

DOKTORI (Ph.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**SZELÉN-INDUKÁLT STRESSZVÁLASZOK VIZSGÁLATA
ARABIDOPSIS THALIANA L. ÉS *PISUM SATIVUM* L.
NÖVÉNYEKBEN, A BIOFORTIFIKÁCIÓ LEHETŐSÉGE**

LEHOTAI NÓRA

TÉMAVEZETŐK:
ÖRDÖGNÉ DR. KOLBERT ZSUZSANNA
EGYETEMI ADJUNKTUS
PROF. DR. ERDEI LÁSZLÓ
EGYETEMI TANÁR



TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
NÖVÉNYBIOLÓGIAI TANSZÉK

2014

BEVEZETÉS

A téma aktualitását támasztja alá, hogy a szelénrel kapcsolatos kutatások csak az elmúlt pár évtizedben kerültek előtérbe. A kutatók rávilágítottak arra, hogy bár a szelén a növények számára nem létfontosságú, az állati és emberi szervezetben azonban esszenciális mikroelem, így nélkülözhetetlen az optimális működéshez, valamint egyre több kutatás irányul a szelén szerepének a tanulmányozására.

A szelén terhelés, más környezeti stresszfaktorokhoz hasonlóan morfológiai változásokat (stressz-indukált morfogenetikai válaszok, SIMV) idéz elő a növényi szervezetben, hiszen a növények szerveik növekedését, fejlődését a környezet aktuális állapotához (pl.: víz- és tápanyag ellátottság, szerves és szervetlen szennyezők jelenléte) igazodva szabályozzák. A stressz-indukált morfogenetikai válaszok a gyökér- és hajtásrendszert egyaránt érintik. A környezeti tényezők mellett a gyökér endogén hormonális rendszere (pl. auxin, citokinin és etilén) is szabályozza a morfológiai válaszokat, vagyis a szelén stressz által indukált SIMV kialakulásában a növényi hormonok metabolizmusának és transzportjának megváltozása is szerepet játszik. A külső, környezeti és belső, hormonális szabályozó elemek közötti gazdag jelátviteli hálózatban szignálmolekulák teremtenek kapcsolatot, biztosítva a fejlődési és növekedési jelek összehangolását.

A jelátviteli molekulák újabb csoportját képezik a nitrogén-monoxid (NO) és reakciótermékei, az ún. reaktív nitrogénformák (RNF). A NO mint jelátvivő, jelentős szerepet tölt be a fejlődési folyamatokban, és újabb kutatások igazolják, hogy a NO és reakciótermékei nem specifikus, sokkal inkább általános és multifunkcionális jelmolekuláknak tekinthetők. Stresszválasz során azonban nem csak a RNF töltönek be jelátvivő funkciót, hanem a reaktív oxigénformák (ROF) is hozzájárulnak a morfogenetikai változásokhoz. A NO és ROF között aktív jelátvitel működik és a kutatók legújabb álláspontja szerint nitro-oxidatív stresszről beszélhetünk, mely során a ROF és RNF képződése biotikus vagy abiotikus stresszre indukálódik, és ezek együttesen alakítják ki a makromolekulákat érintő válaszokat.

CÉLKITŰZÉSEK

Munkám során célul tűztem ki, hogy megvizsgáljam a szelén kezelés milyen hormonális és jelátviteli folyamatok indukálása által eredményezi a bekövetkező morfogenetikai válaszokat (SIMV) lúdfűben, illetve az e mögött húzódó háttérmechanizmusok feltérképezését. További célom volt, hogy a lúdfű (*Arabidopsis thaliana* L.) mint modellnövény mellett, a szelénrel történő biofortifikáció lehetőségét is megvizsgáljam egy egyszerű konyhakerti növény, a borsó (*Pisum sativum* L. Rajnai törpe) segítségével, hiszen a minőségi éhezés komoly egészségügyi és gazdasági károkat okoz a szelén hiányos területeken.

Kutatásaim során a következő kérdésekre kerestem a választ:

1. Hogyan hatnak az alkalmazott szelén koncentrációk a lúdfű modellnövények növekedésére, és kialakul-e morfogenetikai válasz szelén stressz során?
2. Milyen változásokat idéz elő a szelén kezelés a hormonális rendszerben?
3. Milyen változásokat idéz elő a szelén terhelés a fejlődést szabályozó jelmolekulák (a nitrogén-monoxid és a hidrogén-peroxid) szintjében az *Arabidopsis* növények gyökérzetében?
4. Milyen interakciók állnak fenn a fejlődést szabályozó hormonális és jelátviteli rendszer között szelén kitettség során?
5. Milyen hosszú távú hatása van a szelén kezelésnek a borsó növények fejlődésére és a terméshozásra?
6. Az általam alkalmazott módszer alkalmas lenne-e biofortifikációs eljárásként a szelén dúsítására borsó növényekben?

ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Arabidopsis thaliana L. növényen végzett kísérletek

Kísérleteimet 2, 4, 7 és 14 napos (DAG2/DAG4/DAG7/DAG14; days after germination; napok száma csírázás után) lúdfű (*Arabidopsis thaliana* L.) növényekkel végeztem. A növekedési periódust egy 4 napos csírázási időszak előzte meg. A vad típus (*Col-0*) mellett felhasználtam a *nia1nia2* dupla mutánst, a *gsnor1-3* mutánst, valamint a β -glükuronidáz (GUS) transzgenikus vonalakat a hormon státusz vizsgálatához (*DR5::GUS*, *ARR5::GUS* és az *ACS8::GUS/GFP*). Kísérleteket végeztem továbbá három különböző *AtCKX::GUS* (*AtCKX4*, *AtCKX5*, *AtCKX6*) növényvonallal. Tanulmányoztam az *ipt-161* és *35S:CKX2* lúdfű vonalakat is. Ezek mellett kísérleteim során felhasználásra került az *aux1-7*, *hookless* (*hls1-1*) és az *etr1-1* *Arabidopsis*. A módosított aszkorbinsav (Asa) tartalommal rendelkező vonalak közül a *vtc2-1* és a *miox4* került felhasználásra munkám során. A sejtosztódás vizsgálatához a *CYCB1;1::GFP* *Arabidopsis* vonalat alkalmaztam. Fő kezelésként nátrium-szelenitet (Na_2SeO_3) alkalmaztam 10, 20 és 40 μM koncentrációban, melyet közvetlenül a táptalajba adtam, a növények a Se-t tartalmazó táptalajon csíráztak és nevelkedtek. Kontrollként szelenit kezelést nem kapott növényeket használtam. A táptalajba adott Se mellé a következő kezeléseket alkalmaztam: S-nitrozo-N-acetil-DL-penicillinamin (SNAP), mint NO donor 10 μM koncentrációban és 6-benzilaminopurin (BA), mint exogén CK 0,1 μM koncentrációban.

A szelén és kén tartalmakat induktív csatolású plazma tömegspektrométerrel (ICP-MS) határoztam meg a 14 napos (DAG 14) vad típusú *Arabidopsis*-ok gyökér- és hajtásrendszerében.

A mintavételi napokon a következő morfológiai paramétereket határoztam meg: sziklevel terület, hipokotil hossz, főgyökér hossz. A mérések digitális fotókon történtek a Fiji, illetve a Zeiss Axiovision Rel. 4.8 szoftverek segítségével. A digitális felvételek elkészítéséhez Zeiss Axioskope 200-C sztereomikroszkópot és Zeiss Axiovert 200M inverz mikroszkópot használtam. A morfológiai adatok alapján szelén tolerancia indexet is számoltam.

Azokban a transzgenikus *Arabidopsis* vonalakban, melyek rendelkeztek β -glükuronidáz (GUS) aktivitással, 5-bromo-4-kloro-3-indolil glükuronid (X-Gluc) festést végeztem. A mintákat Zeiss Axiovert 200M inverz mikroszkóppal detektáltam. A *DR5::GUS* növények X-Gluc festése lehetővé tette számomra, hogy lokalizáljam és megszámláljam az oldalgyökereket, valamint a fejlettségi állapotukat is meg tudtam határozni.

A fluoreszcensen jelölt minták *in situ* és *in vivo* vizsgálatához a technikai hátteret a Zeiss Axiovert 200M típusú inverz mikroszkóp biztosította számomra. A pixel intenzitásokat a gyökérben és sziklevelben egyaránt meghatároztam. A NO szint meghatározása a 4-amino-5-metilamino-2'-7'-difluorofluorescein diacetát (DAF-FM DA) festék használatával történt, míg a hidrogén-peroxid szint meghatározásához a növényekben az AmplifluTM (vagy 10-acetil-3,7-dihidroxifenoxazin vagy Amplex Red) festéket alkalmaztam. A gyökércsúcsok és a sziklevel életképességének meghatározására fluorescein diacetát (FDA) festéket használtam.

A *CYCB1;1::GFP* növények GFP expresszióját Zeiss LSM 700 Axio Observer.Z1 és Olympus LSM 700 lézer scanning konfokális mikroszkóppal vizsgáltam. A 4 napos (DAG4) növényeket propídium jodid (PI) festéssel jelöltem, hogy láthatóvá váljanak a sejtfalak. A GFP jel intenzitását és lokalizációját digitális képeken elemeztem Zeiss Zen2010 és Olympus Fluoview FV100, valamint Fiji szoftverek segítségével. Meghatározásra került a távolság a nyugalmi centrumtól (QC) az átmeneti zóna (TZ) kezdetéig, ahol a sejtek megnyúlása már erőteljes. A gyökér merisztéma méretét digitális felvételeken, Fiji szoftver segítségével mértem meg.

***Pisum sativum* L. növényen végzett kísérletek**

Kísérleteim során *Pisum sativum* L. Rajnai törpe borsó növényeket használtam. A csíranövényeket perlittel megtöltött 5 literes cserepekbe ültettem (4 növény/cserép és 6 cserép/kezelési koncentráció) és üvegházi körülmények között neveltem. A növények locsolása Hoagland tápoldattal történt. A borsó növények 35 napos korukig kontroll körülmények között nevelkedtek, majd 10, 50 és 100 μM Na_2SeO_3 kezelést kaptak a

tápoldattal 50 (50 és 100 μM Se), illetve 56 napig (10 μM Se). A kísérleti periódus alatt háromszor történt mintavétel a termésből, 2 hetes időközönként.

A következő morfológiai paramétereket határoztam meg manuálisan: hajtás hossz, hajtás friss tömeg, levél hossz, főgyökér hossz és gyökér friss tömeg. A termés morfológiai paramétereit tekintve borsóhüvely szám/növény, a magokat tartalmazó hüvely friss és száraz tömege, a magok friss tömege, a magok száma/hüvely kerültek meghatározásra.

A szelén mellett egyéb mikro- (Zn, Mn, Fe, Co, Cu, Mo) és makroelemek (K, Mg, Ca) koncentrációit is meghatároztam a növények gyökerében, hajtásában és a termésben ICP-MS technikával.

EREDMÉNYEK

Ph.D. munkám során genetikai és biokémiai módszerek felhasználásával megvizsgáltam, hogy a szelenit különböző koncentrációban alkalmazva milyen fejlődésbeli, hormonális és jelátviteli változásokat indukál a modell organizmusként használt *Arabidopsis thaliana* L. növényekben. Tanulmányoztam továbbá, hogy az általunk felállított biofortifikációs rendszerben feldúsul-e a Se a borsó növények termésében, és ez a fajta hosszú távú Se kitettség milyen növekedési változásokat idéz elő. A két rendszer használatával nem csak a növényélettani alapismeretek, hanem a gyakorlati hasznosítás lehetőségének bővítéséhez is hozzájárultam.

Munkám során kapott eredményeim alapján elmondható, hogy:

1. A magasabb Se koncentrációk (20 és 40 μM) a **hajtás és a főgyökér növekedésgátlását** idézték elő, hosszú távon (14 nap), enyhe Se kitettség esetén (10 μM) pedig a stressz indukált morfogenetikai válasz megjelenését tapasztaltuk. Ezek a növekedésbeli válaszok az **adaptáció folyamatának tekinthetők**, hiszen az erőforrások fejlődésről védekezésre történő átcsoportosítása a növény jobb túlélését jelentheti. A növekedésgátlás mellett

sejthalál is történt, amit a Se fehérjékbe történő beépülése (szelenocisztein és szelenometionin kialakulása) okozhat.

2. Kimutattam, hogy a Se terhelés jelentős **változásokat idéz elő a gyökér hormonháztartásában**: az auxinválaszt (DR5-függő GUS aktivitás) csökkenti, az etilén bioszintézist (ACS8-függő GUS aktivitás) jelentős mértékben megnöveli. A citokininválasz promóter-függő (ARR5) GUS aktivitása és térbeli mintázata szintén módosul szelén kitettség hatására, feltehetően a gyökérből hajtásba irányuló CK transzlokáció gátlása és az AtCKX4 és AtCKX5 regulációja révén.
3. A korai csíranövény fejlődés során a szelén többlet csökkenti a **nitrogén-monoxid** tartalmat (ez a nitrát reduktáz aktivitásától függetlenül történik), és emeli a **hidrogén-peroxid** szintet a gyökérben, ami a két molekula antagonizmusára utal. Továbbá biokémiai (NO donor kezelés) és genetikai (*gsnor1-3* és *nia1nia2* mutánsok) módszerekkel bizonyítottam, hogy a nagy **NO tartalom hozzájárul a szelén tolerancia kialakulásához, míg a H_2O_2 optimális szintje szükséges a Se tűréshez.**
4. Feltételezhető, hogy a korai fejlődés során a szelén által indukált **H_2O_2 csökkenti az auxin-függő génexpressziót, míg az idősebb gyökerekben a NO gátolja az auxin transzportját, így redukálva a gyökér auxin szintjét és növekedésgátlást okozva.** A szelén terhelés által fokozott **etilén** bioszintézis (az ACS8 expressziója) részt vesz a sejthalál indukciójában, így a növekedés gátlásban és a **H_2O_2 downstream eleme a jelátvitelnek.** Eredményeim azt mutatják továbbá, hogy **az etilén és a NO között nincs szabályozó kapcsolat** szelén stressznek kitett gyökerekben. Kontroll körülmények között **kölcsönösen negatív szabályozó kapcsolat áll fenn a CK és a NO között az *Arabidopsis* gyökerekben. Szelén terhelés esetén a CK befolyásolja a NO metabolizmusát, és a NO szint csökkenése szükséges az ARR5 promóter aktivációjához.** Ez utóbbi eredmény a negatív CK-NO kapcsolatra utal szelén stressz alatt is.

5. A szelén **hosszú távon negatívan hat a borsó növények növekedésére** és a reprodukív fázisban a növények túlélési stratégiája a terméshozásra és érlelésre fókuszál.
6. A termés fejlődését szintén gátolja a szelenit, ám **a biofortifikáció sikeresnek bizonyult, hiszen a borsószemekben a Se feldúsul.**

Mindezekből világosan látszik, hogy a hormonális (auxin, citokinin és etilén) és jelátviteli rendszer (NO és H_2O_2) elemei együttesen, egymással kapcsolatban állva regulálják a szelén többlete által kiváltott fejlődési válaszokat. Munkacsoportunk elsőként írta le a NO metabolizmusában szelén hatására bekövetkező változásokat és részvételét, illetve szerepét a tolerancia kialakulásában. Fontos új eredményünk a NO és a citokinin közötti kapcsolat kimutatása és jellegének feltárása abiotikus (szelén) stressz alatt. Véleményünk szerint, az elvégzett kísérleti munkával hozzájárultam a növényi NO szerepének és interakcióinak jobb megértéséhez.

PUBLIKÁCIÓS LISTA

A disszertációhoz felhasznált tudományos dolgozatok:

1. **Lehotai N**, Pető A, Erdei L, Kolbert Zs (2011) The effect of selenium (Se) on development and nitric oxide levels in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Acta Biologica Szegediensis* 55: 105-107.
2. **Lehotai N**, Pető A, Bajkán Sz, Erdei L, Kolbert Zs (2011) *In vivo* and *in situ* visualization of early physiological events induced by heavy metals in pea root meristem. *Acta Physiologiae Plantarum* 33: 2199-2207. (IF: 1,639)
3. **Lehotai N**, Kolbert Zs, Pető A, Feigl G, Ördög A, Kumar D, Tari I, Erdei L (2012) Selenite-induced hormonal and signalling mechanisms during root growth of *Arabidopsis thaliana* L.. *Journal of Experimental Botany* 63: 5677-5687. (IF: 5,364)

További tudományos dolgozatok:

1. Pető A, **Lehotai N**, Lozano-Juste J, León J, Tari I, Erdei L, Kolbert Zs (2011) Involvement of nitric oxide and auxin in signal transduction of copper-induced morphological responses in *Arabidopsis* seedlings. *Annals of Botany* 108: 449-457. (IF: 4,030)
2. **Lehotai N**, Pető A, Weisz M, Erdei L, Kolbert Zs (2011) Generation of reactive oxygen and nitrogen species in pea cultivars under copper excess. *Acta Biologica Szegediensis* 55: 273-278.
3. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Feigl G, Ördög A, Erdei L (2012) *In vivo* and *in vitro* studies on fluorophore-specificity. *Acta Biologica Szegediensis*. 56: 37-41.
4. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Feigl G, Erdei L (2012) Long-term copper (Cu^{2+}) exposure impacts on auxin, nitric oxide (NO) metabolism and morphology of *Arabidopsis thaliana* L.. *Plant Growth Regulation*. 68:151-159. (IF: 2,859)
5. Feigl G, Kumar D, **Lehotai N**, Tugyi N, Molnár Á, Ördög A, Szepesi Á, Gémes K, Laskay G, Erdei L, Kolbert Zs (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 94: 179-189. (IF: 2,482)
6. Pető A, **Lehotai N**, Feigl G, Tugyi N, Ördög A, Gémes K, Tari I, Erdei L, Kolbert Zs (2013) Nitric oxide contributes to copper tolerance by influencing ROS metabolism in *Arabidopsis*. *Plant Cell Reports*, 32: 1913-1923. (IF: 2,936)
7. Elfogadva: Feigl G, Kumar D, **Lehotai N**, Pető A, Molnár Á, Rác É, Ördög A, Erdei L, Kolbert Zs, Laskay G: Comparing the effects of excess copper in the leaves of *Brassica juncea* (L. Czern) and *Brassica napus* (L.) seedlings: growth inhibition, oxidative stress and photosynthetic damage. *Acta Biologica Hungarica*. (IF: 0,563)

Összesített impaktfaktor: 19,873

Tudományos riport:

1. **Lehotai N** (2012) The possibilities and enzymatic background of selenium and zinc biofortification of pea plants. Report for Short-Term Scientific Mission (STSM) in the framework of COST Action FA 0905 (Reference code COST-STSM-ECOST-STSM-FA0905-010212-013321).

Konferencia előadások:

1. Pető A, **Lehotai N**, Kolbert Zs, Erdei L (2010) The effect of heavy metal-induced reactive oxygen- (ROS) and nitrogen species (RNS) generations on cell viability of pea roots. p27, L18. 3rd Plant NO Club International Meeting, 2010. július 15-16., Olmütz, Csehország.
2. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Erdei L (2011) A nitrogén-monoxid (NO), mint a nehézfém-indukált növekedési válaszok regulátora. S4-02. A Magyar Növénybiológiai Társaság X. Kongresszusa, 2011. augusztus 31-szeptember 2., Szeged, Magyarország.
3. Feigl G, Kumar D, Pető A, **Lehotai N**, Szepesi Á, Erdei L, Kolbert Zs (2012) Studying the effect of copper in *Brassica juncea* and *Brassica napus* root tips: metabolism of reactive oxygen and nitrogen species and morphological adaptation. p51. 7th PhD Student Conference, Scandinavian Plant Physiology Society (SPPS), 2012. szeptember 12-15., Laulasmaa, Észtország.
4. Feigl G, Kumar D, Pető A, **Lehotai N**, Ördög A, Molnár Á, Kolbert Zs, Erdei L (2012) The effect of zinc on the microelement homeostasis and the metabolism of reactive signal molecules in *Brassica juncea* and *Brassica napus*. Third Annual Workshop of COST Action FA 0905 – Mineral improved crop production for healthy food and feed. 2012. október 23-26., Lisszabon, Portugália.
5. **Lehotai N**, Lyubenova L, Drews N, Ördög A, Feigl G, Kolbert Zs, Erdei L, Schröder P (2012) The possibilities and enzymatic background of Se and Zn biofortification of pea plants. Third Annual Workshop of COST ACTION FA 0905 – Mineral improved crop production for healthy food and feed. 2012. október 23-26., Lisszabon, Portugália.
6. Horváth E, Kolbert Zs, **Lehotai N**, Feigl G, Tari I, Erdei L (2012) Role of reactive oxygen- and nitrogen species in poplar plants during zinc, copper and polyethylene glycol treatments. Characterization and oxidative stress tolerance in plants: from models to trees (OXIT) HUSRB/1002/214/036. Interim Conference, 2012. november 20., Szeged, Magyarország.
7. **Lehotai N**, Feigl G, Koós Á, Erdei L, Kolbert Zs (2014) Cytokinin-nitric oxide relationship in selenium-stressed *Arabidopsis*. Societas Biologiae Plantarum Hungarica, Conference of Young Biologists, 2014. január 30., Budapest, Magyarország.
8. Feigl G, **Lehotai N**, Molnár Á, Erdei L, Rodríguez-Ruiz M, Palma JM, Corpas FJ, Kolbert Zs (2014) Zinc induced nitro-oxidative stress in *Brassica* species. L23. 5th Plant NO Club Meeting, 2014. július 24-25., München, Németország.
9. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Feigl G, Erdei L (2014) Growth responses induced by microelement excess: the role of reactive nitrogen species. S1-11. Societas Biologiae Plantarum Hungarica, 11th Congress, 2014. augusztus 27-29., Szeged, Magyarország.

Konferencia posztterek:

1. Kolbert Zs, Vashegyi Á, Ördög A, **Lehotai N**, Méri Á, Erdei L (2009) Short time effect of copper ion (Cu^{2+}) on nitric oxide (NO) production in *Sorghum sudanense* L. roots. p58., P19. COST 859 Workshop of WG1 and WG2 on Uptake, Sequestration and Detoxification - an Integrated Approach, 2009. április 16-17., Szeged, Magyarország.
2. Pető A, **Lehotai N**, Erdei L, Kolbert Zs (2010) Metal content and nitric oxide (NO) production in the roots of heavy metal-treated pea plants. SB-23. ISIRR 11th International Symposium Interdisciplinary Regional Research, 2010. október 13-15., Szeged, Magyarország.
3. **Lehotai N**, Pető A, Weisz M, Kolbert Zs, Erdei L (2011) The effect of long-term copper (Cu^{2+}) exposure on reactive nitrogen- and oxygen species generation in two pea cultivars. P110, p174. 10th International Conference on Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Plants, 2011. július 5-8., Budapest, Magyarország.
4. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Erdei L (2011) Nitric oxide as negative regulator of auxin during copper induced morphological responses. P141, p220. 10th International Conference on Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Plants, 2011. július 5-8., Budapest, Magyarország.
5. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Tari I, Erdei L (2011) Endogenous reactive oxygen species (ROS) status and cell death in nitric oxide (NO) mutants under copper excess. XXIV Scandinavian Plant Physiology Society (SPPS) Congress, 2011. augusztus 21-25., Stavanger, Norvégia.
6. **Lehotai N**, Pető A, Erdei L, Kolbert Zs (2011) The effect of selenium (Se) on development and nitric oxide levels in *Arabidopsis thaliana* seedlings. S4-P02. Societas Biologiae Plantarum 10th Congress, 2011. augusztus 31-szeptember 2., Szeged, Magyarország.
7. **Lehotai N**, Pető A, Feigl G, Kumar D, Erdei L, Kolbert Zs (2011) Early responses in root meristem of *Pisum sativum* and *Arabidopsis thaliana* induced by copper and selenium. Second Annual Conference and MC Meeting COST Action FA 0905, Mineral Improved Crop Production for Healthy Food and Feed, 2011. november 23-26., Vence, Olaszország.
8. Kolbert Zs, **Lehotai N**, Pető A, Feigl G, Kumar D, Erdei L (2012) Selenium-induced growth responses and their hormonal background. Plant growth, Nutrition & Environment Interactions, 2012. február 18-21., Bécs, Ausztria.
9. **Lehotai N**, Pető A, Feigl G, Kumar D, Erdei L, Kolbert Zs (2012) Study of selenite-induced hormonal and signalling mechanisms during root growth of *Arabidopsis thaliana* L. by light- and fluorescence microscopy. p54. 7th PhD Student Conference, Scandinavian Plant Physiology Society (SPPS), 2012. szeptember 12-15., Laulusmaa, Észtország.
10. Kolbert Zs, Pető A, **Lehotai N**, Feigl G, Tugyi N, Ördög A, Erdei L (2013) Relationship between nitric oxide (NO) and reactive oxygen species (ROS) in copper-treated *Arabidopsis* roots. p189. Society for Experimental Biology (SEB) Annual Main Meeting, 2013. július 3-6., Valencia, Spanyolország.
11. Kolbert Zs, **Lehotai N**, Pető A, Feigl G, Tugyi N, Erdei L (2013) Cytokinin overproducing *ipt6-1 Arabidopsis* shows altered NO generation and insensitivity to selenite. 11th International POG Conference, 2013. július 17-19., Varsó, Lengyelország.

12. **Lehotai N**, Feigl G, Koós Á, Pető A, Erdei L, Kolbert Zs (2013) Relationship between cytokinin and nitric oxide in selenium-treated *Arabidopsis* plants. p51. Biomedica Minikonferencia, 2013. december 13., Szeged, Magyarország.
13. Feigl G, Pető A, **Lehotai N**, Molnár Á, Erdei L, Kolbert Zs (2013) Comparison of the effect of copper and zinc in *Brassica juncea* and *Brassica napus* roots: microelement homeostasis, metabolism of reactive signal molecules and morphological adaptation. p44. Biomedica Minikonferencia, 2013. december 13., Szeged, Magyarország.
14. **Lehotai N**, Feigl G, Koós Á, Erdei L, Kolbert Zs (2014) Cytokinin-nitric oxide interaction: an antagonistic relationship in selenite-exposed *Arabidopsis*. C7.40. Society for Experimental Biology (SEB) Annual Main Meeting, 2014. július 1-4, Manchester, Anglia.
15. Feigl G, **Lehotai N**, Molnár Á, Erdei L, Kolbert Zs (2014) Zinc excess affects root architecture and reactive oxygen- and nitrogen species metabolism in *Brassica juncea* and *Brassica napus*. C7.39. Society for Experimental Biology (SEB) Annual Main Meeting, 2014. július 1-4, Manchester, Anglia.
16. Feigl G, **Lehotai N**, Molnár Á, Erdei L, Kolbert Zs (2014) Detection of protein tyrosine nitration in zinc-treated *Brassica* plants. S1-P03. Societas Biologiae Plantarum Hungarica, 11th Congress, 2014. augusztus 27-29., Szeged, Magyarország.
17. **Lehotai N**, Feigl G, Koós Á, Pető A, Erdei L, Kolbert Zs (2014) The role of nitric oxide under selenium tolerance. S1-P09. Societas Biologiae Plantarum Hungarica, 11th Congress, 2014. augusztus 27-29., Szeged, Magyarország.
18. Molnár Á, Feigl G, **Lehotai N**, Erdei L, Kolbert Zs (2014) Microscopic study of zinc localization in *Brassica* roots. S1-P14. Societas Biologiae Plantarum Hungarica, 11th Congress, 2014. augusztus 27-29., Szeged, Magyarország.

NYILATKOZAT



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS
INFORMATIKAI KAR
NÖVÉNYBIOLOGIAI TANSZÉK
SZEGED, 6726 Közép fasor 52.

Tel/Fax: (62) 544-307
E-mail: tari@bio.u-szeged.hu
Tanszékvezető: Dr. Tari Irma

DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND
INFORMATICS
UNIVERSITY OF SZEGED
H-6726 SZEGED, Közép fasor 52.
HUNGARY
Phone/Fax: +36-62-544-307
E-mail: tari@bio.u-szeged.hu
Head of Department: Dr. I. Tari



Nyilatkozat

Alulírottak kijelentjük, hogy az alább felsorolt közleményekben megjelent és a jelölt által a Szegei Tudományegyetemre benyújtott doktori (Ph.D.) értekezésében felhasznált tudományos eredmények eddig nem szerepeltek más Ph.D. értekezés tudományos eredményei között. Továbbá tudomásul vesszük, hogy a fenti tudományos eredmények a jövőben nem szerepelhetnek más Ph.D. értekezés eredményei között.

1. Lehotai N, Pető A, Erdei L, Kolbert Zs (2011) The effect of selenium (Se) on development and nitric oxide levels in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Acta Biologica Szegediensis* 55: 105-107.
2. Lehotai N, Pető A, Bajkán Sz, Erdei L, Kolbert Zs (2011) *In vivo* and *in situ* visualization of early physiological events induced by heavy metals in pea root meristem. *Acta Physiologiae Plantarum* 33: 2199-2207. (IF: 1,639)
3. Lehotai N, Kolbert Zs, Pető A, Feigl G, Ördög A, Kumar D, Tari I, Erdei L (2012) Selenite-induced hormonal and signalling mechanisms during root growth of *Arabidopsis thaliana* L.. *Journal of Experimental Botany* 63: 5677-5687. (IF: 5,364)

Lehotai Nóra (jelölt)

Pető Andrea (társszerző)

Feigl Gábor (társszerző)

Bajkán Szilvia (társszerző)

Ördög Attila (társszerző)

Tari Irma (társszerző)

Erdei László (témavezető, társszerző)

Kolbert Zsuzsanna (témavezető, társszerző)

Szeged, 2014. augusztus 25.