

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

**KUKORICA ÉS NAPRAFORGÓ HIBRIDEK KADMIUM ÉRZÉKENYSÉGE,
A KÁROS HATÁSOK MÉRSEKLÉSÉNEK LEHETŐSÉGE**

Gajdos Éva

Témavezető: Dr. Lévai László



DEBRECENI EGYETEM
Kerpely Kálmán Doktori Iskola

Debrecen, 2013

1. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEI

Napjaink mezőgazdasági növényei folyamatosan ki vannak téve a toxikus kemikáliáknak, beleértve a nehézfémeket is. A nehézfémek szennyezik a környezetet és károsítják a humán egészséget. Talajaink nehézfém tartalma egyrészt a bányászat, az ipari tevékenységek és a városiasodás révén, másrészt az agráriumban felhasznált peszticidek és műtrágyázás hatására az utóbbi évtizedekben jelentősen növekedett. Köztudott, hogy a mérgező nehézfémek (ólom, kadmium, higany) képesek bejutni az élő szervezetekbe és gátolni számos fontos metabolikus folyamatot. A toxikus fémek jelenléte károkat okoz a növényi sejtek homeosztázisában, a transpirációban és számos egyéb élettani folyamatban (Di Tioppi and Gabbrielli 1999). A növények azonban képesek túlélni ezt az abiotikus stresszt, a védekező mechanizmusuknak köszönhetően (Supalkova et al. 2007). A növények élhetnek és fejlődhetnek a szennyezett környezetben, sőt a szöveikben meg is kötik, méregtelenítik a nehézfém ionokat. Így a betakarított növények élelmiszerként történő felhasználása fenyegetőleg hat az állati és emberi egészségre egyaránt (Zehnalek et al. 2004). A FAO/WHO Joint Expert Committee on Food Additives ajánlásával a tolerálható napi maximális bevitel a kadmiumból, minden forrást beleértve (élelmiszer, levegő és víz) $1.0\text{-}1.2 \mu\text{g kg}^{-1}$ testtömegre vetítve (FAO/WHO, 1972). A nehézfémek, mint stresszorok csökkenthetik a növényi produkciót. Mérgező hatásuk és felhalmozódásuk a növényekben számos tényezőtől függ, így a talaj tulajdonságaitól, a szennyező anyag koncentrációjától, a szennyezés időtartamától, a rhizoszféra komplexképző anyagaitól, a növényfajtól (Fodor, 2003). A kadmium a növények számára, különösen savanyú talajokon, könnyen felvehető és a növényen belül is gyorsan szállítódik és a növények sokszor látható tünetek nélkül, nagy mennyiségben halmozják fel. Vizsgálataimba két, eltérő tápanyag felvételi mechanizmussal rendelkező kultúrnövényt (kukorica, napraforgó) vontam be, amelyek közvetve vagy közvetetten, de jelentős szerepet játszanak a humánélelmiszerben. A választott növények gazdasági szerepe is igen jelentős. A kukorica vetésterülete magyarországi viszonylatban a következő képen alakult a 2012-es évben: 1.280e ha, a napraforgó vetésterülete: 621e ha volt (KSH adatok).

Jelen munkában a nehézfémek, azon belül is elsősorban a kadmium hatását vizsgáltam különböző kukorica és napraforgó hibridek növényfiziológiai folyamataira és paramétereire. A kadmium hatása a különböző élő szervezetekben széles körben tanulmányozott terület, azonban még jelenleg sem ismert a teljes hatásmechanizmusa. Vizsgálataim során összefoglaló képet próbáltam adni, arról hogyan hat a kadmium a növények

tápanyagfelvételére, a fotoszintézisre, milyen védekezési mechanizmussal reagálnak a kísérletben használt növényfajok. Kerestem a választ arra is, hogy létezik-e olyan környezetkímélő megoldás, amely képes kompenzálni a kadmium növényekre gyakorolt negatív hatását, ezáltal a szennyezett területek hasznosíthatóságát is növelve. Ilyen alternatív megoldásként egy baktérium alapú biotrágyát vontam be a kísérleteimbe.

Céljaink elérésére az alábbiakat vizsgáltuk:

- a Cd hatása a kezdeti gyökérnövekedés intenzitására
- a Cd hatása a gyökérsav kiválasztás intenzitására és összetételére
- a Cd hatása fotoszintézisre, azon belül a relatív és abszolút klorofill tartalomra, pigment összetételre
- az apoplazmatikus oldat pH-jának vizsgálata, különböző kezelések hatására, tápoldaton nevelt növényeknél
- rhizoboxos kísérletekben vizsgáltuk az oldható kadmium tartalom hogyan változik a talajban az idő múlásával, és ez milyen kapcsolatban van a növények általi felvehetőséggel, illetve az egyes szervekben történő akkumulációval; kadmiummal szennyezett talajmintákon (*Gyöngyöroszri bánya meddő területe*)
- különböző növényfajok és azok hibridjeinek bevonása a vizsgálatokba, - ha elfogadjuk azt a felvetést, hogy a fém tolerancia és a fém felvétel funkcionálisan összefügg - akkor összehasonlíthatóvá válnak a nehézfémek felvételi adatai a különböző fajoknál, belső információt adva az egyes genotípusok tolerancia működéséről

Ez a megközelítés lehetőséget ad a nehézfém stressz növényfiziológiai változásokat okozó hatásának összehasonlítására két eltérő növényfaj, illetve azonos fajon belüli hibridek közötti különbségek bemutatására. Az így kapott ismeretek jól hasznosíthatók a stressz tolerancia mechanizmusának bemutatásában és a növénynemesítéssel kapcsolatos munkában ugyanúgy, mint a nehézfémrel szennyezett területek mezőgazdasági hasznosításában.

2. A KUTATÁS MÓDSZEREI

2.1. Nevelési körülmények

A növényeket a Debreceni Egyetem Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, Növénytudományi Intézet, Növénytani és Növényélettani Tanszék laboratóriumában neveltük. Kísérleti növényként kukorica (*Zea mays L.*) és napraforgó (*Helianthus annuus L.*) hibrideket használtunk, melyek rövid ismertetője a 11. mellékletben található. A magvakat nedves szűrőpapír között csíráztattuk, majd hidropónikus körülmények között, tápoldaton neveltük (Lévai és Kovács, 2001). A tápoldat összetétele a következő volt: 2,0 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,7 mM K_2SO_4 , 0,5 mM MgSO_4 , 0,1 mM KH_2PO_4 , 0,1 mM KCl , 1 μM MnSO_4 , 1 μM ZnSO_4 , 0,25 μM CuSO_4 , 0,01 μM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$. Az egyszikűeknél a tápoldatában a bór koncentrációja 1 μM H_3BO_3 , míg a kétszikűeknél 10 μM H_3BO_3 volt. A növények a vasat 10^{-4} M FeEDTA formában kapták. A kadmium kezelés CdSO_4 formájában történt, az alkalmazott koncentrációk a vizsgálat célját tekintve alkalmanként változott. A kísérletek során a környezeti feltételek szabályozottak voltak: a fényintenzitás $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a hőmérséklet periodicitása 25/20 °C (nappal/éjjel), a relatív páratartalom (RH) 65-75%, a megvilágítás/sötét periódus 16 h/8 h volt.

A tápoldatok egyes kísérletnél élő baktériumokat is tartalmaztak, melyet egy kereskedelmi forgalomban kapható biotrágya formájában adtuk a tápoldathoz 1 ml dm^{-3} mennyiségben. Az alkalmazott biotrágya egy viszkózus folyadék, mely két baktérium törzset, egy szabadon élő nitrogénkötőt *Azotobacter chroococcum*-ot ($1-2 \times 10^9$ db cm^{-3}) és egy foszfort mobilizáló baktériumtörzset a *Bacillus megatherium var. phosphoricum*-ot ($1-2 \times 10^8$ db cm^{-3}) tartalmazott. Melynek használata biogazdálkodásban is elfogadott, biokontroll engedélyszáma: FM 9961/1992. A szabadalmi leírások szerint három lényeges alkalmazási területe van:

- a talaj nitrogéntartamának gazdagítása és a foszfor felvehetőségének javítása,
- nagy rosttartalmú tarlómaradványok mineralizációjának gyorsítása és
- a talajélet serkentése.

2.2. A szárazanyag tartalom meghatározása

A növényi részek szárazanyag tömegét termo gravimetriás módszerrel határoztuk meg. A kísérleteket 6-8 ismétlésben állítottuk be, a növényi hajtás és gyökér részeket külön-külön előre felmelegített 85°C-os szárítószekrénybe helyeztük 48h időtartamra. Tömegállandóságig

történő szárítás után négy tizedes jegy pontossággal visszamértük a szárazanyag tömeget. A mérésekhez OHAUS Explorer (Svájc) típusú analitikai mérleget használtunk.

2.3. A relatív klorofill tartalom (SPAD-index) mérése

A relatív klorofill tartalom mérését (SPAD-index) SPAD-502 (Soil Plant Analysis System) (Minolta, Japán) klorofill mérővel végeztük. A műszer az össz-klorofill tartalomról ad információt, melyet a levélen áthaladó vörös (650 nm) és infravörös (940 nm) fény intenzitásából kalkulál. Méréseinket 10-szeres ismétlésben végeztük levelenként egyenletesen elosztva a levél alap és a levélcsőcs között. A módszer előnye, hogy gyors, a növényekre nem káros, így a növény fejlődése során folyamatosan nyomon követhető ezen a paraméter változása.

2.4. A fotoszintetikus pigmentek abszolút koncentrációjának meghatározása

A fotoszintetikus pigmentek meghatározásához a mintákból homogenizálás után 80%-os aceton felhasználásával pigment-kivonatot készítettünk (Wellburn, 1994). A klorofill-*a*, klorofill-*b* és az össz-karotinoidok koncentrációját spektrofotometriásan határoztuk meg (Metertek SP-830 UV/VIS, Japán). A kivonatban a koncentrációk (mg g^{-1}) meghatározása a 663, 646 és 470 nm-en regisztrált abszorbanciák alapján történt. A zavarosság kiküszöbölésére a 750 nm-en mért abszorbanciával korrigáltuk az eredményeinket. A klorofill-*a*, a klorofill-*b* és az össz-karotinoid tartalmat egységnyi száraztömegre vonatkoztattuk. Illetve Moran and Porath (1980) (In: Vidican and Cachita-Cosma, 2010) módszerét alkalmaztam, melynek során 50 mg friss levélmintát 5 ml DMF (N,N-Dimethylformamid)-ban oldottam 72 órán keresztül, 4°C-on. Majd spektrofotometriásan mértem a klorofill-*a* (664 nm), a klorofill-*b* (647 nm), és a karotinoidok mennyiségét 480 nm-es hullámhosszon. A mennyiségek meghatározásához az alábbi képleteket alkalmaztam:

$$\text{Klorofill-} a \text{ (mg/gSP)} = (11,65 A_{664} - 2,69 A_{647}) * v/sp$$

$$\text{Klorofill-} b \text{ (mg/gSP)} = (20,8 A_{647} - 3,14 A_{664}) * v/sp$$

$$\text{Karotinoidok (mg/gSP)} = (1000 A_{480} - 1,28 \text{ klorofill } a - 56,7 \text{ klorofill } b) / 245 * v/sp$$

ahol: A_{480} – az olvasható érték 480nm filternél;

A_{647} – az olvasható érték 647nm filternél;

A_{664} – az olvasható érték 664nm filternél;

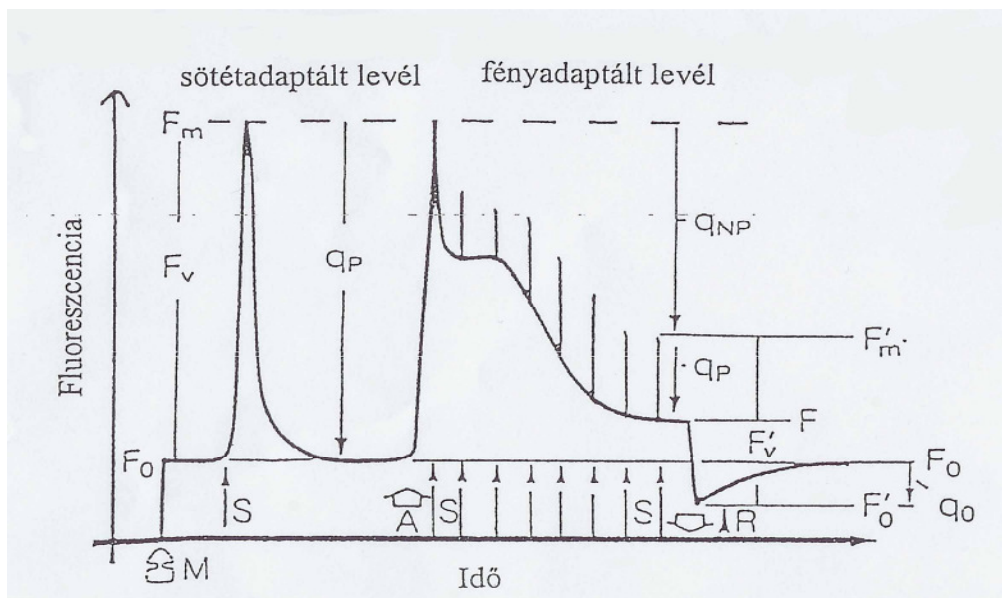
v – alkalmazott oldat ml-ben;

SP – mg friss növényi anyag, amely az extrakcióhoz fel lett használva.

2.5. A fotoszintetikus aktivitás mérése klorofill-fluoreszcencia indukció módszer segítségével

A fotoszintézis aktivitásának a megállapításához, közvetett módszerként a klorofill fluoreszcencia indukciós módszert alkalmaztuk (Schreiber *et al.*, 1994). A sötétadaptált levelekben az *in vivo* klorofill fluoreszcenciát, a klorofill fluoreszcencia indukció gyors szakaszának a paramétereit PAM-2001 típusú fluorométerrel (WALZ GmbH, Németország) határoztuk meg. A mérések előtt a növényi mintát 20 percig sötét adaptáltuk.

A mérés során előbb a sötétadaptált mintát gyenge mérőfényvel világítottuk meg, és mértük az alapfluoreszcencia (F_0) szintjét, majd telítési fényimpulzus ($6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) alkalmazása után, a műszer detektálta a maximális fluoreszcenciát (F_m). Az F_m sötétben kb. 20 s elteltével az F_0 szintre esik vissza (1. ábra). Az F_m és F_0 különbsége a változó fluoreszcencia (F_v). Az F_v/F_m arányt a PSII maximális (potenciális) fotokémiai hatékonyság jellemzésére használtuk.



1. ábra: A klorofill fluoreszcencia indukciós görbéje

2.6. A gyökér savkiválasztásának vizsgálata

A növények által kiválasztott gyökérsav kimutatásához agar lapokat használtunk, az indikátor brómkrezol-bíbor volt. Az agar lap készítése az alábbiak szerint történt. Az agaros táptalaj 100 ml desztillált vizet, 1,25 g Agar-agar tartalmazott, melyet vízfürdőn forraltunk kb. 15 percig, majd hozzáadtunk 1 ml brómkrezol-bíbor indikátort. (Az indikátor-oldat 1,25% brómkrezol-bíbor (BCP-5',5"-dibromo-o-krezolszulfotalein) tartalmazott, melynek pH-ját 1 n-os NaOH-dal és 1 n-os H₂SO₄-val állítottam be 6.0 pH -ra.) Az így elkészített táptalaj pH-ja 6.0; a színe bordó lett. A pH értékek (0.5 léptékű) változtatásával létrehoztam egy színskálát,

melynek segítségével azonosíthatóvá vált az egyes pH értékekhez tartozó szintartomány. Az agar-agaros táptalajt 3mm vastag lapokba öntöttük ki, és ezen lapokat használtuk fel a gyökér savkiválasztásának kimutatására (*Marshner et al.*, 1982). Ez egy viszonylag szubjektív módszer a kiválasztott gyökérsav láthatóvá tételére, illetve a kiválasztott sav pH-jának becslésére.

2.7. A minták elemtartalmának meghatározása

Növényi minták kezelése

A vizsgálati növények gyökereinek és hajtásainak elemtartalmát külön határoztuk meg. A gyökerek felületén kötött ionokat 0,1n HCl-as, a sósav maradékokat desztillált vizes öblítéssel távolítottuk el. Az elemzések előtt a hajtásokat és gyökereket szárítószekrényben 85 °C -on tömegállandóságig szárítottuk. A növényi minták előkészítése az elem meghatározáshoz az alábbiak szerint történt: a megfelelően előkészített (tömegállandóságig szárított, aprított) minta 1 g-jához, az előroncsolás során, 10 ml HNO₃-at adtam, amit 30 percig 60 °C -on tartottam. A mintákat a lehülésük után 3 ml H₂O₂-dal egészítettem ki, a roncsolást további 90 percig 120 °C-on végeztem. A roncsolt mintákat, a lehülésük után ioncserélt vízzel 50 ml -re egészítettem ki, majd MN 640 W szűrőpapírral szűrtem és OPTIMA 3300DV ICP-OA (Perkin-Elmer) spektrofotométerrel analizáltuk a minták elemtartalmát a DE AGTC Műszerközpontjában. A középértékektől való eltérések szélsőértékeit a táblázatokban jelöltem.

Talajminták kezelése

A megfelelően előkészített (szárítás, darálás) talajmintákból 1 g-ot mértem be, amelyet az előroncsolás során 5 cm³ desztillált cc. HNO₃-val, 60 °C hőmérsékleten 30 percig roncsoltam. Ezt követően a főroncsolás során 5 cm³ 30%-os H₂O₂ hozzáadásával, 270 percig 120 °C hőmérsékleten roncsoltam. A roncsolmány lehülése után ioncserélt vízzel, 50 cm³-re töltöttem fel a kémcsöveket, majd Filtrak 388 szűrőpapírral szűrtem a mintákat. Ezt követően ICP-MS készülékkel mértük a minták össz-elemtartalmát.

2.8. Rhizoboxos kísérletek

Az egyes rizoboxokba 250g talajt tettem, egyenletesen összekeverve a szántóföldi vízkapacitás 50%-ának megfelelő deszt. vízzel, illetve a kezeléseknak megfelelő CdSO₄-oldatokkal nedvesítettem. A kadmium kezeléseknél 10, 30, 50, 100, 150 μmol. 100 mg kg⁻¹ kadmiumra vonatkoztatott CdSO₄-oldatot használtam. Mielőtt a talajt a rizoboxokba raktam,

az egyes rizoboxok aljára ioncserélt vízzel benedvesített szűrőpapírt helyeztem. Ezáltal biztosítottuk az egyenletes nedvesség eloszlást a talajban. Naponta mértem az egyes rizoboxok tömegét és az egyes növények gyökereinek hosszát, a hiányzó vízmennyiséget (transpiráció, evaporáció) pótoltam. A rizoboxokba ültetett kukoricákat és napraforgókat az ültetést követő 5. napon értékeltem.

2.9. A kísérletek során felhasznált talajok paraméterei

A rizoboxos kísérletekhez két különböző talajt használtunk fel. Az egyik a DE AGTC Látóképi Kísérleti Telepéről származó mészlepedékes csernozjom talaj. Amely a kísérlet során kontrollként szerepelt, illetve az általam meghatározott koncentrációban tartalmazta a kadmiumot. A másik talaj bányászati tevékenységekből kifolyólag évek óta szennyezett területről, a Gyöngyösoroszi bánya meddő környékéről, a Toka-patak partjáról begyűjtött talaj. Melynek paraméterei az alábbiak voltak:

	Látókép	Gyöngyösoroszi		Gyöngyösoroszi	
		1. talajszelvény		2. talajszelvény	
Mélység (m)	0-0,3	0-0,4	0,4-0,8	0-0,4	0,4-0,8
pH (KCl)	5,71	7,20	4,97	6,27	3,76
pH (H ₂ O)	6,58				
Arany-féle kötöttség K	43				
Vízoldható összes só	0,015				
Ca (mg kg ⁻¹)		5740	40175	4750	27875
Humusz (%)	4,75	4,775	1,085	4,605	1,065
KCl-oldható NO ₃ -N+NO ₂ -N:(mg kg ⁻¹)	8,04	39,63	16,15	32,91	23,99
AL-oldható P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	199	46,5	0,75	34,84	0,77
AL-oldható K ₂ O (mg kg ⁻¹)	451	113,00	83,55	34,84	27,83
KCl-oldható Mg (mg kg ⁻¹)	332	8,59	0,925	8,59	4,47
KCl-EDTA oldható Fe (μg kg ⁻¹)		61,0	11,56	43,45	77,6
KCl-EDTA oldható Zn (μg kg ⁻¹)	7,9	93,4	3,1	88,1	22,63
KCl-EDTA oldható Mn (μg kg ⁻¹)	262	78,8	2,63	65,9	39,66
Pb _{220.353} (mg kg ⁻¹)		1952,5	839	1913,5	616
Cd _{228.802} (mg kg ⁻¹)		4,485	11,7	2,705	12,3

2.10. Statisztikai kiértékelések

Az eredmények statisztikai kiértékelését Microsoft Excel 2007, Sigmaplot 8.0 (2001) és SPSS 14.0 programokkal végeztük. Az eredmények értékelése során az adatok eloszlásának normalitását Kolmogorov-Smirnov teszttel végeztük. A középértékek szimultán összehasonlítását Duncan-teszttel végeztük. A nem azonos varianciájú kezelések esetében kapott szignifikancia eredmények valóságát t-próbával ellenőriztük.

3. AZ ÉRTEKEZÉS FŐBB MEGÁLLAPÍTÁSAI

Kukorica és napraforgó csíranövények néhány fiziológiai paraméterének alakulása a kadmium hatására

A Cd kezelések hatása a gyökérnövekedés kezdeti stádiumában

Az inkubációs időtartamot vizsgálva a kukorica érzékenyebb volt, mint a napraforgó. A gyökérnövekedés visszaesése mindhárom kezelési időtartam (1, 2, 3 h) alatt szignifikáns csökkenés mutatott (1. táblázat). A napraforgónál szignifikáns különbséget csak az 1 és 3 órás inkubációs idők között tudtunk kimutatni. Mindkét növénynél a 3 órás inkubációs idő mellett volt a legkifejezettebb a kadmium gyökérnövekedést gátló hatása. Az azonos inkubációs időtartamoknál, az hibridek között nem tudtunk statisztikailag igazolható különbségeket kimutatni, a 24 óra alatt bekövetkezett gyökérnövekedése között.

1. táblázat: Kukorica és napraforgó hibridek gyökérnövekedése (cm) a kezelési idő függvényében, 24 órával a kezelést követően. (n=8, ** p <0,01; *** p <0,001; n.s.= nincs szignifikáns különbség)

Kukorica hibridek	Kezelési idő			F-érték
	1óra	2 óra	3 óra	
PR37D25	1,22 a	0,84 b	0,79 b	8,30 ***
DKC4490	1,17 a	1,13 a	1,03 a	0,61 n.s.
P9400	1,27 a	1,15 a	0,88 b	5,87 **
Napraforgó hibridek	1óra	2 óra	3 óra	F-érték
NK Brio	0,22 ab	0,19 b	0,13 cb	2,50 *
NK Ferti	0,21 ab	0,11 cb	0,12 b	3,00 *
NK Neoma	0,19 a	0,19 a	0,12 a	1,36 n.s.

A kezelés után eltelt 6, 24 és 30 órával a kukoricánál mindhárom mérési időpontban szoros szignifikáns különbségek voltak a gyökér növekedésében (2. táblázat). A napraforgónál a 6 és 24 órás mérések között szignifikáns különbségek mutatkoztak, míg a 24 és 30 órás mérések között a gyökérnövekedésben már nem volt jelentős eltérés. A napraforgó gyökérnövekedése a kadmium terhelés hatására hamarabb leállt, mint a kukoricánál. A kezelés után eltelt időre a különböző hibridek azonos módon reagáltak. A kukorica hibrideknél az időegység alatti gyökérnövekedésükben szignifikáns különbségeket 24 és 30 órával a kezelés után tudtunk kimutatni. Míg a napraforgónál már 6 és 30 óra elteltével a Cd- kezelések után szignifikáns különbségek adódtak az egyes hibridek gyökérnövekedése között.

2. táblázat: Kukorica és napraforgó hibridek gyökérnövekedése (cm) a kezelés után eltelt idő függvényében. (n=8, *** p <0,001)

Kukorica hibridek	Kezelési után eltelt idő			F-érték
	6 óra	24 óra	30 óra	
PR37D25	0,41 c	1,02 b	1,39 a	38,96 ***
DKC4490	0,34 c	1,25 b	1,69 a	67,80 ***
P9400	0,41 c	1,19 b	1,68 a	77,55 ***
Napraforgó hibridek	6 óra	24 óra	30 óra	F-érték
NK Brio	0,06 b	0,20 a	0,26 a	9,58 ***
NK Neoma	0,11 b	0,19 b	0,37 a	35,87 ***
NK Feri	0,05 b	0,24 a	0,24 a	11,45 ***

A növekvő kadmium koncentráció (0, 5, 10, 30, 50, 100, 150 μM) hatására mindkét növény gyökerének növekedése jelentősen csökkent (3. táblázat). A napraforgó gyökérnövekedését már az igen alacsony kadmium koncentráció (5 μM) is jelentős mértékben gátolja (~63 %-kal csökkent a gyökér növekedése 24 órával a kezeléseket követően). A kukoricára csak az ennél magasabb, 30 μM feletti Cd- koncentráció okozott a napraforgóhoz hasonló mértékű (~60 %-os) visszaesést a gyökérnövekedésben. A kukorica erősebb Cd toleranciáját jelzi az is, hogy az egészen magas kadmium koncentráció mellett is képes volt némi gyökérnövekedést produkálni. Míg a napraforgónál 50 μM Cd- koncentráció felett teljesen gátolt volt a gyökérnövekedés. A vizsgálatba bevont kukorica hibridek között csak az 50 μM -nál nagyobb kadmium koncentrációnál volt szignifikáns különbség kimutatható, míg a napraforgónál az 50 μM alatti Cd-koncentrációknál (mivel e felett teljesen gátoltá vált a gyökérnövekedés).

3. táblázat: Kukorica és napraforgó hibridek gyökérnövekedésének (cm) érzékenysége közötti különbségek a növekvő kadmium koncentráció függvényében, 24 órával a kezelést követően. (n=8, *** p <0.001)

Cd (CdSO ₄) koncentráció (μM)	PR37D25	DKC4490	P9400	NK Brio	NK Neoma	NK Feri
0	1,41 a	1,75 a	1,74 a	0,51 a	0,48 a	0,29 a
5	1,38 a	1,49 ab	1,42 b	0,20 b	0,14 b	0,16 b
10	1,21 a	1,39 b	1,20 bc	0,05 c	0,09 bc	0,10 bc
30	0,61 b	0,71 c	0,68 de	0,01 c	0,02 bc	0,04 c
50	0,56 b	0,56 c	0,93 cd	0,00 c	0,00 c	0,00 c
100	0,23 c	0,14 d	0,37 ef	0,00 c	0,00 c	0,00 c
150	0,03 c	0,09 d	0,11 f	0,00 c	0,00 c	0,00 c

A száraz anyag produkció alakulása a Cd kezelések függvényében

A kukorica (*Zea mays L. cv MV343*) mind a hajtásának, mind a gyökerének száraz tömege csökkent a kadmium kezelések hatására, a kontrollhoz képest (4. táblázat). Az alkalmazott legnagyobb, 150 µM-os CdSO₄ kezelések hatására a kontrollhoz képest mind a hajtás, mind a gyökér száraz tömege megközelítőleg a felére csökkent.

4. táblázat: Rhizoboxban nevelt 10 napos kukorica hajtás és gyökér száraz tömege (g) a kadmium koncentráció függvényében (n=3)

Kukorica (MV343)		
	Hajtás száraz tömege	Gyökér száraz tömege
Kontroll	0,0633±0,01	0,1177±0,04
10 µM Cd	0,0607±0,03	0,1152±0,06
30 µM Cd	0,0593±0,01	0,0995±0,02
50 µM Cd	0,0485±0,01	0,0757±0,02
100 µM Cd	0,0358±0,02	0,0713±0,05
150 µM Cd	0,0290±0,01	0,0641±0,01

A napraforgó (*Helianthus annus L. cv Nova*) hajtásának és gyökerének száraz tömege igen eltérő eredményt mutatott a kukoricához képest. A hajtás száraz tömegében nem volt jelentős eltérés a kontrollhoz képest a kadmium kezelések hatására (5. táblázat). A gyökér száraz tömege ugyan csökkent a kadmium kezelések hatására, de nem olyan jelentős mértékben, mint a kukoricánál. Az eredményeket befolyásolhatta, hogy a két növényfaj eltérő tápanyag felvételi mechanizmussal rendelkezik.

5. táblázat: Rhizoboxban nevelt 10 napos napraforgó hajtás és gyökér száraz tömege (g) a kadmium koncentráció függvényében (n=3)

Napraforgó (Nova)		
	Hajtás száraz tömege	Gyökér száraz tömege
Kontroll	0,0319±0,01	0,0358±0,01
10 µM Cd	0,0357±0,00	0,0325±0,01
30 µM Cd	0,0355±0,01	0,0237±0,01
50 µM Cd	0,0342±0,01	0,0238±0,01
100 µM Cd	0,0337±0,01	0,0211±0,01
150 µM Cd	0,0377±0,00	0,0255±0,01

Eltérő talajtípusokon nevelt (a kísérleteimben állandó kontrollként szereplő Látóképi biogazdálkodásból származó csernozjom talajon, illetve egy nehézfémvel évek óta

szennyezett Gyöngyösoroszi bányá meddő, homok talaján) kukorica hibridek hajtásnak és gyökerének száraz tömegét mérve azt tapasztaltam, hogy a hibridek Gyöngyösorosziból származó szennyezett talajon jobb szárazanyag termelést mutattak, mint a szennyezetlen, kontrollként használt látóképi talajon (6. táblázat). Ez valószínűleg a talaj szerkezeti különbségével indokolható, mivel a Gyöngyösoroszi talaj homokos szerkezetű, így a gyökerek kisebb ellenállás mellett tudtak növekedni, ami nagyobb gyökérfelület-tápanyagfelszívó felszívó felületet tudott biztosítani, ami a hajtás száraztömegére is kedvezően hatott. Valamint, hogy az évek óta a Gyöngyösoroszi talajban felhalmozott nehézfémek, különböző kémiai folyamatoknak során átalakultak, a növények számára kevésbé felvehető formákká.

6. táblázat: Kukorica hibridek hajtás és gyökér száraz tömege (g) eltérő talajokon
(1: Látóképi talaj, 2: Gyöngyösoroszi talaj)(n=3)

	Siló King		Mv343		De285		P9400	
	gyökér	hajtás	gyökér	hajtás	gyökér	hajtás	gyökér	hajtás
1	0,1245±0,04	0,0154±0,00	0,1846±0,01	0,0214±0,01	0,1199±0,04	0,0188±0,01	0,1034±0,00	0,0183±0,00
2	0,1559±0,00	0,0201±0,01	0,2750±0,06	0,1053±0,12	0,1559±0,06	0,0254±0,01	0,1810±0,05	0,0223±0,00

A gyökerek által kiválasztott savak mennyisége a Cd kezelések hatására

A növekvő kadmium koncentráció hatására 24 óra elteltével jelentősen lecsökkent a gyökerek savkiválasztásának mértéke, így a rhizoszféra a pH-ja is emelkedett. Az egyes hibridek között jelentős különbségek adódtak.

Fiatal, néhány hetes növények fiziológiai paramétereinek változása a Cd-kezelések hatására

A Cd-kezelések hatása a kukorica és napraforgó gyökér növekedésére

A gyökérhosszúság vizsgálatoknál a napraforgó hibridek viszonylag egyöntetű érzékenységgel reagáltak az alkalmazott kadmium koncentrációkkal szemben, a kukorica hibridek között sokkal hektikusabb eredményeket kaptam. A kukorica hibridek kontrolljait összehasonlítva az Mv500-as produkálta legnagyobb átlagos gyökérhosszt (65 cm), azonban a kadmium kezelésekkel szemben is ez a hibrid volt a legérzékenyebb. A legkisebb átlagos gyökérhosszúságot (44 cm) az Mv343-as hibridnél mértem. A napraforgónál a kontroll gyökérnövekedését vizsgálva szintén egy hibrid, az NK Brio emelkedett ki a többi közül jelentős (60 cm feletti) gyökérhosszúságával. A többi vizsgált hibrid kezeletlen gyökereinek átlagos hosszúsága 40 és 53 cm közé esett. A napraforgónál a 10 mg dm⁻³ Cd kezelés megközelítőleg 50%-os visszaesést jelentett az átlagos gyökérhosszúságban. Mind a

kukoricánál, mind a napraforgónál az oldalgyökerek és a hajszálgökerek mennyisége és mérete jelentősen lecsökkent a kadmium kezelések hatására.

A relatív klorofill tartalom változása a Cd-kezelések hatására

A kukoricánál a kontrollhoz képest a kadmium kezelések szinte minden esetben szignifikáns csökkenést eredményeztek a relatív klorofill tartalomban (7. táblázat). A egyes hibridek között szignifikáns különbségek adódtak a kadmium kezelések függvényében, egyedül a 10 mg dm⁻³ kadmium kezelésnél, a második levélben mért SPAD-értékek nem mutattak szignifikáns különbséget a hibridek között.

7. táblázat: A kadmium kezelések hatása a kukorica hibridek relatív klorofill tartalmára (SPAD-érték) (n=5, Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; az egyes hibridek közötti különbséget a felső indexben lévő betűkkel jelöltem)

	2. levél			
	Mv343	Mv277	Mv500	De285
Kontroll	39,3 ^a ± 0,97	42,8 ^a ± 3,18	37,1 ^b ± 2,56	34,6 ^b ± 2,33
10 mg L⁻¹ Cd	21,4 ± 3,13*	24,1 ± 2,79***	24,7 ± 3,32***	22,1 ± 3,10**
20 mg L⁻¹ Cd	14,9 ^a ± 12,3*	15,4 ^a ± 5,31***	21,2 ^b ± 1,26***	14,8 ^a ± 6,05***
	3. levél			
	Mv343	Mv277	Mv500	De285
Kontroll	43,4 ^a ± 2,56	44,7 ^a ± 2,11	40,6 ^b ± 1,86	36,1 ^c ± 1,18
10 mg L⁻¹ Cd	31,9 ^{ab} ± 1,46***	34,4 ^a ± 2,12***	32,0 ^{ab} ± 1,91***	29,1 ^b ± 3,62**
20 mg L⁻¹ Cd	27,7 ^b ± 5,04***	30,4 ^a ± 1,06***	28,2 ^{ab} ± 1,46***	26,0 ^b ± 3,38***

A különböző napraforgó hibridek relatív klorofill tartalma eltérő érzékenységgel reagált a kadmium kezelésekre (8. táblázat). A 2. leveleken mért klorofill kevésbé csökkent a növekvő kadmium –koncentrációk hatására, mint a 3. levekben mért relatív klorofill tartalom. Mindkét levélen mért értékeket figyelembe véve az NK Brio bizonyult a legérzékenyebbnek. A kontroll mérési eredményeket összevetve is ennek a hibridnek volt a legmagasabb relatív klorofill tartalma.

8. táblázat: A kadmium kezelések hatása a kukorica hibridek relatív klorofill tartalmára (SPAD-érték) (n=5, Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; az egyes hibridek közötti különbséget a felső indexben lévő betűkkel jelöltem)

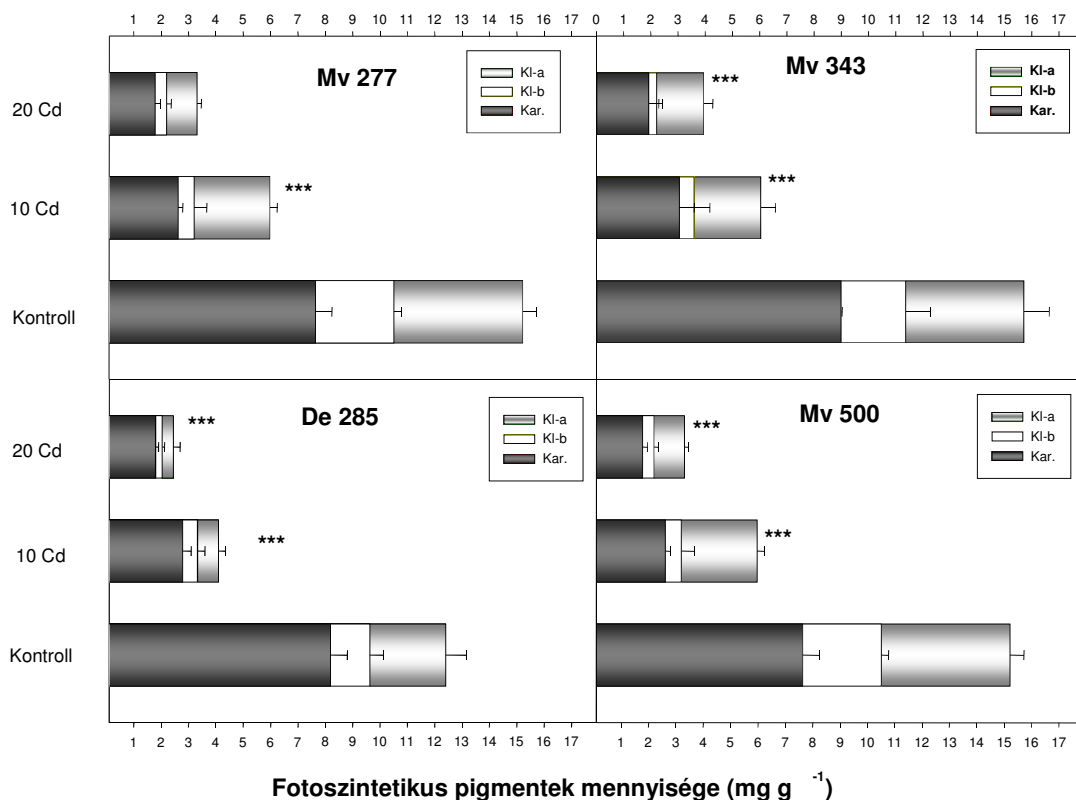
	2. levél			
	NK Brio	NK Neoma	NK Alego	Nova
Kontroll	52,3 ^a ± 1,6	44,2 ^b ± 1,1	43,0 ^b ± 1,49	42,7 ^b ± 2,32
1 mg dm⁻³ Cd	44,7 ^a ± 2,5	45,8 ^a ± 1,9	40,7 ^b ± 1,61	40,6 ^b ± 1,28
5 mg dm⁻³ Cd	42,6 ± 4,8*	41,1 ± 3,3	42,5 ± 0,79	41,8 ± 3,08
10 mg dm⁻³ Cd	40,1 ^a ± 3,3*	36,8 ^b ± 0,8*	41,2 ^a ± 1,19	39,6 ^a ± 2,10
	3. levél			
	NK Brio	NK Neoma	NK Alego	Nova
Kontroll	49,0 ^a ± 1,69	47,1 ^{ab} ± 0,90	41,2 ^c ± 1,24	43,9 ^{bc} ± 2,09
1 mg dm⁻³ Cd	45,7 ^a ± 1,64*	45,0 ^a ± 1,04	40,1 ^b ± 0,36	42,7 ^b ± 2,28
5 mg dm⁻³ Cd	38,8 ± 1,50**	39,5 ± 0,26***	38,2 ± 1,17*	38,6 ± 3,13*
10 mg dm⁻³ Cd	32,5 ^a ± 3,20***	26,5 ^b ± 2,11***	38,1 ^{cd} ± 1,28*	35,9 ^{ad} ± 2,41*

A fotoszintetikus pigment tartalom változása a Cd-kezelések függvényében

A kukorica hibridek abszolút klorofill tartalma, az összes vizsgált pigment csoport tekintetében (klorofill-*a*, -*b* és karotinoidok) a kadmium kezelések hatására szignifikánsan (60-75 %) csökkent a kontrollhoz képest (2. ábra). A három martonvásári hibrid (Mv277, Mv343, Mv500) közel azonos eredményeket produkált, míg a De285 az össz fotoszintetikus pigmentek mennyiségét tekintve kicsit elmaradt tőlük. Mind a négy kukorica hibridnél azt állapítottam meg, hogy a három vizsgált pigment csoport közül a klorofill-*a* és -*b* reagált a legérzékenyebben. A karotinoidok kevésbé voltak érzékenyek a kadmium-koncentráció különbségekre. Mind a négy kukorica hibridnél szignifikáns különbség volt a kontroll és a

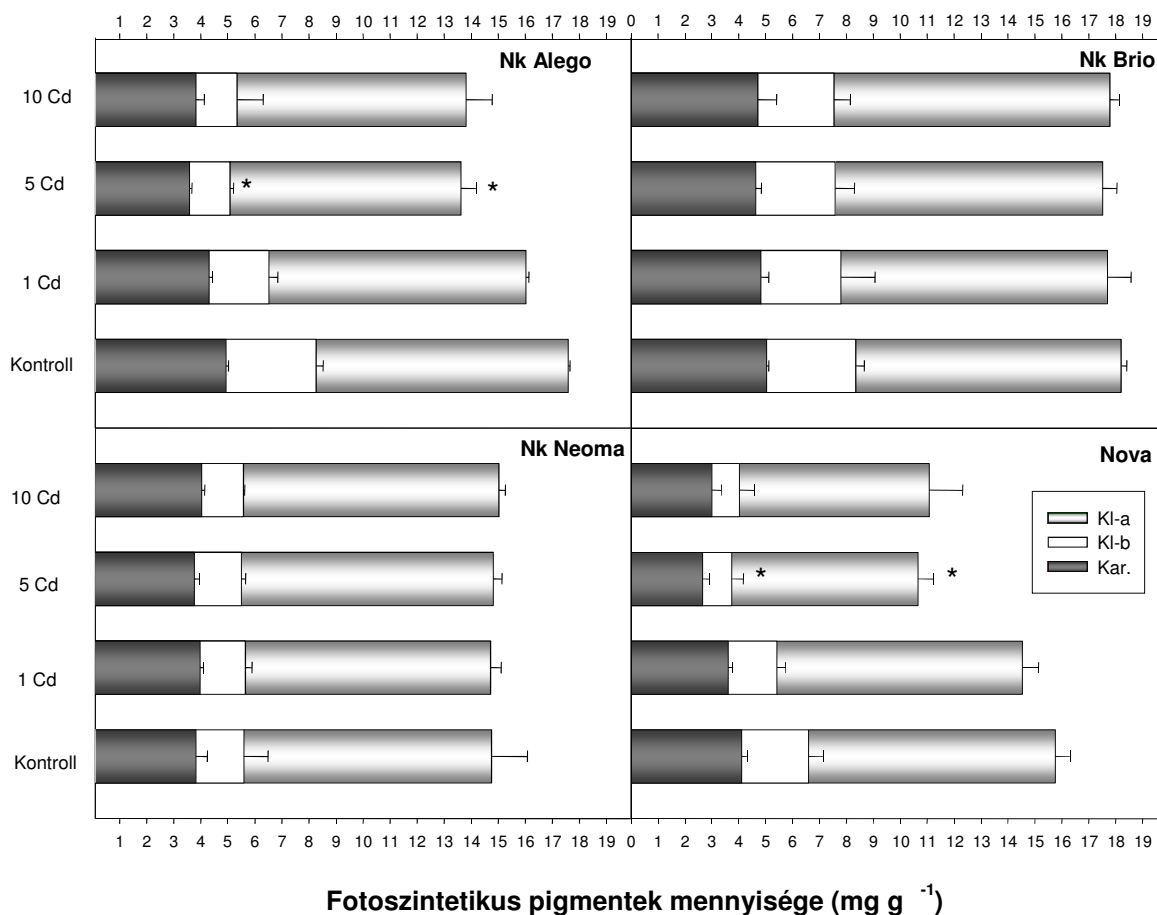
kadmium kezelések között. A kadmium kezelések koncentrációjára az Mv500-as hibrid reagált a legérzékenyebben.

A napraforgónál a fotoszintetikus pigmentek kevésbé reagáltak érzékenyen a kadmium kezelésekre (3. ábra). Mindegyik napraforgó hibridnél voltak olyan pigment csoportok, melyek 10 mg dm⁻³ Cd-koncentrációnál sem mutattak szignifikáns csökkenést, a kontrollhoz képest, ez leginkább azonban az idősebb, 2. levélen mért értékekre volt igaz.



2. ábra: Az abszolút klorofill tartalom (mg g^{-1}) változása a különböző kadmium kezelések hatására 26 napos kukorica növények 3. levelében ($n=3 \pm \text{s.e.}$) kadmium kezelések (1: kontroll, 2: $10 \text{ mg dm}^{-3} \text{ CdSO}_4$, 3: $20 \text{ mg dm}^{-3} \text{ CdSO}_4$); $p < 0.001^{***}$

A kukorica és napraforgó eredményeket tekintve megállapítható, hogy a fotoszintetikus pigmentek szintézise a napraforgónál kevésbé érzékenyek a kadmium kezelésre, mint a kukoricánál.



3. ábra: Az abszolút klorofill tartalom (mg g^{-1}) változása a különböző kadmium kezelések hatására 26 napos napraforgó növények 3. levelében ($n=3 \pm \text{s.e.}$) kadmium kezelések (1: kontroll, 2: $1 \text{ mg dm}^{-3} \text{ CdSO}_4$, 3: $5 \text{ mg dm}^{-3} \text{ CdSO}_4$, 4: $10 \text{ mg dm}^{-3} \text{ CdSO}_4$); $p < 0.05^*$

Az apoplazmatikus pH változása a kadmium koncentráció függvényében

Az apoplazmatikus pH meghatározása guttációs cseppekből történt. Guttáláskor a levelek csúcsán, szélén figyelhetők meg a guttációs cseppek, amelyek a xilémekben lévő vizet és a benne oldott összetevőket (pl. sók, cukrok) tartalmazzák. A levelek apoplazmatikus pH-ját vizsgálva (9. táblázat) megállapítottam, hogy a kontroll növények pH-ja mindhárom kukorica hibridnél (Mv343, Mv500, De285) a bázikus tartományba esett (pH 8.6 – 9.1). A növekvő

kadmium koncentrációk hatására pedig csökkent a pH értéke. A 10 mg dm⁻³ Cd koncentrációnál ez 8.1 – 9.0 pH tartomány között alakult, míg a 20 mg dm⁻³ Cd kezelésnél 7.2 és 8.1 között változott a pH értéke.

9. táblázat: Guttációs csepp pH-jának alakulása a különböző koncentrációjú kadmium (CdSO₄) kezelések hatására kukorica hibrideken (n=5-7)

Hibrid	Kezelés	pH _{guttációs csepp}	ΔpH
MV 343	Kontroll	9,1 ± 0.71	
	10 mg dm ⁻³ Cd	9,0 ± 0.44	-0.1
	20 mg dm ⁻³ Cd	7,9 ± 1.41	-1.2
MV 500	Kontroll	8.6 ± 0.22	
	10 mg dm ⁻³ Cd	8.3 ± 0.00	-0.3
	20 mg dm ⁻³ Cd	8.1 ± 1.26	-0.5
De 285	Kontroll	8.7 ± 0.74	
	10 mg dm ⁻³ Cd	8.1 ± 0.66	-0.6
	20 mg dm ⁻³ Cd	7.2 ± 0.40	-1.5

A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó néhány fiziológiai paraméterére

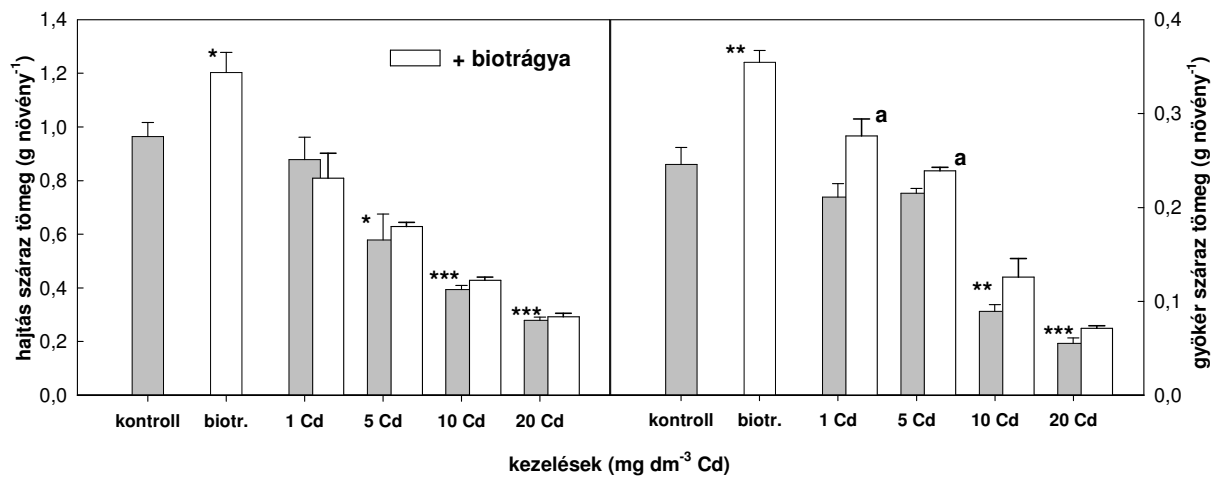
A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó friss tömegére

A kadmium kezelés nagymértékben szignifikánsan csökkentette a kukorica friss tömeg mennyiségét a kontrollhoz képest. A napraforgónál nagyobb mértékű volt a frisstömeg csökkenése kadmium kezelés hatására, mint a kukoricánál. A napraforgó érzékenyebbnek bizonyult a kukoricánál a kadmium koncentráció tekintetében, mivel a 20 mg dm⁻³ kadmium koncentrációnál nem is tudtuk felnevelni a növényeket. A biotrágya kezelés hatására mindkét növényenél azt tapasztaltuk, hogy a kontrollhoz képest közel 25-30%-kal nagyobb friss tömeg volt mérhető. Azokban az esetekben, amikor a kadmium kezeléseket biotrágyával egészítettük ki, az 1 mg dm⁻³ Cd koncentrációnál szignifikánsan növekedett a friss tömeg mennyisége a kukorica és a napraforgó esetében is, míg az 5 és 10 mg dm⁻³ Cd koncentrációnál nem volt kimutatható különbség.

A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó száraz tömegére

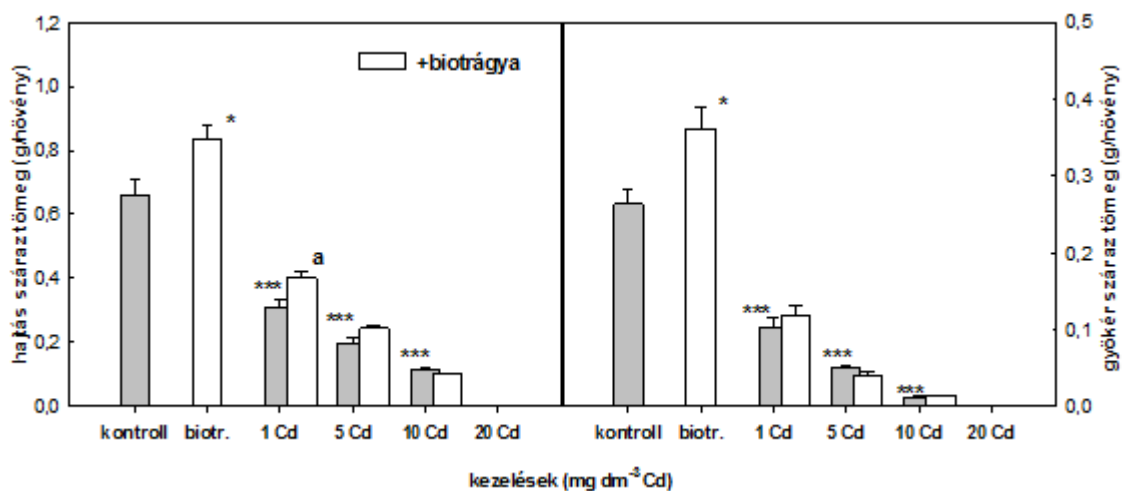
A kukorica hajtás száraz anyag tartalma 5, 10, 20 mg dm⁻³-es Cd kezeléseknél szignifikánsan kisebb a kontroll növények szárazanyag tartalmához képest (4. ábra). A napraforgó hajtás szárazanyag tömege, már az 1 mg dm⁻³-es Cd kezelés hatására is

szignifikánsan kisebb volt a kontrollhoz képest. A biotrágya kezelés mindkét vizsgálati növény hajtás- és gyökér száraz tömegét növelte. A kadmium kezelés a napraforgó hajtás és a gyökér száraz anyag tömegét jobban csökkentette, mint a kukoricáét. A biotrágya kezelés mind a hajtás, mind a gyökér szárazanyag tömeget növelte. Ez a növekedés a kukoricánál a gyökér esetében nagyobb mértékű volt (30%), mint a hajtásnál (20%). A napraforgó gyökerének száraz anyag tömegét vizsgálva megállapíthatjuk, hogy az 1 mg dm⁻³-es Cd kezelésnél a kiegészítő biotrágya kezelés szignifikánsan nagyobb értéket adott, viszont a többi kadmium koncentrációnál nem tudtuk kimutatni a biotrágya kezelésnek a kukoricánál tapasztalt kedvező hatását (5. ábra).



4. ábra: Kukorica hajtás és gyökér száraz anyag (g/növény) tartalmának változása különböző koncentrációjú kadmium (Cd) kezelés hatására, valamint biotrágya alkalmazása esetén. (n=6-8 ±s.e) (kontrollhoz képest Cd kezelés hatása: p <0.05*, p <0.01**, p <0.001***; biotrágya kezelés hatása p <0.05^a)

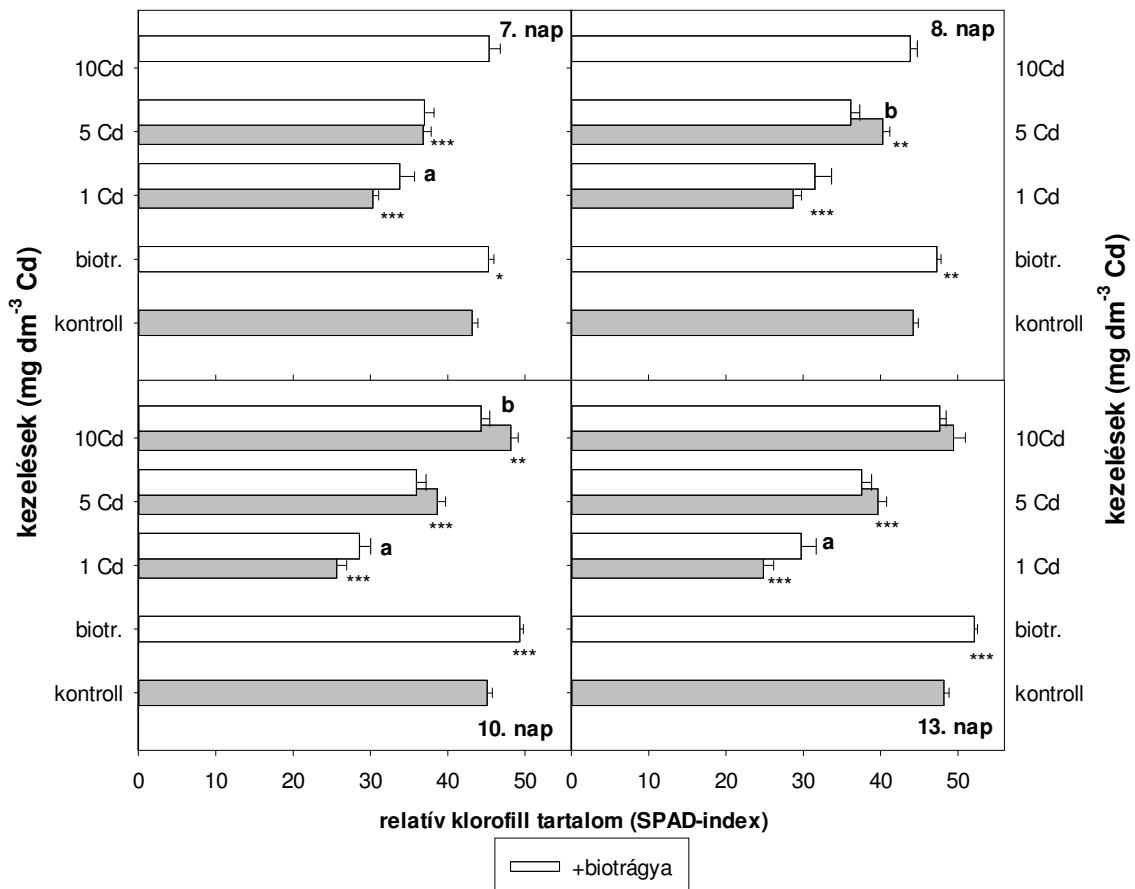
A napraforgó hajtás és gyökér száraz anyag tartalmának a változását különböző koncentrációjú kadmium és biotrágya kezelés hatására a 31. ábra mutatja be.



5. ábra: Napraforgó hajtás és gyökér száraz anyag (g/növény) tartalmának változása különböző koncentrációjú kadmium (Cd) kezelés hatására, valamint biotrágya alkalmazása esetén. (n=6-8 ±s.e) (kontrollhoz képest Cd kezelés hatása: p <0.05*, p <0.01**, p <0.001***; biotrágya kezelés hatása p <0.05^a)

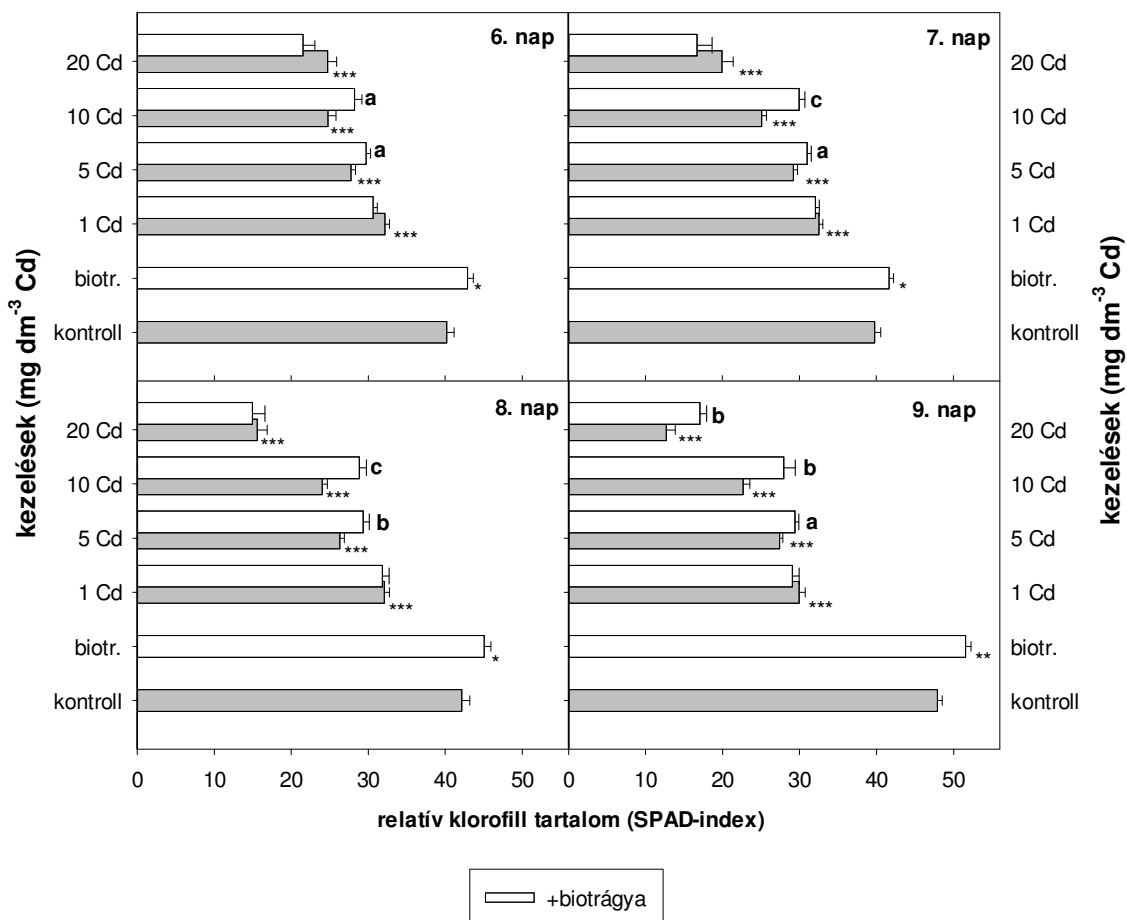
A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó relatív klorofill tartalmára

A kadmium kezelés hatására szignifikánsan csökkent a levelek relatív klorofill tartalma. Míg a kukoricánál az alkalmazott kadmium kezelések hatására a relatív klorofill tartalom a koncentráció függvényében csökkent (6. ábra), addig a napraforgó esetében a nagyobb kadmium koncentrációknál sem tapasztaltunk ilyen irányú változást (7. ábra). A nagyobb kadmium koncentrációval kezelt napraforgók ugyan kisebb méretűek voltak, de ez a relatív klorofill tartalmukban nem volt tapasztalható. Valószínűleg nagyobb mértékben csökkent a növekedés, mint a klorofill tartalom. A napraforgónál az 1 mg dm⁻³ kadmium koncentráció mellett alkalmazott biotrágya kezelés az összes mérési napon szignifikánsan növelte a relatív klorofill tartalom értékét, a többi kadmium koncentrációval szemben azonban hatástalan volt.



6. ábra Napraforgó hajtás relatív-klorofill tartalom (SPAD-index) értékének változása különböző koncentrációjú kadmium (Cd) és biotrágya kezelés hatására 7, 8, 10 és 13 napja kezelt növény esetében. (n=80-100 ±s.e) (kontrollhoz képest Cd kezelés hatása: p <0.05*, p <0.01**, p <0.001***)

biotrágya kezelés hatása $p < 0.05^a$, $p < 0.01^b$)



7. ábra A relatív-klorofill tartalom (SPAD-index) értékének változása különböző koncentrációjú kadmium (Cd) és biotrágya kezelés hatására 6, 7, 8 és 9 napja kezelt kukorica növény esetében. ($n=80-100 \pm s.e$) (kontrollhoz képest Cd kezelés hatása: $p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$, $p < 0.001^{***}$ biotrágya kezelés hatása $p < 0.05^a$, $p < 0.01^b$, $p < 0.001^c$)

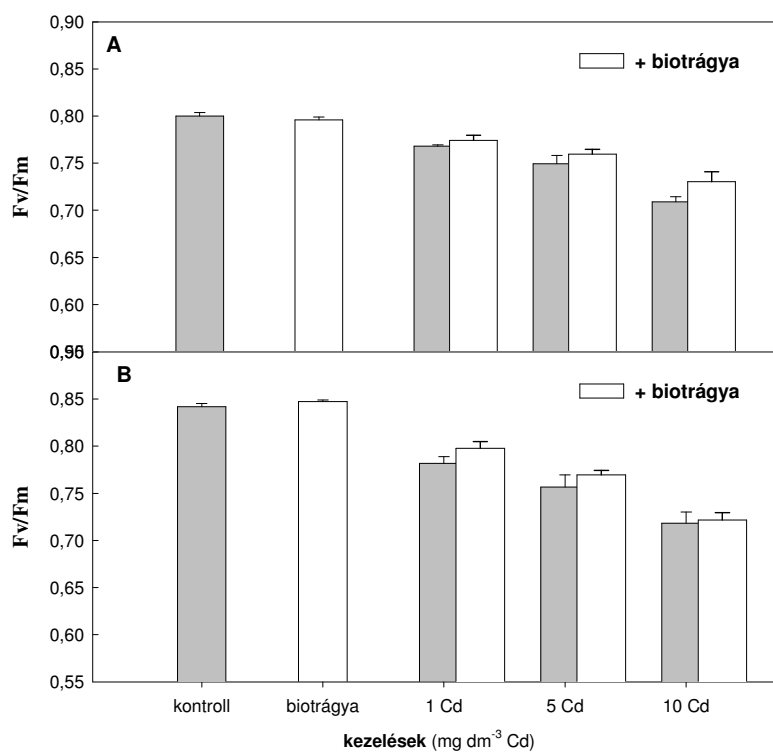
A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó fotoszintetikus pigment tartalmára

Eredményeink szerint a kadmium kezelések csökkentették a klorofilok, valamint a karotinoidok mennyiségét is a kukorica hajtásában, bár a karotinoidok kevésbé voltak érzékenyek. Az önmagában alkalmazott biotrágya növelte a fotoszintetikus pigmentek mennyiségét, a Cd-kezeléssel együtt alkalmazva csökkentette a kadmium negatív hatását. A napraforgónál is hasonló változásokat tapasztaltunk, a kadmium kezelések csökkentették a klorofilok mennyiségét, bár a 10 mg dm⁻³ Cd kezelés kontrollhoz közeli értéket adott, ahogy azt a Spad-index értékeknél is láthattuk. Amíg tehát a kukorica hajtásában egyértelműen a fotoszintetikus pigmentek csökkenését mutattuk ki kadmium kezelés hatására, addig a

napraforgó esetében, a magas koncentrációjú kadmium kezelés növelte a szárazanyag tartalomra vonatkoztatott fotoszintetikus pigment mennyiségeket.

A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó fotokémiai hatékonyságára

A potenciális fotokémiai hatékonyság értékére az jellemző, hogy mindkét vizsgált növény csoportnál a kontroll F_v/F_m értéke közelít az optimálisan becsült értékhez, a biotrágya kezelés hatására is ilyen magas maradt (8. ábra). A különböző koncentrációjú kadmium kezelések hatására csökkent az F_v/F_m , a napraforgó esetében nagyobb mértékben, mint a kukoricánál. A kukorica esetében a 10 mg dm^{-3} kadmium kezelés biotrágyával kiegészítve kompenzálja a kadmium hatását, azaz itt is nagyobb F_v/F_m értékeket mértünk biotrágya kiegészítéssel, mint nélküle. A napraforgó esetében viszont minimális különbség sem mutatható ki a 10 mg dm^{-3} kadmium kezelés és a biotrágya kiegészítés F_v/F_m értékeket befolyásoló hatása között.



8. ábra A potenciális fotokémiai hatékonyság (F_v/F_m) értékének változása különböző koncentrációjú kadmium (Cd) és biotrágya kezelés hatására kukorica (A) és napraforgó (B) növények esetében.
 $n=6 \pm s. e$

A biotrágyával kiegészített kadmium kezelések hatása a kukorica és napraforgó kadmium tartalmára

A kadmium kezelések hatására mindkét növényben növekedett a kadmium mennyisége a hajtásban és a gyökérben a kontrollhoz képest (10-11. táblázat). A gyökér kadmium tartalma többszöröse a hajtás kadmium tartalmának, azaz a felvett kadmium a gyökérben marad és csak viszonylag kis része szállítódik a hajtásba. Biotrágya kezelés hatására mérséklődött a kimutatott kadmium mennyisége a kukorica hajtásában és a gyökérben is.

10. táblázat A kadmiummal és biotrágyával kezelt kukorica hajtásának és gyökerének kadmium tartalma ($n=3\pm s.e.$) (szignifikancia vizsgálat azonos kadmium kezelés és biotrágya kiegészítés között, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

	Hajtás ($\mu\text{g/növény}$)	Gyökér ($\mu\text{g/növény}$)
Kontroll	1,31 \pm 0,10	11,50 \pm 0,72
1 mg dm⁻³ Cd	134,67 \pm 9,06	597,00 \pm 23,52
5 mg dm⁻³ Cd	215,33 \pm 18,09	950,33 \pm 24,39
10 mg dm⁻³ Cd	345,50 \pm 20,50	1602,33 \pm 64,68
20 mg dm⁻³ Cd	514,00 \pm 5,51	2548,33 \pm 118,44
1 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	159,33 \pm 22,26	653,33 \pm 39,22
5 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	209,67 \pm 12,41	880,67 \pm 80,88*
10 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	249,67 \pm 6,38**	1179,00 \pm 49,86**
20 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	563,33 \pm 28,39	3520,00 \pm 236,43

A napraforgó nagyobb mennyiségű kadmiumot halmozott fel a hajtásában és a gyökérében, a kukoricához képest. Ez magyarázza a fentebbi vizsgálatok eredményeit, melyek szerint a napraforgó nagyobb érzékenységet mutatott kadmiummal szemben, mint a kukorica. Feltételezzük, hogy a kukorica és a napraforgó védekezési mechanizmusa eltérő, ez azonban a további kutatásaim tárgya lesz.

11. táblázat A kadmiummal és biotrágyával kezelt napraforgó hajtásának és gyökerének kadmium tartalma ($n=3\pm s.e.$) (szignifikancia vizsgálat azonos kadmium kezelés és biotrágya kiegészítés között, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

	Hajtás ($\mu\text{g/növény}$)	Gyökér ($\mu\text{g/növény}$)
Kontroll	4,68 \pm 0,07	12,67 \pm 1,35
1 mg dm⁻³ Cd	272,67 \pm 16,75	604,00 \pm 84,36
5 mg dm⁻³ Cd	797,67 \pm 13,86	2047,33 \pm 61,65
10 mg dm⁻³ Cd	922,33 \pm 76,91	11334,66 \pm 1220,34
1 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	216,00 \pm 19,86	512,00 \pm 155,47
5 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	800,67 \pm 52,87	2329,33 \pm 352,77
10 mg dm⁻³ Cd+biotrágya	504,00 \pm 57,04**	6745,67 \pm 676,96**

4. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

- A vizsgálataimba bevont két eltérő fajú csíranövénynél (napraforgó és a kukorica) **megállapítottam, hogy eltérő fajú növényegyedek gyökér-növekedésének összehasonlító vizsgálata során az 50 μM feletti CdSO_4 koncentrációknál a relatív gyökernövekedés már nem változott számottevően, illetve egyes növényfajok, mint eredményeimben a napraforgó érzékenyebben reagálhatnak a magas kadmium koncentrációkra.** Az 50 μM kadmium koncentrációnál teljesen gátlódott a gyökernövekedés.
- A néhány napos **csíranövények gyökerének savkiválasztása szoros összefüggést mutatott a gyökér növekedésével.** A gyökér növekedésének gátlásával arányosan a gyökerek savkiválasztása is csökkent. A napraforgónál a savkiválasztás a gyökérnyak zónájában volt az intenzívebb, míg a kukoricánál a gyökérnyak és a gyökércsúcs körüli zónákban volt erőteljesebb.
- A kukorica és napraforgó eredményeket tekintve megállapítható, hogy **a fotoszintetikus pigmentek szintézise a napraforgónál kevésbé érzékeny a kadmium kezelésre, mint a kukoricánál.** Vagyis a napraforgó szárazanyag termelését valószínűleg nem a fotoszintetikus pigmentek mennyiségének csökkenése révén gátolja, hanem valamilyen más folyamaton keresztül akadályozza a fotoszintézist.
- A biotrágya kezelések célja a gyakorlatban a tápanyagok mobilizálása, a növények tápanyagfelvételének elősegítése, így feltételeztük, hogy hatására jelentősen megnövekedne a kadmium felvétele is. **Mérési eredményeink alapján azonban a kiegészítő biotrágya kezelések hatására nem növekedett jelentős mértékben a felvett kadmium mennyisége, sőt egyes esetekben mindkét növénynél mérséklődött a hajtásban és a gyökérben akkumulált kadmium mennyisége.**

5. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

- Eredményeink alapján **a biotrágya alkalmazása kadmiummal szennyezett talajokon is indokolt.** A biotrágya hasznos mikroorganizmusai kompenzálják a **kadmium negatív hatásait**, elősegítik a növények tápanyagfelvételét, szennyezett talajon is, miközben **a nehézfémek felvételét nem erősítik fel jelentős mértékben, feltételezhetően szerepet játszhatnak a nehézfémek felvételének megakadályozásában is.**
- **A kadmium kezelésekre bekövetkezett apoplazmás pH változást,** a gyakorlatban jobban preferált centrifugálással szemben, **guttációs cseppek pH-értékének mérésével határoztam meg,** amely jóval olcsóbb és gyorsabb mérési módszer. Ezzel a módszerrel a tesztnövények csonkítás nélkül alkalmasak lehetnek további vizsgálatokra is. **Méréseink alapján a növekvő kadmium koncentráció hatására a kontrolhoz képest csökkent az apoplazmatikus pH értéke.**

6. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

Tudományos közlemény, idegen nyelvű, lektorált folyóiratban:

- Gajdos É. – Lévai L. – Veres Sz. – Kovács B.: 2012. Effects of Biofertilizers on Maize and Sunflower Seedlings under Cadmium-stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis (special edition)* 43. (1-2): 272-279. (IF₂₀₁₁: 0.506)
- Gajdos É. – Kiss L. – Bánszki L.: 2011. Possible effects of cadmium content of soils on certain physiological parameters of maize. 11th Alps-Adria Workshop, *Növényterm.* 60: 283-286.
- Gajdos É. – Tóth B. – Kovács B.: 2009. Applicability of biofertilization under Cadmium stress in the case of maize and sunflower. *Cereal Res. Commun.* 37: 593-596.
- Lévai L. – Veres Sz. – Bákonyi N. – Gajdos É.: 2008. Can wood ash and bio-fertilizer play a role in organic agriculture? *Agronomiski Glasnik (Agronomy Journal)* 3: 263-272. ISSN 0002-1954.
- Veres Sz. – Lévai L. – Bákonyi, N. – Gajdos É.: 2008. Correlation of nutrient contents and biofertilizations. *Cereal Res. Commun.* 36: 1831-1835. (IF₂₀₀₈: 1.190).
- Lévai L. – Veres Sz. – Gajdos É. – Bákonyi N.: 2008. The Possible Role of bacteria Containing Bio-fertilizers in Sustainable Agriculture. *Soil Science and Plant Nutrition, Special issue.* 8(3):188-189.
- Veres Sz. – Lévai L. – Mészáros I. – Gajdos É.: 2007. The effects of bio-fertilizers and nitrogen nutrition on the physiology of maize. *Cereal Res. Commun.* pp. 1297-1301. (IF₂₀₀₇: 1.190).

Tudományos közlemény magyar nyelvű, lektorált folyóiratban:

- Gajdos É.: 2012. Néhány kukorica és napraforgó fajta kadmium érzékenységének vizsgálata. *Acta Agr. Debr.* 50: 169-173. ISSN 1587-1282.
- Gajdos É.: 2009. Baktérium alapú biotrágya hatása a kukorica és napraforgó kadmium toleranciájára vízkultúrás kísérletben. *Acta Agr. Debr.* 35: 15-21. ISSN 1587-1282.
- Veres Sz. – Lévai, L. – Gajdos É. – Bákonyi N.: 2008. A biotrágyázás hatása napraforgó és kukorica tápanyag-gazdálkodására kadmium szennyezés esetén. XXXII. *Acta Agr. Óváriensis.* ISBN 978 963 9883 05 5
- Veres Sz. – Lévai L. – Gajdos É. – Mészáros I.: 2007. A biotrágyázás hatása kukorica szárazanyag termelésére. *Acta Agr. Óváriensis.* 49(2): 557-561.

Idegen nyelvű lektorált konferencia kiadvány:

Gajdos É. – Bákonyi N. – Marozsán M. – Tóth B. – Lévai L. – Veres Sz.: 2011. Cadmium tolerance of maize and sunflower seedlings. 46th Croatian & 6th International Symposium on Agriculture, Opatija. pp.700-703. ISBN 978-953-6135-90-5

Gajdos É. – Veres Sz. – Bákonyi N. – Tóth B. – Víg R. – Marozsán M. – Lévai L.: 2010. Effects of cadmium on some physiological processes of crop plants. 45th Croatian & 5th International Symposium on Agriculture, Opatija, 2010. february 14-09. pp. 712-716. (eds. Marič and Lončarić) ISBN 978-953-6331-79-6

Gajdos É. – Veres Sz. – Bákonyi N. – Tóth B. – Bódi É. – Marozsán M. – Lévai L.: 2009. Effects of bacteria containing biofertilizer on Cd- tolerance of some crop plants. Előadás. In: Poceedings of 18th symposium of The international scientific center of fertilizers, Rome, Italy, pp. 67-73. ISSN 1971-0755

Veres Sz. – Lévai L. – Marozsán M. – Gajdos É.: 2009. The effect of plant growth promoting bacteria containing fertilizer to the photosynthetic activity of maize seedlings. In: Giametta, G. and Zimbalatti, G. (eds.): Proceedings of XXXIII CIOSTA CIGR V Conference 2009 'Technology and management to ensure sustainable agriculture, agro-systems, forestry and safety' and IUFRO (Unit 3.06.00) Workshop, Reggio Calabria, Italy, Vol., 3, pp. 2123-2127. ISBN 978 88 7583 031 2

Veres Sz. – Lévai L. – Marozsán M. – Gajdos É. – Bákonyi N. – Tóth B.: 2009. Changes of some chlorophyll-fluorescence parameters under biofertilization. 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture, Opatija, 2009.february 16-20. 662 pp. ISBN 978-953-6331-61-3

Gajdos É. – Bákonyi N. – Lévai L. – Veres Sz. – Marozsán M. – Tóth B.: 2009. Physiological examination of cadmium contamination on corn and sunflower seedlings. In: Proceedings of 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture, Opatia, Croatia, pp. 510-512. ISBN 978-953-6331-61-3

Bákonyi N. – Tóth B. – Gajdos É. – Bódi É. – Marozsán M. – Veres Sz. – Lévai L.: 2009. Role of biofertilisers in plant nutrition. Előadás. 18th CIEC Symposium of the International Scientific Centre of Fertilizers. November 8-12, 2009 Rome, Italy. pp.17-22. ISSN 1971-0755

Marozsán M. – Veres Sz. – Gajdos É. – Bákonyi N. – Tóth B. – Lévai L.: 2009. The possible role of bio-fertilizers in agriculture. 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture, Opatija, 2009. february 16-20. 585 pp ISBN 978-953-6331-61-3

Lévai L. – Veres Sz. – Gajdos É. – Bákonyi N.: 2008. The Possible Role of Bacteria Containing Bio-Fertilizers in Sustainable Agriculture. Poster. Session II.,5th International Symposium of Interactions of Soil Minerals with Organic Compartments and Microorganisms, Pucón, Chile, November 24-28 pp.

Magyar nyelvű lektorált konferencia kiadvány:

Gajdos É. – Bákonyi N. – Marozsán M. – Víg R. – Veres Sz. – Lévai L.: 2010. Kadmummal és baktérium alapú biotrágyával kezelt napraforgó hibridek növényfiziológiai vizsgálata. Az Élhető Vidékért 2010 Környezetgazdálkodási Konferencia 223-227. ISBN 978-963-229-871-9

Magyar nyelvű nem lektorált konferencia kiadvány:

- Gajdos É. – Bákonyi N. – Lévai L. – Veres Sz. – Marozsán M. – Tóth B.:* 2008. A biotrágya szerepe a növények nehézfém toleranciájában Poszter VI. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási Napok, Mezőtúr 2008. okt. 16-17. pp. 49 ISBN 978-963-87874-1-5
- Gajdos É.:* 2008. A biotrágya és a nehézfém stressz kölcsönhatásainak fiziológiai vizsgálata. FVM Tudomány Ünnepe-„Fiatal kutatók az élhető földért”. 2008. november 24. Budapest
- Gajdos É. – Bákonyi N. – Lévai L. – Veres Sz.:* 2007. Biotrágyázás, mint alternatív tápanyagutánpótlási lehetőség alkalmazása szennyezett talajokon. Poszter Erdei Ferenc IV. Tudományos Konferencia „A tudomány mindenkié” Kecskemét 2007. aug. 27-28. II. kötet, pp. 885-888. ISBN 978-963-7294 63-1 Ö, ISBN 978-963-7294-65-5
- Gajdos É. – Bákonyi N. – Lévai L. – Veres Sz.:* 2007. A biotrágyázás növényi produkciót befolyásoló hatása kadmiummal szennyezett talajokon Poszter Georgikon Napok „Agrárgazdaság a vidékért, a környezetért, az életminőségért”, Keszthely 2007 szept. 20-21. pp.146, ISBN 978-963-9639-20-1

Egyéb, idegen nyelvű, lektorált konferencia kiadvány:

- Lévai L. – Tóth B. – Gajdos É. – Bákonyi N. – Veres Sz.:* 2011. Bio-Fertilizers for the Quality of Agricultural Production. Proceedings. International Symposium on Kaz Mountains (Mount IDA) and Edremit. Global Changes in the Mediterranean Region (IKES2011). pp. 531-539. Editords: Recep Efe-Münir Öztürk-Ibrahim Atalay. ISBN:978-605-87840-0-0.
- Lévai L. –Veres Sz. –Tóth B. – Bákonyi N. –Gajdos É. –Faragó E. –Marozsán M.:* 2010. Necessity to use living bacteria in plant nutriton. 45th Croatian & 5th International Symposium on Agriculture, Opatija, 2010. february 14-09. pp. 818-822. (eds. Marič and Lončarić) ISBN 978-953-6331-79-6

Egyéb, magyar nyelvű, nem lektorált konferencia kiadvány:

- Bákonyi N. – Gajdos É. –Lévai L. – Veres Sz. – Marozsán M. - Tóth B.:* 2009. Baktérium alapú biotrágyák szerepe a mezőgazdasági növények tápanyag-gazdálkodásában. LI. Georgikon Napok, Keszthely, 2009. október 1-2. Összefoglalók pp 25. ISBN 978 963 9639 34 8
- Marozsán M. – Veres Sz. – Gajdos É. – Bákonyi N. – Tóth B. – Léva, L.:* 2008. A biotrágyák és a fahamu lehetséges szerepe a növények tápanyagellátásában. Poszter. VI. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási Napok, Mezőtúr, 2008. október 16-17. Összefoglalók pp 81. ISBN 978-963-87874-1-5
- Bákonyi N. – Gajdos É. – Lévai L. – Veres Sz. – Marozsán M. – Tóth B.:* 2008. Különböző biotrágyák fiziológiai összehasonlítása. Poszter. VI. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási

Napok, Mezőtúr 2008. október 16-17. Összefoglalók pp 46. ISBN 978-963-87874-1-5