

**MTA Doktori Értekezés Tézisei**

**Molibdén és szelén vizsgálata tápoldat-növény  
és talaj-növény rendszerben**

**Kovács Béla**

**Debreceni Egyetem  
Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és  
Környezetgazdálkodási Kar**

**Debrecen**

**2024.**



## BEVEZETÉS

A növények termesztése és a termőföld védelme kulcsfontosságú a sikeres és fenntartható mezőgazdasági termeléshez. A növénytermesztés területén folytatott kutatások célja a termés mennyiségének és minőségének a javítása, valamint a környezetvédelmi szempontok figyelembevétele.

A talaj egyedülálló kémiai és biológiai összetevőinek köszönhetően a növények számára alapvető tápanyagforrást biztosít. A talaj állapota alapvetően meghatározza a növények fejlődését és a termés mennyiségét. A talajvizsgálatok lehetővé teszik a talaj állapotának és tápanyagtartalmának pontos meghatározását, ami segít a növénytermesztés optimalizálásában. A különböző növényfajok termesztését a mai modern formájában nem csak a talaj, mint termesztési közeg alkalmazásával végzik, hanem tápoldatban is. A tápanyag-ellátás javítása érdekében a növénytermesztésben széles körben alkalmaznak tápoldatokat. A tápoldatok a növények tápanyagigényének kielégítésére szolgálnak és hatékonyabban juttatják el a tápanyagokat a növényekhez. Az optimális növényi tápanyag-ellátás biztosítása érdekében a növények tápoldattal való ellátását számos módszerrel végezhetjük. A különböző céllal beállított szántóföldi kísérletekben lejátszódó elemfelvételi mechanizmusok tisztázásához olyan lehetőséget is igénybe vehetünk, hogy rizoboxokban és tenyészedényekben alakítsunk ki olyan speciálisan beállított környezeti körülményeket, melyek lehetővé teszik, többek között a növények elemfelvételével kapcsolatos vizsgálatok kivitelezését.

A szántóföldi gyakorlatban, a kukorica (*Zea mays* L.), a búza (*Triticum aestivum* L.) és a napraforgó (*Helianthus annuus* L.) azon növények közé tartoznak, amelyek jelentős szerepet töltenek be a mezőgazdasági termelésben. Ezen növények optimális terméshozamának eléréséhez viszont szükséges a megfelelő tápanyag-ellátás biztosítása az adott növények számára.

Az utóbbi évtizedekben számos kutatás foglalkozott a talaj és a növények, valamint a tápoldat és a növények közötti kölcsönhatásokkal, melyek fontos információkat szolgáltatnak a különböző növények termesztése hatékonyságának növeléséhez. Az egyik ilyen tényező a talajban és a tápoldatban található nyomelemek szerepe, mint például a molibdén és a szelén. Ezek a nyomelemek szükségesek a növényi életciklus számos folyamatában, beleértve a fotoszintézist és a nitrogén-fixációt. A túlzott mennyiségben való jelenlétük azonban káros is lehet a növények számára és számos hátrányos állapotot okozhatnak.

Ezek az eredmények fontosak az agronómiai gyakorlatban, mivel a talajok és növények tápanyagellátásának optimalizálása kritikus szerepet játszik a növények termelékenységének növelésében és a fenntartható mezőgazdasági rendszerek létrehozásában. A kutatás eredményei hozzájárulnak a növénytáplálási stratégiák

kidolgozásához és javítják a molibdén és a szelén felhasználásának hatékonyságát a növények termesztésében.

A fenti megfontolások mellett figyelembe kell még vennünk, hogy az elmúlt évszázadban a mezőgazdasági, kommunális és ipari tevékenységek jelentős mértékben növelték a környezetbe kerülő szennyező anyagok mennyiségét. Ezen kibocsátások között különös figyelmet érdemelnek a mikroelemek és a potenciálisan toxikus nehézfémek felhalmozódása. A talajok természetes molibdén- és szelén-dúsulását a talajképző kőzetek és ásványok molibdén és szelén tartalma okozza. Az antropogén tevékenységek, különösen az ipari termelés (vegyipar, elektronikai ipar) és a mezőgazdaság (műtrágyák, szerves trágyák és szennyvíziszapok), jelentős mértékben hozzájárulhatnak a talajok molibdén- és szelén-tartalmának növekedéséhez.

Kádár (1995) megállapította, hogy hazánk termőhelyeinek jelentős részén a legveszélyesebb talajszennyező anyagok nem a természetben kationos formában megtalálható potenciálisan toxikus elemek (pl. az ólom, kadmium, higany, réz és a cink), hanem a mobilis és/vagy toxikus anionos formák (pl. az arzén, króm, szelén és molibdén anionos formái).

A növények molibdén és szelén igénye rendkívül alacsony, továbbá a növények a molibdént és a szelént általában nagyon kis mennyiségben veszik fel, a növények azonban képesek akár extrém nagy koncentrációban akkumulálni a molibdén és szelén mikroelemeket.

## CÉLKITŰZÉSEK

A talaj-növény rendszerben a nemzetközi elemtartalmi kutatások egyrészt az esszenciális makroelemek (pl. nitrogén, foszfor, kálium, kalcium, magnézium) és mikroelemek (pl. réz, vas, mangán, cink) vizsgálatával foglalkozik, másrészt a potenciálisan toxikus elemek kutatásával, melyek között döntően a kationok (pl. kadmium, higany, nikkel és ólom) játszik a fő szerepet. Magyarországon viszont a három leggyakrabban előforduló típusú talaj a csernozjom, a barna erdőtalajok, valamint az öntés- és lejtőhordalék talajok, mely talajok adott pH értékeinél a talaj-növény rendszerben nem a potenciálisan toxikus kationok intenzívebb felvételével kell főként számolnunk, hanem a különböző anionok, oxoanionok (pl. arzén, króm, molibdén, szelén anionos formái) jelentősebb mobilitásával. Ennélfogva a fenti oxoanionok talaj-növény rendszerben való vizsgálata nagy jelentőségű. Emellett a korábbi kutatásaim során kiderült számomra, hogy Magyarországon az újszülött csecsemőhalandóság statisztikailag nagyobb mértékű, mint számos más országban, amely sajnálatos tény a magyarországi talajok szelénhiányának volt tulajdonítható (Oláh et al., 1991). Megjegyzem, azóta szerencsére már pozitív változások történtek, a megelőző intézkedéseknek (többek között a várandós anyák szelénpótlásának) köszönhetően.

A fenti személyes indokokat követően szerettem volna csatlakozni a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete (MTA TAKI), jelenleg HUN-REN ATK Talajtani Intézet (TAKI) Nagyhorcsöki Kísérleti telepén található szabadföldi kísérlethez. Dr. Kádár Imre a személyes megbeszélésünk során azt tanácsolta, hogy a fenti kísérlethez ne csak a szelén vizsgálatán keresztül kapcsolódjak be, hanem a fenti kísérletben az egyéb anionos elemeknek a kutatásomba való bevonásával is. Dr. Kádár Imre tanácsait és segítségét elfogadva, a jelen MTA doktori dolgozatomban a molibdénnel és a szelénnel kapcsolatos kutatási eredményeket fogom értékelni.

Az MTA doktori kutatómunkában növekvő adagú molibdén (Mo(VI)), valamint szelén (Se(IV) és Se(VI)) kezelések hatását vizsgáltam tápoldat-növény, továbbá talaj-növény rendszerekben. A kezelések hatásának értékeléséhez négyféle típusú kísérletet alkalmaztunk: tápoldatos, rizoboxos, tenyészedenyes, továbbá szabadföldi tartamkísérletet. Vizsgálataink során ezen kísérletekből származó növényminták elemzését végeztük el, míg a szabadföldi kísérletben a feltalaj, valamint a mélységi talajminták oldható, továbbá összes elem tartalmát is meghatároztuk.

A növényi- és talajminták vizsgálatánál a következő kérdések megválaszolását tűztük ki célul:

1. A molibdén (Mo(VI)), valamint a különböző szervesen szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) adagolásával beállított kísérletekben (tápodatban, rizoboxban), milyen mértékű hatás tapasztalható a növényi részek szárazanyag-terméskumára (tömegére és hosszára)?
2. Van-e kedvező hatása a vizsgált oxoanionoknak (a Mo(VI)-nak, valamint a Se(IV)-nek és Se(VI)-nak) a vizsgált koncentráció tartományban?
3. A vizsgált koncentráció tartományon belül a Mo(VI), továbbá a szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) mely koncentrációjánál tapasztalhatók toxicitási tünetek?
4. A molibdén (Mo(VI)), valamint az alkalmazott szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) kezelései hogyan hatnak a különböző növényi részek molibdén és szelén tartalmára, továbbá a molibdén és a szelén főként mely növényi rész(ek)ben, milyen mértékben akkumulálódik?
5. Az egyszikű, valamint a kétszikű növényeknek a molibdén és a szelén felvétele hasonló, vagy eltérő intenzitású?
6. Az alkalmazott egyszikű és kétszikű kísérleti növények, az elemfelvétel szempontjából milyen növényi típusba (akkumulátor, hiperakkumulátor, vagy kirekesztő) tartoznak a bioakkumulációs faktor (BAF) alapján, az adott kísérleti elrendezésben?
7. Milyen különbségek figyelhetők meg a Se(IV) és a Se(VI) kezelések szelénfelvételének az intenzitása között?
8. A Nagyhöröcsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet feltalaj mintái összes molibdén és szelén tartalma hogyan alakul a mintavételi években?
9. A Nagyhöröcsöki szabadföldi kísérlet mélységi talajmintái összes molibdén és szelén tartalmának az értékelése: az adott mintavételi években hogyan alakul a talajminták összes molibdén és szelén tartalma a talaj mélysége függvényében, valamint hogyan alakul a molibdén és a szelén kimosódása a vizsgált mintavételi években?
10. Az is a kutatás célkitűzése volt, hogy a talajminták összes molibdén és szelén tartalmának hány százaléka, milyen aránya hozzáférhető a növények számára (oldható molibdén és szelén tartalom)?
11. A szabadföldi kísérlet talajmintáiban hogyan alakul a szelén formák (szelén specicszek) mennyisége és azok százalékos aránya?

12. A szabadföldi kísérlet szelenittel kezelt parcelláin, a kezelést követő 3. évtől kezdve, miért következett be a két legnagyobb dózisú parcellán a termesztett növények és a gyomnövényzet teljes pusztulása?
13. Hogyan alakult a Nagyhörcsöki szabadföldi kísérletben termesztett kukorica-, borsó- és napraforgóminták molibdén és szelén tartalma?

## ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A molibdén és a szelén elemfelvételét tápoldatos, rizoboxos, tenyészedényes és szabadföldi kísérletek vizsgálatával értékelem. Mivel egy esetleges környezetszennyezésben annak van leginkább esélye, hogy a fenti vizsgált elemek szervetlen kötésű elemformája jelenjen meg, így a molibdénnek egy (+6), míg a szelénnek a két leggyakoribb oxidációs állapotát (+4 és +6) alkalmaztam a kezelésekből.

### Tápoldatos kísérlet

Mivel az egy- és kétszikű növények tápanyagfelvételében számos különbség van, ezért a tápoldatos kísérletekhez egy- és kétszikű teszt növényként, kukoricát (*Zea mays* L. cv. Norma SC) és napraforgót (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR) választottam.

Tápoldatos kísérleteinkben a növények nevelésére a Cakmak és Marschner (1990) által használt tápoldatokat alkalmaztuk. A molibdén és a szelén kiegészítéseket a tápoldathoz adagoltuk. A kezelések molibdénnél  $\emptyset$ , 0,07; 0,7; 7  $\mu\text{M}$  Mo koncentrációk, a szelén esetén pedig a szelenitnél  $\emptyset$ , 1, 3, 10, 30 és 90  $\text{mg dm}^{-3}$ , míg a szelenátnál  $\emptyset$ ; 1, 3, 10 és 30  $\text{mg dm}^{-3}$  szelénre vonatkoztatott koncentrációk voltak. Az ismétlések száma három volt. A tápoldatos kísérlet bontására Mo-nél az ültetést követő 9. napon, míg a Se-nél a 12. napon került sor.

### Rizoboxos kísérlet

A rizoboxos kísérleteinknél növénynevelő boxokat (ún. rizoboxokat) alkalmaztunk, melyekben a növények gyökerei növekedését naponta nyomon követtük, valamint az is látható volt, hogy a növekvő koncentrációjú kezelések okoznak-e fitotoxikus tüneteket a kísérleti növényeink gyökereinél. A rizoboxos kísérleteinkben szintén kukoricát (*Zea mays* L. cv. Norma SC (Mo-hez) és cv. Reseda (Se-hez)) és napraforgót (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR) használtunk. A rizoboxban végzett kísérletekhez a Debreceni Egyetem (DE), Látóképi Kísérleti Telepéről származó mészlepedékes csernozjom talajt használtuk.

A kontroll talajhoz sem molibdént sem szelént nem adagoltunk, molibdén kezeléseknél 30, 90 és 270  $\text{mg kg}^{-1}$  molibdénre vonatkozó koncentrációkat, míg a szelén kezeléseknél, a szelenitnél 1, 3, 10, 30 és 90  $\text{mg kg}^{-1}$ , míg a szelenátnál 1, 3, 10 és 30  $\text{mg kg}^{-1}$ , szelénre vonatkoztatott koncentrációkat alkalmaztunk. Egy rizoboxba 3, közel azonos méretű csíranövény került. Az ismétlések száma öt volt.

### Tenyészedényes kísérlet

A tenyészedényes kísérleteinkhez teszt növényként zöldborsót (*Pisum sativum* L.) alkalmaztunk. A kísérletekben használt Avola borsó a zöldborsók közül az egyik



legkedveltebb fajta, mely a konzerv- és hűtőipari felhasználásra való alkalmasságnak köszönhető. A kísérletekhez mészlepedékes csernozjom talajt alkalmaztunk (DE Látóképi Kísérleti Telep), molibdén esetében 0, 3, 30, 90 és 270 mg kg<sup>-1</sup> kezeléseket alkalmaztunk, míg a szelénél, a kontroll mellett, szelenitnél öt (1, 3, 10, 30 és 90 mg kg<sup>-1</sup>), szelenátnál pedig négy (1, 3, 10 és 30 mg kg<sup>-1</sup>) kezelést állítottunk be. A borsó kelése után 9 növényt hagyunk tenyészedenként. A molibdén és a szelén kísérletek, külön-külön három ismétléses véletlen blokk elrendezésben kerültek beállításra.

A borsó növények elemtartalmának meghatározását három (Se) vagy négy (Mo) különböző fejlődési stádiumban végeztük el, melyek a következők voltak: négy nóduszos állapot (csak a Mo), virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés.

### **Nagyhörcsöki szabadföldi kísérlet**

A fenti kísérleteken túlmenően, szerettem volna a molibdén és a szelén talajbani viselkedését, valamint a növények növekedésére, elemfelvételére gyakorolt hatását tanulmányozni szabadföldi kísérletben is, ezért Dr. Kádár Imre segítségével csatlakoztam a Nagyhörcsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlethez, amely kísérlet még elérhető növény- és talajmintáit megkaptam a vizsgálataim elvégzéséhez. Az általam vizsgálatba vont növények: a kukorica 1991-ben (Pi SC 3732 hibrid), a borsó 1994-ben (Smaragd fajta), míg a napraforgó (Viki hibrid) 1998-ban volt termesztésbe vonva. Az osztott parcellás elrendezésben a vizsgált mikroelemek (Mo és Se) jelentették a főparcellát, a négy terhelési szint az alparcellát (Mo: 0, 90, 270 és 810 kg ha<sup>-1</sup>; Se: 30, 90, 270 és 810 kg ha<sup>-1</sup>), két ismétlésben.

### **Az alkalmazott mintaelőkészítési és mérési módszerek**

A talaj- és növényminták analitikai vizsgálata során szárazanyag-tartalom vizsgálatot, továbbá mintaelőkészítési és elemanalitikai módszereket alkalmaztunk.

A talaj- és növényminták elem tartalmának meghatározásához az általam kidolgozott HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nedves roncsolásos mintaelőkészítési módszereket alkalmaztuk (Kovács et al., 1996, 2000). A talajok összes elem tartalmával a tápanyagtőkét határoztuk meg, mely a talajban lévő adott elem teljes mennyiségét jelenti. Mivel egy termőhely minősítésénél, a kockázatelemzésénél nemcsak az „összes”, hanem a mobilis, más néven a „felvehető” elem tartalmakat is érdemes vizsgálni, ezért a nagyhörcsöki talajok felvehető frakcióját is meghatároztuk. A „felvehető” kifejezés a növények által felvehető tápanyagok mennyiségét becsüli. A talajok növények számára hozzáférhető, azaz a felvehető elem tartalmát Lakanen-Erviö-féle kivonószer felhasználásával határoztuk meg (MSZ 21470-50:2006). Az előkészített minták elem tartalmát induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES) (Kovács et al., 1998) és induktív csatolású plazma

tömegspektrométerrel (ICP-MS) (Kovács et al., 2008) határoztuk meg. Az elemtartalmi meghatározásoknál kétféle típusú ICP-OES készüléket (egy Perkin Elmer gyártmányú, Optima 3300 DV, valamint egy Thermo Fisher Scientific gyártmányú iCAP 6300 Duo), továbbá a kisebb koncentrációk elemzéséhez kétféle típusú ICP-MS (egy Thermo Elemental gyártmányú, XSeries<sup>I</sup> és egy Thermo Scientific gyártmányú XSeries<sup>II</sup>) berendezést alkalmaztunk.

A nagyhorcsöki szabadföldi kísérlet talajmintáiban található szelén tartalom időbeli alakulásának értékeléséhez nem elegendő az összes szelén tartalom és a növény számára hozzáférhető szelén tartalom ismerete. Mivel a különböző szelén formák típusától (minőségétől) nagymértékben függ azok felvehetősége és kimosódása, ezért nagy jelentőségű, hogy meghatározzuk az egyes szelén formák koncentrációját. A szelén formák mintaelőkészítéséhez (extrakciójához) 0,1 mól dm<sup>-3</sup> koncentrációjú NaOH oldatot alkalmaztunk, a szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) meghatározását pedig egy nagyhatékonyságú folyadékkromatográf induktív csatolású plazma tömegspektrométer (HPLC–ICP-MS) kapcsolt analitikai rendszer segítségével végeztük. Egy Thermo Scientific SpectraSystem P4000 gyártmányú HPLC pumpához egy Hamilton PRP-X100 típusú anioncserélő oszlopot alkalmaztunk az elválasztásra. Az elválasztott szelén-specieszek detektálására XSeries<sup>II</sup> típusú ICP-MS készüléket használtunk.

A molibdén és a szelén vizsgálatával kapcsolatos kutatási eredményeink statisztikai vizsgálatára SPSS v.22.0 statisztikai programot alkalmaztunk. A paraméterek és az egyes tényezők közötti összefüggések statisztikai vizsgálatához egytényezős varianciaanalízist és Duncan-féle tesztet használtunk. Az 5%-os P-érték alatt tekintettük a próbákat szignifikánsnak.

## EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Az utóbbi időben a növényi alapú élelmiszeralapanyagok előállításához nemcsak a hagyományosnak számító tápközeget, azaz a talajt használják, hanem egyre gyakrabban tápoldatot is alkalmaznak a növényi alapanyagok termesztéséhez. Ezért az MTA doktori disszertáció elkészítésénél, molibdén és szelén adagolás, növények növekedésére és elemfelvételére gyakorolt hatását vizsgáltuk, melyhez egyszikű és kétszikű növényeket alkalmaztunk, tápoldatos, rizoboxos, tenyészedenyes és szabadföldi kísérletekben.

### Tápoldatos kísérletek

A tápoldatos kísérletekben egy egyszikű (kukorica (*Zea mays* L. cv. Norma SC)) és egy kétszikű teszt növényt (napraforgó (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR)) használtunk. A molibdén alkalmazásával végzett tápoldatos kísérletben a kukorica-csíránövénynél (gyökér és hajtás) a száraz tömegének a fejlődésére csupán a 7  $\mu\text{M}$ -os molibdén kezelésnél tapasztaltunk szignifikáns csökkenést (gyökér 17%-os, a hajtás 20%-os) a kontroll kezeléshez képest (1. fotó). A 7  $\mu\text{M}$ -os molibdén kezelés hatására a napraforgó kísérletben (2. fotó), a napraforgó gyökerének a tömege megközelítően 20%-kal csökkent, viszont a hajtásának a tömege 30%-kal növekedett meg.

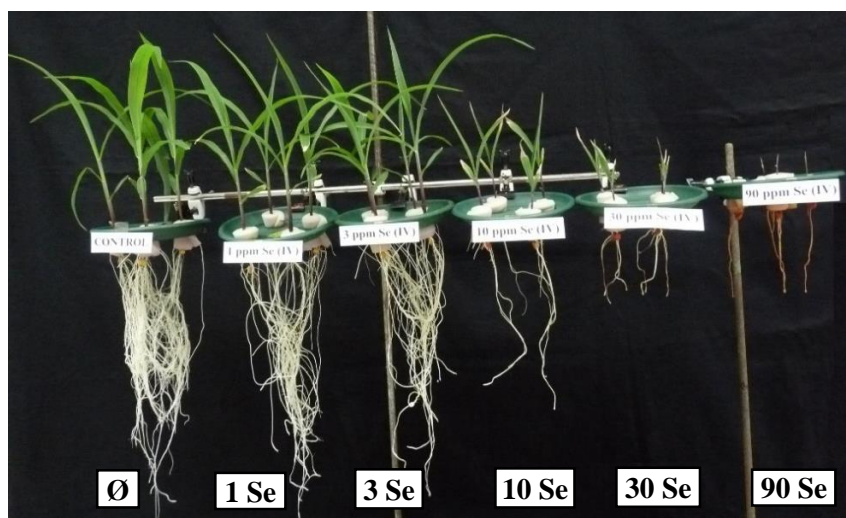


1. fotó: Molibdén kezelés (kontroll és 7  $\mu\text{M}$ ) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



2. fotó: Molibdén kezelés (kontroll és 7  $\mu\text{M}$ ) hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére

Az egyszikű kukorica (3-4. fotók) és a kétszikű napraforgó-tesztnövények (5-6. fotók) szelén kezelésénél (szelenit és szelenát formában) mind a két szervesetlen szelén forma (szelén speciesz) jelentős mértékben csökkentette a gyökerek és hajtások száraz tömegét. Amíg a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény a szelenit kezelés teljes vizsgált koncentráció tartományában (0-90 mg dm<sup>-3</sup>) életképes maradt, addig a szelenát kezelésben már a 30 mg dm<sup>-3</sup> szelenát kezelés a napraforgónövény teljes pusztulását okozta.



3. fotó: Szelenit (Se(IV)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg dm<sup>-3</sup>) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére

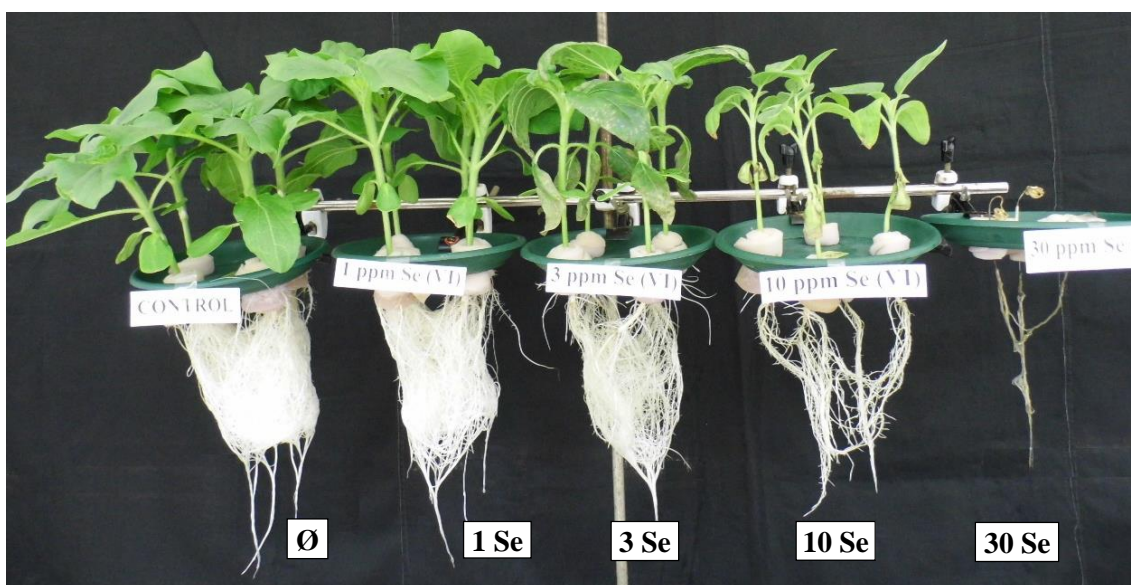


4. fotó: Szelenát (Se(VI)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 mg dm<sup>-3</sup>) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére





5. fotó: Szelenit (Se(IV)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg dm<sup>-3</sup>) hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



6. fotó: Szelenát (Se(VI)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 mg dm<sup>-3</sup>) hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére

A tápoldatos kísérletek növény mintái (kukorica és napraforgó) multielemes analízisét is elvégeztük, mely eredmények közül a molibdén és szelén mérési adatokat értékeltem. Kiszámítottam, hogy a vizsgált növények különböző részei (egy növényre vonatkoztatva), mennyi molibdént, illetve szelént (µg-ban, valamint %-os arányban) vettek fel a tápoldatból. Kiszámoltam a molibdénre és a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF= $c_{\text{hajtás}}/c_{\text{tápoldat}}$ ), valamint transzlokációs faktort (TF= $c_{\text{hajtás}}/c_{\text{gyökér}}$ ).

A kontroll kezeléshez képest monoton növekvő molibdén koncentrációt tapasztaltunk mind a gyökér, mind a hajtás mintákban. Mivel a gyökér molibdén koncentrációja valamennyi kezelés esetében meghaladta a hajtásban mért értékeket, így a transzlokációs faktor minden esetben egy alatt maradt. A kukoricához képest, a napraforgó hajtásában megközelítően kétszeres, a gyökérben pedig háromszoros koncentráció érték adódott, továbbá a teljes napraforgónövény közel háromszoros mennyiségű molibdént vont ki, mint a teljes kukoricánövény.

A tápoldatban alkalmazott növekvő szelenit és szelenát kezelések egyaránt monoton növekvő szelén tartalmat eredményeztek, mind az egy- és kétszikű teszt növényünkben, mind a gyökér és hajtás mintákban, mely teszt növények közül a napraforgó, mint kétszikű növény, reagált érzékenyebben a szelenát kezelésre, amit az is mutat, hogy a legnagyobb dózisú szelenát ( $30 \text{ mg dm}^{-3}$ ) a napraforgó teljes mértékű nekrozisát, teljes kipusztulását eredményezte.

Nagy általánosságban megállapítható, hogy a tápoldatban hasonló molibdén és szelén koncentrációjú kezeléseket alkalmazva, a növényi részekben a molibdén és szelén hasonló nagyságrendű koncentrációi jelennek meg, amely azt bizonyítja, hogy a molibdén és a szelén, a növényen belül, hasonló mobilitási sajátságokkal rendelkezik.

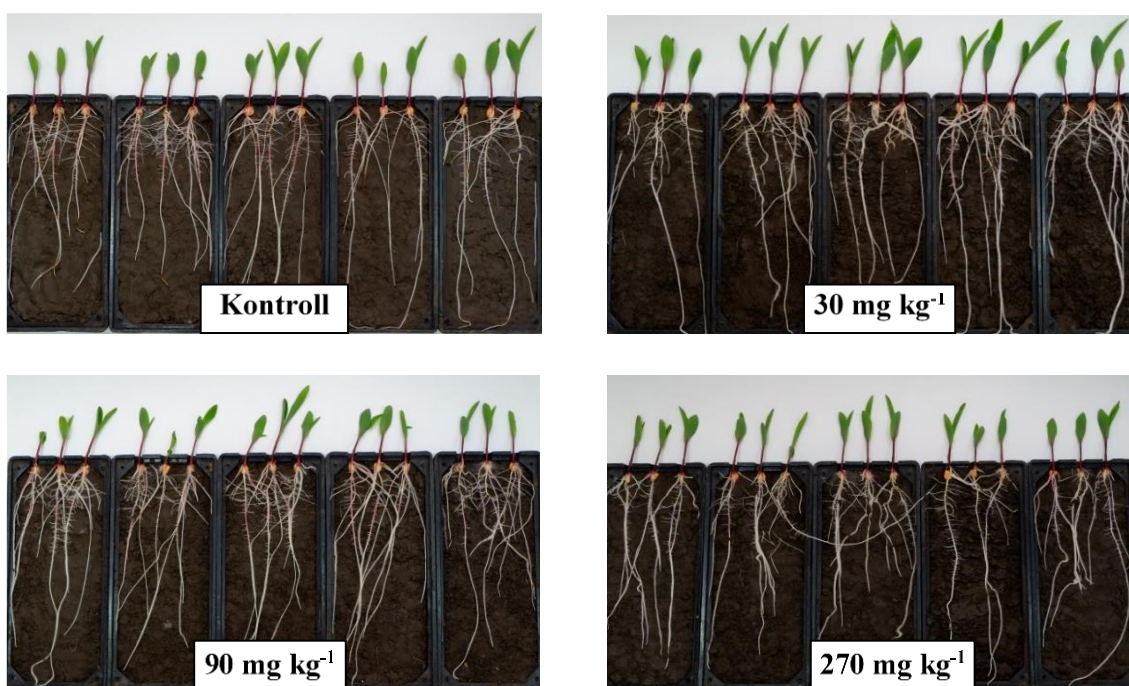
A szakirodalmakból ismert tény, hogy a szelenát könnyebben transzlokálódik a gyökérből a föld feletti szervekbe, mint a szelenit, mivel a szelenit nagy része a gyökérszövetekben marad, ahol gyorsan átalakul szerves kötésű szelén vegyületekké. A vizsgálatainkban alkalmazott kukorica (mint egyszikű növény) többé-kevésbé eleget tett ennek a megállapításnak, viszont a napraforgó (mint kétszikű növény) már egyáltalán nem a fenti „ismert tényt” támasztotta alá.

A napraforgónak a szelénre vonatkozó bioakkumulációs faktorai (BAF) alapján egyértelműen megállapítható, hogy a napraforgó akkumulátornövénynek tekinthető, mind a szelenit, mind a szelenát esetén, mivel sokkal nagyobb BAF értékeket tapasztaltunk, mint egy érték ( $\text{BAF} > 1$ ), sőt még hiperakkumulátor-növénynek is tekinthető, mivel a napraforgóhajtás szelén koncentrációja meghaladta az  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  határértéket. Sőt a szelenit kezelésben a napraforgóhajtás szelén tartalma megközelítően  $14000 \text{ mg kg}^{-1}$  értéknek adódott.

### **Rizoboxban végzett kísérletek**

A tápoldatos termesztési körülményeket követően, talaj-növény rendszerben (rizoboxban, tenyészedényben, valamint szántóföldi kísérletben) vizsgáltuk a molibdén és a szelén adagolások hatását az alkalmazott növények növekedésére és a növényi részek elemtartalmára.

A rizoboxban végzett kísérletek lehetővé tették a növényi részek száraz tömegének a mérését, valamint a kísérleti növények gyökerei hosszának a napi meghatározását, melyhez egyszikű és kétszikű teszt növényként ugyanazt a kukorica hibridet és napraforgófajtát használtuk, mint amelyet a tápoldatos kísérletekben is alkalmaztunk (7-8. fotók). A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy kukoricánál a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ , napraforgónál a  $30$  és a  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  molibdén kezelések kedvezően hatottak a hajtás szárazanyag-termékre. Viszont a kukorica-teszt növényeken fitotoxicitásra utaló tünetek még a legnagyobb dózis esetén sem jelentkeztek, míg a napraforgó-csíránövényeknél a  $90$  és  $270 \text{ mg kg}^{-1}$  molibdén kezelés már fitotoxikus tüneteket okozott.

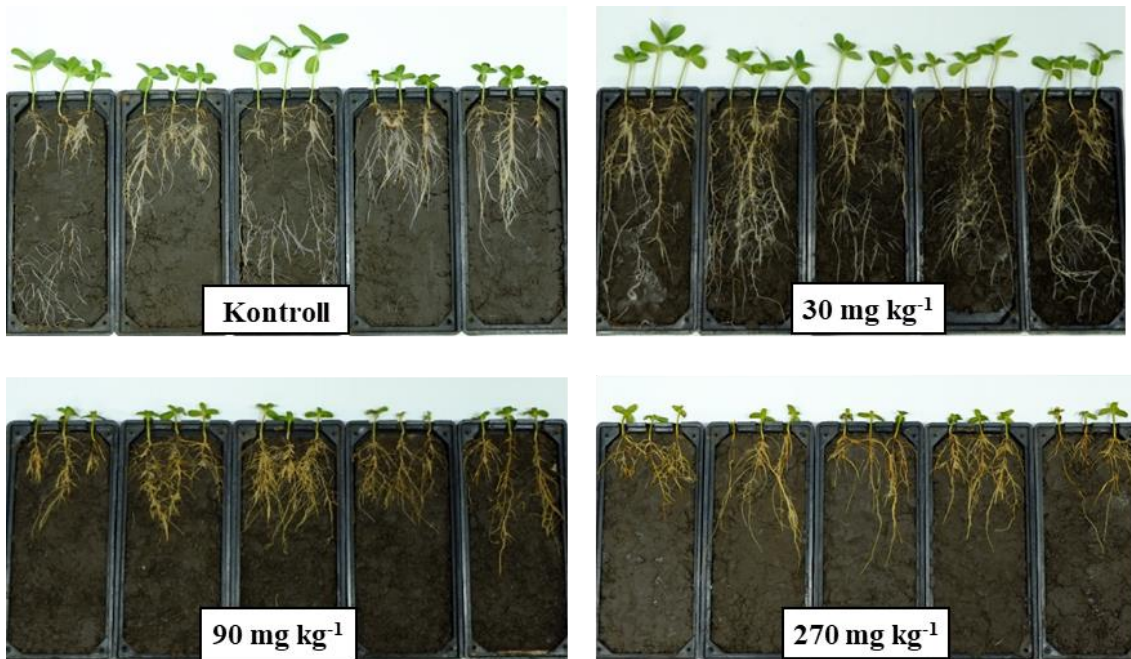


7. fotó: Molibdén kezelés (kontroll, 30, 90 és  $270 \text{ mg kg}^{-1}$ ) hatása a rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény fejlődésére

A szelenittel és a szelenáttal kezelt kukorica-csíránövények gyökerének és hajtásának száraz tömegeiben megközelítően 20-50%-os, a napraforgógyökér minták szelenát kezeléseknél pedig közel 70%-os csökkenés volt megfigyelhető (9-12. fotók).

A rizoboxban a molibdén, a szelenit és a szelenát kezeléseknél a kukorica teszt növény gyökérhosszai többnyire szignifikánsan növekedtek az eltelt napokban, a kisebb mértékű kezelések még serkentőleg is hatottak. A napraforgó-csíránövények gyökerei növekedésénél viszont nem tudtunk kimutatni hasonló egyértelmű szignifikáns eltérést sem a molibdén kezelések között, sem a szelenát kezelések között, sem az idő függvényében. Mind a kukoricánál, mind a napraforgó-csíránövénynél a szelenit  $90 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, míg a szelenát  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelénre vonatkoztatott koncentrációjánál tapasztaltunk toxicitási tüneteket.





8. fotó: Molibdén kezelés (kontroll, 30, 90 és 270 mg kg<sup>-1</sup>) hatása a rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény fejlődésére



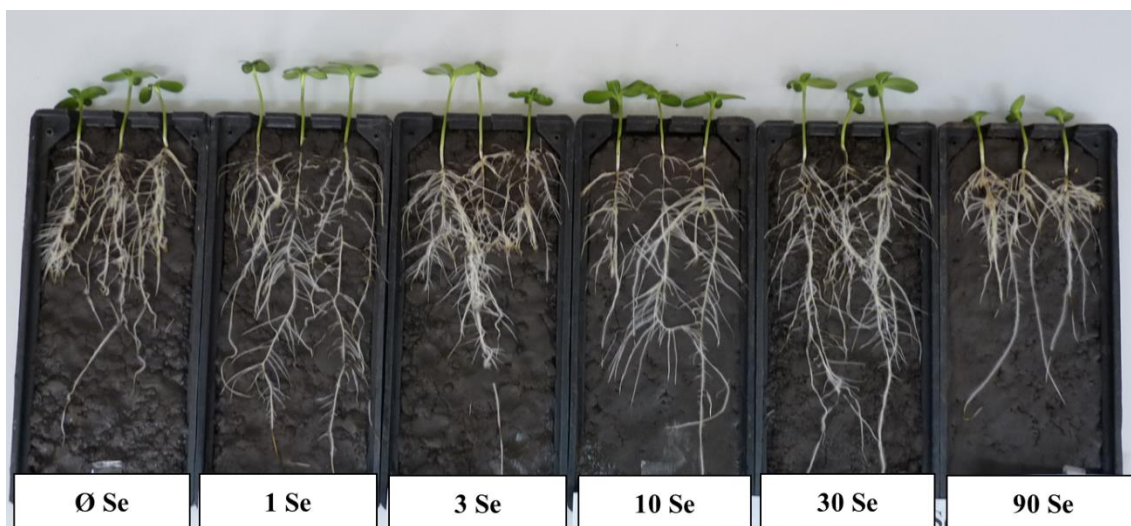
9. fotó: Szelenit (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg<sup>-1</sup>) kezelés hatása a rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény fejlődésére

Értékeltek, hogy a vizsgált növények különböző részei mennyi molibdént és szelént (µg-ban) vettek fel az alkalmazott talajból, továbbá meghatároztuk ezen molibdén és szelén tömegek relatív mennyiségét is. A kontroll talaj kevesebb mint 1 mg kg<sup>-1</sup> molibdént és szelént tartalmazott. A molibdén kezelések növelésével jelentős mértékben nőtt a gyökerek és a hajtások molibdén koncentrációja, amely növekedés eleinte egyenes arányban történt.





10. fotó: Szelenát (kontroll, 1, 3, 10 és 30 mg kg<sup>-1</sup>) kezelés hatása a rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény fejlődésére



11. fotó: Szelenit (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg<sup>-1</sup>) kezelés hatása a rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény fejlődésére

A rizoboxban nevelt napraforgónövény szelén (szelenit és szelenát) kezeléseinek eredményei tendenciájukban nagyon hasonlítanak a kukoricánövénynél kapott mérési eredményekhez. A napraforgó talajának szelénittel való kezelése szinte lineáris összefüggés szerint növelte a gyökerének a szelén tartalmát, míg a hajtásának szelén tartalma már telítési görbe jellegű változást mutatott. A napraforgónövény szelenát kezelésénél is telítési görbe jellegű változást kaptunk a hajtásai szelén tartalmára, viszont ez a telítési jelleg egy kezdeti gyors növekedést követően már ki is alakult.



12. fotó: Szelenát (kontroll, 1, 3, 10 és 30 mg kg<sup>-1</sup>) kezelés hatása a rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény fejlődésére

A kukoricaminták szelén tartalmának értékelésén kívül kiszámoltuk a rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövények növényi részei által kivont molibdén és szelén mennyiségeket. A kontroll kezelésekben megvalósuló kivont molibdén és szelén mennyiségek rendkívül alacsonyak voltak, mely értékek a kezelések hatására nagymértékben megsokszorozódtak. Ezáltal például a kukoricagyökér és a teljes növény által kivont molibdén mennyisége a 30 mg kg<sup>-1</sup>-os kezelésben megközelítőleg 100-szorosára növekedett meg.

A vizsgálati eredmények alapján kiszámolva a bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktor (TF) értékeket megállapítható, hogy a látóképi mészlepedékes csernozjom talajban nevelt kukoricánál és napraforgónál, a háromféle vizsgált oxoanion (molibdenát, szelenit és szelenát) közül a legkisebb BAF és TF értékekkel a szelenit, majd a molibdenát és végül a szelenát rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a napraforgóban a szelenát formából felvett szelén, gyökérből hajtásba irányuló transzlokációja sokkal hatékonyabban valósul meg, mint ahogyan az a molibdenátként felvett molibdénnél, vagy akár az a szelenitnél valósul meg.

Megállapítható, hogy a molibdenát és a szelenát alkalmazásával mind a kukorica, mind a napraforgó akkumulátornövénynek minősül, mivel mindegyik esetben sokkal nagyobb BAF értékeket tapasztaltunk, mint az egy érték (BAF>1). Szelenit használatával viszont csak a napraforgónál teljesült, hogy a BAF>1. Azt is megállapíthatjuk, hogy a napraforgót, mind a molibdénre, mind a szelenátra vonatkozóan hiperakkumulátor-növénynek minősíthetjük az alkalmazott talajunkon, mivel a napraforgóhajtás molibdén és szelén koncentrációja meghaladta az 1000 mg kg<sup>-1</sup> határértéket. A három vizsgált oxoaniont tekintve, a kukoricát csak a szelenátra nézve tekinthetjük hiperakkumulátor-növénynek.



## Tenyészedényes kísérlet

A tenyészedényes kísérletben mészlepedékes csernozjom talajtípuson zöldborsót alkalmaztunk. A különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó tesztnövényeket zöldborsógyökér, -szár és -levél, míg a kísérlet befejezésekor szár és levél együtt, gyökér, hüvely, valamint mag növényi részekre osztottuk. A molibdén kezelésekben (13. fotó), a zöldborsó szárának a négy nóduszos fejlődési stádiumában mért értéke kivételével, a zöldborsógyökér, -szár és -levél száraz tömegei vizsgálatánál szignifikáns hatást tapasztaltunk. A legnagyobb molibdén kezelés ( $270 \text{ mg kg}^{-1}$ ), a kontroll mintához képest, fitotoxikus hatást váltott ki. A borsó termésének (hüvely és mag), valamint a vegetatív részei száraz tömeg eredményei értékelésénél azt tapasztaltuk, hogy a legnagyobb mért tömeget a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  molibdén dózis adta.



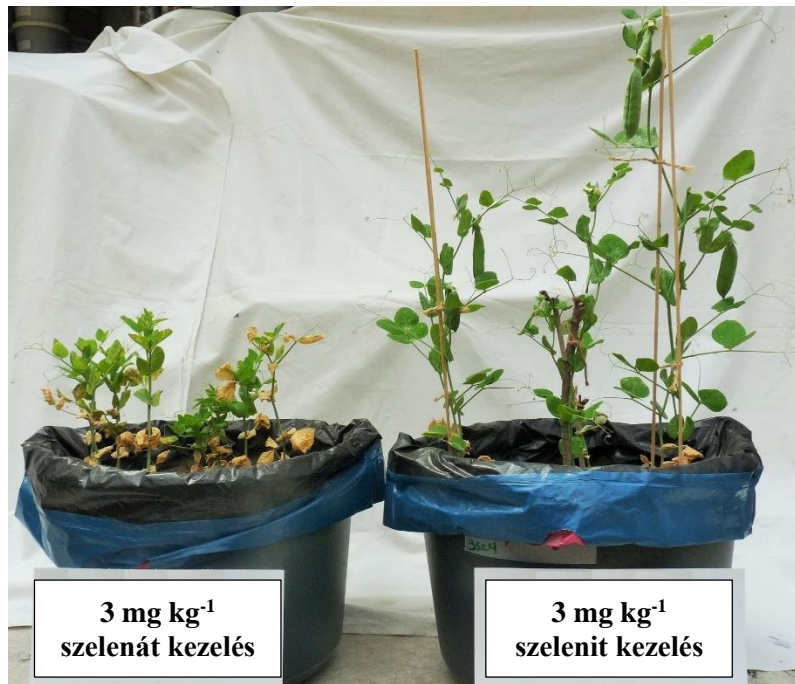
13. fotó: Molibdén kezelés ( $0, 3, 30, 90$  és  $270 \text{ mg kg}^{-1}$ ) hatása a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére, zöldérés fenofázisban

A szelénés kísérletben bármennyi szelenitet, vagy szelenátot is adagoltunk a látóképi kontroll talajhoz, a borsó vegetatív részeinek szárazanyag-produktumában folyamatos csökkenés következett be (14-17. fotók). Az  $1-10 \text{ mg kg}^{-1}$  szelenit adagokkal mind a hüvely, mind a mag szárazanyag-produktumában pozitív hatás mutatkozott, a további kezeléseknél már fitotoxikus hatást lehetett tapasztalni. A látóképi talajhoz adagolt  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  szelenát kezelésen kívül a további három szint alaposabb vizsgálatára nem volt lehetőség, mivel a borsó már a  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelenát kezelésben sem volt képes termés képzésére.



14. fotó: Az  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedenyben nevelt borsó fejlődésére

A borsó-tesztnövény növényi részei multielemes vizsgálatának eredményei közül a molibdén és a szelén koncentrációk értékelését végeztük el. A talaj növekvő molibdén adagjai hatásánál csaknem minden esetben szignifikáns növekedést tapasztaltunk. A borsóhüvely volt a növény azon része, amely statisztikailag a legérzékenyebben viselkedett a talaj molibdén tartalmának a növelésére, viszont a vizsgált borsó növényi részei közül, szinte minden fenofázisban, minden kezelésben, a gyökérnek volt a legnagyobb a molibdén koncentrációja. A zöldborsót a molibdenátra vonatkozóan akkumulátor, sőt a gyökér ( $1322 \pm 132 \text{ mg kg}^{-1}$ ) és a levél molibdén koncentrációi ( $1050 \pm 41 \text{ mg kg}^{-1}$ ) alapján hiperakkumulátor-növénynek tekinthetjük. A tenyészedenyben nevelt borsó szelén koncentrációjának változását vizsgálva általánosságban megállapítható, hogy majd minden kezelési szinten, a szelén adagok növelésével, a borsó minden egyes vegetatív növényi részénél, minden vizsgált fenofázisban a szelén koncentráció növekedése következett be.



15. fotó: A  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyésztedényben nevelt borsó fejlődésére



16. fotó: A  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyésztedényben nevelt borsó fejlődésére

Amennyiben a látóképi talaj szelén tartalmát szelenittel növeltük, akkor a teljesérés fenofázisban lévő borsónövények különböző részeinek szelén tartalma a kezelés koncentrációjával szinte egyenes arányban növekedett. A legkisebb szelén koncentráció mindig a hüvelyben, míg a legnagyobb érték a gyökérben jelent meg.





17. fotó: A  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedenyben nevelt borsó fejlődésére

Az  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  Se(VI) adagú gyökér mintában hasonló nagyságrendű szelén tartalom volt, mint amilyen a  $90 \text{ mg kg}^{-1}$  dózisú szelenit kezelésűben. Az eredményeink szerint a szelenit kezelés hatására a borsógyökér ugyan nagyobb mint  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  szelént akkumulált, viszont a szár+levél minták szelén koncentrációja messze elmaradt a fenti érték mögött. Ez alapján kijelenthetjük, hogy a zöldborsó a szelenitre nézve nem hiperakkumulátor-növény, sőt a teljesérés fenofázisban lévő szár+levél minták szelén koncentrációja alapján még akkumulátornövénynek sem tekinthető. A borsót a szelenátra nézve viszont hiperakkumulátor-növénynek tekinthetjük, mivel a szelenát kezelés hatására megközelítően  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ , sőt a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelésnél  $4000 \text{ mg kg}^{-1}$  szelén koncentrációt mértünk a borsó hajtásában. A fentiekben mért molibdén (és szelén) eredményekből kiszámoltuk, hogy egy borsónövény mennyi ( $\mu\text{g}$ ) molibdént (és szelént) vont ki a talajból és ez a növény által felvett molibdén (és szelén) hogyan oszlik meg a növényi részekben. A növekvő molibdén kezelések a borsó minden egyes növényi részénél megnövelték a kivont molibdén mennyiségét. A molibdén adagok növelése és a teljes növény által kivont molibdén mennyisége között telítési görbe jellegű összefüggést tapasztaltunk.

A molibdén és szelenit adagolásra nézve megállapítottuk, hogy a borsónövény fejlődése során a szárból a levélbe irányuló molibdén és szelén transzlokáció nem hatékonyan ment végbe, mivel a transzlokációs faktor (TF) értékek minden kezelésben egy alatt maradtak ( $\text{TF} < 1$ ). A szelenát kezelésben, a szelén transzlokációja ugyan egy nagyságrenddel hatékonyabban történt, de ez sem nevezhető hatékony transzlokációnak.

## Nagyhörcsöki szabadföldi kísérlet

A TAKI Nagyhörcsöki Kísérleti telepén beállított mikroelem-terhelési kísérlet molibdén- és szelénadagolású parcelláiról származó talaj- és növényminták (kukorica, borsó és napraforgó) vizsgálatát végeztük el. Talajmintáknál feltalaj és mélységi talajminták mintavétele is történt, melyekből molibdénnél kétféle, szelénnél háromféle elemtartalmi vizsgálatot végeztünk (HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nedves roncsolásos „összes” elemtartalom, Lakanen-Erviö-féle kivonószerrel a növény számára felvehető elemtartalom, valamint a szelénnel kezelt talajmintákból szelén formák meghatározása).

A molibdénnel kezelt parcellák feltalaj mintái vizsgálatánál általában statisztikailag is igazolt eltéréseket mutattam ki az ugyanazon évben vett kezelések molibdén tartalma között, míg az eltérő évekből származó ugyanazon szintű molibdén kezelések között nem találtam jelentős eltéréseket. Vizsgálati eredményeim alapján megállapítottam, hogy a szántóföldi kísérlet 1991. évi beállítását követően a feltalaj minták szelén tartalma folyamatosan, szignifikáns módon csökkent.

A növény által hozzáférhető molibdén és szelén tartalom becslésére a Lakanen-Erviö-féle kivonat molibdén és szelén koncentrációjának mérését használtam. A Lakanen-Erviö-féle extraktum molibdén és szelén tartalmának a tendenciája hasonló volt, mint az összes molibdén és szelén tartalom alakulása. Százalékos arányban kifejezve, a molibdén kezelések esetén a Lakanen-Erviö-féle kivonatban az összes molibdén 18-59%-a volt a mobilis, míg a szelén feltalajoknál megközelítően 14 és 90%-a volt a szelén mennyisége, az összes szelénhez viszonyítva. A fenti arányszámok alakulásában tendencia nem volt megfigyelhető, csupán annyi megállapítást tettem, hogy a molibdénnél inkább a kisebb molibdén adagok idéztek elő nagyobb mértékű növény számára hozzáférhető molibdén tartalmat, míg ezzel ellentétben a szelénnél a nagyobb dózisoknál lehetett kimutatni nagyobb arányszámokat.

A szelénnel kezelt parcellák talajaiban meghatároztuk a szervetlen szelén formák (szelén(IV) és szelén(VI)) mennyiségét, melyhez az egyik legalkalmasabb extrakciós oldat a 0,1 M NaOH volt. A 0,1 M NaOH extraháló oldat által oldható szelén koncentrációra is hasonló tendenciát kaptam, mint amilyen a Lakanen-Erviö oldható szelén tartalom alakulása volt. A 0,1 M NaOH extraháló oldat százalékos arányban kifejezett hatékonyságára vonatkozóan megállapítottam, hogy az összes szelén tartalomhoz képest, a 0,1 M NaOH extraháló oldat a talajban lévő Se 32-79%-át oldotta ki, valamint hogy a Lakanen-Erviö oldathoz képest az oldható szelén legalább 50%-át oldotta ki.

A nagyhőrcsöki kísérletből származó talajmintákban lévő szelén formák meghatározására 0,1 M NaOH extrakciós oldatot, valamint HPLC–ICP-MS csatolt rendszert alkalmaztunk. Ezen vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a kísérlet első 9 éve során a szelenit koncentrációja a 30 kg ha<sup>-1</sup> dózisú kezelésnél megközelítően 25%-ára, míg a 810 kg ha<sup>-1</sup> adagú parcellánál 3%-ára csökkent. A szelenát koncentrációja viszont nem mutatott ilyen nagy változást. A kísérlet beállításának az évében a szelén kezeléssel nőtt a szelenit-szelenát aránya, míg az utolsó évben már jelentősen megfordult ez az arány, azaz a kezelési szintekkel egyre csökkent az értéke. Az utolsó vizsgálati évben a legnagyobb kezelésnél, a szelenát koncentrációja már meg is előzte a szelenit mennyiségét a talajban.

A Nagyhőrcsöki Kísérleti telepen a TAKI szakemberei mélységi talajminták mintavételét 1993-ban (0-60 cm), 2000-ben (0-290 cm), valamint 2005. évben (0-590 cm) végezték el, a kontroll és 810 kg ha<sup>-1</sup> parcellákról. A mérési eredményekből látható, hogy a legnagyobb dózisú molibdén és szelén kezelés feltalajából lefelé irányuló, jelentős mértékű molibdén és szelén mozgás volt tapasztalható, mely mobilitás a későbbi vizsgált években (2000 és 2005) is tovább tartott.

A dolgozatomban értékeltem a molibdén és a szelén kimosódását a talaj mélyebb rétegeibe. Az első két évben a molibdén olyan nagy vertikális mobilitást mutatott, hogy a 60 cm mélységű talajmintavétel már nem volt elegendő, hogy kimutassuk a molibdén teljes kilúgzási profilját. Ezzel szemben viszont a szelén 810 kg ha<sup>-1</sup> kezelésű parcelláján a szelén kimosódás két év alatt megközelítően csak 60 cm volt. A következő vizsgálati években tovább tartott a molibdén és a szelén vándorlása a talaj mélyebb rétegeibe, sőt a szelén vándorlása fel is gyorsult. Ennek megfelelően a szelén kimosódása már több mint 300 cm volt 2000-ben, míg ugyanekkor a molibdén lemosódás csak a 160-190 cm-es talajrétegig jutott, a szelén 2005-ben pedig már a 600 cm-es talajrétegen túl is képes volt vándorolni, a molibdén pedig csak a 230-260 cm-es rétegig.

A fentiekben részletezett 0,1 M NaOH extrakciós oldattal, valamint HPLC–ICP-MS csatolt rendszerrel meghatároztuk a Nagyhőrcsöki kísérletben a szelénnel kezelt parcellák talajmintáinak (mind a feltalaj, mind a mélységi talajmintáknak) szelén specieszeit, azaz a szelén(IV) és szelén(VI) koncentrációkat, valamint kiszámoltuk ezek százalékos megoszlását. Ezen eredmények birtokában értékeltem a szelenit-szelenát átalakulás, valamint a szelén lemosódás körülményeit.

Ezt követően megbízhatóan bizonyítottam, hogy az 1991-ben a Nagyhőrcsöki Kísérleti telepen beállított szabadföldi kísérlet nagyobb adagú szelénnel kezelt parcelláin, az évek múlásával, a megnövekedett szelenát tartalom vezetett oda, hogy a 270 és 810 kg ha<sup>-1</sup> adagú szelenit kezelésű parcellákon egyre nagyobb növényi pusztulás következett be, majd ez a hatás a szelenát lemosódás következtében, 2000 után már elkezdett csökkenni.



A Nagyhörcsöki szabadföldi kísérletből származó növényminták közül annak a három növényfajnak a vizsgálatát végeztük el, amelyeket már a korábbi kísérleteinkben is alkalmaztunk. Ezek a következők voltak: kukorica, borsó és napraforgó.

A kukoricakísérletben a kukoricalevél, -szár és -szem minták molibdén és szelén koncentrációk meghatározását végeztük el. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a kukorica vizsgált növényi részeiben, mind a molibdén, mind a szelén tartalmak többnyire szignifikáns monoton növekedését tapasztaltam. A molibdén kezelésnél a kukoricalevélben tapasztaltam a legnagyobb, azaz 700-szoros dúsulást, a szárban megközelítően 300-szoros, míg a szemben csupán 60-szoros volt a molibdén tartalom növekedés. Ugyanezek az értékek a szelénre vonatkozóan: kukoricalevélnél 80-szoros, kukoricaszárnál 100-szoros, míg a kukoricaszemben 140-szeres szelén tartalom növekedést tapasztaltam. Megelemezve a kukoricalevél, -szár és -szem minták molibdén és szelén koncentrációit látható, hogy ezek között a kukoricaszem molibdén tartalma volt a legkisebb, míg a legnagyobb koncentrációt (megközelítően egy nagyságrenddel nagyobb, mint a többi érték), a kukoricalevél molibdén tartalma jelentette.

A borsónövénynél a mag és a szár növényi részei vizsgálatára nyílt lehetőség. A kukoricához hasonlóan, a borsónövénynél is ugyanazokat tudom megfogalmazni: mind a borsómag, mind a borsószár mintákban, a molibdén és a szelén tartalmak többnyire szignifikáns monoton növekedését tapasztaltam. A borsószár molibdén tartalma volt a legnagyobb, míg a legkisebb a borsómag molibdén tartalma.

A napraforgónövény tesztelésénél csak a napraforgószár minták elemzésére nyílt lehetőség. Ebben az esetben is kijelenthető a fentiekhez hasonlóan: mind a molibdén, mind a szelén tartalmak többnyire szignifikáns monoton módon növekedtek. A kezelt parcellák talajában ugyan már megközelítően sem azok a molibdén és szelén koncentrációk voltak elérhetők, mint 7 évvel korábban, a kísérlet kezdetekor, de az adott kontroll mintákhoz képest, a molibdén  $810 \text{ kg ha}^{-1}$  adagú kezelésű parcelláján 1100-szoros molibdén tartalom dúsulást, a szelénnél a  $270 \text{ kg ha}^{-1}$  adagú parcellán a szelén esetén megközelítően 1300-szoros dúsulás volt tapasztalható. Ez azt jelenti, hogy a szelén kezeléshez képest, a molibdén háromszor nagyobb adagú kezelése kellett, hasonló dúsulás eléréséhez.

Végezetül megbecsültem azt is a dolgozatomban, hogy mennyi időtartamra lenne szükség ahhoz, ha egy molibdénrel vagy szelénrel szennyezett talaj tisztítását, fitoremediációs technikával szeretnénk végezni, mely során kukoricát, borsót, vagy napraforgót alkalmaznánk. A rendelkezésre álló adatok felhasználásával, a nagyhörcsöki meszes talajhoz hasonló sajátságokkal rendelkező molibdén és szelén szennyezés (legnagyobb dózissal) megtisztításához, kukoricával legalább ezer évre, míg borsóval, vagy napraforgóval is megközelítően néhány száz évre lenne szükség.

## ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A fentiekben részletezett MTA doktori kutatómunka eredményei értékelésével a következő elméleti és gyakorlati jellegű új tudományos eredmények állapíthatók meg, mely kutatási tevékenység során molibdén (molibdenát) és szelén (szelenit és szelenát) adagolást végeztünk tápoldatos, rizoboxos, tenyészedenyes és szabadföldi kísérletekben, melyeknél egyszikű és kétszikű tesztnövényeket alkalmaztunk.

### Tápoldatos kísérletek

1. A molibdénre és szelénre vonatkozó kiszámított bioakkumulációs faktor értékek (BAF) alapján megállapítható, hogy mind a kukorica, mind a napraforgó, a molibdénre nézve akkumulátornövénynek minősül (mivel a  $BAF > 1$ ), valamint a napraforgó mind a szelenit, mind a szelenát esetén hiperakkumulátor-növénynek tekinthető (mivel a napraforgóhajtás szelén tartalma nagyobb mint  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ ).
2. A tápoldatban alkalmazott növekvő szelenát kezeléseknél a napraforgó, mint kétszikű tesztnövény reagált érzékenyebben a szelenát kezelésre (már a  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  szelenát kezelés a napraforgó teljes mértékű nekrozisát, kipusztulását eredményezte).
3. A nemzetközi szakirodalmak szerint a szelenát könnyebben transzlokálódik a gyökérből a föld feletti szervekbe. A vizsgálataim alapján ez teljesül a kukoricára (mint egyszikű növényre), viszont a napraforgónál (mint kétszikű növényenél) nem a szelenát transzlokálódik könnyebben a gyökérből a föld feletti szervekbe, hanem a szelenit.

### Rizoboxban végzett kísérletek

4. Az egyszikű kukorica és a kétszikű napraforgó tesztnövények szelenát kezeléseit összehasonlítva megállapítottam, hogy míg a kukorica gyökere az (a hajtáshoz képest), ahol a szelenát kezelés hatására, a szelén nagyobb koncentrációját találjuk, valamint a növény által kivont szelén nagyobb hányada (közel 80%-a) is a gyökerében raktározódik, addig a napraforgónövényben (szelenát kezelés hatására), a szelén könnyebben transzlokálódik a hajtásba. Ezáltal a növény által kivont szelén tartalom 97-98,5%-a lesz megtalálható a napraforgó hajtásában. Ezáltal a napraforgó hajtásánál 7800-szoros szelén tartalom növekedést tudunk elérni a kontroll mintához képest.

5. A vizsgálati eredményeink alapján kiszámolva a bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktor (TF) értékeket megállapítottam, hogy a látóképi mészlepedékes csernozjom talajban nevelt kukoricánál és napraforgónál, a háromféle vizsgált oxoanion (molibdenát, szelenit és szelenát) közül a legkisebb BAF és TF értékekkel a szelenit, majd a molibdenát és végül a szelenát rendelkezik. Tehát a három vizsgált oxoanion közül a szelenát forma gyökérből hajtásba irányuló transzlokációja megy a leghatékonyabban. Az azonos dózisú szelén formák BAF értékeit összehasonlítva megállapítható, hogy a kukoricacsíránál 100-350-szer nagyobb a szelenátra vonatkozó bioakkumulációs (BAF) faktor, mint a szelenité (a napraforgócsíránál ugyanez az arány 50-150).
6. A kutatási eredményeink alapján azt javaslom, hogy az ilyen sajátosságú elemek esetén, mint amilyen a szelén, azaz melynek több elemformája van jelen a talaj-növény rendszerekben, ne elemre nézve legyen megállapítva, hogy az elemre nézve az adott növény akkumulátor vagy sem, hanem a természetben megjelenő elemformákra végezzük az akkumulátor és hiperakkumulátor növények csoportosítását, besorolását.

### **Tenyészedényes kísérlet**

7. A tenyészedényes kísérletben, borsó-tesztnövényt alkalmazva, a vizsgált növényi részek közül szinte minden fenofázisban, minden kezelésben, a gyökérnek volt ugyan a legnagyobb a molibdén koncentrációja, mégis a borsóhüvely volt a növény azon része, amely statisztikailag a legérzékenyebben viselkedett a talaj molibdén tartalmának a növelésére, azaz a borsóhüvely minden egyes molibdén kezelésre, mind a zöldérés, mind a teljesérés fenofázisban szignifikáns molibdén koncentráció növekedéssel válaszolt.
8. Borsó-tesztnövény alkalmazásával megállapítottam, hogy tenyészedényben a molibdén adagok növelése és a teljes növény által kivont molibdén mennyisége között telítési görbe jellegű volt az összefüggés, amely azt jelenti, hogy minél inkább növeljük/növekedik a talajban megjelenő molibdenát mennyisége, relatíve annál kevesebb molibdént fog felvenni a teljes borsónövény.

### **Nagyhőrcsöki szabadföldi kísérlet**

9. Bizonyítottam, hogy a mészlepedékes csernozjom talajok szelén formái (specieszei) vizsgálatára kiválóan alkalmas a 0,1 M NaOH extraháló oldat, melyhez mérőmódszerként HPLC-ICP-MS csatolt rendszert használtunk.

10. Megállapítottam, hogy a mészlepedékes csernozjom talajban lévő kisebb mint  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  szelén koncentráció esetén, mind a  $0,1 \text{ M NaOH}$ , mind a Lakanen-Erviö extraháló oldatok egyaránt alkalmasak a növény számára felvehető (oldható) szelén tartalom meghatározásához.
11. Meghatároztam, hogy a nagyhőrcsöki mészlepedékes csernozjom talajon beállított szabadföldi kísérlet első két évében, a  $810 \text{ kg ha}^{-1}$  kezelésű parcellákon, a molibdén vertikális mobilitása volt a jelentősebb, mint a szeléné (a Se megközelítően  $60 \text{ cm}$ , a Mo mobilitása ennél nagyobb volt). Az ezt követő években viszont a szelén vándorlása felgyorsult, 9 év alatt a szelén kimosódása több mint  $300 \text{ cm}$ , a molibdén lemosódása pedig csak  $160\text{-}190 \text{ cm}$  volt. 14 év alatt a szelén vertikális mobilitása meghaladta a  $600 \text{ cm}$ -t, a molibdén kilúgzódása viszont csak a  $230\text{-}260 \text{ cm}$ -es rétegig történt meg.
12. Bebizonyítottam, hogy a nagyhőrcsöki mészlepedékes csernozjom talajon beállított szabadföldi kísérlet  $270$  és  $810 \text{ kg ha}^{-1}$  adagú szelénnel (szelenit formában) kezelt parcelláin, a szelenit-szelenát átalakulás, valamint ezzel párhuzamosan a szelenát lemosódása vezetett ahhoz, hogy néhány év alatt egyre nagyobb növényi pusztulás következett be, valamint hogy megközelítően 10 év alatt ez a hatás a szelenát lemosódás következtében kezdett el csökkenni.

## IRODALOMJEGYZÉK

Cakmak I., H. Marschner: (1990) Decrease in nitrate uptake and increase in proton release in zinc deficient cotton, sunflower and buckwheat plants. *Plant and Soil*. **129**:261-268.

Kádár I.: (1995) A talaj-növény-állat-ember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon. Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet, Budapest.

Kovács B., Dániel P., Győri Z., Loch J., Prokisch J.: (1998) Studies on parameters of inductively coupled plasma spectrometer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **29**(11-14):2035-2054.

Kovács B., É. Széles, J. Prokisch: (2008) Problems and opportunities of selenium analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry in plant and soil samples. *Cereal Research Communications*. **36**(1):459-462.

Kovács B., Győri Z., Prokisch J., Loch J., Dániel P.: (1996) A study of plant sample preparation and inductively coupled plasma emission spectrometry parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **27**(5-8):1177-1198.

Kovács B., Győri Z., Prokisch J., Loch J., Dániel P.: (2000) Studies on soil sample preparation for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **31**(11-14):1949-1963.

MSZ 21470-50:2006 (2006) Környezetvédelmi talajvizsgálatok. Az összes és az oldható toxikuselem-, a nehézfém- és a króm(VI)tartalom meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.

Oláh V. A., L. Csárthy, L. Karmazsin, B. Kovács, L. Papp: (1991) Plasma selenium level and glutathione peroxidase activity in newborn babies. *International symposium on selenium*. Belgrade. Abstract. 54.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm a PhD doktori hallgatóimnak (Bacs kainé Dr. Bódi Évának és Dr. Farzaneh Garousinak) a kutató munka végzésében nyújtott segítségüket, valamint a Debreceni Egyetem Élelmiszertudományi Intézet és az Agrárműszerközpont valamennyi volt és jelenlegi kutatójának, technikusának és dolgozójának a kutatómunkámhoz nyújtott áldozatos munkáját és segítségét.

Köszönöm a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet segítségét, azon belül is nagyrabecsülésemet szeretném kifejezni Prof. Dr. Kádár Imrének†, aki egyrészt azt javasolta, hogy ne csak a szelén vizsgálatával foglalkozzak, hanem egyéb elemek vizsgálatát is végezzem el, másrészt a Nagyhorcsöki Kísérleti telepen beállított szabadföldi kísérlet talaj- és növényminta anyagából is számos mintát, valamint azok dokumentációját is biztosította számomra.

Köszönöm Dr. Lévai Lászlónak, valamint Prof. Dr. Veres Szilviának, hogy a tápoldatos, valamint a rizoboxos kísérleteket kivitelezhattuk a Debreceni Egyetem Növénytudományi Intézet, Mezőgazdasági Növényteni, Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék Klímaszobájában, továbbá a Növénytudományi Intézet kollégáinak is szeretném kifejezni köszönetemet, hogy a rizoboxban és a tenyészedényben végzett kísérletekhez biztosították a megfelelő talajtípusú és minőségű talajokat.

Köszönettel tartozom Balláné Dr. Kovács Andreának, hogy lehetőséget biztosított számunkra, hogy a Debreceni Egyetem, Agrokémiai és Talajtani Intézetének Tenyészházában kivitelezhattuk a tenyészedényes kísérleteket.

Szeretném kifejezni köszönetemet a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatói Ösztöndíj, valamint az Oktatási Minisztérium Széchenyi István Kutatói Ösztöndíj, továbbá a NATO kutatói támogatást és az MHB a Magyar Tudományért ösztöndíj támogatását.

A hosszú évek óta folytatott vizsgálatokat kisebb vagy nagyobb mértékben az OTKA, INCO-Copernicus, JICA, DAAD, EFOP, STCU, TÉT, COST, TÁMOP, HURO, MUNDO, TIOP, GINOP, EFOP, TKP, valamint a PIACI-KFI pályázatok is támogatták.

Köszönettel tartozom Prof. Dr. Sárvári Mihálynak és Prof. Dr. Csapó Jánosnak, hogy a disszertáció végleges formájának elkészítéséhez számos szakmai és grammatikai tanácsot nyújtottak, továbbá köszönöm Dr. Huzsvai Lászlónak a statisztikai elemzésekhez nyújtott tanácsait.

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet mindazoknak a kollégáknak, barátoknak és mindenki másnak, akik ezen disszertáció elkészítéséhez segítséget nyújtottak.

Köszönöm páromnak Dr. Kiss Ildikónak, valamint fiamnak Kovács Gergelynek (Gerinek) azt a megértést és támogatást, amely nélkülözhetetlen volt a kutatómunkám végzéséhez.

Végül, de nem utolsó sorban megköszönöm szüleimnek mindazt az élethosszig tartó segítséget, biztatást és támogatást, amely nélkül nem tudtam volna elkészíteni a disszertációm.

**Kovács Béla tudományos és oktatói munkásságának összefoglalása**  
**MTA IV. Agrártudományok Osztálya (2024.04.18)**

<b>Tudományos és oktatási közlemények</b>	<b>Közlemények fokozat (PhD 1998) után<sup>1</sup></b>	<b>Hivatkozások fokozat után<sup>2</sup></b>	<b>Közlemények összesen</b>	<b>Hivatkozások összesen<sup>1</sup></b>
<b>Folyóiratcikk, lektorált szakfolyóiratban, teljes<sup>3</sup></b>	165	1341	184	1672
ebből első vagy utolsó szerző	71	589	77	769
magyar nyelvű cikk	42	27	51	47
magyar nyelvű cikk osztálylistás folyóiratokban	40	27	45	40
idegen nyelvű cikk IF-os folyóiratokban	75	1182	83	1491
idegen nyelvű cikk nem IF-os folyóiratokban	48	132	50	134
idegen nyelvű cikk osztálylistás folyóiratokban	35	127	36	129
idegen nyelvű cikk hazai szakfolyóiratokban	38	110	39	110
<b>Konferencia közlemény folyóiratban (teljes)</b>	3	---	3	---
magyar nyelvű	0	---	0	---
idegen nyelvű	3	---	3	---
<b>Szakkönyv</b>	0	0	0	0
magyar nyelvű, egy szerzős	0	0	0	0
magyar nyelvű, több szerzős	0	0	0	0
idegen nyelvű, egy szerzős	0	0	0	0
idegen nyelvű, több szerzős	0	0	0	0
<b>Szakkönyv szerkesztőként</b>	2	---	2	---
magyar nyelvű	1	---	1	---
idegen nyelvű	1	---	1	---
<b>Könyvfejezet</b>	13	0	13	0
magyar nyelvű, egy szerzős	3	0	3	0
magyar nyelvű, több szerzős	4	0	4	0
idegen nyelvű, egy szerzős	0	0	0	0
idegen nyelvű, több szerzős	6	0	6	0



<b>Felsőoktatási tankönyv, jegyzet</b>	2	---	2	---
egy szerzős	0	---	0	---
több szerzős	2	---	2	---
<b>Fejezet felsőoktatási tankönyvben, jegyzetben</b>	0	---	0	---
egy szerzős	0	---	0	---
több szerzős	0	---	0	---
<b>Szerkesztett felsőoktatási tankönyv, jegyzet</b>	0	---	0	---
<b>Tanulmány- vagy konferenciakötetben megjelent konferencia közlemény (proceedings)</b>	79	---	117	---
magyar nyelvű	43	---	63	---
idegen nyelvű	36	---	54	---
<b>Összes tudományos és oktatási közleményeinek száma</b>	264	1341	321	1672

<b>Tudományometriai adatok</b>	<b>A tudományos fokozat (PhD 1998) után</b>	<b>Összesen</b>
<b>Közlemények impakt faktora</b>	255,232	263,521
<b>Független hivatkozások száma</b>	1165	1349
magyar nyelvű	28	40
idegen nyelvű	1137	1309
hivatkozások nemzetközi adatbázisokban (WoS és/vagy Scopus) <sup>4</sup>	1012	1158
<b>Hirsch-index<sup>1</sup></b>	---	22
<b>Ismeretterjesztő közlemények száma</b>	5	5
ismeretterjesztő könyvek	0	0
egyéb ismeretterjesztő művek	5	5
<b>Szabadalmak, oltalmak<sup>5</sup></b>	1	1
hazai	1	1
külföldi	0	0

## **Megjegyzések:**

1 A tudományos fokozat után: a disszertáció benyújtásának éve után

2 Disszertációk és egyéb típusú hivatkozások nélkül

3 A teljes tudományos folyóiratcikkek közé a szakcikk, összefoglaló cikk, rövid közlemény, esszé besorolású folyóirat közlemények kerülnek a nagy nemzetközi adatbázisokban referált folyóiratokban és a IV. osztály listáján szereplő folyóiratokban megjelent(lektorált) és teljes cikkek.

4 A Web of Science-ben (WOS) és a Scopusban szereplő hivatkozások: az adatbázis azonosítókkal megjelölve

5 Az elismert fajták listáját az Osztálynak listán kell beküldeni

n.a. = nincs adat

**Debrecen**  
**2024.**