

VÖRÖSISZAPPAL SZENNYEZETT TALAJ VIZSGÁLATA TENYÉSZEDÉNYEKBE ÉS HASZNOSÍTÁSA FÁSSZÁRÚ ENERGETIKAI ÜLTETVÉNNYEL

KÓNYA Anikó, HEIL Bálint, KOVÁCS Gábor

Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar, Környezet-és Földtudományi Intézet
9400 Sopron, Cházár András tér 1., e-mail: konya.aniko@emk.nyme.hu

Kulcsszavak: vörösiszap, tenyészedény kísérlet, fafajok, energetikai ültetvény

Összefoglalás: 2010. október 4-én történt hazánk egyik legnagyobb környezeti katasztrófája, melyben mintegy 1.000.000 m³ erősen lúgos vörösiszap ömlött ki. A katasztrófa bekövetkezése után helyszíni mintavételeket végeztünk tenyészedény kísérlet bevonásával. Vizsgálatainkban a vörösiszap talajra és a kiválasztott fafajokra (akác- *Robinia pseudoacacia*, fehér fűz- *Salix alba* és AF-2 nyár- *Populus x euramericana* AF-2) gyakorolt hatását vizsgáltuk tenyészedény kísérletekkel, valamint szakirodalom és egyszerű adatelemző módszerek segítségével. A kármentesítést követően a telepített fás szárú energetikai ültetvény növekedését elemeztük. A Kormány kármentesítési programjának egyik célja volt a mintegy 1000 ha mezőgazdasági területen alternatív hasznosításként, a fás szárú energetikai ültetvények telepítése. Tenyészedény kísérletünkhöz "kezelt és kezeletlen" talajmintákat alkalmaztunk. Célunk ezzel a vörösiszap szennyező hatásának kimutatása, illetve annak megállapítása volt, hogy mekkora az a szennyezettségi szint, amit a fajok még elviselnek. A talajminták analízise során kimutatható volt, hogy a vörösiszappal szennyezett talajrétegek kémhatása szignifikánsan lúgosabb a szennyezetlen talajrétegtől. Ezenkívül megnövekedett a kicserélhető Na⁺ koncentráció és a Na⁺-ion telítettség százaléka. A talaj felszínén erőteljes sókiválás jelent meg a párolgás következményeként. A vörösiszappal szennyezett talaj gyorsan kiszáradt, és részben elszikesedett talajtulajdonságokat vett fel. A Kormány a szennyezett talaj hasznosításának érdekében úgy döntött, hogy először a vörösiszapot kell elszállítani a talaj felszínéről, majd következő lépésként a tápanyag-utánpótlást szükséges megoldani. Kísérletünkben a növényminták tápelem-ellátottsága valamennyi mintánál a szakirodalmi adatok alapján optimális volt. A tenyészedény kísérletek alapján a vizsgált növények növekedési ütemét figyelve arra következtettünk, hogy a vörösiszapos területek fásítására az akác lenne a legalkalmasabb. A kármentesítést követően pedig a termőhelyi viszonyok vizsgálata után dönthető el a megfelelő faj kiválasztása. A Devecser mellett AF-2 nemesnyárral létrehozott fás szárú energetikai ültetvényben learatott biomassa mennyisége – a felső humuszos szerves anyagban gazdag talajréteg elhordása ellenére is – az első két évben átlagosan elérte a learatott biomassa mennyisége a 7,5 atotonnát hektáronként. A vágás előtti becsült mennyiség 6,2 atotonna/ha-nak adódott.

Bevezetés

2010. október 4-én bekövetkezett Magyarország egyik legnagyobb környezetszennyezéssel járó ipari katasztrófája: átszakadt a Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt. (MAL) területén lévő zagyatározó X. számú kazettájának nyugati gátja. A katasztrófa során mintegy 1.000.000 m³ vörösiszap öntötte el a környező településeket (köztük Devecsert, Kolontárt és Somlóvásárhelyt) és mintegy 1000 ha mezőgazdasági területet (HTTP1).

Az iszappal szennyezett talajt elszállították. A környezeti kár helyreállítása megtörtént. A megtisztított földterületek egyik lehetséges hasznosításaként fás szárú energiaültetvények telepítése is szóba jött. Az ökológiai állapot megfigyelése és a terület regenerálódása ma is tart.

A kármentesítés során a földmunkákat a Mecsekérc Környezetvédelmi Zrt. végezte. A kezdeti időkben a szennyezett termőföldeket az élelmiszertermelésből, ide értve a takarmánytermesztést és minden olyan köztes termesztési célt, ami humán-fogyasztást szolgál, ki kellett zárni. Ebből a szempontból is indokolt volt a megváltozott talajviszonyokat elviselő energia- illetve véderdők telepítése.

A talajok megtisztításának és mentesítésének a technológiáját az határozta meg, hogy milyen vastagságban rakódott le a vörösiszap, illetve hogy milyen művelési ágról lehetett beszélni a szennyeződött területen (SZABÓ 2011). Mindezek mellett a környezet

állapotfelmérésére is szükség volt. Számos kutatóhely és egyetem végzett kutatásokat e témával kapcsolatban; köztük a Károly Róbert Főiskola, amely a katasztrófa következtében kiömlött vörösiszap mennyiségét multispektrális légi távérzékelési módszerrel mérte fel. Az adatok gyűjtését légi felvételek készítésével végezték 5 különböző típusú érzékelő alkalmazásával, különböző felbontásokban.

A Főiskola által készített nagyfelbontású digitális képek fontos szerepet játszottak a katasztrófa feltérképezésében, valamint a sérült vörösiszap tározó fizikai állapotának vizsgálatában. Ezen kívül készítettek egy Vörösiszap Réteg Indexet (Red Mud Layer Index), amivel kiszámították a szennyezett területeken lerakódott vörösiszap vastagságát. A számítások eredményeképpen 0–15 cm terjedő vörösiszap vastagságot állapítottak meg. Eredményeikről áradási térképeket is készítettek, melyek segítséget nyújtottak a károsult vegetáció és a vörösiszap-kiporzás feltérképezésében (BURAI et al. 2011).

A lerakódott vörösiszap vastagságának megismerése szükséges lépés volt a kármentesítési feladatok meghatározásához. A szántóterületek vonatkozásában például két típust különítettek el, írja SZABÓ (2011). A néhány centiméter, de biztosan 10 cm alatti vörösiszap-réteget megfelelő művelő eszközök segítségével a talajba keverték. A fennmaradt lúgos kémhatás enyhítésére vagy közömbösítésére, illetve a talaj szerves anyag tartalmának pótlására magas huminsav tartalmú dudarit ásványt (CSICSOR 2010) használtak. A mikrobiális talajélet beindítására, illetve elősegítésére ún. phylazonit baktérium trágyát szórtak ki a talaj felszínére, melynek hatását más egyéb szerves anyagok (pl. szerves trágya, szecskázott szármaradványok) adagolásával segítették elő. Ezeket az anyagokat nehéztárcsával vagy kombinátorral keverték a talajba.

Ahol vastagabban rakódott le a vörösiszap, ott a talaj felszínéről mechanikusan földmunkagépekkel távolították el azt. A szennyezett anyagot a tárolóba visszaszállították, majd deponálták. A talaj további kezelése hasonlóan történt, mint a vékony vörösiszap-réteggel borított területeken (SZABÓ 2011).

Tenyészedény kísérleten keresztül ismertetjük a vörösiszap szennyező hatását a kiválasztott fafajokra és a talajra, illetve meghatározzuk termékenységét befolyásoló szerepét. Munkánk során "kezelt és kezeletlen" talajmintákkal dolgoztunk (laboratóriumi körülmények között) annak érdekében, hogy megállapítsuk mekkora az a szennyezettségi szint, amit a fafajok még elviselnek. Az eredmények bemutatása után megvizsgáljuk a kármentesített mezőgazdasági területen megvalósult fás szárú energetikai ültetvény sikerességét.

Anyag és módszer

Tenyészedény kísérletünkhöz 2010 novemberében mintavételezést végeztünk a katasztrófa helyszínén (1. ábra).

A kísérlethez felhasznált, 20 cm vastagságú talajrétegből származó talajmintát kb. 2 cm vastag vörösiszap szennyezte, melyet 9 db tenyészedénybe töltöttünk úgy, hogy a szántást vagy tárcsázást utánozva a szennyezett talajréteg az edények aljába került, a felszínre pedig a szennyezetlen talajréteg (mint ahogy a kármentesítés során is beforgatták a vörösiszapot a talajba). Ezek lettek a "kezeletlen" talajminták. További 6 db tenyészedénybe olyan talajt tettünk, amelybe különböző koncentrációkban kevertünk vörösiszapot. Így 3 x 2 db tenyészedénybe a homogenizált talajmintákra további 2; 5 és 8 cm vastag vörösiszap került. Ezeket tekintettük a "kezelt" talajmintáknak.



1. ábra A tenyészedény kísérlethez felhasznált talaj mintavételi helye (Forrás: Google Earth, 2014)

Figure 1. The sampling point of the soil used for carrying out the pot experiment (Source: Google Earth, 2014)

A 2 cm vastag vörösiszap szennyezés a tenyészedényünkben megfelelt 18,5%-os tömegaránynak, míg az 5 cm-es 41,1%-nak, és a 8 cm pedig 59,3%-os tömegaránynak.

Feltételeztük, hogy a vörösiszap térfogat százaléka kb. $2,0 \text{ g/cm}^3$, a talajé $1,0 \text{ g/cm}^3$, amiből az átlagos térfogattömeg $1,1 \text{ g/cm}^3$ volt.

A tenyészedényekbe került talajminták laboratóriumi körülmények között szimulálták azt az esetet, amikor a talaj felszínén elterülő vörösiszapot egy sekély szántással a felszínről nagyjából 20 cm-es mélységbe forgatjuk. A terepről behozott talajmintákat ennek megfelelően helyeztük el a tenyészedényekbe. Az alsó felébe került a vörösiszappal szennyezett, de lefordított talajrész, míg a felszínre a mélyebben, korábban az iszapömlés előtt 10–20 cm mélyen elhelyezkedő talaj.

A tenyészedényekbe akác (*Robinia pseudoacacia*), fehér fűz (*Salix alba*) és AF-2 nyár (*Populus x euramericana* AF-2) dugványokat ültettünk, majd a heti növekedési ütemüket figyeltük. Minden héten 300 ml vízzel öntöttük őket, amely vízmennyiség megfelelt a szennyezett terület átlagos csapadékviszonyainak. A száradás ütemének megfelelően a talaj felszínét megbolygattuk, a kialakult felső talajréteget összetörtük.

A talajmintákat 0–10 cm és 10–20 cm-re különválasztva elemeztük. A vizsgálatokat Magyar Szabványok (MSZ-08-0206/2-1978; MSZ-21470-51-83; MSZ-08-0215/1978) szerint végeztük. Minden mintánál a következő méréseket végeztük: talajkémhatás (pH H₂O), összes só %, CaCO₃ %, savanyúság (hy), Arany-féle kötöttség (K_A), agyag %, iszap %, finomhomok %, durvahomok %, T-érték és kicserélhető Na⁺.

A növényminták analíziséhez a levélmintákat ledaráltuk, bennük a tápanyag-ellátottságot valamint a Na⁺-ion koncentrációt határoztuk meg. Ezeknél a vizsgálatoknál szintén Magyar Szabvány szerint jártunk el. Az azonos fafajjal beültetett talajokat összekevertük, és így kerültek laboranalízisre. Az eredmények kiértékelését STATISTICA programmal végeztük.

A Devecser 0312/5 hrsz. kármentesített területen, mintegy 3,6 ha-on került sor az első fás szárú energetikai ültetvény telepítésére. A telepítés fafaja az AF-2 nemesnyár (*Populus x euramericana* AF-2) volt, egy 3 x 0,5 m hálózatban. A terület kocsánytalan tölgyes illetve

cseres erdészeti klímában fekszik, az átlagos talajvíz mélység 170 cm, időszakos vízhatású. A talaja karbonátos öntés réti talaj 150 cm termőréteg vastagsággal és vályog fizikai féleséggel. A talajban talajhibát nem találtunk. A fás szárú energetikai ültetvény felmérése során két parcellát vizsgáltunk úgy, hogy kijelöltünk egy 20 m-es szakaszt a kiválasztott sorokban (összesen 8 sor lett felmérve), és meghatároztuk a fák tőkerületét (cm-ben), és megeredési százalékát. A biomassza becslését tőátmérő mérésével végeztük a helyszínen, és a „ $y=0,00001096 \cdot x^3+0,00083985 \cdot x^2-0,00286573 \cdot x$ ” kalibrációs függvény segítségével számoltuk (VÁGVÖLGYI 2013), mivel a legszorosabb kapcsolatot a keletkezett biomasszával ez az állományparaméter mutatja (KOVÁCS és HEIL 2010a, 2010b; KOVÁCS et al. 2010, 2011, 2013). A telepítést követően az első állományfelvételle 6 hónap elteltével, a vegetációs időszak után, míg a második felvételre 18 hónap után, azaz a második vegetációs időszak után került sor.

Eredmények

A talajminták analízise

A 9 db ("kezeletlen") talajminta vizsgálati eredményeit az 1. táblázatban mutatjuk be. A 0–10 cm-es réteg vizes kémhatásának átlaga 8,1; minimuma 8,0 és maximuma 8,3 volt, ami egy szűk pH-tartománynak mondható.

	(cm)	Elemszám (N)	Átlag	Szórás	95% -os konfidencia intervallum		Min.	Max.
					Alsó érték	Felső érték		
pH H ₂ O	0-10	9	8,1	0,1	8,0	8,2	8,0	8,3
	10-20	9	8,4	0,1	8,3	8,5	8,2	8,5
Összes só %	0-10	1	<0,02	-	-	-	<0,02	<0,02
	10-20	8	0,07	0,1	0,06	0,07	0,05	0,08
CaCO ₃ %	0-10	9	16	1	16	17	14	17
	10-20	9	15	2	13	17	11	18
hy %	0-10	9	2,33	0,09	2,26	2,40	2,22	2,41
	10-20	9	2,60	1,17	1,70	3,49	2,06	5,69
K _A	0-10	9	50	1	50	51	50	53
	10-20	9	50	1	49	51	49	53
T-érték (1/z mmol/100 g)	0-10	9	36,5	0,9	35,8	37,2	35,2	37,6
	10-20	9	31,7	1,9	30,3	33,2	28,7	35,6
Kics. Na ⁺ (1/z mmol/100 g)	0-10	9	2,42	0,40	2,11	2,73	1,80	3,10
	10-20	9	7,76	1,14	3,89	5,64	3,30	6,60
Na ⁺ % (T-érték %-ban)	0-10	9	6,6	1,1	5,8	7,5	5,0	8,4
	10-20	9	15,1	3,8	12,2	18,0	9,2	21,3

1. táblázat A tenyészedény kísérlet talajmintáinak alapstatisztikái
Table 1. Basic statistics of the soil samples in pot experiment

A 10–20 cm közötti mélységben, a vörösiszappal szennyezett rétegben a vizes pH átlaga 8,4; míg tartománya 8,2–8,5 értékek között volt. A felső 0–10 cm réteg átlag pH értékei 0,2 pH-egységgel alacsonyabbak voltak. Ez magyarázható azzal is, hogy az öntözés hatására a feltalaj kissé kilúgozódott, illetve mivel az alsó 10–20 cm-es réteg volt a vörösiszappal szennyezett talajfelszín a leforgatás előtt, így az iszap növelte a pH-értékét annak közelében.

Az összes-sótartalom százalék a felső 0–10 cm-ben valamennyi mintában 0,02% alatt volt. A mélyebb, 10–20 cm közötti minták esetében pedig 0,05–0,08% között mozgott. Ez a sótartalom természetesen előforduló talajok esetében gyenge szikességet mutat (STEFANOVITS et al. 2010).

A talaj szénsavas mésztartalma átlagosan a felső 0–10 cm-es rétegben 16% volt, alatta pedig 15%. A szórása is kicsi, ugyanis a legkisebb szénsavas mésztartalom 11%, míg a legmagasabb 18%. A talajra gyakorolt hatásuk, valamint a növényekre gyakorolt élettani hatásuk között nem volt különbség.

A talajok fizikai tulajdonságait, a fizikai talajféleséget a higroszkópos nedvesség ($h_y\%$) és az Arany-féle kötöttséggel (K_A) vizsgáltuk. A $h_y\%$ a felső 0–10 cm-es rétegben 2,33%-ot, míg a 10–20 cm-ben 2,60%-ot mutatott, ami részben magyarázható azzal is, hogy a vörösiszap leforgatásával nagyobb mennyiségű abszorbens került a talajba. A legkisebb érték 2,06%, ami alapján a talaj homokos vályog-vályog határán van, míg a legmagasabb érték 5,69%; ami már agyag fizikai féleségre utal (STEFANOVITS et al. 2010). Ez a jelentős eltérés már magyarázható a vörösiszap nagyobb adszorpciós képességével. A statisztikai elemzés alapján azonban a nagy szórás miatt szignifikáns eltérést nem találtunk a két mélység között függetlenül attól, hogy a leforgatott szintben valóban nagyobb mennyiségben volt abszorbens.

A talajszennyezés és elhárítás szempontjából fontos mutató a talajok adszorpciós képessége. A Mehlich-módszerrel (BUZÁS 1983) meghatározott potenciális adszorpciós képesség a talajmintákban jó adszorpciós képességet mutat. A potenciális T-érték 28,7–37,6 1/z mmol/100 g talaj volt (ahol a "z" az adott kation vegyértékét jelölöli). Az egyes vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy a feltalaj adszorpciós képessége szignifikánsan nagyobb, mint a 10–20 cm közötti talajrétegé, azonban az eltérés gyakorlati jelentősége kicsi.

A kicserélhető Na^+ a 0–10 cm-ben átlagosan 2,73 1/z mmol/100 g volt, így az 1,80–3,10 1/z mmol/100 g közötti tartományba esett. A 10–20 cm-es rétegben az átlagérték mintegy kétszerese a felső 0–10 cm-es réteg értékének, nevezetesen 5,64 1/z mmol/100 g, ami a 3,30–6,60 1/z mmol/100 g közötti tartományba esett (BUZÁS 1988). A statisztikai vizsgálatok alapján egyértelmű szignifikáns különbség van a két mélység kicserélhető Na^+ koncentráció között, ami a vörösiszap jelenlétével magyarázható. Ugyanez az eset látható a T-érték százalékában kifejezett Na^+ -ion esetén is. A felső szintben átlagosan 6,6%, ami az 5,0–8,4% közötti tartományba esik, jelezvén a többlet Na^+ -iont a talajban. Vörösiszappal nem szennyezett talajok estében ekkora Na^+ -ion telítettségi százalék csak a valamilyen formában szikességgel rendelkező talajokon fordul elő. A 10–20 cm közötti rétegben az átlagos Na^+ -ion telítettségi százaléka 15,1%, így a 9,2–21,3% értékek közé esik (STEFANOVITS et al. 2010). A maximális értékek már azt mutatják, hogy jelentős a kicserélhető Na^+ koncentráció a talajban, ezért hosszútávon a Na^+ -ionok kedvezőtlen hatása megjelenne, ha a folyamatok nem lennének reverzibilisek. A statisztikai vizsgálatok is egyértelműen mutatják a szignifikáns eltérést a két mélység között, a Na^+ -ion telítettségi százaléka vonatkozásában.

A kísérlet második része tartalmazta a "kezelt" talajmintákat, melyben különböző vastagságú iszaprétegeket kevertünk be a talajba, majd a homogenizálás után növényeket ültettünk bele. Az eltérő mennyiség jelölésére a 2 cm, 5 cm és 8 cm vörösiszap réteg megnevezést használtuk, mivel ennek megfelelően történt a bekeverés (2. táblázat).

Az általunk bekevert, vörösiszappal szennyezett talajmintákban a vizes kémhatás 8,7–8,8 pH értéket mutatott, míg a pH KCl érték egyformán 7,9-es érték volt mindkét szintben. A vörösiszap hatása mindkét mélységben (0–10 cm és 10–20 cm) látható volt, azonban a kilúgozás már éreztette hatását a pH-értékek alakulásában.

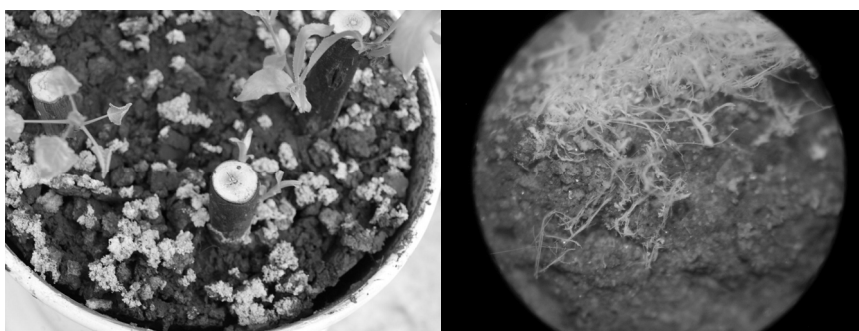
fafaj	Vörös.i.	cm	pH H ₂ O	pH KCl	össz.só [%]	CaCO ₃ [%]	hy [%]	KA [%]	H%	T érték [1/z*mmol/100 g]	Kics. Na [1/z*mmol/100g]	Na _T %
10. Akác	2 cm	0-10	8.7	7.9	0.11	17	2.33	50	2.5	35.5	9.98	28
	2 cm	10-20	8.8	7.9	0.09	18	2.32	51	2.5	32.7	9.28	28
12. Akác	5 cm	0-10	8.9	8.2	0.17	15	2.37	50	2.3	33.4	16.76	50
	5 cm	10-20	9.2	8.2	0.06	16	2.18	50	2.4	33.4	11.78	35
14. Akác	8 cm	0-10	9.0	8.3	0.17	17	2.08	57	2.4	32.5	17.66	54
	8 cm	10-20	9.0	8.1	0.07	19	2.10	54	2.5	31.7	12.24	39
11. Nyár	2 cm	0-10	8.5	7.8	0.12	20	2.06	55	2.6	34.6	8.60	25
	2 cm	10-20	8.7	7.8	0.06	16	2.32	50	2.6	33.3	7.93	24
13. Nyár	5 cm	0-10	8.9	8.1	0.14	17	2.19	52	2.3	32.6	13.59	42
	5 cm	10-20	9.0	8.1	0.06	17	2.17	56	2.4	30.8	11.33	37
15. Nyár	8 cm	0-10	9.0	8.2	0.17	17	2.03	57	2.2	29.5	15.85	54
	8 cm	10-20	9.1	8.1	0.07	14	2.15	55	2.1	30.3	12.69	42

2. táblázat A különböző mennyiségű vörösiszap hatása a tenyészedény kísérlet talajainak tulajdonságaira
Table 2. The effect of the different quantity red sludge to the soil samples in the pot experiment

Az összes sótartalom változása meglepő volt, ugyanis mindegyik mintánál a felső 0–10 cm-es rétegben a 0,11%–0,17% körül mozgott az összes só mennyisége, ami kétszerese az alatta lévő 10–20 cm-es réteg sótartalmának (0,6%–0,7%). Ez a folyamat a kilúgozással ellentétben azt mutatja, hogy a sók a felső szintekben halmozódtak fel inkább, azaz meghatározó volt az öntözési-száradási folyamatokban a vízdoldható sók felső szintek felé történő áramlása. Ezt láttuk a talajok felületén, amikor az öntözést követő napokban a száradás hatására jelentős sókivirágzás indult el (2. ábra). Ez a jelenség főleg a nagyobb tömegarányban bekevert vörösiszappal szennyezett talajmintáknál volt jelentős. A kapott eredményeket laboratóriumi körülmények produkálták.

A szénsavas mésztartalom mennyisége 14–20% között változott. Ez a változás is az eredeti talajbéli különbségek alapján már fennállhatott.

A hy% 2,03%–2,37% értékek között alakult, különbség az eltérő mennyiségű vörösiszapos talajok között volt. Hasonló eredményeket mutat az Arany-féle kötöttség is. Ezzel ellentétben azonban a T-érték, a kicserélhető Na⁺ koncentráció valamint a Na⁺-ion telítettségi százaléka alapján is van különbség az egyes kezelések között. Duncan-tesztel vizsgáltuk, hogy mely kezelések között van szignifikáns eltérés. A 2 cm-es vörösiszapos kezelés szignifikánsan kisebb pH-értékeket mutatott a 8,7-es pH-értékekkel, mint az 5 cm-es vagy 8 cm-es vastag kezelés. A pH-értékek mindkét esetben átlagosan 9,0 volt.



2. ábra Sókiválás a talaj felszínén illetve mikroszkóp alatt
Figure 2. Salt accumulation on the top of the soil and under microscope

Az összes só és szénsavas mésztartalom vonatkozásában nem adódott szignifikáns eltérés. Határozott elkülönülést csak a Na^+ -ion és a Na^+ -ion telítettségi százaléka hozott.

A várakozásnak megfelelően a pH-val igen jól korrelálva hasonló eredményeket hozott a kicserélhető Na^+ is. A 2 cm vastag vörösiszap mellett átlagosan 8,95 1/z mmol/100 g volt a Na^+ -ionok mennyisége, míg az 5 cm-es kezelés esetén 13,4 1/z mmol/100 g, és a 8 cm-es kezelés esetén 14,6 1/z mmol/100 g.

Átlagosan a T-érték százalékában meghatározott kicserélhető Na^+ -százalék a 2 cm-es vastagságnál 26,3% Na^+ -ion telítettséget mutatott, míg az 5 cm-es kezelésnél már 41%-ot és a 8 cm-es kezelésnél pedig 47,2%-ot. Ezek az értékek az erősen szikes talajokra jellemzők (STEFANOVITS et al. 2010), melyet a pH is jelez. A kísérlet során tapasztalható, hogy a talajtulajdonságok megváltoztak, a tenyészedényben lévő talajok a szikes talajok tulajdonságait hordozták.

Mikor megmértük a talaj nedvességtartalmát azt tapasztaltuk, hogy annak a 6 db tenyészedénynek, ami plusz vörösiszapot tartalmazott, víz maradt az alján. Ezt összegyűjtöttük, lemértük a mennyiségét, illetve pH értékét és az eredményeket táblázatba foglaltuk (3. táblázat).

Tenyészedény	Víz mennyiség (ml)	pH értéke
10. sz. (18,5% töm. vö.i.)	205	8,4
11. sz. (18,5 % töm. vö.i.)	145	8,6
12. sz. (41,1% töm. vö.i.)	520	8,3
13. sz. (41,4% töm. vö.i.)	275	8,3
14. sz. (59,3% töm. vö.i.)	590	8,3
15. sz. (59,3% töm. vö.i.)	320	8,0

3. táblázat Az edények alján talált víz mennyisége és pH értéke
Table 3. Amount and pH-value of the water found in the bottom of the pots

Mikroszkóp alatt ezeknek a vízmintáknak a felszínén ugróvillásokat találtunk, melyek emésztőrendszerében tisztán látszott a vörösiszap jelenléte (3. ábra). Az egyre nagyobb mennyiségű öntözővíz átfolyása a tenyészedényekben a megváltozó és romló talajszerkezeti adottságokkal magyarázható.



3. ábra Ugróvillások a vízmintában (Fotó: Kovács Gábor, 2011)
Figure 3. Insects in the water sample and its chemical reaction (Photo: Gábor Kovács, 2011)

A növényminták analízise

A tenyészedény kísérlet lebontásakor a talajvizsgálatok mellett sor került a növényanalízisre is. A makrotápelemek közül vizsgáltuk a nitrogént, foszfort és a káliumot, a mezoelemek közül a kalciumot és a magnéziumot, míg nyomelemből a vas-, mangán-, réz- és cinktartalom

meghatározására került sor. A Na⁺-ion tartalom volt vizsgálatunk fő tárgya, miszerint a vörösiszappal szennyezett talajokból a növény mennyi nátriumot épített be a sejtjeibe, és ez hogyan befolyásolta a többi tápelem felvételét, jelentkezhetett-e ennek következtében tápelem-ellátottsági zavar. Elégtelen mintamennyiség miatt nem került sor valamennyi tápelem meghatározására, így a nitrogénre sem. Hasonló okok miatt történt kevesebb foszfor-elemzés is (4. táblázat). A tenyészedényekben a növényi mintavétel idején a tápelem-hiányoknak látható jele nem volt. Ez a levelek színe, mérete és fejlettségi állapota alapján mondható el.

	N%	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Na (mg/kg)
Optimális ellátottság (ULRICH 1990/91, LYRET AL.)	3,5	18	5-10	4-7	1-2	50-500	50-500	5-12	13-50	-
Akác átlag	-	18,3	27,8	10,6	2,4	379	171	8,9	45,9	462
Nyár átlag	-	23,8	43,5	6,7	2,8	245	123	18,8	122,7	1071
Akác+2 cm vö.i.	-	-	20,9	14,6	3,1	388	201	6,7	31,3	392
Akác+5 cm vö.i.	-	-	28,9	15,0	4,1	642	122	9,1	33,6	1987
Akác+8 cm vö.i.	-	-	40,5	6,4	3,2	355	79	11,6	52,0	938

4. táblázat A növényminták tápelem-tartalmi értékei tenyészedény kísérletben
Table 4. The nutrient content of the chosen species of trees in the pot experiment

A szántást imitáló tenyészedényekben mintegy 2 cm vörösiszap réteg az edények alján helyezkedett el. A növekedés során a gyökérzet részben kapcsolatba is kerülhetett ezzel a talajréteggel. Ez okozhatta az akác illetve nemesnyár minták közötti különbséget, ami a cink- és a nátriumtartalomban jelentkezett.

Általánosan megállapítható azonban, hogy a szakirodalomban közölt (ULRICH 1990) irodalmi határértékekhez viszonyítva a minták tápelem-tartalma mind az akác, mind pedig a nemesnyár esetében az optimális szintet elérte.

A nemesnyárok kicsit több foszfort tartalmaztak (23,8 g/kg-ot) mint az akác, melyben 18,3 g/kg volt a mennyisége. A kálium-ellátottság ugyancsak optimálisnak nevezhető, mivel a határértéket jelentő 5–10 g/kg-os értéket messze meghaladóan, 43,5 g/kg és 27,8 g/kg-ot mértünk a nemesnyárok illetve az akác esetében. A magnézium-ellátottság szintén optimálisnak tekinthető; 2,4 g/kg és 2,8 g/kg-os értékkel az optimálisnak tartott 1–2 g/kg szinthez képest. Annak ellenére, hogy a talajminták lúgos kémhatásúak voltak, a növénymintákban sem a vas, sem a mangán esetében nem alakult ki tápelem-hiány. Mindkét növényfajnál az optimális ellátottsági értékeket mutatták a növényminták eredményei.

A rézre ugyancsak elmondható, hogy az optimális ellátottságot elérte, azonban a nemesnyárokban található réz mennyisége 18,8 mg/kg-os koncentrációt, míg az akác esetén 8,9 mg/kg-os koncentrációt mutatott. Hasonló mondható el a cinktartalomról is, miszerint az optimális határértéket a nemesnyárok cinktartalma jóval meg is haladta, értéke 122,7 mg/kg volt, míg az akác esetén az optimális tartományba esett a mennyisége.

A nátrium nem tartozik a szorosan vett növényi tápelemek közé, azonban a vörösiszap nagy nátrium-telítettsége miatt érdemes vizsgálni, hogy a növények mennyire képesek diszkriminálni a nátrium felvételét egy ilyen közegből. A két faj közötti különbség jelentős

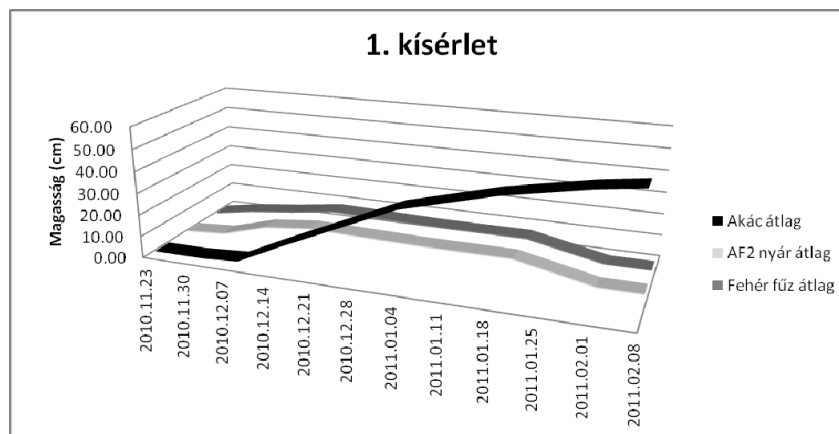
annak ellenére, hogy mindkettő nagy mértékben halmozta fel a nátriumot. Az akácnál 462 mg/kg-os koncentrációt mértünk, míg a nemesnyárak esetén ez az érték 1071 mg/kg. A nemesnyárak ebben a tekintetben vélhetően hasonlóan viselkednek, mint a nehézfémekek esetén, ahol az egyes kutatások szerint más fajokhoz vagy növényfajokhoz képest lényegesen nagyobb mennyiséget tudnak felvenni anélkül, hogy az élettani folyamataikat az hátrányosan befolyásolná. Ezért is javasolják a nemesnyárakat többek között a bioremediáció egyik jól alkalmazható eszközének (SCHOLZ 2010).

A kevert talajok esetén, ahol jelentős mennyiségben volt jelen a vörösiszap, ott a fűz és a nyárdugványok egy idő után elpusztultak, az akác csemeték azonban tovább növekedtek. A tenyészedények lebontásakor vett növényminták elemtartalmát tekintve a káliumtartalomban volt szignifikáns különbség, nevezetesen a legnagyobb kezelést kapott (47,2%-os tömegarány) tenyészedényekben kaptuk a legnagyobb káliumtartalmat 40,5 g/kg értékkel. A kalcium ezzel szemben itt volt a legalacsonyabb, a 15,0 g/kg-mal szemben csak 6,4 g/kg-ot mutatott, azonban ez is még az optimális ellátottsági szinten belül mozgott. A kálium-kalcium ionantagonizmusát azonban a mérési eredmények jól mutatják. A magnézium esetén nincs látható különbség a vizsgálati eredmények között. A nyomelemek mennyisége nem mutat tendenciát a kezeléseket figyelembe véve. Eltérő a vas-, mangán-, réz-, és cink mennyisége, de ennek ellenére még mindig az optimális ellátottsági szinthez tartoznak.

A nátriumtartalomban azonban van jelentős különbség az egyes növényminták között. Míg a 2cm-es vastagságú vörösiszapos mintában a nátriumtartalom 392 mg/kg, addig a növekvő vörösiszap mennyiséggel arányosan 983 mg/kg-ra és 1987 mg/kg-ra emelkedett. Végeredményben azonban ez a koncentráció sem okozott mérgezési tüneteket az akácnál. A nátrium mennyisége 1–2 %, eléri a makroelemekre vonatkozó értéket.

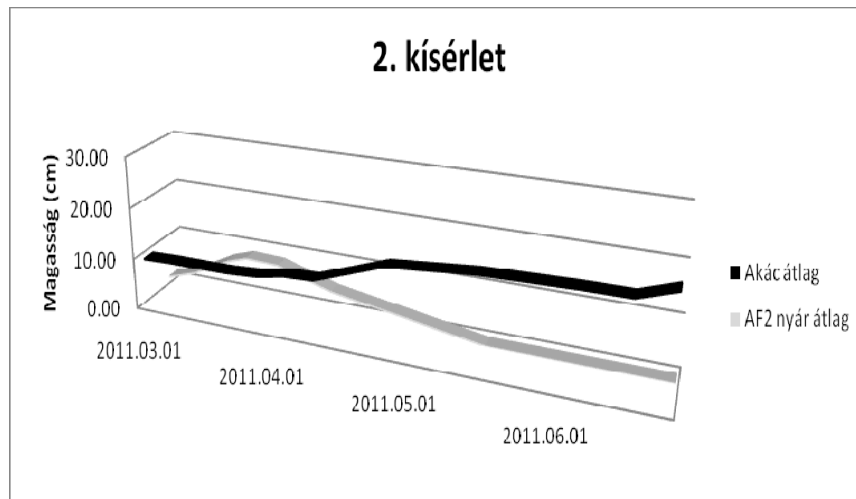
A tenyészedényekbe ültetett fajok közül először a nyár és a fűz dugványok kezdtek el hajtani, az akác gyökeresedése miatt az első levelek később jelentek meg. Egy tenyészedénybe öt dugványt ültettünk, melyek heti növekedési ütemét tenyészedényenként átlagoltuk.

Az első kísérletünknel (4. ábra) a dugványok január 19-én kezdtek elszáradni, míg végül a fehér fűz teljesen elpusztult, és a nemesnyár dugványok nagy része is erre sorsa jutott.



4. ábra Fajok növekedési ütemének átlaga
Figure 4. Mean of the growth of the species of trees

A 10. számú tenyészedényben lévő akác pedig még mindig nem akart megindulni. Ezért került sor egy második kísérletre (5. ábra), amit már csak nemesnyár és akác dugványokkal folytattuk. Az összes nyár dugványt újraültettük új közepes és nagy dugványokkal, az akácokat hagyjuk tovább élni.



5. ábra Fafajok növekedési ütemének átlaga
Figure 5. Mean of the growth of the speices of trees

Néhány nemesnyárnak 43 nap után besárgult a levele és a formája is megváltozott. Volt olyan eset is, ahol még zölden (látszólag épen és egészségesen) lehullottak a levelek. Tavasszal az elszáradt akácokat metszőollóval visszavágtuk. A nemesnyarak úgy tűntek, nem fogják sokáig bírni a vörösiszap hatását, egyre több pusztult el és a leveleik is fodrosodtak. Egy idő után azok a levelek, amik még nem potyogottak le, feketék lettek a kéreggel együtt 59 nap után.

A tenyészedények szétbontása során megállapítottuk, hogy a nemesnyár dugványok alja, ami a vörösiszapos talajba került, elhalt, ott a gyökérképződés nem indult meg.

Az eredmények megvitatása

Az eredményekből arra következtettünk, hogy a vörösiszap hatása a szántás szimulálásával kimutatható. Szignifikáns különbség adódott a pH-értékekben, a kicserélhető Na^+ -ion tartalom, valamint a Na^+ -ion telítettségi százalék között. Az alsó 10–20 cm értékei magasabbak voltak, ahol a vörösiszap nagyobb mennyiségben volt jelen. Mind a felső 0–10 cm-ben, mind pedig az alsó 10–20 cm-ben kimutatható volt a vörösiszap hatása, még ha eltérő mértékben is.

Laboratóriumi körülmények között a sókiválás a felszínen jelentkezett (2. ábra). A sók távozásának, kimosódásának a feltétele a kilúgozási vízháztartás. A felszíni sókiválás a laboratóriumi körülményeknek volt köszönhető (magas hőmérséklet, alacsony páratartalom, megnövekedett párolgás). TÓTH (1972) könyvében olvasható néhány gondolat a szikesek fásításáról. Erdészeti és mezőgazdasági szempontból fontosnak tartja az altalajvíz mélységi elhelyezkedését és sótartalmát, továbbá a talaj kolloidkémiai helyzetét és lúgossági fokát. A szikesek fásításának helyes megtervezése és végrehajtása során figyelembe kell venni a talajok tulajdonságait és a fák ökológiai igényét. Ahol a szikesség alapvető oka a talajokban található nagy sótartalom, mindenekelőtt sótűrő fás növényzet telepítésére kell törekedni.

A talajok szénsavas méisztartalmára, és a fizikai tulajdonságokat mutató értékekre a kezeléseknek nem volt alapvető hatásuk. Eredetileg ezekre a területekre főként réti talajtípusok jellemzőek, de elvétve találni csernozjomokat is. A felhasznált talajtípus réti csernozjom volt. A tenyészedény kísérlet hatására a talajok tulajdonságai a szikes talajok tulajdonságait hordozták bizonyos mértékben. Mivel reverzibilis folyamatokról van szó, ezért kérdés és a továbbiakban vizsgálendő, hogy ez a kedvezőtlen talajtulajdonság időben meddig marad fenn. KALOCSAI (2011) szerint a szennyeződött területen lévő talajok is megváltoztak. A szennyeződés hatására a talajok elszikesedtek. Mindezen kapott eredmények alapján arra

következtethetünk, hogy a vörösiszap hatása kimutatható mind laboratóriumi körülmények (tenyészedény kísérlet), és mind a szennyezett területek vizsgálata során. A kérdés csak az, mivel a folyamat reverzibilis, meddig maradtak volna fenn ezek a különbségek kármentesítés nélkül?

A növényvizsgálati eredményekből megállapítottuk, hogy a három fafaj közül az akác (*Robinia pseudoacacia*) még a legnagyobb, 47,2 tömegszázalékos szennyezés mellett sem mutatott növekedés-gátló tüneteket laboratóriumi körülmények között, heti 10 mm csapadék mellett. A fűz és a nyárak mintegy 220 nap után elpusztultak.

A növényminták tápelem-ellátottsága valamennyi tenyészedényből származó mintánál kielégítő volt, ami azt mutatta, hogy a tápanyag-ellátottsággal összefüggő növekedésük kezdetben a vörösiszap jelenléte mellett is zavartalan volt.

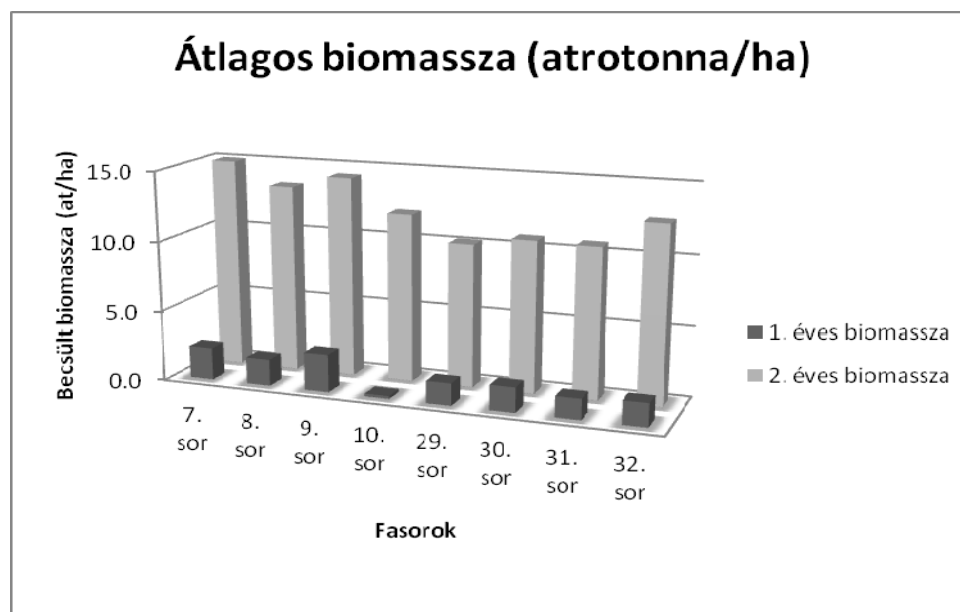
A levélanalízis alapján a nemesnyár (*Populus x euramericana* AF-2) jóval nagyobb mértékben akkumulálta a számára nem releváns nátriumot, mint az akác (*Robinia pseudoacacia*). A rekultivált területen üzemi méretekben létrehozott ültetvény vizsgálatai elsőknek azt mutatják, hogy a szennyezett humuszos feltalaj elhordása után, legalábbis a makrotápelemek vonatkozásában, tápelem hiánnyal számolhatunk.

A fafajok növekedési ütemét tekintve az AF-2 nyár (*Populus x euramericana* AF-2) tovább életben maradt, mint a fehér fűz (*Salix alba*), ennek ellenére tapasztaltunk elváltozásokat a fafaj növekedése során (levelek színe és formája, a fakéreg megfeketedett, ahol vörösiszappal érintkezett). A növények növekedési üteme egyben a három fafaj szikes tulajdonságokat hordozó talajokkal szembeni alkalmazkodó képességét is mutatja. Másrészt a különbséget eredményezhette az is, a nemesnyár és fűz gyökér nélküli dugványok voltak, míg az akác gyökeres csemeteként került elültetésre. Itt a kezdeti időszakban, a gyökeresedés első fázisában a nyár és a fűz sokkal érzékenyebben reagált a jelenlévő vörösiszappalra.

A növények növekedési ütemét figyelve arra következtettünk, hogy a vörösiszapos területek fásítására az akác lenne a legalkalmasabb, mivel ez számított a három fafaj közül a legellenállóbbnak a nem kármentesített területeken. A kármentesített területeken, ahol a felső 30 cm elhordásra került, ott ezek a hatások már nem jelentkeztek, így a termőhelyi adottságoknak megfelelően lehetett, pl. fás szárú energetikai ültetvények létrehozásához, fafajt választani.

A 2011-ben telepített 3,6 ha AF-2 nyár vizsgálati eredményei meggyőzően mutatják, hogy már a kezdeti időszakban sem jelentkezett a növekedést befolyásoló kedvezőtlen hatás. Az első évben, amikor a gyökérrendszer kialakulása a meghatározó, a keletkezett biomasz mennyisége átlagosan 1,7 atotonna/ha/év (szórás: 0,7 atotonna/ha/év) volt, a második évben viszont már 12,4 atotonna/ha (szórás: 1,7 atotonna/ha), amely átlagosan megfelel a 6,2 atotonna/ha/év biomasz termelésnek. A növekedés 3,6-szeres (6. ábra). A 2. év után történő betakarítás a becsült 6,2 atotonna/ha/év mennyiséggel szemben 7,5 atotonna/ha/év volt, ami azt mutatja, hogy a becslőfüggvénnyel történő előzetes biomasz meghatározás 18 %-kal alábecsülte a keletkezett mennyiséget. Ezt okozhatja a terület termőhelyi heterogenitása, hiszen a becslési mintaterekkel a teljes terület 0,75 %-át vettük fel. A fafajok megeredési aránya 70–87%-os, ami szakmailag teljes mértékben elfogadott.

Tenyészedény kísérleteink eredményei azt mutatták, hogy a vörösiszappal közvetlenül szennyezett talajokon a fás szárú növények növekedése is gátolt, fafajtól függően eltérő mértékben. A kármentesített talajok tulajdonságai azonban már nem mutattak talajhibát, rajtuk történő fás szárú energetikai ültetvények létrehozása jó alternatív választás volt. A növények fejlődését már a vörösiszap már nem befolyásolta, intenzív, erőteljes növekedés és jó-közepes biomasz termelés jellemző az ültetvényre (7. ábra).



6. ábra A fás szárú energetikai ültetvény átlagos biomassa produkciója két év után
 Figure 6. Mean of the biomass production of the energetic plants after two years



7. ábra Balra a devecseri két éves AF-2 nemesnyár ültetvény, jobbra az ültetvény aratása
 Figure 7. The two year-old AF-2 Poplar plantation on the left and its reaping-time on the right

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani a Fehérvári Téglaiipari Kft.-nek a kutatáshoz szükséges anyagi támogatásukért, és a Nyugat-magyarországi Egyetem Termőhelyismerettani Intézeti Tanszék munkatársainak, hogy lehetőséget biztosítottak vizsgálataink elvégzéséhez. A telepített fás szárú energetikai ültetvény felmérését pedig köszönjük Kungli József erdőmérnök hallgatónak.

Irodalom

- BURAI P., SMALBEGOVIC A., LÉNÁRT CS., BERKE J., TOMOR T., BÍRÓ T. 2011: Preliminary analysis of red mud spill based on aerial imagery. *AGD Landscape & Environment* 5(1), p. 47–57.
- BUZÁS I. 1983: A növénytáplálás zsebkönyve. Mezőgazdasági kiadó, Budapest, p. 206–211.
- BUZÁS I. 1988: Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 2. A talajok fizikai-kémiai és kémiai vizsgálati módszerei. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, p. 6–242.
- CSICSOR J. 2010: Vörösiszap + Dudarit = Van remény a felmérhetetlen bajban? p. 1–3. <http://epiteszforum.hu/vorosiszap-dudarit-van-remeny-a-felmerhetetlen-bajban>.
- KALOCSAI R. 2011: A talajvizsgálati eredmények értelmezése. Tanulmány, Mosonmagyaróvár, p. 1–6.
- KÓNYA A. 2011: Tenyészedény kísérletek vörös iszappal. Szakdolgozat, Sopron, p. 2–66.
- KOVÁCS G., HEIL B. 2010a: vigyázzunk, a kordé nehogy megelőzze a szamarat! Kárenyhítő energiaültetvények. In: *Mezőhír, Mezőgazdasági szaklap*. 14. évfolyam, nov. dec., pp. 111–113.

- KOVÁCS G., HEIL B. 2010b: Aratás tél végén? Nemes nyár energiaültetvény betakarításának tapasztalatai. In: MEZŐHÍR, MEZŐGAZDASÁGI SZAKLAP. 14. ÉVFOLYAM, JÚNIUS, PP. 107–108.
- KOVÁCS G., HEIL B., MAGYARI CS., GYÓRI T., SZABÓ O. 2010: Fás szárú, kísérleti célú energiaültetvények termőhelyi viszonyai az ültetvények tapasztalatainak függvényében. In: Alföldi Erdőkért Egyesület Kutatói nap, Szolnok konferencia kiadvány.
- KOVÁCS G., HORVÁTH B., VÁGVÖLGYI A., MAGYARI CS. 2011: Megújuló energiaforrásként hasznosítható nemesnyár és akác ültetvényszerű fatermesztése I. In: Östermelő- Gazdálkodók lapja, június-július.
- KOVÁCS G., HEIL B., CZUPY I., VÁGVÖLGYI A. 2013: Fásszárú energia ültetvények termesztés-technológiája. Országos Erdészeti Egyesület 144. Vándorgyűlés, július 12–13., Tata-Pusztavám.
- RUYTERS, S., MERTENS, J., VASSILIEVA, E., DEHANDSCHUTTER, B., POFFIJN, A., SMOLDERS, E. 2011: The Red Mud Accident in Ajka (Hungary): Plant Toxicity and Trace Metal Bioavailability in Red Mud Contaminated Soil. Environmental Science and Technology, p. 6.
- SCHOLZ V. 2010: Umweltverträglichkeit von Pappeln und Weiden im Vergleich mit Anderen Energiepflanzen. Agrarholz, Leibniz-Insitut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. 5. (ATB), p. 1–14.
- STEFANOVITS P., FILEP GY., FÜLEKY GY. 2010: Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest, p. 279–282., 287–293., 301–303., 308–309, 424–426., 439., 441.
- SZABÓ CS. 2011: A reménytelenségtől a megújulásig, küzdelem a vörösiszappal. Vidékfejlesztési Minisztérium, Budapest, p. 98., 107–115., 127–128.
- TÓTH B., JASSÓ F., LESZTÁK J-NÉ, SZABOLCS I. 1972: Szikések fásítása, Szikes fásítási kutatás és gyakorlat Magyarországon. Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 23–24.
- ULRICH B. 1990: Stoffhaushalt von Wald-Ökosystem Bioelement-haushalt. Vorlesungsskript Institut für Bodenkunde und Waldernahrung der Universitat, Göttingen.
- VÁGVÖLGYI A. 2013: Fás szárú energetikai ültetvények helyzete Magyarországon napjainkig; üzemeltetésük, hasznosításuk alternatívái. Doktori Értekezés, NYME, Sopron. www.greenman.hu.

HTTP1: www.vorosizap.bm.hu 2010: A vörösiszap katasztrófa hivatalos honlapja.

INVESTIGATION OF SOIL POLLUTED WITH RED SLUDGE IN POT EXPERIMENT AND RECLAMATION WITH SRC

A. KÓNYA, B. HEIL, G. KOVÁCS

University of West Hungary, Faculty of Forestry, Institute of Environmental and Earth Sciences
H-9400 Sopron, Cházár András square 1., e-mail: konya.aniko5@gmail.com

Keywords: red sludge, pot experiment, species of trees, SRC

Abstract: On the 4th October 2010, one of the largest industrial disaster occurred in Hungary, which caused a large environmental pollution: approximately 1.000.000 m³ of basic red sludge spilled out. After the disaster we began to carry out field samplings with pot experiment. During our investigation we observed the effects of red sludge on soil and chosen species of trees (*Acacia-Robinia pseudoacacia*, White willow- *Salix alba* and AF-2 Poplar- *Populus x euramericana* AF-2). By doing so, we have carefully analysed the results of our pot experiment by taking into account the existing literature on this matter as well as data analysis methods. Once the remediation has been carried out successfully we began to observe the growth of the planted energetic trees. One of the purposes of the Hungarian Government's remediation program was to plant energy plants to exploit the contaminated farmlands. We have divided our pot experiment into two parts; the first one was focused on 'treated samples of soil' while the second one aimed at observing the 'untreated samples of soil'. That way our goal was to demonstrate the pollution effect of red sludge by analysing the distinct levels of contamination which can be tolerated by the different species of trees. During the analysis of soil samples the chemical reaction was demonstrable in the red sludge polluted soil which was significantly different from the unpolluted soil sample. In addition, the level of exchangeable Na⁺-ion content and Na⁺-saturation percentage have grown as well. We also found a thin layer of salt crystals on the surface of the soil as a consequence of water evaporation. The red sludge polluted soil quickly dried out and showed the properties of salinization. As for Government's Initiative to make use of contaminated soil, the first step was to remove the red sludge from the surface and as a second step, soil nutrients were added to damaged lands. As for our experiment the plant samples have not shown signs of lack of nutrients. By considering the tempo of growth of the selected plants in the pot experiment we can conclude that the *Acacia* will be the fittest tree for the afforestation of areas polluted with red sludge. Once soil remediation as well as the examination of growth conditions are concluded, species of trees being able to adapt to these conditions can be selected. As for the AF-2 poplar, we have observed that its development and capacity to generate biomass showed 7.5 tons at 0% moisture content even two years after hummus with high organic content had been removed.