

Vörösiszap – csapás, kihívás és lehetőség

Makó András¹, Rékási Márk², Uzinger Nikolett², Barna Gyöngyi¹,
Kocsis Mihály³, Csitári Gábor⁴, Hernádi Hilda^{1*} 

¹HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont, Talajfizikai és Vízgazdálkodási Osztály, Budapest, Magyarország

²HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont, Talajkémiai és Anyagforgalmi Osztály, Budapest, Magyarország

³HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont, Talajtérképezési és Környezetinformatikai Osztály, Budapest, Magyarország

⁴Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem GC, ÉTI TTÉT,
Takarmányozástani és Takarmányozás-élettani Tanszék, Keszthely, Magyarország
*Levelező szerző, e-mail: hernadi.hilda@atk.hun-ren.hu

Beérkezett: 2025. április 30.; elfogadva: 2025. május 23.

Összefoglalás

A 2010-es ajkai vörösiszap-katasztrófa súlyos talajfizikai, -kémiai és -biológiai változásokat idézett elő a szennyezett területeken. Az MTA ATK TAKI részvételével a rövid és középtávú környezeti hatások felmérésére talajoszlop-kísérletek indultak, amelyekben vizsgálták az elemek mobilitását, a kapcsolódó kockázatokat és a DUDARIT[®] talajjavító anyag hatását a szennyezett talajokra. Összefoglalták a vörösiszap mint másodnyersanyag hasznosítási lehetőségeit.

Az oszlopkísérletekben a vörösiszap gyors bemosódását, a talaj-pH emelkedését, a Na és egyes toxikus elemek koncentrációjának és vízben oldódó formáinak a növekedését tapasztalták, különösen a feltalajban. Az ökotoxikológiai és mikrobiológiai vizsgálatok jelentős biológiai hatásokat mutattak a 0–30 cm-es rétegben, de súlyos toxicitást nem. A kármentesítés eredményesnek bizonyult, a terület kis hányadán maradt fenn jelentős kockázat. A DUDARIT[®] elősorban hosszabb távon, mineralizációja során változtathatja meg a talaj pH-értékét, és javíthatja más tulajdonságait, különösen nagyarányú alkalmazás esetén.

Kulcsszavak: aggregátumstabilitás, biológiai aktivitás, nehézfémek, toxicitás, hasznosítás

Red mud – Crisis, challenge, and opportunity

András Makó¹, Márk Rékási², Nikolett Uzinger², Gyöngyi Barna¹,
Mihály Kocsis³, Gábor Csitári⁴, Hilda Hernádi¹

¹HUN-REN Centre for Agricultural Research, Institute for Soil Sciences,
Department of Soil Physics and Water Management, Budapest, Hungary

²HUN-REN Centre for Agricultural Research, Institute for Soil Sciences,
Department of Soil Chemistry and Material Fluxes, Budapest, Hungary

³HUN-REN Centre for Agricultural Research, Institute for Soil Sciences,
Department of Soil Mapping and Environmental Informatics, Budapest, Hungary

⁴Hungarian University of Agriculture and Life Sciences GC, ÉTI TTÉT,
Department of Nutrition and Nutritional Physiology, Keszthely, Hungary

Summary

The 2010 Ajka red mud disaster in Hungary released about 1 million cubic meters of highly alkaline (pH ~13) red mud, which severely affected agriculture, residential areas and human health. This event highlighted the hazardous nature of red mud and the lack of possibility to their long-term disposal and recovery.

To assess the short- and medium-term (30, 60 and 120 days) environmental impacts, soil column experiments were conducted with soil samples from an uncontaminated area near Kolontár to assess the environmental impact, focusing on element mobility and associated risks (e.g. changes in chemistry and baseline parameters, heavy metal content, microbiological activity, toxicity). We also investigated the impact of DUDARIT[®], a lignite-based soil amendment, on the properties of contaminated soils (e.g. pH, buffering capacity, humus content). The current potential and prospective uses of red mud were summarized.

The results of the laboratory column experiment at the MTA ATK TAKI showed rapid infiltration of red mud, which led to an increase in soil pH, sodium and in some cases the toxic element concentrations and increased the water-soluble levels of As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn, especially in the topsoil. Ecotoxicological studies showed significant biological effects in the 0–30 cm layer, but no severe toxicity. In some cases, microbial populations and plant germination were increased, indicating resistance and adaptation to contamination. Remediation has been effective, with a small part of the site remaining at significant risk. Our results show that DUDARIT® soil amendment can change soil pH and improve other properties, especially at higher application rates, in the longer term, during mineralization. According to the literature red mud is a hazardous waste, but also can be used as a secondary raw material in industry, for metal recovery, environmental protection and circular economy, if appropriate technologies are applied.

Keywords: aggregate stability, biological activity, heavy metal content, toxicity, recovery

Bevezetés

Magyarországon a „vörösiszap” kifejezés hallatán szinte mindenki Európa legnagyobb, vörösiszap okozta környezeti katasztrófájára, a 2010. október 4-i haváriára gondol, amikor az Ajkai Timföldgyár (MAL Zrt.) X. vörösiszap-tározókazettája gátjának átszakadása következtében körülbelül 0,7–1 millió m³ vörösiszap és lúgos víz maró elegye (pH ~13) öntötte el a környező településeket (Kolontárt, Devcsert, Somlóvásárhelyet) és 1017 ha mezőgazdasági területet, súlyos humán egészségügyi, környezeti és természeti károkat okozva (1. ábra).

A terepviszonyoktól függően 3–45 cm lúgos vörösiszap borította be a talajt; a szennyezés egy részét a Torna, illetve a Marcal patak szállította tovább. Ez az esemény mélyen bevésődött a közösségi emlékezetbe, és a vörösiszapot elsősorban veszélyes hulladékként tartjuk számon. Azonban a vörösiszap nem csupán környezeti kockázatot jelent: olyan anyagokat tartalmaz, amelyek újrahasznosítása és hasznosítása számos területen lehetséges, így nemcsak veszélyeket, kihívásokat, hanem lehetőségeket is rejt magában. Megfelelő kezeléssel és innovatív technológiák alkalmazásával hozzájárulhat a körforgásos gazdaság megvalósításához és a fenntartható fejlődéshez.

Az MTA kilenc főből álló szakmai bizottsága, egyetemek, szakmai testületek segítették a Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság munkáját. A környezeti hatástanulmányok alapjául helyszíni és modellkísérleti vizsgálatok eredményei szolgáltak.

Jelen közleményünk első részében áttekintjük azokat a kutatásokat, amelyek az ajkai vörösiszap-katasztrófát követően, az akkori MTA ATK TAKI és a Pannon Egyetem Georgikon Kara közreműködésével folytak. Ezek a vizsgálatok hozzájárultak a katasztrófa környezeti hatásainak megértéséhez, valamint a kármentesítési feladatok kijelöléséhez, később a kármentesítés értékeléséhez. A közlemény második részében röviden összefoglaljuk a vörösiszap lehetséges felhasználási irányait és lehetőségeit, bemutatva, hogy ez a melléktermék potenciális erőforrás is lehet. Ennek megfelelően közleményünk szerkezete eltér a hagyományostól: nem új tudományos eredmények bemutatására törekszik, hanem a meglévő ismeretek összegzésére és a jövőbeli lehetőségek felvázolására.

Célunk, hogy átfogó képet adjunk a vörösiszap problémaköréről, illetve ösztönözzük a további kutatásokat és innovatív megoldásokat ezen a területen.

A talaj fizikai, kémiai és biológiai jellemzőinek változása a 2010-es vörösiszap-elöntés hatására – Az MTA ATK TAKI eredményeinek áttekintése

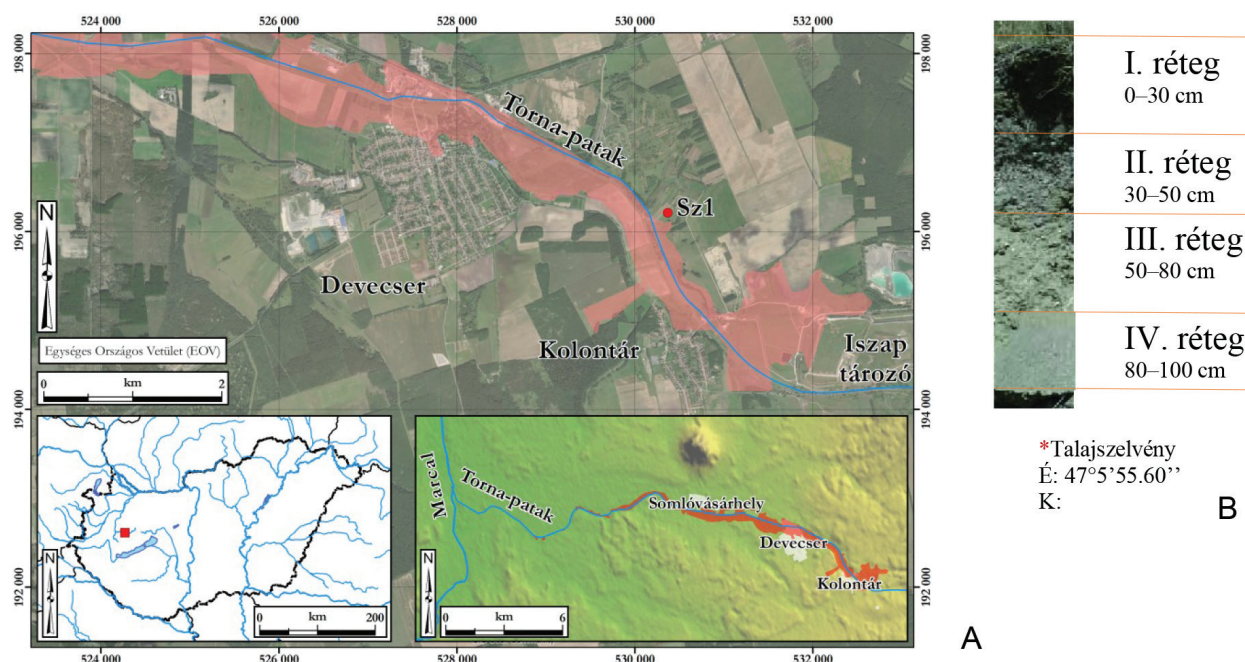
Az MTA ATK TAKI (jogutód: HUN-REN ATK TAKI) többféle vizsgálatban vett részt.

I.

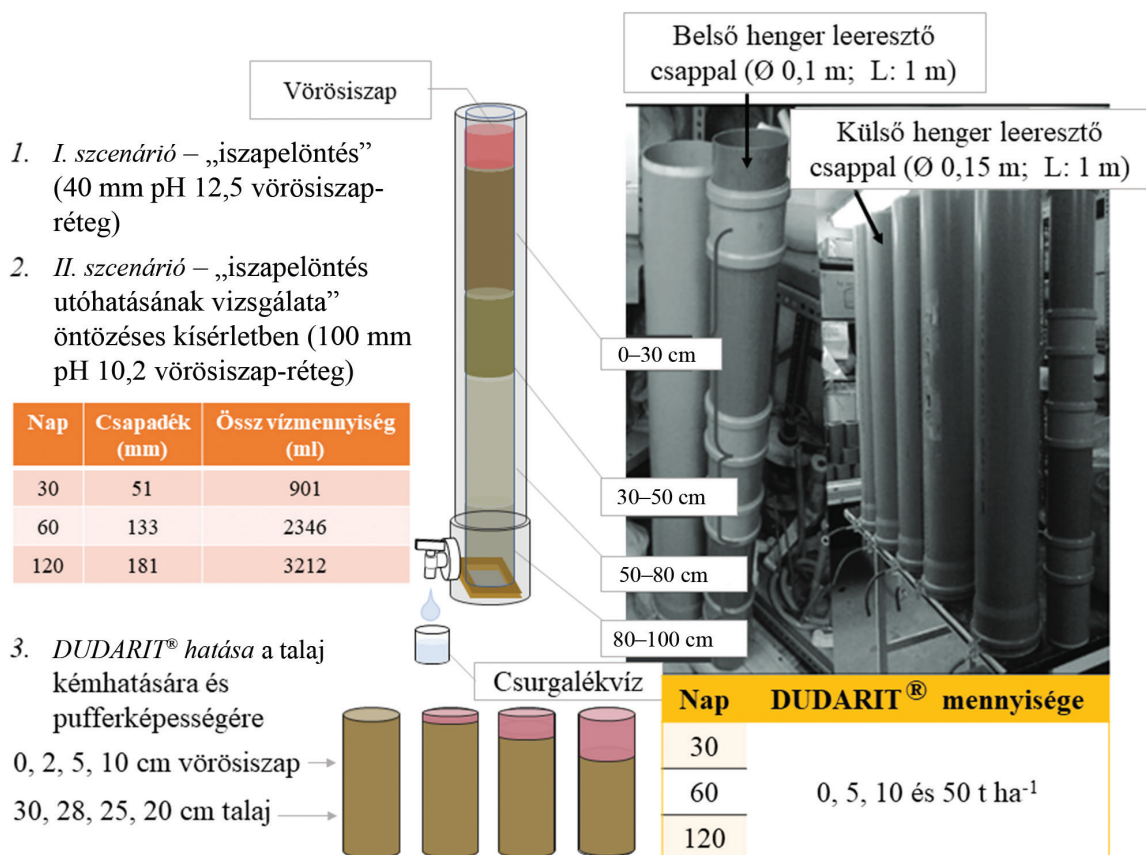
A magyarországi vörösiszap-katasztrófa hatásait egy laboratóriumi, talajoszlopokkal végzett kísérlet során vizsgálták, különös tekintettel az elemek oldhatóságára és a környezeti kockázatokra. A kísérlethez használt modell-talajszelvényt Kolontárról gyűjtötték, szennyezetlen szántóföldi területről (karbonátos humuszos öntéstalaj: semleges kémhatású, alacsony mésztartalmú, homok-homokos vályog fizikai féleségű, közepes humusztartalmú, kavicsos; WRB: Eutric Fluvisols Arenic) (1. ábra). A talajrétegek az oszlopokban a modellszelvénynek megfelelően a következők voltak: 0–30 cm kavicsos homokos vályog; 30–50 cm homok, magasabb kavicsstartalommal; 50–80 cm kavicsos homok, 60 cm-nél összefüggő kavicsréteggel; 80–100 cm kavicsos homok (2. ábra).

A kísérlet két forgatókönyvet vizsgált: (1) elöntés maró hatású, erősen lúgos (pH ~12,5) vörösiszap-szuszpenzióval (4 cm vastag, 30 napos iszapborítás), illetve (2) csapadékvíz átszivárgása egy 10 cm vastag vörösiszap-rétegen keresztül (hosszabb távú talajfizikai és kémiai hatás vizsgálata: 30, 60 és 120 napos vörösiszapborítás). Az elszivárgó vizekből és a szétbontott oszlopok egyes rétegeiből meghatározták a potenciálisan toxikus elemek összes koncentrációját, bizonyos talajkémiai és fizikai tulajdonságokat: pH, szerves anyag, kationcserélő kapacitás, szemcseeloszlás.

A vizsgálati eredmények szerint a vörösiszap bemosódása volt tapasztalható már az első harminc nap alatt. Mindkét scenárió esetében jelentős változásokat figyel-



1. ábra A. Az ajkai vörösiszap-katasztrófa helyszíne a X. tározó gátszakadását követően (Sz1 a feltárt karbonátos humuszos öntéstalaj-szelvény elhelyezkedése); B. a feltárt talajszelvény rétegei
Forrás: saját szerkesztés



2. ábra A vörösiszap-elöntés közvetlen (I. szcenárió) és középtávú utóhatásainak (II. szcenárió) vizsgálatához beállított oszlopkísérlet elrendezése, illetve a DUDARIT® hatásának vizsgálata a talaj kémhatására és sav-bázis puffereképességére
Forrás: saját szerkesztés

tek meg a talaj kémiai tulajdonságaiban. Az elöntést követően elsősorban a talajfelszínen, majd a 120. nap végére a teljes talajszelvényben tapasztalható volt a pH növekedése. A legfelső talajrétegek összes, vízdoldható és a talajkolloidokon adszorbeált, kicserélhető Na^+ -tartalma is igazolhatóan megnőtt. A kicserélhető Na^+ -tartalom a felszínen (max. 3 mg $\text{é}^{\text{g}}/100 \text{ g}$) az S érték 28 százaléka volt.

A vörösiszappal bemosódó Na^+ -tartalom a felszíni rétegekben diszperziót okozott, továbbá a humusz- és a karbonáttartalom, illetve az aggregátumstabilitás csökkenését. Viszont az alsóbb rétegekben kismértékű aggregátumstabilitás- és humusztartalom-növekedés volt tapasztalható. Az alsóbb rétegekben valószínűleg a lúgos kémhatás mellett képződő Na-szilikátok hatása – bár csak ideiglenesen – segíthette az aggregátumok képződését, hasonlóan a szikes talajok estében már korábban leírtakhoz (Makó et al. 2014). A humuszanyagok lúgos közegben bekövetkező bomlási folyamatait az összes szervesanyag-tartalom belüli vízdoldható szervesanyag-tartalom szignifikáns növekedése is mutatta (Rékási et al. 2013).

A vörösiszap-részecskék (0,05–0,02 mm és <0,002 mm méretűek) kimosódásának következtében a nátrium és a molibdén összes koncentrációja növekedett a talajoszlopban. Emellett az arzén, kobalt, króm, réz, nikkel, ólom és cink vízdoldható koncentrációja is emelkedett – főként a talaj felső rétegében (Anton et al. 2012).

A kémiai változások biológiai hatásait ökotoxikológiai tesztek segítségével értékelték, *Vibrio fischeri*, *Sinapis alba* és *Folsomia candida* tesztorganizmusok bevonásával. Meghatározták továbbá az aerob heterotróf mikroorganizmusok számát is. A teszteredmények alapján a kémiai változások főként a 0–30 cm-es talajrétegben okoztak szignifikáns hatást, kivéve az *F. candida*-t, amely a 30–50 cm-es rétegben is alacsonyabb túlélési arányt mutatott. Súlyos toxikus hatást egyik tesztorganizmus esetében sem tapasztaltak. Sőt bizonyos esetekben – például az aerob heterotróf sejtszám növekedése és a fehér mustár csírázása során – serkentő hatás is megfigyelhető volt. Ennek ellenére a vörösiszap önmagában toxikusnak bizonyult, így az ökotoxikológiai eredmények is alátámasztották, hogy a katasztrófát követően indokolt volt a vörösiszap azonnali eltávolítása a talajfelszínről (Rékási et al. 2013).

A talaj biológiai jellemzői közül a mikrobiális biomasz-sza mennyiségének (mBioC) és enzimaktivitásának (FDA) változását is mérték a második forgatókönyv szerinti oszlopkísérletekben. Az mBioC értékei a 20–160 $\mu\text{g C/g}$ talaj tartományban változtak. Az mBioC átlagértéke a 60 napig inkubált mintákban volt a legnagyobb, de a 120. napon sem esett vissza a 30. napon mért értékekre. Az FDA bontó aktivitás időbeli változása hasonló volt a mikrobiális biomaszáéhoz, de a 120. napon a visz-

szaesés mértéke kisebb volt. A legfelső, szerves anyagban leggazdagabb rétegben a mikrobiális biomasz mennyisége és az aktivitás nem csökkent az inkubációs idővel, ami arra utal, hogy a talajt ért magas pH-értékű szennyezés rövid távú hatása után a talaj mikroorganizmusai hosszú távon (120 nap) képesek voltak alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez (Csitári et al. 2013).

II.

További oszlopkísérletekben vizsgálták a DUDARIT[®] nevű talajjavító anyag hatékonyságát (a dudarit bányából kitermelt, többféle módon előkészített lignit) (2. ábra). Az előző kísérletekben használt feltalajmintákkal (0–30 cm) töltött talajoszlopokra rétegeztek 0, 2, 5 és 10 cm vörösiszapot, majd a talajmintákhoz különböző mennyiségű (0, 5, 10 és 50 t $\cdot\text{ha}^{-1}$ javítóanyagnak megfelelő) DUDARIT[®]-ot adtak. Vizsgálták a talaj kémhatásának és sav-bázis pufferképességének középtávú változását (30, 60, 120 nap elteltével).

Rövid távon a DUDARIT[®]-kezelések nem eredményeztek kimutatható változást a talaj kémhatásában. Ugyanakkor hosszabb inkubációs idő után, a szerves anyagok mineralizációja révén (pl. CO_2 -képződés, nitrifikáció, denitrifikáció) a talaj pH-ja módosulhat. A felszabaduló H^+ és OH^- ionok hatására a DUDARIT[®] hosszú távon valószínűsíthetően kedvezően befolyásolja a talaj kémhatását és egyéb jellemzőit. A pufferkapacitás nem változott szignifikánsan, csak a legnagyobb (DUDARIT[®] adag (50 t $\cdot\text{ha}^{-1}$) okozott jól érzékelhető növekedést (Filep-Rékási-Makó 2015).

III.

A katasztrófa után végzett kárfelmérés alapján az 5 cm-nél vékonyabb iszaprétegeket beforgatták a talajba, a vastagabbakat eltávolították. A Mecsekérc Zrt. ponthálós mintavételezést végzett 0–20 és 20–40 cm mélységben. Az MTA ATK TAKI vizsgálta a pH-t, a szervesanyag- és sótartalmat, valamint több potenciálisan toxikus elem koncentrációját, amelyeket a D célhatárértékekhez viszonyítottak. A vizsgálatok eredményei szerint a kármentesítés sikeres volt: a terület mindössze 6,5 százalékán kellett ideiglenesen tiltani az élelmezési célú növénytermesztést. A pH többnyire határértéken belül maradt, és a sótartalom is csak enyhén nőtt. Két évvel később a TAKI ismételt vizsgálatai csak az áradás által érintett, mély fekvésű területeken mutattak ki határérték feletti arzén- és kobaltkoncentrációt, de ezek alacsony mobilitása és felvehetősége miatt környezeti kockázatuk csekély volt. A nátriumtartalom helyenként még meghaladta a D célértéket, de a szervesanyag-, a pH- és a sótartalom-változás nem jelentett környezeti veszélyt (Uzinger et al. 2015, 2016).

A vörösiszap hasznosítása – kihívások és lehetőségek

A világ alumíniumiparában évente mintegy 98–141 millió tonna vörösiszap keletkezik melléktermékként (2011–2023), amelyből évente mindössze 2–4 millió tonnát dolgoznak fel másodnyersanyagként (Evans 2016). Az 1960-as évektől kezdve számos hazai és nemzetközi kutatás foglalkozott a vörösiszap hasznosítási lehetőségeinek feltárásával (pl. Klauber–Gräfe–Power 2009; Szépvölgyi–Kótai 2012; Wang et al. 2019; Pan et al. 2023; Vuković et al. 2024).

A másodnyersanyagként feldolgozott vörösiszap csaknem felét építőipari alapanyagként alkalmazzák (3. ábra). A cement előállításában adalékként, a beton- és téglagyártásban töltőanyagként használják fel, csökkentve a természetes nyersanyagok felhasználását és a cementgyártás CO₂-kibocsátását. A nagy Ca-Al-szilikát-tartalmú vörösiszapok például tűzálló cement és beton előállítására (Raj et al. 2024; Vuković et al. 2024), illetve nagy mechanikai szilárdságú, toxikus elemeket hatékonyan immobilizáló úgynevezett geopolimerek készítésére használatosak (Klauber et al. 2009; Samal 2021). A vörösiszap adalék anyagként műanyagok olcsó hőstabilizáló komponense lehet (pl. öregedésgátló, formatartósság-, tűzállóság-növelő; Sutar et al. 2014). A kerámiaipar, illetve az ipari porcelángyártás alapvetően agyaghelyettesítőként és adalékanyagként üvegeket és üvegkerámiákat, nanokristályos üvegkerámiákat állít elő felhasználásával (Klauber et al. 2009; Szépvölgyi–Kótai 2012).

A nagy homoktartalmú (~50%) bauxitmaradványokból elkülönített durva homok frakció az építőiparban és különböző útalapok, burkolatok készítéséhez (Qui 2021), zúzott „kő” vagy pellet formájában vasúti töltések készítésére is alkalmazható (Klauber et al. 2009).

Kis mennyiségben hasznosítják például színezékek, pigmentek előállítására is (Klauber et al. 2009). Plazmafázisú porlasztással a környezeti hatásoknak ellenálló, kopásálló bevonatok készíthetők vörösiszapból, elsősorban a nagyobb Ti-tartalmúakból (Evans 2016; Samal 2021). A nagy fémoxid- és jelentős ritkaföldfém-tartalmú vörösiszapok – illetve az ezekből előállított Fe- és Ti-oxidok – jól hasznosíthatók az ipari katalízisben (például a papírgyártás, PVC, PTFE, üzemanyagok előállítása, szennyvízkezelés, hidrogénezési folyamatok, nitrogén-oxidok és SO₂ redukciója, illetve szerves klórvegyületek klórmentesítése során, hidrogénezési, hidrokrakkolási reakciókban; Ifju et al. 2016).

A vörösiszap hasznosítására gazdaságos megoldást jelenthetnek továbbá az egyszerre több fém kinyerését szolgáló eljárások. Összetételtől függően előállítható belőle akár nagy tisztaságú alumínium is. Mágneses szeparációval és redukciós eljárással vas-oxid-dúsítmány nyerhető, ami lehetővé teszi a vasérc kiváltását, segíti ötvözetek készítését. A szinterezett ötvözeteket az elektronikai ipar is hasznosítja (Samal 2021; Pan et al. 2023; Klauber et al. 2009; Szépvölgyi–Kótai 2012). Kémiai eljárásokkal alumínium- és titán-oxidok, valamint kritikus ritka elemek (critical raw material, CRM), ezen belül a ritkaföldfémek (RFF) kinyerése azért lehet gazdaságos,



3. ábra | A vörösiszap hasznosításának lehetőségei
Forrás: saját szerkesztés

mert ezek technológiailag felhalmozódhatnak a vörösiszapban (Újczaki et al. 2017; Wang et al. 2019; Pramanik et al. 2024). A CRM hasznosítása nélkülözhetetlen egyes iparágakban, ezért kitermelésük ma már rentábilis, a felmerülő jelentős költségek ellenére is (Újczaki et al. 2018). Ilyen kiemelt ipari felhasználási területek például a fényforrások, kijelzők és (permanens) mágnesek gyártása, a katalízis, a metallurgiai hasznosítás és ötvözetek képzése, hibrid akkumulátorok gyártása, kerámiák, speciális (pl. optikai és védő) üvegek készítése, polírozás, a jármű- és hadiipar, illetve a környezetvédelmi célú hasznosítás (Evans 2016; Vuković et al. 2024).

A fémek kivonására általánosan alkalmazott piro- és hidrometallurgiai eljárások mellett kutatott továbbá például a biológiai kivonás lehetősége szerves savakat (pl. almasavat, tanninsavat) termelő baktériumokkal („bioleaching” – Liu–Naidu–Ming 2011; Pan et al. 2023). Nagy jelentőségűek lehetnek a ritkaföldfémek kinyerésében és hasznosításában egyes nanotechnológiai eljárások – például a sóoldadék-elektrolízis eljárás –, amelyekkel nanokristályos fémoxidok képezhetők (Gupta–Mao 2019; Mohanty–Muduli 2019).

Magyarország az elmúlt századokban lépést tartott a nemzetközi gyakorlattal a technológiai újítások, az innovativitás, a kitermelés, illetve a hasznosítással kapcsolatos szabványok kialakítása terén is. Ez a tendencia az ezredfordulón kismértékben csökkent, hiszen több alumíniumipari létesítmény bezárt, a tározók egy részét pedig rekultiválták. A 2010-es vörösiszap-katasztrófát követően azonban Magyarországon is új lendületet kapott a másodnyersanyagként történő hasznosítás lehetőségeinek kutatása, a nemzetközihez hasonló technológiai fejlesztések, laboratóriumi és félüzemi kísérletek indultak (pl. Szépvölgyi–Kótai 2012; Újczaki et al. 2017; Heil et al. 2022; Somogyi et al. 2022; Mádai et al. 2022, Salman et al. 2022).

A vörösiszap összetétele ugyanakkor nemcsak az alapanyagtól vagy a tárolástól függően változik, hanem a folyamatos technológiai újítások, fejlesztések miatt sem állandó. Ennek megfelelően eltérő technológiai lépések és kombinációk lehetnek kívánatosak (pl. csapadékképzés, extrakció, kristályosítás, oxidáció/redukció, membránszűrés, kromatográfiai eljárás, adszorpció, ioncsere-folyamatok stb.); sorrendjük mind gazdasági és környezetvédelmi, mind technológiai szempontból megfontolandó (Újczaki et al. 2017; Wang et al. 2019; Pramanik et al. 2024). Mindig helyzetfüggően kell megítélni, hogy melyik technológia vagy eljáraskombináció alkalmazása elégíthet ki minden szükséges szempontot, gazdasági, üzemviteli és környezetvédelmi elvárásokat (Klauber et al. 2009; Szépvölgyi–Kótai 2012). A XXI. század gazdasági, társadalmi és környezetvédelmi elvárásai már nem pusztán a technológiák fejlesztését, azok kapcsolását igénylik. A nemzetközi gyakorlat a technológiák optimalizálását, tisztább technológiák kialakítását tűzte ki célul (pl. lúgvisszanyerés és alkálimentesítés eljárásai, a szilícium visszanyerése, plazmatechnológiai és

különböző elválasztási eljárások fejlesztése) (Klauber et al. 2009; Szépvölgyi–Kótai 2012; Wang et al. 2019; Qui 2021; Samal 2021; Pan et al. 2023; Vuković et al. 2024). A kapcsolt eljárások megnövelhetik az üzemi költségeket, de ezt ellensúlyozhatja a könnyebb továbbhasznosítás és a környezetvédelmi szempontok erősödése (Klauber et al. 2009).

Környezetvédelmi szempontból a kezelt (szeparált, szárított, semlegesített stb.) vörösiszap savanyú, szerkezet nélküli, esetleg nehézfém-szennyezett talajok javítására, talajstabilizációra, kármentesítésre, a foszformegkötés növelésére alkalmas, növelve a talajok víz- és tápanyagmegkötő képességét, pufferkapacitását, csökkentve ezzel az elsavasodás ütemét (Klauber et al. 2009; Gräfe–Klauber 2011; Heil et al. 2022; Raj et al. 2024; Vuković et al. 2024). Nagy fajlagos felülete, magas vas-oxid-, alumínium-oxid-, szilícium-dioxid- és titán-dioxid-tartalma miatt a vörösiszap abszorbensként és katalizátorként is használható a hulladékgázok tisztításában (Liu et al. 2011). Adszorpciós adalékként képes megkötöni és így eltávolítani a szennyvizekből a fémeket, fémeket és nehézfémeket, valamint a szerves anionokat és a különféle szerves szennyeződések (Bhatnagar et al. 2011; Somogyi et al. 2022; Raj et al. 2024). A komplex hasznosítás révén csökkenthető a hulladéktározók terhelése, és elősegíthető a zárt anyagforgalom kialakítása, támogatva a fenntartható gazdálkodást. Az évente globálisan termelődő több, mint 100 millió tonna vörösiszap kezeléséhez elengedhetetlen a fenntartható gazdálkodási stratégiák és erőforrás-hasznosítási megközelítések alkalmazása, a kutatás-fejlesztés megfelelő finanszírozása, illetve az érdekelt felek (ipar, kutatás, gazdaság, politika, társadalom stb.) közötti teljesebb körű kommunikáció.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásunkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) No. K134563. projektje támogatta.

Irodalomjegyzék

- Anton, A., Rékási, M., Uzinger, N., Széplábi, G. & Makó, A. (2012) Modelling the potential effects of the Hungarian red mud disaster on soil properties. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 223, No. 8. pp. 5175–5188. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1269-3>
- Bhatnagar, A., Vilar, V. J. P., Botelho, C. M. S. & Boaventura, R. A. R. (2011) A review of the use of red mud as adsorbent for the removal of toxic pollutants from water and wastewater. *Environmental Technology*, Vol. 32, No. 3. pp. 231–249. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.560615>
- Csitári G., Hernádi H., Széplábi G. & Makó A. (2013) 2010. évi vörösiszap-katasztrófához kapcsolódó modell oszlopkísérletek tapasztalatai: talajbiológiai vizsgálatok. *Talajvédelem. Talajtan a mezőgazdaság, a vidékfejlesztés és a környezetgazdálkodás szolgálatában. Különszám.* pp. 125–136.
- Evans, K. (2016) The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, Vol. 2. pp. 316–331. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>

- Filep T., Rékási M. & Makó A. (2015) Vörösiszappal szennyezett talajok kémhatása és sav-bázis pufferoló képessége barnaszéntartalmú talajjavító anyag alkalmazását követően. *Agrokémia és Talajtan*, Vol. 64. No. 1. pp. 93–104. <https://doi.org/10.1556/0088.2015.64.1.7>
- Gräfe, M. & Klauber, C. (2011) Bauxite residue issues: IV. Old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation. *Hydrometallurgy*, Vol. 108. No. 1–2. pp. 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.005>
- Gupta, S. K. & Mao, Y. (2019) A review on molten salt synthesis of metal oxide nanomaterials: Status, opportunity, and challenge. *Progress in Materials Science*, Vol. 117. Article No. 100734. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100734>
- Heil, B., Heilig, D., Csanády, V., Berta K., Kurdi, R., Fejes, R. & Kovács, G. (2022) Effects of red mud on plant growth in an artificial soil mixture. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, Vol. 18. No. 2. pp. 151–166. <https://doi.org/10.37045/aslh-2022-0010>
- Ifju Zs., Juzsakova T., Al-Jammal N. & Rédey Á. (2016) A vörösiszap katalizátorként történő alkalmazásának vizsgálata. In: Böhner B., Ádám A., Timár Z. & Ziegenheim Sz. (szerk.) XXXIX. Kémiai Előadói Napok. MTA Szegedi Akadémiai Bizottság, Szeged. pp. 137–140.
- Klauber, C., Gräfe, M. & Power, G. (2009) Review of Bauxite Residue “Re-use” Options. CSIRO Document DMR-3609. National Research Flagships, Light Metals, Australia, May 2009. pp. 1–79.
- Liu, Y., Naidu, R. & Ming, H. (2011) Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. *Geoderma*, Vol. 163. No. 1–2. pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.002>
- Mádaiiné, Ü. V., Csik-Simon, K., Bokányi, L. (2022) Új megközelítés a vörösiszap hasznosítására. In: Kovács, Helga; Madarász, Tamás; Nagy, Gábor; Nagy, István; Szűcs, Péter; Németh, Norbert; Vadász, Marianna (szerk.) Fókuszban a hazai felszín alatti természeti erőforrások: Nyersanyagok, energia és technológiák nexusa. Miskolci Egyetem. pp. 104–112.
- Makó A., Anton A., Csitári G., Rékási M., Uzinger N., Barna Gy., Széplábi G. & Hernádi H. (2014) Vörösiszappal szennyezett talaj fizikai tulajdonságainak vizsgálata modell oszlopkísérletben. *Agrokémia és Talajtan*, Vol. 63. No. 2. pp. 203–222. <https://doi.org/10.1556/Agrokem.63.2014.2.4>
- Mohanty, J. & Muduli, R. Ch. (2019) Preparation of Fe-Ni alloy containing low Cr and Ti from red mud through molten salt electrolysis. *Journal of Institution of Engineers (India) Ser. C*, Vol. 101. pp. 401–406. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00543-9>
- Pan, X., Wu, H., Lv, Z., Yu, H. & Tu, G. (2023) Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, Vol. 904. Article No. 16686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.16686>
- Pramanik, S., Kaur, S., Popovs, I., Ivanov, A. S. & Jansone-Popova, S. (2024) Emerging rare earth element separation technologies. *European Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 27, e2024000064. <https://doi.org/10.1002/ejic.2024000064>
- Qui, Y. (2021) The neutralization and recycling of red mud – A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1759. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1759/1/012004>
- Raj, R., Yadav, B., Yadav, J. S. & Kumar, S. (2024) Red mud utilisation for sustainable construction and soil improvement: A comprehensive review. *Discover Sustainability*, Vol. 5. No. 1. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00619-2>
- Rékási, M., Feigl, V., Uzinger, N., Gruiz, K., Makó, A. & Anton A. (2013) Effects of leaching from alkaline red mud on soil biota: Modelling the conditions after the Hungarian red mud disaster. *Chemistry and Ecology*, Vol. 29. No. 8. pp. 709–723. <https://doi.org/10.1080/02757540.2013.817568>
- Salman, A. D., Juzsakova, T., Jalhoom, M. G., Abdullah, T. A., Le, P.-C., Viktor, S., Domokos, E., X. Nguyen, X. C., La, D. D., Nadda, A. K., Nguyen, D. D. (2022) A selective hydrometallurgical method for scandium recovery from a real red mud leachate: A comparative study. *Environmental Pollution*, Vol. 308, Art. 119596. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119596>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122008107>)
- Samal, S. (2021) Utilization of reed mud as a source for metal ions – A review. *Materials*, Vol. 14. No. 9. Article No. 2211. <https://doi.org/10.3390/ma14092211>
- Somogyi, V., Pitás, V., Berta, K. M. & Kurdi, R. (2022) Red mud as adsorbent to recover phosphorous from wastewater streams. *Sustainability*, Vol. 14. No. 20. Article No. 13202. <https://doi.org/10.3390/su142013202>
- Sutar, H. M., Mishra, S. C., Sahoo, S. K., Chakraverty, A. P. & Maharana, H. S. (2014) Progress of red mud utilization: An overview. *American Chemical Science Journal*, Vol. 4. No. 3. pp. 255–279. <https://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/7258>
- Szépvölgyi J. & Kótai L. (2012) Az ajkai vörösiszap-ömlés. II. A vörösiszap hasznosítási és feldolgozási lehetőségei. *Magyar Kémikusok Lapja*, Vol. LXVII. No. 12. pp. 362–368.
- Újczaki, É., Feigl, V., Molnár, M., Cusack, P., Curtin, T., Courtney, R., O'Donoghue, L., Davris, P., Hugi, Ch., Evangelou, M. W. H., Balomenos, E. & Lenz, M. (2018) Re-using bauxite residues: Benefits beyond (critical raw) material recovery. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 93. No. 9. pp. 2498–2510. <https://doi.org/10.1002/jctb.5687>
- Újczaki, 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. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 92. No. 11. pp. 2385–2844. <https://doi.org/10.1002/jctb.5300>
- Uzinger, N., Anton, Á. D., Ötvös, K., Tamás, P. & Anton, A. (2015) Results of the clean-up operation to reduce pollution on flooded agricultural fields after the red mud spill in Hungary. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22. No. 13. pp. 9849–9857. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4158-7>
- Uzinger, N., Rékási, M., Anton, Á. D., Koós, S., László, P. & Anton, A. (2016) Monitoring the clean-up operation of agricultural fields flooded with red mud in Hungary. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23. No. 23. pp. 23573–23581. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7608-y>
- Vuković, J., Perušić, M., Stopić, S., Kostić, D., Smiljanić, S., Filipović, R. & Damjanović, V. (2024) A review of the red mud utilization possibilities. *Ovidius University Annals of Chemistry*, Vol. 35. No. 2. pp. 165–173. <https://doi.org/10.2478/auoc-2024-0021>
- Wang, L., Hu, G., Lyu, F., Yue, T., Tang, H., Han, H. & Sun, W. (2019) Application of red mud in wastewater treatment. *Minerals*, Vol. 9. No. 5. Article No. 281. <https://doi.org/10.3390/min9050281>