, a lista összeállításánál a fizikai-kémiai, biológiai tulajdonságokon kívül a technológiai-műveleti lehetőségek legyenek a döntőek. Ennek a listának az összeállításakor a minél teljesebb áttekintésre törekedjünk, az alkalmatlan technológiák kiszelektálását és a gazdasági és szociális szempontú szűkítéseket egy következő lépésben tegyük meg.

A további döntési lépéseknél vegyük figyelembe a gazdasági szempontokat, a technológia saját kockázatát és a szociális szempontokat.

A lista szűkítésénél, az értékeléseknél mindig vegyük számba az összes indokot és lehetőleg számszerűsítsük azok következményeit. Ha ez nem lehetséges, akkor hozzunk létre kvalitatív értékelési módszert (pontszámok, százalékok, piros pontok, stb.)

6.1. Technológiai szempontok

Azt, hogy milyen sorrendben haladjunk a szempontok értékelésénél nem könnyű megmondani, hiszen minden összefügg mindennel. Saját tapasztalatom alapján, legcélszerűbb az immobilizáció/mobilizáció kérdéskörrel kezdeni.

Egy alternatív lehetőség, hogy az *in situ* vagy *ex situ* döntéssel kezdjük, de az sok esetben indokolatlan önkorlátozást jelent, hiszen az alkalmas technológiák legtöbbször *in situ* és *ex situ* egyaránt alkalmazható, főleg az enyhe beavatkozásokra igaz ez. Az *in situ* vagy *ex situ* döntésbe sokkal több nem technológiai jellegű szempont jelenhet meg (költség, időigény, a terület jövőbeni használata, szociális elfogadás), amit a döntési sorozatunkban hátrébb helyeztünk. A hátrébb helyezés nem jelent fontossági sorrendet vagy befolyási erősséget, hiszen nagyon is döntőek a gazdasági lehetőségek, viszont indokolatlanul korlátozzák a lehető legjobb technológia kiválasztását, hiszen a költség-haszon mérleget a technológia költségén kívül nagyban befolyásolják a jövőbeni területhasználat, és a pénzben nem kifejezhető hasznok.

Természetesen további problémát jelenthet, hogy a gazdaságilag nem mérhető hasznok figyelembe vétele hogyan történjék. Ezek felmérhetetlensége miatt a döntési rendszerünk még sokáig kvalitatív vagy félkvalitatív marad.

Immobilizáció vagy mobilizáció

A szennyezőanyag fizikai-kémiai és biológiai tulajdonságaitól, toxicitásától, fizikai állapotától, a mátrix megkötőképességétől és a területhasználattól függ, hogy a talajban lévő szennyezőanyagot mobilizálással vagy immobilizálással ártalmatlanítsuk-e.

Döntő lehet az is, hogy milyen környezeti elemekben és fázisban van jelen, mint szennyezőanyag: már most le lehet szögezni, hogy a talajgáz és a talajvíz (egyéb csurgalék és mosóvizek esetében) a mobilizálás az elsődleges, csak különleges esetben jön szóba az immobilizálás.

Az immobilizálás elsősorban a szilárd fázishoz erősen kötött szennyezőanyagoknál jelent jó megoldást, ilyenkor a technológus erősíti a spontán létező megoldást.

A mobilizálás az esetek nagy részében preferált, hiszen a talajból való szennyezőanyag eltávolítás valódi kockázatcsökkenést jelent, míg a mozgékony csökkenése rövid távú megoldás, amikor a szennyezőanyag, – ha ártalmatlan formában is –, de ottmarad a talajban. Mozgékony, vagyis illékony, vízdékony és biodegradálható szennyezőanyagok esetében nem kérdés, hogy mobilizáláshoz kell folyamodnunk.

A mobilizáció vagy immobilizáció kérdés megválaszolása függ attól is, hogy *in situ* vagy *ex situ* lesz-e a remediáció. Ha *ex situ*, akkor még inkább preferált a mobilizáció, mert kockázati szempontok pl. vízbe kerülhet, továbbterjedhet, stb. nem döntőek az immobilizáció választása mellett.

Ne felejtjük el, hogy ami mobilizálás a környezeti elem szemszögéből, immobilizálás lehet a fázisváltásos megoldások esetében. Egy biológiai szűrőn immobilizálhatjuk azt, amit a talajgázból, talajvízből kivonunk (mobilizálunk). A talajban fitoremediációval mobilizáljuk, de a növényben immobilizálódik, átmenetileg. Ebben a tanulmányban a kezelendő környezeti elem, illetve fázis szempontjából nézzük, hogy mobilizáció vagy immobilizáció-e a technológia alapja. A tökéletes biodegradáció (a mineralizáció) az egyetlen folyamat, amelynél a fázisváltást nem kell figyelembe vennünk, hiszen a végtermék, a mineralizált elem, nem tekintendő szennyezőanyagnak.

Szempontrendszer, döntési pontok összefüggését mutatja már az első döntési pontunk is, hiszen másképp fogunk dönteni pl. vízbázis esetében egy vízdoldható veszélyes anyagról, ha a talaj kitermelhető, mintha nem. Ha *ex situ* kezelést tervezünk, nagy valószínűséggel mobilizációs technológiát fogunk választani, de ha nem jön szóba a talaj kitermelése, akkor a tovaterjedés meggátlása (rézfal, depressziós kutak, stb.) és a stabilizálásos (pl. kémiai stabilizálás) módszerek azonos súlyú technológiai alternatívaként fognak felmerülni.

Fizikai-kémiai vagy biológiai módszer

A fizikai-kémiai sokszor egyszerűbb de általában költségesebb, mint a biológiai módszer, de környezeti kockázata is nagyobb, mint a biológiaié. A fizikai-kémiai beavatkozás is lehet enyhe beavatkozás, általában folytonos skálájuk van az egészen enyhétől a legdrasztikusabbig (pl. hőmérsékletemelés). A biológiai technológiák, viszont mindig enyhe beavatkozást jelentenek, olyanokat, amiket az ökoszisztéma, a talaj mikroflórája tolerál. A biológiai is lehet kockázata, de általában nem akkora, mint a fizikai-kémiai technológiáknak (v.ö.: A természetes szennyezőanyag-csökkenés

intenzifikálása és a környezeti kockázat c. tanulmány). Az időigény is igen eltérő lehet: a fizikai-kémiai technológiák általában kevésbé időigényesek, mint a biológiaiak.

A mobilizáció vagy immobilizáció kérdésében elsősorban két szempont fog dönteni, a szennyezőanyag és a matrix.

Szennyezőanyagtól függő döntési szempontok:

Milyen módon mobilizálható:

- Illékony: elpárologtatás
- Szorbeálódó: deszorpció felé eltolás
- Vízoldékony: vizes extrakció
- Biodegradálható: bioremediáció
- Fényérzékeny: fotodegradáció, stb.

Milyen módon immobilizálható:

- Ez elsősorban a szennyezőanyag fizikai állapotától függ
- Részecske: fizikai stabilizálás, tömbösítés
- Szorbeált: ad/abszorpció felé eltolás külső körülmények, pl. pH, redoxpotenciál segítségével
- Reaktív: kémiai reakcióval az immobilis forma felé
- Biológiailag immobilizálható: bioakkumuláción vagy bioszorpción alapuló technológiák, pl. bioszűrés, rhizofiltráció, stb.

Mátrixtól és fázistól is függő döntési szempontok

- Mely környezeti elem, mely fázisai szennyezettek, melyeket kell kezelni
- Az egyes szennyezett fázisok milyen módon kötik a szennyezőanyagot
- Milyen kölcsönhatások vannak az egyes fázisok, a biota és a szennyezőanyag között
- A kezelendő környezeti elemek és fázisok hozzáférhetősége, elhelyezkedése, hidrogeológiai viszonyok
- A kezelendő környezeti elemek és fázisok érzékenysége

A fizikai, kémiai vagy biológiai módszer választásáról szóló döntés attól is függ, hogy *in situ* vagy *ex situ* kezelés lesz-e. *Ex situ* vízkezelésnél például a fizikai, kémiai vagy biológia eljárások azonos jogú alternatívák lesznek.

In situ talajkezelésnél biológiai eljárás preferált, a környezeti kockázat és a talaj jövőbeni használata miatt, az ökoszisztéma megóvása érdekében.

In situ vagy ex situ

- Nagyság, kiterjedés: nagy kiterjedés az *in situ* felé tolja a döntés mérlegének nyelvét

- Terjedés, toxicitás, veszélyesség: ennek nagy volta az ex situ felé tolja a döntésünket
- Szennyezett elemek és fázisok: víz, levegő: ex situ, talaj: in situ
- Terület jövőbeni használata: pl. lesz-e építkezés, megbolygatják-e a terület felszínét. Ha igen, ex situ. Természetvédelmi terület és nem várható területhasználat változás: in situ. A kettő között folyamatos átmenet szerinti döntés.
- A beavatkozás sürgőssége: sürgős: ex situ felé, nem sürgős: in situ felé tolja.
- Kapcsolható és kapcsolandó technológiák: pl. megelőzésre: résfal: aktív résfal: kezelés + megelőzés, szivattyúzás: ex situ vízkezelés + vízzel tovaterjedése

Egy technológia vagy több kapcsolt technológia

Gyakori, hogy egyetlen technológia nem jelent megoldást, hiszen a szennyezettség kiterjedhet több környezeti elemre és fázisra.

Ha több technológia jelenthet csak megoldást, akkor kiválasztásuknál a kölcsönhatások és az együttes költség-haszon felmérés fog dönteni. Ha már tudjuk, hogy melyek lesznek az alkalmazott technológiák, alkalmazási sorrendjük még mindig döntésre vár.

Gyakran felmerülő kérdés, hogy legyen-e előkezelés: szükséges-e a talaj fellazítása vagy a szemcseméret szerinti osztályozás?

Szemcseméret szerinti frakcionálásról történő döntés költség-haszon felmérés alapján történik: frakcionálás költségét fedezi-e az előkezelést követő kezelés költségsökkenése. Ha frakcionálás költsége kisebb, akkor frakcionálni kell. A frakcionáláskor keletkező hasznosítható termék tovább növeli a hasznokat és a mérleg nyelvét a frakcionálás felé billenti.

Gyakran felmerülő kapcsolt technológia az immobilizálás utáni stabilizálás. A stabilizálás a maradék szennyezőanyag jelenlétéből adódó kockázat csökkentését szolgálja.

Több szennyezőanyag esetében a biodegradációt követő kioldás vagy stabilizáció jön szóba, esetleg a vizes mosás utáni biodegradáció. Mivel a biodegradáció lassú lehet, a fizikai-kémiai módszerek előkezeléskén való alkalmazása a logikus.

Kísérleti eredmények

A döntések előkészítése során szinte mindig szükséges laboratóriumi és félüzemi kísérletek végzése. A kísérleti eredmények alapján választhatjuk meg a technológiai paramétereket, számíthatjuk ki a határfokot és az időigényt. Mindezek alapján tudjuk elkészíteni a költségbecslést.

Mivel minden terület és minden szennyezettségi eset eltér egymástól a szennyezettség és a kockázat felmérését és a kockázatcsökkentési tervet minden esetben a terület ismeretében, területspecifikus formában kell elkészíteni. Korábbi tapasztalatokat természetesen fel lehet használni, de a technológiaválasztási döntési sorozaton minden esetben végig kell menni, és a végső döntéshez szükséges a konkrét kiválasztott technológia vagy technológiaegyüttes technológiai paramétereinek helyszínspecifikus, kísérleti meghatározása is.

A technológiai paraméterek

A technológiai paraméterek kiválasztásánál az irányadó a remediációt végző biológiai közösség igénye. De ne felejtjük el, hogy a technológiai paraméterek biztosításának komoly költségei vannak, tehát az optimálásnál nem csak a biológiai igényt, hanem a költség-haszon mérleget is figyelembe kell vennünk. A fizikai kémiai módszerek esetében a technológiai paraméterek széles skálája alkalmazható, a biológiai beavatkozások enyhe, de hosszú ideig tartó beavatkozások. A berendezés a biotechnológiáknál általában olcsóbb, mint a fizikai-kémiai technológiáknál ahol gyakran bonyolult, igényes berendezésekre és széles skálán mozgó technológiai paraméterekre lehet szükség.

A technológia kockázata

A döntésünket alapvetően befolyásoló faktor. Az ökoszisztéma és az emberi egészség védelmén kívül a technológia saját kockázata a költségeket is nagyban befolyásolja.

Milyen kockázatokkal számoljunk?

Alapvetően kétféle kockázatot különböztessünk meg. A maradék kockázatot a kezelt szennyezett környezeti elemekben és a technológia alkalmazása közbeni kibocsátásból származó kockázatot. Mindkét kockázatot jól szemlélteti a kockázati profil. Ha a technológia alkalmazása közbeni kockázat elfogadhatatlanul nagy, akkor a kibocsátás csökkentéséről kell gondoskodnunk. Ez a kockázatsökkentési intézkedés eltér in situ és ex situ technológia alkalmazása esetén, hiszen ex situ esetben legkézenfekvőbb megoldás az izoláció: elpárolgás kontrollálása, gázelszívás, sátoztető, drénrendszer, csurgalékvíz gyűjtés és kezelés, izolálás geofóliával, vízzáró réteggel, stb. Az in situ kezelés során szintén szóba jön az izoláció: felszín alatti rétfalak, kapszulázás, de gyakoribb a mobilis fázisok kontrollja, pl. vízszintsüllyesztő kutakkal vagy gáz/gőzelszívással. A szilárd fázisból történő mobilizációt, stabilizálással vagy immobilizálással oldhatjuk meg, pl. kémiai oxidáció/redukció, mikrobiológiai immobilizáció vagy fitostabilizáció.

Technológiamonitoring, utómonitoring

A technológiából történő kibocsátást és a technológia alkalmazása utáni kibocsátást monitorozással ellenőrizzük. A technológiamonitoring és az utómonitoring alapulhat ugyanazon az integrált rendszeren és a mintavételt vagy mérést biztosító berendezések is lehetnek ugyanazok. Monitorozott természetes szennyezőanyag-csökkenés esetén tulajdonképpen mesterségesen beállított technológia nincs is, csupán a monitoringrendszer működik.

A monitoring adatok értékelésére és interpretációjára ma még nem fordítanak elegendő gondot, holott a nyers adatok önmagukban nem elegendők a döntésekhez. Ez az egyik legfőbb oka a rossz döntéseknek.

6.2. Gazdasági szempontok

Egy szennyezett területtel kapcsolatos döntési folyamatban nagy szerepe van a gazdasági szempontoknak, a költségeknek és az abból adódó hasznoknak. A konkrét költségek meghatározása viszonylag egyszerű, nehezebb már a területfejlesztéssel és a terü-

let jövőbeni használatával kapcsolatos hasznok és a pénzben ki nem fejezhető hasznok számbavétele és mennyiségi meghatározása. Utóbbiak kvantifikálása nem is mindig lehetséges, ilyenkor a kvantitatív eredmény kiszámítása helyett a kvalitatív jellemzést vagyunk kénytelenek választani.

Költségek és hasznok

Miből tevődik össze a remediáció költsége?

1. Előkészítés, felmérés, tervezés költségei.
2. A berendezés létrehozásának, telepítésének vagy bérlésének ára.
3. Az alkalmazandó technológia paraméterei és a rendelkezésre álló idő egyértelműen megszabják a technológia működtetési költségeit.
4. Az alkalmazandó technológia saját kockázatának csökkentése, mint költségtényező.
5. A költségek tetemes részét képezheti a technológia monitoring és az utómonitoring.

Miből adódnak a hasznok?

1. A szennyezettség megszűnéséből adódó értéknövekedés.
2. A remediáció során megengedett területhasználat.
3. A remediáció utáni értékesebb területhasználat.
4. A szennyezőanyag hasznosítása.
5. Pénzben kifejezhető szociális, egészségügyi és életminőségbeli hasznok.
6. Pénzben ki nem fejezhető szociális, egészségügyi és életminőségbeli hasznok.

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

Költségek befolyásolása:

A 2. ábrán (enyhe technológiai beavatkozások vonata) bemutatott beavatkozások fokozatai balról jobbra növekvő költségeket, ugyanakkor az időigény csökkenését jelentik. A fokozatok megfelelő megválasztásával és szükség esetén megváltoztatásával befolyásolhatjuk a költség- és az időigényt.

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

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

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

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

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

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

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

A hasznok oldalát növelheti a remediáció során keletkező termék hasznosítása is. Ez lehet a kinyert vagy átalakított szennyezőanyag, pl. lefőlözött és tisztított olaj, vagy a kezelt talajból esetleg annak valamely részéből előállított termék, pl. homok, vagy más építőanyag, steril talaj, stb. Az *ex situ* kezelt talajt minőségétől függően lehet különböző célokra hasznosítani: meddőhányók letakarása, útalap, mezőgazdasági hasznosítás, steril talaj, stb. A hasznosításból eredő haszon ismeretében érdemes a kezelési technológiát a termék minőségének figyelembe vételével módosítani. Lehet, hogy a biológiai kezelés időtartamának meghosszabbítása vagy a deszorpció hőmérsékletének megváltoztatása értékesíthető terméket eredményez.

6.3. Technológiaválasztási döntési algoritmusok

A döntési algoritmusok, ha már elkészültek, szinte mechanikusan alkalmazhatóak a lehető legjobb remediációs technológia kiválasztásához. Mindazonáltal a mechanikus alkalmazás mindig veszélyeket hordoz magában. Ezeket az előregyártott sablonokat csak mankónak tekintjük, ötletadóknak, de a valódi megoldásunk mindig a szennyezettségi eset tökéletes ismeretén alapuló egyedi megoldás legyen.

Technológiaválasztási döntési algoritmus általános esetben

Az esélyes technológiák kiválasztásához vezető út folytonos szűkítést jelent. A szelekció a technológiaválasztás elvi alapjainak tisztázása után kialakított szempontok szerint történik. az első szelekció után kapott technológiák előnyeit és hátrányait. A döntési algoritmus és/vagy az elvi megfontolások alapján kiválasztott alternatívákat laboratóriumi kísérletek alapján értékeljük, tehát az elvileg megfelelő technológiák alkalmasságát laboratóriumi kísérletekkel támasztjuk alá.

6.3.1. Általános döntési algoritmus természetes szennyezőanyag-csökkenés esetén

Az általános döntési algoritmusban pirossal adjuk meg a kulcsot (haladási irányt) a konkrét szennyezett talajhoz alkalmas technológiák kiválasztásához.

1. Régi-e a szennyezettség?

Igen 2

Nem 16/17

2. Monitorozott-e a terület

Igen 2a

Nem 14

2a. Azonosított(ak)-e a szennyezőanyag(ok)

Igen 2b

Nem 13

2b. Azonosítottak-e a szennyezett környezeti elemek

Igen 2c

Nem 13

2c. Azonosítottak-e a szennyezett fázisok

Igen 3

Nem 13

3. Azonosítható-e természetes szennyezőanyag-csökkenési folyamat a területen?

Igen 4

Nem 14

4. Kockázatot csökkentő folyamat-e a természetes folyamat?

Igen 4a

Nem 5

4a. Mobilizációs folyamat zajlik-e a területen?

Igen 4b

Nem 4c

4b. Biodegradáció folyik-e a területen?

Igen 6

Nem 6/4c

4c. Immobilizációs folyamat zajlik-e a területen?

Igen 6

Nem 14

5. Kockázatot növelő-e?

Igen 17

Nem 16

5a. Mobilizációs folyamat zajlik-e a területen?

Igen 5b

- Nem 5c**
- 5b. Biodegradáció folyik-e a területen?
Igen 6
Nem 6/5c
- 5c. Immobilizációs folyamat zajlik-e a területen?
Igen 6
Nem 14
6. Technológia alapját képezheti-e a folyamat?
Igen 7
Nem 16/17
7. A talaj kitermelése nélkül alkalmazható-e a technológia?
Igen 10/11
Nem 8
8. Talaj kitermelése és ex situ kezelése
Igen 9
Nem 7
9. A talaj szemcseméreteloszlása indokolja-e az előzetes frakcionálást?
Igen 9a
Nem 10/11
- 9a. Szemcseméret szerinti frakcionálás után kapott frakció szennyezett-e
Igen 10/11
Nem 18

10. Mobilizáción alapuló módszer alkalmazása

- 10a. Mobilizáció a gáz/gőz vagy vízfázissal együtt
 Gáz/gőzfázis eltávolítása és kezelése 12a
 Folyadékfázis eltávolítása és kezelése 12b
- 10b. Mobilizáció más fázisba átvitelrel
 Gáz/gőzfázis eltávolítása talajvízből sztrippelés
 Gáz/gőzfázis eltávolítása szilárd fázisból deszorpció
 Szorbeált fázis átvitele folyadékfázisba mosás, extrakció
 Szorbeált fázis átvitele gőzfázisba termikus deszorpció
- 10c. Biológiai folyamatokon alapuló mobilizációs módszer alkalmazása
 Bármilyen fázis eltávolítása bármely fázisból biodegradációval
 Szorbeált fázis átvitele folyadékfázisba biológiai kioldás
 Szorbeált fázis átvitele biológiai fázisba fitoextrakció

11. Immobilizáción alapuló módszer alkalmazása

- 11a. Fizikai-kémiai immobilizáció
 Fizikai stabilizáció tömbösítés, diszperz stab.
 Kémiai stabilizáció meszezés, oxidáció/redukció
- 11b. Biológiai immobilizáció
 Oldott fázisból szilárd fázisba rizofiltráció, bioakkumuláció
 Fizikai stabilizálás fitostabilizáció

12. Gőz/gázfázis és folyadékfázis ex situ kezelése

- 12a. Gőz/gázfázis ex situ kezelése
 gáz/gőzadszorpció

- katalitikus égetés
- biológiai szűrés, stb.
- 12b. Vízfázis ex situ kezelése
 - fázisszétválasztás: ülepités leförlözés
 - adszorpció
 - kémiai kezelés (oxidáció, redukció, dehalogénezés, stb.)
 - biológiai kezelés
 - UV-oxidáció, stb.
- 13. Állapotfelmérés
- 14. Monitorozás
- 15. Kockázatfelmérés
- 16. Intézkedés
 - Megelőzés
 - Korlátozás
 - Remediáció
- 17. Gyorsintézkedés
- 18. Kezelt talaj (más környezeti elem vagy fázis) hasznosítása

A feketével számozott döntési pontokban adott válaszok vagy újabb fekete döntési pontokhoz irányítanak minket vagy a pirossal jelölt megoldáshoz: technológiához, vagy intézkedéshez.

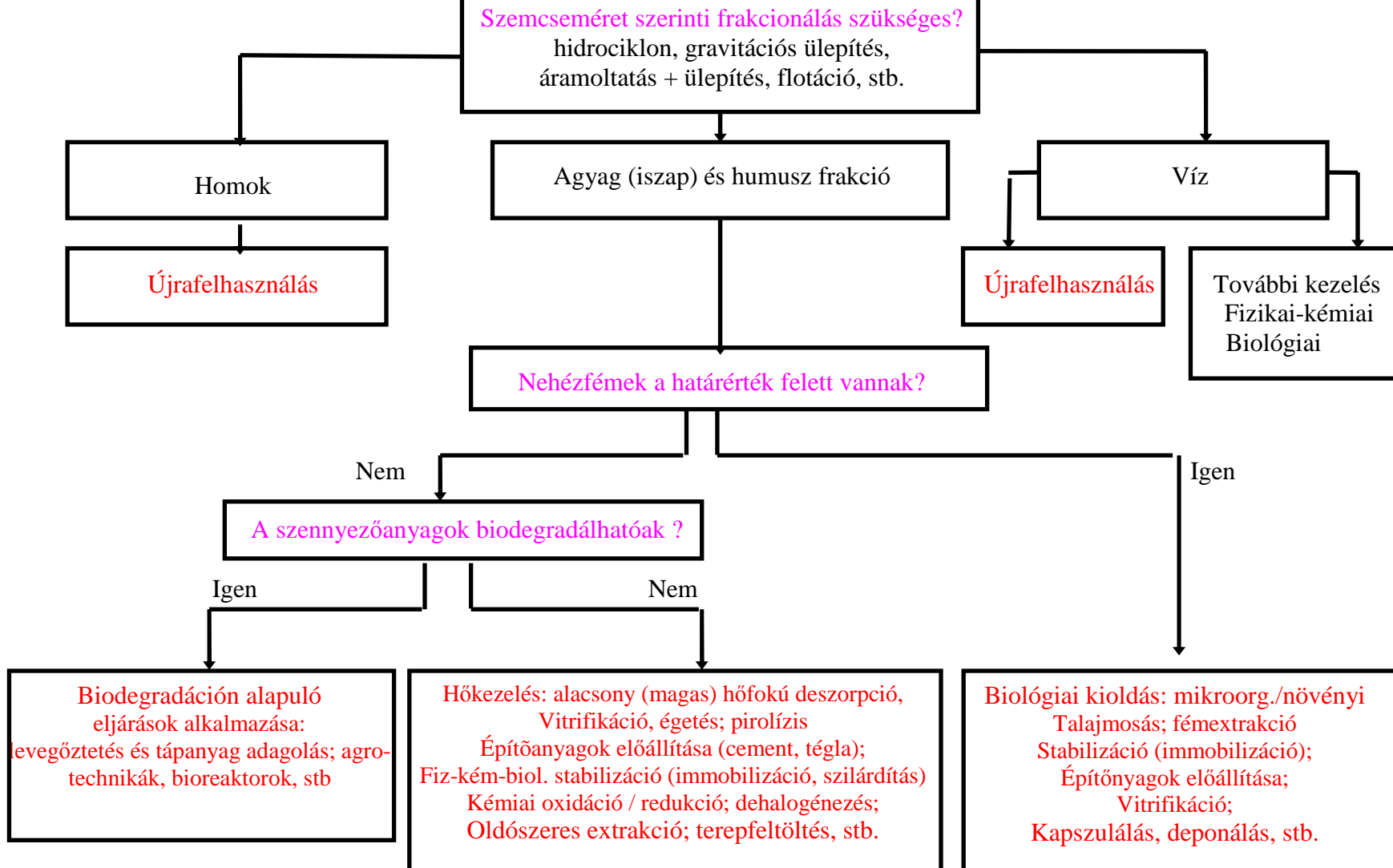
A döntési algoritmus fenti, "kulcsszámokon" alapuló megoldáson kívül más, például blokk-séma formájában is felrajzolható, ahol nyilak és dobozok jelölik ki a döntési útvonalat. A választható konkrét technológiák itt is a döntések végső lépését jelentik.

A most ismertetett döntési algoritmusok technológiai jellegűek, a gazdasági és szociális argumentumokat, a jövőbeni területhasználatot még nem tartalmazza. Ezeket a szempontokat a döntési folyamat finomításaként kell integrálni.

6.3.2. Technológiválasztási séma szennyezett üledék remediálására

A szennyezett területhez alkalmas legjobb technológia kiválasztására alkalmas blokk-sémát mutat be a 3. ábra.

**EX SITU
TECHNOLÓGIAVÁLASZTÁSI DÖNTÉSI MÁTRIX**



DECISION MATRIX

IN SITU OR EX SITU REMEDIATION OF THE SEDIMENT

