

AZ ÖKOLÓGIAI-ÖKONÓMIAI SZEMLÉLET BEMUTATÁSA EGY SZERVETLEN SZENNYEZŐANYAGOKKAL SZENNYEZETT TERÜLETEN

3. A technológiai tervezése

3.1. Tervezési alapadatok

A szabadföldi kísérlet első éve alatt választ kaphatunk a felmerülő kérdésekre. A kapott válaszok alapján menet közben tovább módosíthatjuk a technológiáinkat.

Elvégezendő kísérletek:

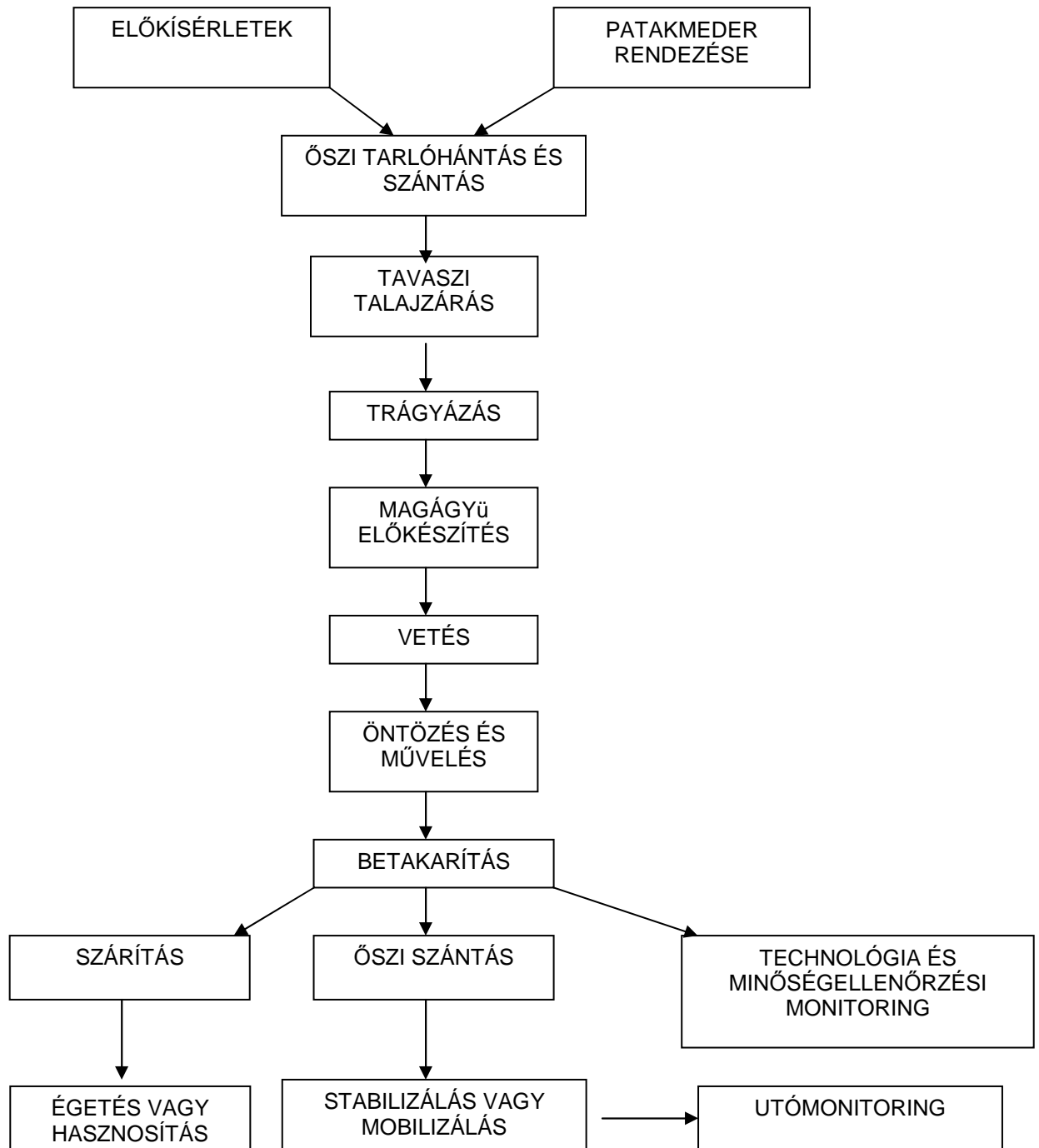
- A BCF függése a fémnek a talajban mérhető koncentrációjától: az összefüggés kimérése laboratóriumi kísérletekkel. Exponenciálisan csökkenő görbe várható, de egyáltalán nem mindegy az időbeni lefutás. Egyes esetekben kis talajkoncentráció mellett is igen nagy fémfelvétel mérhető.
- A szabadföldi kísérleteket végigkövetve nemcsak a fémek talajbeli koncentrációját, hanem a kémiai formáját, illetve mozgékonyságát is meghatározzuk.
- Az adalékanyagok hatását nem csak a fémek kémiai mérhető „mozgékonyására”, de a biológiai felvételre, elsősorban a növényi bioakkumulációra és a talajlakó élőlényekre gyakorolt toxikus hatás alapján is értékeljük, mind laboratóriumi előkísérletekben, mind a szabadföldön.
- A remediáció során mérjük ki a BCF időfüggését. A technológia nyomon követésekor mért értékekből BCF-et számítunk ($BCF = c_{\text{növény}} / c_{\text{talaj}}$) és ezt évről-évre az idő függvényében ábrázoljuk. A folyamatosan kirajzolódó görbével azután évről-évre pontosítható a technológia, mind fitoextrakció, mind fitostabilizáció esetén.
- Meghatározzuk a várható biomassza hozamokat, mind fitoextrakció esetében (kezelendő hulladék és kinyert fém), mind fitostabilizáció esetén (hasznosítható anyag).

Az irodalmi adatok és az előzetes kísérletek eredményei alapján már megtervezhető a konkrét technológia, megadható az anyag- és energiaigény, a szükséges munkaerő és szaktudás és a várható időszükséglet.

3.2. A Toka patak völgyében alkalmazandó fitoremediációs technológia folyamatábrája

A patakparti elárasztott kiskertek egy része jelenleg termelésbe bevont terület, másik része a szennyezettség miatt parlagon hagyott terület, emiatt a fitoremediáció alkalmazása előtt a területet elő kell készíteni. Az egy éves előkészítő munkák alatt elvégezhetőek a laboratóriumi és féléves kísérletek, valamint a tervezés. A patakmeder remediálásának ekkorra már be kell fejeződnie.

A folyamatábra a 4. ábrán látható.



4. ábra: A Toka-patak menti kiskertek talajának remediálása: technológiai blokkséma

A 4. ábra mind fitoextrakciós, mind fitostabilizációs eljárás esetére érvényes. A különbség a talajra ültetett növényzetben és a növények utókezelésében lesz. A fémtartalmú növényt veszélyes hulladékként kell kezelni, a fitostabilizációra alkalmazott növény hasznosításáról kell gondoskodni.

A 12. és 13. táblázatban összefoglaljuk azokat a biológiai és biológiaiával kombinálható fizikai-kémiai eljárásokat, amelyeket az ökológiai szempontok szem előtt tartása mellett is felhasználhatunk a szennyezett területe remediálásában, tehát amelyek környezetbarát, az ökoszisztémát nem károsító technológiák, ugyanakkor költség szempontjából is reálisak.

12. táblázat: A szennyezőanyag mobilizációját okozó természetes folyamatok és hasznosításuk technológiákban

	Mikrobiológiai	Fitoremediáció
Biológiai mobilizáció	<p>1. Bioleaching: savanyodással együtt járó biológiai kioldás</p> <p>2. Kőzetek mállásával és a holt szerves anyag bontásával együtt járó fémmobilizáció</p> <p>3. Sejtbe beépítés után a sejt pusztulásával járó mobilizáció</p>	<p>4. Gyökerekkel felszívás és a szövetekbe építés: a talaj szempontjából mobilizáció, a növényben viszont megkötés:</p> <ul style="list-style-type: none"> - a növényben megkötött fém eltávolítása a rendszerből (remediációs technológia) - a növény által megkötött fém vertikális cirkuláltatása (hasznosítható: alsóbb rétegekből a felszínre kerül) - a növény által megkötött fém táplálékláncba kerülése (káros: kockázat növekedése)
Fizikai, kémiai mobilizáció	<p>5. Fémeket mobilizáló, komplexképző vegyületek adagolása a szennyezett talajba/hulladékba</p> <p>6. A mobilizációt okozó mikroflóra és/vagy növényi kultúra aktivitásának növelése</p>	

13. táblázat: Természetes immobilizációs folyamatok és hasznosításuk technológiákban

	Mikrobiológiai	Fitoremediáció
Biológiai immobilizáció	<p>1. Extracelluláris poliszacharidokat termelve csapja ki a fémekeket a sejten kívül.</p> <p>2. A sejten belül köti meg, a sejtfalba és a membránba építi a szennyezőanyagokat, ezáltal védve saját magát a toxicitástól.</p> <p>3. Reduktív körülmények között mikrobiológiai szulfiddá alakítás</p>	<p>4. Extracelluláris anyagot termelve a rhizoszférában csapja ki.</p> <p>5. Felveszi és elraktározza a különböző növényi szervekben (gyökér, szár, levél), a sejtfalban, membránokban és vakuolumokban immobilizálja.</p>
Fizikai, kémiai immobilizáció	<p>6. Szennyezett talaj/hulladék letakarása, izolálása</p> <p>7. Szennyezett felszíni vizek üledékének természetes izolációja felületén egy idő után humuszos réteg alakul ki a behullott szerves anyagoktól (egy humuszlepeny), mely kettős hatású: egyrészt izolálja az alatta lévő szennyezett réteget, másrészt az így létrejövő anaerob körülmények közt a redoxpotenciál megváltozásával a fémek oldhatatlan szulfid formába (MeS) kerülnek.</p> <p>8. Adalékokkal: oldható foszfátok, mészkő illetve mész adagolásával lecsökkenthető a talaj pH-ja, s ennek következtében csökken a szennyezőanyagok hozzáférhetősége is. Adszorbensek adagolásával megköthetőek az ionos fémek. Ez a vízzel való kimosás ellen jó megoldás, a növényi felvételt viszont kevésbé befolyásolja. Szilikáttartalmú adalékok (hamuk, pernyék, beringit, stb.) képesek molekula- illetve atomrácsba zárni a fémekeket, amely immobilis forma.</p>	

3.2. A műszaki megoldások

A technológia kiválasztásakor a műszaki megoldások alkalmazhatóságán túl számos egyéb tényezőt is figyelembe kellett vennünk, illetve feltételezni:

- a helyi lakosság nem engedi elszállíttatni a földet (teljes talajcsere még költségesebbnek bizonyulna),
- a lakosok félnek az ökoszisztémát károsító beavatkozásoktól, így jelentősen leszűkül az alkalmazható technológiák száma,
- az emberek készek együttműködni velünk (feltételezések):
 - o saját költségükön termesztik a növényeket a fitostabilizációhoz és a fitoextrakcióhoz (öntözés, művelés),
 - o hozzájárulnak ahhoz, hogy az állam kisajátítsa a telkek patak menti 3 m-es sávját (mivel ez a telkek területének 10 %-ánál nem nagyobb, így az állam ezt megteheti),
 - o nem hátráltatják munkánkat,
 - o részt vesznek a felvilágosító találkozókön, rendszeresen tartják velünk a kapcsolatot és beszámolnak a munka menetéről.

A növények betakarítása géppel történik. A sóska egy tenyészidőszakban ötször aratható, termés hozama átlagosan 10 t/ha, így minden évben hektáronként mintegy 50 t takarítható be.

Mivel a sóska évelő növény, egyszeri vetésből 3-5 évig takarítható be, így a fenti műveletsort az ötödik és a kilencedik évben megismételjük. Az ezeket megelőző években természetesen ugyanúgy szükséges a talaj felszántása. A sóska vetőmagigénye 2 kg/ha.

A talaj tavaszi fejtrágyázását és a rovarirtást, permetezést minden évben el kell végezni mind a fitoextrakciós, mind a fitostabilizációs eljárásoknál. Fitoextrakciós eljárásnál a talajt komplexképző, fémmobilizáló adalékkal is kezelhetjük, pl. EDTA-val, illetve annak származékaival. Fitostabilizációt kémiai stabilizálószerrel adagolásával (beszántás, nedvesítés, stb.) kombináljuk.

A betakarított terményt fitoextrakció esetén (sóska, saláta) egy betonlapra épített, könnyűszerkezetes hangárban szárítjuk ki. A szárítást, akár csak a mezőgazdasági munkákat, helyi megbízott végzi. A szárítóépületben 4 db egyenként 1 m széles, 21 m hosszú, 2 m magas, 5 szintes polcrendszerrel helyezzük el. A polcok tulajdonképpen kihúzható dróthálóból állnak, melyeken kb. 10 cm vastagságban teríthető ki a szárítandó növény. A szárítás maximum 2 hétig tart, így folyamatos és fokozatos betakarítás mellett a szárítás kapacitása megfelelőnek mondható. A szárítandó növényanyagot naponta át kell forgatni. Fitostabilizációra használt növények betakarítása, kezelése és hasznosítása növénytől függő technológiával történik, a hasznosítható termék nem szennyezett voltát természetesen kontrollálni kell.

A kiszárított sóska (salátát) konténerbe gyűjtjük, majd veszélyes hulladékégetőbe szállítjuk. A Dorogi veszélyes hulladékégető által megadott költségeket vesszük alapul a számításnál. A talajtisztítás színhelyén a veszélyes hulladék maximum 1 évig tárolható megfelelő rendszabályok betartása mellett. Ha a termés ártalmatlan (nem szennyezett), akkor a mezőgazdaságban általában elterjedt betakarítási és tárolási eljárásokat alkalmazzuk.

Az éves betakarítás befejeztével a területet ismét fel kell szántani. Fitoextrakciós technológia alkalmazása esetén ekkor történik a mobilizáló adalék (EDTA, cyclodextrin, stb.) talajba juttatása, bekeverése. A fitoextrakcióval történt remediáció befejezése után (Cd, Zn, Cu és As megfelelő szintre csökkentése) a maradék fémszennyezettség (Pb, esetleg As) stabilizálása érdekében ún. utószántást követően kémiai stabilizációt végzünk, amely

gyakorlatilag megegyezik a kombinált megoldásban alkalmazott stabilizálással. Kémiai stabilizálásra a második, a hetedik és a tizenharmadik évben van szükség az egyes területrészek utókezelésekor.

Fitostabilizáció esetén a talajban lévő (maradt) szennyezőanyagok felvehetőségének csökkentése érdekében kémiai stabilizálást végzünk. Hektáronként 6 t mészkő kiszórásával a talaj pH-ja kb. fél értékkel megemelhető. A mészkőport Egerből hozathatjuk. Mészkő helyett beringit tartalmú vagy azzal rokon szilikátokat tartalmazó erőművi pernyét, illetve hamut alkalmazhatunk. Ha erőművi pernyét alkalmazunk, akkor abból 3–5 %-nyi mennyiséget kell a talaj felső 20–50 centiméterére számítani. Az oroszlányi pernye megfelelő minőségű, nem minősül veszélyes hulladéknak, tehát korlátozás nélkül használható stabilizálószerként.

14. táblázat: A fitoextrakcióval remediálandó terület nagysága és a termelt növény mennyiség változása az évek során

Év	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Terület (ha)	6,8	6,8	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Sóska (t)	340	340	120	120	120	120	120	60	60	60	60	60	60

A remediáció időtartamának számításakor figyelembe vettük azt a tényt, hogy a terület háttérszennyezettsége a B határérték kb. kétszerese, így a remediáció helyspecifikus célértékét 2B-nek vettük, tehát célunk a határérték kétszeresének megfelelő érték elérése.

Fitostabilizáció alkalmazása esetén a terület nagysága nem változik, mindvégig a teljes terület kezelése, később monitorozása folyik.

Fák alkalmazása fitoextrakcióhoz

A fák alkalmazása fitostabilizációhoz egyre elterjedtebb megoldás. Vannak jó tűrőképességű, közepesen akkumuláló, nagy biomasszatermelő fák, amelyek egy évben többször is betakaríthatóak, hasznosíthatóak. Az égetésük után visszamaradt hamut természetesen ilyenkor is veszélyes hulladékként kell kezelni, tehát csak olyan égetőben szabad égetni, ahol amúgyis veszélyes hulladékot semmisítenek meg vagy veszélyes hulladéknak minősülő hamut (pernyét) nyernek.

Fitoextrakciós technológiában termelt növények hasznosítása

A fitoextrakció költségét kompenzálhatja a termesztett növény hasznosítása. Elsősorban olyan növények termesztése mellett kell döntenünk, amelyek a nagy hozam és a jó akkumuláció mellett hasznosítható növényi termékeket is képeznek, pl. rostokat, olajos magvakat, illóolajokat vagy aromaanyagokat. Ezek hasznosításának feltétele, hogy a hasznosítandó növényi részekben nem akkumuláljanak toxikus fémeket, illetve a feldolgozási technológia során ezektől meg lehessen szabadulni, lehetőleg többletköltség nélkül.

További hasznosítási lehetőség az, ha a növény szelektíven extrahálja az egyes fémeket, így a betakarított növényi anyagból azt érdemes visszanyerni (pl. égetés utáni hamuból) és hasznosítani.

Fitostabilizáció előnyei

A fitostabilizáció annak ellenére, hogy nem jelent teljesen végleges megoldást és irreverzibilis immobilizálást, sok előnyt élvez. Már az első pillanattól, az első

növénygeneráció felnövéstől lényeges kockázatsökkenést jelent a területen, ellentétben a fitoextrakcióval, amely a kezelés teljes ideje alatt megnövekedett kockázatot eredményez (táplálékláncba kerülés), főként akkor, ha kémiai mobilizációval (fémek mozgékonyságának megnövelése a talajban = a talajvíz fokozott veszélyeztetése) kombináljuk. A fitostabilizáció további előnye, hogy nem kell a növényi anyagot veszélyes hulladékként kezelni, és ha jól választunk, akkor a növényt, például az olajos magvakat, fákat, lehet hasznosítani.

A fitostabilizáció további előnye, hogy kiszámítható, míg a fitoextrakció eredménye csak rosszul becsülhető előre. A mi példánkon is látszik, hogy a számításokhoz felhasznált BCF értékek mennyire függenek a konkrét körülményektől és mind az időben, mind a talaj fémtartalmának változásával párhuzamosan változnak. A legnagyobb probléma, hogy gyakorlatilag csak a mozgékony vagy mobilizálható fémek vonhatóak ki növényekkel a talajból, a kevésbé mozgékonyak, ugyanakkor legnagyobb krónikus kockázatokat jelentő As és Pb a gyakorlat számára végtelennek tekinthető idő alatt extrahálható csak ki növények által. Tehát a mozgékonyak eltávolítása után mindenképpen szükség lesz egy fitostabilizációs lépésre, alkalmasint akár 10–20 éves kezelés (költség) után.

A fitostabilizációban alkalmazott növények hasznosítása

A fitostabilizációban alkalmazott növények hasznosítására nagy esélyünk van, hiszen a szennyezőanyag nem hozzáférhető, nem jelenik meg a növényben, tehát széleskörű hasznosításban gondolkodhatunk. Rostnövények, olajos magvak, illóolajokat és aromaanyagokat termelő növények többszörösen is biztonságosak, hiszen a feldolgozási módszer is biztosítja a szennyezőanyagtól való mentesítést.

A fitostabilizáció ugyanakkor kompromisszum a fitoextrakcióhoz képest, hiszen a szennyezőanyag kint marad a környezetben, hosszútávon tehát megmarad a kockázata, mely kockázatot folyamatos kontrollal (a korlátozott mozgékonyság irreverzibilissé tétele: folyamatosan gondoskodni az egyensúly eltoltságáról) képes csak csökkent értéken tartani.

A költség-hatékonyság, illetve költség-haszon számításánál figyelembe vehetjük a hasznosítást, az adalékok alkalmazását, hiszen ezek alternatív lehetőségek.

3.3. A fitoextrakció anyagmérlege:

A számítás menetét a Cd-ra mutatjuk be, a Toka pataktól 2–3 m-es távolságban lévő sávra. A szennyezett terület többi részére és a többi fémre analóg módon végeztük el a számításokat, melyek eredményét a 16. táblázat foglalja össze.

2 m-nél a mért Cd koncentráció: $c_{2m} = 4,75$ mg/kg szárazanyag

3 m-nél a mért koncentráció: $c_{3m} = 4,58$ mg/kg szárazanyag.

Az átlagos koncentrációt a két érték súlyozásával adjuk meg:

$$c_{talaj} = \frac{2 * c_{2m} + 3 * c_{3m}}{2 + 3} = \frac{2 * 4,75 + 3 * 4,58}{5} = 4,648 \text{ mg / kg}$$

A talaj 3200 tonna tömegű és 25 % nedvességtartamú. A talajban lévő összes fém mennyisége:

$$M_{fém} = M_{talaj} * \text{nedvességtartalom} * c_{talaj} = 3200 \text{ t} * 0,75 * 4,648 \text{ mg/kg} = 11,1552 \text{ kg Cd}$$

Mivel a célértékünk a B határérték kétszerese (azonos a háttérszennyezettséggel), így az eltávolítandó Cd mennyisége:

$$M_{fém \text{ eltáv}} = M_{fém} - M_{talaj} * \text{nedvességtartalom} * 2 * c_B = 11,1552 \text{ kg} - 3200 \text{ t} * 0,75 * 2 * 1 \text{ mg/kg} = 11,1552 - 4,8 = 6,3552 \text{ kg Cd}$$

Egy kilogramm hiperakkumuláló sóskaiban lévő fémmennyiség kiszámítása:

$$BCF_{Cd} = c_{sóska} / c_{talaj} = 50$$

$$c_{sóska} = 50 * c_{talaj} = 50 * 4,648 \text{ mg/kg szárazanyag} = 232,4 \text{ mg Cd/kg szárazanyag}$$

$$M_{fém\ sóska} = c_{sóska} * \text{szárazanyagtartalom} = 232,4 \text{ mg/kg} * 0,1 = 23,24 \text{ mg Cd / kg sóska.}$$

Az eltávolítandó 6,3552 kg Cd-ot tehát:

$$M_{sóska} = M_{fém\ eltáv} / M_{sóska} = 6,3552 \text{ kg} / 23,24 \text{ mg} = 273,46 \text{ t sóska fogja kivonni a talajból, feltéve, hogy a BCF = 50 érték elérhető.}$$

1 hektáron évente 50 t sóska terem, így a szennyezett 0,4 ha-os területen a sóska hozama: $50 \text{ t} / \text{év/ha} / * 0,4 \text{ ha} = 20 \text{ t/év}$

$$\text{Remediálási idő} = 273,46 \text{ t} / 20 \text{ t/év} = \underline{\underline{13,7 \text{ év}}}$$
 (a legjobb esetben).

15. táblázat: Kiindulási adatok a számításhoz: fémkoncentráció a talajban

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
2m (mg/kg)	644	4,75	196	2040	920
3m (mg/kg)	72	4,58	106	1020	690
6m (mg/kg)	33,3	3,24	97,6	254	472
9m (mg/kg)	32,1	2,42	73,8	230	420
17m (mg/kg)	31,1	1,42	72,3	84,4	395
B határérték (mg/kg)	15	1	100	100	200
Maximális BCF	35	50	20	1	25

A költségek becsléséhez évenként és sávonként kiszámítottuk a sóska által eltávolított fémmennyiséget, az ehhez szükséges természetett növény mennyiséget és a termésátlag ismeretében a szükséges időt. Ezeket az adatokat a 16. táblázat tartalmazza.

16. táblázat: A számított értékek sávonként

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Fémkoncentráció: 0-2m	644	4,75	196	2040	920
A sóskaiban a fémkoncentráció (mg/kg)	22 540	237,50	3920,0	2 040,0	23 000
A talajból eltávolítandó fém (kg)	2 947,2	13,2	-19,2	8 832	2 496
Szükséges sóska (t)	1 307,5	555,79	-48,98	43 294	1 085,2
50 t/ha hozammal szükséges idő (év)	32,7	13,9	-1,2	1 082,4	27,1
Fémkoncentráció: 2-3m	300,8	4,648	142	1428	782
A sóskaiban a fémkonc. (mg/kg)	10 528	232,40	2 840,0	1 428,0	19 550
A talajból eltávolítandó fém (kg)	649,92	6,4	-139,2	2 947,2	916,8
Szükséges sóska (t)	617,33	273,46	-490,1	20 639	468,95
50 t/ha hozammal az idő (év)	30,9	13,7	-24,5	1 031,9	23,4
Fémkoncentráció: 3-6m	46,2	3,6867	100,4	509,33	544,67
A sóskaiban a fémkonc. (mg/kg)	1617	184,33	2 008,0	509,3	13617
A talajból eltávolítandó fém (kg)	116,64	12,1	-717,1	2227,2	1 041,6
Szükséges sóska (t)	721,34	658,81	-3571	43728	764,94
50 t/ha hozammal az idő (év)	12,0	11,0	-59,5	728,8	12,7
Fémkoncentráció: 6-9m	32,58	2,748	83,32	239,6	440,8
A sóskaiban a fémkonc. (mg/kg)	1 140,3	137,40	1 666,4	239,6	11 020
A talajból eltávolítandó fém (kg)	18,576	5,4	-840,1	285,12	293,76
Szükséges sóska (t)	162,9	391,97	-5041	11 900	266,57
50 t/ha hozammal az idő (év)	2,7	6,5	-84,0	198,3	4,4
Fémkoncentráció: 9-20 m	31,45	1,77	72,82	134,8	403,7

A sóskában a fémkonc. (mg/kg)	1 100,6	88,31	1456,4	134,8	10 091
A talajból eltávolítandó fém (kg)	38,18	-6,2	-3 357,6	-1721	96,46
Szükséges sóska (t)	346,88	-699,1	-23 054	-1E+05	95,59
50 t/ha hozammal az idő (év)	1,6	-3,2	-104,8	-580,4	0,4

Az BCF = 50-es biokoncentrációs faktor optimista becslés eredménye, lehet, hogy nem minden talajon érhető el ez a fémtartalom, a hozam is lehet kisebb a fémtartalmú talajon. Ehhez járul a talaj csökkenő fémtartalmának hatása, mely egyre kisebb hajtóerőt jelent, tehát az idők során emiatt is csökkenhet a növény által felvett fémmennyiség. Ugyanez vonatkozik az eleve kis koncentrációban szennyezett talajokra, ott már az elején sem érhető el mindig a maximális biokoncentráció. Célszerű a biztonság kedvéért 2–3-szoros időgigénnyel tervezni. Akkor viszont egyértelmű, hogy a legszennyezettebb parti sávot ki kell venni a fitoextrakcióból, hiszen 100 évnél hosszabb kezelési idő túl hosszú és költséges.

A konkrét növény kiválasztása és az előkísérletek eredményei alapján lehet pontosítani fenti számítást.

Az ólom nagy része maradni fog, emiatt a mozgékony fémek fitoextrakcióját követően majd stabilizálni kell talajt. A Cd és a Zn eltávolítható, az adatok alapján az As is, a rézből még hiány is keletkezhet, de az ólom jelenléte miatt a fitoextrakciót kémiai stabilizációnak kell majd követnie.

3.4. A kémiai stabilizáció

Gyöngyösoroszi esetében a kémiai stabilizációt kiterjedten alkalmazhatjuk:

1. főtechnológiaként
2. fitostabilizációval kombinálva
3. fitoextrakciót követően a maradék fém kockázatának csökkentésére.

Főtechnológiaként elsősorban a Toka-patak forrásterületén, a bányászati hulladékkal diffúzan szennyezett természeti területen kerül alkalmazásra a kémiai stabilizáció, ahol az adalékanyagok bekeverését követően vagy pionerfajok telepítése vagy a természetes növényzet fokozatos megtelepedése jelenti a revegetációt.

A kémiai stabilizáció fitostabilizációval kombinálva mind a természeti területeken, mind pedig a mezőgazdasági művelés alatt álló kiskertekben alkalmazható.

A fitoextrakció alkalmazását követően azért szükséges a kémiai stabilizáció alkalmazása, mert a toxikus fémek nehezen mobilizálható része belátható időn belül nem csökkenthető a kockázatos szint alá, ezért a mozgékonyak eltávolítását követően a maradék stabilizációjára van szükség.

A fitostabilizáció anyag- és költségigényének kiszámításakor egyszeri vagy többszöri adalékalkalmazással számolhatunk. Ha megfelelő volt az adalékanyag és megtörtént a toxikus fémek irreverzibilis átalakulása immobilis kémiai formává, akkor egyszeri alkalmazás elegendő. Ezt természetesen monitoring adatokkal kell bizonyítani. Amennyiben egyszeri adalékanyag alkalmazás nem bizonyult elegendőnek, a kezelést meg kell ismételni. Az előkísérletek eredményei alapján (2.6.) ez még nem dönthető el, végleges választ a szabadföldi kísérlet hosszú távú követése fogja megadni.

3.5. Monitoringrendszerek

Három féle monitoringrendszert működtetünk, 1. a technológia követését, állandó kontrollját szolgáló technológia-monitoringot, a technológiai paraméterek ellenőrzésére,

illetve a technológia módosítására, 2. a környezeti monitoringot, hogy a technológiából történő szennyezőanyag-kibocsátást megakadályozzuk, illetve elviselhető kockázati szinten tartjuk és 3. az utómonitoringot, amelyet a technológia-alkalmazás befejeztével is fenntartunk egy bizonyos ideig.

Technológia monitoring

A remediáció hatékonyságát folyamatosan nyomon kell követni, ez a technológiai monitoring. Szükséges a talajban mérhető összes és a növények által felvehető fémtartalom meghatározása, továbbá a sóskában mérhető fémtartalom megadása. Ezáltal folyamatosan ellenőrizhető a talaj tisztulása és a kiválasztott növény akkumulációja, a termelt biomassza minősége. Mivel ezen mérések roppant költségesek és időigényesek (mintánként kb. 15 000 Ft), így nem minden évben vizsgáljuk be az összes aratást. Érdekes az aratásokból egy átlagmintát készíteni és a növényekben a felvett fémtartalmat ICP-vel megmérni. Az adott év végén az utolsó szedéskor talajmintát is kell venni, s ennek fémtartalmát ugyancsak ICP-vel lemérni. A minták évenkénti számát a 17. táblázat tartalmazza.

17. táblázat: A technológia monitoring során vizsgálandó minták száma

Év	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Talajminta/év	40	40	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10
Növényminta/év	40	40	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10

Minőségellenőrző monitoring

A kívánt cél eléréséhez szükséges idő vége felé érdemes sűrűbben mintát venni, hogy a lakosság és a hatóságok felé is bizonyítani tudjuk a megfelelő minőséget. Az adott területre kiszámított remediációs idő utolsó évében az utolsó három betakarítás mindegyikét be kell vizsgálatni. Itt is növény és talajmintákról van szó, és ugyanazokat a vizsgálatokat kell elvégezni, mint a technológia-monitoring esetén. Az adatok összefoglalása a 18. táblázatban látható.

18. táblázat: A minőségellenőrzési monitoring során vizsgálandó minták száma

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Talajminta/év		120					60						30
Növényminta/év		120					60						30

Utómonitoring

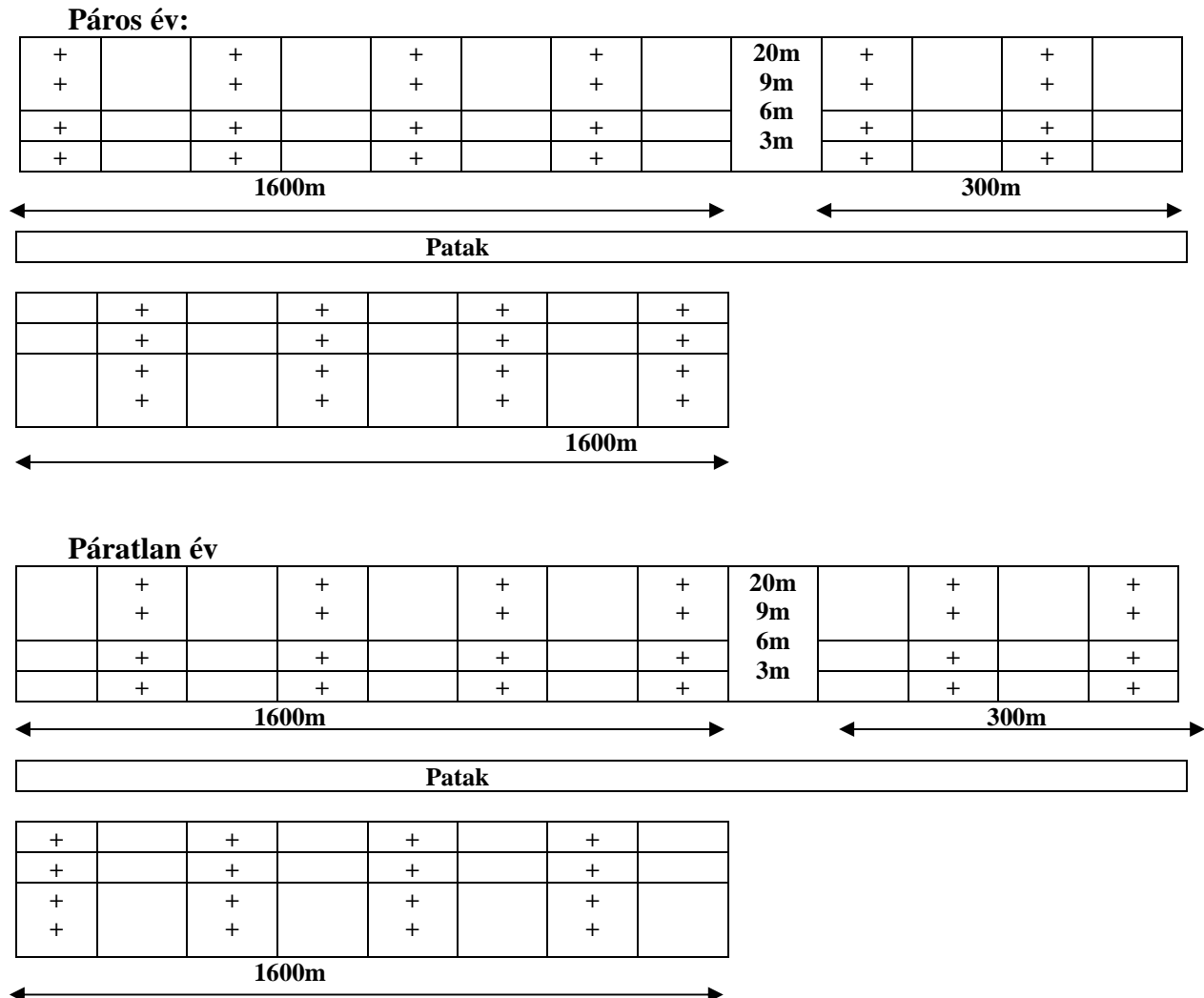
Az utómonitoringra a remediációt követő 3-5 évben van szükség. Ekkor azt vizsgáljuk, hogy a technológia tényleg sikeres volt-e, lett-e valamilyen káros következménye. Ekkor már csak a talajt vizsgáljuk. Az utómonitoring ütemezését a 19. táblázatban látjuk.

19. táblázat: Utómonitoringkor vizsgálandó minták száma

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Talajminta/év	20	20	20			10	10	10				10	10	10
Növényminta/év														

A mintavételi terv elkészítéséhez a szennyezett területet 200 méteres sávokra osztottuk fel. A páros és páratlan években váltakozva veszünk mintát, a mintavétel helyét + jelöli.

A mintavételi tervet az 5. ábra mutatja. A patak két oldalán nem szimmetrikus a kezelés és a mintavétel. A kezeléseik ideje alatt technológia- és környezetmonitoring, a technológia befejeztével utómonitoring folyik. Mivel sávonként eltér a kezelés ideje, ezért a eltér az alkalmazandó monitoringrendszer is.



5. ábra: Mintavételi terv a monitoring rendszerhez

3.6. A remediációs technológia alkalmazásából eredő kockázatok

A remediációs technológia alkalmazásának kockázatai között meg kell különböztetni átmeneti és maradó kockázatokat. El kell különítenünk a munkahelyi, vagyis a munkaterület és a dolgozókat érintő kockázatokat a munkaterületen kívül eső területek ökoszisztémáját és a területet használó lakosságot érintő kockázatokat.

A fitoremediációs technológia, mint további szennyezések forrása:

- a toxikus fémekkel szennyezett növények környezetbe kerülése, táplálékláncba jutása,
- az alkalmazott berendezések és a szükséges energia előállítás (mezőgazdasági és laboratóriumi gépek műszerek, a szárító terület üzemeltetése.) hatása,

- a technológiában használt adalékanyagok (mobilizációt segítő adalék, műtrágya, immobilizációt segítő adalék) hatása. Itt elsősorban a mobilizációt segítő természetes folyamatok és nem természetes adalékanyagok hatására kell ügyelni, hiszen ezek nem csak a növényi felvétel céljára mobilizálnak, hanem általánosan, tehát a továbbterjedés, a vízzel való bemosódás kockázata megnőhet.

A természetett fémextraháló növények szigorú kontroll alatt tartásával (üzemi terület), és kontrollálatlan felhasználásuk tiltásával a humán egészségkockázat minimális szintre csökkenhető. Az ökoszisztéma hozzáférése természetesen mindig csak részben korlátozható (nagyobb növényevők kizárhatóak, pl. szarvas, de a rágcsálók, a rovarok és a madarak nem akceptálják a kerítést, így az ebből adódó kockázatot mindenképpen figyelembe kell venni).

GyöngyöSOROSZIBAN mindezek elhanyagolhatóan kis kockázatot jelentenek a talajszennyezettség meglévő kockázatához képest. A mobilizáló adalék kontrollált alkalmazása minimális mértékben veszélyezteti a talajvizet, lévén, hogy a talajvíz mélyen van, a terület nem vízbázis.

A fitoremediációs technológia humán egészségkockázatai a dolgozókra és az érintett lakosságra:

- a toxikus fémekkel szennyezett talajjal való érintkezés bőrfelülettel és belégzéssel,
- a nehézfémekkel szennyezett növényekkel való érintkezés (itt mind a dolgozókra, mind pedig a környékbeli lakosságra fokozottan oda kell figyelni. Tudatosítani kell bennük a veszély valódi mértékét),
- az adalékanyaggal való érintkezés (az alkalmazott adalékanyaggal megbízott szakember dolgozik, szaktudást feltételezve az ezzel járó kockázat elhanyagolható).

A technológia befejezése utáni, maradék kockázat

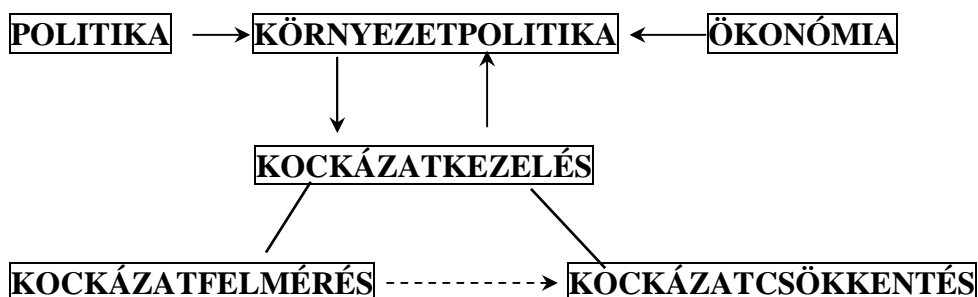
Minden technológia esetében van maradék kockázat. Ez a kockázat kapcsolódhat a megváltoztatott helyszínhez, a helyszínen maradt szennyezőanyaghoz, adalékanyaghoz, a megváltozott mikroflórához. Nem elhanyagolhatóak az eltávolított talaj, üledék, szennyezőanyagban dús frakciók vagy eltávolított koncentrált szennyezőanyag kockázatai, melyek ugyan nem az eredeti szennyeződés helyszínén lépnek fel, hanem a szennyeződést tartalmazó anyag, talaj, üledék, veszélyes hulladék elhelyezésekor.

A maradék kockázat jellemzésénél is érdemes megkülönböztetnünk azt a területet, ahol a munkálatok folytak a tágabb környezettől. A maradék kockázat csökkentésére további intézkedések hozhatók.

Fitoremediáció:

- az összetételben, tápanyag-ellátottságban, mikroflórában megváltozik a terület. (az új viszonyokhoz az élőlények adaptációjára van szükség),
- az adalékanyag maradék kockázata (a túlzott műtrágyázás felboríthatja a talajban lévő tápanyag egyensúlyt. ezért használata fokozott odafigyelést igényel),
- a kármentesített terület későbbi használatától függő ökológiai és humán egészségügyi kockázatok: Ha a remediálás során, sikerül a területen a nehézfém koncentrációt a határérték alá csökkenteni, akkor a mezőgazdasági termelés korlátozások nélkül folytatódhat, ha a nehézfém koncentráció meghaladja a határértéket akkor a terület mezőgazdasági termelésre csak korlátozottan használható, csak olyan növények termesztethetők, amelyek nem akkumulálják a szennyező nehézfémeket, pl. bogyósok (szőlő, ribizli, málna, őszi barack, alma, paradicsom, sárga és görögdinnye).

4. Környezeti kockázat és kommunikáció



6. ábra: Kockázatkezelés helye és szerepe

Egy sok ember tulajdonát képező nagy kiterjedésű terület remediációjakor elengedhetetlen a tulajdonosok, a szakemberek és a hivatalos szervek közötti kapcsolat megteremtése. Ahhoz, hogy egy remediáció sikeres legyen négy kulcsfontosságú csoport kooperációjára van szükség:

1. Tulajdonosok,
2. Technológusok,
3. Önkormányzat,
4. Környezetvédelmi felügyelőség és más hatóságok.

Ezen négy csoport tagjainak együttműködése és összehangolt hosszú távú munkája szükséges a cél megvalósítása érdekében. Ahhoz, hogy a csoportok közötti kapcsolat létrejöhessen, megfelelő PR-munka kell, ezzel foglalkozik az úgynevezett kockázat-kommunikáció.

A tervek szerint a helyszínen, a polgármesteri hivatalban nyitunk egy irodát. Az iroda környezetvédelmi és agrár szakembereket foglalkoztat majd, akik szoros kapcsolatot tartanak a Környezetvédelmi Felügyelőség embereivel. Ezen kis csoport munkája a következőkből áll:

- tájékoztatják a település lakóit a szennyeződés és a technológia kockázatairól,
- felvilágosítják az embereket a procedúra jogi és gazdasági hátteréről,
- tanácsot adnak a remediáció kivitelezésére vonatkozóan,
- biztosítják a kommunikációt a fent említett négy kulcsfontosságú csoport között.