BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

ÉRTÉKEK A MAGYAR VÖRÖSISZAPBAN: HASZNOSÍTÁS TALAJJAVÍTÓ ANYAGKÉNT ÉS KRITIKUS NYERSANYAGOK FORRÁSAKÉNT

Tézisfüzet

Ujaczki Éva

Témavezető: Dr. Mónika Molnár
Konzulensek: Dr. Feigl Viktória, Dr. Markus Lenz

Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék
Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar

Institute for Ecopreneurship, University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland,
School of Life Sciences, Muttenz, Switzerland

2017

Bevezetés

A doktori disszertáció célja olyan korszerű technológiák kidolgozása, amelyek alkalmasak a vörösiszap újrahasznosítására, kihasználva a benne rejlő értékeket.

A vörösiszap az alumínium gyártás melléktermék, amely a bauxit feldolgozása közben keletkezik a Bayer eljárás során. A keletkező nagy mennyiségnek (~150 millió tonna évente), valamint az ártalmatlanítással összefüggő hatásoknak (veszélyeknek) és kockázatnak köszönhetően a vörösiszap kezelése továbbra is globális probléma. Ezért kiemelt szükség van olyan technológiák kidolgozására, amelyek a vörösiszap hasznosítását célozzák[1].

A vörösiszapot hasznosító technológiák három fő csoportra bonthatók Klauber és mtsai[1] szerint: építési és kémiai alkalmazások[2], környezetvédelmi valamint agronómiai alkalmazások[3] és kohászati alkalmazások[4].

Az ipari forrásokból, például a bányászatból származó hulladékok és melléktermékek gyakran értékes fémeket tartalmaznak. Ezeknek a hulladékoknak a visszanyerése környezetkímélő eljárással történhet és gazdaságilag járható utat képvisel. Az évente keletkező nagy mennyiségnek köszönhetően a vörösiszap egy kihasználatlan másodlagos forrása a kritikus nyersanyagoknak és további értékes fémeknek.

A talajromlási és a talajszennyezési folyamatoknak köszönhetően csökken talajaink tápanyagtartalma, pufferkapacitása és detoxikáló képessége. Így napjainkban kulcsfontosságú a talajok védelme, valamint funkcióinak és általános minőségének megóvása. A talaj védelme mellett az emberiség számára egy másik fontos feladat az egyre nagyobb mennyiségben keletkező hulladék kezelése és hasznosítása.

Ezen két problémakörhöz kapcsolódóan doktori kutatásomban két vörösiszap hasznosítását célzó technológia megalapozására és kidolgozására került sor. A kutatás-fejlesztési munka egyik részében talajjavítási kísérleteket végeztem, rávilágítva a hulladékok hasznosításának lehetőségeire talajban kockázat alapú megközelítéssel. Emellett kutatási munkám másik részében egy olyan korszerű eljárást dolgoztam ki, amely alkalmas a kritikus nyersanyagok visszanyerésére vörösiszapból.

A dolgozat fő célkitűzései a következők:

A doktori disszertáció fő célkitűzése olyan korszerű technológiák kidolgozása, amelyek a vörösiszap újrahasznosítására alkalmasak kihasználva a benne rejlő értékeket.

Főbb céljai a következők:

1. meghatározni azt a vörösiszap mennyiséget, amely bekeveréskor nem jelent kockázatot a talajra;
2. felmérni a vörösiszap kedvező, talajjavító hatásait egy speciális, Kelet-Magyarországról származó savanyú homoktalajon;
3. jellemezni és értékelni a vörösiszap-talaj keverék hasznosíthatóságát adalékanyagként hulladéklerakó felszíni rétegében egy települési szilárd hulladéklerakóban Magyarországon;
4. létrehozni a magyar vörösiszapban megtalálható kritikus nyersanyagok (beleértve ritka földfémek és további értékes elemek, mint Ni és V) leltárát;
5. kidolgozni egy olyan technológiát, amely alkalmas kritikus nyersanyagok kinyerésére a magyar vörösiszapból kombinált savas kioldással és folyadék-folyadék extrakciós eljárással.

---

[1] Power *et al*., 2011. Bauxite residue issue: I. Current Management, disposal, and storage practices. *Hydrometallurgy* 108, 33–45.

[2] Kalkan, E., 2006. Utilization of bauxite residue as a stabilization material for the preparation of clay liners. *Eng. Geol.* 87 (3–4), 220–229.

3 Feigl *et al*., 2012. Red mud as a chemical stabilizer for soil contaminated with toxic metals. *Water Air Soil Pollut.* 223 (3), 1237–1247.

4 Liu, Z., Li, H., 2015. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud–A review. *Hydrometallurgy* 155, 29–43.

1. Irodalmi áttekintés

1.1. A vörösiszap és az ártalmatlanítással összefüggő problémák általános áttekintése

Az alumíniumgyártás két fő lépésből áll. Az első lépés az alumínium finomítás (Bayer eljárás), amely magában foglalja az alumínium-oxid termelést a bauxit ércből, és a második lépés az alumínium-oxid olvasztása (Hall–Héroult eljárás), ahol az alumínium-oxid alumínium fémmé alakítása történik.

A vörösiszap a Bayer eljárás melléktermék, amely a bauxit érc koncentrált nátrium-hidroxidos kezelését követően keletkezik magas hőmérsékleten és nyomáson alumíniumot hordozó ásványi anyagok kinyerése céljából (elsősorban gibbsit, böhmit, diaszpor)[5]. A becslések szerint 2,7 milliárd tonna vörösiszapot termeltek világszerte 2007-ig és ez a mennyiség kb. 150 millióval növekszik évente[1]. 1 tonna alumínium termelés 0,8 és 1,5 tonna közötti vörösiszap mennyiséget eredményez[6]. A tárolt vörösiszap jelentős környezeti kockázatot jelenthet a helyi környezetben a lúgosságának (pH általánosan 10-13 között változik), magas Na tartalmának (>50 g L^{-1}), finom szemcseméretének (0,7 µm a nano-szemcsés hematit medián mérete és 1,3 µm a kancrinit medián mérete)[7], és a fémek és félfémek (pl., Al, As, Cr, Mo, és V) kioldódásának köszönhetően a talaj-víz környezetbe, amint az Ajkán bekövetkezett katasztrófa is mutatta 2010-ben Magyarországon[7]. Ezért sürgető szükség van új vörösiszap ártalmatlanítási stratégiákra.

A topográfia, a földterület és az eső mennyisége a három fő meghatározó tényező a megfelelő hulladékkezelési módszer kiválasztásakor[1]. Az 1970-es évekig a tengerbe eresztés és a medencékbe ülepítés volt a két meghatározó tárolási módszer. A két újabb módszer az úgynevezett “dry stacking” (vörösiszap nem száraz a tárolás során) és a „dry cake” tárolás. Több mint 50 éves kutatás és több száz kiadvány és szabadalom létezik, amelyek azzal foglalkoznak, hogy mire használhatjuk a vörösiszapot. A vörösiszap újrahasznosításánál minden lehetőségét figyelembe veszünk, de a hangsúly a legmagasabb volumenű felhasználásokra a legkisebb kockázattal járó technológián van.

Magyarországon, Ajkán jelenleg egyetlen működő alumínium gyártó üzem van, ahol egy vörösiszap tározó található. Ezenkívül két vörösiszap tározó van még Magyarországon (Almásfüzitő és Mosonmagyaróvár) amelyek bezárt alumínium gyártó üzemekhez kapcsolódnak.

Körülbelül 39,8 millió tonna vörösiszapot tárolnak Magyarországon úgynevezett zagytározó tavakban (sűrűség, 25–30 $^{w}/_{w}$ %), amiből 6,4 millió tonna Mosonmagyaróváron, 14,4 millió tonna Almásfüzitőn és 19,0 millió tonna Ajkán található.

1.2. Talaj és hulladékok hasznosítása talajban

A talajok alapvető ökoszisztéma-szolgáltatásokat nyújtanak mind az ökoszisztéma, mind az emberi szükségletek kielégítésére. Az intenzívebb emberi tevékenységek és a terjeszkedés következtében egyre nagyobb nyomás nehezedik a szárazföldi erőforrásokra, ami a talaj minőségének romlását eredményezi. A különböző emberi tevékenységek vagy környezeti tényezők nagymértékben befolyásolják a talajfunkciókat és a biológiai sokféleséget, valamint az élőhelyek minőségének és a tápanyagok elérhetőségének megváltozását okozzák, ami az egyes fajok változatosságának változását eredményezi. A megfelelő talajműködés alapvető fontosságú életet támogató funkció, ezért a talajminőség fenntartása létfontosságú a környezeti fenntarthatóság szempontjából, ezért növekvő érdeklődés mutatkozik az olyan talajok minőségének és teljesítményének a javítására, amelyek az emberi tevékenység következtében leromlottak. A globális problémák között, a talajvédelem fontossága fokozódik a talajromlásnak a világ élelmezésbiztonságára és a környezet minőségére gyakorolt hatása miatt.

A talaj védelme mellett az emberiség számára egy másik fontos feladat az egyre nagyobb mennyiségben keletkező hulladékok kezelése és hasznosítása.

---

[5] Gräfe, M., Klauber, C., 2011. Bauxite residue issues: IV. Old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation. *Hydrometallurgy* 108 (1–2), 46–59.

[6] Liu, X., Zhang, N., 2011. Utilization of red mud in cement production: a review. *Waste Manage. Res.* 29(10), 1053–1063.

[7] Mayes *et al.*, 2011. Dispersal and attenuation of trace contaminants downstream of the Ajka bauxite residue (red mud) depository failure, Hungary. Environ. Sci. Technol. 45, 5147-5155.

Ehhez a két kérdéshez kapcsolódóan néhány kísérletet végeztek a vörösiszap talajjavítás célú félvásznasára. A mezőgazdaságban a homokos talaj foszfortartalmának növelésére alkalmazták[8] valamint a savanyú talajok alacsony pH-jának növelésére[9].

A vas, alumínium és tektoszilikát vegyületek együttes jelenlétének köszönhetően a vörösiszap alkalmas toxikus fémek immobilizációjára szennyezett talajból[10], toxikus fémek eltávolítására szennyvízből[11] és a talaj tápanyagtartalmának a kioldódásának a csökkentésére[12].

A kockázatokon alapuló megközelítés és a hulladékok értékalapú kiértékelése lehetővé teszi bizonyos hulladékok (pl. vörösiszap) alkalmazását degradált vagy alacsony minőségű talajokban azért, hogy javítsuk a talaj minőséget a hulladék hasznosítására szolgáló technológiával. Ugyanaz a hulladék nem jelent kockázatot egy földhasználatra, de egy másikban nagy kockázatot jelent. Ezért különösen fontos a környezeti monitoring a talajban történő hulladékhasznosítás során, beleértve a fizikai-kémiai, biológiai és környezeti toxicitási vizsgálatokat is.

1.3. Kritikus nyersanyagok

A kritikus nyersanyagok alternatív forrásainak feltérképezésé sürgős, mivel a világgazdaság nagymértékben függ a biztonságos ellátásuktól[13], pl. elektronikus eszközök gyártására és sok más technológia. A kritikus nyersanyagok olyan anyagként definiálhatók, amelynek nagy a kínálati kockázata és az átlag feletti gazdasági jelentősége a többi nyersanyaghoz képest. A nyersanyagok ellátási kockázatának kialakulása a termelés földrajzi koncentrációjának [pl., 99% a ritkaföldfémeknek (REEs) Kínában termelt], politikai és gazdasági stabilitásnak, a potenciális helyettesítési és újrahasznosítás lehetőségeknek köszönhető[13].

Az ellátási kockázat, eddig kihasználatlan forrásoknak (elsődleges és másodlagos) a feltérképezésével csökkenthető. Kiváló másodlagos források lehetnek például a pernyék, bontási hulladék vagy e-hulladék. Egyik eddig kihasználatlan kritikus nyersanyagok másodlagos forrása lehet a vörösiszap. A bauxit érc földrajzi eredetétől és az alumínium gyártás paramétereitől függően a vörösiszap jelentős mennyiségben tartalmazhat gazdaságilag érdekes fémeket[14]. A legnagyobb mennyiségben jelenlévő fémek kinyerési jól ismert [vas (Fe), alumínium (Al), titánium (Ti)][15], csak néhány tanulmány foglalkozott a nyomokban megtalálható értékes elemek kinyerésével a vörösiszapból mint például ritkaföldfémek (REE). Ezek a tanulmányok kizárólag a nagymennyiségben jelenlevő elemekkel foglalkoztak a ritkaföldfémek közül, mint például lantán (La) és cérium (Ce)[16] és néhány esetben a szkandiummal is (Sc)[16]. Ezzel szemben a vanádium (V), cirkónium (Zr) és gallium (Ga) kinyerése vörösiszapból egyre jelentősebb gazdasági szempontból. További kritikus nyersanyagokat tartalmazhat a vörösiszap, de ezek eddig nem voltak értékelve (pl. Co, Cr, In).

A vörösiszapban kisebb mennyiségben megtalálható kritikus nyersanyagok visszanyerésére irányuló feldolgozás biztosan szelektív extrakciót igényel, ahol a Fe és Al feloldatlan marad.

---

8 Summers *et al*., 1993. Bauxite residue (red mud) increases phosphorus retention in sandy soil catchment in Western Australia. *Fertil. Res*. 34, 85–94.

9 Snars *et al*., 2004. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils. *Aust. J. Soil Res*. 42 (3), 321–328.

10 Gadepalle *et al*., 2007. Immobilization of heavy metals in soil using natural waste materials for vegetation establishment on contaminated sites. *Soil Sediment Contam*. 16, 233–251.

11 Garau *et al*., 2011. Long-term influence of red mud on As mobility and soil physico-chemical and microbial parameters in a polluted sub-acidic soil. *J. Hazard. Mater*. 185, 1241–1248.

12 Phillips, I.R., 1998. Use of soil amendments to reduce nitrogen, phosphorus and heavy metal availability. *J. Soil Contam*. 7, 191–212.

13 European Commission, Report on critical raw materials for the EU, 2014. http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm.

14 Fuller *et al*., 1982. Reclamation of red mud (bauxite residues) using alkaline-tolerant grasses with organic amendments. *J. Environ. Qual*. 11 (3), 533–539.

15 Agatzini-Leonardou *et al*., 2008. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure. *J. Haz. Mat*. 157: 579–586 (2008).

16 Borra *et al*., 2015. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Miner. Eng*. 76, 20–27.

2. Anyagok és módszerek

2.1. Talajjavítási kísérlet

A talajjavítással kapcsolatos hulladékhasznosítási technológia kidolgozásának első lépése egy mikrokozmosz szintű laboratóriumi vizsgálat volt, hogy megértsük a vörösiszap hatását az Ajkai vörösiszap katasztrófa által elárasztott talajkörnyezetére. A második talajjavító technológia kidolgozását célzó laboratóriumi mikrokozmosz kísérletben a vörösiszap kedvező hatását tanulmányoztam savanyú homokos talajba keverve.

A kutatás célja volt a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) talajadalékként való felhasználását támogató technológia kidolgozása. Ezért egy szabadföldi léptékű kísérletben a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) kedvező hatásait tanulmányoztam a hulladéklerakó takarórétegében adalékanyagként keverve, azzal a céllal, hogy hasznosítsam a hulladékot, ezáltal csökkentve a hulladékártalmatlanítás költségeit és értéknövelt terméket biztosítva.

Mikrokozmosz kísérlet – I.

- *Laboratóriumi mikrokozmosz kísérlet (8 hónap)*
- Mikrokozmosz összetétele: 5, 10, 20, 30, 40 $^{w}/_{w}$% vörösiszap talajban
- Cél: meghatározni a károsan még nem ható vörösiszap arányt
- Kérdések: Mennyi vörösiszap keverhető talajba káros hatás (környezeti kockázat) nélkül? Hogyan reagál a talajbióta a vörösiszapra?

Mikrokozmosz kísérlet – II.

- *Laboratóriumi mikrokoz mosz kísérlet (10 hónap)*
- Mikrokozmoszok összetétele: 5, 10, 20, 30, 40, 50 $^{w}/_{w}$% vörösiszap savanyú homokos talajban
- Cél: meghatározni a vörösiszap előnyös, talajjavító hatásait, speciális savanyú homokos talajon Kelet-Mo.-ról
- Kérdések: Mennyi vörösiszap keverhető talajba káros hatás (környezeti kockázat) nélkül? Milyen előnyös hatásai vannak a vörösiszapnak a savanyú homokos talajon?

Szabadföldi talajjavítás kísérlet

- *Szabadföldi kísérlet a hulladéklerakón (10 hónap)*
- Szabadföldiparcellék összetétele: 5, 10, 20, 50 $^{w}/_{w}$% vörösiszap-talaj keverék (BRSM) altalajban
- Cél: vörösiszap-talaj keverék (BRSM) alkalmazhatóságának értékelése hulladéklerakó felszíni rétegére vonatkozóan egy települési szilárd hulladéklerakóban Magyarországon
- Kérdések: Mennyi vörösiszap-talaj keverék (BRSM) keverhető talajba káros hatás (környezeti kockázat) nélkül? BRSM alkalmazható hulladéklerakó rendszer felszíni rétegén?

1. ábra *Célok és alapvető kérdések az értekezés első részében, ahol a magyar vörösiszap talajjavítást célzó kísérletekben volt értékelve*

A különböző mennyiségű talajba kevert vörösiszap és vörösiszap-talaj keverékek (BRSM) hatását a talajra integrált monitoring módszeregyüttessel követtük nyomon, amely magában foglalja a fizikai, kémiai, biológiai vizsgálatokat és a direkt kontakt szabványosított, valamint az újonnan kifejlesztett és módosított ökotoxicitási teszteket is.

2.2. Kinyerési kísérlet

Mivel a vörösiszap jelentős mennyiségű kritikus nyersanyagot tartalmazhat, másodlagos forrásként történő felhasználását meg kell vizsgálni. Egy olyan technológia kifejlesztését terveztem, amely nem csak a vörösiszapban található gazdaságilag érdekes elemek kinyerését szolgálja, hanem lehetőséget nyújt a vörösiszap lúgosságával kapcsolatos kockázatok mérséklésére az ártalmatlanítás után is.

A magyar vörösiszapból értékes elemek (beleértve a ritkaföldfémeket is) kinyerését célzó kísérletben egy átfogó leltárt hoztam létre röntgenfluoreszcencia (XRF) analízis, valamint egyidejűleg mikrohullámú energia és királyvizes feltárást követő induktív csatolású plazma-tömegspektrometria (ICP-MS) segítségével.

Ezután számos hagyományos extrahálószert értékeltem a ritkaföldfémek kinyerése céljából. Végül a ritkaföldfémek extrahálhatóságát szelektív savkioldással is vizsgáltam ebben a doktori kutatásban.

Összehasonlító értékeléshez a kivont kritikus nyersanyagok gazdasági potenciálját határoztam meg, amely az összes kivont értékes elem gazdasági értékének az összege.

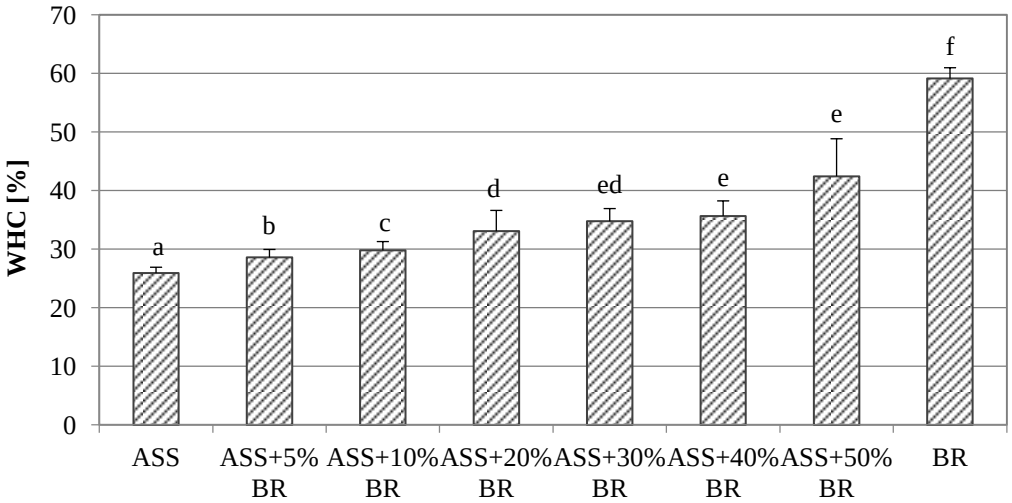
2. ábra *Célok és alapvetőkérdések az értekezés második részében, ahol a vörösiszap, mint kritikus nyersanyagok forrása volt értékelve*

3. Eredmények

3.1. Talajjavítási kísérlet

Ahogyan a vörösiszapot (BR) számos alkalmazásban sikeresen alkalmazták meszező anyagként, mi is azt találtuk, hogy még a legalacsonyabb ajkai vörösiszap keverési arány (5 $^{w}/_{w}$ %) is növelte a savanyú homokos talaj (ASS) pH-ját (5,4) a kissé lúgos tartományba (7,4) a mikrokozmosz kísérletben.

A talajba kevert vörösiszap szignifikánsan javította a homokos talaj víztartóképességét (WHC) mindkét mikrokozmosz kísérletben (3. ábra) és a szabadföldi kísérletben. A víztartóképesség javulása valószínűleg az iszap szemcsék homokos talajhoz keverésének köszönhető, ami a porozitás és a pórusméret-eloszlás változásait eredményezi.



3. ábra *Vörösiszap hatása a víztartóképességre (WHC) a 10. hónapban. Azonos betűk nem mutatnak szignifikáns eltérés p=0.05 (ASS: savanyú homokos talaj; BR: vörösiszap)*

A vörösiszap nagy koncentrációban tartalmazhat potenciális toxikus fémeket és félfémeket, beleértve As, Cr, Ni és Pb, amelyek alapvetően a vörösiszap üledék nehezen ülepíthető frakciójához kapcsolódnak. A vizsgált vörösiszap teljes As, Cd, Cr, Ni és Pb tartalma (királyvíz oldható) volt magasabb, mint a megengedett magyar határérték talajokra (magyar 6/2009 (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM rendelet). A talajok fémtartalma nőtt a vörösiszap hozzáadásával, várakozásnak megfelelően. A környezeti kockázatot jelentő fémek az As, Cr, Ni és Na voltak mindkét mikrokozmosz kísérletben. Az As, Cr és Ni koncentrációk meghaladták a magyar határértékeket talajokra (As: 15 mg kg^{-1}; Cr: 75 mg kg^{-1}; Ni: 40 mg kg^{-1}) a mikrokozmoszokban (>5 $^{w}/_{w}$ % és >10 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap hozzáadásánál). Az As volt az egyetlen elem, amely koncentrációja meghaladta a megengedett magyar határértéket talajokra a vörösiszappal kevert parcellákban a szabadföldi kísérletben, amikor a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) keverés nagyobb volt, mint 20 $^{w}/_{w}$ %. A Ni koncentrációja szintén meghaladta a határértéket, de csak a vörösiszap-talaj keverékben (BRSM).

A vörösiszap talajba keverése szignifikánsan növelte a talaj teljes és vízoldható Na tartalmát a kezeltelen talajhoz képest a vörösiszap Na tartalmának köszönhetően. Gruiz és mtsai.[17] által javasolt helyspecifikus határérték Na-ra 900 mg kg^{-1} az ajkai régióban található talajra. A Na koncentrációja már 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszapot tartalmazó talajban is meghaladta a határértéket mindkét mikrokozmosz kísérletben és 10 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap-talaj keveréket (BRSM) tartalmazó altalajban is a szabadföldi kísérletben.

A vörösiszap-talaj keverék (BRSM) csurgalékvizének pH-ja nem különbözik szignifikánsan sem az altalaj (LQS) pH-jától sem pedig a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) és altalaj keverékek pH-jától,

[17] Gruiz *et al*., 2013. Environmental risk assessment of red mud contaminated soil in Hungary. Proceeding of AquaConsoil 2013 Conference 16–19 April 2013, Theme C: Assessment and monitoring, 2013, paper 2292.

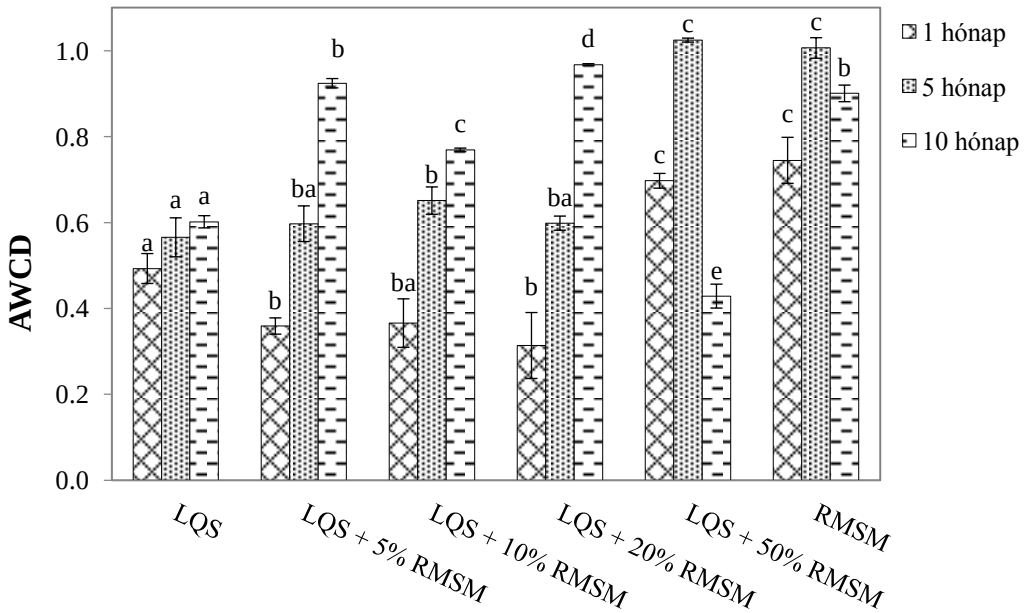
mivel a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) a légköri érintkezés által már semlegesítve volt. Mivel az altalajnak (LQS) már a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) keverést megelőzően magas B, Mo, Na, Ni, Se, és Zn tartalma volt, a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) nem befolyásolta szignifikánsan a csurgalékvíz fémtartalmát a B és Mo kivételével.

Az első mikrokozmosz kísérletben a talaj mikrobiológiai aktivitásának jellemzésére meghatároztam az aerob heterotróf baktériumszámot azért, hogy megbecsüljem a talajba keverhető, károsan még nem ható vörösiszap mennyiséget. A Biolog EcoPlate rendszert alkalmaztam a második mikrokozmosz kísérletben annak érdekében, hogy megvizsgáljam a vörösiszap hatását a savanyú homokos talajon (ASS, mikrokozmosz kísérlet II) valamint a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) hatását a gyenge minőségű altalajon (LQS, szabadföldi talajjavítás kísérlet). A Biolog rendszer eredményei különböző mutatók alapján lettek értékelve, mint például átlagos színfejlődési érték (AWCD), szubsztrátcsoportok átlagos színfejlődési értéke (SAWCD), Shannon diverzitás index (H), szubsztrátszám (SR) és Shannon egyenletlenség (E).

A második mikrokozmosz kísérletben az átlagos színfejlődési értékek azt mutatták, hogy az 5 $^{w}/_{w}$ %, 10 $^{w}/_{w}$ % és 20 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap talajhoz keverése növelte a mikroflóra aktivitását a savanyú homokos talajban (ASS) rövidtávon (5 hónap), de ez a hatás nem tartott hosszútávon (10 hónap).

A Shannon diverzitás index értékei kis mennyiségű vörösiszap (5–20 $^{w}/_{w}$ %) bekeverése esetén szignifikánsan nem különbözött a savanyú homokos talajra mért értékektől rövidtávon a második mikrokozmosz kísérletben, azonban a kísérlet végén, a 10. hónapban a bakteriális diverzitás szignifikánsan csökkent minden vörösiszappal kevert összeállításban a kezeltelen savanyú homokos talajhoz viszonyítva. Nagyobb mennyiségű vörösiszap (30–50 $^{w}/_{w}$ %) hozzáadása kerülendő a talaj mikroflórájára gyakorolt kedvezőtlen hatása következtében, amelyet az összes kiszámított végpont mutatott. Ebben a kísérletben a maximálisan talajba keverhető vörösiszap mennyiség, amely még tolerálható a talaj ökoszisztéma által 5 $^{w}/_{w}$ %, ezért ezt a mennyiséget nem javasolt átlépni alkalmazás esetén. Ez megegyezik az első mikrokozmosz kísérletben meghatározott talajban élő baktériumszám által mutatott eredményekkel, mivel 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszappal kevert mikrokozmoszban nem csökkent az aerob heterotróf élősejtek száma a kezeletlen talajhoz képest.

A vörösiszap-talaj keverék (BRSM) altalajhoz (LQS) adagolása a szabadföldi talajjavítás kísérletben maximum 20 $^{w}/_{w}$ % bekeverésig volt előnyös hatással a mikrobiális aktivitásra az AWCD alapján (4. ábra).



4. ábra *Átlagos színfejlődési értékek (AWCD) 120 óránál. Azonos betűk nem mutattak szignifikáns különbséget p=0.05 (LQS: gyenge minőségű altalaj; BRSM: vörösiszap-talaj keverék)*

Azonban 50 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap-talaj keverék (BRSM) bekeverése csökkentette a mikrobiális aktivitást (AWCD értékek, 4. ábra) és a diverzitást (H értékek alapján). A vörösiszap-talaj keverék (BRSM) mikrobiális aktivitást fokozó hatása a 10. hónap végéig tartott, elletétben a második mikrokozmosz kísérletben rövidtávon megfigyelt hatással. A biológiai eredmények alapján javasolható maximálisan bekeverhető vörösiszap-talaj keverék (BRSM) mennyisége 20 $^{w}/_{w}$ %.

A vörösiszap potenciális toxikus hatását a következő tesztorganizmusokkal vizsgáltam *A. fischeri* (lumineszcens baktérium), *T. pyriformis* (egysejtű állat), *S. alba* (növény) and *T. aestivum* (növény) and *F. candida* (állat).

5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap bekeverése nem volt toxikus hatással az *A. fischeri*-re nézve a második mikrokozmosz kísérletben, az első mikrokozmosz kísérlethez viszonyítva, ahol már 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap is biolumineszcencia gátlást okozott, amely Cu egyenértékben kifejezve 1238 mg Cu kg^{-1} felel meg a talajban az első hónapban (nagyon toxikus).

Mindezek mellett, 20 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap-talaj keverék (BRSM) alkalmazása volt a legtoxikusabb az *A. fischeri*-re, amely biolumineszcencia gátlást okozott a szabadföldi talajjavítás kísérletben, azonban a mérsékelten toxikus tartományban. A vörösiszap-talaj keverék (BRSM) gátló hatása csökkenő tendenciát mutatott a nem-toxikus tartományba a kísérlet 10 hónapja alatt, amely megegyezett a mikrokozmoszban tapasztalatható hatással.

A vörösiszap növénynövekedésre kifejtett hatásának a tanulmányozása során 20–40 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap bekeverése eredményezett *S. alba* gyökér és szár növekedés gátlást az első, 8 hónapos mikrokozmosz kísérletben, a kezeltelen ajkai talajhoz, valamint 5 $^{w}/_{w}$ % és 10 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap kezeléshez mérten. 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap gátló hatása elfogadható volt, amíg 15% alatt maradt. Nagyobb mennyiségű vörösiszap savanyú homokos talajba (ASS) keverve negatívan befolyásolta a növénynövekedést. Az ED_{50} értékek azt mutatták, hogy a *T. aestivum* növény érzékenyebb volt a *S. alba*-hoz képest a mikrokozmosz kísérletben. Figyelembevéve mind a gyökér és szár növekedést elmondható, hogy 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap alkalmazása nincs szignifikáns negatív hatással a talaj mikrofolórájára hosszútávon (8 hónap). Továbbá, a legnagyobb gátlási százalék az altalajhoz (LQS) viszonyítva a *S. alba* gyökérnövekedés gátlásnál volt látható a szabadföldi kísérletben a csak vörösiszap-talaj keveréket (BRSM) tartalmazó parcellában.

5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap bekeverése nem okozott gátló hatást a *T. pyriformis* egysejtű állatra, mivel hasonló értékeket határoztam meg a kezeletlen talajban is. A legnagyobb gátlás (82%) hosszútávon 40 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap bekeverése során volt tapasztalható.

A *F. candida* (Collembola) halálozási teszt azt mutatta a második mikrokozmosz kísérletben, hogy a növekvő vörösiszap arány a talajban nem okozott gátló hatást a vizsgált tesztorganizmuson a kezeletlen talajhoz mérten a 40 $^{w}/_{w}$ %vörösiszap bekeverés kivételével. Hasonlóan, a szabadföldi talajjavítási kísérletben a vörösiszap-talaj keverék (BRSM) és altalaj (LQS) keverékek nem okoztak gátló hatást a *F. candida*-ra (Collembola) az altalajhoz mérten (LQS), ellentétben az első mikrokozmosz kísérlettel, ahol nagyobb mennyiségű vörösiszap (> 30 $^{w}/_{w}$ %) bekeverése toxikus volt a tesztorganizmusra.

5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap alkalmazása közvetlenül a talajon nem volt káros hatással a talaj mikroflórájára, valamint nem okozott szignifikáns gátló hatást a vizsgált tesztorganizmusokra nézve és ez a második mikrokozmosz kísérletben is hasonlóan alakult.

A kísérletek eredményei azt bizonyítják, hogy szükség van környezettoxikológiai tesztek alkalmazására a káros hatás és kockázatértékelés kapcsán, amely képes a különböző válaszok és kölcsönhatások mérésére.

Az 1. táblázat összefoglalja a szignifikáns pozitív hatásokat a vörösiszappal és vörösiszap-talaj keverékkel (BRSM) kezelt talajokon.

1. táblázat *Összefoglalása a szignifikáns pozitív hatásoknak a kezelt talajokon a különböző kezeléseknél*

Kezelések	TALAJ JELLEMZŐ														
	pH	$CaCO_3$	K(A)	Humus	N	P	K	Toxikus elemek	WHC	Mikrob. aktivitás	*A. fischeri* (baktérium)	*S. alba* (növ.)	*T. aestivum* (növ.)	*T. pyriformis* (protozoa)	*F. candida* (állat)
	Vörösiszap alkalmazása savanyú homokos talajon (ASS) talajjavító anyagként														
ASS + 5% BR	✓					✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ASS + 10% BR	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓			
ASS + 20% BR	✓	✓	✓			✓			✓	✓					
ASS + 30% BR	✓	✓	✓			✓			✓						
ASS + 40% BR	✓	✓	✓			✓			✓						
ASS + 50% BR	✓	✓	✓			✓			✓						
	Vöröszsap-talaj keverék (BRSM) adalékanyag a hulladéklerakó takarórétegében – altalajjal keverve (LQS)														
LQS+ 5% BRSM	✓							✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
LQS+ 10% BRSM	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
LQS+ 20% BRSM	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
LQS+ 50% BRSM	✓			✓	✓	✓			✓		✓				

3.2. Kinyerési kísérlet

A magyar vörösiszap ritkaföldfémekben (REE) gazdag az átlagos, más forrásból származó vörösiszapokhoz képest <100 ppm-től ~500 ppm-ig REE. A teljes ritkaföldfém (REE) tartalom > 0.11 wt% (1082 mg kg^{-1}) (BR2) volt. A vizsgált elemek közül, Ga (9.61 US \$ t^{-1}) és ritkaföldfémek (REEs) (45.25 US \$ ton^{-1}) járultak hozzá a legnagyobb mértékben a teljes gazdasági potenciálhoz, ezért a további kísérletek a Ga és a ritkaföldfémek (REE) kinyerésére irányultak.

A legnagyobb gazdasági potenciál HCl (25.48 US \$ t^{-1} kritikus nyersanyagokra) alkalmazásával volt elérhető, majd ezt követően a savak hatékonyságának sorrendje: HNO_3 > $C_6H_8O_7$ > H_2SO_4 > $H_2C_2O_4$ [(22.36–9.23 US \$ t^{-1} kritikus nyersanyagokra (2. táblázat)]. Ezek alapján a HCl-at választottam a további kioldási kísérletekhez.

2. táblázat *Kinyerési hatékonyság a kioldási kísérletben vörösiszapból a következő savakkal: HCl, H_2SO_4, HNO_3, $C_6H_8O_7$ és $H_2C_2O_4$ (normalitás = 2; 24h; 60 °C; 100 g L^{-1} zagykoncentráció)*

Sav	Végső pH	Kinyerési hatékonyság*					
		Fe	Al	Ga	La	Ce	Nd
HCl	0,19	3,0 ± 0,1% (6529 mg kg^{-1}) a	94,6 ± 4,1% (47508 mg kg^{-1}) a	44,3 ± 2,3% (11,8 mg kg^{-1}) b	51,0 ± 2,6% (84,5 mg kg^{-1}) a	39,6 ± 1,4% (170 mg kg^{-1}) a	58,5 ± 2,1% (88,4 mg kg^{-1}) a
H_2SO_4	0,49	1,9 ± 0,1% (4130 mg kg^{-1}) c	84,1 ± 4,8% (47453 mg kg^{-1}) a	31,9 ± 1,6% (8,50 mg kg^{-1}) c	28,9 ± 1,7% (47,8 mg kg^{-1}) c	22,9 ± 0,9% (98,4 mg kg^{-1}) b	27,1 ± 1,4% (41,0 mg kg^{-1}) c
HNO_3	0,22	1,2 ± 0,03% (2502 mg kg^{-1}) d	91,4 ± 2,0% (51541 mg kg^{-1}) a	42,4 ± 0,5% (11,3 mg kg^{-1}) b	39,3 ± 0,5% (65,0 mg kg^{-1}) b	24,0 ± 0,6% (103 mg kg^{-1}) b	49,6 ± 0,6% (75,0 mg kg^{-1}) b
$C_6H_8O_7$	2,61	2,8 ± 0,1% (6083 mg kg^{-1}) b	80,2 ± 3,0% (45230 mg kg^{-1}) a	30,6 ± 0,5% (8,15 mg kg^{-1}) c	38,2 ± 1,0% (63,3 mg kg^{-1}) b	24,0 ± 0,6% (103 mg kg^{-1}) b	48,6 ± 2,0% (73,4 mg kg^{-1}) b
$H_2C_2O_4$	0,7	2,0 ± 0,1% (4389 mg kg^{-1}) c	9,0 ± 0,2% (5054 mg kg^{-1}) b	59,6 ± 4,9% (15,9 mg kg^{-1}) a	<LOD d	<LOD d	<LOD d

Azonos betűk nem mutattak szignifikáns különbséget $p<0.05$. Fémanalízis a 3.2.3 fejezetben ICP-MS-el.
*Királyvíz oldható tartalmak alapján.

Növekvő HCl koncentráció 0,5 M-ról 6 M-ra jelentős mértékben növelte a ritkaföldfémek (REE: La, Ce, Nd) és Ga kioldási hatékonyságát. A leghatékonyabb kioldási idő 3 óránál volt látható, amikor a kioldás hatékonysága Ga (63%), La (67%), Ce (54%) és Nd (69%) már magas volt, de a Fe hatékonysága még alacsony (21%). Ezek mellett, a hőmérséklet és a zagykoncentráció növelése kismértékben befolyásolta az említett elemek kinyerési hatékonyságát.

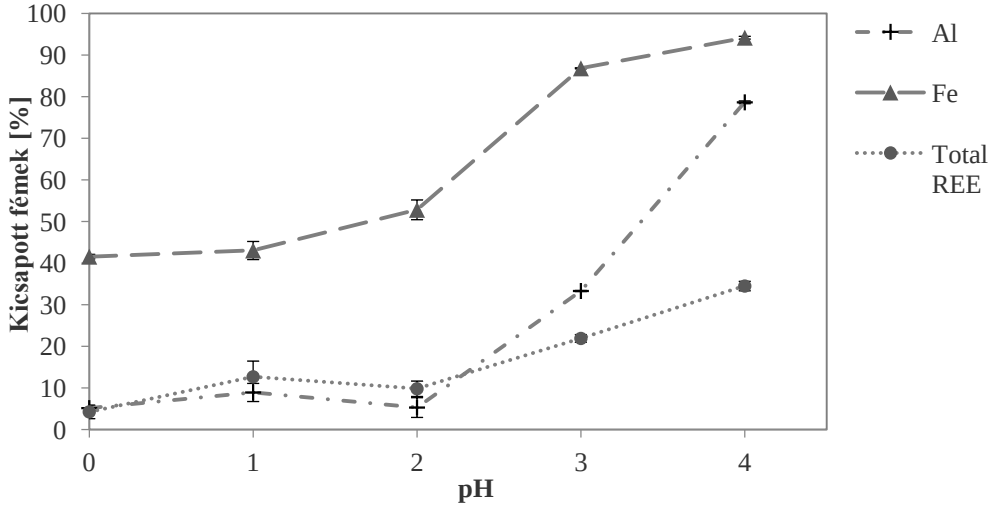
Az extrakciós paraméterek közötti komplex kölcsönhatások ábrázolása lehetővé teheti az extrakció alapjául szolgáló folyamatok gondos értelmezését. Nagyszámú paraméter (sav koncentráció, hőmérséklet, idő, zagykoncentráció) nehezen összehasonlítható. Itt a

szisztematikus modell a kétfaktoros és a nem lineáris (kvadratikus) kölcsönhatásokat mutatja.

Optimális kioldási paraméterek, amelyek maximalizáljak a kioldható legnagyobb gazdasági potenciált 5,60 M HCl; 24 h kontakt idő; 73,36 °C és 100 g L^{-1} zagykoncentráció.

A kísérletileg meghatározott gazdasági potenciál jól illeszkedett (96 % az előre jelzettnek) az előre jelzésekhez mérten ezáltal 40,95 ± 0,90 US $ t^{-1} kinyerését eredményezve.

Annak a ténynek köszönhetően, hogy a Fe és az Al a vörösiszapban a legnagyobb mennyiségben előforduló elemek, az elválasztásuk alapvető fontosságú a szelektív kinyerést illetően. Ebben a kísérletben hatékonyan elválasztottam kicsapás (Fe) és folyadék-folyadék fázisú extrakciós paraméterek variálásával (Al) az említett két elemet. A legjobb szelektivitás a ritkaföldfémekre (REE) NaOH-os kicsapás segítségével volt elérhető, amivel a Fe 87%-a volt elválasztható 3-as pH-n (5. ábra). A Fe mellett, az Al 33%-a került elválasztásra, míg a ritkaföldfémekre (REEs) (79%) további tisztítása folyadék-folyadék extrakciós eljárással történt. Ahol az Al 59%-a is elválasztásra került.



4. ábra *Al, Fe és total REEs (össz ritkaföldfém) kicsapás1M NaOH-al különböző pH-n.*

A folyadék-folyadék extrakciós paraméterek ritkaföldfém (REE) kinyerésre / szelektivitásra gyakorolt általános hatása volt megfigyelhető: a ritkaföldfémek (REE)-ek kinyerési hatékonysága nőtt a D2EHPA koncentrációval és a növekvő szerves / vizes aránnyal. A sztrippelésnél a magasabb HCl-koncentráció nagyobb sztrippelési hatékonyságot eredményezett.

A teljes folyamat 17,18 US $ t^{-1} gazdasági potenciál kinyerését tette lehetővé a teljes kritikus nyersanyag tartalomra nézve, az optimális paraméterek segítségével, amelyek a szisztematikus modell segítségével lettek meghatározva. Ezek a paraméterek a következők voltak: 0,1 szerves / vizes arány folyadék-folyadék extrakciónál; 0,76 M D2EHPA koncentráció kerozinban; 0,67 szerves / vizes arány sztrippelésnél és 4 M HCl koncentráció. A kritikus nyersanyag árak jelentős mértékben emelkedhetnek a jövőben, ezáltal a folyamatot még inkább gazdaságilag vonzóvá téve. A modell előrejelzése pontos volt, mivel a kísérleti úton meghatározott gazdasági potenciál jól illeszkedett (88%) az előre jelzett értékhez képest ezáltal 17,18 ± 0,59 US $ t^{-1} gazdasági potenciál kinyerését lehetővé téve.

5. táblázat *Elért gazdasági potenciál 1 t vörösiszapból kioldott fémek/félfémekre számolva 5.37 M sósavval (100 g L^{-1}; 73.21 °C; 23.24h)*

Elemek	Királyvíz oldható (teljes) [g t^{-1}]	HCl csurgalék [g t^{-1}]	Felülúszó [g t^{-1}]	Szerves fázis FFE [g t^{-1}]	Sztripping media [g t^{-1}]	Ár* [US $ t^{-1}]	Teljes gazdasági potenciál [US $ t^{-1}]	Gazdasági potenciál HCl csurgalékban [US $ t^{-1}]	Gazdasági potenciál felülúszóban [US $ t^{-1}]	Gazdasági potenciál FFE szerves fázisban [US $ t^{-1}]	Gazdasági potenciál sztripping media [US $ t^{-1}]
Al	56401 ± 1542	54735 ± 1473	36505 ± 1721	2952 ± 147	3001 ± 151	2.092	117,99	114,51	76,37	6,68	6,28
Ce	430 ± 2,7	240 ± 5,3	205 ± 1,3	196 ± 4,1	177 ± 9,2	4.500	1,93	1,08	0,92	n.a.	n.a.
Co	59,5 ± 0,5	47,4 ± 0,9	41,3 ± 1,4	–	–	31.747	1,89	1,50	1,31	0,00	0,00
Cr	646 ± 4,2	614 ± 16,8	45,4 ± 0,1	35,6 ± 1,8	33,4 ± 1,2	10.866	7,02	6,67	0,49	0,39	0,36
Dy	21,2 ± 0,1	14.2 ± 0,2	10,5 ± 0,4	10,5 ± 0,4	9,96 ± 0,02	685.000	14,52	9,73	7,19	7,19	6,82
Er	12,0 ± 0,1	7,36 ± 0,1	6,32 ± 0,05	6,32 ± 0,05	4,17 ± 0,5	705.000	8,46	5,19	4,46	4,46	2,94
Eu	6,07 ± 0,01	3,59 ± 0,1	3,06 ± 0,1	3,06 ± 0,1	2,86 ± 0,2	12.500	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04
Fe	214175 ± 4365	164915 ± 2781	21765 ± 147	20226 ± 834	14566 ± 519	0.068	0,01	0,01	n.a.	0,00	0,00
Ga	26,6 ± 1,2	17,6 ± 0,5	5,12 ± 0,1	1,99 ± 0,1	1,83 ± 0,2	362.000	9,63	6,37	1,85	0,72	0,66
Gd	26,6 ± 0,4	18,3 ± 0,1	14,9 ± 0,4	14,9 ± 0,4	12,7 ± 1,3	12.500	0,33	0,23	0,19	0,19	0,16
Ho	4,15 ± 0,1	–	–	–	–	12.500	0,05	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
In	0,555 ± 0,01	–	–	–	–	735.000	0,41	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
La	166 ± 1,4	120 ± 2,0	103 ± 0,8	86,4 ± 0,01	71,4 ± 2,1	5.000	0,83	0,60	0,51	0,43	0,36
Lu	1,72 ± 0,2	–	–	–	–	12.500	0,02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nd	151 ± 1,1	106 ± 1,6	93,0 ± 0,3	93,0 ± 0,3	79,0 ± 5,7	58.000	8,76	6,15	5,39	5,39	4,58
Pr	39,2 ± 0,3	26,5 ± 0,6	24,0 ± 0,2	24,0 ± 0,2	19,7 ± 1,2	12.500	0,49	0,33	0,30	0,30	0,25
Sc	80,0 ± 2,6	68,7 ± 1,2	14,8 ± 0,6	14,8 ± 0,6	–	12.500	1,00	0,86	0,18	0,18	n.a.
Sm	27,9 ± 2,4	20,6 ± 0,6	16,1 ± 0,4	16,1 ± 0,4	15,7 ± 1,2	12.500	0,35	0,26	0,20	0,20	0,20
Tb	3,69 ± 0,3	–	–	–	–	615.000	2,27	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tm	1,78 ± 0,03	–	–	–	–	12.500	0,02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Y	100 ± 9,4	35,9 ± 0,6	–	–	–	60.000	6,00	2,15	n.a.	n.a.	n.a.
Yb	10,8 ± 1,2	7,13 ± 0,2	2,74 ± 0,1	2,74 ± 0,1	1,72 ± 0,06	12.500	0,13	0,09	0,03	0,03	0,02
Össz							182,20	155,77	99,45	27,08	23,46
Össz CRM							64,20	41,26	23,08	20,41	17,18
Össz REE							45,25	26,71	19,42	19,30	16,16

Fémek/félfémek ICP-MS-el vizsgálva (lásd értekezés 3.2.3); FFE: folyadék-folyadék extrakció; CRM: kritikus nyersanyagok; REE: ritkaföldfémek
*Értékek: U.S. Geological Survey (USGS, 2015).

5. Tézisek

Vörösiszap felhasználása talajjavítást célzó kísérletben:

1. Igazoltam, komplex - fizikai, kémiai, biokémiai és ökotoxikológiai vizsgálatokat magában foglaló - metodika eredményei alapján, hogy az ajkai vörösiszap legfeljebb 5 $^{w}/_{w}$%-ban keverhető homokos talajba anélkül, hogy hosszú távon káros hatással lenne a talajra, mint élőhelyre. (VI)

2. Kimutattam az alkalmazott integrált módszeregyüttes eredményei alapján, hogy a Magyarországon termelt és a helyi vörösiszap tározóban tárolt vörösiszap, alkalmas a Kelet-Magyarországi savanyú homokos talaj pH-jának, $CaCO_3$ tartalmának és vízmegtartó képességének javítására, kis bekeverési arányban. (IV, V)

    a. A vörösiszap kis dózisban (5–10 $^{w}/_{w}$%) savanyú homokos talajba (ASS) keverve, nem haladta meg a magyar talajra megszabott fémhatárértékeket (KvVM-EüM-FVM együttes rendelet Sz. 6/2009). (IV)

    b. 5–20 $^{w}/_{w}$% vörösiszap rövid távon növelte a savanyú homokos talaj mikrobiális aktivitását, azonban ez a hatás nem tartott hosszú távon a Biolog EcoPlate mikrobiális szubsztráthasznosításon alapuló módszerrel meghatározott paraméterek alapján [átlagos színfejlődési érték (AWCD), szubsztrátcsoportok átlagos színfejlődési értéke (SAWCD), szubsztrátszám (SR)]. A Shannon diverzitás index (H) megmutatta, hogy a vörösiszap 20 $^{w}/_{w}$%-os arányig nem változtatja meg a mikrobiális diverzitást rövidtávon, azonban a diverzitás csökken hosszútávon. (IV, V)

    c. 5 $^{w}/_{w}$% vörösiszap nincs káros hatással a vizsgált tesztorganizmusokra [*Aliivibrio fischeri* (biolumineszcens baktérium), *Sinapis alba* (növény), *Triticum aestivum* (növény) és *Tetrahymena pyriformis* (protozoa)]. (IV)

3. Megállapítottam, hogy a vörösiszap-talaj keverék (BRSM), amelyet eltávolítottak az Ajkai (Magyarország) vörösiszap katasztrófa által elárasztott területekről és a MAL Zrt. tározójában tárolnak Ajkán, alkalmazható adalékanyag a hulladéklerakó felszíni takarórétegében, maximum 20 $^{w}/_{w}$%-ban keverve a rossz minőségű altalajba. Javítja a talaj fizikia-kémiai és biológiai tulajdonságait és segíti a növények megtelepedését és növekedését. (V)

    a. 5–20 $^{w}/_{w}$% vörösiszap-talaj keverék (BRSM) gyenge minőségű altalajba keverve, hosszútávú fokozó hatással volt a mikrobiális közösségre a Biolog EcoPlate paraméterek alapján. (V)

    b. A csurgalékvizen és talajon végzett ökotoxikológiai vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy 20 $^{w}/_{w}$% vörösiszap-talaj (BRSM) keverék nincs káros hatással a vizsgált tesztorganizmusokra *Sinapis alba, Triticum aestivum, Aliivibrio fischeri* és *Folsomia candida*. (V)

4. Igazoltam, hogy a Biolog EcoPlate-ből származó értékelési paraméterek megbízható válaszreakciót adtak a vörösiszapnak a talaj mikroflórájára gyakorolt pozitív és negatív hatásaira; ezen túlmenően ezek az eredmények kiterjeszthetők a talaj mikroflórájának mikrobiális aktivitására és sokféleségére irodalmi adatok alapján.
   Hasonló talajadalékok leromlott talajok mikroflórájára gyakorolt pozitív és negatív hatásainak felmérésére ajánlott az AWCD (átlagos színfejlődési index), az SAWCD

(szubsztrátcsoportok átlagos színfejlődési index), H (Shannon-index) és S (szubsztrátszám) értékek számítása. (III)

Vörösiszap felhasználása, mint a kritikus nyersanyagok forrása:

5. Kidolgoztam, egy korszerű technológiát kritikus nyersanyagok (CRM) - ritkaföldfémeket (REE) is beleértve - kinyerésére a magyar vörösiszapból. (I)

    a. Kísérlettervezési metodikával meghatározott optimális kioldási paraméterek, amelyek maximalizálják a kivonható legnagyobb gazdasági potenciált (összes kioldott fém × a megfelelő fémek gazdasági értékével) 5,6 M HCl; 24 h; 73,4 °C és 100 g L^{-1} zagykoncentráció. (I)

    b. Ezek a feltételek 40,95 ± 0,90 US \$ t^{-1} teljes gazdasági potenciál kivonását tették lehetővé, amely a magyar vörösiszapban megtalálható kritikus nyersanyagok teljes gazdasági potenciáljának 64%-ának felel meg. (I)

6. Igazoltam, hogy a magyar vörösiszap teljes ritkaföldfém (REE) (> 62% kioldható REE) tartalmának több mint > 40%-a kinyerhető, folyadék-folyadék extrakciós eljárással, az Al sikeres kicsapását követően a koncentrátumból (~5%-a a teljes Al tartalomnak). (II)

    a. Kísérlettervezési metodikával meghatározott optimális kioldási paraméterek, amelyek maximalizálják a kivonható legnagyobb gazdasági potenciált (összes kioldott fém × a megfelelő fémek gazdasági értékével) 0,1 szerves / vizes arány; 0,78 M D2EHPA koncentráció kerozinban; 0,67 szerves / vizes arány sztrippelésnél és 4 M HCl koncentráció. (II)

    b. A modell pontos volt, mivel a kísérleti úton meghatározott gazdasági potenciál 88%-ban illeszkedett a modell által megjósolt értékhez, ezáltal lehetővé téve 17,18 ± 0,59 US \$ t^{-1} teljes gazdasági potenciál kivonását. (II)

6. Következtetések, alkalmazási lehetőségek

A vörösiszap az alumínium gyártás fő melléktermére a Bayer eljárás során. A vörösiszap ártalmatlanítása és tárolása jelentős művelet az alumínium gyártó üzemben. Számos nemzetközi kutatás és fejlesztés célja megtalálni a vörösiszap hatékony felhasználásának módját, amely különböző termékek fejlesztését foglalja magába.

Mivel Magyarországon is jelenős mennyiségű vörösiszapot tárolnak, ez a kutatás felbecsülte a magyar vörösiszap felhasználásának hatékonyságát talajjavítást célzó kísérletben és mint kritikus nyersanyagok másodlagos forrása.

A kombinált értékelés azt mutatta, hogy 5 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap savanyú homokos talajba keverve (ASS) volt a legkedvezőbb kezelés a talajjavítást célzó mikrokozmosz kísérletben, ezen felül mind az analitikai, biológiai és környezettoxikológiai vizsgálatok eredményei, amelyeket a szabadföldikísérletben alkalmaztam azt mutatták, hogy maximum 20 $^{w}/_{w}$ % vörösiszap-talaj keverék (BRSM) keverhető altalajba (LQS) káros hatás nélkül a talaj ökoszisztémájára.

Az integrált monitoring módszeregyüttes, amely magában foglalja a fizikai, kémiai, biológiai és környezettoxikológiai vizsgálatokat támogatta a technológia hatékony nyomon követését és az előnyök / korlátok azonosítását a vörösiszap és vörösiszap-talaj keverék (BRSM) talajjavítás célú alkalmazása során.

A kutatás további részében kifejlesztett folyamat kritikus nyersanyagok szelektív kinyerésére

alkalmas magyar vörösiszapból.

Számos paramétert megvizsgáltam, mint például kivonószer, kontakt idő, hőmérséklet, szilárd / folyadék arány, komplexképző koncentrációja a szerves fázisban annak érdekében, hogy meghatározzam a kioldás és folyadék-folyadék extrakció optimális paramétereit.

Az optimális paraméterek 17,18 US $ t^{-1} kinyerését tették lehetővé, amely megfelel a vörösiszapban megtalálható összes kritikus nyersanyag 27%-ának. Várhatóan a vörösiszap felhasználásának jelentősége, mint kritikus nyersanyagok forrása a jövőben növekedni fog. Ezért az itt bemutatott metodika, amely lehetővé teszi a kinyerési hatékonyság gyors maximalizálását és figyelembe veszi a kinyerési paraméterek közötti kölcsönhatásokat, általánosan alkalmazható más eredetű, eltérő összetételű vörösiszapokra. A kinyert elemek gazdasági potenciáljának az összegzése az elért kinyerési hatékonyság alkalmazásával szemben közvetlenül teszi lehetővé, hogy reagáljunk a különböző nyersanyagárak változására.

7. Publikációk

A PhD értekezés témájához kapcsolódó publikációk

I. **Ujaczki É**., Zimmermann Y.S., Gasser C.A., Molnár M., Feigl V. & Lenz M. (2017) Red mud as secondary source for critical raw materials – Extraction study. J. Chem. Tech. Biotech. DOI: 10.1002/jctb.5300. (IF:3.14; I:1)

II. **Ujaczki É**., Zimmermann Y.S., Gasser C.A., Molnár M., Feigl V. & Lenz M. (2017) Red mud as secondary source for critical raw materials – Purification of rare earth elements by liquid/liquid extraction. J. Chem. Tech. Biotech. DOI: 10.1002/jctb.5289. (IF:3.14; I:1)

III. Feigl V., **Ujaczki É**., Vaszita E. & Molnár M. (2017) Influence of red mud on soil microbial communities: Application and comprehensive evaluation of the Biolog EcoPlate approach as a tool in soil microbiological studies. Sci. Total Environ. 19 (595), 903–911. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.266. (IF:5.10; I:1)

IV. **Ujaczki É**., Feigl V., Farkas É., Vaszita E., Gruiz K. & Molnár M. (2016) Red mud as acidic sandy soil ameliorant: a microcosm incubation study. J. Chem. Technol. Biotechnol. 91, 1596–1606. DOI: 10.1002/jctb.4898. (IF:3.14; I:5)

V. **Ujaczki É**., Feigl V., Molnár M., Vaszita E., Uzinger N., Erdélyi A. & Gruiz K. (2016) The potential application of red mud and soil mixture as additive to the surface layer of a landfill cover system. J. Environ. Sci. 44, 189–196. DOI: 10.1016/j.jes.2015.12.014. (IF:2.94; I:6)

VI. **Ujaczki É**., Klebercz O., Feigl V., Molnár M., Magyar Á., Uzinger N. & Gruiz K. (2015) Environmental toxicity assessment of the spilled Ajka red mud in soil microcosms for its potential utilisation as soil ameliorant. Period. Polytech. Chem. 59 (4), 253–261. DOI: 10.3311/PPch.7839. (IF:0.55; I:9)

Könyv részletek

Gruiz K., Molnár M., Feigl V., Hajdu Cs., Nagy Zs.M., Klebercz O., Fekete-Kertész I., **Ujaczki É**. & Tolner M. (2015) Terrestrial toxicology. In: Engineering Tools for Environmental Risk Management: 2. Environmental Toxicology, Gruiz K., Meggyes T., Fenyvesi É. (Eds.), CRC Press, Taylor & Francis Group.

Konferencia kiadványok

Ujaczki É., Zimmermann Y.S., Feigl V. & Lenz M. (2015) Recovery of rare earth elements from Hungarian red mud with combined acid leaching and liquid-liquid extraction. BR2015 Conference Proceedings, Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference, October 5–7, 2015, Leuven, Belgium, (Ed.) Pontikes Y., pp. 339–345.

Feigl V., Molnár M., **Ujaczki É**., Klebercz O., Tolner M., Vaszita E. & Gruiz K. (2015) Ecotoxicity of biochars from organic wastes focusing on their use as soil ameliorant. AquaConSoil 2015 Conference Proceedings, 13th International UFZ-Deltares Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources, June 9–12, 2015, Copenhagen, Denmark.

Molnár M., Feigl V., **Ujaczki É**., Klebercz O., Tolner M., Vaszita E. & Gruiz K. (2015) Soil improvement with biochar - microcosms for characterisation of the effects of biochar on acidic sandy soil. AquaConSoil 2015 Conference Proceedings, 13th International UFZ-Deltares Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources, June 9–12, 2015, Copenhagen, Denmark.

Ujaczki É., Klebercz O., Lerner T., Feigl V. & Gruiz K. (2013) Integrated monitoring of red mud contaminated soil in microcosms. AquaConSoil 2013 Conference Proceedings, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain (paper 2473).

Feigl V., Gruiz K., Mogyorós E., Klebercz O. & **Ujaczki É**. (2013) Capillary barrier systems from construction wastes to cover red mud reservoirs. AquaConSoil 2013 Conference Proceedings, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain (paper 2248).

Gruiz K., Vaszita E., Feigl V., Klebercz O., **Ujaczki É**. & Anton A. (2013) Environmental risk assessment of red mud contaminated soil in Hungary. AquaConSoil2013 Conference Proceedings, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain (paper 2292).

Tolner M., Molnár M., Feigl V., Klebercz O., **Ujaczki É**. & Gruiz K. (2013) Field portable XRF analyser for mine waste and red mud polluted soil. AquaConSoil 2013 Conference Proceedings, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain (paper 2247).

Vaszita E., Gruiz K., Siki Z., Feigl V., Klebercz O., **Ujaczki É**. & Fekete-Kertész I. (2013) The ENFO knowledge base to support efficient management of waste utilization on soil. AquaConSoil 2013 Conference Proceedings, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain (paper 2246).

Gruiz K., Feigl V., Vaszita E., Klebercz O., **Ujaczki É**. & Atkári Á. (2010) An integrated approach for the utilization of waste on soil – Innovative management and technologies. ConSoil Conference Proceedings, 11th International UFZ-Deltares/TNO Conference on Management and Soil, Groundwater and Sediment, 22– 24 September, 2010, Salzburg, Austria.

Szóbeli és poszter előadások

Ujaczki É., Zimmermann Y.S., Gasser C.A., Molnár M., Feigl V. & Lenz M. (2017) Systematic approach to harness the potential of CRM secondary sources on the example of red mud. Oral Presentation, The 2nd conference on European rare earth resources, May 28–31, 2017, Santorini, Greece.

Ujaczki É., Cusack P., Curtin T., Courtney R. & O'Donoghue L. (2017) Evaluation of a reuse technology for bauxite residue – Extraction of critical raw materials. Oral Presentation, 27th Irish Environmental Researchers Colloquium, April 10–12, 2017, Athlone, Ireland.

Ujaczki É., Cusack P., Courtney R. & O'Donoghue L. (2016) Using the red mud byproduct as a source of critical raw materials. Oral Presentation, 26th Irish Environmental Researchers Colloquium, March 22–24, 2016, Limerick, Ireland.

Ujaczki É., Zimmermann Y.S., Feigl V. & Lenz M. (2015) Recovery of rare earth elements from Hungarian red mud with combined acid leaching and liquid-liquid extraction. Oral Presentation, Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference, October 5–7, 2015, Leuven, Belgium.

Ujaczki É., Zimmermann Y.S., Molnár M., Gruiz K., Feigl V. & Lenz M. (2015) Evaluation of two reuse technologies for a Hungarian red mud. Oral Presentation, 6th European Bioremediation Conference, June 29–July 2, 2015, Chania, Crete, Greece.

Ujaczki É., Zimmermann Y.S., Feigl V. & Lenz M. (2015) Feasibility for critical raw material recovery from Hungarian red muds of different origin. Poster Presentation, Environmental Technology for Impact conference (ETEI2015), April 29–30, 2015, Wageningen, The Netherlands.

Ujaczki É., Feigl, V., Klebercz, O., Molnár, M. & Gruiz K. (2014) Soil substitute from red mud soil mixture: field study. Oral Presentation, X Meeting of Young Chemical Engineers, February 20–21, 2014, Zagreb, Croatia.

Ujaczki É., Feigl V., Klebercz O., Molnár M. & Gruiz K. (2014) Experimental work for producing soil substitute with red mud soil mixture. Oral Presentation, George Olah PhD School Conference 2014, February 6, 2014, Budapest, Hungary (in Hungarian).

Ujaczki É., Feigl V., Klebercz O., Molnár M. & Gruiz K. (2013) Application of red mud for soil. Oral Presentation, SoilUtil Conference, November 14, 2013, Budapest, Hungary (in Hungarian).

Ujaczki É., Simo Zs., Feigl V., Molnár M. & Gruiz K. (2013) Ecotoxicology Investigation of red mud on soil improvement in microcosms. Oral Presentation, PhD student in Environmental Sciences Conference, June 6, 2013, Budapest, Hungary (in Hungarian).

Ujaczki É., Klebercz O., Lerner T., Feigl V. & Gruiz K. (2013) Integrated monitoring of red mud contaminated soil in microcosms. Poster Presentation, 12th International UFZ-Deltares Conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management, April 16–19, 2013, Barcelona, Spain.

Ujaczki É., Klebercz O., Feigl V. & Gruiz K. (2012) Environmental toxicity analysis of red mud mixed soil in microcosm experiments. Oral Presentation, Chemical Engineering Days 2012, April 24–26, 2012, Veszprém, Hungary (In Hungarian).

Egyéb tudományos közlemények

Mayes W.M., Burke I.T., Gomes H.I., Anton Á.D., Molnár M., Feigl V. & **Ujaczki É**. (2016) Advances in Understanding Environmental Risks of Red Mud After the Ajka Spill, Hungary. J. Sustain. Metall. 2 (4), 332–343. DOI: 10.1007/s40831-016-0050-z. (I:15)

Molnár M., Vaszita E., Farkas É., **Ujaczki É**., Fekete-Kertész I., Tolner M., Klebercz O., Kirchkeszner Cs., Gruiz K., Uzinger N. & Feigl V. (2016) Acidic sandy soil improvement with biochar – A microcosm study. Sci. Total Environ. 563–564, 855–865. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.091. (IF:5.10; I:11)

Molnár M., Csernyánszky V., **Ujaczki É**., Feigl V., Farkas É., Vaszita E., Erdélyi A. & Gruiz K. (2016) Innovative soil improvement by waste. Agrárágazat 2016 April pp. 54–55 (In Hungarian).