

MTA Doktori Értekezés

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

Kovács Béla

Debreceni Egyetem

Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar

Debrecen

2024.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	1
2. CÉLKITŰZÉSEK	3
3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
3.1. A molibdén	6
3.1.1. A molibdén története és általános jellemzése	6
3.1.2. A molibdén termelése és felhasználása	7
3.1.3. A molibdén előfordulása	8
3.1.3.1. A molibdén előfordulása a talajokban	8
3.1.3.2. A molibdén előfordulása a vizekben	14
3.1.3.3. A molibdén előfordulása a levegőben	15
3.1.3.4. A molibdén előfordulása és szerepe a növényekben	15
3.1.3.4.1. Molibdén hiánytünetek megjelenése a növényekben	20
3.1.3.4.2. A megfelelő mennyiségű molibdén kedvező hatása a növények fejlődésére	24
3.1.3.4.3. Molibdén toxicitás megjelenése a növényekben	25
3.1.3.4.4. A molibdén hatása a növények makroelem felvételére	27
3.1.3.4.5. A molibdén hatása a növények mikroelem felvételére	28
3.1.3.5. Élelmiszereink molibdén tartalma	30
3.1.3.6. A molibdén előfordulása és szerepe az állatokban és az embereknél	33
3.2. A szelén	36
3.2.1. A szelén története és általános jellemzése	36
3.2.2. A szelén termelése és felhasználása	38
3.2.3. A szelén előfordulása	40
3.2.3.1. A szelén előfordulása a talajokban	41
3.2.3.2. A szelén előfordulása a vizekben	45
3.2.3.3. A szelén előfordulása a levegőben	46
3.2.3.4. A szelén előfordulása és szerepe a növényekben	47
3.2.3.5. Szelén hiánytünet és toxicitás megjelenése a növényekben	50
3.2.3.6. Élelmiszereink szelén tartalma	51
3.2.3.7. A szelén előfordulása és szerepe az állatokban és az embereknél	54
4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	57
4.1. Anyagok	57
4.1.1. Tápoldatos kísérlet	57
4.1.2. Rizoboxos kísérlet	58
4.1.3. Tenyészedényes kísérlet	59
4.1.4. Nagyhörsöki szabadföldi kísérlet	61
4.1.4.1. A kukoricakísérlet	62
4.1.4.2. A borsókísérlet	63
4.1.4.3. A napraforgókísérlet	63
4.2. Az alkalmazott mintaelőkészítési és mérési módszerek	64
4.2.1. A növényi minták szárazanyag-tartalmának meghatározása	65
4.2.2. Mintaelőkészítés kémiai analízishez	65
4.2.2.1. Mintaelőkészítés a talaj „oldható” elem tartalmának meghatározásához	65
4.2.2.2. Mintaelőkészítés a talaj „összes” elem tartalmának meghatározásához	66
4.2.2.3. Mintaelőkészítés a növény „összes” elem tartalmának meghatározásához	66
4.2.3. A minták elem tartalmának meghatározása	67
4.2.3.1. A minták elem tartalmának meghatározása ICP-OES technikákkal	67
4.2.3.2. A minták elem tartalmának meghatározása ICP-MS technikákkal	68
4.2.4. Szelén formák meghatározása HPLC–ICP-MS technikával, a mérés körülményei	71
4.2.5. A kísérleti eredmények kiértékeléséhez használt egyéb programok	72

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK.....	73
5.1. Tápoldatos kísérletből származó növényminták vizsgálata	73
5.1.1. A tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgónövények száraz tömege	73
5.1.2. A tápoldaton nevelt kukorica és napraforgó, molibdén és szelén koncentrációja	75
5.2. Rizoboxos kísérletből származó növényminták vizsgálata	79
5.2.1. A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgónövények száraz tömege	79
5.2.2. A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgónövények gyökérhossza	81
5.2.3. A rizoboxban nevelt kukorica és napraforgó, molibdén és szelén koncentrációja ...	84
5.3. Tenyészedényes kísérletből származó borsó vizsgálata	91
5.3.1. A tenyészedényben nevelt borsó száraz tömegének változása	91
5.3.2. A tenyészedényben nevelt borsó molibdén koncentrációjának változása	94
5.3.3. A tenyészedényben nevelt borsó szelén koncentrációjának változása	99
5.4. Nagyhörsöki szabadföldi kísérlet	107
5.4.1. A nagyhörsöki szabadföldi kísérletből származó talajminták vizsgálata.....	107
5.4.1.1. A feltalaj minták vizsgálata	107
5.4.1.2. A mélységi talajminták vizsgálata.....	114
5.4.2. Nagyhörsöki szabadföldi kísérletből származó növényminták vizsgálata.....	129
5.4.2.1. A kukoricakísérlet	129
5.4.2.2. A borsókísérlet	130
5.4.2.3. A napraforgókísérlet.....	132
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	135
7. ÖSSZEFOGLALÁS	137
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	I
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	A
10. MELLÉKLETEK	B

"dolgozni csak pontosan, szépen,
ahogy a csillag megy az égen,
ugy érdemes."

József Attila

1. 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 tápanyag-igényének 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 tenyészedeényekben 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 növény táplálási 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.

2. 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 (Magyarország termőterületének 22%-a), a barna erdőtalajok (Magyarország mezőgazdasági területének közel 34%-a), valamint az öntés- és lejtőhordalék talajok (megközelítően 11%), továbbá a csernozjom típusú talajok (melyek semleges vagy gyengén lúgos pH-val rendelkeznek), mely talajok 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 (I1). 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, mely kísérletet 13 elem alkalmazásával állították be. 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 (arzén és molibdén) a kutatásomba való bevonásával is. (Megjegyzés: a 13 elem között oxoanion formában található még a króm, melynek a vizsgálatát Dr. Prokisch József kollégám végezte.) Dr. Kádár Imre tanácsait és segítségét elfogadva, az azóta eltelt időszakban mindhárom anionos formában lévő elem (arzén, molibdén és szelén) kutatásával foglalkoztunk, mely eredményekből 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, tenyészedényes, továbbá szabadföldi tartamkísérletet. Vizsgálataink során ezen kísérletekből származó növénytípusok 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 szervesetlen szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) adagolásával beállított kísérletekben (tápoldatban, rizoboxban), milyen mértékű hatás tapasztalható a növényi részek szárazanyag-termékumára (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 koncentrációinál 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 Nagyhörcsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet feltalaj mintái összes molibdén és szelén tartalma hogyan alakul a mintavételi években?
9. A Nagyhörcsöki 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 specieszek) mennyisége és azok százalékos aránya?
12. A szabadföldi kísérlet szelennel kezelt parcelláin, a kezelést követő 3. évtől kezdve, miért következett be a két legnagyobb dózisu 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?

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Zarcinas et al. (1987) szerint minimum 14 ásványi elem szükséges a növények zavartalan növekedéséhez és fejlődéséhez. Ezek közül a nitrogén, foszfor, kálium, kén, kalcium és a magnézium (N, P, K, S, Ca és a Mg) makroelemek, a bór, réz, vas, mangán, molibdén, nátrium, cink és a klór (B, Cu, Fe, Mn Mo, Na, Zn és a Cl) nyomelemek. A 14 felsorolt elemen kívül, a kobalt, szelén, jód, fluor, nikkel, vanádium, szilícium, alumínium és a króm (Co, Se, I, F, Ni, V, Si, Al és a Cr) nem esszenciálisak a növény növekedéséhez, viszont közvetve hatnak a termés mennyiségére vagy az emberek, állatok egészségére. Adriano 1986-ban a növény szempontjából esszenciális elemek közé sorolta a bór, kobalt, réz, mangán, molibdén, szelén, vanádium és cink (B, Co, Cu, Mn, Mo, Se, V és Zn) elemeket. A fentiekén kívül az ezüst, arzén, bárium, berillium, bizmut, kadmium, króm, fluor, higany, nikkel, ólom, antimon, ón, titán, tallium és volfrám (Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Cr, F, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn, Ti, Tl és W) viszont toxikusak vagy csak az állatok számára esszenciálisak. Adriano 2001-ben megjelent könyve szerint, a magasabb rendű növények kilenc makroelemet (szén (C), hidrogén (H), oxigén (O), nitrogén (N), kálium (K), kalcium (Ca), magnézium (Mg), foszfor (P) és kén (S)), valamint hét mikroelemet (klór (Cl), mangán (Mn), vas (Fe), cink (Zn), bór (B), réz (Cu) és molibdén (Mo)) (mikroelemek azok, melyek koncentrációja $\leq 100 \text{ mg kg}^{-1}$ a szárazanyagban) igényelnek a növekedésükhöz. A fentiekén túlmenően a magasabb rendű növények olyan mikroelemeket is tartalmaznak, amelyek alapvetően az állatok fejlődéséhez szükségesek. Ezek között foglal helyet a kobalt (Co), króm (Cr), fluor (F), jód (I) és a szelén (Se) is (Selinus et al., 2005; Miller et al., 1991; Van Campen, 1991; Csathó, 1994).

Az elemek fenti besorolásának a koncentrációk nagysága volt az alapja. A növényekben előforduló elemek azonban kiemelt fiziológiai szerepük alapján is csoportosíthatók. Mengel et al. (2001) fiziológiai szempontból 4 csoportba sorolja a növények fejlődését segítő tápelemeket:

1. C, H, O, N, S: amely elemek gáz formájában fordulnak elő az atmoszférában és a felvételük ionos állapotban történik (CO_2 , HCO_3^- , H_2O , O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , N_2 , SO_4^{2-} , SO_2).
2. P, B, Si: amely elemeket a növények foszfátok, bórsav, borát, vagy kovasav formájában veszik fel a talajoldatból.
3. K, Na, Ca, Mg, Mn, Cl: amely elemeket a növények ionos formában veszik fel a talajoldatból.
4. Fe, Cu, Zn, Mo: amely elemek felvétele vagy ionos vagy kelát formában történik.

Adriano (2001) szerint viszonylag sok tanulmány jelent meg mind a növény számára esszenciális molibdén, mind az állatok növekedéséhez nélkülözhetetlen molibdén és szelén elemekkel kapcsolatban. Adriano (2001) ezeket az elemeket nyomelemekként definiálja, bár hozzáteszi, hogy a „nyomelem” elnevezés manapság inkább „divatosnak” számít. A nyomelem kifejezés, véleménye szerint, többféle jelentéssel bír. Például a nyomelemek csoportja azokat az elemeket jelenti, amelyek nagyon kis koncentrációban fordulnak elő a természetben, valamint azok is ebbe a kategóriába tartoznak, amelyek az élő szervezetekben kis mennyiségben találhatóak, és azok táplálásában nélkülözhetetlenek. A földtudományok területén viszont sokkal konkrétabb ezek besorolása és definiálása: a bioszférában található azon elemeket, amelyek nem tartoznak a nyolc közetképző elem közé (melyek az O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K és a Mg), nyomelemeknek

nevezzük. A biokémiai és orvosbiológiai kutatások terén, nyomelemeknek kell tekinteni azokat, amelyek a növényi vagy állati szövetekben kisebb mint 0,1%-ban találhatóak. Az élelmiszer- és táplálkozástudomány területén azt nevezzük nyomelemnek mely koncentrációja a késztermékben csak ritkán haladja meg a 20 mg kg^{-1} -ot. A gyakorlatban a nyomelem, a nehézfém, a mikrotápanyag és a mikroelem elnevezéseket szinonimaként szokták alkalmazni. Meg kell említeni, hogy a nehézfémek kifejezés általában azon fémekre és félfémekre vonatkozik, amelyek sűrűsége nagyobb mint $5,0 \text{ g cm}^{-3}$, emellett környezetszennyezést és toxicitást már igen alacsony koncentrációban lehet hozzájuk társítani (Adriano, 2001; Simon, 2007). Mivel a dolgozatban tárgyalt szelén sűrűsége ($4,79 \text{ g cm}^{-3}$) nem éri el az említett $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ értéket, a molibdéné ($10,22 \text{ g cm}^{-3}$) viszont meghaladja ezt, így az említett indokok alapján a molibdént egyaránt nevezhetjük nyomelemnek és nehézfémnek is, a szelént viszont csak nyomelemnek (Adriano, 2001; Yaws, 2011).

3.1. A molibdén

3.1.1. A molibdén története és általános jellemzése

Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) (1. kép), svéd kémikus volt, aki több híres felfedezése mellett, 1778-ban a molibdenit (MoS_2) ásványból egy új, addig nem ismert elem oxidját állította elő (Stiefel és Murray, 2002). Három évvel később, 1781-ben Peter Jacob Hjelm (1746-1813) (2. kép) volt az, aki először állított elő fém molibdént úgy, hogy a molibdén oxidját faszénnel együtt hevítette. A molibdén neve a görög ólom (molybdos) szóból származik, amely alátámasztja azt, hogy akkoriban az írásra alkalmas puha ásványok beazonosítása körül bizonyos zavar jelentkezett. A nyelvújításkori magyar neve ólany volt.

A molibdén (Mo) kemény, rideg, ezüstfehér színű fém. A periódusos rendszerben a krómcsoporthoz, azaz a VI.b. csoportba (króm, molibdén, volfrám és sziborgium) tartozó átmeneti fém. Rendszáma 42, egy mól atomtömege $95,94 \text{ g}$. Az elemek között az egyik legnagyobb sűrűségű ($10,22 \text{ g cm}^{-3}$), legmagasabb olvadáspontú (2623°C) és forráspontú (5560°C) fém (Presta, 2015; Neumüller, 1983; Barceloux, 1999; Reilly, 2002, Yaws, 2011).

Elemi állapotban nem található meg a természetben, vegyületeiben 0, 2, 3, 4, 5 és 6 vegyértékkel fordul elő. Vegyületeiben, bár a kation-formák is ismeretesek, általában molibdenát- (vagy molibdát)-anionként szerepel, melyben az oxidációs állapota +6. A molibdénnek 35 izotópja ismert, amelyek közül 7 stabil: ^{92}Mo (14,84%), ^{94}Mo (9,25%), ^{95}Mo (15,92%), ^{96}Mo (16,68%), ^{97}Mo (9,55%), ^{98}Mo (24,13%) és ^{100}Mo (9,63%) (Berglund és Wieser, 2011; Presta, 2015).

Az ezüstfehér színű molibdén sötétvörös színűre változik, amennyiben jelentős mértékben növeljük a hőmérsékletét, majd kb. 600°C -on molibdén-trioxiddá oxidálódik és ha tovább növeljük a hőmérsékletét, 800°C fölött szublimál. Az elemi molibdén salétromsavban, forró tömény kénsavban és királyvízben jól oldódik, kis mértékben sósavban, viszont hígított kénsavban, hidrogén-fluoridban, ammóniában, valamint alkáli-hidroxidokban, mint pl. kálium-hidroxidban oldhatatlan (Neumüller, 1983).



1. kép

Carl Wilhelm Scheele svéd kémikus (I2)



2. kép

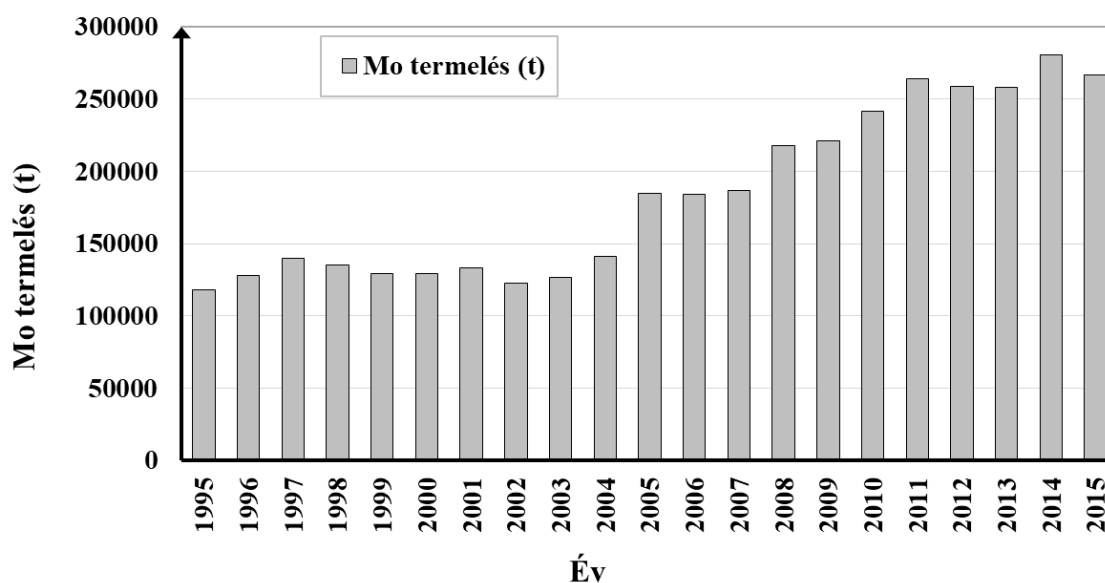
Peter Jacob Hjelm svéd kémikus (I3)

3.1.2. A molibdén termelése és felhasználása

A világ éves molibdén termelése 1957-1962 között 30 ezer tonnánál kevesebb volt. Viszont ebben az időben jöttek rá arra, hogy a jobb minőségű acélokban, a korróziógátlókban és bizonyos festékekben, a toxikus krómot kiválthatják a nem toxikus molibdénnel. Ez az igény indukálta a világ molibdén termelésének a monoton növekedését. A következő 20 évben megközelítően négyszeresére növekedett a termelés; a 70-es évek végére valamivel több mint 100 ezer tonna molibdént állítottak elő (Adriano, 1986). 1980-ban már közel 110 ezer tonna, majd 1995-2005 között 120 és 140 ezer tonna között változott (Babbitt és Groat, 2001; Norton és Groat, 2002; Butterman és Brown Jr, 2004; Norton és Leahy, 2006; Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007), az azt követő tíz évben pedig a megnövekedett igények miatt fokozatos növekedésnek indult, mely mostanában a 250-300 ezer tonna évi molibdén termelést ért el (Norton és Leahy, 2006; Kempthorne és Myers, 2008; Salazar és McNutt, 2010, 2011, 2012, 2013; Jewell és Kimball, 2014, 2015, 2016) (1. ábra). A világ molibdén termelésének említésre méltó hányadát Kínában, az USA-ban, Chilében, Peruban, Mexikóban, Kanadában, Örményországban, Oroszországban, Iránban, Mongóliában, Törökországban és Üzbegisztánban állítják elő (Jewell és Kimball, 2016).

A molibdént az ipar széles körben használja. Az összes molibdén termelés több mint kétharmad részét a vas- és acélgyártásban ötvözetek előállítására alkalmazzák. Viszonylag kisebb mennyiségű molibdén is előnyösen változtatja meg az acél tulajdonságait. Már 0,3% molibdén adagolása is jelentősen növeli az öntöttvas szilárdságát, valamint számos acélfajta korrózióállóságát. A korrózióálló molibdénacél ötvözet előállításához 0,4-3,5% molibdén szükséges, de vannak olyan speciális acélok is, melyek molibdén tartalma elérheti a 14,5%-ot is. Ezáltal nagy szilárdságú, korrózióálló, valamint fényezhető acélok nyerhetők, pl. speciális páncéllemezek, fegyver alkatrészek, mágnesacélok és saválló készülékek. A fentiekén túlmenően használják izzólámpaszálak tartójaként, órarugók, gépkocsirugók, tengelyek előállítására, a volfrámgyártásban speciális kemencékhez, továbbá a molibdént alkalmazzák még katalizátorok, festékek, füst- és égésgátló anyagok, kémiai reagensek, valamint nagynyomású edények,

dombornyomású bélyegzők, mágnesek és kenőanyagok előállítására (Evans és Barabash, 2010; Hall, 2007; Takács, 1992; Anke, 2004; Presta, 2015; Otto-Albrecht, 1983). A molibdén ezenkívül gyógyászati készítmények és mezőgazdasági termékek komponense (Reilly, 2002).



1. ábra: A világ molibdén termelése 1995 és 2015 között

Számos szerves kémiai folyamatban alkalmaznak molibdén-trioxidot vagy molibdén-diszulfidot katalizátorként, például acetilénből etilén, benzolból maleinsav-anhidrid, propilénből aceton, etilénből polietilén és fenolból benzol stb. előállításához (Braithwaite és Haber, 1994). Molibdén vegyületeket használnak pigmentek, festékek, reagensek, kenőanyagok, katalizátorok, korróziógátlók, kerámiai segédanyagok, nyomelemtrágya stb. előállításához (Srivastava, 2007; Gupta, 2007a; Mortvedt, 2007; Reddy et al., 2007).

3.1.3. A molibdén előfordulása

A molibdén csak kis mennyiségben van jelen a környezetünkben. A legfelső 16 km vastag földkéregben, a szerzőktől függően, 1,2-14 mg kg⁻¹ molibdén található, melyet ez alapján az elemek gyakorisági sorrendjében, a 38. és az 53. helyek közé rangsorolják (Neumüller, 1983; Greenwood és Earnshaw, 2004; Adriano, 2001; Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Pendias, 2001). Átlagos előfordulási aránya a litoszférában 1,5 mg kg⁻¹, a talajokban 0,5-3,0 mg kg⁻¹, a tengervízben 10 µg dm⁻³, az édesvizekben 0,5 µg dm⁻³ érték körül változik (Szabó et al., 1987).

3.1.3.1. A molibdén előfordulása a talajokban

Az Irodalmi áttekintés fejezet első részében (5-6. oldalakon) tárgyalt mikroelemekhez képest, a molibdén viszonylag kis koncentrációkban fordul elő a különböző talajokban.

A molibdén átlagban 1,5-1,8 mg kg⁻¹ koncentrációban fordul elő a talajokban, míg ennek tartománya 0,1-7 mg kg⁻¹. A talajok molibdén tartalma hasonló értéket mutat, mint ami azok talajképző közetében jelenik meg (Adriano, 2001; Kabata-Pendias és Szteke, 2015). Kabata-Pendias és Szteke (2015) szerint a molibdén koncentráció általában a homokos podzolos talajok 1,3 mg kg⁻¹ értékétől az agyagbemosódásos barna erdőtalajok 2,8 mg kg⁻¹ értékéig terjed.

Svédországi szántóföldi talajokban Eriksson (2001) 0,1-4 mg kg⁻¹ molibdén értékeket határozott meg.

Az Amerikai Egyesült Államok (USA) olyan talajaiban, amelyek közel helyezkedtek el molibdén feldolgozó üzemekhez, akár 35 mg kg⁻¹, míg hasonló talajokban, Chilében 38 mg kg⁻¹ molibdén értékeket mértek (Kabata-Pendias és Pendias, 2001). Pieri et al. (1996) Kanadában olyan talajokat vizsgáltak, melyeken zöldségfélék kereskedelmi termesztése folyt. Ezeknek szintén viszonylag magas volt a molibdén koncentrációja (24 mg kg⁻¹). Kabata-Pendias és Mukherjee (2007) szerint a vulkáni kőzetek a kőzet típusától függően átlagos 0,2-2 mg kg⁻¹ molibdént tartalmaznak, az agyagos kőzetek 2-2,5 mg kg⁻¹, a karbonátok pedig 0,2-0,4 mg kg⁻¹, valamint a homokkövek 0,2-0,8 mg kg⁻¹ molibdén tartalommal rendelkeznek. Az Európai altalajok molibdén tartalma De Vos és Tarvainen (2006) szerint széles intervallumban változik (0,1-17,2 mg kg⁻¹), míg a feltalajok molibdén tartalmának tartománya 0,1-21,3 mg kg⁻¹. Hazánk talajainak molibdén tartalma 0,3-4,0 mg kg⁻¹. A homoktalajaink molibdén tartalma a legalacsonyabb értékkel rendelkezik (0,34-0,50 mg kg⁻¹). Az ásványi talajaink molibdén tartalma általában kisebb mint 1 mg kg⁻¹, az erdőtalajaink molibdén tartalma pedig szélesebb intervallumban változik (0,25-1,0 mg kg⁻¹), hasonlóan a csernozjom talajainkhoz (0,31-1,48 mg kg⁻¹). A rosszul szellőző hidromorf talajaink a fenti felsorolástól eltérnek a molibdén tartalmukat illetően, ugyanis a réti- és láptalajaink molibdén tartalma akár a 4 mg kg⁻¹-ot is elérheti (Győri, 1984; Ráthonyi et al., 2010).

A rossz vízvezető képességű, vizenyősebb talajokon termesztett növények jelentős mennyiségű molibdén akkumulálására képesek, homoktalajoknál azonban gyakran jelentkezhet a molibdén hiánya. Ez azért lehetséges, mivel a homoktalajok rendkívül jó vízvezető képességűek, ezáltal ha molibdén trágyázást végzünk, a molibdén nagy része könnyen kimosódik a talajból (Adriano, 1986, 2001; Gupta, 2007a).

Savanyú, kedvezőtlen szerkezetű talajaink meszezése, nagyobb adagú foszfortrágyázása, lazítása általában elegendő a molibdén-hiány leküzdésére (Gupta és Lipsett, 1981). Amennyiben azonban a növények kielégítő molibdén tápláltsági állapotának biztosításához trágyázás szükséges, úgy ebben az esetben nagyon ügyelni kell a túladagolás elkerülésére.

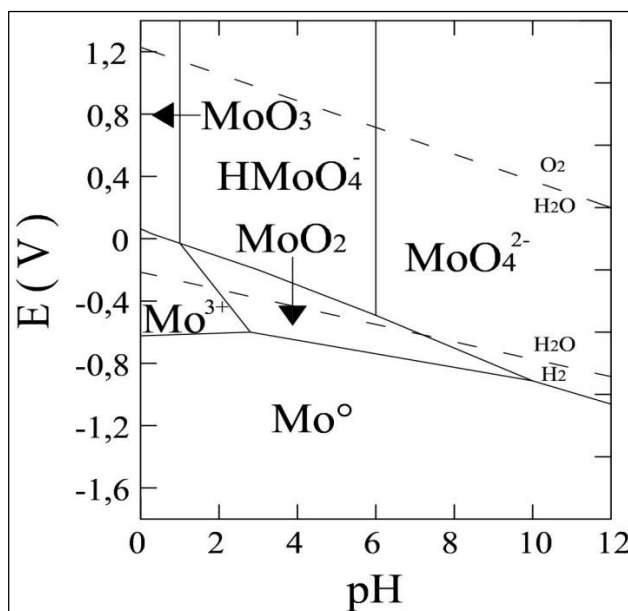
A talajok arid és szemi-arid tartományokban, különösen a sok vasat tartalmazó talajoknál (lateriteknél), viszonylag nagy mennyiségű molibdén jelentkezik. Ezek a talajok molibdénnel szennyezett talajoknak tekinthetők, és ezeknél talajjavítást kell alkalmazni annak érdekében, hogy a növény számára hozzáférhető molibdén tartalmat csökkenteni tudjuk (Adriano, 1986, 2001).

A talajokban található nagyobb molibdén tartalmat a különböző típusú ipari szennyezések okozzák. Bizonyos szennyvíziszapok molibdén tartalma akár 50 mg kg⁻¹ is lehet. A széntüzelésű erőművek szállóhamuja potenciális molibdén-forrás lehet (Kabata-Pendias, 2011).

A Holland Lista a szennyezett talajok molibdén koncentrációjának beavatkozási határértékére 2000-ben még 200 mg kg⁻¹ értéket adott meg, míg 2013-ban már csak 190 mg kg⁻¹ értéket (The New Dutch List, 2000; Soil Remediation Circular, 2013).

Különleges mangán konkréciók viszonylag olyan nagy kapacitású helyekkel rendelkeznek, mellyel képesek megkötni a molibdént akár 400 mg kg^{-1} koncentrációban is (Kabata-Pendias és Sadurski 2004). Szefer (2002) szerint viszont a kevésbé szellőzött, és emellett kénben gazdag környezetben lévő üledékekben akár olyan Mn-Fe konkréciók találhatóak, melyek molibdént képesek felhalmozni, megközelítőleg 500 mg kg^{-1} koncentrációban. De talált még olyan helyeket is, ahol a Mn-Fe konkréciók maximum 2000 mg kg^{-1} molibdén tartalmat tudtak kialakítani.

A molibdén mind kalkofil mind litofil elemként képes viselkedni, mivel a molibdén főként anionként jelenik meg a természetben (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). A közel semleges és a mérsékelt lúgos pH-tartományban a MoO_4^{2-} forma (speciész), mint oxoanion dominál, míg a pH csökkentésével egyre inkább a HMoO_4^- anion válik az uralkodó molibdén formává (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; Kabata-Pendias és Szteke, 2015; Adriano, 2001; Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Pendias, 2001; Evans és Barabash, 2010). Egyébként mindkét anion előfordulhat a talajoldatban, viszont ezek mennyisége, aránya nagymértékben függ a talaj pH-jától (2. ábra) (Kabata-Pendias és Sadurski, 2004).



2. ábra: A molibdén megjelenési formái a pH-tól és az elektródpotenciáltól (E) függően (Saji és Lee, 2012)

A molibdén (mint nyomelem) anionos formájának köszönhetően teljesen eltér a talajbani viselkedése a többi nyomelemtől. A molibdén kissé mobilis savanyú talajokban ($\text{pH} < 4-5$), és viszonylag könnyen mobilizálható lúgos talajban ($\text{pH} > 6,5$). A viszonylag könnyen oldható molibdén anionok azonban együtt képezhetnek csapadékot a talajban a következő komponensekkel: szervesanyaggal, CaCO_3 -tal, valamint a vas- és mangán-vegyületekkel, továbbá számos más kationnal is, mint például a réz, a cink és az ólom. Különösen könnyen adszorbeálódik a frissen kicsapott $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -hoz. A molibdén a talajban különböző komplex vegyületek és ásványi anyagok képzésében is részt vesz, mint például a wulfenit (PbMoO_4), a ferrimolibdit ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), valamint más félkristályos szerkezetű Fe-Mo-formák. Redukáló körülmények

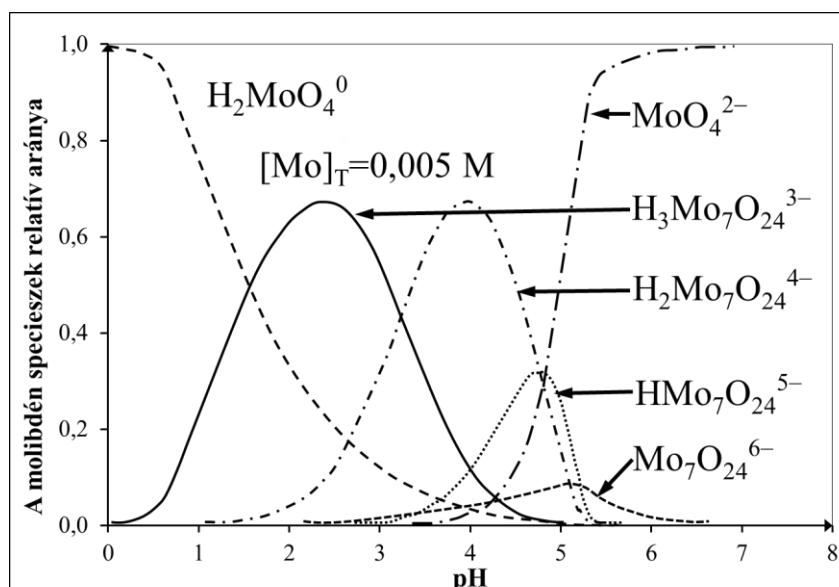
között a molibdén könnyen képez oldható tiomolibdát (például MoS_4^{2-} és a $\text{MoO}_2\text{S}_2^{2-}$) vegyületeket. Mindezen reakciók nagymértékben függenek a rendszer redox potenciáljától és a pH-jától (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). Reddy et al. (2007) és Bódi et al. (2015) megállapítása szerint a molibdén a talajainkban négy különböző formában fordulhat elő:

- 1.) kötött állapotban vas-, alumínium- és mangán-oxidokhoz kapcsolódva,
- 2.) szerves kötésben,
- 3.) vízoldható formában a talajoldatban,
- 4.) ásványokban (molibdenit (MoS_2), powellit (CaMoO_4), ferrimolibdit ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$) és wulfenit (PbMoO_4)).

Savanyú talajokban a molibdén nagy része a vas- és alumínium-oxidokhoz kötődve található (Goldberg és Forster, 1998; Bibak és Borggaard, 1994). A vas- és alumínium-oxidok amfoter kolloidok, azaz savas közegben pozitív töltésűek és anionmegkötésre képesek, lúgos közegben viszont anionként viselkednek, ezáltal kationmegkötést tesznek lehetővé. A savanyú talajokból a növények viszonylag kisebb mennyiségű molibdént képesek felvenni, mivel a pH=2-4 között a talajokban található Fe- és Al-oxidok erős kötésben tartják a molibdenát aniont. Az adszorpció mértéke a 4-es pH-nál a legintenzívebb (Ferreiro et al., 1985; Goldberg et al., 1996). Ennek következtében a savanyú talajoknál a talajoldat molibdén tartalma jelentősen lecsökken. Ezt a megállapítást számszerűsíti Barceloux (1999) és Krebs (2006) is: amikor savanyú talajvíz lépett érintkezésbe a 800 mg kg^{-1} molibdén tartalmú talajjal, a talajoldatban csak $<0,2 \text{ mg dm}^{-3}$ molibdént mértek. Goldberg et al. (2002) pedig azt állapították meg, hogy a molibdén adszorpció maximális volt azokban a talajokban, amelyek a 2-5 közötti pH tartományban helyezkedtek el, viszont a pH=5-től nagyon gyorsan csökkent a növekvő pH-val, egészen a pH=8-as értékig, majd pH=9 fölött minimális volt a talajok molibdén adszorpciós kapacitása. Reisenauer et al. (1962), valamint Marks et al. (2015) vizsgálatai is ezt támasztják alá, miszerint a lúgos talajoknál a molibdén adszorpció kicsi, így a molibdén jelentős része a talajoldatban található, ezáltal a molibdén-felvétel lúgos kémhatású talajokból lényegesen nagyobb mértékű lehet. A molibdén, vas- és alumínium-oxidokhoz való kötődésének erősségében viszont eltérés figyelhető meg. Goldberg et al. (1996) kutatásai arra mutattak rá, hogy a molibdén adszorpciója az alumínium-oxidok felületéhez sokkal gyengébb, mint a vas-oxidok felületéhez, arról nem is beszélve, hogy az adott talajokban a vizsgált alumínium-oxidok felülete (amely fontos az adszorpció értékeléséhez) megközelítően tízszerese volt, mint a vas-oxidok felülete. Ugyanezen munkájuknak (Goldberg et al., 1996) az eredménye volt az a megállapítás is, miszerint az agyagásványok molibdén adszorpciójának nagyságrendje a következő sorrendet követi: kaolinit < illit < montmorillonit. Ezek szerint a molibdén adszorpció mértékét az agyagásványok típusa és azok mennyisége is meghatározza. A fentiekben részletezett különbség ellenére, miszerint a vas-oxidok adszorpciója sokkal nagyobb, mint az alumínium-oxidoké, nem szabad figyelmen kívül hagynunk az alumínium-oxidok mennyiségét és azok adszorpciós képességét, mivel az Al-oxidok is fontos szerepet játszanak a molibdén megkötésében.

A talajban lévő molibdenát anionok komplexet tudnak képezni a talajoldatban található alkálifém és alkáliföldfém kationokkal (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), valamint a humuszanyagokkal (humín- és fulvosavak) is. Mivel a fenti komplexek képződése eredményeként csökken a Fe-, Al- és Mn-oxidok által kötésben tartott molibdenát mennyisége, ezért a növények számára hozzáférhető molibdén mennyisége a talajoldatban megemelkedik (Reddy et al., 2007; Adriano, 2001; Gupta, 2007a). A talajban lévő szerves kötésben lévő molibdén nagyobb hányada főként a fulvo- és huminsavakhoz kötődve található. A talaj szervesanyagai a molibdént erősen adszorbeálják, ezért a szervesanyagban gazdag talajokban magas a molibdén tartalom (Kabata-Pendias és Pendias, 2001; Bibak és Borggaard, 1994; Kaiser et al., 2005). Győri (1958) hazai talajokon végzett vizsgálataival megállapította, hogy az általa vizsgált láptalaj, több mint tízszer annyi molibdént tartalmazott, mint a többi, viszont azok kisebb szervesanyag-tartalmú talajok voltak. Ez is azt igazolja, hogy a talajok nagyobb szervesanyag-tartalma, potenciális lehetőséget jelenthet a molibdén nagyobb mérvű dúsulásához.

A talajoldatban a vízoldható formában található molibdén megjelenési formáját és felvehetőségét elsősorban a talaj kémhatása határozza meg (2. ábra) (Saji és Lee, 2012; Osman, 2013). A legnagyobb oldható molibdén fajta (speciesz) a talajoldatokban és a vizes oldatokban, a molibdénsav (H_2MoO_4^0), valamint az oxoanionjai (HMoO_4^- és MoO_4^{2-}) (3. ábra). Viszonylag nagyobb molibdén koncentráció esetén, megközelítően 10^{-4} M fölött ($>9,65 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Mo}$), viszont polinukleáris komplexek keletkeznek. Ezek közé tartozik a polimolibdénsav ($\text{H}_3\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{3-}$), valamint a három konjugált anionja is ($\text{H}_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{4-}$, $\text{HMo}_7\text{O}_{24}^{5-}$ és $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$) (3. ábra). Meg kell említeni, hogy a fentiekben tárgyalt specieszek a talajoldatban számos komplex képzésére alkalmasak. Az 1. táblázat bemutatja, hogy a talajoldatban pl. a molibdenát ion (MoO_4^-) esetén milyen fontosabb komplexek képződésére nyílik lehetőség. Az 1. táblázatban a felsorolt lehetséges komplexek képződési állandói is megtalálhatók.



3. ábra: A molibdénsav specieszek relatív aránya a pH-tól függően (viszonylag nagyobb molibdén koncentráció esetén) (Evans és Barabash, 2010)

Smith et al. (1997) szerint pH=4,23 érték alatt a talaj pH értékének csökkenésével az alábbi molibdén formák csökkenő mennyiségi sorrendben vannak jelen a talajban:



4,23 pH érték felett viszont jelentősen nő a molibdenát anion (MoO_4^{2-}) aránya. Mivel a növények a molibdént molibdenát anion (MoO_4^{2-}) formájában veszik fel (Mengel és Kirkby, 1987), ezért leginkább a talaj pH-jának a növelésével tudjuk serkenteni a növények molibdén felvételét. Lindsay (1972) megállapítása szerint pH=5 érték felett, amennyiben a talaj pH értékét egy egységgel megnöveljük, akkor a felvehető MoO_4^{2-} koncentrációja megközelítően százszorosára emelkedik. Ebből következően a savanyú talajaink meszezése általában elegendő lehet a molibdén hiány kiküszöbölésére (Bittner, 2014), egyes esetekben azonban a talajok meszezése mellett még molibdén kiegészítésre is szükség van (Zimmer és Mendel, 1999). Gupta (2007) megállapítása is ezt a tényt erősítette meg, miszerint az agyagos talajon nevelt káposzta, lucerna, rozsnok esetében a talaj pH értékének 5-ről 6,5-re történő emelése serkentette ugyan az adott növények molibdén akkumulációját, viszont homoktalaj esetében a meszezés nem volt elegendő hatással a molibdén felvételre.

A molibdén különböző ásványokban is előfordul. Az ásványok közül a legfontosabb molibdén forrás a hexagonális/trigonális kristályrendszerű molibdenit (MoS_2), de a powellit (CaMoO_4), a wulfenit (PbMoO_4), az ilsemanit (Mo_3O_8) és a ferrimolibdit ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$) is tartalmaz molibdént (Pau, 2004; Sharma és Chatterjee, 1997; Xu et al., 2013; Stiefel és Murray, 2002). A molibdenit fontosabb lelőhelyei Magyarországon: Nadap, Sukoró, Pákozdi, Nagybörzsöny, Recsk, Kővágószőlős, Fertőrákos (Kiss és Szalai, 2009). Magyarországon a molibdén viszonylag nagyobb mennyiségének jelenléte a következő vonalon található (bár egyik helyen sem érdemes kitermelni): Szabadbattyán, Pákozdi, Ördög-hegy, Olaszköfő, Meleg-hegy, Gécsi-hegy (Koch, 1966).

1. táblázat: A molibdenát ion (MoO_4^-) fontosabb komplexei és azok komplex képződési állandói (Evans és Barabash, 2010)

Reakció	logK
$\text{MoO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HMoO}_4^-$	4,21
$\text{MoO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{MoO}_4^0$	8,19
$7\text{MoO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-} + 4\text{H}_2\text{O}$	52,99
$7\text{MoO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HMo}_7\text{O}_{24}^{5-} + 4\text{H}_2\text{O}$	59,37
$7\text{MoO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_3\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{3-} + 4\text{H}_2\text{O}$	64,15
$7\text{MoO}_4^{2-} + 11\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_3\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{3-} + 4\text{H}_2\text{O}$	67,39
$19\text{MoO}_4^{2-} + 34\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Mo}_{19}\text{O}_{59}^{4-} + 17\text{H}_2\text{O}$	183,6
$\text{MoO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} \rightleftharpoons \text{CaMoO}_4^0$	2,57
$\text{MoO}_4^{2-} + \text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons \text{MgMoO}_4^0$	3,03
$\text{MoO}_4^{2-} + \text{K}^+ \rightleftharpoons \text{KMoO}_4^-$	1,29
$\text{MoO}_4^{2-} + \text{Na}^+ \rightleftharpoons \text{NaMoO}_4^-$	1,66
$6\text{MoO}_4^{2-} + 6\text{H}^+ + \text{Al}^{3+} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_6\text{Mo}_6\text{O}_{18}^{3-}$	54,98

A Földön a molibdén legnagyobb lelőhelye az USA-ban, Coloradóban található (Climax-bánya, prekambriumi gránitokban, a készlet megközelítően 85 millió t érc), de előfordul

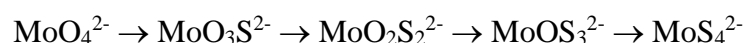
Kanadában, Chilében, Kínában, Angliában, Norvégiában, Svédországban, Mexikóban, Peruban, Oroszországban és Ausztráliában is. Európa legnagyobb molibdéntelepe Norvégiában van (Knabendistrikt, Stavanger mellett), kisebb molibdéntelepek Németországban, Felső-Bajorországban találhatóak. A legtöbb érc, amelyet molibdénben gazdagnak, fejtésre érdemesnek találunk, megközelítően 0,4-1% molibdenitet, azaz molibdén-szulfidot tartalmaz (Neumüller, 1983; Reilly, 2004; Krebs, 2006; Newton, 2010; Adriano, 1986, 2001).

3.1.3.2. A molibdén előfordulása a vizekben

A felszíni és a felszín alatti vizek molibdén koncentrációja általában $1-2 \mu\text{g dm}^{-3}$ tartományban található. Ezek közül csak azok a helyek képeznek kivételt, ahol valamilyen antropogén molibdén forrás, vagy molibdén depozíció fordul elő, mint pl. bányák közelében. Ilyen esetekben, ha még egy magasabb pH érték is előfordul, akkor akár 10000-szeresére is növekedhet a fenti molibdén koncentráció, ezáltal a talajvíz molibdén tartalma $0,002 \text{ mg dm}^{-3}$ -ról elérheti a 20 mg dm^{-3} értéket is. Ez a magas koncentráció érték ilyen esetben a rendkívüli mértékben oldható és ezáltal mobilis molibdenát anionnak (MoO_4^{2-}) tudható be (Stiefel és Murray, 2002).

A tengervízben a molibdén a legnagyobb koncentrációban előforduló átmenetifém. Az óceánok átlagos molibdén koncentrációja $10 \mu\text{g dm}^{-3}$ (Stiefel és Murray, 2002). Az óceánok lúgos pH-ján (pH=8,3) a molibdén molibdenát anion formában fordul elő, bár kolloidok vagy szuszpenziók formájában is megtalálható (Stiefel és Murray, 2002; Jarrell et al., 1980).

Anaerob vizek esetén, különösen azoknál, ahol még a szulfid tartalom is magas, már nemcsak a molibdenát az egyetlen molibdén speciesz. A pH-tól, valamint a szulfid-ion aktivitástól függően az oxidok helyett a szulfidok képződése irányába tolódik el az alábbi egyensúly, továbbá igen magas szulfid tartalom esetén elérhetjük egészen a tetratiomolibdát kialakulását is (Harmer és Sykes, 1980; Erickson és Helz, 2000).



Amennyiben a fenti módon tiomolibdát ionok kezdenek kialakulni akkor arra is lehetőség nyílik, hogy különböző redox reakciók menjenek végbe, mely reakciók a MoS_2 vagy a MoS_3 csapadék képződésének kedveznek, ezáltal csökken az oldatban lévő molibdén koncentrációja (Stiefel, 1997; Helz et al., 1996).

Az európai uniós országokban a palackozott vizek molibdén koncentrációjának középértéke $0,275 \mu\text{g dm}^{-3}$, ami csak egy kicsivel magasabb, mint a csapvizek középértéke ($0,233 \mu\text{g dm}^{-3}$) (Birke et al., 2010). Mivel a fentieknek megfelelően a molibdén csak nagyon kis koncentrációban fordul elő az ivóvizekben, amely koncentráció tartományban nem tapasztaltak semmilyen egészségügyi problémát, így a FAO és a WHO által közösen kiadott hivatalos iránymutatásban nem tartották szükségesnek, hogy egészségügyi határértéket határozzanak meg a csapvizek molibdén koncentrációjára (WHO, 2011a). Ugyanezt a megállapítást támasztja alá egy másik WHO tanulmány is (WHO, 2011b) melyet azzal indokolnak, hogy az ivóvizek molibdén tartalma általában $10 \mu\text{g dm}^{-3}$ érték alatt található, bár szintén ebben a tanulmányban már meg is cáfolják

ezt, miszerint 380 ivóvízminta vizsgálatával a molibdén koncentrációk (az átlag: $85,9 \mu\text{g dm}^{-3}$) 3-1024 $\mu\text{g dm}^{-3}$ tartományban voltak, míg az ezek előállításához használt folyóvizekben 2-1500 $\mu\text{g dm}^{-3}$ Mo (az átlag: $60 \mu\text{g dm}^{-3}$) értékeket mértek.

3.1.3.3. A molibdén előfordulása a levegőben

A levegő molibdén koncentrációja nagyon változó, akár $<0,2 \text{ ng m}^{-3}$, és a felső határa 10 ng m^{-3} lehet (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). Amennyiben a levegő molibdén tartalmát összehasonlítjuk egyéb nyomelemekével, mint pl. a kadmium, a réz, az ólom és a cink, kiderül, hogy a légszennyezést még azokhoz képest is viszonylag alacsony molibdén tartalom jellemzi (Barceloux, 1999). A molibdén nagyobb koncentrációi ($0,01$ - $0,03 \text{ mg m}^{-3}$) a városi területek levegőjében fordulnak elő, míg a vidéki területek molibdén szintje ettől jóval alacsonyabb ($0,001$ - $0,0032 \mu\text{g m}^{-3}$) (Stiefel és Murray, 2002). Ez azt jelenti, hogy megközelítően akár 10000-szer nagyobb molibdén tartalmak várhatók egy város levegőjében. Meg kell jegyezni, hogy bár a természetes források molibdén kibocsátása messze meghaladja az antropogén forrásokból, pl. a nehéziparból, különösen az acélművekből származó értéket, a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével viszont jelentős mértékben megemelkedhet a levegő molibdén koncentrációja az égetés közelében.

A szállóhamu molibdén koncentrációja 7 - 160 mg kg^{-1} tartományban található (Barceloux, 1999; Stiefel és Murray, 2002). Mivel a szállóhamu kiülepedése hozzájárulhat a talajok molibdén tartalmához, ezért Reimann és de Caritat (1998) vizsgálták a szállóhamu kiülepedését a Kola-félszigeten. Kutatásaik alapján megállapították, hogy az éves molibdén terhelés a távoli területeken $0,043 \text{ kg km}^{-2}$, míg a szennyezett területeken ugyanez az érték $0,923 \text{ kg km}^{-2}$. Migaszewski et al. (2009) viszont a lengyelországi hegyekben lévő moha (*Hylocomium splendens*) molibdén tartalmát ($0,1$ - $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$) hasonlították össze az Alaszkában található mohákéval ($<0,05$ - $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$) és úgy találták, hogy ezek molibdén tartalma ugyanabban a koncentráció tartományban volt, amelyből azt a következtetést vonták le, hogy mindkét régióban hasonló mértékű molibdén depozícióval kell számolni.

3.1.3.4. A molibdén előfordulása és szerepe a növényekben

A molibdén 1778-as felfedezését követően (Stiefel és Murray, 2002), megközelítően 150 évvel később, 1930-ban derült fény arra, hogy biológiai rendszerekben a molibdén esszenciális az *Azotobacter chroococcum* baktérium növekedéséhez és a légköri nitrogén megkötéséhez (Bortels, 1930). 1936-ban pedig Steinberg mutatta azt ki, hogy az *Aspergillus niger* gomba növekedéséhez molibdénre van szükség (Steinberg, 1936; Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). 1939-ben Arnon és Stout számoltak be elsőként arról, hogy a molibdén a magasabb rendű növények számára is esszenciális. Arnon vizsgálatai mutattak rá arra, hogy a molibdén kis mennyisége elősegítette a tápoldatos körülmények között nevelt árpa (*Hordeum vulgare* L.), a fejesaláta (*Lactuca sativa* L.) és a spárga (*Asparagus officinalis* L.) fejlődését (Arnon, 1937, 1938). A molibdénnel kapcsolatos fenti eredmények nagy előrelépést jelentettek a molibdén növényélettani szerepének a feltérképezésében.

Ezt követően számos kutató azt vizsgálta, hogy a molibdén esszenciálisnak tekinthető-e a magasabb rendű növények számára. Az adott növényi tápelem, azaz az adott kémiai elem akkor tekinthető esszenciálisnak, azaz nélkülözhetetlennek, ha: 1.) a növény normális növekedéséhez, fejlődéséhez, szaporodásához, továbbá a termésképzéshez nélkülözhetetlen, 2.) más elemmel nem helyettesíthető, 3.) az anyagcserére közvetlenül vagy közvetetten hat. Ha az előbbi három feltétel közül valamelyik nem teljesül, vagy esetleg egy másik tápelemmel helyettesíthető, vagy a kedvező hatását úgy éri el, hogy egy másik elemnek a kedvezőtlen hatását közömbösíti, akkor már csak kedvező hatású tápelemlről beszélhetünk. Az esszenciális és a kedvező hatású tápelemek közötti lényeges különbség, hogy csak az esszenciális elemeknek vannak hiánytüneteik, a kedvező hatású tápelemeknek nincsen (Arnon és Stout, 1939; Ördög és Molnár, 2011; Allaga és Bódis, 2014).

Arnon és Stout az 1939-ben megjelent cikkükben azt publikálták, hogy molibdén alkalmazása nélkül a teszt növények molibdén hiánytüneteket mutattak, és ezek a hiánytünetek csakis molibdén ($0,01 \text{ mg dm}^{-3}$) hozzáadásával voltak megszüntethetők. Ez azt jelentette, hogy a molibdént nem lehetett semmilyen más mikroelemmel sem helyettesíteni. Továbbá azt is megállapították, hogy bár az alkalmazott növények hiánytünetei megszüntetéséhez csak kisebb mennyiségű molibdénre volt szükség, viszont az ettől jóval nagyobb koncentráció alkalmazása sem okozott zavart a növények fejlődésében. Toxikus tüneteket csak az a molibdén koncentráció okozott, amely nagyobb volt mint 10 mg dm^{-3} .

2. táblázat: A különböző, élelmiszerfogyasztásra kerülő növényminták molibdén tartalma (Kabata-Pendias és Pendias, 2001)

Növényi minta	Koncentráció (mg kg^{-1})
Búza (szem)	0,2-2,4
Tavaszi árpa (szem)	0,17-1,2
Rozs (szem)	0,12-1,3
Zab (szem)	0,28-1,9
Borsó (mag)	1,2-1,8
Vetőbab (mag)	0,9-1,6
Sárgarépa (gyökér)	0,04
Hagyma (fej)	0,16-0,24
Burgonya (gumó)	0,1-0,25
Paradicsom (bogyó)	0,82
Alma (gyümölcs)	0,07

A molibdén az összes növény számára nélkülözhetetlen elem. A növények többsége azonban csak viszonylag kisebb mennyiségű molibdénre tart igényt a növényi szervezet zavartalan életműködéséhez. A gabonaféléken belül a gabona magvak molibdén tartalma nem mutat nagy változatosságot, sem azok faja, sem a szabadföldi termesztési körülmények nem befolyásolják jelentősen az értéküket, amely általában megközelítően $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (2. táblázat). Ezek között az egyik legalacsonyabb értéket a tavaszi árpa molibdén tartalma mutatta ($0,16 \text{ mg kg}^{-1}$), melyet Norvégiában termesztettek, az Oroszországból származóban viszont már $0,72 \text{ mg kg}^{-1}$ koncentráció értéket mutattak ki (Kabata-Pendias és Pendias, 2001). A 2. táblázatban bemutatott

gabonanövények azon részében, melyet élelmezésre szántak, azok között a búza képviselte a legmagasabb molibdén tartalmat, mely $2,4 \text{ mg kg}^{-1}$ volt.

A növényi szervezetek a többi mikroelemhez viszonyítva kevesebb molibdént igényelnek (Kabata-Pendias, 2011; Gupta, 2007b; Marschner, 2012) (3. táblázat).

Az egyes növényfajok molibdén tartalma azonban, mint ahogyan a 3. táblázat adatai alapján is látható, jelentős eltéréseket mutat. A pillangós növények molibdén tartalma általában jelentősen meghaladja a többi növény molibdén tartalmát (Szabó et al., 1987), melyek szárazanyagra vonatkoztatott átlagos molibdén tartalma megközelítően 4 mg kg^{-1} , a gabonaféléké pedig $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$, a fűféléké pedig $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$. Mivel a pillangós növények gyökerein lévő gümöbaktériumok feladata a nitrogén megkötése, ezért a pillangós virágú növények magasabb molibdén koncentrációt igényelnek. A nitrogén kötésében a nitrogenáz enzim játsza a legfontosabb szerepet. A nitrogenáz enzim két fehérjéből áll; az egyik vasat, valamint molibdént tartalmaz, míg a másik csak vasat. A *Rhizobiumok* viszonylag sok molibdént igényelnek. A borsó gyökérgümői például megközelítően tízszer több molibdént tartalmaznak, mint a föld feletti részei. Ezek alapján kijelenthető, hogy nem a magasabb rendű növények, hanem a vele szimbiózisban lévő gümöbaktériumokban található nagy mennyiségben a molibdén. Ahhoz, hogy a fenti baktériumok nitrogént kössenek meg, a molibdén nélkülözhetetlen (Burgess és Lowe, 1996; Williams és Frausto da Silva, 2002). Fontos azt is megemlíteni, hogy a növények számára szükséges molibdén mennyisége attól is függ, hogy a növény mely nitrogén felvételét végzi döntő módon. A növények nitrogén ellátását szolgáló nitrogén formája nagymértékben befolyásolja azt, hogy a növénynek mennyi molibdénre van szüksége. A legtöbb molibdénre akkor van szükség, ha a növények nitrogén ellátására főként a nitrát forma áll rendelkezésre (Agarwala és Hewitt, 1954; Marschner, 1995; Marschner, 2012). Mivel a molibdén a nitrát redukciójában játszik központi szerepet, ezért azok a növények igényelnek több molibdént, amelyek nitrogén-trágyázását nitrát formájában oldották meg (Gowariker et al., 2009; Kabata-Pendias, 2011).

3. táblázat: A különböző növényi levelek molibdén tartalma, szárazanyagra vonatkoztatva (mg kg^{-1}) (Hamlin, 2007)

Növény	Mo koncentráció (mg kg^{-1} sz. a.)	
	Hiány	Szükséglet
Cukorrépa (<i>Beta vulgaris</i> L.)	<0,16	0,2-20
Kukorica (<i>Zea mays</i> L.)	<0,12	1,4-7,0
Lucerna (<i>Medicago sativa</i> L.)	<0,4	0,5-5,0
Bab (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	<0,2	0,2-5,0
Káposzta (<i>Brassica oleracea</i> L.)	<0,3	0,3-3,0
Uborka (<i>Cucumis sativus</i> L.)	<0,2	0,2-2,0
Vöröshere (<i>Trifolium pratense</i> L.)	<0,15	0,3-1,59
Borsó (<i>Pisum sativum</i> L.)	-	0,4-1
Árpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	-	0,09-0,8
Napraforgó (<i>Helianthus annuus</i> L.)	-	0,25-0,75
Zab (<i>Avena sativa</i> L.)	-	0,2-0,3
Fejessaláta (<i>Lactuca sativa</i> L.)	<0,07	0,08-0,14

A fentieken túlmenően a növényekben található molibdén mennyisége a növény életkorától függően is változik. A nemzetközi szakirodalmak szerint a növények molibdén tartalma a növények korával fordítottan arányos, azaz minél fiatalabb a növény annál több molibdént tartalmaz, míg ugyanezen növény idősebb korában már kisebb molibdén koncentrációval rendelkezik (Anke és Seifert, 2007) (4. táblázat).

A növényekben megjelenő molibdén koncentrációt a talajtani viszonyok jelentősen meghatározzák. Györi és Tölgyesi (1968) arról számoltak be, hogy az a fehér here (*Trifolium repens*), amelyet tőzeges láptalajon termesztettek, átlagosan $18,2 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdén tartalommal rendelkezett, viszont az a fehér here, amelyet humuszos homoktalajon vagy homokon kialakult réti talajon termesztettek, már csak $0,08 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdént tartalmazott. Ugyanez a jelenség volt tapasztalható a molibdént nem akkumuláló növényeknél is; a közönséges galaj (*Gallium mollugo*) molibdén koncentrációja tőzeges láptalajon $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$, humuszos homoktalajon viszont már csak $0,14 \text{ mg kg}^{-1}$ volt. A talaj típusán kívül a talaj kémhatása, nedvességtartalma, szervesanyag-tartalma szintén hatással vannak a növények molibdén felvételére (Smith et al., 1997; Kaiser et al., 2005).

4. táblázat: A növények molibdén koncentrációjának alakulása a növény életkorának a függvényében (mg kg^{-1} sz. a.) (Anke és Seifert, 2007)

Növényfaj	április 30.	május 12.	május 26.	június 16.
Lucerna	0,624	0,520	0,279	0,177
Réti vörös here	1,149	0,416	0,520	0,377
Mezei vörös here	1,308	1,281	1,094	0,886
Réti csenkesz	0,485	0,614	0,692	0,282
Rozs	0,398	0,263	0,278	0,261
Búza	0,378	0,324	0,386	0,118

A különböző növényfajok növényi részei molibdén tartalma is jelentős eltéréseket mutat. Szabó et al. (1987) a kukorica molibdén tartalmát vizsgálta, mely mérések alapján a kukoricánövény megközelítőleg $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdént tartalmazott, míg a szemtermés molibdén tartalma ettől kisebb ($0,25 \text{ mg kg}^{-1}$), és a kukoricaszár pedig még ettől is kevesebb molibdént tartalmazott.

Anke és Seifert (2007) szerint a lucerna nagy mennyiségű molibdént raktározott a gyökérgümőkben, a szár és a levél molibdén tartalma viszont viszonylag csekély volt. A vöröshere és a svéd here szárának és levelének a molibdén koncentrációja azonban meghaladta a gyökérgümőkben mért értékeket ($4,6\text{-}22,7 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ sz. a.).

Ishizuka (1982) a szójabab molibdén abszorpcióját és transzlokációját tanulmányozta szántóföldi kísérletben. Vizsgálatai alapján a növények fejlődésének kezdeti szakaszában a molibdén tartalom valamennyi növényi részben egyaránt nőtt, a gyökérgümőkben volt azonban a legmagasabb. A gyökérgümők megfelelő működéséhez szükséges molibdén eleinte főként a magokból, és csak kisebb része a talajból származott. Sőt a magok molibdén tartalma először a hajtásba és a gyökérbe transzlokálódott, majd onnan a gyökérgümőkbe. A hüvelyképződés fenofázisában azonban a gyökerek és a szójabab hajtások molibdén koncentrációja folyamatosan

csökkent június közepéig, majd aztán gyors növekedésnek indult július közepéig, majd ismét csökkent. Azt is kimutatta, hogy a szójabab gyökér és hüvely molibdén tartalmának csökkenésével párhuzamosan a borsómag molibdén koncentrációja folyamatosan növekedett ami arra enged következtetni, hogy a molibdén egy része transzlokálódott az említett szervekből a magtermésbe. Molibdén hiányos állapotban a hüvelyeseknél a gyökérgümő képződése gyakran elmaradhat, és ennek eredményeként a gyökérben mérhető molibdén koncentrációja rendkívül alacsony (Anke és Seifert, 2007).

A növények gyökerei a molibdént molibdenát anion (MoO_4^{2-}) formájában veszik fel, mely metabolikusan kontrollált folyamat (Mengel et al., 2001). A növényen belül a molibdén két szállítószövetben transzlokálódik, a floémában (háncsrészben) és a xilémában (farészben) (Kannan és Ramani, 1978). Azt, hogy a molibdén milyen speciesze transzlokálódik, a mai napig sem ismerjük. A legtöbb feltételezés szerint azonban nem a molibdén valamilyen komplex vegyületének, hanem a szabad MoO_4^{2-} ionnak a szállítása történik. A növényben megjelenő különböző molibdén specieszek aránya természetesen függ a felvett és a szövetekben akkumulálódott molibdén mennyiségétől is (Marschner, 1995; Marschner, 2012). A molibdén vízi növényeken belüli transzlokációja mérsékelt, amely valószínűleg annak tudható be, hogy a molibdén a kéntartalmú aminosavakkal Mo-S komplexeket alakít ki. Mivel a molibdenát (MoO_4^{2-}) és a szulfát (SO_4^{2-}) kémiaiilag nagymérvű hasonlóságot mutat, ez azt eredményezi, hogy a kén vegyületek gátolják a molibdén biológiai beépülését a növénybe (Marino et al., 2003; Anbar, 2004).

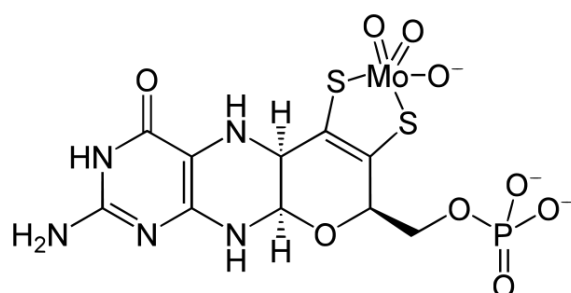
A molibdén növényen belüli eloszlása a növényfajoktól függően különböző, a molibdén legnagyobb koncentrációja azonban általában a magokban és a nitrogénkötő növények gyökérgümőiben a legmagasabb (Gupta és Lipsett, 1981; Marschner, 1995; Marschner, 2012). Abban az esetben, ha limitált mennyiségű molibdén áll rendelkezésre a nitrogénkötő növények számára, akkor a gyökérgümők molibdén felvétele a preferált, ezáltal az egyéb növényi részben, mint például a hajtásokban vagy a magvakban, alacsonyabb molibdén tartalom fog kialakulni (Ishizuka, 1982). Hristozkova et al. (2005) megállapították, hogy molibdént nem tartalmazó, tápoldaton nevelt zöldborsók több gyökérgümővel rendelkeztek, azonban ezek nyers tömege kevesebb volt, mint a molibdén kiegészítést kapott növényeké.

A biológiai rendszerekben a molibdén önmagában nem képes katalitikusan aktív lenni, csak ha komplex kötést létesít egy speciális kofaktorról. A bakteriális nitrogénáz enzim kivételével a molibdén pterinhez van kötve (molibdopterin), amely egy sor enzim kofaktora (Moco). Az összes ilyen enzim redox reakciókat katalizál, mely a molibdén oxidációs állapotának változásával van kapcsolatban. A prokariótáknál és az eukariótáknál ezidáig 60 féle molibdént tartalmazó enzimet írtak le részletesen (Hille, 1996; Mendel, 2013; Zimmer és Mendel, 1999).

A molibdén növényélettani jelentősége főként abban rejlik, hogy a nitrogén-anyagcserében részt vevő enzimek fontos alkotórésze. Egyrészt a nitrogénáz enzim fémkomponenseként hatékonyan részt vesz a légköri nitrogén megkötésében, másrészt a nitrát-reduktáz alkotóelemeként kulcsszerepe van a nitrát redukcióban, ugyanis a nitrát-reduktáz aktivitásához a

molibdén jelenléte nélkülözhetetlen. Molibdén hiányában a nitrát redukció folyamata lelassul, és ez a nitrát felhalmozódását eredményezi (Robb és Pierpont, 1983; Yaneva et al., 1996; Anke és Seifert, 2007). A molibdén jelentősége megkérdőjelezhetetlen a fentieken túlmenően a xantin-dehidrogenázban, mely a purin anyagcserében játszik fontos szerepet, az aldehid-oxidázban, amely az indolecetsav és az abszcizinsav bioszintézisének utolsó lépésében vesz részt, illetve a szulfit-oxidázban, amely enzim a kéntartalmú aminosavak metabolizmusában a szulfitot szulfáttá oxidálja (Hille, 1996; Mendel, 2011; Mendel és Bittner, 2006; Mendel és Hänsch, 2002; Mendel és Kruse, 2012; Schwarz et al., 2009; Williams és Frausto da Silva, 2002; Zdunek-Zastocka és Lips, 2003; Zimmer és Mendel, 1999). A fentieken túlmenően Ivchenko (1988) kiemelte még a molibdén gátló és szabályozó funkcióját a dezoxiribonukleinsav (DNS) és a ribonukleinsav (RNS) aktivitásában (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007).

A fenti enzimekben a molibdén (a nitrogenáz enzim kivételével) egy komplex vegyületként, molibdén kofaktorként (Moco, molibdopterin) van jelen (Hille et al., 2017; Mendel, 2005; Mendel és Kruse, 2012; Campbell, 1999; Pelsy és Caboche, 1992; Rajagopalan és Johnson, 1992). A molibdén kofaktor egy olyan heterociklusos vegyület, amelyben a pterin vázhoz a molibdén oldalláncon keresztül kapcsolódik, valamint a pterin vázhoz egy terminális foszfátészter is kapcsolódik. A molibdén kofaktorban a Mo kénatomokon keresztül kötődik a heterociklusos gyűrűhöz, ahogyan azt a 4. ábra is mutatja.



4. ábra: A molibdén kofaktor (Campbell, 1999)

A molibdén a különböző enzimek redoxi reakcióiban vesz részt, amely során az oxidációs száma +4 és +6 között változik (Kisker et al., 1997; Bittner, 2014).

3.1.3.4.1. Molibdén hiánytünetek megjelenése a növényekben

Marschner (1995) szerint a tápelemek közül csak a nikkelt az az elem, amelyből kevesebb szükséges a növények zavartalan működéséhez, mint amennyi a molibdénből szükséges, viszont más kutatóknak (Gupta, 2007b; Marschner, 2012) az a véleménye, hogy a molibdén az a tápelem, amelyből a legkisebb mennyiségre van szüksége a növénynek. A növények különböző mennyiségű molibdént képesek felvenni és beépíteni a szervezetükbe a gyökérrendszerükön keresztül, valamint a növények számára a molibdén elegendő mennyisége is viszonylag széles skálán mozog (5. táblázat). A legtöbb növény molibdén tartalmának az elegendő szintje hozzávetőleg a 0,2-2,0 mg kg⁻¹ tartományban található (szárazanyagra vonatkoztatva). Meg kell jegyezni azonban, hogy a kritikus hiány- és toxicitási-szintek közötti különbség akár négy nagyságrend is lehet

(szárazanyagra számolva, megközelítően 0,1 és 1000 mg kg⁻¹) (Marschner, 1995; Barker és Pilbeam, 2007).

5. táblázat: A vizsgált növények molibdén koncentrációi, melyek hiánytünetet, vagy a növények megfelelő fejlődését segítették elő

Növény típusa	Növényi rész	Mo-koncentráció (mg kg ⁻¹ sz.a.)		
		Hiánytünet	Megfelelő	Hivatkozás
Szántóföldi növények:				
Lucerna (<i>Medicago sativa</i> L.)	A teljes föld feletti rész, virágzást megelőzően	<0,4	0,5-5,0	Jones Jr., 1967; Barker és Pilbeam, 2007
Árpa (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Bokrosodáskor, a föld feletti rész		0,09-0,18	Gupta, 1971
Repce (<i>Brassica napus</i> L.)	Kifejlett levelek, a levélgyekek nélkül		0,25-0,60	Barker és Pilbeam, 2007
Kukorica (<i>Zea mays</i> L.)	Szár	<0,12	1,4-7,0	Barker és Pilbeam, 2007
	A csővel szemközti levelek, bajuszképződéskor	<1,1		Barker és Pilbeam, 2007
Gyapot (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	Teljesen kifejlett levelek, virágzás után		0,6-2,0	Barker és Pilbeam, 2007
Zab (<i>Avena sativa</i> L.)	A teljes föld feletti rész		0,2-0,3	Barker és Pilbeam, 2007
Szójabab [<i>Glycine max</i> (L.) Merr.]	Teljes növény	<0,2		Barker és Pilbeam, 2007
	A virágzás végén, a felső teljesen kifejlett levelek		0,5-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Réti here (<i>Trifolium pratense</i> L.)	A teljes föld feletti rész, virágzáskor	<0,15	0,3-1,59	Gupta et al., 1990; Barker és Pilbeam, 2007
	A teljes föld feletti rész, virágzást megelőzően		0,46-1,08	Gupta et al., 1978; Gupta, 1970
Földimogyoró (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	A felső teljesen kifejlett levelek	<1	0,5-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Rizs (<i>Oryza sativa</i> L.)	Virágzást megelőzően, a felső teljesen kifejlett levelek		0,4-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Cukorrépa (<i>Beta vulgaris</i> L. ssp. <i>vulgaris</i>)	Levéllemezek	<0,16	0,2-20,0	Barker és Pilbeam, 2007
	Teljesen kifejlett levelek, szár nélkül	<0,15	0,2-20,0	Barker és Pilbeam, 2007
Napraforgó (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,25-0,75	Barker és Pilbeam, 2007
Dohány (<i>Nicotiana tabacum</i> L.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,1-0,6	Barker és Pilbeam, 2007
Búza (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Bokrosodáskor, a föld feletti rész	<0,05	0,09-0,18	Snowball és Robson, 1991; Gupta, 1971
Zöldségek:				
Bab (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Virágzáskori teljesen szétnyílt legfiatalabb levelek	<0,2	0,2-5,0	Barker és Pilbeam, 2007
Répa (<i>Beta vulgaris</i> L.)	A 8 hetes növény felső része	<0,06		Johnson et al., 1952
	Fiatal kifejlett levelek		0,15-0,6	Barker és Pilbeam, 2007

5. táblázat folyt.				
Brokkoli (<i>Brassica oleracea</i> L. convar. <i>botrytis</i>)	A 8 hetes növény felső része	<0,05		Johnson et al., 1952
	Új hajtás kifejlett levelei		0,30-0,50	Barker és Pilbeam, 2007
Káposzta (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata</i>)	Külső levelek	<0,3	0,3-3,0	Barker és Pilbeam, 2007
Sárgarépa (<i>Daucus carota</i> L.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,5-1,5	Barker és Pilbeam, 2007
Karfiol (<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>botrytis</i> var. <i>botrytis</i>)	Fiatal levelek, melyek az ostornyél (whiptail) betegséget mutatják	0,04	0,07	Gupta et al., 1990; Barker és Pilbeam, 2007
	A karfiolfej föld feletti része	<0,26	0,68-1,49	Chipman et al., 1970
Uborka (<i>Cucumis sativus</i> L.)	A legfiatalabb teljesen kifejlett levelek	<0,2	0,2-2,0	Barker és Pilbeam, 2007
Burgonya (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	Levéllemez	<0,16		Barker és Pilbeam, 2007
	Teljesen kifejlett levelek, korán érő		0,2-0,5	Barker és Pilbeam, 2007
Borsó (<i>Pisum sativum</i> L.)	A virágzás kezdetén lévő, fiatal, teljesen kifejlődött levelek		0,4-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Saláta (<i>Lactuca sativa</i> L.)	Levelek	<0,07	0,08-0,14	Gupta et al., 1978, Plant, 1951
Vöröshagyma (<i>Allium cepa</i> L.)	Érett, föld feletti rész	<0,06	>0,1	Gupta et al., 1990
Gyümölcsök:				
Alma (<i>Malus sylvestris</i> Mill.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,10-2,00	Barker és Pilbeam, 2007
Avokádó (<i>Persea americana</i> Mill.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,05-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Narancs (<i>Citrus sinensis</i> L.)	Nem termő hajtás kifejlett levelei		0,1-0,9	Barker és Pilbeam, 2007
Körte (<i>Pyrus communis</i> L.)	Új hajtás középső kifejlett levelei		0,10-2,0	Barker és Pilbeam, 2007
Őszibarack (<i>Prunus persica</i> L. Batsch.)	Hajtás középső levelei		1,6-2,8	Barker és Pilbeam, 2007
Szamóca (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,25-0,50	Barker és Pilbeam, 2007
Dísznövények:				
Nebáncsvirág (<i>Impatiens</i> x hybrids)	Új hajtás kifejlett levelei		0,15-1,0	Barker és Pilbeam, 2007
Mikulásvirág (<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd.)	Új hajtás kifejlett levelei	<0,5	0,12-0,5	Cox, 1992; Barker és Pilbeam, 2007
Tearózsa (<i>Rosax</i> cultivars)	Kifejlett felső levelek		0,1-0,9	Barker és Pilbeam, 2007
Paprikavirág (<i>Salvia splendens</i>)	Új hajtás kifejlett levelei		0,2-1,08	Barker és Pilbeam, 2007
Oroszlánszáj (<i>Antirrhinum majus</i> L.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,12-2,0	Barker és Pilbeam, 2007

5. táblázat folyt.				
Verbéna (<i>Verbena x</i> hybrids)	Új hajtás kifejlett levelei		0,14-0,8	Barker és Pilbeam, 2007
Fák és cserjék:				
Lila orgona (<i>Syringa</i> <i>vulgaris</i> L.)	Új hajtás kifejlett levelei		0,12-4,0	Barker és Pilbeam, 2007
Duglász fenyő (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Fenyőtűk		0,02-0,25	Barker és Pilbeam, 2007
Tűnyalábos fenyő (<i>Pinus taeda</i> L.)	Fenyőtűk		0,12-0,56	Barker és Pilbeam, 2007

Molibdén hiányt először Anderson 1946-ban Adelaide környékén a hüvelyes növényeknél (lóhere, *Trifolium subterraneum*), és később a szójababoknál (*Glycine max*) mutatott ki. A molibdén hiány általában savas talajokban jelentkezik, ahol a molibdén kevésbé hozzáférhető a növények számára. Néha gyengén savanyú vagy semleges kémhatású talajokon is előfordulhat a molibdén hiánya abban az esetben, ha már a talaj eredeti molibdén tartalma is rendkívül alacsony. Mivel meszezéssel a felvehető molibdén mennyisége megnövelhető (Mertz, 1986), így már a meszezés alkalmazása is termésnövekedést eredményez, ha viszont a mész mellett molibdént is adagolunk a talajba, akkor még nagyobb hatás érhető el. Meg kell jegyezni, hogy a mezőgazdasági talajok fenti helyzetéhez képest hasonló állapotok (molibdén ellátottság) jellemzik az erdők talajait is, és az azokban megjelenő molibdén ellátottság javítását is a fentiekben részletezett módon lehet kivitelezni (Mengel és Kirkby, 1987; Stiefel és Murray, 2002; Gupta és Lipsett, 1981; Barker és Pilbeam, 2007).

A mikrotápanyagok hiánya általában a növények fiatal levelein szokott megjelenni (pl. Fe, Zn). Mivel a molibdén legnagyobb része a xilemben és a floémában található, valamint a molibdén viszonylag könnyen transzlokálódik a növényen belül, ezért a fenti szabály alól kivételt képez a molibdén hiányának a megjelenése, mely nem a növények fiatal levelein, hanem a teljes növényen jelenik meg. A molibdén hiányának a tünetei a nitrogén metabolizmusával kapcsolatosak, amelynek az az oka, hogy molibdén hiányában a nitrát-reduktáz aktivitása lecsökken, ezáltal a nitrogén beépülése a fehérjékbe elmarad, vagy csak kisebb mértékű (Hamlin, 2007; Gupta, 2007c). A hiánybetegségben szenvedő növények növekedése lassul, a levelek fakó színűekké válnak, és a virágzás is zavart szenved (Martin et al., 1995; Agarwala et al., 1978). A molibdén hiány jellemző tünetegyüttese a szürkészöld vagy sárgás levélszín, a levélerek közötti klorózis, a klorotikus elváltozások a levélszélektől indulnak ki, a klorotikus szövetekben barnás nekrotikus képződhetnek (Bambara és Ndakidemi, 2010; Zajun et al., 2005). A pillangósok molibdén hiánya is ezekben a tünetekben nyilvánul meg, hiszen e mikroelem hiánya megakadályozza a növények gyökereiben lévő gümöbaktériumok nitrogén megkötését.

Nem megfelelő molibdén ellátottság esetén, a fentiekben túlmenően, csökken a cukor- és klorofill tartalom, továbbá a fotoszintézis intenzitása, valamint az aszkorbinsav bioszintézise is gátolt lesz, így pl. a növényi levelek C-vitamin tartalma az átlagos érték negyedére is lecsökkenhet. A molibdén hiányos növények levélszöveiben a nitrát akkumulálódik, és a növény

fehérjetartalma csökken. A kétszikű növények érzékenyebbek a molibdén-hiányra mint az egyszikűek (Gowariker et al., 2009; Wang et al., 1999; Loch és Nosticzius, 1992, 2004).

A keresztesvirágú és a hüvelyes növények molibdén igénye viszonylag magas. Ezek a növények gyakran olyan molibdén hiányos talajokon, amelyeken a gabonafélék a molibdén hiányhoz társítható rendellenességek megjelenése nélkül termesztethők, ott a 6. táblázatban feltüntetett keresztesvirágú és hüvelyes növények viszont jelentős mértékű molibdén hiányos tüneteket mutatnak (Katyal és Randhawa, 1983).

6. táblázat: A különböző növények molibdén érzékenységeinek kategóriái
(Katyal és Randhawa, 1983)

alacsony	közepes	magas
árpa	lucerna	karfiol
bab	fejes káposzta	lóhere
sárgarépa	zab	saláta
zeller	borsó	spenót
kukorica	szójabab	
pamut	reték	
burgonya	cukorrépa	
cirok	cékla	
rizs	paradicsom	
búza	fehértépa	
almafélék	citrus-félék	
őszibarack		
szőlő		

A kétszikűeknél a következő hiánytünetek jelentkezhetnek molibdén-hiány esetén: levéltorzulások, fodrozott levéllemezek, klorotikus elváltozások, nekrotikus foltok, tenyészkép elhalása (Gupta és Lipsett, 1981). Egyes növények érzékenyebbek a molibdén hiányra, ezért indikátornövényként is használhatók. Ilyen indikátornövény pl. a borsó, a karfiol, a káposzta, a paradicsom, a saláta és a spenót (Katyal és Randhawa, 1983; Duval et al., 1991). A karfiolnál a levéllemez a molibdén hiány fokozódásával egyre jobban elkeskenyedik, szélsőséges esetben pedig ostornyélhez válik hasonlónak. Ezek a „whiptail” nevű hiánybetegség (ostorfarkúság) tünetei. A kór másik elnevezése a fonallelűség, mert a hiányt mutató növényeknél a levéllemez felülete nagymértékben csökken, és az idősebb leveleken a főér mentén csak kisebb szakadozott levéllemez-maradványok találhatóak (Szabó et al., 1987).

3.1.3.4.2. A megfelelő mennyiségű molibdén kedvező hatása a növények fejlődésére

A molibdén az a tápelem, amelyből a legkisebb, vagy a nikkelt után következően a legkisebb mennyiség szükséges a növények zavartalan működéséhez (Marschner, 1995; Gupta, 2007b; Marschner, 2012). Viszont számos kutatás igazolja, hogyha a növények igényén túlmenően nagyobb mennyiségű molibdent alkalmazunk, az kedvezően hat mind a növények fejlődésére, mind azok terméshozamára.

A borsónál 5-6 leveles állapotban, valamint a virágzás kezdetén adagolt molibdén növelte a virágok és a hüvelyek számát, valamint a termés hozamot, továbbá a zöldborsó összfehérje tartalmát (Kotecki, 1991).

Gungula és Garjila (2006) homoki bab termesztésénél különböző molibdén dóziseket (0-0,39 kg ha⁻¹) alkalmazták, és azt vizsgálták, hogy a különböző molibdén dózis hogyan befolyásolja a homoki bab termés hozamát. Azt tapasztalták, hogy a termés hozam a kontroll kezelésben volt a legalacsonyabb (1069 kg ha⁻¹), míg a 0,26 kg ha⁻¹ dózisonál 1280 kg ha⁻¹, 0,39 kg ha⁻¹ dózisonál pedig 1250 kg ha⁻¹ termésmennyiségeket takarítottak be.

Shil et al. (2007) karbonátos és nem karbonátos öntéstalajon határozták meg azt a molibdén dózist, amely a maximális termés hozam elérését biztosítja a csicseriborsó termesztésénél. A vizsgálataik alapján a legnagyobb termésmennyiséget az 1,5 kg ha⁻¹ molibdén dózis alkalmazásával érték el, mely a kontrollhoz képest megközelítően 15-16%-os termésnövekedést eredményezett. Valenciano et al. (2011a) szántóföldi kísérletben szintén csicseriborsó molibdén ellátását vizsgálva kimutatták, hogy a termés hozam növelésében fontos szerepe van a molibdén koncentrációjának. Eredményeik alapján megállapították, hogyha a csicseriborsó termesztéséhez 241 g ha⁻¹ molibdén dózist alkalmaznak, akkor a borsóhüvely száraz tömegében több mint 26%-os, a növények száraz tömegében közel 20%-os, míg a termésmennyiségben megközelítően 25%-os növekedést érnek el. Vizsgálataik alapján azt is megállapították, hogy a molibdén termésmenővelő hatása eredményesebb volt, amennyiben a molibdént lombtrágyaként alkalmazták (Valenciano et al., 2011b).

A napraforgó minőségét és termés hozamát vizsgálták szántóföldi kísérletben, mely során a molibdén napraforgónövények hozamára kifejtett hatását tanulmányozva Škarpa et al. (2013) megállapították, hogy a lombtrágyaként alkalmazott 125 g ha⁻¹ molibdén a napraforgó biomassza tömegében szignifikáns növekedést eredményezett. Azt is kimutatták, hogy az alkalmazott molibdén nem szignifikánsan ugyan, de kis mértékben a napraforgó olajhozamát is növelte (a kontrollhoz viszonyítva).

Karpagam és Rajesh (2014) szintén szántóföldi kísérletben (homokos agyagtalajon) vizsgálták a molibdén kezelések hatását, a mungóbab fejlődésére és hozamára. A molibdént nátrium-molibdenát formájában adagolták, mely során 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 és 1 kg ha⁻¹ molibdén mennyiséget alkalmaztak. Vizsgálataik alapján az 1 kg ha⁻¹ molibdén dózis bizonyult a legmegfelelőbbnek mind a növény fejlődése, mind a termés hozam szempontjából. Ennél a kezelésnél ugyanis megközelítően kétszeres gyökér hossz, a termésben közel háromszoros száraz tömeg, a hajtás száraz tömegében pedig közel kétszeres növekedést mutattak ki (a kontroll növényekhez viszonyítva).

3.1.3.4.3. Molibdén toxicitás megjelenése a növényekben

A különböző növények sokkal látványosabban és érzékenyebben reagálnak a molibdén hiány jelenségére, mint ahogyan a molibdén toxicitást okozó nagy molibdén koncentrációk hatása jelenik meg. Sok esetben a nagy mésztartalmú, lúgos kémhatású talajokon, valamint az ártéri

területeken a molibdén olyan nagy koncentrációban képes akkumulálódni, hogy toxikus hatást okozhasson, de ez is csak igen nagy koncentrációnál jelentkezik (Marschner, 1995; Anke és Seifert, 2007).

A növényekben lejátszódó nitrogén metabolizmushoz általában elegendő szokott lenni a 0,1-0,5 mg kg⁻¹ molibdén tartalom, a növények elemzése során viszont számos esetben találkozunk 10-50 mg kg⁻¹-os molibdén koncentrációval is, amely már több növényfaj termesztésénél is toxikus tüneteket idéz elő. Számos hüvelyes és keresztesvirágú növény igényel viszonylag sok molibdént. A molibdén toxicitás legszembetűnőbb tünete a levelek aransárgától narancssárgáig terjedő kloróza (Gupta, 2007b). A molibdén toxicitás további tüneteire tartozik még, amikor az ízközők gátolt megnyúlása, a hónaljrygök kinövése, az idősebb levelek elpozsgásodása, valamint a növényi szárak megvastagodása következik be (Anke és Seifert, 2007). A túlzottan nagy molibdén koncentrációnak tulajdonítható további toxicitási tünetnek tekinthető Kevresan et al. (2001) megállapításai alapján, hogy a zöldborsó gyökerének és hajtásának fejlődése is visszamaradott volt.

A molibdén akkumulációja szempontjából a különböző típusú (egyszikű és kétszikű) növények jelentős eltéréseket mutatnak. Ezt a tényt támasztják alá Nayyar et al. (1977) vizsgálatai, miszerint a káposztafélék (*Brassica*) akkumulálták a legnagyobb mennyiségű molibdént (538 mg kg⁻¹), és még a homoki bab (*Vigna unguiculata* L.) is 410 mg kg⁻¹ koncentrációjú molibdént akkumulált, viszont a kukoricában (*Zea mays* L.) és a seprőcirokban (*Sorghum vulgare Pers.*), gyengén akkumuláló növényben, már csak 54,9 és 69,1 mg kg⁻¹ molibdén koncentrációt mértek. Gupta et al. (1978) vizsgálatai alapján a káposztánál (*Brassica oleracea var. botrytis* L.) és a hagymánál (*Allium cepa* L.) még akkor sem jelentkezett fitotoxikus hatás, amikor a levelekben mérhető molibdén koncentráció meghaladta az 500 mg kg⁻¹ értéket. Viszont Davis et al. (1978) kutatási eredményei alapján amint az árpa (*Hordeum vulgare* L.) levélszövetének molibdén tartalma meghaladta a 135 mg kg⁻¹ értéket, már toxikus tüneteket eredményezett.

Az adott növényfajon túlmenően a növények aktuális molibdén tartalma attól függ, hogy a talajban mennyi a növény számára hozzáférhető, azaz a talaj mobilis molibdén tartalma. Az egyes növényfajok, különösen a hüvelyes növények, igen nagy mennyiségű molibdént képesek akkumulálni a szervezetükben, amely elérheti akár a 350 mg kg⁻¹ értéket is, különösebb toxikus tünet nélkül. Hornick és munkatársai még 1061 mg kg⁻¹ molibdén koncentrációt is mértek káposztában (Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Szteke, 2015). Számos növényfaj levele nagyobb molibdén tartalommal rendelkezik, mint azok szára. Ilyen például a paradicsom, a lucerna és a szója is (Gupta és Lipsett, 1981).

A növények viszonylag nagy molibdén koncentrációja esetén is csak ritkán tapasztalunk fitotoxikus tüneteket, a növényekben kialakuló magas molibdén koncentráció viszont jelentős veszélyt hordoz magában, mivel az állatok táplálásánál, főként a kérődzők esetén, a nagy molibdén koncentráció molibdenózist okozhat. A betegség kialakulásának kockázata már akár 5 mg kg⁻¹

molibdén tartalom (sz.a.) felett is kialakulhat, amelyről nem feledkezhetünk meg az állatok takarmányozásakor (Gupta és Lipsett, 1981; Anke et al., 2010).

3.1.3.4.4. A molibdén hatása a növények makroelem felvételére

Számos hazai és nemzetközi publikáció számolt be arról, hogy a molibdén kezelés bizonyos elemekre szinergista (felvételüket elősegítő), más elemekre viszont antagonistá (felvételüket gátló) hatással rendelkezik. Ezen makroelemek között kell megemlíteni elsősorban a nitrogént, a foszfort és a kén.

Mivel a növények nitrogén anyagcseréjében a molibdén a jelentős szereppel bíró enzimek központi eleme, így a molibdén a nitrogén felvételét természetesen elősegíti (Anke, 2004; Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; Mortvedt, 2007; Barker és Pilbeam, 2007). Vieira et al. (1998), valamint Barker és Pilbeam (2007) arról számoltak be, hogy 40 g ha^{-1} molibdén kijuttatása bab (*Phaseolus vulgaris* L.) felületére, levéltrágya formájában, 10%-kal növelte meg a szemtermés összes nitrogén tartalmát. Steiner és Zoz (2015) 78 g ha^{-1} molibdent alkalmazott szintén levéltrágyaként, amely dózis 142%-os növekedést eredményezett a napraforgó levelének összes N tartalmában (a kontrollhoz viszonyítva). Škarpa et al. (2013) publikációja alapján, a lombtrágyaként alkalmazott 125 g ha^{-1} molibdén kijuttatása a nitrogén tartalom szignifikáns növekedését idézte elő a napraforgó összes növényi részében. A fenti eseteken túlmenően Yu et al. (2010) őszi búzánál, Bagheri and Jafari (2012) pedig árpa esetén számolt be a molibdén és a nitrogén tartalmak közötti pozitív korrelációs kapcsolatról.

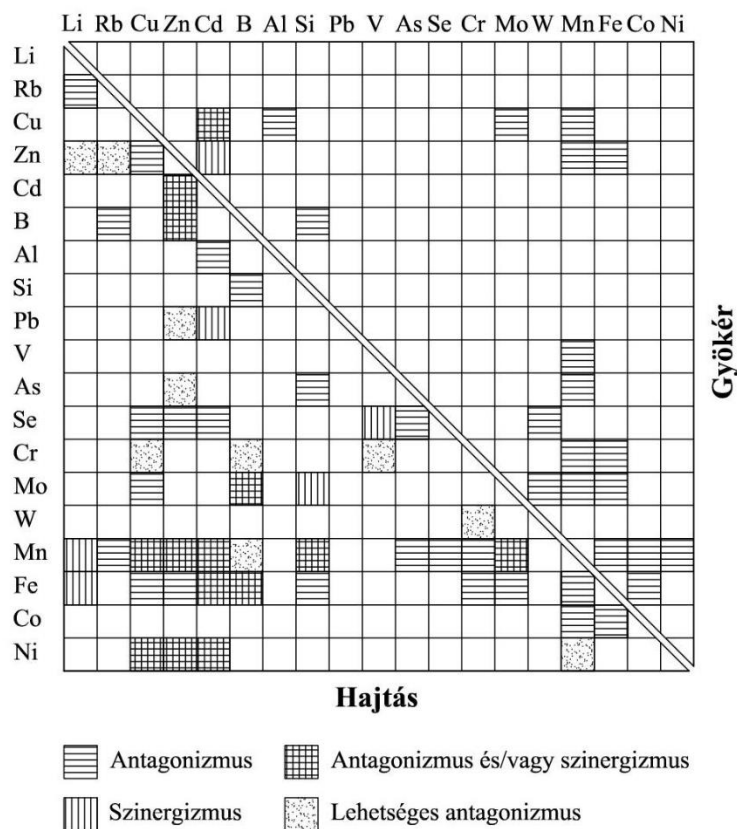
A molibdén foszforral kapcsolatos kölcsönhatásának vizsgálatáról egymásnak ellentmondó eredményeket találhatunk. Liu et al. (2010) azt állapították meg, hogy a tápoldatos kísérletükben alkalmazott molibdén (0; 0,01; 0,1 és 1 mg dm^{-3}) növelte a foszfor koncentrációját a repce (*Brassica napus*) gyökerében és hajtásában is. Zakikhani et al. (2014a) szintén tápoldatos kísérletben azt tapasztalták, hogy a növekvő molibdén kezelések (0; 0,01; 0,1 és 1 mg dm^{-3}) hatására a foszfor koncentráció szignifikánsan növekedett a rizs (*Oryza sativa*) hajtásában, míg a gyökere foszfor koncentrációjára már nem volt szignifikáns hatással. Basak et al. (1982) üvegházban végzett molibdén adagolási (0; 2,5 és $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$) kísérletükben kapott kutatási eredményei is az előbbi tényt támasztják alá, miszerint csak a rizs hajtásában növekedett meg a foszforfelvétel, míg a gyökerében a molibdén kezelés és a foszfor tartalom között nem lehetett szignifikáns kapcsolatot kimutatni. A fentiekkel ellentétben számos kutató számolt be olyan vizsgálati eredményről, hogy a molibdén kezelés alkalmazásával csökken a foszfor felvétele. Kumar és Singh (1980) tapasztaltak olyan kutatási eredményeket üvegházi kísérletek során, hogy szója vizsgálata során a molibdén alkalmazása szignifikánsan csökkentette a szár, a levél, a hüvely és a mag foszfortartalmát. A foszfor tartalom csökkenését azzal magyarázták, hogy mind a molibdenát-ion mind a foszfát-ion anionként adszorbeálódik, így mind a két ion ugyanazokért a szabad adszorpciós helyekért versenyez. Chatterjee et al. (1985) mustár vizsgálatával, Heuwinkel et al. (1992) paradicsom alkalmazásával kapcsolatos kutatási eredményei is a molibdén és a foszfor közötti antagonistá kapcsolatot támasztják alá. A fentiekben tárgyalt, a molibdén kezelések

hatására bekövetkező, foszfor felvételre gyakorolt szinergista és antagonista hatások mellett, Greenwood és Hallsworth (1960) a lóherénél (*Trifolium subterraneum* L.), Singh és Jain (1968) pedig a homoki babnál (*Vigna unguiculate* L.) sem tapasztaltak semmilyen pozitív vagy negatív hatást.

Számos kutató vizsgálta és igazolta, hogy a molibdén és a kén között antagonista kapcsolatot találhatók (Gupta és MacLeod, 1975; Gupta és Mehla, 1980). Pasricha és Randhawa (1972) kutatási eredményei is ezt támasztják alá, mely során a molibdén kezelés hatására az indiaimustár (*Brassica juncea* L.) vegetatív szerveiben a kén koncentrációja csökkent. Néhány kutató viszont nem támogatja a fentiekben részletezett antagonista kapcsolatot. Hunashikatti et al. (2000) káposzta esetén például azt tapasztalták, hogy az 1 kg ha⁻¹ molibdén megközelítőleg 25%-kal növeli a kén akkumulációját a levél- és szárrészben, valamint 20%-kal a káposztafejben, a legnagyobb kezelés (2 kg ha⁻¹) esetén viszont a káposzta összes részében csökkenést állapítottak meg (30-35%-os). Rabbi et al. (2011) és Rabbi (2007) arról számoltak be, hogy a szántóföldi borsókísérletben alkalmazott 0,4 és 0,8 kg ha⁻¹ molibdén kezelés szignifikánsan megnövelte a növényminták kéntartalmát (a kontroll növényhez viszonyítva).

3.1.3.4.5. A molibdén hatása a növények mikroelem felvételére

A molibdén természetesen nem csak a makroelemek, hanem számos mikroelem felvételére is hatással van. A molibdén leginkább említésre méltó mikroelemekkel kapcsolatos szinergista és antagonista kapcsolatait mutatja be az 5. ábra.



5. ábra: A molibdén és a mikroelemek között lévő legfontosabb szinergista és antagonista kapcsolatok (Kabata-Pendias, 2011)

A növényi szövetekben és gyökerekben, a molibdén és más mikroelemek között számos komplex kölcsönhatást figyelhetünk meg (5. ábra). Az ábrából kitűnik, hogy a molibdén a következő mikroelemek felvételét befolyásolja: B, Cu, Fe, Mn, Si és a W. A molibdén és az előbbi elemek között, kivéve a bórt és a szilíciumot, antagonizmus áll fenn, amely a növény gyökerének és hajtásának elemtartalmában is megmutatkozik. A molibdén legfontosabb kölcsönhatása a mikroelemek közül a rézzel van. A Mo-Cu antagonizmus a növényekben szoros kapcsolatban van a nitrogén-anyagcserével (Kabata-Pendias, 2011). Gartrell (1981) részletesen áttekintette azokat a talajparamétereket, melyek hozzájárulnak ahhoz, hogy a talajban a növény számára hozzáférhető molibdén koncentráció megnövekedjen, amely pedig elősegíti egyrészt a nagyobb molibdén felvétel kialakulását, másrészt ezek a molibdén számára kedvező paraméterek általában gátolják a növények réz felvételét. Gartrell (1981) szerint azokon a legelőkön, amelyeken a takarmány termesztése folyik, ott az állatok egészségére káros Cu-Mo arány megfelelő értékének elérését a növények szulfát koncentrációjával szabályozhatjuk. A magas szulfát (SO_4^{2-}) koncentráció alkalmazásával még akkor is csökkenthető a réz abszorpció, ha a molibdén tartalom túl kicsi.

Az 5. ábra alapján, a molibdén és a mangán között egyértelmű antagonista kapcsolatot csak a gyökérben állapítottak meg, a hajtásban viszont a molibdén és a mangán között szinergista és antagonista kapcsolat is fennállhat. Mivel a talaj savasságából származó Mo-Mn antagonizmus hatással van ezen elemek (Mo és Mn) növény számára hozzáférhető koncentrációjának kialakulására, ezért a meszezés korrigálhatja mind a molibdén hiányt, mind a mangán toxicitást. A Mo-Fe kölcsönhatást leginkább azzal tudjuk szemléltetni, hogy a vasban gazdag talajokban alacsony a talajoldatban megjelenő molibdén koncentráció. A nagyon magas molibdén tartalom viszont vas hiányt is indukálhat. Bár a különböző növényen belüli kölcsönhatások mechanizmusai nem eléggé tisztázottak, viszont minden bizonnyal a Fe-Mo csapadékképzés kialakulása a gyökérben tehető felelőssé a megfelelő mértékű molibdén transzlokáció elmaradásáért. Ezenkívül a molibdén a szilícium felvételét segíti elő (szinergizmus) a növény hajtásában, így a molibdén adagolása a növény hajtásában a szilícium koncentráció növekedését idézi elő. A Mo-W és a Mo-V metabolikus kölcsönhatások nem zárhatók ki, mivel ezen elemek nagy valószínűséggel számos biokémiai folyamatban helyettesíthetik a molibdént.

Az 5. ábra adataiból az is látható, hogy a molibdén adagolása a szelén, mint hasonló felépítésű anion felvételére nincs sem szinergista, sem antagonista hatással. Ezt a tényt támasztja alá Liu et al. (2017) publikációja is, melyben 0-202,5 g ha⁻¹ molibdén kezelés alkalmazásával a szamócát vizsgálták. A mérési eredményeik alapján semmilyen szignifikáns hatást sem tudtak kimutatni a molibdén koncentráció és a szelén koncentráció között, szintén alátámasztották a fentiekben megfogalmazottakat, miszerint a molibdén szignifikáns hatással van a nitrogén, a vas és a réz felvételére is.

Zakikhani et al. (2014a) tápoldatos (hidropónikus) körülmények között végezték a molibdén kezelés hatásának a vizsgálatát a rizs (*Oryza sativa*) mikroelem felvételére. A molibdént, ammónium-molibdenát [(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4 H₂O] formájában, négy különböző nagyságrendben (0; 0,01; 0,1 és 1 mg dm⁻³) adták a tápoldathoz, továbbá a vizsgálataikhoz öt különböző rizsfajtát

alkalmazták. A hajtások Fe tartalma és a tápoldatok molibdén koncentrációja között fordított arányosság volt megállapítható. Hasonló tendenciájú eredményeket kaptak Gerloff et al. (1959) is, akik a molibdén koncentráció növelésével, paradicsom-tesztnövény alkalmazásával, a vas hiány miatt bekövetkező klorózist tapasztalták. Ezzel szemben Gad (2012), valamint Gad és Kandil (2013) viszont azt tapasztalták, hogy a földimogyoró és a homoki bab termesztése esetén a molibdén serkentette, azaz növelte a vas felvételét.

Zakikhani et al. (2014b), továbbá Basak et al. (1982) szintén rizs tesztnövénnyel végezték a kísérleteiket és azt tapasztalták, hogy a molibdén kezelés hatására szignifikánsan emelkedett a rizs hajtásában a mangán koncentráció, a gyökér mangán tartalmára viszont nem volt szignifikáns hatással. Kirsch, (1958), valamint Kirsch et al. (1960) viszont arról számoltak be a tápoldatos kísérletükben, hogy a tápoldat mangán és vas koncentrációja is jelentősen befolyásolja a Mo-Mn kölcsönhatást. Amikor a tápoldat kisebb mennyiségben tartalmazott vasat és mangánt, akkor a molibdén kezelés is kisebb hatással volt a felvételükre. Érdekes megállapítást tettek: amikor a vas kis, a mangán pedig nagy koncentrációban volt jelen a tápoldatban, akkor a molibdén adagolás csökkentette a mangán felvételét, amikor viszont mindkét elem nagyobb koncentrációban volt jelen a tápoldatban, akkor pedig a molibdén serkentette a mangán akkumulációját.

Basak et al. (1982) a korábban már említett cikkében azt is bemutatta, hogy a molibdén a cink és a réz felvételét is befolyásolja. A $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdén kezelés alkalmazásával azt tapasztalták, hogy a rizs hajtásának cinktartalmára mintegy 8%-os, míg az 5 mg kg^{-1} molibdén kezelés megközelítően 20%-os csökkenést eredményezett. A rizs-tesztnövény gyökerében viszont 33%-os, továbbá 38%-os csökkenést mutattak ki az alkalmazott molibdén kezelések hatására. A molibdén kezelések a fentiekén túlmenően a rizs réz koncentrációjára is hatással voltak. Mind a hajtásában, mind a gyökerében szignifikánsan csökkent a réz koncentráció.

Gad 2012-es kutatómunkájában arról is számot adott, hogy a szántóföldi kísérletében a 12 mg kg^{-1} molibdén alkalmazása a kontroll növényekhez képest szignifikánsan emelte meg a földimogyoró termésében a réz koncentrációját. Gad és Kandil (2013) pedig homoki bab szemtermésében vizsgálva a 16 mg kg^{-1} molibdén adagolás hatását azt tapasztalták, hogy a szántóföldi kísérletükben a molibdén valamennyi vizsgált mikroelem (Mn, Fe, Cu, Zn), köztük a réz felvételét elősegítette.

3.1.3.5. Élelmiszereink molibdén tartalma

A molibdén a különböző élelmiszereinkben többnyire mérhető koncentrációban van jelen, ezek koncentrációja viszont többnyire kisebb mint 1 mg kg^{-1} (Reilly, 2004; Gropper és Smith, 2012). A növényi alapú élelmiszerek közül általában a hüvelyes növények molibdén tartalma a legmagasabb, míg az állati eredetűeknél az állati belsőségekből készült élelmiszerek molibdén tartalma a kiemelkedő.

A 7. táblázatban, a Shacklette (1980) és Kabata-Pendias (2011) publikációi alapján, a növényi élelmiszerek molibdén tartalma $0,04\text{-}2,1 \text{ mg kg}^{-1}$ közötti tartományban található. A

legalacsonyabb molibdén értékekkel a sárgarépa, a saláta és a gyümölcsök rendelkeznek, míg a tartomány felső részében a hüvelyes növények szerepelnek (7. táblázat).

Anke és Seifert (2007) mérései alapján a levélzöltségek molibdén koncentrációja 0,6-1,5 mg kg⁻¹, míg azoknál a zöltségeknél, amelyeknek vagy a gumóját, vagy a szárát fogyasztjuk (pl. a burgonya, a retek, a hagyma, a karalábé vagy a spárga), alacsonyabb (0,1-0,7 mg kg⁻¹) molibdén tartalmat állapítottak meg.

A gabonafélék átlagos molibdén koncentrációja szárazanyagra számítva 0,49 mg kg⁻¹. Kabata-Pendias (2011) publikációja alapján a különböző országokból származó gabonanövények molibdén tartalma nem mutat túl nagy ingadozást: az árpa molibdén koncentrációja 0,16-0,72, a búzáé 0,18-0,64; a rozse 0,40-0,54, a zabé pedig 0,41-0,88 mg kg⁻¹ között változik.

7. táblázat: A különböző növényi élelmiszerek molibdén koncentrációja (mg kg⁻¹)
(Kabata-Pendias, 2011; Shacklette, 1980)

Növény	Növényi rész	Mo koncentráció (száraz tömeg)
Csemegekukorica	szem	0,18
Vesebab	mag	0,9-1,6
Zöldborsó	mag	1,2-1,75
Zöldbab	hüvely	2,1
Sárgarépa	gyökér	0,04
Cukorrépa	gyökér	0,45-0,75
Cukorrépa	levél	0,39
Saláta	levél	0,074
Káposzta	levél	0,85
Burgonya	gumó	0,15-0,25
Hagyma	gumó	0,16-0,24
Uborka	kabaktermés	0,82
Paradicsom	bogyótermés	0,82
Alma	gyümölcs	0,07
Narancs	gyümölcs	0,11
Tea	levél	0,2-0,3

A különböző növényi mintákban található fenti molibdén tartalmaktól azonban jelentős eltéréseket tapasztalhatunk, ha az adott növény termesztése molibdénnel szennyezett területen történik (Reilly, 2004). Kabata-Pendias (2011), Kabata-Pendias és Szteke (2015) a saláta mintában 124 mg kg⁻¹, a káposztában pedig 1061 mg kg⁻¹ molibdén tartalmat mértek, amelyeket egy molibdén feldolgozó üzem közelében termesztettek. Furr et al. (1980) olyan területeken termesztettek babot és káposztát, amelyeken települési szennyvíziszapot alkalmaztak talajjavításra. A méréseik alapján a bab molibdén tartalma 0,8 mg kg⁻¹ értékről, 18 mg kg⁻¹-ra, a káposztáé 0,4 mg kg⁻¹-ről, 19 mg kg⁻¹-ra emelkedett. Schalscha et al. (1987) mérései szerint, Chilében egy molibdén feldolgozó közelében termesztett fűfélékben, a molibdén koncentráció 6,5-36,0 mg kg⁻¹ közé esett (Kabata-Pendias és Pendias, 2001). Mindez arra hívja fel a figyelmet, hogy az ipari szennyezés (bányászat és/vagy fémfeldolgozás), valamint a mezőgazdasági tevékenység számos esetben felelős lehet a növények extrém magas molibdén koncentrációjáért, mivel a

molibdén egy mobilis elem, amelyet a növények ennek következtében nagy koncentrációban képesek akkumulálni (Seifert et al., 2009).

A 8. és a 9. táblázatok néhány fontosabb élelmiszerünk molibdén koncentrációját foglalják össze, amelyek a 7. táblázat adataival nem összehasonlíthatók, ugyanis ezek a mérési eredmények a nyers tömegre vonatkoznak. A táblázatokból kitűnik, hogy a leggazdagabb molibdén forrásunknak az állati belsőségek számítanak, valamint a többi élelmiszerünkhöz viszonyítva a dió is jelentős molibdén tartalommal rendelkezik. Az állati belsőségek kiemelkedően magas molibdén tartalmát Seifert et al. (2009) mérési eredményei is alátámasztják. Megállapításuk szerint a vese és a máj átlagosan 1,8-2,9 mg kg⁻¹ molibdént tartalmazott szárazanyagra vonatkoztatva, amely összhangban van Anke et al. (2007) eredményeivel is.

8. táblázat: Élelmiszerek molibdén tartalma (mg kg⁻¹ nyers tömeg) (Ysart et al., 1999)

Élelmiszercsoportok	Mo-koncentráció	Élelmiszercsoportok	Mo-koncentráció
Állati belsőségek	1,2	Egyéb zöldségek	0,06
Dió	0,96	Baromfi	0,04
Zöldségkonzervek	0,31	Hal	0,03
Egyéb gabonafélék	0,23	Cukor	0,03
Kenyér	0,20	Tej	0,03
Zöldségek	0,15	Olajok és zsírok	0,02
Húskészítmények	0,12	Tőkehús	0,01
Burgonya	0,09	Friss gyümölcsök	0,01
Tojás	0,08	Gyümölcskonzervek/befőttek	0,009
Tejtermékek	0,07	Italok	0,003

9. táblázat: A különböző növényi és állati eredetű élelmiszerek molibdén tartalma (mg kg⁻¹ nyers tömeg) (a: Rose et al., 2010; b: Leblanc et al., 2005; c: Gabryszuk et al., 2010; Kabata-Pendias és Szteke, 2015)

Növényi eredetű élelmiszerek		Állati eredetű élelmiszerek	
Termék	Mo-koncentráció	Termék	Mo-koncentráció
Kenyér ^a	0,22	Hús ^b	0,141
Egyéb gabonafélék ^a	0,32	Állati belsőségek ^a	1,10
Rizs és búzadara ^b	0,110	Hústermékek ^a	0,085
Zöldszínű zöldségek ^a	0,143	Hal ^b	0,065
Hüvelyes növények ^b	0,727	Kagylófélék ^b	0,129
Burgonyafélék ^a	0,068	Tojás ^a	0,124
Gyümölcsök ^b	0,010	Tej ^b	0,039
Diófélék ^a	1,26	Tej ^c	0,085
Diófélék és olajos magvak ^b	1,031	Tejtermékek ^a	0,065

Az egyéb állati termékek molibdén koncentrációja azonban, – összehasonlítva az állati belsőségek molibdén tartalmával –, viszonylag rendkívül csekélynek mondható (Mills és Davis, 1987). Az állati hústermékek (a szarvasmarha, a juh, a kecske és a baromfi hús) fogyasztásával csupán 0,075-0,16 mg kg⁻¹ molibdén juttatható be a szervezetünkbe. A tej és tejtermékek molibdén tartalma függ az adott termékfajtától, a molibdén tartalmukra azonban jelentős hatással van mind az előállítás ideje, mind a helye. A tehéntej molibdén koncentrációja 0,03-0,075 mg kg⁻¹ értékek

között változik. Általánosságban megfogalmazható, hogy a tej molibdén tartalma meghaladja a sajtok és túrók molibdén tartalmát is, amely a molibdén specieszek jó vízdékonyságával magyarázható (Seifert et al., 2009).

3.1.3.6. A molibdén előfordulása és szerepe az állatokban és az emberekben

A molibdén esszenciális mikroelem az állati és az emberi szervezet számára, az állati és az emberi szervezetnek azonban csak kis mennyiségű molibdénre van szüksége. A molibdén koncentráció a különféle állatok (pl. rovarok, csigák, földigiliszták, egerek, pockok és cickányok) teljes testében nagymértékben fajfüggő. Viszonylag nagyobb molibdén tartalmak halmozódtak fel az éticsigákban (1048 mg kg^{-1}), míg ugyanazon a területen található meztelen csigákban 798 mg kg^{-1} -t, a földigilisztákban viszont csak 371 mg kg^{-1} -ot mértek (mindegyik koncentráció szárazanyagra vonatkozik). Az azonos területről származó különböző állatfajok molibdén tartalma ugyanolyan nagyságrendben van (Anke, 2004). A szöcskék 957, a temetőbogarak 663, a kaszáspók 672, a futóbogarak 640, a gömbászkák 314 és az ikerszelvényesek $222 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ molibdént tartalmaztak szárazanyagra vonatkoztatva. Az egerek és a pockok megközelítően hasonló molibdén tartalmúak ($357\text{-}648 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$), míg a cickányokban, amelyek rovarévek, sokkal nagyobb molibdén koncentrációk akkumulálódtak ($2398 \pm 869 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$) valószínűleg azért, mert a rovarok molibdénben gazdagok (Anke, 2004). Az állatok molibdén tartalmának jó indikátora a májak és a vesék molibdén koncentrációja. Mindkét szerv a léppel együtt a legmagasabb molibdén mennyiségeket halmozza fel (Anke, 2004). A lovak, a nők és a férfiak májai általában nagyobb mint $3500 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ molibdént tartalmaznak (10. táblázat). A 10. táblázat adataiból látható, hogy a vesék a májhoz képest, általában kisebb mennyiségű molibdént akkumulálnak. Az állatkertekben lévő kérődző állatok májának és veséjének molibdén tartalma a fentiekhez hasonló mintázatot mutatja.

10. táblázat: A házi és a vadon élő állatok, valamint az ember májának és veséjének molibdén tartalma ($\mu\text{g kg}^{-1}$ sz.a.)

Faj	Máj	Vese
	átlag \pm szórás	átlag \pm szórás
Nők	4823 ± 2320	1338 ± 613
Férfiak	3775 ± 1575	1214 ± 397
Ló	7987 ± 10768	1034 ± 381
Szarvasmarha	2913 ± 4033	1279 ± 1134
Sertés	2415 ± 1040	2108 ± 736
Juh	2197 ± 1134	1232 ± 501
Dámvad	1949 ± 1169	1621 ± 923
Gímszarvas	1195 ± 619	847 ± 458
Őz	620 ± 368	214 ± 137

Mivel a molibdén viszonylag nem túl magas molibdén koncentráció felett molibdenózist tud okozni az állatok takarmányozásában, ezért a nemzetközi szakirodalomban megjelent, molibdénre vonatkozó cikkek többsége, a takarmányozás területén jelent meg.

A szakirodalomban nincs egységes álláspont, hogy mennyi az a molibdén koncentráció, amely már toxikus tüneteket idézhet elő az emberi és az állati szervezetben. Dick 1956-ban szarvasmarhák legeltetése során még a 15-300 mg kg⁻¹ közötti molibdén koncentrációkat tartotta toxikusnak (Adriano, 2001), Ward (1978) szerint a molibdéntoxikózis csak 20 mg kg⁻¹ felett fordul elő, Stojek (2013) kutatásai alapján viszont ez a koncentrációérték 10-20 mg kg⁻¹. Kádár (2012) megállapítása szerint a molibdén toxikus tünetei már 5-10 mg kg⁻¹ molibdén koncentráció bevitelére esetén jelentkeznek. Jarrell et al. (1980) vizsgálatai alapján megállapította, hogy az állati takarmányokban, a molibdén toxicitás nagymértékben a réz és a szulfát (SO₄²⁻) koncentrációjától függ. Ha rezet és szulfátot adagolunk kiegészítésként a takarmányhoz, akkor csökkenteni tudjuk a molibdén toxicitását (Adriano, 2001).

A legtöbb patás haszonállat takarmányozásában jelentős problémának számít a molibdenózist a nagyobb mint 10 mg kg⁻¹ molibdén tartalom okozhat. Kabata-Pendias és Mukherjee (2007) egy olyan táblázatot (11. táblázat) készített, mely azon zöld takarmányok és hüvelyes takarmányok molibdén tartalmát mutatja, amely az adott állatállományánál molibdén toxicitást okozott. Ezek tanulmányozásával érdekes megállapítás tehető, miszerint Nagy-Britanniában 1,5 mg kg⁻¹ molibdén tartalmú füvek esetén is tapasztaltak már toxicitást és találtak olyan fű mintát is, mely ugyan egy molibdén érc-feldolgozó üzem környékéről származott, de már 36 mg kg⁻¹ molibdént tartalmazott (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007).

11. táblázat: A különböző toxicitást okozó és toxicitást nem okozó molibdén koncentráció értékek az állatok takarmányozása során (mg kg⁻¹) (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007)

Ország	zöld takarmányok		hüvelyes takarmányok	
	toxikus	nem toxikus	toxikus	nem toxikus
Finnország	–	0,45	–	0,7
Japán	–	0,72	–	0,9
Kanada	4,0	1,3	5,2	–
Lengyelország	–	0,33	26,6	0,5
Nagy-Britannia	1,5	0,56	–	–
Oroszország	10-50	–	–	2,3
USA	3,7	–	–	1,8

Az emberi szervezetben a molibdén eloszlása nem egyenletes. Jelentős része a májban és a vesében, valamint a mellékvesékben koncentrálódik. Takács (1992) szerint a máj átlagos molibdén koncentrációja (nedves tömeg) 1 mg kg⁻¹, a vese 0,3 mg kg⁻¹, míg a mellékvese 0,7 mg kg⁻¹ molibdént tartalmaz, míg Anke (2004) ettől sokkal magasabb koncentrációkról számolt be (10. táblázat). A vérérum molibdén koncentrációja Caroli et al. (1994) mérései szerint 0,58-0,91 µg dm⁻³, míg Forrer et al. (2001) szerint 0,44 µg dm⁻³, amelyek Anke (2004) méréseivel összehasonlítva jóval kevesebb.

A Magyar Élelmiszerkönyv (2001) 1-1-90/496 számú előírása szerint a felnőttek számára ajánlott napi beviteli mennyiség (RDA=Recommended Dietary Allowance) molibdén esetében 50 µg. Az élelmiszerekből történő felszívódása széles határok között ingadozik. Cantone et al.

(1992) szerint a molibdén élelmiszerekből történő hasznosulása 85-90% közé tehető, Vyskočil és Viau (1999) szerint 28% és 75%, Gropper és Smith (2012) szerint pedig 51% és 85%. A szulfátionok (SO_4^{2-}) elősegítik a molibdén felszívódását (Gropper és Smith, 2012), a szükségesnél nagyobb mennyiségű réz bevitele azonban gátolja azt (Bremner, 1979).

A molibdénnel kapcsolatos humán egészségügyi vonatkozások között két tényezőt kell megemlíteni: 1.) a növényben lévő molibdén koncentráció hatása, 2.) a molibdén tartalom közvetlen hatása az emberre.

1.) Az élelmiszerekben potenciálisan kialakuló magas nitrát tartalom hat hónaposnál fiatalabb csecsemőknél jelentős mértékű egészségkárosodást, úgynevezett methemoglobinémiát (kékkór) okozhat, felnőtteknél viszont növeli a rák kialakulásának a kockázatát (Sanchez-Echaniz et al., 2001; Wright et al., 1999). Methemoglobinémia kialakulásakor a hemoglobinban található vas(II)-ion vas(III)-ionná oxidálódik, amely ezáltal alkalmatlanná válik az oxigén szállítására (Mansouri és Lurie, 1993; Coleman és Coleman, 1996; Wright et al., 1999; Bradberry, 2007, 2011). A methemoglobinémia egy egészséges felnőtt szervezetében nem alakul ki, mivel az emberek szervezetében a methemoglobin-reduktáz enzim akkorra már kialakul és ezáltal már megfelelően működőképes. Calonego et al. (2010) megállapították, hogy szántóföldi kísérletben, a veteménybab (*Phaseolus vulgaris* L.) levelében, a molibdén hiánya nagymértékben fokozza a nitrát akkumulációját, főként ha nitrogén-trágyázást alkalmaznak. Ezért kell odafigyelni, hogy a csecsemők számára előállított élelmiszerek készítésénél ne használjunk magas nitráttartalmú alapanyagokat, mivel a nitrát viszonylag nagyobb koncentrációja agykárosodáshoz vezethet, sőt akár a csecsemő fulladását is eredményezheti. Ez a tény is arra hívja fel a figyelmet, hogy a növényi eredetű élelmiszer alapanyagok előállítása során mennyire fontos, hogy a nitrát-reduktáz enzim megfelelő működéséhez elegendő mennyiségű molibdén álljon rendelkezésre.

2.) Molibdén hiány felnőtt embereknél ritkán lép fel. A molibdén elengedhetetlenül fontos a DNS és az RNS szintézisében részt vevő enzimek működéséhez, valamint azokéhoz, amelyek a zsírokból energiát szabadítanak fel. A molibdén az emberi szervezetben kofaktorként vesz részt a szulfít-oxidáz, a xantin-oxidáz és az aldehyd-oxidáz működésében, ezáltal hiánya ezen enzimek működésének zavarában nyilvánul meg (Rajagopalan, 1988; Sardesai, 1993; Momcilović, 1999; Gropper és Smith, 2012; Ali et al., 2014). Elsősorban parentálisan táplált betegeknél (pl. Crohn-betegség) jelentkezik, akiknél szulfít-oxidáz alulműködés alakult ki. A Crohn-betegség legfőbb tünetei: a véres hasmenés és a nyálka jelenléte a székletben, ezenkívül tapasztalhatunk hasfájást, hányingert, étvágytalanságot és fogyást is. A tapasztalatok azt mutatják, hogy napi 300 µg ammónium-molibdát (163 µg Mo) szervezetbe történő juttatásával a fenti tünetek visszafordíthatók (Howerde et al., 1973; Underwood, 1977; Howerde, 1999; Anke et al., 2010; Gropper és Smith, 2012).

Molibdén hiány mellett, előfordulhat molibdén túladagolás is. Mivel a molibdén viszont általában csak kis mennyiségben van jelen az élelmiszereinkben, ezért változatos táplálkozás mellett a molibdén túladagolás csak ritkán fordulhat elő. Örményországi vizsgálatokban mutatták

ki, hogy a nagy molibdén tartalmú területeken, ahol ezáltal a molibdén napi bevitel eléri a 10-15 mg-ot, a köszvényeszerű megbetegedések száma jelentősen megemelkedett. Mivel a betegek vérének magas volt a húgysav tartalma, ezért valószínűleg a xantin-oxidáz aktivitás növekedett meg (Takács, 1992; Eisler, 2007). Momcilović (1999) pedig arról számolt be, hogy az a molibdén gőz, amelyet adalékanyagként használtak az acélgyártás során, különböző tüneteket okozott a dolgozóknál: levertség, gyengeség, fáradtság, étvágytalanság, fejfájás, ízületi fájdalom, izomfájdalom, mellkasi fájdalom, száraz köhögés és hasmenés.

A fentiekben túlmenően, számos kutatás igazolta azt, hogy a molibdén fontos szerepet játszik az emberi egészség megőrzésében. Marczenko és Lobinski (1991) például arról számoltak be, hogy a molibdén beépülve a fogzománcba, hatással van a fogak egészségi állapotára és kielégítő ellátottság esetén csökkenteni tudja a fogszuvasodás veszélyét. Brewer et al. (1991; 1996) publikációikban azt részletezték, hogy ammónium-molibdát-tetrahidrát formájában a Wilson-kór (rézanyagcsere zavar) kezelésében is eredményesnek bizonyult. Ezenkívül azt is kimutatták, hogy összefüggés van az emberi szervezet molibdén tartalma és az egyes rákos elváltozások kialakulása között (Van Rensburg et al., 1985).

3.2. A szelén

3.2.1. A szelén története és általános jellemzése

A szelén felfedezése (1817) történetileg leginkább Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) (3. kép), svéd vegyész nevéhez köthető, aki egyedül vagy más kutatóval a szilícium, a tórium és a cérium új elemek felfedezésében is részt vett. A szelén felfedezése viszont, legalább ilyen súllyal, egy másik svéd vegyészhez, Johan Gottlieb Gahn (1745-1818) (4. kép) nevéhez is köthető, aki a mangán azonosítását is végezte. Mivel Gahn vállalkozó is volt, rábeszélte Berzeliust, hogy vásárolják meg a gripsholmi vegyi gyárat. Már korábban is azt figyelték meg, hogyha Gripsholmban a kénsavgyártáshoz a rézpiritet Falun bányájából szerzik be, akkor az ólomkamra alján egy vöröses anyag marad vissza, amelynek a szaga a rothadt retekéhez hasonlít, és ami a dolgozók rosszullétét is előidézte. Berzelius eleinte azt gondolta, hogy a visszamaradó anyag a tellúr, mivel hasonló volt a szaga, mint amit M. H. Klaproth, egy másik vegyész írásából már ismertek, viszont Berzelius vizsgálatai a tellúr jelenlétét ez esetben kizárták. Klaproth a tellúrt 35 évvel korábban fedezte fel a Börzsöny-hegységben található arany bányában. Mivel a fentiekben részletezett visszamaradó anyag nagymértékben a tellúrhoz hasonlított, továbbá Berzelius a tellúr nevét és kémiai közelségét vette alapul (Klaproth a tellúrt a latin „Tellus”, azaz Föld szóból

nevezte el), Berzelius a görög „Szeléné” (Σελήνη), azaz Hold szóból képezte a szelén, mint új elem nevét (Neumüller, 1983; Schrauzer, 2004; Eisler, 2007; Newton, 2010; Selinus et al., 2013).



3. kép

Jöns Jakob Berzelius svéd kémikus (I4)



4. kép

Johan Gottlieb Gahn svéd kémikus (I5)

Manapság Berzeliust tekintjük annak a személynek, aki a szelént elsőként volt képes izolálni, valamint jellemezni, nagy valószínűséggel viszont nem ő volt az elem első felfedezője. Egy olasz tudós (alkímikus), Arnaldus de Villa Nova (1235-1311) a Rosarius Philosophorum című könyvében részletesen jellemezte egy ún. „vörös ként”, amely a kén elpárologtatására használt kamrák falán maradt vissza. Ezek a kamrák hasonlítottak a Berzelius és a Gahn által használt kamrákhoz, viszont Villa Nova nem volt abban a helyzetben, hogy beazonosíthatta volna a szelént.

Egy másik, szintén olasz, Marco Polo volt az, aki szintén a 13. században a szelénre, jobban mondva a szelén nem kívánatos hatására bukkant. Marco Polo, – aki 1254-ben Velencében született –, fiatal férfiként csatlakozott egy Kínába irányuló kereskedelmi expedícióhoz. 20 éven át Kínában maradt, amikor is állást kapott Kubiláj mongol nagykán udvartartásában. Marco Polo több hosszú utat tett meg a Kán nevében, egészen távoli területeken. Az egyik ilyen utazás alkalmával a könyvében rögzítette azt, hogy mit tapasztalt az útján. Sok napig kellett lovagolniuk, ahol a vad területek veszélyén túlmenően egy plusz veszéllyel kellett számolniuk. A hegyek között egy olyan mérgező növényvel találkozhattak, amelyet ha a lovak megesznek, akkor a lovak patái elhalnak, elvesztik szőrüket és legyengülten, betegen néznek ki. A mai kor kutatói úgy vélik, hogy Marco Polo által leírt mérgező növény egy szelén akkumulátornövény lehetett, amely a talajból nagy koncentrációban volt képes akkumulálni a szelént és azt toxikus szintre növelni. Napjainkban Dakota és Wyoming (USA) egyes részein az Astragalus bizonyos fajtái szintén szelén-akkumulátorok (Wagstaff, 2008), amelyek a haszonállatoknál szelenózist okoznak.

A szelén az egyik legritkább elem, a Földkéregben a természetben előforduló 88 elem közül, a természetes gyakoriságot tekintve, a szelén a 70. legritkább elem. Ennek ellenére az élőrendszerek kulcseleme, sem az emberek, sem az állatok fejlődése, vagy élete nem képzelhető el szelén nélkül. A szelén (Se) (nyelvújításkori neve reteny) rendszáma 34, relatív atomtömege 78,96. Gyakorlatilag hat stabilis izotópja ismert: ^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{78}Se , ^{80}Se és ^{82}Se , melyek természetes relatív gyakorisága sorban: 0,87%, 9,02%, 7,58%, 23,52%, 49,82%, 9,19%

(Schrauzer, 2004; Kovács és Borbély, 2011). Bár meg kell említeni, hogy a ^{82}Se izotóp valójában nem stabilis, hanem egy hosszú élettartamú β^- -emitter, $t_{1/2}=1,4\cdot 10^{20}$ év (Neumüller, 1983; Krebs, 2006). A szelén hat stabilis izotópja mellett 24 nem stabilis izotópja is ismert (Reimann és de Caritat, 1998). A szelén, mint félfémes elem, a periódusos rendszer VI. főcsoportjában (az oxigéncsoportban: O, S, Se, Te, Po) található, közvetlenül a kén alatt és a tellúr fölött. Kémiai sajátosságait tekintve inkább a kénhez, mint a tellúrhoz hasonlít. A szelén hasonló külső vegyértékhéj elektronszerkezettel és atommérettel rendelkezik, ami azt eredményezi, hogy a szerves vegyületekben a kén diszulfid (-S-S-), a szelén pedig diszelenid (-Se-Se-) hidak kialakítására képes. A fenti hasonlóságok ellenére, a kén és a szelén biokémiai viselkedése eltér egymástól. Az egyik különbség az, hogy a biológiai rendszerek redox folyamataiban a szelénvegyületek redukálódnak, míg a kénvegyületek oxidálódásra képesek. A szelenit (SeO_3^{2-}) enyhe, a szelenát (SeO_4^{2-}) viszont erős oxidálószer, míg a szulfít (SO_3^{2-}) redukál, addig a szulfát (SO_4^{2-}) nem vesz részt a redoxi-folyamatokban. A másik igen fontos eltérés a hidridjeik savas jellegéből adódik (Greenwood és Earnshaw, 2004; Széles, 2007).

A szelén a kénhez hasonlóan -2, 0, +2, +4 és +6 oxidációs számmal fordul elő, de a +4 értékű szelén vegyületei a leggyakoribbak és a legállandóbbak. A természetben, a homológ kénhez hasonlóan, az elemi szelénnek is több allotróp módosulata ismert, melyek közül a három legfontosabb: 1.) a kristályos szerkezetű szürke elemi szelén szelénatomjai hexagonális kristályrácsban helyezkednek el, amely a biológiai rendszerekben inert (Adriano, 2001), 2.) az amorf szerkezetű vagy monoklin kristályrácsú vörös szelén, mely nem rendelkezik fémes tulajdonsággal, 3.) a szelén harmadik allotróp módosulata a szürke amorf szerkezetű szelén (Kessi et al., 1999; Tamás, 2015). Greenwood és Earnshaw (2004), valamint Neumüller (1983) szerint a szelén sűrűsége $4,189\text{-}4,389\text{ g cm}^{-3}$ között változik, az adott allotróp módosulattól függően, az olvadáspontja 217°C , a forráspontja pedig 685°C . A fenti értékektől eltérően magasabb sűrűség található Krebs (2006), Selinus et al. (2013), valamint Yaws (2011) közleményeiben, melyekben $4,809\text{ g cm}^{-3}$ értéket közöltek, Reilly (2002) publikációjában pedig ettől még magasabb sűrűség ($4,9\text{ g cm}^{-3}$) található.

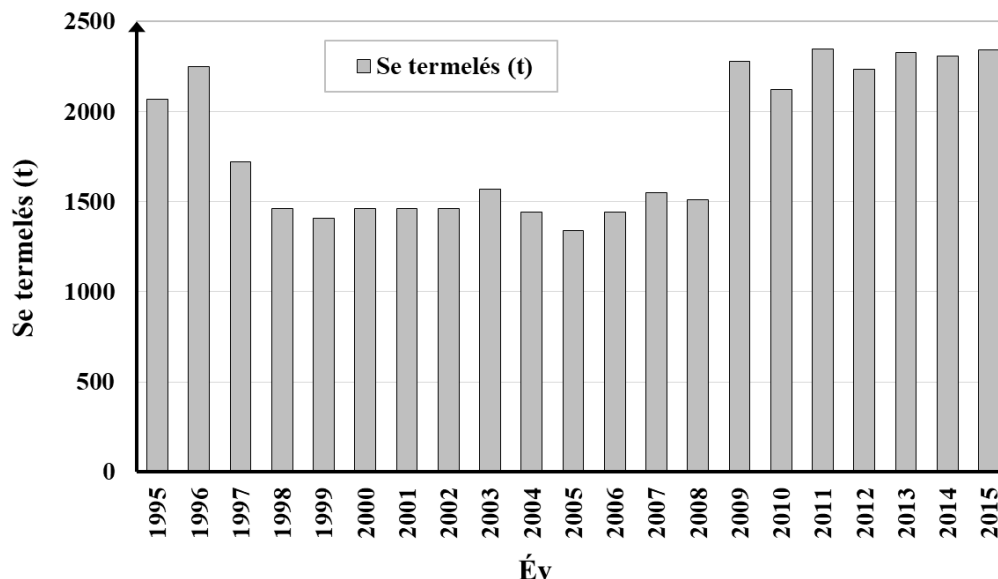
A növények szelén felvétele az 1930-as évektől kiemelt figyelmet kapott, amikor Robinson 1933-ban (Wu, 1994a) és Beath et al. 1934-ben olyan toxikus hatásokat mutattak ki az állatoknál, amelyeket a nagyobb mint 1 mg kg^{-1} szelén koncentrációjú (sz.a.) takarmányok elfogyasztása okozott. Az 1930-as évek elején a szelént erősen mérgezőnek tartották, ezért elsősorban ipari célokra használták (Nelson et al., 1943; Wu, 1994a), 1943-ban pedig rákkeltő hatásának gondolták (Pais, 2000). 1957-ben fordulat következett be, amikor Schwarz és Foltz kimutatta a szelén esszenciális jellegét. Patkánykísérleteik alapján megállapították, hogy az állatok étrendjébe illesztett szelén fontos szerepet játszik a májnekrozis megelőzésében (Schwarz és Foltz, 1957).

3.2.2. A szelén termelése és felhasználása

Az 1900-as évek elején a világ szelén termelése viszonylag alacsony, 1910-ben megközelítően 5000 kg volt. Akkoriban jelent meg néhány olyan ipari alkalmazás, amely nagyobb

mennyiségű szelént igényelt. Ilyen például az üveg- és kerámiaipar. Amennyiben szelént adagolnak az üveg- és kerámia alapanyagába, akkor a nemkívánatos zöld szín helyett egy ragyogó rubinvörös színt kapunk. A II. Világháború idején megnőtt a szelén iránti kereslet, mivel a német üvegyárakban egyre több esetben kezdték helyettesíteni a mangánt a szelénnel. Mindeközben az 1930-as években a szelén felhasználásával kifejlesztették a xerografikus másolási eljárást. A II. Világháború végére, a fenti igények miatt, a szelén beszerzésére az évenkénti piaci igények, körülbelül 2300 tonnára emelkedtek (Reilly, 1996).

A szelén felhasználás iparterületenkénti megoszlása az elmúlt 80 évben ugyan megváltozott, de az összfelhasználása nem változott jelentős mértékben (6. ábra) (Babbitt és Groat, 2001; Norton és Groat, 2002; Buttermann és Brown Jr, 2004; Norton és Leahy, 2006; Kempthorne és Myers, 2008; Salazar és McNutt, 2010, 2011, 2012, 2013; Jewell és Kimball, 2014, 2015, 2016). A világon nem található sehol sem olyan lelőhely, ahol a szelént önmagában gazdaságosan lehetne kitermelni. A szelén számos más elemmel, pl. a rézzel, a kénnel, vagy az ólommal együtt található meg a természetben. Ezáltal más fémek melléktermékeként, pl. a réz elektrolitikus finomításával állítják elő a szelént, vagy a nemesfémek finomítójának az iszapjából nyerik ki. A világ szelén termelésének legnagyobb hányadát az USA-ban, Japánban, Németországban, Belgiumban, Kanadában, Kínában és Oroszországban állítják elő, valamint kisebb mennyiségben még Finnország, Lengyelország, Peru és Chile is hozzájárul a világ szelén termeléséhez (Reilly, 1996; Newton, 2010).



6. ábra: A világ szelén termelése 1995 és 2015 között

Az ipar a szelént nagymértékben alkalmazza a legkülönbözőbb területeken, de számos háztartási felhasználása is ismert. Az összes szelén 25%-át az üvegiparban használják, további 25%-át szervesetlen alapú festékanyagként műanyagokban, festékekben, zománcokban, tintákban, gumikban és kerámiákban, 10-15%-át egyéb területen alkalmazzák (pl. vulkanizáló szerként a gumi előállításnál, rozsdamentes acél előállítására, valamint szelenid formában a tűzálló fémek kenőanyagaiban), körülbelül 15%-át orvosi és gyógyászati célra, továbbá megközelítően 20%-át

táplálkozási és mezőgazdasági területen (pl. emberi és állati táplálékkiegészítők) használják (George, 2003; Schrauzer, 2004) (12. táblázat). A szelénnek vannak olyan radioaktív izotópjai is, amelyeket csak mesterségesen, pl. neutronaktivációval lehet előállítani. Ezek közül, pl. a gamma-sugárzó ^{75}Se izotópot orvosi diagnosztikai célra is használják (Schrauzer, 2004; Reilly, 2006; Fordyce, 2013).

12. táblázat: Az egyes szelénvegyületek és azok felhasználása (Selinus et al., 2013)

Elemi szelén, vagy szelén vegyület	Felhasználás
Elemi szelén	Egyenirányítók, fotoelektromos cellák, detonátorok, fénymásolók, rozsdamentes acélgyártás, katalizátor dehidrogénezésnél
Tellúr-szelén ötvözetek	Optikai tárolók (számítástechnika) törlése
Nátrium-szelenát (Na_2SeO_4)	Rovarölő szerekben, üvegyártásban, állatgyógyászati készítményekben
Nátrium-szelenit (Na_2SeO_3)	Üvegyártásban, szelén-hiányos talajokhoz adalékanyag
Szelén-dietil-ditiokarbamát ($\text{Se}[\text{SCSN}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_4$)	Gombaölőszerek, vulkanizálószer
Szelén-monoszulfid (SeS)	Állatgyógyászatban, korpásodás megszüntetésére (samponok)
Szelén-diszulfid (SeS_2)	Állatgyógyászatban, korpásodás megszüntetésére (samponok)
Szelén-dioxid (SeO_2)	Katalizátor oxidációs reakcióban és szerves vegyületek hidrogénezésénél vagy dehidrogénezésénél
Szelén-hexafluorid (SeF_6)	Gázállapotú elektromos szigetelőként
Szelén-oxiklorid (SeOCl_2)	Kén, szelén, tellúr, bakelit, valamint gumik, rágógumik, gyanták, aszfalt ragasztók és egyéb anyagok oldószere
Alumínium-szelenid (Al_2Se_3)	Hidrogénszelenid előállítása félvezetőkhöz
Ammónium-szelenit [$(\text{NH}_4)_2\text{SeO}_3$]	Vörös üveg gyártásánál
Kadmium-szelenid (CdSe)	Fényvezetők, fotoelektromos cellák, egyenirányítók gyártásánál
Réz-szelenát (CuSeO_4)	Réz és rézötvözetek színezésére
Volfrám-diszelenid (WSe_2)	Kenőanyagokban

3.2.3. A szelén előfordulása

A periódusos rendszer elemei között a szelén a ritkább elemekhez tartozik. A legfelső 16 km vastag, szilárd földkéregben, a különböző szerzőktől függően, 0,05-0,5 mg kg^{-1} szelén található, melyet ez alapján az elemek gyakorisági sorrendjében, a 69-70. helyek közé rangsorolják. A fenti koncentráció tartományon belül Kabata-Pendias és Pendias (2001) 0,05 mg kg^{-1} , Neumüller (1983), valamint Barker és Pilbeam (2007) 0,09 mg kg^{-1} , míg Reimann és de Caritat (1998) 0,12 mg kg^{-1} értéket közöltek. Vannak olyan szerzők, akik a szelén koncentrációját a legfelső 16 km vastag, szilárd földkéregben egy kisebb, vagy nagyobb, 0,05-0,09 mg kg^{-1} koncentráció tartománnyal becsülik (Adriano, 1986, 2001; Risher et al., 2003; Schrauzer, 2004), továbbá 0,05-0,5 mg kg^{-1} (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Szteke, 2015; El-Ramady et al., 2015). A tiszta szelénásványok ritkák, pl. a berzelianit (Cu_2Se), a tiemannit (HgSe), vagy a naumannit (Ag_2Se), amelyek kitermelése nem gazdaságos. Ezzel szemben a szelenidok kis mennyiségben gyakran megtalálhatók izomorf szulfidokkal együtt (pl. kalkopirit, szfalerit, vas-szulfidok). A szelén a fenti szulfidok pörkölése során, mint szelén-dioxid elpárolog és így gyakorta jelentős mennyiségben koncentráódik az ólomkamra iszapjában.

3.2.3.1. A szelén előfordulása a talajokban

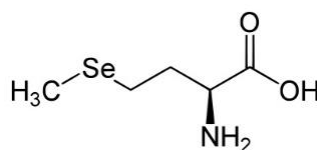
A Földünk talajai szelén tartalma Takács (2001) szerint $0,1-10 \text{ mg kg}^{-1}$. A szelénhiányos területeken $0,005-2,0 \text{ mg kg}^{-1}$, míg az egyes szelénben gazdag talajokban (ún. seleniferous talajokban) viszont akár több száz mg kg^{-1} értéket is mértek (Kádár, 1998). A termőtalajok világátlagos $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$, hazai talajaink $0,3-0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ szelént tartalmaznak (Simon, 1999). A talaj szelén tartalmának vizsgálata főként olyan országokban volt kiterjedt, ahol felfedezték, hogy összefüggés van a szelén tartalom, valamint az emberi és állati egészség között. Az egyik ilyen példaértékű hely Finnország, ahol a szelénhiány káros hatásának feltárása után, 1984-től évről-évre szelén adagolást végeztek (Na_2SeO_4 formájában) a finnországi talajokhoz. Az első években 20 t év^{-1} (16 mg kg^{-1} a gabonanövények és 6 mg kg^{-1} a gyepek műtrágyájához), majd később $7,6 \text{ t év}^{-1}$ szelént adagoltak a műtrágyákhoz és azt pedig a finnországi talajokhoz. A program első 20 évének részletes eredményeiről egy 2005-ben Helsinkiben megrendezett konferencián számoltak be (Eurola, 2005; Kovács et al., 2005). Az előadások keretében elhangzottak szerint, a szelén adagolás következtében, számos pozitív hatás mellett, a finnországi emberek várható élettartama néhány évvel emelkedett (Eurola, 2005). A program megkezdését követő 14 év alatt megközelítően kétszeresére nőtt a talajok forró víz oldható szelén tartalma, a talajkolloidokhoz kötődött szelén mennyisége pedig pozitív korrelációt mutatott az agyag tartalommal és a vas tartalommal egyaránt, míg negatív korreláció volt fellelhető a kénssavval extrahálható foszfor koncentrációval. A program másodlagos hatásaként lehet megemlíteni, hogy mind a folyóvizek (legfeljebb $180 \mu\text{g dm}^{-3}$), mind az alsó üledékek (legfeljebb 4 mg kg^{-1}) szelén szintje megemelkedett (Eurola, 2005).

A szelén a világ minden területén megtalálható, de számos tényező befolyásolja a talaj szelén tartalmát. A legmeghatározóbb a talaj talajképző közete. A talaj talajképző közete mellett, az éghajlati viszonyok (főként a csapadék mennyisége) is befolyásoló tényezőként jelennek meg, száraz talajokban nagyobb szelén értéket mértek (Aubert és Pinta, 1977; Kaur et al., 2014). Azokon a területeken, ahol a magas szeléntartalmú talaj, az 500 mm-t meg nem haladó csapadékkal párosul, ott a talajban akár potenciálisan toxikus szelén koncentrációk jelenhetnek meg. Abban az esetben viszont, ha ugyanolyan körülmények között (a talaj talajképző közete, klimatikus viszonyok és hasonló összes szelén tartalom) a vastartalom magas lesz a talajban, akkor kötött állapotban fog lenni a szelén jelentős része, ezáltal az oldható, a növény számára hozzáférhető szelén tartalom jóval alacsonyabb lesz, így a toxikus szintet nem fogja elérni. Amennyiben a talaj szelén koncentrációja viszonylag alacsony, akkor a benne kialakuló oldható szelén tartalom is alacsony lesz, függetlenül az éghajlati viszonyoktól (McNeal és Balistrieri, 1989; Kaur et al., 2014). A szelén tartalom kialakulásában a talajt borító növényzet a harmadik meghatározó tényező (Brown és Shrift, 1982). A fenti három fő tényezőn (és a vulkáni tevékenységen) kívül egyéb antropogén tevékenységek (például a bányameddő és a dréncsővek használata a mezőgazdaságban, különböző műtrágyák és talajvíz használata a növénytermesztéshez, valamint a szén elégetésével előálló hamu, továbbá a háztartási hulladékok) is hozzájárulhatnak a szelén tartalom kialakulásához, amely szelén toxicitást is eredményezhet (Dhillon és Dhillon, 2003). A

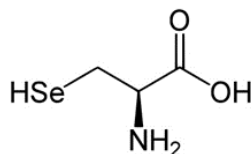
szelén vegyületek biológiai metilációja (főként anaerob baktériumok közreműködésével) is nagymértékben befolyásolja az adott vegyület párolgási viszonyait, amely jelentős szerepet játszik a szelén geokémiai körforgásában (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). A metiláció folyamán gáz halmazállapotú szerves szelén vegyületek (szelenidek) képződnek (pl. a dimetil-szelenid: $(\text{CH}_3)_2\text{Se}$). A legtöbb talaj szervesanyag és szelén tartalma között szoros kapcsolat van. A szervesanyagok a szelénnel reagálva szerves kötésű szelén vegyületeket képesek alkotni, amelyek szintén képesek befolyásolni a talaj szelén tartalmát. A mikrobiális folyamatok mind a szerves szelén vegyületek (például a szelenometionin és a szelenocisztein) képződésében, mind a szelén mineralizációjában szintén hozzájárulnak a szelén körforgalomhoz, ezen keresztül a szelénnel szennyezett talajok szelén koncentrációjának, fitovolatilizáció általi csökkenéséhez. Ezen mikrobiális folyamatok közé elsősorban a Se(IV) és a Se(VI) redukciója, valamint a szelén metilációja tartozik. A mikrobiotáknak változó az érzékenysége a szelén tartalomtól függően. Ha a talajban lévő szelén koncentrációja nagyobb mint 5 mM, az gátolja a talaj enzimaktivitását (Nowak et al., 2002; Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). A gyakorlatban a szelén mobilitását, ezáltal a növény számára való felvehetőségét növelhetjük foszfát (PO_4^{3-}) trágyázással is. A fenti információk figyelembe vételével, a talajban, a különböző szelén formák felvehetősége a következő sorrendben csökken (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; El-Ramady et al., 2015; Kabata-Pendias és Szteke, 2015):

szelenát>szelenometionin* >szelenocisztein** >szelenit>elemi szelén>szelenid

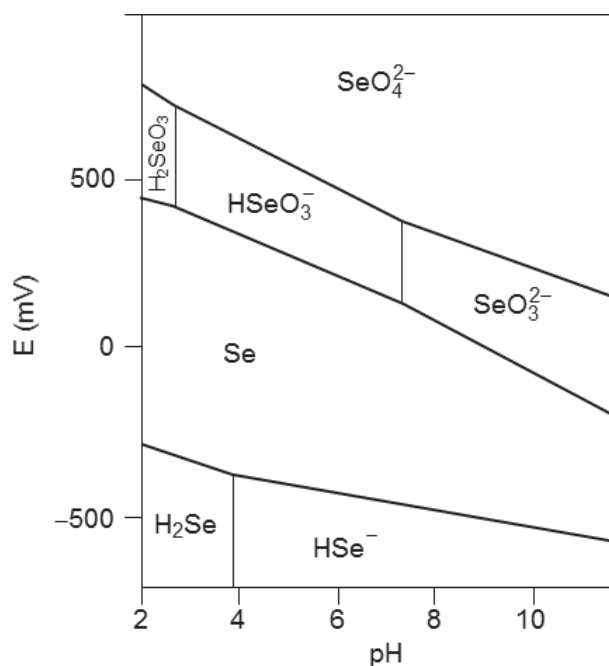
*: szelenometionin (I6):



** : szelenocisztein (I7):



A szelén viselkedését a talajban az aktuális pH és az elektródpotenciál (E) értéke dönti el (7. ábra). A szelén általában könnyen oxidálódik és mobilizálódik a talajban. A szelenit ion stabilnak nevezhető, és könnyen adszorbeálódik mind a talaj ásványokhoz, mind a szervesanyag részecskéihez. Az agyagásványok (különösen a montmorillonit) és a vas-oxidok (különösen a goethit) nagy adszorpciós kapacitással rendelkeznek. A savanyú talajokban a szelén valószínűleg Se(IV) oxidációs állapotban fordul elő, amelyet a vas-oxid adszorbeál, ferri-szelenit $[\text{Fe}_2(\text{OH})_4\text{SeO}_3]$ vagy vas-szelenit (FeSeO_3) formájában. A talajban a szelén legnagyobb mennyisége a pH=3-5 tartományban adszorbeálódik, a pH növekedésekor viszont jelentősen csökken az adszorbeálódott mennyiség. A bázikus talajokban viszont a szelén Se(VI) oxidációs állapotban található, amely nagyon gyengén adszorbeálódik. Ha ez a lúgos pH egy arid vagy szemi-arid körülménnyel párosul, akkor a szelén nagyon mobilis lesz ezekben a régiókban (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).



7. ábra: A szelén megjelenési formái a pH-tól és az elektródpotenciáltól (E) függően (Barker és Pilbeam, 2007; Takeno, 2005)

A szelén oxidációs állapota nagymértékben befolyásolja a talajbani viselkedését. A pH-E hatását a következőképpen lehet összegezni (Kabata-Pendias és Szteke, 2015):

- pH \approx 7, E>400 mV, oxidációs állapot: Se(VI), főbb forma: SeO₄²⁻
- pH>7, E=200-400 mV, oxidációs állapot: Se(VI), főbb forma: SeO₃²⁻
- pH<7, E \approx 200 mV, oxidációs állapot Se(IV), főbb forma: HSeO₄⁻
- pH<3,2, E<-200 mV, oxidációs állapot Se(-II), főbb forma: HSe⁻, H₂Se^o

A szelén fenti szervesetlen formái, az oxidációs állapotuktól függően, változó tulajdonságokat mutatnak, melyek a következők (Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Szteke, 2015):

- A szelenátok [Se(VI)] szervesetlen formái, különösen közel semleges és lúgos kémhatású talajokban mobilisak, valamint nem adszorbeálódnak kristályvizet tartalmazó szeszkvioxidokra (főként a Fe₂O₃·H₂O-ra).
- A szelenitek [(Se(IV))] semleges és savanyú talajokban csak kissé mozgékonyak, valamint könnyen adszorbeálódnak a kristályvizet tartalmazó szeszkvioxidokhoz és a szervesanyagokhoz.
- A szelenidek [(Se(-II))] a savas talajokban, mivel stabilis kötést létesítenek az ásványi anyagokkal és a szerves vegyületekkel, ezért csak nagyon kis mértékben mobilisak.

A fenti oxidációs állapotok közötti dinamikus átalakulást, figyelembe véve, hogy elemi szeléné is alakulhatnak, mindegyik talajban jelen vannak ezek az átalakulások, az általános talajparaméterek között viszont meglehetősen lassú folyamatok. A szelén talajoldatban található anionos formái könnyen mobilizálódnak a talajszelvényben, mely mobilis anionok a következők: SeO₃²⁻ és főként a SeO₄²⁻ (Schrauzer, 2004). Az előbbi anionok közül néhány immobilizálódhat. A szelenit (SeO₃²⁻) a vas-oxidokon adszorbeálódhat és csapadékot képezhet Fe₂(SeO₃)₃ formában.

Lúgos pH értéken a szelén szelenát (SeO_4^{2-}) formában található, és ez az anion kevésbé adszorbeálódik a döntően negatív töltésű talajkolloidokon. Savanyú talajokban viszont a szelén minden bizonnyal Se(IV) oxidációs állapotban fordul elő, és a fentiekben bemutatott módon immobilizálódik a vas-vegyületekkel. Általánosságban elmondható, hogy a növény számára könnyen felvehető szelén tartalom az arid és szemiarid körülmények között lévő, lúgos kémhatású és jól szellőzött talajokban fordul elő.

Szelénhiányos területek például Délkelet-Kínában találhatóak, melyeknél viszonylag jelentősek a szelén hiányok. A területek talaját rendkívül kis oldható szelén tartalom jellemzi, ezáltal az ott termesztett mezőgazdasági növények is rendkívül kevés szelént tartalmaznak (Combs et al., 2001). A fentiek miatt Kína ezen területén kimutatható volt az a két betegség, mely kifejezetten a szelén hiányához köthető: 1.) a Keshan-kór, mely a szívfunkciók működésbeli zavarát okozza főként gyerekeknél és fiatal nőknél, 2.) a Kashin-Beck kór, mely egy csont és ízületi megbetegedés. Ezek a betegségek a szelén hiányos térségekre jellemzőek (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). Hasonló tüneteket tapasztaltak Lengyelországban (Borowska, 1998) és Magyarországon is (Gondi et al., 1992; Combs, 2001; Széles, 2007; Nagy et al., 2010; Bódi et al., 2012). Észak-Európában Finnországban mutattak ki szántóföldi növények termésében alacsony szelén koncentráció értékeket (Eurola, 2005). Ezen kutatásban a búzaszem elemzésekor mindössze csak 10-15 $\mu\text{g kg}^{-1}$ szelént mutattak ki (Aspila, 2005; Ekholm et al., 2005).

A talajokban viszont nem csak kis szelén koncentrációk lehetnek, hanem nagyok is. Általában a nagyobb szelén tartalmak azokban a talajokban figyelhetők meg, amelyek nagy vas-, vagy agyagtartalommal rendelkeznek, vagy amelyek talajképző kőzetét már eredetileg is nagy szelén koncentráció jellemezte (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). A talajok fentiekben említett normál szelén tartalmához (0,1-10 mg kg^{-1}) képest sokkal nagyobb koncentráció értékeket is mérhetünk a szelénben gazdag, ún. seleniferous talajokban, melyek közé tartoznak a különböző palák és a homokkő, valamint a nagy mész- és szervesanyag tartalmú talajok (Fordyce, 2013; Johnson et al., 2010). A termőföld már 1-5 mg kg^{-1} szelén tartalomnál szennyezettnek minősül, 5-10 mg kg^{-1} tartományban közepes, 10 mg kg^{-1} felett erős szennyezésről beszélhetünk (Kádár, 2012). Vannak olyan országok, sőt az országoknak vannak olyan részei, ahol a szelén szintje magasabb, míg más területek viszont szelénben hiányosak. Mayland et al. (1989) szerint, a szelénben gazdag talajon – amelynek a szelén koncentrációja általában 5 és 1200 mg kg^{-1} között van – a vegetáció megközelítően 45 mg kg^{-1} szeléntartalmú. Ezeken a talajokon általában fellelhető a haszonállatok vagy a vadállatok valamilyen mérvű szelén toxicitása is (Aubert és Pinta, 1977; Gupta és Gupta, 1998; Oldfield, 2002). A világ nagy szeléntartalmú régiói között kell megemlíteni a Kínai-alföldet (Yang et al., 1989), Kanadát (Kaur et al., 2014), Mexikó egy részét (Bauer, 1997), a Latin-Amerikai országok egyes részeit, Új-Zélandot és Ausztráliát (Kaur et al., 2014). A Kaliforniában (USA) található Kesterson víztározó környékének kiterjedt vizsgálatát elvégezve 40-70 mg kg^{-1} szelén koncentrációkat állapítottak meg a talajban (Wu et al., 1993). Európában Wales és Írország területeit kell megemlíteni, ahol több helyen toxikus szelén szinteket

jegyezték fel (Fleming, 1962). Angliában és Skóciában is vannak olyan területek, ahol a szarvasmarhák szelén mérgezésének súlyos tüneteit jelentették (Rimmer et al., 1990).

3.2.3.2. A szelén előfordulása a vizekben

A szelén az esővizekben általában $0,04-1,7 \text{ g dm}^{-3}$ koncentrációban található, a sarki jegék viszont, amelyekben a múlt tisztább körülményeit találjuk lefagyasztva, $0,02 \mu\text{g dm}^{-3}$ koncentrációjú a szelén. Reimann és de Caritat (1998) szerint, ha egy olyan területen mérjük meg az esővíz szelén tartalmát, amely távol található az ipari területektől, akkor többnyire $0,5 \text{ g dm}^{-3}$ értéket mérhetünk. Így pl. a Kola-félszigeten, és ha mindinkább megközelítünk egy ipari területet, annál inkább a $0,9 \text{ g dm}^{-3}$ maximális szelén tartalmat érzük el. Eriksson (2001) a svédországi csapadékvizekben $0,15-0,26 \text{ g dm}^{-3}$ szelén tartalmakat állapított meg. Kabata-Pendias és Szteke (2015) szerint az esővizek fő szelén forrása a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből és vulkánkitörésekből származik.

A folyóvizek átlagos szelén koncentrációja többnyire $0,07 \text{ g dm}^{-3}$, de ettől az értéktől valamivel kisebb (min. $0,05 \text{ g dm}^{-3}$) és sokkal nagyobb szelén tartalmak is előfordulnak (max. $22,0 \text{ g dm}^{-3}$) (Gaillardet et al., 2003; Gaillardet et al., 2014). A nagyobb szelén tartalmak döntő hányada ipari létesítményekből származik; például a San Francisco-öbölben található szelén koncentráció kialakulásához 75%-ban az olajfinomítók járulnak hozzá (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). A szénbányákból származó vizek is viszonylag nagyobb mennyiségű szelént tartalmaznak, főként dimetil-szelenid $[(\text{CH}_3)_2\text{Se}]$ formában.

A csapvizekben oldott szelén mennyisége általában kisebb mint $10 \mu\text{g dm}^{-3}$, de időnként több is lehet mint $50 \mu\text{g dm}^{-3}$. A kínai csapvizekben mértek már $50-160 \mu\text{g dm}^{-3}$ szelén tartalmakat is (WHO, 2011c; El-Ramady et al., 2015). Az Európai Unió országaiban palackozott vizek szelén tartalma $0,036 \text{ g dm}^{-3}$, a csapvizek szelén tartalma ehhez képest megközelítően háromszoros, átlagban $0,115 \text{ g dm}^{-3}$ (WHO, 2011c; Birke et al., 2010). Kabata-Pendias and Mukherjee (2007) az emberek számára való ivóvízben maximálisan $10 \mu\text{g dm}^{-3}$ szelént, míg az állatok számára $50 \mu\text{g dm}^{-3}$ értéket javasol, valamint az öntözővizekben legfeljebb $20 \mu\text{g dm}^{-3}$ szelén tartalom a megfelelő.

Az édesvizekben lévő $20 \mu\text{g dm}^{-3}$, valamint a tengervízben található $300 \mu\text{g dm}^{-3}$ szelén tartalom akut veszélyt jelent a vízi növény- és állatvilágra. A viszonylag nagyobb koncentráció általában toxikus a halakra. A legellenállóbb faj a lazac, amelynek a toxikusság határa nagyjából $1000 \mu\text{g kg}^{-1}$ szelén tartalom (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

A tengerek és óceánok vizében a szelén koncentrációja általában a $0,1-0,35 \text{ g dm}^{-3}$ tartományba esik (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; Reimann és de Caritat, 1998).

A talajvizek általában több szelént tartalmaznak, mint amennyi a felszíni vizekben található. A talajvizek szelén tartalma $0,25-1,8 \text{ g dm}^{-3}$ tartományban található, ha a mintavételi hely közel esik egy kémiai üzemhez. Különösen magas szelén koncentrációkat szelénben gazdag talajképző kőzeteknél találhatunk, amely akár $1000 \mu\text{g dm}^{-3}$ szelén koncentrációt is eredményezhet a

talajvízben. Aszályos területeken, mint például az Egyesült Államok, Kína, Pakisztán és Venezuela egyes részein, a szelén tartalom még a $2000 \mu\text{g dm}^{-3}$ értéket is elérheti (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). El-Ramady et al. (2015) szerint a felszíni és talajvizekben a szelén koncentrációja elérheti a $6000 \mu\text{g dm}^{-3}$ értéket is. A patakok, folyóvizek és üledékek magasabb szelén szintjeit olyan talajok közelében mérték, amelyek szelénben gazdag (seleniferous) talajokon találhatók. Haygarth (1994) a finnországi folyóvizek és üledékek szelén tartalmát vizsgálva megállapította, hogy Finnországban az 1984-es szelén trágyázást követően a szelén koncentráció a folyóvizekben legfeljebb $180 \mu\text{g dm}^{-3}$, üledékekben pedig maximum 4 mg kg^{-1} lehet (Haygarth, 1994).

3.2.3.3. A szelén előfordulása a levegőben

A légkörben található szelén koncentráció rendkívül változó, mely a következő forrásokból származik: 1.) az óceánokból és tengerekből való gázhalmazállapotú szelén kigőzölgése, 2.) a vulkáni kitörésekkor az atmoszférába kerülő szelén mennyisége és 3.) az ipari termelésnél a légkörbe kerülő szennyező szelénkibocsátás (Kabata-Pendias és Szteke, 2015; Combs, 2001). A nyersolaj szelén tartalma általában kisebb mint $0,35 \text{ mg dm}^{-3}$. Az 1960-as évek végén készült felmérés célja a fosszilis tüzelőanyagok szelén tartalmának a vizsgálata volt (Combs, 2001). A fosszilis tüzelőanyagok általában nem tartalmazzak túl sok szelént, de az USA néhány államában mégis találtak olyan szenet, melyben $1-5 \text{ mg kg}^{-1}$ szelén volt, sőt Kína Hubei tartomány Enshi megyéjében volt olyan szén, mely analízisének eredménye 90000 mg kg^{-1} szelén volt. Mivel ez az érték extrém magas, így kb. 15 évvel később egy alaposabb vizsgálatot végeztek. A fenti kínai tartományban újból megvizsgálták több szénminta szelén tartalmát, melynek eredménye általában 300 mg kg^{-1} volt, de néhány szén mintára 80000 mg kg^{-1} értéket is kaptak (Yang et al., 1983). Huang et al. (2013) a gabonanövények szelén tartalmának 40 éves változását vizsgálta. Megelemeztek többek között, a szén hamuminták szelén koncentrációját is, amelyeket korábban a mezőgazdasági termelésben hasznosítottak és ezekre maximum 8390 mg kg^{-1} értékeket találtak. A fenti extrém magas értékek is hozzájárulnak a lakó- és iparterületek környezetében található levegő szelén koncentrációjához, mely $0,08-30,0 \text{ ng m}^{-3}$ lehet, míg a Déli sarkon ugyanez csupán $0,06 \text{ ng m}^{-3}$ (Reimann és de Caritat, 1998). A szelén toxikózis megjelenésével megközelítőn $1000000 \text{ ng m}^{-3}$, azaz 1 mg m^{-3} koncentrációtól kell számolnunk (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

A tengeri aeroszolokban az illékony szerveskötésű szelén-vegyületek dúsulása valósul meg, melyek között elsősorban a dimetil-szeleniddel $[(\text{CH}_3)_2\text{Se}]$ kell számolnunk. Az illékony szelén komponensek között kell megemlíteni a dimetil-diszelenidet $(\text{CH}_3\text{-Se-Se-CH}_3)$ is, amely szintén képződik. Berg és Steinnes (1997) mohaminták több éves vizsgálatával mutatták ki, hogy a tengervízből kigőzölgő szerves kötésű szelén hozzájárul a mohák szelén tartalmának időbeli növekedéséhez. A skandináv országokban a mohák szelén tartalma $390-2900 \mu\text{g kg}^{-1}$ tartományban található (Berg és Steinnes, 1997). A légkörből való direkt szelén akkumulációt legjobban a gyökér nélküli gombák jelzik (a szelén koncentrációjuk akár $20000 \mu\text{g kg}^{-1}$ is lehet). Számos növény nem csak a gyökéren keresztül képes a szelén megkötésére, hanem a levél

felületen keresztül is. Haygarth (1994), valamint Kabata-Pendias (2011) szerint a légköri szelén megkötésének aránya, egyes növényeknél, akár elérheti a 80%-os értéket is. Viszont Combs (2001) szerint az árpa-, a paradicsom-, a retek és a lóhere hajtása összes szelén tartalmának csupán 2%-a származott a légkörből, mely eredetileg dimetil-szelenid volt.

3.2.3.4. A szelén előfordulása és szerepe a növényekben

A növények szelén szükséglete fajspecifikus, néhány növény viszonylag nagy mennyiséget igényel, míg mások fejlődéséhez látszólag nem is szükséges szelén. A növények nagy része igen alacsony szelén koncentrációval rendelkezik ($25-100 \mu\text{g kg}^{-1}$), más növények viszont kiválóan képesek a szelén akkumulálására, normál termesztési körülmények között akár $1000 \mu\text{g kg}^{-1}$ szintig, ami az emberi és állati szervezetre is mérgező lehet (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

A különböző országokban termesztett búzaszemek szelén tartalma nagyon különböző értékeket mutat: Algéria 920, Egyiptom 340, Egyesült Államok 297, Finnország 142, Lengyelország 42, Franciaország 36, Norvégia 33, Ausztrália 23, Kanada 21 és Svédország $14 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias és Szteke, 2015). A csapadékosabb országok gabonájához képest, általában a kevésbé csapadékos országokban magasabb a gabonafélék szelén tartalma. Időnként a takarmánynövények szelén tartalma is aggodalomra adhat okot. A hüvelyes növények általában több szelént tartalmaznak, mint a fűminták. A különböző országokból származó fűvek átlagos szelén tartalma $13-350 \mu\text{g kg}^{-1}$, míg a lóhere és a lucerna szelén tartalma $15-672 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Oldfield, 2002). A növények között a legmagasabb szelén koncentráció a brazil dióban (vagy más néven, paradióban) van, melynek tartománya $200-253000 \mu\text{g kg}^{-1}$, nedves tömegre számolva. Abban a brazil dióban van nagyobb szelén tartalom, amelyet vulkánkitörésből származó szelénben gazdag mészlepedékes talajon termesztettek. Emellett a kókuszdió is viszonylag nagy mennyiségű (megközelítően $700 \mu\text{g kg}^{-1}$, nedves tömeg) szelént tartalmaz (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

Mivel a szelén nagy jelentőségű a különböző állatok táplálkozásában és a metabolikus folyamatokban (Schwarz és Foltz, 1957; Patterson et al., 1957; Reilly, 2004; Gropper és Smith, 2012), ezért nagyszámú kutatás foglalkozott a szelénnel, amelyekben a növényfajok szelén akkumulációs sajátságát is figyelembe vették (Brown és Shrift, 1982; Adriano, 2001; Kabata-Pendias és Szteke, 2015). A növények szelén akkumulációs képessége rendkívüli változatosságot mutat, így ez alapján a növényeket három csoportra oszthatjuk (Rosenfeld és Beath, 1964; Robb és Pierpoint, 1983; Adriano, 2001; Kabata-Pendias és Szteke, 2015):

1. Az elsődleges indikátor, vagy más néven akkumulátornövények azok, amelyek nagy mennyiségű szelént tartalmaznak ($1000-10000 \text{ mg kg}^{-1}$ sz.a.) és úgy tűnik, hogy a növekedésükhöz szelén szükséges. Ezek közé olyan növények tartoznak, melyek a következő nemzetségekbe tartoznak: *Astragalus*, *Machaeranthera*, *Haplopappus*, *Stanleya*, *Morinda* és főként a legelőkön található meg (Fordyce, 2013). A szelén a növényi szövetekben elsősorban szervetlen formában van jelen. Az állatállomány által elfogyasztott növények, kergekór formájában szelén mérgezést képesek okozni. Broadley et al. (2006) és Christophersen et al. (2013) szerint az elsődleges indikátor növényekben a szelén tartalom akár 40000 mg kg^{-1} is lehet.

2. A másodlagos indikátor növények a szelént, nagy oldható szeléntartalmú talajokból megközelítően 100-1000 mg kg⁻¹ koncentrációban képesek felhalmozni a szervezetükben, és úgy tűnik, hogy nem igényelnek szelént a növekedésükhöz. Ebbe a csoportba például az *Astragalus*, *Atriplex*, *Castilleja*, *Grindelia*, *Gutierrezia*, *Machaeranthera* és *Mentzelia* nemzetségű növények tartoznak (Fordyce, 2013). A szelén nagy része ezekben a növényekben szelenátként fordul elő, és csak kisebb mennyisége található szerves kötésben. Ezek a növények akut vagy krónikus szelenózist képesek okozni az állatállományban.

3. A nem akkumulátorok, amely növények közé a legtöbb szántóföldi növénykultúra (gabonafélék) és a fűfélék tartoznak. Általában alacsony szelén tartalom jellemzi ezeket a növényeket (<30 mg kg⁻¹).

Fordyce (2013) a jól akkumulálók közé sorolja a következő növényeket: brokkoli, retek, zsázsa, káposzta, tarlórépa, repce, mustár, hagyma, vörös és fehér lóhere, borsó, valamint a napraforgó, míg a nem akkumulátornövények közé pedig a saláta, a százszorszép, az articsóka, a kakasláb, az angol perje, a búza, a zab, az árpa, a paszternák és a sárgarépa tartozik.

A növények szelén tartalmát a növény fajtája (pl. szelén akkumulációs képessége), növekedési állapota, különböző talaj paraméterek (pl. szelénellátottság, szervesanyag-tartalom, pH), klimatikus viszonyok (pl. a csapadék mennyisége) és a szelén adott kémiai formája határozza meg (El-Ramady et al., 2015). Zhao et al. (2005) szerint csak a biológiailag elérhető formákat képes a növény felvenni a környezetből. A talaj szervesanyagához kötött szelén nem mobilis és csak egyes indikátor fajok számára felvehető. Ezek a növények szelén transzformátorok, mivel elhalásuk után kiváló szelén forrásul szolgálhatnak a többi növényfaj számára (Kádár, 1998).

Simon (1999) szerint a magasabbrendű növények számára a szelén kis koncentrációban stimulatív, kedvező hatású mikroelem, de nem esszenciális. Kádár (1998) szerint az előregedő növényekben a szelén koncentráció gyakran a tizedére csökken.

Bár tudjuk, hogy a szelén néhány növény kivételével nem esszenciális a növények számára, amennyiben viszont megfelelő mennyiségű szelént adagolunk a talajokhoz, akkor biztosíthatjuk azt a szelén mennyiséget a táplálkozásunkhoz, amelyet végső soron az élelmiszerek és a takarmánynövények fognak közvetíteni. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a periódusos rendszerben a szelén az az elem, amely a legszűkebb koncentráció tartománnyal rendelkezik, azaz a legkisebb a különbség azon koncentráció értékek között, amelyek a humán táplálkozásban hiánytünetet vagy toxicitást okoznak. Mivel a táplálkozásunkban a szántóföldi növények adják a döntő hányadot, ezért az utóbbi időben számos kutatási eredmény jelent meg az élelmiszeriparban és a takarmányozásban használt növények (főként a gabonafélék) szelén tartalmával kapcsolatban. Fordyce (2005, 2013) és Morrison (2015) a növényekben található, különböző szelén vegyületek anti-karcinogén hatását vizsgálták.

Számos országban a szelénhiány csökkentésére, nátrium-szelenát levéltrágyát javasolnak, aeroszol formájában. Mivel a szelén-sók mérgező tulajdonságúak lehetnek, ezért a gyakorlatban óvatosan kell eljárni (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

Számos tényező hatással van a növények szelén felvételére. A növények akkor képesek viszonylag könnyen felvenni a szelént, ha a növény számára elérhető frakcióban, azaz a talajoldatban található. A legtöbb esetben lineáris összefüggés fedezhető fel a növényi szövetekben lévő szelén tartalom és a talaj szelén tartalma, valamint a talaj pH-ja között. A szelén felvételét nagymértékben a növény típusa (szelén akkumulációs képessége) határozza meg, a legnagyobb mennyiségű szelén felvétele pedig a lúgos talajokban lehetséges (Fordyce, 2005, 2013). A talajhoz hozzáadott szelén formája (szennyeződésként vagy kiegészítésként), valamint a különböző növényi és talaj tényezők jelentős hatással vannak a talajban oldható szelén-specieszek típusára és ezáltal a növények felvételére. Különösen a rizoszféra mikrobák és bizonyos növények gyökerei vannak hatással a szelenometionin képződésére, amely pedig a szelén hozzáférhetőségét és a fitovolatilizációját befolyásolja. Néhány specifikus gyökér-talaj kölcsönhatásban a *Rhizobium* baktériumok és a gyökérexudátumok elősegítik a SeO_3^{2-} oxidációját SeO_4^{2-} -tá, amely folyamatok növelik a szelén hozzáférhetőségét a növények számára (Ríos et al., 2008). A növények a szerves szeléntartalmú vegyületet szerves szeléntartalmú vegyületté alakítják át, így az emberi szervezet számára is felhasználhatóvá válik (Bankhofer, 1994). Kádár (1995) szerint a növény egy sajátos szűrőrendszert képez, amely eredményeként a szelén koncentráció a következő növényi részekben csökkenő tendenciát mutat: gyökér, fiatal hajtás, levél, szár és a szemtermés.

A növények az összes mobilis szelén formát képesek viszonylag könnyen felvenni, amely elemfelvétel a víz tömegáramával valósul meg. A növények csak a szelenátokat és a szerves szeléneket metabolizálják. A szerves szelén vegyületeket a növények általában könnyebben be tudják építeni a szervezetükbe, valamint a szelenometionin könnyebben szállítható a növényi szövetekben, mint a szerves szelén formák. A szelén felvétel mechanizmusa és metabolizációja hasonlóképpen megy végbe, mint a kéné (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

Bár ezidáig nem ismert olyan kutatási eredmény, mely a növényekben a szerves szelén vegyületek esszencialitását bizonyította volna, a növényekben a szelén fehérjék szintézisével viszont számos kutatás foglalkozott (Terry et al., 2000). A különböző növények számos szerveskötésű szelén vegyület, pl. a szeleno-aminosavak szintézisére képesek, melyek képződését leginkább a glutation-peroxidáz enzimmel hozzák összefüggésbe. A szeleno-aminosavak közül, a szelenometionin (SeMet) a gabonafélék és a hüvelyes növények magjaiban az uralkodó szelén forma, míg a zöldségekben a szeleno-metilszelenocisztein (SeMSC) található a legnagyobb koncentrációban. A SeMSC, amely a leghatásosabb szelén vegyület, főként a fokhagymában, a brokkoliban és a kelbimbóban van jelen (Lyi et al., 2005). A növények által felvett szelén akár 75% arányban oldhatatlan fehérjékben található. A szelén különböző vegyületek formájában számos anyagcsere-folyamatra hatással van, pl. a glutation-peroxidáz enzim aktivitását növelheti, míg a szuperoxid-dizmutázét (SOD) csökkentheti (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

A nagy mennyiségű szelenát (SeO_4^{2-}) és szelenit (SeO_3^{2-}) a legtöbb növényre mérgező, mely a következő három tényező kombinált hatásának tulajdonítható: 1.) a növények gyökerei a szelenátot és a szelenitet is könnyen felvehetik a talajból és könnyen transzlokálódnak a növény további részeibe, 2.) ezek az anionok szerves szelén vegyületekké alakíthatók az anyagcsere-

reakciókban, 3.) az olyan szerves szelén metabolitok, amelyek az esszenciális kén-vegyületek analógjai, zavarják a sejtek biokémiai reakcióit (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

A szelén esszenciális elem az állatok számára, viszont a növények nem feltétlenül igénylik a fejlődésükhöz (White és Brown, 2010). Meg kell említeni, hogy a szelén kis koncentrációja csökkenti a növényi szövetekben a különböző környezeti tényezők által okozott oxidatív stresszeket, valamint a szelén nagyobb koncentrációja védheti a növényeket a növényevők és a kórokozók ellen (El Mehdawi és Pilon-Smits, 2012). A növényi szövetekben jelenlévő túl magas koncentrációjú szelén viszont a legtöbb növényre mérgező hatású és csak olyan növényfajok képesek ezt tolerálni, amelyek képesek a szelénben gazdag talajok szelén tartalmát megfelelő módon kezelni (Rosenfeld és Beath, 1964; Brown és Shrift, 1982). A szelén-hiperakkumulátor fajok viszonylag nagy szelén tartalmat (nagyobb mint 1 mg g^{-1} sz.a.) is képesek tolerálni a növényi szöveikben (Brown és Shrift 1982; White et al., 2004; Cappa és Pilon-Smits, 2014; White, 2015, 2017). A szelén fölöslege növekedésgátlást idéz elő, klorótikus tünetek alakulnak ki, feltételezhetően a növények kénanyagcseréjét zavarja meg (Simon, 1999).

3.2.3.5. Szelén hiánytünet és toxicitás megjelenése a növényekben

A szelén felvételét, ezáltal a szelén hiány kialakulását vagy a toxicitását (szelenózis) számos tényező befolyásolja, amelyek közül a fontosabbak: a növény típusa, a termesztési tápközegben a szelén formája, valamint a kompetitív ionok, például a szulfát és a foszfát koncentrációja (Adriano, 1986; Gupta és Gupta, 2017). Lehetőségünk van a növények számára felvehető szelén tartalmat a modern mezőgazdasági gyakorlatban alkalmazott technikákkal módosítani, pl. szelén tartalom csökkenést is előidézni, amelyek végül az állati takarmányok szelénhiányát is eredményezheti. A mezőgazdasági gyakorlatban alkalmazott termesztési tényezőkön kívül más paraméterek is meghatározzák a felvehető szelén tartalmat, például a nitrogén-, kén- és foszfortartalmú műtrágyák mindegyike különböző hatásmechanizmusokon keresztül befolyásolja a növények szelén felvételét. Ezen műtrágyák alkalmazása a felvehető szelén mennyiségét csökkenti. A talajban lévő összes kén (szulfát formájában) tartalom növekedése, amelyet a savas esők, a műtrágyák és egyéb más források idéznek elő, a szelén növény általi felvételét gátolja. A fentiekén túlmenően, a humán táplálékokban, valamint a takarmányokban lévő különböző nehézfémek (pl. a réz, a cink, az ezüst és a higany) viszonylag magas koncentráció szintje is az emberek és az állatok szelénhiányához járul hozzá, amelyet feltételezhetően a biológiailag kevésbé felvehető formák (fém-szelén kötések) kialakulásával lehet magyarázni (Eisler, 2007).

A növény fejlődése közben kialakuló szelén toxicitás leggyakrabban enyhe klorózissal, a fehérjeszintézis és a szárazanyag-termelés csökkenésével, valamint a levelek sorvadásával és száradásával jár (Mengel és Kirkby, 1987). A szelén toxicitás az idősebb leveleken klorótikus foltokként jelenik meg, amely levelek idővel tovább fakulnak. A gyökereken áttetsző rózsaszínű elváltozás is előfordulhat (Wu, 1994b), sőt az is elképzelhető, hogy a növény szelén toxicitását a kén hiányra jellemző tünetek mutatják (Barker és Pilbeam, 2007).

A növényekben a szelén toxikus hatása egyrészt a kén anyagcsere zavarában, másrészt az oxidatív stressz változásában nyilvánul meg (Van Hoewyk, 2013). A legtöbb növényfaj esetén a szeleno-aminosavak a nekik megfelelő kéntartalmú aminosavak helyére lépnek be és ezen keresztül épülnek be a fehérjékbe (Barker és Pilbeam, 2007). A szelén által indukált oxidatív stressz vizsgálata során, számos kutató emelkedett antioxidáns enzim aktivitást és a reaktív oxigén formák (ROS) nagyobb koncentrációját mérték (Tamaoki et al., 2008; Akbulut és Çakir, 2010; Schiavon et al., 2012). Ezenkívül szelén stressz hatására (50 μM szelenát hatására, 2 óra alatt, két nagyságrenddel) a növényben mért glutation koncentráció csökken (Hugouvieux et al., 2009), míg a szelén-toleráns növényekben növekszik (Grant et al., 2011). A nem akkumulátornövényeknél a két szélső értéket a rizs és a fehér lóhere (*Trifolium repens* L.) képviseli. 10%-os terméscsökkenés következett be akkor, amennyiben a rizs hajtásában 2 mg kg^{-1} , a fehér lóhere hajtásában pedig 330 mg kg^{-1} szelén koncentráció volt mérhető (Barker és Pilbeam, 2007). A szelénben gazdag területeken található vadon termő növények viszont már alkalmazkodtak a nagy szelén tartalmú körülményekhez. Az elsődleges indikátor növények, Kaur et al. (2014) szerint 4000, Barker és Pilbeam (2007) és El-Ramady et al. (2015) publikációi alapján 10000, valamint Terry et al. (2000) és Németh (2015) szerint 15000 mg kg^{-1} szelént képesek akkumulálni a szervezetükben, és különböző biokémiai eszközeik segítségével képesek elkerülni a toxicitás kialakulását.

3.2.3.6. Élelmiszereink szelén tartalma

Az emberek többsége a szelént csupán az élelmiszerekkel viszik be a szervezetükbe. Számos kutatás bizonyította már, hogy a felvett szelén mennyisége nagymértékben függ attól, hogy a táplálkozással elfogyasztott növényeket hol termesztik, az állatokat hol, hogyan táplálják, mennyi a talaj felvehető szelén tartalma és milyen az elfogyasztott élelmiszerek mennyisége, összetétele (El-Ramady et al., 2015). A szérum szelén szintjénél, a teljes vér szelén szintje jobban tükrözi az adott személy aktuális szelén állapotát (Kłapcińska et al., 2006). Figyelembe véve az emberi vérminták szelén tartalmát, általában a tengerparti populációk szelén szintje magasabb, mint a kontinensen belül élőké, ezért joggal feltételezhetjük, hogy a tenger gyümölcsei igen jelentős szelén tartalommal rendelkeznek (Sager, 2006). Svédországban, ahol a talaj szelén tartalma alacsony és a táplálkozásuk elsődleges forrása a hús és a hal, a halat fogyasztók (91 $\mu\text{g dm}^{-3}$) és a nem halfogyasztók (80 $\mu\text{g dm}^{-3}$) plazma szelén tartalma között szignifikáns különbséget állapítottak meg (Svensson, 1992). Vegyes táplálkozási szokásokat feltételezve, a szelén felvétel határfoka körülbelül 80% (Sager, 2006; Rayman et al., 2008). A szelén átlagos napi beviteli mennyisége Új-Zélandon megközelítően 6-70, Svédországban 44, Olaszországban 43, Németországban 38-48, Nagy-Britanniában 31-60 $\mu\text{g nap}^{-1}$, míg az USA-ban 60-150, Görögországban 110, Kanadában pedig 98-224 $\mu\text{g nap}^{-1}$. Az előző értékek mellett meg kell említenünk Kínát, ahol a 3.2.3.1. alfejezetben részletezett okok miatt nagyon széles a tartomány, 11-116 $\mu\text{g nap}^{-1}$ (Barclay et al., 1995). A másik különleges eset pedig Finnország, ahol az 1984-ben bevezetett szelén szint növelési programnak köszönhetően (lásd 3.2.3.1. alfejezet), az átlagos szelén bevitel 30 $\mu\text{g nap}^{-1}$ -ről (1976) 113 $\mu\text{g nap}^{-1}$ -ra (1986) emelkedett (Eurola et al., 2003).

Az elfogyasztott élelmiszerfajták összetétele jelentősen befolyásolja a szelén biológiai hasznosulását. A szelén felvétel hatásfoka általában viszonylag magas, amely értéket a sertéshús ($94\pm 2\%$) (Bügel et al., 2004), a hal ($86,2-90,4\%$) (Fox et al., 2004), valamint a tejalapú anyatej-helyettesítő tápszerek ($73,4-97,1\%$) (Van Dael et al., 2002) és a tojások ($54,1-85\%$) (Preedy, 2015) szelén biohasznosulása reprezentál. A brokkoli, a csirkehús és a tej szelén tartalmának biohasznosulása már kisebb érték, megközelítően 70%-os (Preedy, 2015; Christensen et al., 1983; Chen et al., 2004) és még ezektől is kisebb érték mutatkozott az élesztő esetén ($53,5-59,3\%$) (Fox et al., 2004). A legalacsonyabb szelén felvételi arányt viszont a szelenit mutatta ($34,7-37,6\%$).

A szelén az élelmiszerekben elsősorban szeleno-aminosavak, szelenometionin (főként a gabonafélékben) és szelenocisztein (állati termékekben) formában van jelen. Egyes növényeknél, például a káposztában, a céklában és a fokhagymában, szelenát formában is előfordul, amelyekben a szerves szelén az összes szelén maximum 50%-át teszi ki (ATSDR, 1996; Reilly, 2004).

A növényekben és az állatokban kis és nagy molekulatömegű szerves szelén vegyületek is megtalálhatók. A legfontosabb kis molekulatömegű szerves szelén vegyületek, melyek mind a növényekben, mind az állatokban előfordulnak, a következők: a $\text{H-Se-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ (szelenocisztein), a $\text{CH}_3\text{-Se-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ (szelenometionin), a $\text{CH}_3\text{-Se-CH}_3$ (dimetil-szelén) és a $\text{CH}_3\text{-Se-Se-CH}_3$ (dimetil-diszelén). A növényekben megtalálható kis molekulatömegű szerves szelén vegyületek közé tartozik a $\text{CH}_3\text{-Se-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ (metil-szelenocisztein), a $\text{HOOC-CH(NH}_2\text{)-NH}_2\text{-CH}_2\text{-Se-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$, az $\text{(NH}_2\text{)-COOH}$ (szelenocisztin) és $\text{HOOC-CH(NH}_2\text{)-(CH}_2\text{)}_2\text{-Se-Se(CH}_2\text{)}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$. Az állatokban megtalálható kis molekulatömegű szerves szelén vegyületek közé pedig a $\text{(CH}_3\text{)}_3\text{Se}^+$ (trimetil-szelén) tartozik. A nagy molekulatömegű szerves szeléntartalmú vegyületek közé a GSHPx (glutathion-peroxidáz) és a szelenoprotein P tartozik, az állatokban pedig a szeleno-tRNS található meg.

A hús, a csirke, a hal és a tojás olyan fehérjedús élelmiszerek, amelyeknek magas a szelén tartalma (Klapeck et al., 2004; Sirichakwal et al., 2005). Ventura et al. (2007) az előbbi élelmiszer csoportok szelén tartalmára $87,6-737 \text{ ng g}^{-1}$ koncentráció tartományt állapított meg. Ezekben belül a hal és a tojás képviseli a legmagasabb szelén koncentrációt ($123-450 \text{ ng g}^{-1}$) (Sirichakwal et al., 2005; Pappa et al., 2006). A különböző mintavételi helyekről származó halakra változó szelén tartalmakat állapítottak meg, ami Görögországban $62,7-506,7 \text{ ng g}^{-1}$ (Pappa et al., 2006), Ausztráliában pedig $120-632 \text{ ng g}^{-1}$ (McNaughton és Marks, 2002). Navarro-Alarcon és Cabrera-Vique (2008) szerint a húskészítményekben a szelén szintje $55,0-329 \text{ ng g}^{-1}$ közötti értékeket mutat. Az állatok hújának szelén tartalma nagy eltéréseket mutat, amely azt tükrözi, hogy az állatok különböző szelén koncentrációjú takarmányokat fogyasztanak (McNaughton és Marks, 2002; Pappa et al., 2006). Pappa et al. (2006) a görög piacokon beszerzett húsokat vizsgálva úgy találták, hogy a sertéshúsok ($94,1\pm 4,1 \text{ ng g}^{-1}$) szignifikánsan magasabb szelén koncentrációval rendelkeztek, mint a marhahúsok ($48,8\pm 8,6 \text{ ng g}^{-1}$).

Tej és tejtermékek szelén tartalmát értékelve, Pappa et al. (2006) vizsgálatai alapján megállapíthatjuk, hogy a tej szelén koncentrációja negatív korrelációt mutat a zsírtartalmával, valamint a különböző állatfajoktól származó tejminták szelén koncentrációja a következő sorrendet mutatja: humán = juh > kecske > tehéntej. Zamberlin et al. (2012) elem tartalmi vizsgálatai viszont nem az iménti sorrendet mutatták, szerintük a következő sorrend állítható fel: humán tej ($10\text{-}53 \text{ ng g}^{-1}$) > tehéntej ($13\text{-}17 \text{ ng g}^{-1}$) > juhtej (9 ng g^{-1}) > kecsketej (7 ng g^{-1}). Barclay et al. (1995) 18 féle sajt szelén tartalmát határozták meg és azt találták, hogy a legjobb, de negatív korreláció a sajtok zsírtartalmával volt felfedezhető. Minél magasabb volt a sajt zsírtartalma, annál nagyobb volt a szelén tartalma. A legkisebb szelén tartalommal az alacsony zsírtartalmú Fromage Frais (19 ng g^{-1}) sajt rendelkezett, míg a legnagyobb szelén koncentrációt a Parmesan és az alacsony zsírtartalmú Cheddar sajtokban mérték ($110\text{-}120 \text{ ng g}^{-1}$).

A gyümölcsökhöz tartozó növények fehérje tartalma alacsony, víztartalmuk magas, ennek következtében a gyümölcsök szelén koncentrációja alacsony. Hasonló paraméterek jellemzik a friss zöldségek szelén tartalmát is (Sirichakwal et al., 2005). Ventura et al. (2007) a fentieknek megfelelő szelén adatokat publikált a Portugáliából származó gyümölcsök és zöldségek szelén tartalmára vonatkozóan ($1,7\text{-}24,9 \text{ ng g}^{-1}$). Ismeretes azonban, hogy a *Brassica* nemzetségű növények (pl. a brokkoli, kelbimbó, káposzta, kelkáposzta, karfiol, karalábé és a mustár), valamint a hagyma, a fokhagyma és a snidling, magasabb szelén tartalommal rendelkeznek (Ip és Ganther, 1994; Dumont et al., 2006; Kápolna és Fodor, 2007). Ez annak tudható be, hogy ezek a növények nagyobb mennyiségben tartalmazzák mind a kén tartalmú aminosavakat, mind ezek származékait. Ezekben a növényekben a szelén képes a kén helyére beépülni, ami magasabb szelén tartalmat eredményez (Ip és Ganther, 1994). A gombák közül nem mindegyik gomba képes a szelén akkumulációjára, Manjusha et al. (2007) viszont a gomba vizsgálatánál viszonylag magas szelén tartalmat (1340 ng g^{-1}) határoztak meg.

Pappa et al. (2006) $24,4\text{-}443,9 \text{ ng g}^{-1}$ közötti szelén tartalmat mértek a görögországi hüvelyes növényekben, amelyek között a lencse képviselte a legmagasabb szelén értéket.

A diófélék között a mandula a legszegényebb, míg a pisztácia a leggazdagabb szelén forrás. Általában elmondható, hogy a diófélék szelén koncentrációja $7,0$ és $32,3 \text{ ng g}^{-1}$ közötti értékeket mutatott. A fehérjében gazdag diófélékben (pl. a pisztáciában és a dióban) viszonylag magas a szelén koncentráció (Ip és Ganther, 1994; Dumont et al., 2006). Manjusha et al., (2007) brazil dió (más néven paradió) (*Bertholletia excelsa*) szelén tartalmára, amely főként szelenometionint tartalmaz, 3800 ng g^{-1} értéket állapítottak meg. Dumont et al. (2006) mérései alapján egy darab brazil dió elfogyasztása is meghaladhatja a szelén napi ajánlott mennyiségét.

Dumont et al. (2006) a gabonafélék szelén tartalmának, nyers tömegre vonatkoztatott értékét, $10\text{-}550 \text{ ng g}^{-1}$ koncentráció tartományban állapították meg. Marro (1996) szerint, a szelén a fehér kenyérben $80\text{-}109 \text{ ng g}^{-1}$, míg a teljes kiőrlésű kenyérben $100\text{-}152 \text{ ng g}^{-1}$ tartományban található. Pappa et al. (2006) viszont 70 és $131,8 \text{ ng g}^{-1}$ szelén koncentrációt állapítottak meg.

Singh és Garg (2006) indiai fűszerekben határozták meg a szelén tartalmát, amely 12-670 ng g⁻¹ közötti értékeket mutatott. Az egyik legmagasabb érték a kurkumában (500 ng g⁻¹) volt megtalálható. Mivel a kurkuma alapvető fűszere az indiai konyhának (a legtöbb ételükben megtalálható), valószínűleg ez is hozzájárul ahhoz, hogy India lakossága a vérérum szelén szintje alapján a harmadik legjobb helyet foglalja el (Comb, 2001).

3.2.3.7. A szelén előfordulása és szerepe az állatokban és az emberekben

A szelén a szervezetünk nélkülözhetetlen nyomeleme. Schwarz és Foltz (1957) patkányokon végzett kísérletükkel bebizonyították, hogy a szelén létfontosságú elem, mert a májzsugor szelén adagolásával megszüntethető. 15 évvel később feltételezték, hogy a glutation-peroxidáz az első olyan enzim, amely valószínűleg egy szelenoprotein (Woollins és Laitinen, 2011). Ennek a hipotézisnek az igazolása 1973-ban történt meg, amikor megállapították, hogy a szelénnek a glutation-peroxidáz enzim egyik nélkülözhetetlen elemének kell lennie (Flohé et al., 1973; Rotruck et al., 1973). A glutation-peroxidáz enzim egyrészt a sejtek anyagcseréje során keletkező szabad gyökök hatástalanításáért felelős, másrészt stimulálja az immunrendszert. Különös jelentőségű, hogy hatástalanítja a nehézfémek (pl. ólom, kadmium, higany) mérgező hatását a szervezeten belül (Kovács et al., 2014).

A szelén az emlősök szöveteiben 0,7-2,5 mg kg⁻¹ koncentráció tartományban fordul elő, mely értékek a szív és az izom szelén tartalmára vonatkoznak. El-Ramady et al. (2015) szerint az emberi lágyszövetek átlagos szelén tartalma 0,11 mg kg⁻¹, míg a humán folyadék halmazállapotú minták szelén koncentrációja (µg dm⁻³) a következő: a vér 107, a szérum 80, a vizelet 22 és az anyatej 13 µg dm⁻³. Zachara és Pilecki (2000) a lengyelországi anyatejek átlagos szelén tartalmára 9-11 µg dm⁻³ értékeket állapítottak meg. Kabata-Pendias és Mukherjee (2007) több európai országra vonatkozóan közölte a humán vesék szelén tartalmát (nedves tömegre): Bulgária 2,5 mg kg⁻¹, Németország 0,7 mg kg⁻¹ és Olaszország 1,9 mg kg⁻¹.

Kabata-Pendias és Mukherjee (2007) szerint az elfogyasztott és belélegzett szelén formák befolyásolhatják ugyan a szelén szervezeten belüli viselkedését és mennyiségét, a szérum és a teljes vér szelén szintje egyaránt megfelelő indikátor lehet az egyes személyek szelén ellátottságára vonatkozóan. Cser és Sziklainé (1998) a teljes vér és a szérum vizsgálatán kívül, a szelén státusz megítélésére megfelelő indikátornak tartja a vörösvérsejtek, a trombociták, a haj, a köröm és a vizelet szelén szintjének mérését is. Ahhoz, hogy a glutation-peroxidáz enzim aktivitása optimális legyen, megközelítően 100 µg dm⁻³ szelén szint szükséges. Rayman (2000) szerint Európában az emberek vér mintájában a szelén 45 µg dm⁻³ (Szerbia) koncentrációtól körülbelül 90 µg dm⁻³ (Franciaország, Olaszország és Svédország) értékekig terjed. Combs (2001) összegyűjtötte a Föld 68 országának egészséges felnőtt lakosságára a szelén szintet, melyet a vér és a szérum, mint jellemző indikátorok szelén tartalma alapján állította össze. Az adott kutatási területet átfogó cikkében külön kezelte azokat a kínai területeket, ahol a Keshan, valamint a Kashin-Beck kór megjelenik, ahol a teljes vér szelén koncentrációja csupán 9-29 µg dm⁻³ volt, a normál vidéki területeken 76-110, míg a városi lakosok vérében 93-136 µg dm⁻³ szelén tartalmakat állapítottak

meg. A Combs (2001) által összeállított táblázat alapján a magyar lakosság vér eredménye (Se: $64 \mu\text{g dm}^{-3}$) képviselte az 5-6. legrosszabb helyezést a 68 országra vonatkozó rangsorban. A vér szelén tartalma alapján viszont Vietnám ($400 \mu\text{g dm}^{-3}$) és az Amerikai Egyesült Államok egyes területei ($404 \mu\text{g dm}^{-3}$) jelentették a legmagasabb szelén szinteket, míg a szérum eredmények alapján Venezuela ($315 \mu\text{g dm}^{-3}$) került a képzeletbeli első helyre. A vér vizsgálatok alapján a szelenózisban szenvedő betegek vér eredménye jelentette a kiemelkedően magas szelén tartalmat, mely több szerző alapján $896\text{-}3480 \mu\text{g dm}^{-3}$ koncentráció tartományban volt (Combs, 2001).

A szelén antioxidációs és gyulladáscsökkentő folyamatokban, valamint a pajzsmirigyhormon termelésében is részt vesz. Közel 20 éve ismerték fel, hogy a szelén egy kemopreventív ágens a HIV és az AIDS elleni küzdelemben (Baum et al., 2000). Navarro-Alarcón és López-Martínez (2000) munkájukban mutatták ki a szelén fogyasztás korrelációját a szív- és érrendszeri betegségekkel, valamint a cukorbetegséggel kapcsolatban.

A haszonállatokban, a halakban és az emberekben megjelenő szelén hiány klinikai tünetei között kell megemlíteni a termékenység, a növekedés és az étvágy csökkenését, a vérszegénységet és az izomgyengeséget (Combs és Combs, 1984). Különleges rendellenességek közé tartozik az exudatív diatézis (kóros izzadmányos hajlam), valamint a madaraknál az embrionális elhalálózás növekedése. Az izomsorvadás a halaknál, a madaraknál és más állatoknál is megjelenik. A szelén hiány a szarvasmarháknál magzatburok-visszamaradást, míg a sertéseknél eperszív betegséget is előidézhethet. A súlyos szelén hiány endemikus kardiomiopátiát (szívelégtelenséget) (pl. Keshan-kórt), szívmegegyesítést és elektrokardiográfiás (EKG) rendellenességeket, valamint főként 5-13 éves fiatalok körében endemikus oszteoartróziást (ízületi kopást) (pl. Kashin-Beck-kórt) idéz elő (Adriano, 2001).

A 3.2.3.1. fejezetben már említettem az 1984-ben Finnországban bevezetett szelén szint növelési programot. A szelén növelés bevezetését megelőzően a finn populációban nem észleltek a szelén hiánynak betudható detektálható rendellenességeket, az alacsony szérum szelén szinttel kapcsolatban viszont a kardiovaszkuláris megbetegedések, elhalálózások és egyes daganatos megbetegedések fokozott kockázatát feltételezték (Salonen et al., 1982, 1984; Aspila, 2005). Mivel a finn lakosok átlagos szelén bevitele 30-ról (1976) $113 \mu\text{g nap}^{-1}$ -ra (1986) emelkedett (Eurola et al., 2003), ezért a finn társadalom várható élettartama néhány évvel megnövekedett (Eurola, 2005).

Bár a kérődzők és a monogasztrikus (együregű gyomrú) állatok szelén toxicitása szőrhullást (hajhullást), a paták deformációját és elvesztését, valamint az ízületek lepusztulását okozza, továbbá vérszegénységet idéz elő, ezen kívül hatással van a szívre, a vesére és a májra is (ATSDR, 1996), a vadon élő állatoknál azonban általában nem a magas szelén tartalom és az előforduló szelenózis (szelén toxicitás) jelenti a legnagyobb problémát, veszélyt az állatok számára (Adriano, 2001). A vízimadarak vérenek magas szelén szintjét több élőhelyen is észlelték, így például a Yukon-Kuskokwim deltájáról (Nyugat-Alaszka) származó császárlúd (*Chen canagica*) vérmintájában 10 mg dm^{-3} szelént mértek (Franson et al., 1999).

Az emberekre vonatkozó nem megfelelő mennyiségű szelén ellátás tüneteit a következőképpen foglalhatjuk össze (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007):

A szelén hiánya esetén:

- Izomgyengeség, -fájdalom és -gyulladás
- Vérszegénység
- Máj és hasnyálmirigy problémák
- Bőrproblémák kialakulása (anyajegyek és májfoltok szaporodása)
- A szívbetegségek kockázatának növekedése
- Keshan-kór (szívfunkciók működésbeli zavara)
- Kashin-Beck kór (csont és ízületi megbetegedés)
- Nagyobb érzékenység a daganatos megbetegedésekre

A szelén toxicitása esetén:

- A máj és a vesék károsodása
- Véralvadási problémák
- Szív és máj nekrózis
- Bőrelváltozás, bőrgyulladás
- Haj- és körömvesztés
- Hányinger és hányás

4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

4.1. Anyagok

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

4.1.1. Tápoldatos kísérlet

Mivel az egy- és kétszikű növények tápanyagfelvételében számos különbség van, ezért a tápoldatos kísérletekhez egy- és kétszikű tesztnövényként, kukoricát (*Zea mays* L. cv. Norma SC) és napraforgót (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR) választottam. A kukorica- és napraforgómagvak csíráztatása előtt, a magvak felületéről többszöri lemosással távolítottuk el a csávázószert, majd a magvak felületét sterilizáltuk, így azokat 6%-os H₂O₂ oldatba helyeztük. 20 perc után a fertőtlenített magvakat desztillált vízzel többször leöblítettük, majd a kukoricát a jobb csírázás érdekében 10 mM-os CaSO₄ oldatban 4 óráig áztattuk. A magvakat, fertőtlenítés után nedves szűrőpapírok között 22°C-on termosztátban geotróposan stimulálva csíráztattuk. A 2,5-3,0 cm koleoptillal rendelkező kukorica-csíránövényeket és a 3 cm-es hipokotilú napraforgó-csíránövényeket 1,7 dm³ úrtartalmú edényekben (Mo-nél négy növény, Se-nél tíz növény egy edényben) neveltük hidropónikus körülmények között (Lévai és Kovács, 2001).

Tápoldatos kísérleteinkben az egyszikű növények nevelésére a következő összetételű tápoldatot alkalmaztuk: 2,0 mM Ca(NO₃)₂, 0,7 mM K₂SO₄, 0,5 mM MgSO₄, 0,1 mM KH₂PO₄, 0,1 mM KCl, 0,1 μM H₃BO₃, 0,5 μM MnSO₄, 0,5 μM ZnSO₄, 0,2 μM CuSO₄, 0,01 μM (NH₄)₆Mo₇O₂₄. A kétszikű növények nevelésére pedig a következő összetételű tápoldatot használtuk: 2,0 mM Ca(NO₃)₂, 0,7 mM K₂SO₄, 0,5 mM MgSO₄, 0,1 mM KH₂PO₄, 0,1 mM KCl, 10 μM H₃BO₃, 0,5 μM MnSO₄, 0,5 μM ZnSO₄, 0,2 μM CuSO₄, 0,01 μM (NH₄)₆Mo₇O₂₄. A növények a vasat 10⁻⁴ M koncentrációjú Fe-EDTA formájában kapták (Cakmak és Marschner, 1990). A molibdén és a szelén kiegészítéseket a jelzett kezeléseknél megfelelően a tápoldathoz adagoltuk. A kezeléseket molibdén esetén a következők voltak: Ø, 0,07; 0,7; 7 μM Mo koncentrációk, a szelén esetén: a szelenitnél Ø, 1, 3, 10, 30 és 90 mg dm⁻³, míg a szelenátnál Ø, 1, 3, 10 és 30 mg dm⁻³, szelénre vonatkoztatott koncentrációk voltak. A legkisebb molibdén kezelés megválasztásánál azt a tényt vettük figyelembe, hogy a növények fiziológiai molibdén igénye Cakmak és Marschner (1990) meghatározása alapján 0,07 μM (6,72 μg kg⁻¹). Az ismétlések száma három volt. A tápoldatos kísérletnél, mivel a tápoldatban nincs légnemű fázis, a gyökerek megfelelő oxigénellátásáról is gondoskodni kellett, amit levegő átbuborékoltatása biztosította. A tápoldatot kétnaponta cseréltük és az elpárologott vizet rendszeresen pótoltuk.

A növények nevelésére a Növénytudományi Intézet, Mezőgazdasági Növényteni, Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék Klímaszobájában került sor, ahol a környezeti tényezők szabályozottak voltak: a fényintenzitás 300 μmol m⁻² s⁻¹, a hőmérséklet periodicitása

25/20°C (nappal/éjjel), a relatív páratartalom (RH) 65-75%, a megvilágítás/sötét periódus 16 óra/8 óra.

A tápoldatos kísérlet bontására Mo-nél az ültetést követő 9. napon, míg a Se-nél a 12. napon került sor. A tápoldatos kísérlet kiértékelésekor a kísérleti növények gyökereit 0,1 M-os HCl-val mostuk át, majd ioncserélt vízzel többször leöblítettük és ezt követően a gyökér és hajtás részeket elkülönítettük egymástól.

4.1.2. Rizoboxos kísérlet

A rizoboxos kísérleteinknél növénynevelő boxokat 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, Látóképi Kísérleti Telepéről származó mészlepedékes csernozjom talajt használtuk, mely legfontosabb paramétereit a 13. táblázat tartalmazza. A talajt, alkalmazása előtt, tömegállandóságig szárítottuk, majd 6 mm-es lyukátmérőjű szitán szitáltuk át.

13. táblázat: A kísérleti talaj legfontosabb paramétereit (Kovács et al., 2015)

Paraméterek	Értékek
Mélység	0-0,3 m
pH (KCl)	5,71
pH (H ₂ O)	6,58
Arany-féle kötöttség K _A	43
CaCO ₃	0,202%
Humusz	3,54%
AL-oldható P ₂ O ₅	199 mg kg ⁻¹
AL-oldható K ₂ O	451 mg kg ⁻¹
KCl-oldható NO ₃ -N+NO ₂ -N	8,04 mg kg ⁻¹
AL-oldható Na	332 mg kg ⁻¹
KCl-oldható Mg	176 mg kg ⁻¹
KCl-oldható SO ₄ ²⁻ -S	6,04 mg kg ⁻¹
KCl-EDTA-oldható Cu	5,79 mg kg ⁻¹
KCl-EDTA-oldható Zn	7,9 mg kg ⁻¹
KCl-EDTA-oldható Mn	262 mg kg ⁻¹
Vízoldható összes só	0,015%

A kontroll talajhoz sem molibdént sem szelént nem adagoltunk, molibdén kezeléseknél 30, 90 és 270 mg kg⁻¹ molibdénre vonatkozó koncentrációkat, míg a szelén kezeléseknél, a szelenitnél 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹, míg a szelenátnál 1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹, szelénre vonatkoztatott koncentrációkat alkalmaztunk. A molibdént ammónium-molibdenát [(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O] (Reanal, Budapest), a szelént nátrium-szelenit (Na₂SeO₃·5H₂O) (Fluka, Buchs, Svájc) és nátrium-szelenát (Na₂SeO₄) (Sigma-Aldrich, Steinheim, Németország) formájában adtuk a talajhoz. Az oldatok hozzáadásával a szántóföldi vízkapacitást 60 V/V%-ra állítottuk be.

Ezt követően az előkészített talajt műanyagból készült, téglalap alakú növénynevelő boxokba (ún. rizoboxokba) helyeztük. Mivel a rizoboxokat 45°-ban megdőntve helyeztük el és így a geotrópos stimulus hatására, a gyökerek az edény átlátszó (alsó) fala mentén növekedtek, ezáltal lehetőségünk volt a rizoszféra vizuális elemzésére. (Naponta mértük a rizoboxok tömegét és a hiányzó vízmennyiséget (evaporáció, transpiráció) pótoltuk.) Az alkalmazott magvak felületét, a tápoldatos kísérletben leírtakhoz hasonlóan készítettük elő (fertőtlenítés, leöblítés, csíráztatás stb.). Miután a csíráztatott magvakat az előkészített talajba helyeztük, a rizoboxok átlátszó oldalát fekete fóliával beborítottuk. Az egyes rizoboxok aljára ioncserélt vízzel benedvesített szűrőpapírt helyeztünk, mellyel az egyenletes vízfelvételt biztosítottuk a növények számára. A fenti növénynevelő boxok 1 cm mély és 255 cm³ térfogatú rizoboxok voltak. Egy rizoboxba 3, közel azonos méretű csíranövény került. Az ismétlések száma 5 volt. A növények nevelésére a Növénytudományi Intézet, Mezőgazdasági Növényteni, Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék Klímaszobájában került sor, ahol a fenti tápoldatos kísérleteknél már ismertetett környezeti tényezőket alkalmaztuk.

A kísérlet befejezésekor, hogy a rizoboxban nevelt kísérleti növények gyökereit megtisztítsuk a talajszemcséktől, 0,1 M-os HCl-val mostuk meg, majd a növények száraz tömegének a meghatározásához a mintákat 85°C-on tömegállandóságig szárítottuk és OHAUS (USA) gyártmányú analitikai mérlegen mértük a növényi gyökerek és hajtások tömegét.

4.1.3. Tenyészedényes kísérlet

A tenyészedényes kísérleteinket a Debreceni Egyetem, Agrokémiai és Talajtani Intézetének Tenyészházában állítottuk be. A kísérletek során azt vizsgáltuk, hogy milyen hatással van a növekvő koncentrációjú molibdén és szelén kezelés a zöldborsó (*Pisum sativum* L.) növekedésére és elemtartalmára. A zöldborsó-tesztnövényként való alkalmazását az indokolta, hogy hazánkban a zöldségfajok közül a zöldborsót termesztik a legnagyobb területen. A kísérletekben használt Avola borsó a zöldborsók közül az egyik legkedveltebb fajta, mely a konzerv- és hűtőipari felhasználásra való alkalmasságnak köszönhető. Az Avola velőborsó az egyik legkorábban szedhető, megbízható termőképességű borsófajta, mely a rövid tenyészidejéből adódóan könnyen beilleszthető a tenyészházi körülmények között végzett kísérletbe. Növényhabitusa robosztus és erős szár jellemzi. Magja nagy, mely hosszan megőrzi zsengességét (Fajtaajánlat, Rédei Kertimag ZRt.) (14. táblázat).

14. táblázat: A kísérleti borsófajta tulajdonságai

Paraméterek	Értékek
Zöldborsó	Avola (velőborsó)
Éréscsoport	nagyon korai A1
Magasság	40-45 cm
Hüvelyhossz	7-8 cm
Magszín	középzöld
Magnagyság	6-7 mm
Magszám hüvelyenként	6-7 db
Ezer magtömeg	200-220 g

A kísérletekhez mészlepedékes csernozjom talajt (pH=6,58) alkalmaztunk – DE MÉK Látóképi Kísérleti Telep (az elnevezése a továbbiakban: látóképi talaj), mely talaj legfontosabb paraméterei a 13. táblázatban találhatóak.

A molibdént nátrium-molibdenát (Mo(VI), Na₂MoO₄·2H₂O), a szelént nátrium-szelenit (Se(IV), Na₂SeO₃·5H₂O) és nátrium-szelenát (Se(VI), Na₂SeO₄) formában, desztillált vízben feloldva adagoltuk a talajhoz. Látóképi talajt (mészlepedékes csernozjom) használva, molibdén esetében 0, 3, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹ kezeléseket alkalmaztunk, míg a szelénnél, a kontroll mellett, szelenitnél öt (1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹), szelenátnál pedig négy (1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹) kezelést állítottunk be. A kontroll kezelésű talajokhoz nem adtunk sem molibdént, sem szelént. A kísérlet beállításakor 11 kg légszáraz, 1 cm rostán átrostált talajt mértünk be az egyes műanyag vödrökbe. A zöldborsó fajlagos tápanyagigényének kielégítéséhez NPK műtrágyákat alkalmaztunk. A műtrágyázás során a nitrogént KNO₃, a foszfort KH₂PO₄ és a káliumot pedig KNO₃, KH₂PO₄ és K₂SO₄ formájában juttattuk a talajba. Az elkészített molibdént, szelént, valamint az NPK műtrágyákat (edényenként: 1,44 g KNO₃, 0,229 g KH₂PO₄, 0,149 g K₂SO₄) tartalmazó oldatokat permetezéssel juttattuk a talajba edényenként 100 cm³-es oldatok formájában, majd ezt követően a talajt homogenizáltuk (Bacsainé, 2017; Garousi, 2016).

A megfelelően benedvesített talaj 2-4 cm mélységébe minden edénybe 20 borsó vetőmagot vetettünk. A borsó kelése után végeztük el a tőszámbeállítást, 9 növényt hagytunk tenyészedényenként. A molibdén és a szelén kísérletek, külön-külön három ismétléses véletlen blokk elrendezésben kerültek beállításra. Az edényeket naponta a szántóföldi vízkapacitás 60 V/V%-ig tömeg-kiegészítés alapján öntöztük. A tenyészedényeket a kísérlet ideje alatt kocsikon tároltuk, amely lehetővé tette, hogy éjszaka, illetve eső esetén tető alatt tartsuk a növényeket.

A borsó növények elemtartalmának meghatározását 3 (Se) vagy 4 (Mo) különböző fejlődési stádiumban végeztük el, melyek a következők voltak: négy nóduszos állapot (csak a Mo), virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés. A vetés és a mintavételek időpontját a 15. táblázat tartalmazza. A kísérletek bontására 2015. július 2-án került sor.

15. táblázat: A vetés és az egyes mintavételek időpontjai

Időpontok	Látóképi talaj
Vetési idő	2015. 05. 12.
Kelési idő	2015. 05. 19.
4 nóduszos állapot (1. mintavétel)	2015. 06. 01.
Virágzás kezdete (2. mintavétel)	2015. 06. 08.
Zöldérés (3. mintavétel)	2015. 06. 17.
Teljesérés (4. mintavétel)	2015. 07. 02.

A mintavételek alkalmával begyűjtött borsónövény mintákat a helyszínen műanyag zacskókba helyeztük és azonnal beszállítottuk az Élelmiszertudományi Intézet laboratóriumába, ahol a gyökereket folyó csapvízzel alaposan megmostuk, majd ioncserélt vízzel is alaposan leöblítettük. A növényeket ezután szűrőpapírokra terítettük szét, lemértük a gyökerek és a hajtások

hosszát és az egyes növényi részeket (levél, szár, gyökér, hüvely) ollóval különítettük el egymástól és lemértük azok tömegét. A növényi részeket ezt követően a szárítószekrénybe helyeztük és 65°C-on tömegállandóságig szárítottuk. A megszáritott mintákat daráltuk és a kémiai analízis előtt zárható műanyag zacskókban tároltuk.

4.1.4. Nagyhöröcsöki 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 Nagyhöröcsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlethez, amely kísérlet még elérhető növény- és talajmintáit megkaptam a vizsgálataim elvégzéséhez. A jelen dolgozatomban a nagyhöröcsöki kísérletből a fentiekben már részletezett növényfajokkal (kukorica, borsó és napraforgó) kapcsolatos eredményeimet mutatom be.

A HUN-REN ATK Talajtani Intézet (TAKI) Nagyhöröcsöki Kísérleti telepe Fejér megye déli részén, Sárbogárdtól mintegy 20 km-re ÉNY-ra fekszik. A Kísérleti Telep az Alföld nagy tájának Dunántúlra eső Mezőföld részén helyezkedik el. A Mezőföld hidrológiai, éghajlati és növényföldrajzi viszonyai a Nagyalföldéhez hasonlóak. Időjárása kevésbé felhős, napsütésben gazdag, csapadékban viszonylag szegény, nyári aszályra erősen hajlik, hőingadozása kifejezett (Kádár, 1995, 2012). Részletes talajföldrajzi feltárásai alapján Szűcs (1965) a kísérleti területet a dunavölgyi mészlepedékes csernozjomok (elnevezése a továbbiakban: nagyhöröcsöki talaj) közepes és mélyebb humuszrétegű változatába sorolta, 50-100 cm humuszréteggel, löszön létrejött vályog csernozjom. A szántott réteg nagyfokú felszíni tömörödéssre, illetve cserepedésre hajlamos. A tömörödés mértékére jellemző, hogy nagyobb eső alkalmával a csapadék egy része barázdás eróziót okozva elfolyhat, bár a felszín lejtése alig észrevehető.

A kísérlet 1991 tavaszán lett beállítva, 21 m² területű parcellákkal, melyeket a jó megközelíthetőség érdekében és a talajáthordás megakadályozására körbe 1 m széles utak határoltak. Az általam vizsgálatba vont növények: a kukorica 1991-ben, a borsó 1994-ben, míg a napraforgó 1998-ban volt termesztésbe vonva. Az osztott parcellás elrendezésben a vizsgált mikroelemek (Mo és Se) jelentették a főparcellát, a 4 terhelési szint az alparcellát, 2 ismétlésben. A kísérleti kezeléseket, az alkalmazott sók formáit és adagjait a 16. táblázat ismerteti (Kádár, 1995, 2012; Szabó et al., 2019).

16. táblázat: A kísérletben 1991-ben egyszer alkalmazott terhelési kezelések

Elem jele	Adagolás 1991. tavasz (kg ha ⁻¹)				Alkalmazott sók formája
Mo	0	90	270	810	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O
Se	30	90	270	810	Na ₂ SeO ₃

Évente alaptrágyázást alkalmaztak: N=100, P₂O₅=100, K₂O=100 kg ha⁻¹, ammónium-nitrát, szuperfoszfát és 60%-os kálisó formájában. A foszfor és kálium műtrágyákat, valamint a nitrogén műtrágya felét ősszel szántás előtt, a nitrogén másik felét tavasszal vetés előtt, vagy fejrtrágyaként

juttatták a talajba. A nagyhőrcsöki kísérlet feltalajának és mélységi talajszelvényeinek alapparaméterei, valamint a Nagyhőrcsöki Kísérleti telepen mért meteorológiai adatok összefoglalóan Kádár (2012) publikációjában található meg. Parcellánként 20-20 pontminta egyesítésével évente átlagmintát vettek a talaj szántott rétegéből. A növényminták vételéhez parcellánként 20-40 növényből álló átlagmintát képeztek (Kádár, 1995, 2012).

4.1.4.1. A kukoricakísérlet

17. táblázat: A kukoricakísérletben végzett agrotechnikai műveletek és megfigyelések

Munka megnevezése	Időpontja	Megjegyzés
Kísérlet kitűzése	1991.04.22.	Karók, fix karók elhelyezése
Műtrágyák kiszórása	1991.04.22.	N, P, K
Szántás	1991.04.22.	MTZ 80 + Lajta eke
Gyűrűs hengerezés	1991.04.22.	MTZ 50 + gyűrűs henger
Kombinátorozás	1991.05.16.	MTZ 50 + kombinátor
Vetés	1991.05.22.	MTZ 80 + SPL vetőgép
Kísérlet kitűzése	1991.06.10.	Karók elhelyezése (kézzel)
Tőszámlálás	1991.06.26.	2-4 leveles korban
Talajmintavétel	1991.07.04.	0-20 cm (kézzel)
Kísérlet bekerítése	1991.07.09.	Drótháló rögzítése (kézzel)
Gyom mintavétel	1991.07.09.	Parcellánként (kézzel)
Növénymintavétel	1991.08.08.	Virágzás idején, levélminta
Tőszámlálás	1991.11.25.	Aratás előtt
Betakarítás	1991.11.25.	Kombájn + kézi mintavétel, szem- + szárminta

A 17. táblázatban láthatók a kukoricakísérletben végzett agrotechnikai műveletek és megfigyelések, míg a 18. táblázat a kukoricakísérlet egyéb paramétereit tartalmazza. A vetés május 22-én történt géppel, az üzemekben szokásos módon 70 cm sortávolságra. A tőszámot 100 000 db ha⁻¹ körülire állították be. A nagyobb állománysűrűség a késői vetést, valamint a fűszók esetleges ritkulást előidéző befolyását kompenzálhatta. A parcellaméret 3,5x6=21 m². Mintavételek és a betakarítás idején a szélső kukorica sorokat elhagyták, hogy a szántással okozott talajáthordás hatását kiküszöböljék. Az értékelt terület így 2,8x6=16,8 m² volt (Kádár, 1995, 2012).

18. táblázat: A kukoricakísérlet egyéb paramétereit

Egyéb paraméter	Megnevezése/értéke
Vizsgált hibrid	Pi SC 3732
Vetés mélysége	5-7 cm
Csíráképesség	92%
Csírászára	10-12 db fm ⁻¹
Cold teszt	95%
Tisztaság	99,9%
Csávázószer	Buvisild K
Egyéb fenológiai megfigyelések	
Állomány sorol	06.03.
4-6 leveles kor	07.08.
Virágzás kezdete	08.02.
Teljes virágzás	08.08.

4.1.4.2. A borsókísérlet

A 19. táblázat a borsókísérletben végzett agrotechnikai műveleteket és megfigyeléseket tartalmazza, míg a 20. táblázatban a borsókísérlet egyéb paraméterei láthatók. A nagyhörsöki kísérlet 4. évében Smaragd fajtájú borsót vetettek gabona sortávolságra, viszonylag sűrű állományt létrehozva (Kádár, 1995, 2001). Talajmintavételre, illetve talajvizsgálatokra 1994. évben került sor. Ekkor parcellánként 20-20 pontminta (lefűrés) egyesítésével átlagmintákat képeztek a szántott rétegből (Kádár, 2003).

19. táblázat: A borsókísérletben végzett agrotechnikai műveletek és megfigyelések

Munka megnevezése	Időpontja	Megjegyzés
Szántás	1993.10.26.	MTZ Lajta ekével
Kombinátorozás	1994.03.11.	MTZ 50 kombinátorral
Vetés+magtakarás	1994.03.11.	Gépi vetés + fogasolás
Hengerezés	1994.03.11.	TZ-4K + simahenger
Egyenletesen sorol	1994.03.31.	Egész kísérletben
Kísérlet kitűzése	1994.04.19.	Karók lehelyezése
Talajmintavétel (0-20 cm)	1994.04.25.	Parcellánként átlagminta
Levélmintavétel (virágzás kezdete)	1994.05.26.	20 db parcellánként
Kerítés lehelyezése	1994.05.30.	Drótháló kézzel
Virágzás vége	1994.06.07.	Hüvelyesedés kezdődik
Zöldborsó mintavétel	1994.06.14.	Föld feletti teljes növény
Minták feldolgozása	1994.06.15-16.	Mag és szár elkülönítése
Kézi gyomirtás	1994.07.14.	Nagytestű gyomok
Mintakéve aratás előtt	1994.07.18.	1-1 m ² nettó parcellánként
Betakarítás	1994.07.18.	Parcellakombájn

A tenyészidő folyamán végzett állománybonítási munkák szerint a szelén kezelések bizonyultak fitotoxikusnak a borsóra. A szelénrel kezelt parcellákon az állomány elsárgult, vontatottan kelt és alacsony maradt, a zöld levéltömeg a virágzás kezdetén töredékére esett vissza. A szelén terhelés hatására a levelek élettani aktivitása csökkent és elszáradásuk előrehaladottabb volt. A bonítási munkák, a levéltömeg- és a szárazanyag-százalékok eredményei összhangban vannak (Kádár, 1995, 2001, 2012).

20. táblázat: A borsókísérlet egyéb paraméterei

Egyéb paraméter	Megnevezése/értéke
Vetőmag fajtája	Smaragd
Vetőmag mennyisége	14-17 db fm ⁻¹ (240-260 kg ha ⁻¹)
Vetés mélysége	5-8 cm (gabona sortávolságra vetve)
Parcellák nettó (értékelt) területe	2,1 m x 6 m=12,6 m ²

4.1.4.3. A napraforgókísérlet

A 21. táblázatban láthatók a napraforgókísérletben végzett agrotechnikai műveletek és megfigyelések, míg a 22. táblázat a napraforgókísérlet egyéb paramétereit tartalmazza. A vetés 1998. április 23-án történt szemenkénti vetőgéppel 70x20 cm sorxó távolságra, megközelítően 70 000-es tőszámmal (Kádár és Pálvölgyi, 2003).

21. táblázat: A napraforgókísérletben végzett agrotechnikai műveletek és megfigyelések

Műveletek megnevezése	Időpontja	Megjegyzés
NPK alaptrágyázás	1998.03.16.	Parcellánként kézzel
Szántás	1998.03.31.	MTZ 80 + Lajta eke
Gyűrűshengerezés	1998.03.31.	MTZ 80 + gyűrűshenger
N műtrágyázás	1998.04.15.	Parcellánként kézzel
Kombinátorozás	1998.04.16.	MTZ 50 + kombinátor
Vetés, hengerezés	1998.04.23.	MTZ 50 + SPC 6 vetőgép
Állomány sorol	1998.05.05.	Az egész kísérletben
Kísérlet karózása/kitűzése	1998.05.20.	Parcellánként kézzel
Gyomirtó, kapálás	1998.05.27.	Parcellánként kézzel
Bonitálás 4-6 leveles korban	1998.06.02.	Parcellánként 1-5 skálán
Gyomirtó, kapálás	1998.06.30.	Az egész kísérletben kézzel
Bonitálás virágzás elején	1998.07.06.	Parcellánként 1-5 skálán
Levélmintavétel	1998.07.06.	20 db parcella ¹ , tányér alatt
Tőszámlálás	1998.09.22.	4-4 sor parcella ¹
Mintakéve vétel	1998.09.22.	20 tő parcellánként
Betakarítás, kombájnozás	1998.09.23.	Kézi fejelés + kombájn cséplés
Mintakéve feldolgozás	1998.09.26.	Szár, tányér parcellánként
Talajmintavétel	1998.10.19.	Parcellánként, 0-20 cm
Tányérok cséplése	1998.11.23.	Parcellánként kézzel

Közvetlenül kombájnozás előtt 20-20 db föld feletti teljes növényt vettek véletlenszerűen parcellánként a szár, tányér, valamint a mag tömegarányának és összetételének megállapítására. Mérték a növényi átlagminták friss és légszáraz tömegét 40-50°C-on történt szárítást követően, majd az átlagmintákat finomra darálták és ilyen állapotban tárolták elemzésre. A parcellák teljes területe 3,5 m x 6 m=21 m². Betakarításkor a két szélső sort elhagyva a belső 4-4 sor állománya került mintavételezésre, tehát az értékelt (azaz nettó) terület parcellánként 2,8 m x 6 m=16,8 m²-t tett ki (Kádár és Pálvölgyi, 2003).

22. táblázat: A napraforgókísérlet egyéb paramétereit

Egyéb paraméter	Megnevezése/értéke
Vizsgált hibrid	Viki
Vetés mélysége	5 cm
Csírászám	5-6 db fm ⁻¹ (10 kg ha ⁻¹)
Sor x tőtávolság	70 x 20 cm

4.2. Az alkalmazott mintaelőkészítési és mérési módszerek

A talaj- és növényminták analitikai vizsgálatait (szárazanyag-tartalom, mintaelőkészítési és elemanalitikai meghatározások) a Debreceni Egyetem (DE) Agrárműszerközpontjában, valamint a DE MÉK (Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar) Élelmiszertudományi Intézetében végeztük el.

4.2.1. A növényi minták szárazanyag-tartalmának meghatározása

A száraz tömeg meghatározásához a mintákat LABOR-MIM LP-320 (Budapest) és MEMMERT ULM-400 (Schwabach, Németország) típusú szárítószekrényben 85°C-on tömegállandóságig szárítottuk. A tömegállandóságig szárított mintákat szobahőmérsékletre történt visszahűlésük után OHAUS típusú (Greifensee, Svájc) analitikai mérlegen mértük le négy tizedesjegyre pontossággal.

4.2.2. Mintaelőkészítés kémiai analízishez

A talajok összes elem tartalmának a meghatározásával a tápanyagtöket kapjuk, amely a talajban lévő adott elem teljes mennyiségét jelenti. A tápanyagok viszont különböző formákban, kémiai és biológiai kötötten találhatók meg a talajokban. Mivel egy termőhely minősítésénél, a kockázatelemzésénél nemcsak az „összes”, hanem a mobilis, más néven a „felvehető” elem tartalmakat is érdemes vizsgálni, ezért a nagyhorcsöki 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, míg a talaj- és növényminták teljes elem tartalmának analíziséhez HNO₃-H₂O₂ mintaelőkészítési módszert alkalmaztunk. A talaj- és növényminták elem tartalmának meghatározásához az általam kidolgozott HNO₃-H₂O₂ nedves roncsolásos mintaelőkészítési módszereket alkalmaztuk (Kovács et al., 1996, 2000). 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; Kovács és Györi, 2009) határoztuk meg. Az ICP-MS-nél a poliatomos zavaró hatások kiküszöbölésére KED (Kinetic Energy Discrimination) üzemmódot alkalmaztunk (Kovács és Borbély, 2011; András et al., 2012).

A roncsoláshoz és a kalibráló standard oldatok előállításához cc. HNO₃ (65 m/m%, Scharlau Chemie, Spanyolország), valamint cc. H₂O₂ (30 m/m%, Merck, Németország) oldatokat használtunk. A törzsoldatok készítéséhez Merck és BDH (többnyire 1000 mg dm⁻³-es monoelemes), valamint Spectrascan gyártmányú (Teknolab, Norvégia) (100 mg dm⁻³-es multielemes) standard oldatokat, továbbá Reanal gyártmányú (Budapest) nagy tisztaságú szilárd vegyszereket alkalmaztunk. A mosogathoz, továbbá az oldatok elkészítéséhez használt nagy tisztaságú vizet egy kétlépcsős Millipore (Párizs, Franciaország) víztisztító berendezés segítségével állítottuk elő. A csapvízből az első lépcsőben egy fordított ozmózis elvén működő MILLI-RO 5 PLUS berendezés 0,1-0,2 μS vezetőképességű vizet állít elő, a második lépcsőben pedig a MILLI-Q RG ioncserés, baktériumszűrővel ellátott készülék ezt tisztítja tovább. A MILLI-Q RG készülékből közel 0,05 μS vezetőképességű, gyakorlatilag baktérium és sómentes vizet kapunk.

4.2.2.1. Mintaelőkészítés a talaj „oldható” elem tartalmának meghatározásához

A talajok, növény számára felvehető (oldható), molibdén- és szelén tartalmának meghatározásához Lakanen-Erviö-féle kivonószer alkalmaztunk az MSZ 21470-50:2006

szabvány előírásainak megfelelően. A megszáritott, Retsch SK 3 darálóval ledarált (1 mm-es lyukátmérőjű szitát alkalmazva) homogén talajmintákból 1,5 g ($\pm 0,01$ g) tömeget mértünk be szcintillációs edénybe és 15 cm³ Lakanen-Erviö-féle oldatot (0,5 M ammónium-acetát + 0,5 M ecetsav + 0,02 M EDTE, pH=4,65) adtunk hozzá. Ezt követően a mintákat rázó gépbe helyezve, 1 órán keresztül végeztük az extrakciót, majd a szuszpenziót MN 619 G^{1/4}, vagy hasonló minőségű (pl. Filtrak 392) típusú szűrőpapíron keresztül szűrtük le. A mintákat a mérés elvégzéséig 25 cm³-es műanyag szcintillációs edényekben tároltuk. A talajminták előkészítésével párhuzamosan vakminták készítésére is sor került. A fentieknek megfelelően előkészített minták elemtartalmát induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES) és induktív csatolású plazma tömegspektrométerrel (ICP-MS) határoztuk meg.

4.2.2.2. Mintaelőkészítés a talaj „összes” elem tartalmának meghatározásához

A talajminták Retsch SK 3 darálóval való ledarálását és homogenizálását követően $1\pm 0,01$ g-ot mértünk be 50 és 100 cm³-re kalibrált, hőálló roncsolócsövekbe (25x420 mm-es) RADWAG WPS 210-es analitikai mérlegen. A bemért talajmintákhoz 5 cm³ cc. HNO₃-at adtunk. Az így előállt HNO₃-as oldatokat egy éjszakán át állni hagytuk. Másnap a mintákat LABOR MIM OE 718/A típusú blokkroncsoló készülék fűtőegységébe helyeztük, melybe egy alkalommal maximum 50 db roncsoló csövet lehet helyezni. Az előroncsolást 30 percig, 60°C-on végeztük. Az így kapott mintákhoz még 5 cm³ cc. H₂O₂-ot adtunk, majd ezt követően a főroncsolást 270 percen keresztül, 120°C-on végeztük. A roncsolmányokat, lehűlésüket követően, a roncsolócső 50 cm³-es jeléig töltöttük fel ioncserélt vízzel, majd 100 cm³-es Erlenmeyer lombikokba szűrtük FILTRAK 388-as típusú, vagy annak megfelelő minőségű szűrőpapíron (pl. MN 640W) keresztül (Kovács et al., 2000). A mintákat a mérés elvégzéséig 25 cm³-es műanyag szcintillációs edényekben tároltuk. A minták feltárásánál roncsolási vakpróbákat is készítettünk.

4.2.2.3. Mintaelőkészítés a növény „összes” elem tartalmának meghatározásához

A növényi minták mintaelőkészítését az általam kidolgozott eljárás szerint végeztük (Kovács, 1998; Kovács et al., 1996). A növényi mintákat kávédaráló segítségével aprítottuk és homogenizáltuk (a nagyhorcsöki talaj- és növénymintákat nem volt szükséges darálni). Azokból a mintákból, amelyekből elegendő mennyiség állt rendelkezésre, $1\pm 0,01$ g-ot, amelyekből viszont nem kaptunk elegendő szárított mintát, azokból csupán 0,1 g-ot mértünk be a roncsoláshoz milligramm pontossággal és ezekre egy kompromisszumos roncsolási módszert alkalmaztunk. A roncsolást ugyanazzal a roncsoló berendezéssel, ugyanolyan hőmérsékletek (60°C és 120°C) mellett végeztük, mint amelyet az előző pontban már részleteztem. A következő növény roncsolási paramétereket alkalmaztuk: 10 cm³ cc. HNO₃-at adtunk az 1 g mintához (0,1 g-hoz csupán 1 cm³-t). A minták savval együtt egy éjszakán át előroncsolódtak. Majd a mintákat 30 percen keresztül előroncsoltuk 60°C-on. A szükséges idő elteltével és a minták lehűlése után 3 cm³ cc. H₂O₂-ot adtunk a roncsolmányhoz (0,1 g mintához csak 0,3 cm³-t). A főroncsolás 120°C-on 90 percig tartott. Ezt követően, amikor a leroncsolt minta lehűlt, a roncsolmányt nagy tisztaságú, ionmentes vízzel 50 cm³-re töltöttük fel, roncsolócsőben. 0,1 g minta esetén, 10 cm³-es lombikokba mostuk

át a roncsolmányt és abban végeztük el a jelre töltést. A mintákat a mérés elvégzéséig szintén 25 cm³-es műanyag szcintillációs edényekben tároltuk. A minták feltárásánál roncsolási vakpróbákat is készítettünk.

4.2.3. A minták elem tartalmának meghatározása

A fentiekben előkészített extrahált és roncsolt minták elem tartalmának meghatározásához kétféle típusú induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométert (ICP-OES), egy Perkin Elmer gyártmányú, Optima 3300 DV típusú ICP-OES készüléket, valamint egy Thermo Fisher Scientific gyártmányú iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES berendezést használtunk. A kisebb koncentrációk elemzéséhez kétféle típusú induktív csatolású plazma tömegspektrométert (ICP-MS), egy Thermo Elemental gyártmányú, XSeries^I típusú és egy Thermo Scientific gyártmányú XSeries^{II} típusú ICP-MS készüléket alkalmaztunk.

4.2.3.1. A minták elem tartalmának meghatározása ICP-OES technikákkal

Optima 3300 DV típusú ICP-OES: A Perkin Elmer gyártmányú, Optima 3300 DV típusú ICP-OES készülék állandó és változtatható paramétereit listája a 23. és a 24. táblázatban található. Az ICP-OES készülékek változtatható paramétereit beállításánál az általam kidolgozott paraméter értékeket és a kutatómunka végzése során megszerzett ismereteket alkalmaztuk (Kovács, 1998; Kovács et al., 1998). A mérések során axiális plazmamegfigyelést és kompromisszumos optimális mérési körülményeket alkalmaztunk (Kovács, 1998). A vizsgálatainkat a következő elemek mérésével végeztük el: Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ho, In, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, Pr, S, Sc, Se, Sm, Sr, Tb, Ti, Tm, V, Y, Yb és Zn. A terjedelmi korlátok miatt viszont, csak a molibdén és a szelén elemek értékelésével foglalkozom a dolgozatomban.

23. táblázat: Az Optima 3300 DV típusú ICP-OES készülék paramétereit

Paraméter	Megnevezése/értéke
Típusa	Optima 3300 DV
Gyártó	Perkin-Elmer Ltd.
Optikai rendszer	Echelle-rendszerű, argon gázzal öblített
Hullámhossz tartomány	160-782 nm
RF generátor	40,68 MHz
Detektor	szilárdtest áramkör detektálás, SCD
Plazma megfigyelés	axiális
Porlasztó típusa	koncentrikus (Meinhard Type A)
Az optikai rendszer felbontása	normal
Feloldóképesség	0,007 nm

iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES: A Thermo Fisher Scientific gyártmányú, iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES berendezés állandó és változtatható paramétereit listáját a 25. és a 26. táblázatok tartalmazzák. Az ICP-OES készülékek változtatható paramétereit beállításánál az általam (Kovács, 1998) végzett kutatómunka ismereteit alkalmaztuk, mely analitikai berendezés paramétereit és a változtatható paramétereit beállítási értékei, többek között a Bacskaiké (2017) és a Papp-Topa et al. (2017) publikációkban található meg. A mérések során ennél az ICP-OES-nél

is megközelítően ugyanazokat az elemeket használtuk elemzésre, és az elemek ugyanazon hullámhosszait, a szelén mérésénél a 196,026 nm-es, míg a molibdén analízisének a 202,031 nm-es hullámhosszúságú vonalakat alkalmaztuk. Mivel az iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES-nél nincs lehetőség a hűtőgáz áramlási sebességének a változtatására, ezért a fix beállítási értékű $12 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ argon gáz áramlási sebességet használtuk.

24. táblázat: Az Optima 3300 DV típusú ICP-OES készülék változtatható paraméterei

Változtatható paraméterek	Értéke
Kicsatolt teljesítmény	1300 W
Porlasztógáz áramlási sebesség	$0,95 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$
Hűtőgáz áramlási sebesség	$15 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$
Segédgáz áramlási sebesség	$1,0 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$
Mintabetáplálás sebessége	$1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$
Plazma megfigyelési magassága	15 mm
Integrációs idő	10 s
Ismétlések száma	3
A perisztaltikus pumpacsó típusa	fekete-fekete

25. táblázat: Az iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES készülék paraméterei

Paraméter	Megnevezése/értéke
Típusa	iCAP 6300 Duo
Gyártó	Thermo Fisher Scientific
Optikai rendszer	Echelle-rendszerű, argon gázzal öblített
Hullámhossz tartomány	166-847 nm
RF generátor	27,12 MHz
Detektor	szilárdtest áramkör detektálás, CID
Porlasztó típusa	koncentrikus (Meinhard Type A)
Ködkamra típusa	ciklon
Plazma megfigyelés	autoview (axiális vagy radiális)
Hűtőgáz áramlási sebesség	$12 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$

26. táblázat: Az iCAP 6300 Duo típusú ICP-OES készülék változtatható paraméterei

Változtatható paraméterek	Értéke
RF kicsatolt teljesítmény	1350 W
Segédgáz áramlási sebesség	$1,0 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$
Porlasztógáz áramlási sebesség	$1,0 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$
Mintabetáplálás sebessége	$1,6 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$
A perisztaltikus pumpacsó típusa	sárga-narancssárga
Integrációs idő	20 s
Ismétlések száma	2

4.2.3.2. A minták elem tartalmának meghatározása ICP-MS technikákkal

A növényi és talajmintákban azon elemek analíziséhez, amelyeknél – a kis elem koncentrációk miatt – az ICP-OE spektrométer nem volt alkalmas a meghatározásukhoz, azoknál kétféle típusú induktív csatolású plazma tömegspektrométert (ICP-MS), egy Thermo Elemental

gyártmányú, XSeries^I típusú és egy Thermo Scientific gyártmányú XSeries^{II} típusú ICP-MS készüléket alkalmaztunk. Ezáltal a minták multielemes végeredménye egyrészt az ICP-OES, másrészt az ICP-MS készülék által mért eredményekből állt össze. Mivel a talaj- és főként a növényi mintákban a molibdén és a szelén koncentrációja, a kontroll vagy a kis dózisu kezeléseket esetén az ICP-OES készülékek mérési határa alá esett, ezért ezen elemek esetén, az ICP-MS készülékkel meghatározott koncentrációkat használtuk a kísérletek értékeléséhez.

Thermo Elemental gyártmányú, XSeries^I típusú ICP-MS: A kutatásaim korai szakaszában XSeries^I típusú ICP-MS készüléket, míg a későbbiek során XSeries^{II} típusú ICP-MS berendezést használtunk a relatív kis elem koncentrációk meghatározásához. A két készülék felépítése és alkalmazhatósága nem különbözik jelentősen. Az újabb készülékkel, konstrukciójából adódóan, ugyanarra a koncentrációra, általában nagyobb jelintenzitásokat kapunk. A további különbség, hogy az XSeries^I típusú ICP-MS-t Winsfordban (Anglia), míg az XSeries^{II} típusú készüléket már Brémában (Németország) gyártották. Az XSeries^I típusú ICP-MS készülék állandó és változtatható paramétereit, valamint azok megnevezését és értékét a 27. táblázat mutatja. Az induktív csatolású plazma tömegspektrométer (ICP-MS), mint analitikai berendezés leírásának és működésének részletezése két egyetemi jegyzetben található meg (Kovács és Csapó, 2015a, 2015b). A jegyzetekben található ismeretek alapján megállapítható, hogy a mezőgazdasági minták (pl. élelmiszer alapanyagok) rutin elemzéséhez, azaz a Mo és főként a Se méréseinél jelentkező zavaróhatások (poliatomos adduktumok) kiküszöböléséhez, nélkülözhetetlen az ütközési és reakció cella (collision cell technology, CCT) alkalmazása. A molibdén és szelén méréseket a ⁹⁵Mo, valamint a ⁷⁷Se, ⁷⁸Se, ⁸⁰Se és ⁸²Se izotópokon végeztük, de a kiértékelésnél, a szelén izotópok közül, csupán a 80-as tömegszámú, legérzékenyebb szelén izotóp eredményeit használtuk. A CCT-ben 7% H₂+93% He ütközési és reakció gázt alkalmaztunk (27. táblázat), mellyel 99,99%-os hatékonysággal tudtuk eliminálni a ⁸⁰Se izotópon jelentkező poliatomos zavaróhatásokat (pl. a ⁴⁰Ar⁴⁰Ar⁺ zavaró hatását) (Szebeni et al., 2011); Soós et al., 2021; Kovács, 2020, 2021; Varga et al., 2005; Széles et al., 2005).

Thermo Scientific gyártmányú, XSeries^{II} típusú ICP-MS: Az XSeries^I típusú ICP-MS készülékünk idővel elhasználódott és közben sikerült beszereznünk egy új ICP-MS-t, ezért a későbbiek során egy XSeries^{II} típusú ICP-MS berendezést használtunk a kutató munkánkhoz. Az XSeries^{II} típusú ICP-MS készülék állandó és változtatható paramétereit listája, valamint az egyes paraméterek megnevezése és értéke a 28. táblázatban látható. Az XSeries^{II} típusú ICP-MS alkalmazásánál is felhasználtuk (Bacsainé, 2017; Garousi, 2016) a már korábbi években megszerzett ismereteket és ennek az ICP-MS berendezésünk rutin alkalmazásánál is szinte ugyanazokat a készülék paraméter értékeket alkalmaztuk, amelyeket a korábbi készülékünkönél (XSeries^I típusú ICP-MS) is. Mivel az előző ICP-MS-ünkhöz képest, ez is hasonló konstrukciójú készülék, itt is az elemek ugyanazon izotópjait használtuk a mérésre, valamint ugyanazt az összetételű ütközési és reakció gázt (7% H₂+93% He) alkalmaztuk a növény- és talajminták analízisének jelentkező poliatomos adduktumoktól eredő zavaró hatások kiszűrésére/csökkentésére (28. táblázat).

27. táblázat: Az XSeries^I típusú ICP-MS készülék beállítási és mérési paramétere

Paraméter	Megnevezése/értéke
Típusa	XSeries ^I (kvadrupól rendszerű)
Gyártó	Thermo Elemental
RF generátor	27,12 MHz
RF kicsatolt teljesítmény	1400 W
Porlasztó típusa	koncentrikus (Meinhard Type A)
Ködkamra típusa	kúp alakú 2°C-ra hűtve
Mintázó és merítő kónuszok	nikkel
Plazmagáz áramlási sebesség	14 dm ³ min ⁻¹
Porlasztógáz áramlási sebesség	0,8 dm ³ min ⁻¹
Segédgáz áramlási sebesség	0,95 dm ³ min ⁻¹
Mintabetáplálás sebessége	1 cm ³ min ⁻¹
Pole Bias	-3,1 V
Hexapole Bias	4,5 V
Extraction	-118 V
Fókusz	3
CCT gáz áramlási sebesség	5,9 cm ³ min ⁻¹ (7% H ₂ +93% He)
Integrációs idő (Dwell time)	0,1 s
Söprések száma (Sweeps)	7
Ismétlések száma (Main runs)	3
Mérésre használt izotópok	⁹⁵ Mo, ⁷⁷ Se, ⁷⁸ Se, ⁸⁰ Se, ⁸² Se
Belső standard izotópok	⁷² Ge, ¹⁰³ Rh, ¹⁹⁵ Pt
Mintaszállító pumpacső	fehér-fehér (Anachem Ltd., Anglia)

28. táblázat: Az XSeries^{II} típusú ICP-MS készülék beállítási és mérési paramétere

Paraméter	Megnevezése/értéke
Típusa	XSeries ^{II} (kvadrupól rendszerű)
Gyártó	Thermo Scientific
RF generátor	27,12 MHz
RF kicsatolt teljesítmény	1400 W
Porlasztó típusa	koncentrikus (Meinhard Type A)
Ködkamra típusa	kúp alakú 2°C-ra hűtve
Mintázó és merítő kónuszok	nikkel
Plazmagáz áramlási sebesség	14 dm ³ min ⁻¹
Porlasztógáz áramlási sebesség	0,9 dm ³ min ⁻¹
Segédgáz áramlási sebesség	0,88 dm ³ min ⁻¹
Mintabetáplálás sebessége	0,87 cm ³ min ⁻¹
Pole Bias	-16 V
Hexapole Bias	-10 V
Extraction Lens	-149 V
Fókusz	-7,5 V
CCT gáz áramlási sebesség	6 cm ³ min ⁻¹ (7% H ₂ +93% He)
Integrációs idő (Dwell time)	0,1 s
Söprések száma (Sweeps)	9
Ismétlések száma (Main runs)	3
Belső standard izotóp	¹⁰³ Rh
Mintaszállító pumpacső	sárga-narancs

4.2.4. Szelén formák meghatározása HPLC–ICP-MS technikával, a mérés körülményei

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 hazai és a nemzetközi szakirodalmak, a szelén formák mintaelőkészítéséhez többféle típusú extrakciós oldatok alkalmazását javasolják. Ezek között kell megemlíteni a hideg és forró víz, a 0,01 M CaCl_2 , a 0,43 M HNO_3 , az ammónium-oxalát (pH=3), a 0,1 M (pH=7) $\text{K}_2\text{HPO}_4\text{-KH}_2\text{PO}_4$ (puffer), a 0,1 M NaOH, az 1 M NaOCl (pH=8), a 0,1 M $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (90°C), a HNO_3 (90°C) és a királyvíz vegyületek/oldatok talajkivonatok készítésére való alkalmazását (Széles et al., 2006; Széles, 2007; Stanciu-Burileanu et al., 2015; Tolu et al., 2011; Martens és Suarez, 1997; Supriatin et al., 2015; Tolu et al., 2010). Mivel ezek közül a talajmintákban előforduló szelén formák extrakciójához a 0,1 M NaOH alkalmazása biztosítja a legnagyobb mérvű kioldási hatékonyságot, amelyet mi is számos extrakciós oldat vizsgálatával ellenőriztünk, továbbá a rendelkezésre álló kapcsolt analitikai rendszerünk működéséhez is megfelelő, így én is ezt az extraháló oldatot választottam a szelén-speciációs vizsgálatokhoz (Stanciu-Burileanu et al., 2015; Tolu et al., 2010).

A fenti indokok miatt a szelén formák mintaelőkészítéséhez (extrakciójához) 0,1 mol dm^{-3} koncentrációjú NaOH oldatot alkalmaztunk a következő működési feltételek mellett: $1\pm 0,002$ g talajt és 10 ml extrahálószer (0,1 M NaOH) mértünk polipropilén csövekbe, melyeket 24 órán át, szobahőmérsékleten ($25\pm 2^\circ\text{C}$ -on), 31 fordulat min^{-1} sebességgel rázattuk PTR-25 típusú Mini Rotatorral. Ezután a szuszpenziót 3000 fordulat min^{-1} sebességgel 5 percig centrifugáltuk, majd a felülúszót ismét 10 percig centrifugáltuk. Az így kapott felülúszót polipropilén csövekben 4°C -on tároltuk az elemzésig. Injektálás előtt ötszörösére hígítottuk a mintákat desztillált vízzel és $0,2\ \mu\text{m}$ pórusátmérőjű, GHP membrán (hidrofil polipropilén) fecskendőszűrőn engedték keresztül. Az előkészített minták elemzését egy napon belül elvégeztük.

A szelén formák (szelén-módosulatok) meghatározását egy nagyhatékonyságú folyadékkromatográf induktív csatolású plazma tömegspektrométer (HPLC–ICP-MS) kapcsolt analitikai rendszer segítségével végeztük. A HPLC pumpa egy Thermo Scientific SpectraSystem P4000 gyártmányú, manuális injektorral és 100 μl -es mintahurokkal felszerelt készülék volt. A HPLC pumpa után egy Hamilton PRP-X100 (250x4,1 mm, 10 μm) típusú anioncserélő oszlopot alkalmaztunk az elválasztásra. Az eluens 2% metanolt és 10 mM ammónium citrát puffert (pH=5,2) tartalmazott, az áramlási sebessége $1\ \text{ml}\ \text{min}^{-1}$ volt. Termosztálást nem végeztünk, a kromatografálás szobahőmérsékleten történt $25\pm 2^\circ\text{C}$ -on.

A HPLC és az ICP-MS készülékek csatolását egy teflon csővel végeztük, mellyel a HPLC-ből kijövő oldatot közvetlenül az ICP-MS koncentrikus porlasztójába és a 2°C -ra hűtött kúp alakú ködkamrájába vezettük. Az elválasztott szelén-specieszek detektálására használt XSeries^{II} típusú ICP-MS készülék paraméterei listája és azok beállítási értékei a 28. táblázatban találhatóak, azzal a

különbséggel, hogy ebben az esetben az Integrációs idő (Dwell time) 20 ms volt. A meghatározáshoz nem alkalmaztunk belső standard korrekciót. A szelén meghatározását a ^{80}Se izotóp detektálásával végeztük és ebben az esetben is az előzőekben részletezett összetételű ütközési és reakció gázt (7% H_2 +93% He) alkalmaztuk. Az ICP-MS készülék által kapott tranziens jelet (kromatogramot) az ICP-MS berendezés Plasmalab vezérlőszoftverével értékeltük ki. A kromatografálás mintánként összesen 450 másodpercig (7,5 percig) tartott, melyben a szelenit és a szelenát retenciós ideje 165 és 325 s-nál volt.

A mérésekhez az alábbi, szelénre számítva, 1000 mg dm^{-3} Se(IV) (Na_2SeO_3 ; Amresco, Solon, Ohio, USA), valamint Se(VI) (Na_2SeO_4 ; Sigma Aldrich, UK) törzsoldatokat használtuk. Mindegyik standard vegyületet ionmentes vízben oldottuk fel. A kalibrációhoz használt standard oldatokat minden nap frissen készítettük el a törzsoldatokból. Ezek koncentrációja 0, 5, 50, 500 és $5000 \text{ } \mu\text{g dm}^{-3}$ volt Se(IV) és Se(VI) specieszekre vonatkoztatva. Mátrixillesztésként mindegyik standard oldathoz NaOH-ot is adtunk $0,02 \text{ mól dm}^{-3}$ végső koncentrációban.

4.2.5. A kísérleti eredmények kiértékeléséhez használt egyéb programok

A molibdén és a szelén vizsgálatával kapcsolatos kutatási munkánk során kapott adatok feldolgozását és rendezését (lehetőség szerint) mindig a legfrissebb Microsoft Office programcsomaggal végeztük. Eleinte a Microsoft Office 2003, míg utoljára a Microsoft Office Professional Plus 2013-as programcsomagot használtuk az adatok kiértékelésére. A kutatási eredmények 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. Azért használtunk Duncan tesztet, mert ki akartuk küszöbölni az első fajú hiba halmozódását. Az $\alpha=5\%$ -os szignifikanciát globális alfabént alkalmaztuk, amelyet úgy kell érteni, hogy az összes lehetséges páronkénti összehasonlításnál elkövethető hiba maximális valószínűsége volt az 5%.

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTEKELÉSÜK

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 a molibdén és a szelén, a növények növekedésére és elemfelvételére gyakorolt hatásának vizsgálatához tápoldatos, rizoboxos, tenyészedenyes és szabadföldi kísérleteket is alkalmaztunk.

5.1. Tápoldatos kísérletből származó növényminták vizsgálata

5.1.1. A tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgónövények száraz tömege

A tápoldatos kísérletekben egy egyszikű (kukoricát (*Zea mays* L. cv. Norma SC)) és egy kétszikű teszt növényt (napraforgót (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR)) használtunk. A növények neveléséhez alkalmazott termesztési körülményeket a 4.1.1. alfejezet tartalmazza. A kísérletekben termesztett csíranövények gyökerének és hajtásának száraz tömeg értékeit, a molibdén kezelésnél a 29. táblázatban, a szelén formák kezeléseit kukorica és napraforgó száraz tömeg eredményeit pedig a 30-31. táblázatokban tüntettem fel.

29. táblázat: A tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgó-csíranövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (μM)	Kukorica		Napraforgó	
	Gyökér	Hajtás	Gyökér	Hajtás
\emptyset	0,129 \pm 0,007 ^a	0,279 \pm 0,010 ^a	0,210 \pm 0,006 ^a	0,203 \pm 0,001 ^a
0,07	0,112 \pm 0,013 ^{ab}	0,257 \pm 0,028 ^{ab}	0,212 \pm 0,017 ^a	0,262 \pm 0,006 ^b
0,7	0,124 \pm 0,003 ^{ab}	0,243 \pm 0,017 ^{ab}	0,221 \pm 0,003 ^a	0,280 \pm 0,010 ^b
7	0,108 \pm 0,010 ^b	0,221 \pm 0,020 ^b	0,171 \pm 0,022 ^b	0,262 \pm 0,010 ^b

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag \pm szórás, $n=3$)

30. táblázat: A tápoldaton nevelt kukorica-csíranövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény⁻¹) a szelénit és a szelenát kezeléseik függvényében

Se-kezelés (mg dm^{-3})	Gyökér		Hajtás	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
\emptyset	0,210 \pm 0,010 ^a	0,210 \pm 0,010 ^a	0,608 \pm 0,074 ^a	0,608 \pm 0,074 ^a
1	0,241 \pm 0,027 ^a	0,215 \pm 0,030 ^a	0,454 \pm 0,080 ^b	0,618 \pm 0,144 ^a
3	0,224 \pm 0,042 ^a	0,226 \pm 0,009 ^a	0,351 \pm 0,045 ^c	0,617 \pm 0,022 ^a
10	0,099 \pm 0,003 ^b	0,092 \pm 0,012 ^b	0,140 \pm 0,014 ^d	0,278 \pm 0,062 ^b
30	0,070 \pm 0,011 ^b	0,067 \pm 0,011 ^b	0,111 \pm 0,031 ^d	0,108 \pm 0,029 ^c
90	0,021 \pm 0,005 ^c		0,048 \pm 0,009 ^d	

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag \pm szórás, $n=3$)

A 29. táblázatban látható kukorica mérési adatok alapján azt tapasztaltuk, hogy sem a 0,07 μM , sem a 0,7 μM molibdén kezelés nem volt szignifikáns hatással a csíranövény (gyökér és hajtás) fejlődésére, szignifikáns különbséget csak a 7 μM -os molibdén kezelésnél kaptunk. A kontroll kukorica növényi részek száraz tömegéhez képest, a hajtásnál közel 20%-os, míg a gyökérnél megközelítően 17%-os csökkenést tudtunk kimutatni, mely tömeg különbségek még

vizuálisan is észrevehető (Mellékletek 1. fotó). A napraforgó hajtásánál a kontroll kezeléshez képest mintegy 30%-os növekedést, míg a gyökerénél megközelítően 20%-os tömegcsökkenést tapasztaltunk (Mellékletek 2. fotó), amely azt jelenti, hogy a 7 μM -os molibdén kezelés a napraforgóhajtás növekedésére szignifikáns serkentő hatással, a napraforgógyökér fejlődésére pedig szignifikáns tömegcsökkentő hatással van.

31. táblázat: A tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény^{-1}) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg dm^{-3})	Gyökér		Hajtás	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
\emptyset	0,192 \pm 0,027 ^a	0,192 \pm 0,027 ^a	1,05 \pm 0,14 ^a	1,05 \pm 0,14 ^a
1	0,307 \pm 0,014 ^b	0,308 \pm 0,052 ^b	0,461 \pm 0,047 ^b	1,01 \pm 0,04 ^a
3	0,262 \pm 0,027 ^c	0,142 \pm 0,010 ^c	0,333 \pm 0,034 ^c	0,626 \pm 0,007 ^b
10	0,0677 \pm 0,0029 ^d	0,0711 \pm 0,0043 ^d	0,181 \pm 0,018 ^d	0,367 \pm 0,047 ^c
30	0,0386 \pm 0,0067 ^{de}	–	0,128 \pm 0,012 ^{de}	–
90	0,0144 \pm 0,0014 ^e	–	0,0522 \pm 0,0089 ^e	–

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag \pm szórás, $n=3$)

A szelén vizsgálatánál a szelenit és a szelenát kezeléseket külön-külön vizsgálva azt az eredményt kaptuk, hogy mind a két szerves szelén forma jelentős mértékben csökkentette a vizsgált kukorica és napraforgó-gyökerek és hajtások száraz tömegét (30-31. táblázat). Megállapítható, hogy a kukoricánál a szelenit a kisebb koncentrációknál szignifikánsan kisebb biomasszát eredményezett, mint ugyanaz a szintű szelenát kezelés, de a 30 mg dm^{-3} szelén kezelésnél már mind a szelenit, mind a szelenát forma hasonló száraz tömegeket eredményezett, a hajtásnál a kontrollhoz képest megközelítően hatod részére csökkent. A szelén kezelés hatása a napraforgóra, mint kétszikű növényre rendkívül érdekes eredményt mutatott: amíg a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény hajtásának száraz tömege megközelítően fele volt a szelenit kezelésben, mint a szelenát kezelésben, viszont a teljes vizsgált koncentráció tartományban (0-90 mg dm^{-3}) életképes maradt, addig a szelenát kezelés ugyan kétszer nagyobb száraz tömeget produkált az 1-10 mg dm^{-3} koncentráció tartományban, viszont a 30 mg dm^{-3} szelenát kezelés már a napraforgónövény teljes pusztulását okozta (31. táblázat). A fentiekben bemutatott megállapításokhoz hasonló eredményeket kaptak szelenit és szelenát kezeléssel Hawrylak-Nowak et al. (2015) uborkával, valamint szelenát adagolással Turakainen et al. (2004) burgonyával és Xue et al. (2001) salátával kapcsolatos kísérleteik során.

A szelén és az adott növény kölcsönhatása az alkalmazott szelén koncentrációjától függ. Alacsonyabb koncentrációknál a szelén elősegíti a növekedést, az antioxidációt elősegítő elemek csoportjába lehet sorolni, relatíve nagyobb dózisokban viszont prooxidánsként hat, amely egyrészt metabolikus zavarokat, másrészt termés csökkenést eredményez (Xue et al., 2001). Hawrylak-Nowak (2008) kimutatta, hogy a tápoldat nagy szelén koncentrációja kisebb mértékű növényi növekedést és biomasszát eredményez, valamint az ásványi tápanyagok egyensúlyában is zavart okoz.

5.1.2. A tápoldaton nevelt kukorica és napraforgó, molibdén és szelén koncentrációja

A 4.1.1. alfejezetben részletezett tápoldatos kísérlet növényi mintái (kukorica és napraforgó) multielemes analízisét is elvégeztük a kísérlet befejezésekor, mely elemzési adatok közül a jelen dolgozatban a molibdén és szelén mérési eredményeket mutatom be (32. és 34-35. táblázatok). Ezen táblázatok azt is tartalmazzák, hogy a vizsgált növények különböző részei egy növényre vonatkoztatva, mennyi molibdént, illetve szelént (μg -ban) vettek fel a tápoldatból, továbbá meghatároztuk ezen molibdén és szelén tömegek relatív mennyiségét is %-ban. A mérési adatokból kiszámoltuk a tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövénynél a molibdén, valamint a szelén kezelés hatására, a molibdénre (33. táblázat), továbbá a szelénre (36. táblázat) vonatkozó bioakkumulációs ($\text{BAF} = C_{\text{hajtás}}/C_{\text{tápoldat}}$) és transzlokációs faktort ($\text{TF} = C_{\text{hajtás}}/C_{\text{gyökér}}$) (Rezvani és Zaefarian, 2011). Rezvani és Zaefarian (2011) publikációjukban definiálták, hogyha a bioakkumulációs faktor, a $\text{BAF} > 1$, akkor a növény akkumulátor (vagy hiperakkumulátor), amennyiben a $\text{BAF} < 1$, akkor pedig a kirekesztő növények csoportjába tartozik. A dolgozatomban viszont nem csak ezt a meghatározást használom, hanem a kutatók többsége által elfogadott osztályozást is, miszerint akkumulátor, indikátor és kirekesztő növények léteznek (Simon, 2004). Ezen túlmenően, elfogadva White (2015) és Adriano (2001) javaslatát, én is használom a hiperakkumulátor besorolást. Ezek alapján, ha a növényben az adott elem szárazanyagra vonatkozó koncentrációja meghaladja a 100 mg kg^{-1} koncentrációt, akkor akkumulátor, 1000 mg kg^{-1} érték fölött viszont már hiperakkumulátor-növénynek tekinthetjük.

32. táblázat: A molibdén kezelés hatása a tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának molibdén tartalmára, valamint a felvett molibdén mennyiségére

Mo-kezelés (μM)	Mo tartalom a gyökérben (mg kg^{-1})	Mo tömege a gyökérben ($\mu\text{g növény}^{-1}$ (%))	Mo tartalom a hajtásban (mg kg^{-1})	Mo tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$ (%))	Teljes növény (μg)
Kukorica					
Ø	5,78±0,12 ^a	0,746±0,002 ^a (51,5)	2,52±0,17 ^a	0,703±0,005 ^a (48,5)	1,45
0,07	7,89±0,46 ^b	0,884±0,005 ^a (52,9)	3,06±0,08 ^a	0,786±0,002 ^a (47,1)	1,67
0,7	17,9±0,14 ^c	2,21±0,00 ^b (60,0)	6,08±0,41 ^b	1,48±0,01 ^b (40,0)	3,69
7	66,5±1,4 ^d	7,17±0,01 ^c (61,2)	20,6±0,5 ^c	4,55±0,01 ^c (38,8)	11,7
Napraforgó					
Ø	9,87±0,01 ^a	2,07±0,01 ^a (64,1)	5,72±0,37 ^a	1,16±0,01 ^a (35,9)	3,23
0,07	13,3±0,1 ^a	2,82±0,01 ^a (62,3)	6,52±0,19 ^a	1,71±0,01 ^b (37,7)	4,53
0,7	39,2±1,7 ^b	8,65±0,03 ^b (74,8)	10,4±0,2 ^b	2,90±0,01 ^c (25,2)	11,6
7	125±6 ^c	21,4±0,1 ^c (62,4)	49,2±0,8 ^c	12,9±0,0 ^d (37,6)	34,3

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont molibdén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban (átlag±szórás, $n=3$)

A 32. táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a kontrollhoz képest a molibdén kezelések hatására a növény molibdén felvétele fokozódott, monoton növekvő molibdén koncentrációt tapasztaltunk mind a gyökér, mind a hajtás mintákban. Minden esetben szignifikáns különbséget tudtunk kimutatni, kivéve a kontroll és a $0,07 \mu\text{M}$ molibdén kezelések között a kukorica hajtásában, valamint a napraforgógyökér és hajtás mintáinál. Az eredményekből az is kitűnik, hogy a gyökér molibdén koncentrációja valamennyi kezelés esetében meghaladta a hajtásban mért

értékeket, amelyet a 33. táblázatban lévő transzlokációs faktor is jelez, miszerint minden egyes esetben kisebb mint egy értéket mutatott, melyek összhangban vannak Liu et al. (2010) eredményeivel is. Vizsgálva a növényi részek által felvett molibdén abszolút és relatív mennyiségét megállapítható, hogy a kukorica-csíránövénynél a kontroll és a 0,07 μM molibdén kezeléseknél az akkumulált molibdén gyökérben és hajtásban történő megoszlása közel azonos volt, viszont a tápoldat molibdén koncentrációjának növelésével a teljes növény által felvett molibdén nagyobb része jelent meg a kukorica gyökerében. A napraforgónál nem tapasztaltunk ilyen tendenciát. A napraforgó által akkumulált molibdén tömege mindegyik kezelésnél hajtás esetén megközelítően kétszerese, gyökér esetén pedig háromszorosa volt, mint a kukoricában számolt értékek. Sőt a napraforgógyökere által kivont molibdén mennyisége is közel kétszerese volt, mint amennyi molibdént vett fel a hajtása. Összességében a napraforgó teljes növény által akkumulált molibdén közel háromszorosa volt, mint a kukoricában számolt értékek.

33. táblázat: A molibdén kezelés hatása a molibdénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (tápoldaton nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény)

Mo-kezelés (μM)	BAF ($C_{\text{hajtás}}/C_{\text{tápoldat}}$)	TF ($C_{\text{hajtás}}/C_{\text{gyökér}}$)		BAF ($C_{\text{hajtás}}/C_{\text{tápoldat}}$)	TF ($C_{\text{hajtás}}/C_{\text{gyökér}}$)
	Kukorica	Kukorica		Napraforgó	Napraforgó
Ø	840	0,436		1907	0,580
0,07	315	0,388		671	0,490
0,7	86,7	0,340		148	0,265
7	30,5	0,310		72,9	0,394

A 33. táblázatban megtalálható molibdénre vonatkozó bioakkumulációs faktort (BAF) vizsgálva megállapítható, hogy mind a kukorica, mind a napraforgó akkumulátornövénynek minősül, mivel Rezvani és Zaefarian (2011) publikációja alapján mindkét esetben jóval nagyobb BAF értékeket tapasztaltunk, mint egy érték ($\text{BAF} > 1$). White (2015) és Adriano (2001) szerint viszont elvileg nem tekinthetjük sem a kukoricát, sem a napraforgót akkumulátornövénynek, mivel a molibdén koncentráció nem haladta meg a 100 mg kg^{-1} koncentráció határértéket. Meg kell jegyezni azonban, hogy az alkalmazott legnagyobb molibdén koncentráció sem volt túl nagy, csupán $7 \mu\text{M}$ volt, amely $0,672 \text{ mg kg}^{-1}$ -nak felel meg. Ez az érték annak a Cakmak és Marschner (1990) által meghatározott molibdén koncentrációnak a 100-szorosa volt, amelyet nélkülözhetetlennek találtak a tápoldatos növények neveléséhez. A 33. táblázatban a transzlokációs faktor (TF) értékeket is átfogóan tanulmányozhatjuk. Rezvani és Zaefarian (2011) tanulmányaiból is ismerjük, hogy amennyiben a $\text{TF} > 1$, az azt jelenti, hogy az elem (az adott esetben a Mo vagy a Se) transzlokációja hatékonyan ment végbe a gyökérből a hajtásba. Mivel a tápoldatos vizsgálatainkban minden TF érték egy alatt maradt, ezért általánosságban megállapíthatjuk, hogy a molibdénnek a gyökérből a hajtásba irányuló transzlokációja nem eléggé hatékony, azaz a kukorica- vagy a napraforgógyökérben minden esetben nagyobb molibdén koncentrációkat mértünk, mint a levelében (32. táblázat).

A tápoldatban alkalmazott növekvő szelenit és szelenát kezelések egyaránt monoton növekvő szelén tartalmat eredményeztek, mind a kukorica és a napraforgó, mind a gyökér és a

hajtás mintákban (34-35. táblázat). A kukoricához mint egyszikű növényhez képest (Mellékletek 3. és 4. fotók), a napraforgó mint kétszikű növény érzékenyebben reagált a szelenát kezelésre (Mellékletek 5. és 6. fotók), ugyanis az alkalmazott legnagyobb koncentráció (30 mg dm⁻³) a napraforgó teljes mértékű nekrozisát, elszáradását okozta (Mellékletek 6. fotó).

34. táblázat: A különböző szelén formák hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökerének és hajtásának szelén tartalmára, valamint a felvett szelén mennyiségére

Se-kezelés (mg dm ⁻³)	Se tartalom a gyökérben (mg kg ⁻¹)	Se tömege a gyökérben (µg növény ⁻¹ (%))	Se tartalom a hajtásban (mg kg ⁻¹)	Se tömege a hajtásban (µg növény ⁻¹ (%))	Teljes növény (µg)
Szelenit					
Ø	7,83±0,88 ^a	1,65±0,24 ^a (37,3)	4,58±0,58 ^a	2,79±0,47 ^a (62,7)	4,44
1	137±13 ^{ab}	33,0±3,9 ^{bc} (37,1)	124±18 ^b	56,3±10,3 ^b (62,9)	89,2
3	229±10 ^{ab}	51,0±8,0 ^d (46,5)	168±19 ^{bc}	59,2±13,2 ^b (53,5)	110
10	410±87 ^b	40,2±7,3 ^{ce} (59,3)	196±10 ^c	27,3±1,8 ^c (40,7)	67,5
30	434±70 ^b	29,8±1,9 ^b (56,2)	213±6 ^c	23,8±7,2 ^c (43,8)	53,6
90	2262±380 ^c	46,9±2,0 ^{de} (76,8)	301±53 ^d	14,2±1,5 ^{ac} (23,2)	61,1
Szelenát					
Ø	7,83±0,88 ^a	1,65±0,24 ^a (37,3)	4,58±0,58 ^a	2,79±0,47 ^a (62,7)	4,44
1	138±15 ^b	29,4±1,2 ^b (31,0)	108±3 ^b	66,4±13,8 ^b (69,0)	95,8
3	178±14 ^b	40,1±1,7 ^c (12,7)	448±4 ^c	277±10 ^c (87,3)	317
10	238±28 ^c	21,9±2,3 ^d (9,03)	807±45 ^d	222±38 ^d (91,0)	244
30	347±46 ^d	22,9±1,9 ^d (18,8)	943±72 ^e	101±21 ^e (81,2)	123

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan (p<0,05) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban (átlag±szórás, n=3)

35. táblázat: A különböző szelén formák hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának szelén tartalmára, valamint a felvett szelén mennyiségére

Se-kezelés (mg dm ⁻³)	Se tartalom a gyökérben (mg kg ⁻¹)	Se tömege a gyökérben (µg növény ⁻¹ (%))	Se tartalom a hajtásban (mg kg ⁻¹)	Se tömege a hajtásban (µg növény ⁻¹ (%))	Teljes növény (µg)
Szelenit					
Ø	39,6±6,0 ^a	7,64±1,87 ^a (81,9)	1,55±0,03 ^a	1,64±0,21 ^a (18,1)	9,28
1	452±26 ^b	139±14 ^b (81,2)	69,2±3,3 ^a	31,9±3,8 ^a (18,8)	171
3	610±12 ^b	160±18 ^c (86,6)	74,6±9,0 ^a	24,7±1,3 ^a (13,4)	185
10	1418±172 ^c	95,9±10,7 ^d (21,1)	1986±213 ^b	358±26 ^b (78,9)	454
30	1793±211 ^d	68,5±6,9 ^e (20,1)	2190±394 ^b	278±40 ^c (79,9)	346
90	2537±286 ^e	36,5±3,1 ^f (4,87)	13940±1981 ^c	718±60 ^d (95,1)	755
Szelenát					
Ø	39,6±6,0 ^a	7,64±1,87 ^a (81,9)	1,55±0,03 ^a	1,64±0,21 ^a (18,1)	9,28
1	143±10 ^b	43,9±7,8 ^b (8,77)	456±11 ^b	460±27 ^b (91,2)	504
3	222±12 ^c	31,5±2,2 ^c (2,97)	1660±31 ^c	1040±31 ^c (97,0)	1071
10	461±17 ^d	32,8±3,1 ^c (3,70)	2367±72 ^d	866±102 ^d (96,3)	899
30	–	–	–	–	–

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan (p<0,05) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban (átlag±szórás, n=3)

A 34. és 35. táblázatok adatait megvizsgálva látható, hogy a különböző szelén (szelenit és szelenát) kezeléseket, a molibdén kezelésekhöz képest, nagy valószínűséggel többféle paraméter

egymásmelletti és egymásra való hatásainak eredőjeként nyilvánul meg. Az viszont nagy általánosságban megállapítható, hogy a tápoldatban hasonló molibdén és szelén koncentrációjú kezeléseket alkalmazva a növényi részekben a molibdén és a szelén ugyanolyan nagyságrendű koncentrációi jelennek meg, amely azt bizonyítja, hogy a molibdén és a szelén a növényen belül, hasonló mobilitási sajátságokkal rendelkezik.

A kukorica és a napraforgó mintákban (a gyökérben és a hajtásban is), mind a szelenit, mind a szelenát kezelés hatására a szelén felvétele fokozódott, amely monoton növekvő szelén koncentrációt eredményezett. A szelenit és a szelenát kezeléseket a fenti táblázatokban is látható növelése többnyire szignifikáns változást jelentett (34. és 35. táblázat). Ez a szignifikáns változás a teljes szelén koncentrációknál minden esetben növekedés volt, míg a gyökérben és a hajtásban akkumulált szelén tömege egy maximum görbéhez hasonló gyors fel-, és lassúbb mértékű lefutást mutatott. A kukorica-csíránövénynél mind a szelenit, mind a szelenát adagolásnál a 3 mg dm⁻³-es kezelés biztosította a legnagyobb szelén tömeget a hajtásban, míg a napraforgónál a 10 mg dm⁻³ szelén kezelés eredményezte a maximális szelén tömeget a hajtásban, amely szelén tömegek öt-hatszor voltak nagyobbak a napraforgóhajtásban, mint egy kukorica növényi hajtásban. Ez annak ellenére igaz, hogy a 3 mg dm⁻³-es kezelésű kukoricahajtások betakarításkori száraz tömege volt a nagyobb, megközelítően kétszerese, mint a 10 mg dm⁻³-es szelén kezelésű napraforgóhajtások esetében. Az előtanulmányaink alapján meghatároztuk, hogy a szelenát kezelésnél nincs értelme a 90 mg dm⁻³-es kezelésnek, mivel az a növények teljes mértékű kipusztulását eredményezte. Ennek a megállapításunknak a figyelembevételével állítottuk be a kezeléseinket. A napraforgókísérletben viszont még a 30 mg dm⁻³ szelenát kezelés is túl nagy koncentrációnak mutatkozott, ugyanis a csíránövény teljes kipusztulását eredményezte (35. táblázat). Ugyanezt a tényt támasztja alá vizuálisan a Mellékletek 6. fotója is, mely fotó még a kísérlet ideje alatt, s nem a betakarításkor készült. Jól ismert tény, hogy a szelenát könnyebben transzlokálódik a gyökérből a föld feletti szervekbe, mint a szelenit vagy a szerves szelén, mivel a szelenit nagy része a gyökérszövetekben marad, ahol gyorsan átalakul szerves kötésű szelén vegyületekké (Zayed et al., 1998). A vizsgálatainkban alkalmazott kukorica (mint egyszikű növény) többé-kevésbé teljesítette a fenti tényt, viszont a napraforgó (mint kétszikű növény) közepes és nagy adagú szelenit kezelése már egyáltalán nem a „jól ismert elvárt mintázatot” követte.

A kukorica szelenittel való kezelése eleget tett az elvárásainknak, mivel a gyökér által felvett szelén nagyobb része a gyökérben maradt és nem szállítódott a hajtásba. Ennek következtében a kukorica minden szelenit kezelésére igaz, hogy a gyökér szelén koncentrációja magasabb volt, mint ugyanazon kukoricák gyökerei szelén tartalma. Ugyanezt a tényt mutatják a 36. táblázatban található kukorica szelenit kezelésének transzlokációs faktor értékei is, amelyek minden esetben kisebbek voltak, mint 1 ($TF_{\text{kukorica, szelenit}} < 1$). A kukorica szelenáttal és a napraforgó szelenittel való kisebb adagú kezelése viszont már nem tükrözte az elvárt koncentrációarányokat. A kukorica 0-1 mg dm⁻³-es szelenát, és a napraforgó 0-3 mg dm⁻³ adagú szelenit kezeléseknél a transzlokációs faktor értékek minden esetben egy alatt maradtak, azaz a hajtás minták szelén tartalma kisebb volt, mint ugyanezen minták gyökérének teljes szelén tartalma (36. táblázat).

36. táblázat: A szelén kezelés hatása a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (tápodaton nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény)

Se-kezelés (mg dm ⁻³)	BAF kukorica (C _{hajtás} /C _{tápodat})		TF kukorica (C _{hajtás} /C _{gyökér})		BAF napraforgó (C _{hajtás} /C _{tápodat})		TF napraforgó (C _{hajtás} /C _{gyökér})	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
Ø	183	183	0,585	0,585	62,2	62,2	0,039	0,039
1	121	105	0,906	0,781	67,5	445	0,153	3,19
3	55,5	148	0,732	2,52	24,7	549	0,122	7,48
10	19,5	80,5	0,478	3,39	198	236	1,40	5,14
30	7,1	31,4	0,491	2,72	72,9	–	1,22	–
90	3,34		0,133		155		5,49	

A napraforgónál viszont, mint ahogyan a 36. táblázat adataiból is látható, a szelénre vonatkozó bioakkumulációs faktor (BAF) sem a szelenit, sem a szelenát esetén nem mutat egyértelmű tendenciát. Az viszont egyértelműen megállapítható, hogy a napraforgó akkumulátornövénynek tekinthető, ugyanis Rezvani és Zaefarian (2011) megállapításának megfelelően mind a szelenit, mind a szelenát esetén sokkal nagyobb BAF értékeket tapasztaltunk, mint egy érték (BAF>1). A napraforgó a White (2015) és Adriano (2001) által megfogalmazottak szerint hiperakkumulátor-növénynek minősül, mivel a napraforgóhajtás szelén koncentrációja meghaladta az 1000 mg kg⁻¹ határértéket (35. táblázat). A szelenit kezelésben a napraforgóhajtás szelén tartalma még a 10000 mg kg⁻¹ értéket is meghaladta (megközelítően 14000 mg kg⁻¹). A 36. táblázatban a napraforgó transzlokációs faktor (TF) értékei növekvő tendenciát, bár nem szigorúan monoton növekedést mutatnak. Megállapíthatjuk, hogy a szelenát kezelésnél a szelén transzlokációja a gyökérből a hajtásba, sokkal hatékonyabban ment végbe, mint a szelenit kezelésnél, ugyanis már a napraforgó 1 mg dm⁻³ szelén kezelésénél (szelenát formában) a transzlokációs faktor 3,19, ami azt jelenti, hogy több mint háromszorosa a hajtás szelén tartalma, mint ugyanazon növény gyökerének szelén koncentrációja. A szelenát nagyobb mobilitását mutatja az a tény is, hogy a szelenát már a 3-10 mg dm⁻³ szelén adagolásnál is hasonló TF értékeket eredményezett, mint a szelenitnél a 90 mg dm⁻³ szelén adagolás, valamint a szelenátnál a nagyobb szelén felvétel már a 30 mg dm⁻³ szelén kezelésnél is a növény teljes kipusztulását idézte elő.

5.2. Rizoboxos kísérletből származó növényminták vizsgálata

5.2.1. A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgónövények száraz tömege

A rizoboxban végzett kísérleteinkhez egyszikű tesztnövényként ugyanazt a kukorica hibridet (*Zea mays* L. cv. Norma SC), kétszikű tesztnövénynek pedig ugyanazt a napraforgófajtát (*Helianthus annuus* L. cv. Arena PR) használtuk, mint amelyet a tápodatos kísérletekben is alkalmaztunk (4.1.2. alfejezet). A rizoboxokban termesztett csíránövények gyökerének és hajtásának száraz tömeg értékeit a molibdén kezelésnél a 37. táblázatban, míg a szelén formák kezeléseknél nyert kukorica- és napraforgóminták száraz tömeg eredményeit a 38-39. táblázatokban mutatjuk be.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az általunk alkalmazott kisebb molibdén

kezelések (kukoricánál a 30 mg kg⁻¹, napraforgónál a 30 és a 90 mg kg⁻¹) kedvezően hatottak a hajtás szárazanyag-produktumára. A nagyobb adagú molibdén kezelések viszont már a szárazanyag mennyiségek visszaesését eredményezték. A két vizsgált növény gyökere közül a kontroll kezeléshez képest a molibdén adagolás csupán a napraforgógyökér szárazanyag tartalmát növelte meg, azt is csak a 30 mg kg⁻¹-os kezelési szintig. A napraforgónál a további, míg a kukoricánál az összes kezelés a kontroll kezeléshez képest már gátolta a gyökér fejlődését. A napraforgógyökér száraz tömeg eredményeinél az összes kezelés, míg a kukoricánál csak a legnagyobb kezelés mutatott statisztikailag is igazolható változást. A fentiekben tapasztalt eredményeket láthatjuk a Mellékletek 7. és 8. fotókon, amelyek alapján megállapíthatjuk, hogy a kukorica-tesztnövényeken fitotoxicitásra utaló tünetek még a legnagyobb dózis esetén sem jelentkeztek, viszont a napraforgó-csíránövényeknél a 90 és 270 mg kg⁻¹-os molibdén adagok esetében már fitotoxicitási tünetek is megjelentek. A molibdén nagy koncentrációjának betudható mérgezési tünetekben szenvedő napraforgónövények gyökerei sárgás-barnás színt mutattak, a kisméretű levelei pedig sárgászöld színűek voltak.

37. táblázat: A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica		Napraforgó	
	Gyökér	Hajtás	Gyökér	Hajtás
Ø	0,0400±0,0098 ^a	0,0238±0,0034 ^{ab}	0,0201±0,0069 ^a	0,0531±0,0112 ^a
30	0,0394±0,0103 ^a	0,0267±0,0046 ^{bc}	0,0255±0,0053 ^b	0,0608±0,0086 ^b
90	0,0374±0,0120 ^a	0,0308±0,0083 ^c	0,0156±0,0046 ^c	0,0379±0,0088 ^c
270	0,0305±0,0069 ^b	0,0210±0,0049 ^a	0,0115±0,0028 ^d	0,0347±0,0058 ^c

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag±szórás, n=3)

38. táblázat: A rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény⁻¹) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Gyökér		Hajtás	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
Ø	0,0492±0,0105 ^{ab}	0,0492±0,0105 ^{ab}	0,0309±0,0063 ^a	0,0309±0,0063 ^a
1	0,0431±0,0033 ^a	0,0623±0,0120 ^b	0,0257±0,0033 ^{ab}	0,0267±0,0034 ^{ab}
3	0,0606±0,0104 ^b	0,0423±0,0047 ^{ac}	0,0279±0,0033 ^{ab}	0,0237±0,0046 ^{ab}
10	0,0465±0,0016 ^{ab}	0,0540±0,0106 ^{ab}	0,0241±0,0015 ^{ab}	0,0226±0,0054 ^b
30	0,0463±0,0131 ^{ab}	0,0309±0,0019 ^c	0,0212±0,0057 ^{bc}	0,0141±0,0022 ^c
90	0,0399±0,0008 ^a		0,0144±0,0015 ^c	

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag±szórás, n=3)

A 38-39. táblázatokban lévő eredményeket megvizsgálva megállapítható, hogy a szelenittel és a szelenáttal kezelt csíránövények gyökerének és hajtásának száraz tömegei viszonylag nem változtak jelentős mértékben. A kukoricaminták (Mellékletek 9. és 10. fotók) szárazanyag-produktumában mind a szelenit, mind a szelenát adagolás hatására csökkenő tendencia (megközelítően 20-50%-os csökkenés) figyelhető meg, továbbá ugyanez állapítható meg a napraforgógyökér-minták szelenát kezelése (Mellékletek 12. fotó) esetén is (közel 70%-os). A kukorica és napraforgóminták szelenit és szelenát kezeléseinél, ez utóbbi tömeg csökkenés

jelentette a leghatározottabb szignifikáns változást. A többi napraforgómintánál (Mellékletek 11. fotó) viszont már stagnálás, vagy kisebb mértékű szárazanyag-növekedés (5-40%-os változás) állapítható meg.

39. táblázat: A rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának száraz tömege (g növény^{-1}) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

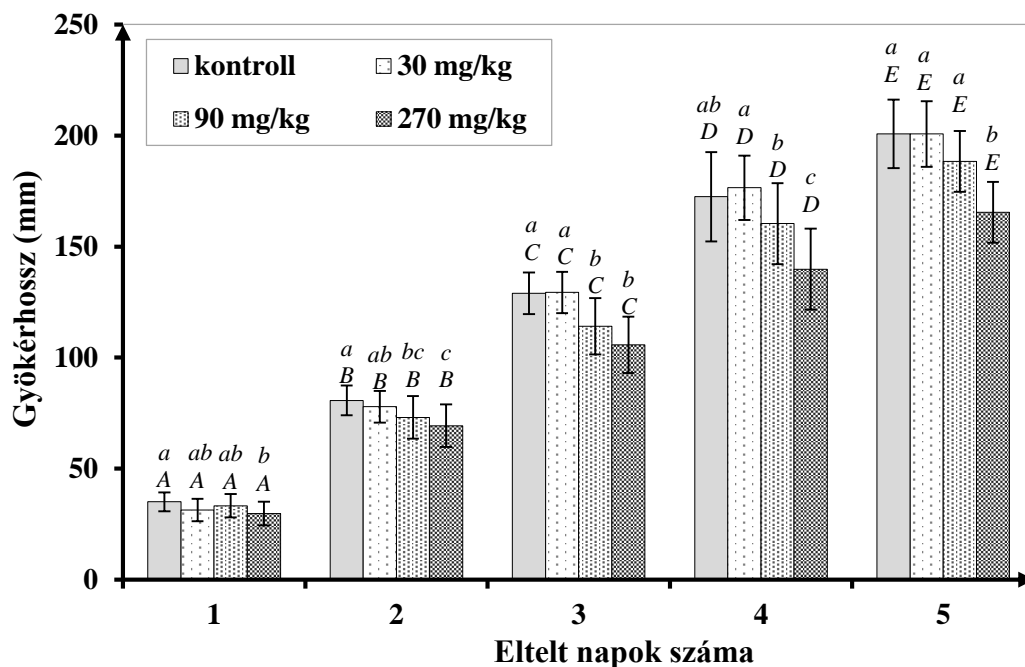
Se-kezelés (mg kg^{-1})	Gyökér		Hajtás	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
Ø	0,0240±0,0038 ^a	0,0240±0,0038 ^a	0,0442±0,0065 ^a	0,0442±0,0065 ^a
1	0,0237±0,0079 ^a	0,0191±0,0027 ^b	0,0496±0,0060 ^a	0,0641±0,0047 ^a
3	0,0290±0,0047 ^a	0,0123±0,0017 ^c	0,0475±0,0035 ^a	0,0542±0,0157 ^a
10	0,0200±0,0044 ^a	0,0077±0,0019 ^d	0,0509±0,0058 ^a	0,0533±0,0091 ^a
30	0,0287±0,0078 ^a	0,0072±0,0018 ^d	0,0538±0,0058 ^a	0,0586±0,0152 ^a
90	0,0252±0,0032 ^a		0,0347±0,0024 ^b	

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag±szórás, $n=3$)

5.2.2. A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgónövények gyökérhossza

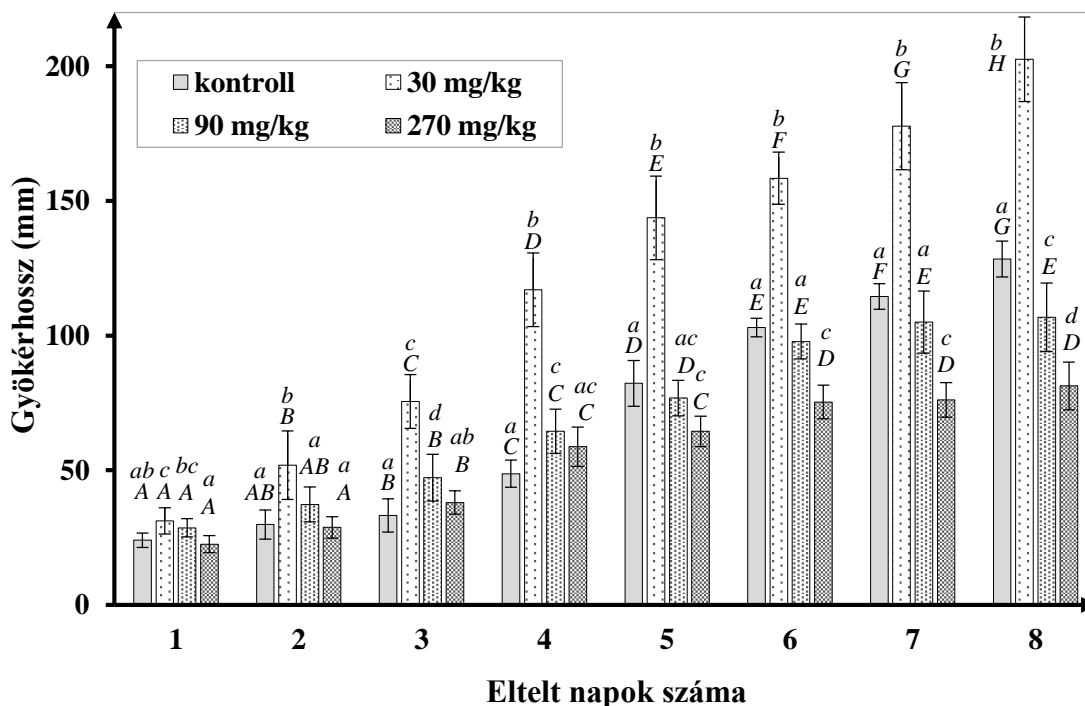
A rizoboxok kialakítása lehetővé tette a kísérleti növények gyökerei hosszának meghatározását. A molibdén kezeléssel kísérletben a kukorica- és a napraforgó-csíránövények gyökerének napi növekedését szemlélteti a 8. és a 9. ábra. A gyökér fejlődésének a nyomonkövetését a kukoricakísérlet bontásáig, azaz az 5. napig végeztük, és az eltelt napok között, valamennyi kezelésnél, szignifikáns növekedést tapasztaltunk. Az idő függvényében azonban minden egyes kezelésnél a kukoricagyökér növekedésének intenzitása folyamatosan csökkent, ugyanis amíg a 2. napon 121-151%-os, a 3. napon pedig 53-65%-os, a 4. napon 32-40%-os, addig az 5. napon már csak 14-18%-os növekedést mértünk. A 8. ábra adatai alapján az is megállapítható, hogy a talajhoz adagolt molibdén mennyisége is hatással volt a kukoricagyökér hosszának a fejlődésére. A kontroll és a 270 mg kg^{-1} molibdén kezelések között, egészen a kísérlet utolsó napjáig, minden egyes napon szignifikáns különbséget tapasztaltunk.

A molibdén adagolással végzett kísérletben a napraforgó-csíránövények gyökerei növekedésének detektálását nyolc napig végeztük. A 9. ábra adatait elemezve megállapítottuk, hogy a napraforgógyökér növekedésének intenzitása eltérést mutat a kukorica fejlődéséhez képest. A napraforgó esetében, az idő függvényében, szignifikáns növekedést csak a 30 mg kg^{-1} -os molibdén kezelés eredményezett, amely vizuálisan is látható módon, az összes kezeléshez képest, jelentősen növelte a napraforgógyökér produktivitását. A 90 mg kg^{-1} molibdén kezelésnél a kísérlet 1. és 2. napi, a 2. és a 3. napi, valamint a 6., a 7. és a 8. napi gyökér növekedései között már nem lehetett statisztikailag szignifikáns különbségeket kimutatni. A 270 mg kg^{-1} molibdén kezelésnél pedig a kísérlet 1. és 2. napi, a 4. és az 5. napi, valamint a 6., a 7. és a 8. napi gyökér fejlődések között nem találtunk szignifikáns eltérést.



8. ábra: Rizoboxban nevelt kukorica-csíránövények gyökérhossza (mm) az eltelt napok száma és a molibdén kezelések (Ø, 30, 90, 270 mg kg⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik a kezelések között, a vizsgálat egyes napjain belül. Az eltérő nagybetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik egy kezeléson belül, a vizsgálat egyes napjai között. (átlag±szórás, $n=3$)



9. ábra: Rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövények gyökérhossza (mm) az eltelt napok száma és a molibdén kezelések (Ø, 30, 90, 270 mg kg⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik a kezelések között a vizsgálat egyes napjain belül. Az eltérő nagybetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik egy kezeléson belül, a vizsgálat egyes napjai között. (átlag±szórás, $n=3$)

A szelenit és a szelenát kezelés hatására bekövetkező naponta mért gyökér növekedéseket tanulmányozhatjuk a kukorica- (40. táblázat) és a napraforgó-csíránövényeket (41. táblázat)

értékelő két táblázatban. A gyökér fejlődésének a nyomonkövetését a kukoricakísérlet bontásáig, azaz a 6. napig végeztük. Az eltelt napok között, valamennyi kezelésnél, az utolsó előtti napig többnyire szignifikáns gyökér növekedést tapasztaltunk, míg a kísérlet utolsó napján is növekedett ugyan a kukorica-gyökerek hossza, viszont ez már egyik esetben sem jelentett szignifikáns változást. A 40. táblázat adataiból azt is megállapíthatjuk, hogy a növekvő szelén kezelés (hasonlóan a molibdénhoz) is hatással volt a kukoricagyökér hosszára. Mind a szelenit, mind a szelenát adagolás eleinte serkentőleg hatott a kukoricagyökér növekedésére a kontroll mintákhoz képest, viszont míg a szelenitnél a legnagyobb növekedést a 3 mg kg⁻¹ koncentráció jelentette, addig a szelenátnál mindez már az 1 mg kg⁻¹ szelén adagolás hatására bekövetkezett. A szelenit és a szelenát viselkedésében bekövetkező utóbbi változást azzal tudjuk magyarázni, hogy a szelenit jobban adszorbeálódik a talajban a kristályvizet tartalmazó szeszkvioxidokhoz és a szervesanyagokhoz, mint a szelenát. Ennek következtében a szelenát esetén a növény számára hozzáférhető szelén koncentráció is nagyobb lesz a talajoldatban, amely a szelenát talajbani mobilitását, ezáltal a transzport folyamatait is elősegíti (Kabata-Pendias és Szteke, 2015).

40. táblázat: A rizoboxban nevelt kukorica-csíránövények gyökérhossza (mm) a szelenit és a szelenát kezelések, valamint az eltelt napok száma függvényében

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Az eltelt napok száma					
	1	2	3	4	5	6
Szelenit						
Ø	51,1±12,7 ^{abA}	106±26 ^{aB}	154±46 ^{aC}	193±63 ^{aCD}	225±65 ^{aDE}	249±62 ^{aE}
1	61,1±17,1 ^{aA}	108±20 ^{aB}	160±37 ^{aC}	196±50 ^{aCD}	229±62 ^{aDE}	252±71 ^{aE}
3	52,8±27,7 ^{abA}	113±44 ^{aB}	162±60 ^{abC}	199±62 ^{aCD}	236±60 ^{aDE}	258±58 ^{aE}
10	41,1±18,5 ^{bcA}	98,9±37,9 ^{aB}	156±51 ^{aC}	193±56 ^{aCD}	221±66 ^{aD}	239±66 ^{aD}
30	40,0±15,0 ^{bcA}	95,0±19,7 ^{aB}	146±40 ^{aC}	188±48 ^{aD}	215±58 ^{aDE}	237±61 ^{aE}
90	26,1±6,5 ^{cA}	66,7±18,4 ^{bB}	100±29 ^{bC}	124±35 ^{bCD}	143±39 ^{bDE}	158±41 ^{bE}
Szelenát						
Ø	51,1±12,7 ^{aA}	106±26 ^{abB}	154±46 ^{abC}	193±63 ^{abCD}	225±65 ^{abDE}	249±62 ^{abE}
1	65,6±21,3 ^{aA}	122±33 ^{aB}	176±41 ^{aC}	233±35 ^{aD}	274±50 ^{aE}	294±61 ^{aE}
3	61,1±15,2 ^{aA}	112±26 ^{abB}	164±37 ^{abC}	205±49 ^{abCD}	237±57 ^{abDE}	250±58 ^{abE}
10	48,3±17,9 ^{aA}	100±31 ^{abB}	149±48 ^{abC}	179±42 ^{bcCD}	199±44 ^{bcD}	208±47 ^{bcD}
30	48,9±16,2 ^{aA}	88,3±25,9 ^{bB}	123±31 ^{bC}	138±31 ^{cCD}	153±34 ^{cD}	162±36 ^{cD}

Az oszlopokon belül az eltérő kisbetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik a kezelések között, a vizsgálat ugyanazon napjain belül. Az eltérő nagybetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik egy kezeléson belül, a vizsgálat egyes napjai között. (átlag±szórás, $n=3$)

A napraforgó-csíránövénynek a szelenit és a szelenát kezelés hatására megjelenő gyökér növekedése (41. táblázat) eltérőnek mutatkozott a fentiekben megismert kukorica-csíránövények válaszreakciójától. A napraforgó gyökerek hosszát a kísérlet 7. napjáig, azaz a kísérlet befejezéséig mértük. Az eltelt napok között, valamennyi szelenit kezelésnél a gyökér növekedését tapasztaltuk, viszont csupán a 3. vagy a 4. napig volt szignifikáns a változás. A szelenát adagolásánál viszont a sokkal kisebb mértékű gyökér növekedés mellett szinte semmilyen szignifikáns hatást nem tudtunk kimutatni, sem az eltelt napok, sem a kezelések között. Sőt a legnagyobb szelenát kezelésnél (30 mg kg⁻¹) a napraforgó-csíránövény gyökerének a fejlődése is teljes mértékben megállt a 3. napot követően.

Összességében megállapíthatjuk, hogy mind a kukorica (mint egyszikű), mind a napraforgó-csíránövény (mint kétszikű tesztnövény) gyökér hosszát figyelembevéve elértük a szelenit és a szelenát adagolás toxikus szintjét. A szelén toxicitás megjelenése leginkább a napraforgó szelenát kezelésénél valósult meg, ahol a legnagyobb kezelésnél mért gyökér növekedése, a kontroll kezelésnek megfelelő értékéhez képest megközelítően 30%-ára esett vissza. Megállapíthatjuk, hogy mind a kukoricánál, mind a napraforgó-csíránövénynél a szelenit 90 mg kg⁻¹-os, míg a szelenát 30 mg kg⁻¹-os szelénre vonatkoztatott koncentrációjánál tapasztaltuk a toxicitási tüneteket.

41. táblázat: A rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövények gyökérhossza (mm) a szelenit és a szelenát kezelések, valamint az eltelt napok száma függvényében

Se- kezelés (mg kg ⁻¹)	Az eltelt napok száma						
	1	2	3	4	5	6	7
Szelenit							
Ø	32,8±17,9 ^{aA}	57,2±14,4 ^{aAB}	74,4±30,9 ^{abBC}	90,0±41,2 ^{abBCD}	98,3±44,1 ^{abBCD}	108±53 ^{abCD}	123±65 ^{abD}
1	38,3±28,3 ^{aA}	62,2±22,4 ^{aAB}	82,2±30,8 ^{abABC}	101±50 ^{abBCD}	134±78 ^{aCDE}	156±88 ^{aDE}	170±79 ^{abcE}
3	38,3±29,6 ^{aA}	52,2±41,5 ^{aA}	93,3±35,0 ^{aB}	109±41 ^{aBC}	127±30 ^{abBCD}	143±44 ^{abCD}	151±52 ^{abcD}
10	46,7±24,2 ^{aA}	67,8±44,2 ^{aA}	96,7±53,4 ^{aAB}	116±72 ^{aABC}	148±97 ^{aBCD}	182±97 ^{aCD}	208±103 ^{cD}
30	22,2±18,0 ^{aA}	51,1±40,1 ^{aAB}	79,4±43,3 ^{abABC}	114±61 ^{aBCD}	142±69 ^{aCDE}	171±92 ^{aDE}	204±109 ^{bcE}
90	35,0±19,0 ^{aA}	46,1±25,8 ^{aAB}	47,8±26,4 ^{bAB}	50,6±25,6 ^{bAB}	67,8±34,5 ^{bABC}	75,6±38,1 ^{bBC}	88,9±51,6 ^{aC}
Szelenát							
Ø	32,8±17,9 ^{aA}	57,2±14,4 ^{aAB}	74,4±30,9 ^{abBC}	90,0±41,2 ^{abBCD}	98,3±44,1 ^{abCD}	108±53 ^{aCD}	123±65 ^{aD}
1	31,1±29,8 ^{aA}	50,6±40,5 ^{aAB}	61,7±40,0 ^{aAB}	69,4±40,0 ^{abAB}	73,3±38,6 ^{abB}	75,6±39,0 ^{abB}	77,8±40,4 ^{abcB}
3	50,6±30,5 ^{aA}	68,9±40,6 ^{aA}	75,0±38,6 ^{aA}	80,6±40,3 ^{aA}	83,3±41,4 ^{aA}	86,1±41,4 ^{aA}	87,8±42,8 ^{abA}
10	38,9±21,5 ^{aA}	61,1±36,9 ^{aA}	66,7±38,2 ^{aA}	70,0±40,2 ^{abA}	71,7±41,5 ^{abA}	73,3±42,9 ^{abA}	75,0±44,4 ^{bcA}
30	30,6±22,3 ^{aA}	35,6±24,0 ^{aA}	38,3±27,2 ^{aA}	38,3±27,2 ^{aA}	38,3±27,2 ^{aA}	38,3±27,2 ^{aA}	38,3±27,2 ^{aA}

Az oszlopokon belül az eltérő kisbetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik a kezelések között, a vizsgálat ugyanazon napjain belül. Az eltérő nagybetűk a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik egy kezelésen belül, a vizsgálat egyes napjai között. (átlag±szórás, $n=3$)

5.2.3. A rizoboxban nevelt kukorica és napraforgó, molibdén és szelén koncentrációja

A rizoboxokban használt kísérleti talaj legfontosabb paramétereit a 13. táblázat mutatja be. A paraméterek alapján megállapíthatjuk, hogy a kiindulási talaj tápanyagtökéje átlagosnak tekinthető, nehézfémekkel nem volt szennyezett (Aubert és Pinta, 1977; Kabata-Pendias és Pendias, 2001). A 13. táblázatban található legfontosabb adatok mellett meghatároztuk egyéb elemek koncentrációját is, melyek közül a molibdén 0,750 mg kg⁻¹, a szelén pedig 0,812 mg kg⁻¹ értékeknek adódott. Az eredmények értékelése szempontjából azt is fontos lehet tudni, hogy a kezeletlen és a kezelt talajok összes molibdén és szelén tartalmából mennyi a növények számára hasznosítható, azaz a felvehető molibdén és szelén koncentráció. A kezeletlen, azaz a kontroll látóképi talajból az összes molibdén és szelén tartalomnak közel 10 és 80%-a a növény számára hozzáférhető molibdén és szelén koncentráció. Minél nagyobb a kezelés (azaz a potenciális szennyezés) mértéke, annál nagyobb a fenti érték. Pl. a fenti talaj 0,750 mg kg⁻¹ molibdén tartalmából megközelítőleg 10%-a volt a Lakanen-Erviö-féle kivonószer használatával mért molibdén tartalom. Mindez összhangban van Szabó et al. (1987) adataival, miszerint a talajok

összes molibdén tartalma $0,5-3,0 \text{ mg kg}^{-1}$, és ebből $0,001-0,800 \text{ mg kg}^{-1}$ a növények számára hasznosítható mennyiség.

A 4.1.2. alfejezetben részletezett rizoboxos kísérletek befejezésekor elvégeztük a kukorica és napraforgóminták multielemes analízisét, mely eredmények közül a jelen dolgozatban csupán a molibdén és a szelén mérési adatokat értékelem (42-44. táblázatok). Az 5.1.2. alfejezetben részletezettekhez hasonlóan, az előbbi táblázatok azt is tartalmazzák, hogy a vizsgált növények különböző részei (egy növényre vonatkoztatva), mennyi molibdént, illetve szelént (μg -ban) vettek fel az alkalmazott látóképi mészlepedékes csernozjom talajból, továbbá meghatároztuk ezen molibdén és szelén tömegek relatív mennyiségét is %-ban.

42. táblázat: A molibdén kezelés hatása a rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának molibdén tartalmára, valamint a felvett molibdén mennyiségére

Mo-kezelés (mg kg^{-1})	Mo tartalom a gyökérben (mg kg^{-1})	Mo tömege a gyökérben ($\mu\text{g növény}^{-1}$ (%))	Mo tartalom a hajtásban (mg kg^{-1})	Mo tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$ (%))	Teljes növény (μg)
Kukorica					
Ø	$2,29 \pm 0,25^a$	$0,092 \pm 0,001^a$ (66,4)	$1,95 \pm 0,15^a$	$0,046 \pm 0,001^a$ (33,6)	0,138
30	210 ± 13^b	$8,29 \pm 0,05^b$ (71,9)	121 ± 6^b	$3,24 \pm 0,02^b$ (28,1)	11,5
90	573 ± 26^c	$21,4 \pm 0,1^c$ (70,8)	287 ± 20^c	$8,85 \pm 0,06^c$ (29,2)	30,3
270	1082 ± 75^d	$33,0 \pm 0,4^d$ (80,0)	392 ± 5^d	$8,23 \pm 0,01^d$ (20,0)	41,2
Napraforgó					
Ø	$6,43 \pm 0,99^a$	$0,129 \pm 0,002^a$ (31,7)	$5,24 \pm 1,00^a$	$0,278 \pm 0,005^a$ (68,3)	0,407
30	583 ± 23^b	$14,9 \pm 0,1^b$ (37,4)	409 ± 48^b	$24,9 \pm 0,3^b$ (62,6)	39,7
90	1458 ± 167^c	$22,7 \pm 0,3^c$ (30,8)	1350 ± 46^c	$51,2 \pm 0,2^c$ (69,2)	73,9
270	990 ± 30^d	$11,4 \pm 0,0^d$ (20,0)	1315 ± 35^c	$45,6 \pm 0,1^d$ (80,0)	57,0

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont molibdén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban. (átlag \pm szórás, $n=3$)

A kontroll talaj kevesebb mint 1 mg kg^{-1} molibdént tartalmazott, amiből a kukorica-csíránövény részei viszonylag kis mennyiségű molibdént, a napraforgó pedig hozzávetőleg ezen értékeknek a háromszorosát vette fel. Ennek megfelelően a kukorica gyökerének és hajtásának megközelítően 2 mg kg^{-1} , míg a napraforgó részeinek közel 6 mg kg^{-1} volt a molibdén koncentrációja. A kísérletben használt molibdén kezelések hatására azonban jelentős mértékben nőtt a gyökerek és a hajtások molibdén koncentrációja. Ez a növekedés eleinte egyenes arányban történt, majd a legnagyobb adagú kezelések (270 mg kg^{-1}) hatására a kukoricánál már nem lineáris volt ez az összefüggés, a napraforgó-csíránövény gyökerénél és hajtásánál pedig jelentős koncentráció visszaesés következett be. A napraforgóhajtás legnagyobb adagú kezelése kivételével az összes kezelés szignifikáns változást eredményezett, valamint ez utóbbi minta ismételt kivételével a gyökér minták molibdén koncentrációja valamennyi kezelés esetén meghaladta a hajtás mintákban mért értékeket. Gupta és Lipsett (1981), valamint Anke et al. (2010) szerint a növények viszonylag nagy molibdén koncentrációja esetén is csak ritkán tapasztalunk fitotoxikus tüneteket, továbbá arról sem szabad elfelejtkeznünk, hogy a növényekben kialakuló magas molibdén koncentráció az állatok táplálásánál, főként a kérődzők esetén molibdenózist okozhat ($>5 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdén tartalom a szárazanyagban). A 42. táblázatban található mérési

adatok, valamint a Mellékletek 8. fotója alapján valószínűsíthetjük, hogy már a 90 mg kg⁻¹-os molibdén dózis is toxikus tünetek előidézésére elegendő mennyiség a napraforgó-csíránövény számára, azt viszont már egyértelműen kijelenthetjük, hogy a legnagyobb kezelés (270 mg kg⁻¹) fitotoxicitást okozott a napraforgónövény esetében.

A rizoboxban nevelt kukorica és napraforgó-csíránövények által kivont molibdén mennyiségek is megtalálhatók a már említett 42. táblázatban. Látható, hogy egy kontroll kukorica, vagy egy napraforgó-csíránövény által kivont molibdén mennyisége rendkívül alacsony volt (0,138 µg növény⁻¹ és 0,407 µg növény⁻¹). A kukorica- és a napraforgó-csíránövényeknél a kezelések hatására viszont nagymértékben megsokszorozódott (a 30 mg kg⁻¹ közel 100-szorosára, a 90 mg kg⁻¹ megközelítően 200-szorosára) a gyökerek és a hajtások által kivont molibdén mennyisége. A kontrollhoz viszonyítva a 270 mg kg⁻¹ legnagyobb kezelés pedig hozzávetőleg 300-szorosára növelte meg a kivont mennyiséget, viszont ez már csak a kukoricagyökér és a teljes növény által kivont molibdén mennyiségére igaz. A fentiekben túlmenően általánosságban az is megállapítható, hogy a kukorica teljes növény által kivont molibdén mennyiségének kétharmada a gyökerében, míg egyharmada a hajtásában volt megtalálható. A napraforgónál ugyanez fordítva fogalmazható meg: a napraforgó teljes növény által kivont molibdén mennyiségének egyharmadát a gyökerében, míg kétharmadát a hajtásában mértük. Az előbbieken megfogalmazott arányokban egyfajta (nem szigorú) tendencia figyelhető meg, amely arány változása is (hasonlóan az előbbiekhöz) fordítva valósult meg a két vizsgált növénynél: a kukoricánál 80%-20%, míg a napraforgónál 20%-80%-ra tolódott el.

43. táblázat: A különböző szelén formák hatása a rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény gyökerének és hajtásának szelén tartalmára, valamint a felvett szelén mennyiségére

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Se tartalom a gyökérben (mg kg ⁻¹)	Se tömege a gyökérben (µg növény ⁻¹ (%))	Se tartalom a hajtásban (mg kg ⁻¹)	Se tömege a hajtásban (µg növény ⁻¹ (%))	Teljes növény (µg)
Szelenit					
Ø	0,903±0,237 ^a	0,043±0,006 ^a (75,4)	0,467±0,117 ^a	0,013±0,006 ^a (24,6)	0,057
1	2,17±0,55 ^a	0,097±0,023 ^a (88,9)	0,450±0,132 ^a	0,010±0,000 ^a (11,1)	0,107
3	7,29±1,34 ^{ab}	0,447±0,139 ^{ab} (94,6)	0,858±0,030 ^a	0,023±0,006 ^{ab} (5,37)	0,470
10	20,9±4,5 ^b	0,963±0,191 ^b (93,3)	2,81±0,14 ^b	0,070±0,000 ^b (6,67)	1,03
30	63,9±12,1 ^c	2,86±0,28 ^c (93,9)	8,96±1,12 ^c	0,187±0,047 ^c (6,10)	3,05
90	111±14 ^d	4,42±0,62 ^d (94,2)	19,0±1,1 ^d	0,273±0,045 ^d (5,83)	4,70
Szelenát					
Ø	0,903±0,237 ^a	0,043±0,006 ^a (75,4)	0,467±0,117 ^a	0,013±0,006 ^a (24,6)	0,057
1	44,8±3,1 ^a	2,78±0,55 ^{ab} (50,6)	101±4 ^b	2,71±0,44 ^b (49,4)	5,49
3	221±32 ^b	9,43±2,50 ^b (56,7)	302±38 ^c	7,17±1,78 ^c (43,3)	16,6
10	852±9 ^c	46,1±9,6 ^c (80,1)	515±99 ^d	11,3±0,8 ^d (19,9)	57,4
30	1558±69 ^d	48,1±3,3 ^c (77,5)	993±69 ^e	13,9±1,8 ^e (22,5)	62,0

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban. (átlag±szórás, n=3)

A kontroll talaj a szelénből is (a molibdénhez hasonlóan) kisebb koncentrációt tartalmazott, mint 1 mg kg⁻¹. A kukorica-csíránövény gyökere a talaj 0,812 mg kg⁻¹ szelén tartalmához képest,

nagyságrendileg hasonló ($0,903 \text{ mg kg}^{-1}$), míg a hajtása megközelítően fele ($0,467 \text{ mg kg}^{-1}$) koncentrációban tartalmazta a szelént. A 43. táblázat adatait tanulmányozva megfogalmazhatjuk, hogy mind a kukoricaminták szelén tartalmának, mind a vizsgált növényi részek által kivont szelén abszolút mennyiségének szinte monoton növekedése figyelhető meg a szelén kezelések függvényében. Látható, hogy csak a kisebb szelenit dózisek ($1\text{-}3 \text{ mg kg}^{-1}$) nem eredményeztek rögtön szelén szint növekedést, vagy a kezelések hatására kialakult növekedés nem járt szignifikáns hatással. A kukorica gyökerének és hajtásának szelenittel való kezelése szinte lineáris szelenit tartalom növekedést eredményezett. Ez a növekedési ráta viszont messze elmarad a szelenát kezelésben tapasztaltakhoz képest. A talaj szelén tartalmának 1 mg kg^{-1} -mal való növelése szelenát formában, a kontroll kezeléshez képest a kukoricagyökérben közel 50-szeres, míg a hajtásban megközelítően 200-szoros szelén tartalom növekedést eredményezett. A szelenát adagolásnál ez jelentette a leglátványosabb szelén tartalom növekedést. A további háromszoros koncentráció növelési szintek már csak kétszeres-háromszoros szelén tartalom növekedést jelentettek. A szelenát kezelésben összességében, a kontroll mintához képest, a legnagyobb, azaz a 30 mg kg^{-1} -os szelenát adagolással, megközelítően 1700-szoros (gyökér) és 2100-szoros (hajtás) szelén tartalom növekedést értünk el. A kukorica szelenit adagolásánál ugyanezen értékek már sokkal szolidabb növekedést jelentettek, ugyanis csak 40-200-szoros szelén tartalom növekedés mutatkozott a kukorica növényi részeiben a legnagyobb, azaz a 90 mg kg^{-1} -os szelenit kezelés hatására. Összehasonlítva a szelenit és a szelenát hatását ugyanolyan kezelési szinteken (a 30 mg kg^{-1} -os dózisek esetén), a kukoricakísérletben alkalmazott szelenát kezelés a gyökérben 24-szer, míg a hajtásban 110-szer nagyobb szelén tartalom dúsulást eredményezett. Amennyiben az egy növény által kivont szelén tartalmat szeretnénk összehasonlítani mind a kezelések, mind a szelén formák között, akkor már a kísérletben kapott száraz tömegek is befolyásolják a számolt értékeket. Ezáltal összetettebb eredményt kaptunk, mivel a szelenát hatására a fentiekben részletezett nagy szelén koncentráció jelenik meg, így ez fitotoxikus hatású a növény fejlődésére, tehát a szelenát nagyobb dózisa kisebb száraz tömegeket eredményezett. Az előbbieken részletezett hatások eredőjeként a szelenát adagolás hatására a gyökérben csak 17-szer, míg a kukorica hajtásában 74-szer volt nagyobb az egy növény által kivont szelén mennyisége. Ha külön-külön értékeljük a szelén formák hatását, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy a 90 mg kg^{-1} -os szelenit adagolás a kontroll kezeléshez képest, a kukoricagyökérben közel 100-szoros, a hajtásában pedig 21-szeres kivont szelént produkált. Ha viszont a potenciális szennyezőforrás szelenát formájában lenne megtalálható (30 mg kg^{-1} -os adag) a talajban, akkor a kukoricagyökérben és a hajtásában is közel 1000-szeresére nőne a kivont szelén mennyisége a kontroll kezeléshez viszonyítva. Ha a szelén felvételt a növényen belüli százalékos eloszlással szeretnénk szemléltetni akkor megállapíthatjuk, hogy a felvett szelén nagyobb része mind a szelenit, mind a szelenát kezelés esetén a kukoricagyökérben található, a szelenit kezelésnél 75-95%-a, míg a szelenát kezelés esetén csupán 50-80%-a. Ezek alapján is az nyer bizonyítást kukorica-tesztnövényt alkalmazva, hogy a szelenát könnyebben transzlokálódik a növényen belül a gyökérből a hajtásba mint a szelenit.

44. táblázat: A különböző szelén formák hatása a rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény gyökerének és hajtásának szelén tartalmára, valamint a felvett szelén mennyiségére

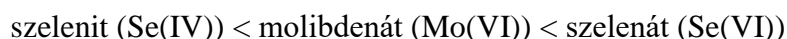
Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Se tartalom a gyökérben (mg kg ⁻¹)	Se tömege a gyökérben (µg növény ⁻¹ (%))	Se tartalom a hajtásban (mg kg ⁻¹)	Se tömege a hajtásban (µg növény ⁻¹ (%))	Teljes növény (µg)
Szelenit					
Ø	0,749±0,063 ^a	0,018±0,003 ^a (65,4)	0,231±0,115 ^a	0,010±0,004 ^a (34,6)	0,028
1	4,52±0,93 ^a	0,107±0,029 ^a (46,9)	2,46±0,98 ^a	0,123±0,042 ^{ab} (53,1)	0,230
3	13,0±3,5 ^{ab}	0,380±0,111 ^a (48,3)	8,32±1,31 ^b	0,393±0,032 ^b (51,7)	0,773
10	31,5±5,4 ^b	0,613±0,049 ^a (35,4)	22,1±1,8 ^c	1,12±0,08 ^c (64,6)	1,73
30	116±15 ^c	3,33±1,07 ^b (61,7)	37,3±2,2 ^d	2,01±0,33 ^d (38,3)	5,35
90	262±29 ^d	6,66±1,47 ^c (77,9)	53,5±1,9 ^e	1,86±0,19 ^d (22,1)	8,52
Szelenát					
Ø	0,749±0,063 ^a	0,018±0,003 ^a (65,4)	0,231±0,115 ^a	0,010±0,004 ^a (34,6)	0,028
1	141±32 ^b	2,65±0,42 ^b (12,1)	301±15 ^b	19,2±0,9 ^a (87,9)	21,9
3	151±39 ^b	1,82±0,27 ^c (3,1)	1210±182 ^c	67,3±27,1 ^b (96,9)	69,1
10	215±61 ^b	1,59±0,11 ^c (1,9)	1579±33 ^d	84,0±13,0 ^{bc} (98,1)	85,6
30	448±83 ^c	3,11±0,30 ^d (2,9)	1805±196 ^e	104±15 ^c (97,1)	107

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban. (átlag±szórás, n=3)

A rizoboxban nevelt napraforgónövény szelén kezeléseinek eredményei (44. táblázat) tendenciájukban nagyon hasonlítanak a kukoricanövényénél kapott mérési eredményekhez. A szelenát szintek emelkedésével közel monoton növekedést mutat mind a napraforgóminták szelén tartalma, mind a vizsgált növényi részek (gyökerek és hajtások) által kivont szelén mennyisége, csupán a napraforgógyökér által kivont szelén mennyisége az a vizsgált paraméter a 44. táblázatban, amely nem növekszik a szelenát szint növelésével. Főként a kisebb szelenát dózisok (1-3 mg kg⁻¹) azok, amelyek nem eredményeztek biztosan szignifikáns hatást. A 44. táblázat oszlopain belül viszont egyedül a hajtásban lévő szelén tartalom az, amely minden szelén kezelés hatására egyértelmű szignifikáns növekedést eredményezett. A napraforgó talajának szelenittel való kezelése szinte lineáris összefüggés szerint növelte a gyökerének a szelén tartalmát. Ugyanezen növények hajtás mintáinak a szelén tartalma viszont már telítési görbe jellegű változást mutatott. Ugyancsak telítési görbe jellegű változást tapasztaltunk, ha szelenáttal növeltük az alkalmazott talaj szelén tartalmát, mely esetben a napraforgónövény hajtásai szelén tartalmának telítési jellege a szelén tartalom kezdeti gyors növekedését követően alakult ki. Amíg a szelén tartalom 1 mg kg⁻¹-mal, szelenit formában való növelésével, a napraforgó gyökérben közel hatszoros, a hajtásban pedig közel 10-szeres szelén tartalom növekedést eredményezett, addig ugyanez a szintű kezelés szelenáttal a gyökérnél megközelítően 190-szeres, a napraforgó hajtásánál pedig már 1300-szoros szelén tartalom növekedést jelentett a kontroll kezelés megfelelő eredményeihez képest. A szelenát adagolásnál ez jelentette a leglátványosabb szelén tartalom növekedést. A kukorica és a napraforgó szelenát kezeléseit összehasonlítva megállapítható, míg a kukoricának a gyökere az (a hajtáshoz képest), ahol szelenát kezelés hatására a szelén nagyobb koncentrációját találjuk, valamint a növény által kivont szelén nagyobb hányada (közel 80%-a) is a gyökérben raktározódik, addig a napraforgónövényben (szelenát kezelés hatására) a

szelén könnyebben transzlokálódik a hajtásba, ezáltal a növény által kivont szelén tartalom csupán 1,5-3%-a lesz megtalálható a napraforgó gyökerében, továbbá a szelén koncentráció és a növény által kivont szelén is a hajtásban lesz jóval nagyobb (a koncentrációja 1805 mg kg^{-1} , a %-os mennyisége pedig 97%). Amennyiben a napraforgó nevelésére használt talaj szelén szintjének szelenáttal való növelésével vizsgáljuk a napraforgó növényi részek szelén tartalmát a kontroll mintákhoz képest megállapíthatjuk, hogy a legnagyobb, azaz a 30 mg kg^{-1} -os szelenát adagolással, megközelítően 600-szoros (gyökér) és 7800-szoros (hajtás) szelén tartalom növekedést tudunk elérni. Ugyanez a dózis (30 mg kg^{-1}), csak szelenit formájában használva, a napraforgónál 150-160-szoros (a gyökérnél 150-szeres, a hajtásnál 160-szoros) szelén tartalom növekedést eredményezett, míg a következő, azaz a legnagyobb (90 mg kg^{-1}) szelenit kezelés a gyökérnél 350-szeres, a hajtásnál pedig 230-szoros szelén tartalom növekedést jelentett, a kontroll mintákhoz képest.

A 45. táblázatban a molibdénre, míg a 46. táblázatban a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktor (TF) értékei találhatóak. A látóképi mészlepedékes csernozjom talajban nevelt kukoricánál és napraforgónál, a háromféle vizsgált oxoanionra (molibdenát, szelenit és szelenát) vonatkozó bioakkumulációs és transzlokációs faktorokat megvizsgálva látható, hogy a legkisebb BAF és TF értékekkel a szelenit, majd a molibdenát és végül a szelenát rendelkezik:



Az eredményeink alapján, ugyanolyan nagyságú dózisok hatását összehasonlítva megállapítható, hogy a molibdenát (Mo(VI)) 11-14-szer nagyobb BAF értékekkel rendelkezik, mint a szelenit (Se(IV)), a szelenát (Se(VI)) pedig négyszer-nyolcszor nagyobb értékekkel, mint a molibdenát. Ugyanilyen elvek szerint kiszámolva a TF értékek arányát, a molibdenát kétszer-négyszer nagyobb TF értékekkel rendelkezik, mint a szelenit. A szelenát valamint a molibdenát TF értékére kukoricacsíra esetén hasonló értéket kaptunk, tehát az arányuk közel egy. A napraforgócsíra kísérletnél számolt szelenát és molibdenát TF értékek aránya pedig megközelítően hat. Ez azt jelenti, hogy a napraforgóban a szelenát anionként felvett szelén gyökérből hajtásba irányuló transzlokációja hatszor hatékonyabban megy végbe, mint ahogyan az a molibdenát felvételénél megvalósul. Amennyiben viszont az azonos dózisú szelén formák BAF értékeit hasonlítjuk össze megállapítható, hogy a kukoricacsíránál 100-350-szer nagyobb a szelenátra vonatkozó bioakkumulációs (BAF) faktor, mint a szelenité, míg a napraforgócsíránál ugyanez az arány csupán 50-150. Mindezek alapján kijelenthetjük, hogy a kukoricacsírában 100-350-szer, a napraforgócsírában pedig 50-150-szer hatékonyabb a szelénnek a talajból/talajoldatból a hajtásba irányuló transzlokációja, ha szelenátot alkalmazunk, mint ahogyan az a szelenit oxoanionként történő szelén felvételénél megvalósul. A TF értékek összehasonlításával megállapíthatjuk, hogy mind a kukoricánál, mind a napraforgónál, a szelenátra vonatkozó transzlokációs faktorok (TF) megközelítően 4-13-szor nagyobb értékek, mint amelyeket a szelenit alkalmazásánál kaptunk, tehát szelenátként a szelén hajtásba irányuló transzlokációja 4-13-szor nagyobb, mint amit a szelenit alkalmazásánál tapasztaltunk.

45. táblázat: A molibdén kezelés hatása a molibdénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíranövény)

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	BAF (C _{hajtás} /C _{talaj})	TF (C _{hajtás} /C _{gyökér})	BAF (C _{hajtás} /C _{talaj})	TF (C _{hajtás} /C _{gyökér})
	Kukorica	Kukorica	Napraforgó	Napraforgó
Ø	2,60	0,852	6,99	0,815
30	3,93	0,576	13,3	0,702
90	3,16	0,501	14,9	0,926
270	1,45	0,362	4,86	1,33

46. táblázat: A szelén kezelés hatása a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíranövény)

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	BAF kukorica (C _{hajtás} /C _{talaj})		TF kukorica (C _{hajtás} /C _{gyökér})		BAF napraforgó (C _{hajtás} /C _{talaj})		TF napraforgó (C _{hajtás} /C _{gyökér})	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
Ø	0,575	0,575	0,517	0,517	0,284	0,284	0,308	0,308
1	0,248	55,9	0,207	2,26	1,36	166	0,545	2,13
3	0,225	79,3	0,118	1,37	2,18	318	0,640	8,02
10	0,260	47,6	0,135	0,604	2,05	146	0,703	7,33
30	0,291	32,2	0,140	0,637	1,21	58,6	0,320	4,03
90	0,209		0,171		0,589		0,204	

Megállapítható, hogy a molibdenát és a szelenát vonatkozásában egyaránt akkumulátornövénynek minősül mind a kukorica, mind a napraforgó, mivel Rezvani és Zaefarian (2011) publikációja alapján mindegyik esetben sokkal nagyobb BAF értékeket tapasztaltunk, mint egy érték (BAF>1). A szelenit alkalmazásával viszont csak a napraforgónál teljesül mindez, azaz hogy a bioakkumulációs faktor nagyobb legyen, mint egy. Amennyiben a White (2015) és az Adriano (2001) meghatározása alapján szeretnénk besorolni a vizsgált egy- és kétszikű tesztnövényeinket akkor megállapíthatjuk, hogy a molibdénre vonatkozóan a napraforgót hiperakkumulátor-növénynek minősíthetjük, mivel a napraforgóhajtás molibdén koncentrációja meghaladta az 1000 mg kg⁻¹ határértéket (42. táblázat). Ugyanilyen okok miatt, a szelenátra vonatkozóan is kijelenthetjük, hogy a napraforgó hiperakkumulátor-növény (1805 mg kg⁻¹) (44. táblázat). Véleményem szerint a kukorica is többé-kevésbé teljesíti az 1000 mg kg⁻¹ határértéket (993±69 mg kg⁻¹) (43. táblázat), tehát a szelenátra nézve a kukorica is hiperakkumulátor-növénynek minősíthető. A szelenit viszont nem teljesíti sem a kukoricánál, sem a napraforgónál azt az akkumulátornövényekre elvárt követelményt, hogy a hajtás szelén koncentrációja haladja meg legalább a 100 mg kg⁻¹ határértéket (43-44. táblázat). Ennek alapján a szelenitre vonatkozóan sem a kukorica, sem a napraforgó nem tekinthető akkumulátornövénynek.

A fenti eredmények alapján, mindenképpen megfontolandó lenne az a több kutató által tett kijelentés, hogy egy elemre nézve egy növény akkumulátor vagy sem. Véleményem szerint, egy ilyen sajátosságú elemnél, mint a szelén, elemformákra való akkumulációról és hiperakkumulációról kellene beszélnünk, és ezek szerint csoportosítani, besorolni a vizsgált növényeket.

5.3. Tenyészedényes kísérletről származó borsó vizsgálata

5.3.1. A tenyészedényben nevelt borsó száraz tömegének változása

A tenyészedényes kísérleteinkhez ugyanazt a mészlepedékes csernozjom talajtípust választottuk (DE MÉK Látóképi Kísérleti Telep) (13. táblázat), amelyiket a rizoboxban végzett kísérleteinkhez is használtunk. A tenyészedényes kísérleteknél adott limitáló tényezők miatt, tesztnövényként nem a tápoldatos és a rizoboxos kísérletekben használt kukorica és napraforgónövényeket választottuk, hanem a tenyészedényes vizsgálatokhoz jobban illő zöldborsót (*Pisum sativum* L.) (4.1.3. alfejezet).

47. táblázat: Látóképi mészlepedékes csernozjom talajon termesztett, különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsónövények vegetatív részeinek száraz tömege ($\text{g} \cdot \text{növény}^{-1}$) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg^{-1})	4 nóduszos állapot	Virágzás kezdete	Zöldérés	Teljesérés
A gyökér száraz tömege ($\text{g} \cdot \text{növény}^{-1}$)				
Ø	0,0193±0,0026 ^{ab}	0,0381±0,0135 ^a	0,0305±0,0076 ^{ab}	0,0687±0,0023 ^{ab}
3	0,0256±0,0056 ^b	0,0364±0,0121 ^a	0,0365±0,0106 ^b	0,0806±0,0064 ^{bc}
30	0,0219±0,0011 ^{ab}	0,0289±0,0042 ^{ab}	0,0368±0,0026 ^b	0,0898±0,0108 ^c
90	0,0242±0,0020 ^b	0,0269±0,0091 ^{ab}	0,0289±0,0030 ^{ab}	0,0519±0,0137 ^a
270	0,0171±0,0031 ^a	0,0210±0,0051 ^b	0,0246±0,0058 ^a	0,0537±0,0172 ^a
A szár száraz tömege ($\text{g} \cdot \text{növény}^{-1}$)				
Ø	0,0270±0,0035 ^a	0,2043±0,0168 ^{abc}	0,2241±0,0579 ^{ab}	0,3829±0,0759 ^a
3	0,0378±0,0076 ^b	0,2252±0,0302 ^{bc}	0,2260±0,0797 ^{ab}	0,3948±0,0513 ^a
30	0,0431±0,0090 ^{bc}	0,2403±0,0252 ^c	0,2716±0,0240 ^b	0,7475±0,1335 ^b
90	0,0522±0,0075 ^c	0,1872±0,0407 ^{ab}	0,2113±0,0435 ^{ab}	0,5490±0,2454 ^{ab}
270	0,0340±0,0046 ^{ab}	0,1584±0,0075 ^a	0,1485±0,0322 ^a	0,3118±0,1202 ^a
A levél száraz tömege ($\text{g} \cdot \text{növény}^{-1}$)				
Ø	0,0825±0,0160 ^{ab}	0,1998±0,0161 ^{ab}	0,2255±0,0408 ^a	0,4640±0,1238 ^a
3	0,0909±0,0216 ^{abc}	0,1984±0,0492 ^{ab}	0,1980±0,0403 ^{ab}	0,5022±0,0776 ^a
30	0,1041±0,0191 ^c	0,2366±0,0101 ^a	0,2698±0,0306 ^a	0,7956±0,0993 ^b
90	0,0964±0,0151 ^{bc}	0,1859±0,0276 ^{bc}	0,2221±0,0415 ^a	0,5193±0,1411 ^a
270	0,0684±0,0142 ^a	0,1488±0,0086 ^c	0,1405±0,0478 ^b	0,3787±0,0861 ^a

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

A molibdénrel kezelt talajmintákban termesztett, különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsónövények vegetatív részeinek, valamint a termésének száraz tömeg eredményei a 47. és a 48. táblázatokban találhatóak. A zöldborsógyökér, -szár és -levél száraz tömeg vizsgálatánál azt tapasztaltuk, hogy a 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelés, a kontroll kezeléshez képest, szinte semelyik növényi rész és semelyik fenofázisban sem mutatott szignifikáns hatást, a növényi részek száraz tömegei változására. Kivétel ez alól a zöldborsó szárának négy nóduszos fejlődési stádiumában mért értéke. A 30 mg kg^{-1} adagú molibdén kezelés viszont már mindegyik vegetatív rész fejlődésére, legalább a teljesérés fenofázisban szignifikáns hatással volt. A kontroll kezeléshez képest a 30 mg kg^{-1} adagú molibdén kezelés, a zöldborsógyökér esetén megközelítően csak 30%-os növekedést mutatott, a levélnél és a szárnál viszont már 71-75%-os száraz tömeg növekedést

eredményezett. A további molibdén adagok növelése a száraz tömeg produktumokban visszaesést eredményezett, míg a legnagyobb molibdén kezelés, a kontroll mintához képest, fitotoxikus hatást váltott ki. A 270 mg kg⁻¹ molibdénnel kezelt talajon termesztett borsó növényi részei száraz tömege ugyanis egyetlenegy fenofázisban sem érte el a kontroll növény megfelelő értékeit, a négy nóduszos fejlődési stádiumban lévő borsószár kivételével. Szignifikáns változást viszont csak a levélnél (a virágzás kezdete és a zöldérés fenofázisban), továbbá a gyökérnél (a virágzás kezdete fenofázisban) tudtunk kimutatni, a kontroll kezeléshez képest (Mellékletek 13. és 14. fotók).

48. táblázat: Látóképi talajon termesztett zöldborsó termésének száraz tömege (g növény⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	A termés száraz tömege (g növény ⁻¹)		
	Hüvely (zöldérés)	Hüvely (teljesérés)	Mag (teljesérés)
Ø	0,1321±0,0575 ^{ab}	0,2326±0,0697 ^a	0,2092±0,0190 ^a
3	0,1324±0,0211 ^{ab}	0,2489±0,0306 ^a	0,2123±0,0505 ^a
30	0,2509±0,0682 ^c	0,3259±0,0373 ^a	0,2333±0,0557 ^a
90	0,1964±0,0544 ^{bc}	0,2501±0,0563 ^a	0,1895±0,0595 ^a
270	0,0991±0,0022 ^a	0,2370±0,0453 ^a	0,1737±0,0430 ^a

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, n=3)

A borsó termésének hüvely és mag részei (a hüvely a zöldérés és a teljesérés, míg a mag a teljesérés fenofázisban) száraz tömeg eredményeit a 48. táblázat tartalmazza. Az eredmények alapján látható, hogy a termés szárazanyag értékei alakulása hasonló mintázatot követ, mint amit a vegetatív részek értékelésénél tapasztaltunk, azaz a legnagyobb mért tömeget a 30 mg kg⁻¹ molibdén dózis adta, valamint alig találtunk statisztikailag is igazolható hatást a kezelések között. Ennek megfelelően, például a teljesérés fenofázisban lévő borsóhüvely és borsómag száraz tömeg produktumára egyetlen molibdén adagolás sem volt szignifikáns hatással. Szignifikáns változást csupán a zöldérés fenofázisban lévő borsóhüvely száraz tömeg értékeinél, a 30 mg kg⁻¹ molibdén kezelésnél tudtunk kimutatni, a kontroll mintához viszonyítva.

49. táblázat: A látóképi talajon termesztett teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részeinek száraz tömege (g növény⁻¹) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Száraz tömeg (g növény ⁻¹)			
	Gyökér	Szár+levél	Hüvely	Mag
Szelenit				
Ø	0,0725±0,0015 ^a	0,7803±0,1633 ^a	0,2713±0,0278 ^{ab}	0,2092±0,0190 ^a
1	0,0623±0,0061 ^b	0,6447±0,0416 ^b	0,3742±0,0776 ^c	0,3567±0,1069 ^b
3	0,0589±0,0070 ^b	0,6286±0,1168 ^{abc}	0,3802±0,0494 ^c	0,3823±0,0160 ^b
10	0,0587±0,0046 ^b	0,5553±0,0331 ^{bc}	0,3083±0,0218 ^{bc}	0,3383±0,0409 ^b
30	0,0428±0,0028 ^c	0,4682±0,0869 ^c	0,2282±0,0344 ^a	0,2017±0,0478 ^a
90	0,0425±0,0009 ^c	0,1980±0,0062 ^d	0,1148±0,0053 ^d	0,0440±0,0110 ^c
Szelenát				
Ø	0,0725±0,0015 ^a	0,7803±0,1633 ^a	0,2713±0,0278 ^a	0,2092±0,0190 ^a
1	0,0517±0,0002 ^b	0,5741±0,0197 ^b	0,3153±0,0177 ^b	0,2022±0,0636 ^a

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag±szórás, n=3)

Az utóbbi időben, a nemzetközi szakirodalomban egyre több bizonyíték áll rendelkezésre arra nézve, hogy a szelén adagolás jótékony hatással van a növények növekedésére, hozamára és stressz toleranciájára (Hartikainen, 2005). Ugyanakkor a stimulált tömeg növekedés és a megnövekedett tolerancia háttérében álló fiziológiai, biokémiai vagy molekuláris mechanizmusokat még nem tárták fel teljes mértékben. Az viszont ismert, hogy a szelén szint kisebb mértékű növelése fokozott antioxidáns kapacitást (Hartikainen, 2005), és a szénhidrátok hatékonyabb felhalmozódását idézi elő (Turakainen et al., 2004). Ahhoz hogy megismerjük a kisebb és a nagyobb szelén adagolás hatását is talaj-növény rendszerben, ezért tenyészedényes kísérletben, zöldborsó-tesztnövény alkalmazásával vizsgáltuk a szelén adagolás hatását, mely során, látóképi talajon, szelenit és szelenát kezeléseket állítottunk be. Korábban ugyan már néhány szerző leírta (Smrkolj et al., 2006; Poblaciones et al., 2013; Garousi et al., 2017a, 2017b) a zöldborsó szelén kezelésének a hatását, viszont továbbra is elég korlátozott a szakirodalom ezen a területen. Annak érdekében, hogy a kísérlet befejezésekor biztonsággal el tudjuk végezni a tervezett fontosabb vizsgálatainkat, a száraz tömegekben bekövetkezett változásokat csak a betakarításkor értékeltük. A teljes növényt a következő növényi részekre osztottuk a kísérlet befejezésekor: gyökér, szár és levél együtt, hüvely, valamint mag (49. táblázat). Az előbbi növényi részek száraz tömegeit értékelve látható, hogy bármennyi szelenitet, vagy szelenátot is adagoltunk a látóképi kontroll talajhoz, a borsó vegetatív részeinek (gyökér, valamint a szár és levél) szárazanyag-produktumában rögtön folyamatos csökkenés következett be. A kontroll mintákhoz képest, a 90 mg kg⁻¹ szelén (legnagyobb) kezelésben kapott gyökér tömege közel 40%-kal, míg a hajtás száraz tömege megközelítően 75%-kal csökkent. Mind a szelenit, mind a szelenát kezelésű vegetatív mintáknál többnyire szignifikáns csökkenést jelentett az egyre nagyobb szelén dózisok alkalmazása. A szelenittel és a szelenáttal kezelt mészlepedékes csernozjom talaj szelén koncentrációjában viszont optimum értéket találtunk ahhoz, hogy a szelén tartalomtól függő maximális szárazanyag mennyiséget érhesük el. Az 1-10 mg kg⁻¹ szelenit adagokkal (Melléklet 15-17. fotók) mind a hüvely, mind a mag szárazanyag-produktumában pozitív hatást értünk el, a további kezeléseknél viszont már fitotoxikus hatást lehetett tapasztalni. A legnagyobb szárazanyagot biztosító kezelésben (3 mg kg⁻¹) a kontroll mintákhoz képest, a hüvelynél 40%-os, míg a borsómagnál 80%-os szárazanyag-növekedést értünk el. Amennyiben a kontroll mintákhoz viszonyítjuk a fitotoxikus hatás mértékét megállapítható, hogy a legnagyobb kezelésben (90 mg kg⁻¹) a hüvely mért tömege közel 60%-kal (az optimumhoz képest 70%-kal), a mag száraz tömege pedig 80%-kal (az optimumhoz képest közel 90%-kal) csökkent. A látóképi talajhoz adagolt 1 mg kg⁻¹ szelenát a borsóhüvelynél szignifikáns szárazanyag-növekedést eredményezett, a borsómagnál viszont sem növekvő, sem csökkenő változást nem tapasztaltunk. Sajnálatos módon a szelenát kezeléseink további 3 szintjét nem állt módunkban alaposabb vizsgálatnak alávetni, ugyanis a 3 mg kg⁻¹-os szelenát kezelés a kelést követően elkezdett fejlődni, de termés képzésére már nem volt képes (Melléklet 16. fotó). A 10 mg kg⁻¹-os és a 30 mg kg⁻¹-os szelenát kezelése pedig még kikeltek ugyan (Melléklet 17-19. fotók), de ezt követően elkezdtek kevésbé, vagy jobban „haldokolni”, aminek következtében értékelhető tömeggel nem rendelkeztek. A fenti okok miatt a 3-30 mg kg⁻¹-os szelenát kezeléseket a továbbiakban nem vizsgáltuk.

5.3.2. A tenyészedényben nevelt borsó molibdén koncentrációjának változása

A rizoboxos kísérlet (5.2.3. alfejezet) értékelésében is már említettem, hogy a rizoboxos és a tenyészedényes kísérletekhez alkalmazott látóképi talaj (13. táblázat) eredetileg $0,750 \text{ mg kg}^{-1}$ molibdént tartalmazott, amely értékhez hozzáadódtak még az általunk alkalmazott molibdén kezelések (4.1.3. alfejezet). A borsó-tesztnövénynek az előző alfejezetben (5.1.3.) bemutatott növényi részei multieleemes vizsgálatát is elvégeztük, melyek közül a molibdén koncentrációjára vonatkozó mérési eredményeket összefoglalva az 50. és az 51. táblázatok tartalmazzák.

50. táblázat: A látóképi talajon termesztett különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó vegetatív részeinek molibdén koncentrációja (mg kg^{-1}), a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg^{-1})	4 nóduszos állapot	Virágzás kezdete	Zöldérés	Teljesérés
	A gyökér molibdén koncentrációja (mg kg^{-1})			
Ø	10,4±0,3 ^a	5,36±0,40 ^a	8,40±0,20 ^a	10,0±0,9 ^a
3	19,7±0,4 ^a	14,3±0,2 ^a	19,6±0,2 ^a	11,0±0,3 ^a
30	212±1 ^b	241±36 ^b	207±23 ^b	337±40 ^b
90	964±67 ^c	1117±148 ^c	1280±12 ^c	964±27 ^c
270	1917±8 ^d	2206±58 ^d	2069±109 ^d	1322±132 ^d
	A szár molibdén koncentrációja (mg kg^{-1})			
Ø	9,60±0,66 ^a	3,97±1,50 ^a	3,58±0,78 ^a	4,01±0,42 ^a
3	12,2±1,8 ^a	7,28±0,36 ^a	10,8±0,4 ^a	12,0±0,1 ^a
30	162±05 ^b	54,9±0,9 ^b	77,7±4,4 ^b	187±15 ^b
90	285±32 ^c	260±8 ^c	279±12 ^c	431±17 ^c
270	779±30 ^d	540±25 ^d	735±36 ^d	822±2 ^d
	A levél molibdén koncentrációja (mg kg^{-1})			
Ø	1,98±0,08 ^a	1,97±0,01 ^a	1,78±0,01 ^a	2,85±0,10 ^a
3	4,29±0,25 ^a	2,98±0,28 ^a	5,13±0,53 ^a	7,21±1,73 ^a
30	79,9±0,8 ^b	35,1±0,8 ^b	42,6±1,1 ^b	119±3 ^b
90	223±3 ^c	382±3 ^c	425±23 ^c	483±33 ^c
270	585±15 ^d	912±16 ^d	1213±13 ^d	1050±41 ^d

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

Áttanulmányozva a mérési eredményeket (50-51. táblázat) általánosságban megállapítható, hogy a növekvő molibdén adagok, a borsó minden egyes növényi részénél, minden vizsgált fenofázisában elősegítették a molibdén akkumulációt. Mindegyik kezelés statisztikailag is igazolható volt, tehát csaknem minden esetben szignifikáns növekedést tapasztaltunk. A kontroll kezeléshez képest, csak a vegetatív részek és a borsómag minták 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelése között nem tudtunk statisztikailag is igazolható molibdén növekedést kimutatni. Ezek alapján tehát 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. Az 50. és az 51. táblázatok adataiból az is látható, hogy a fentiekben vizsgált borsó növényi részek közül, szinte minden fenofázisban, minden kezelésben a gyökérnek volt a legnagyobb a molibdén koncentrációja. Ez alól kivételt képez a 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelésnél,

a teljesérés fenofázisban, a szár és a hüvely minták molibdén koncentrációja. Az a tény is észrevehető, hogy az első vizsgált fenofázisban, azaz a négy nóduszos állapotban, a szár molibdén tartalma valamennyi kezelés esetén meghaladta a levélben mért értékeket, viszont az idő múlásával a szár-levél koncentrációarány (közel 5), a kontroll mintánál megközelítően a harmadára, 1,4-re esett vissza. A 3 mg kg⁻¹-os molibdén kezelések kivételével, a talajok molibdén tartalmának növelésével a szár-levél koncentrációarány csökkent. A borsókísérlet eredményei azt mutatják, hogy a növény fejlődése során a szárból a levélbe irányuló molibdén transzlokáció, a molibdén adagolás mértékével egyre fokozódott.

51. táblázat: A látóképi talajon termesztett zöldborsó termésének molibdén koncentrációja (mg kg⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	Hüvely (zöldérés)	Hüvely (teljesérés)	Mag (teljesérés)
	Molibdén koncentráció (mg kg ⁻¹)		
Ø	1,69±0,09 ^a	2,61±0,14 ^a	4,82±0,52 ^a
3	6,83±0,19 ^b	15,5±4,0 ^b	5,62±0,38 ^a
30	30,0±0,8 ^c	48,3±5,9 ^c	42,6±1 ^b
90	120±2 ^d	134±7 ^d	131±3 ^c
270	238±4 ^e	165±9 ^e	200±6 ^d

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, n=3)

52. táblázat: A molibdén kezelés hatása a molibdénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (tenyészedényben nevelt teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó)

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	BAF zöldborsó (C _{levél} /C _{talaj})	TF zöldborsó (C _{levél} /C _{gyökér})
Ø	3,80	0,285
3	1,92	0,655
30	3,87	0,353
90	5,32	0,501
270	3,88	0,794

Az 50. és az 52. táblázatok adatai alapján megállapítható, hogy a White (2015) és az Adriano (2001) által meghatározott peremfeltételeknek megfelelően, a zöldborsót a molibdenátra vonatkozóan akkumulátor, sőt a gyökér (1322±132 mg kg⁻¹) és a levél molibdén koncentrációi (1050±41 mg kg⁻¹) alapján hiperakkumulátor-növénynek tekinthetjük. Az 50. táblázatban látható, hogy még a borsószár molibdén tartalma (822±2 mg kg⁻¹) is megközelítette a fenti cikkekben elvárt 1000 mg kg⁻¹ szárazanyagra vonatkozó koncentrációt. A fentieken túlmenően, a molibdenát szempontjából, Rezvani és Zaefarian (2011) publikációja alapján is kijelenthetjük, hogy a borsó akkumulátornövény, ugyanis a BAF értékek minden kezelésben, még a kontrollban is nagyobbak voltak, mint egy (BAF>1) (52. táblázat). Az 52. táblázatban található transzlokációs faktor (TF) értékek alapján (Rezvani és Zaefarian, 2011) azt is megállapíthatjuk, hogy a TF érték minden kezelésben egy alatt maradt (TF<1), mely azt jelenti, hogy a molibdénnek a gyökérből a levélbe irányuló transzlokációja nem hatékonyan ment végbe.

Az 51-52. táblázatokban lévő eredményekből kiszámoltuk, hogy egy borsónövény mennyi (μg) molibdént vont ki a talajból és ez a növény által felvett molibdén hogyan oszlik meg a növényi részekben. A számítások elvégzésével kapott eredményeket az 53. táblázatban mutatom be.

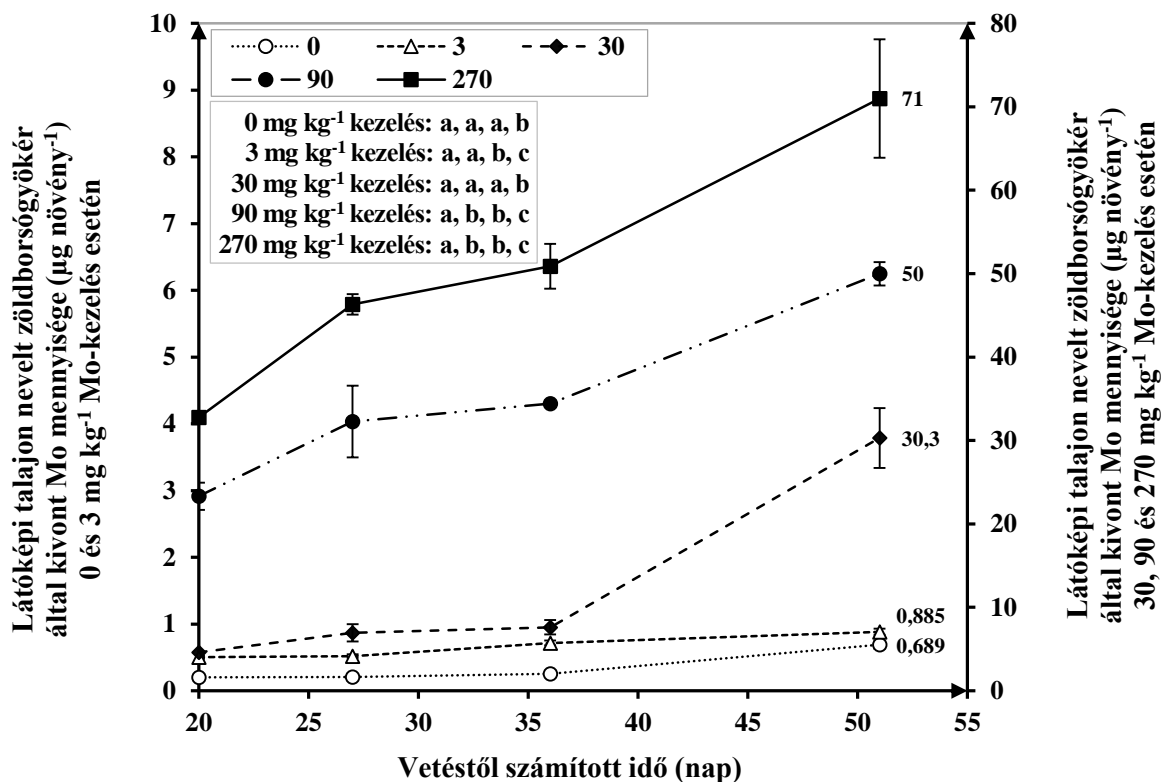
53. táblázat: A látóképi talajon termesztett, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó által felvett molibdén mennyisége (μg növény⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg^{-1})	A zöldborsó által felvett molibdén a teljesérés fenofázisban (μg növény ⁻¹)					
	Gyökér	Szár	Levél	Hüvely	Mag	Teljes növény
Ø	0,689±0,059 ^a (13)	1,53±0,16 ^a (30)	1,31±0,05 ^a (25)	0,607±0,033 ^a (12)	1,01±0,11 ^a (20)	5,15
3	0,885±0,023 ^a (6)	4,72±0,03 ^a (33)	3,62±0,87 ^a (25)	3,85±1,00 ^b (27)	1,19±0,08 ^a (8)	14,3
30	30,3±3,6 ^b (10)	140±12 ^b (48)	94,3±2,4 ^b (33)	15,7±1,9 ^c (5)	9,94±0,24 ^b (3)	290
90	50,0±1,4 ^c (8)	237±9 ^c (40)	251±17 ^c (42)	33,5±1,7 ^d (6)	24,9±0,5 ^c (4)	596
270	71,0±7,1 ^d (9)	256±1 ^d (32)	398±16 ^d (50)	39,2±2,1 ^e (5)	34,8±1,0 ^d (4)	799

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont molibdén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban. (átlag±szórás, $n=3$)

Az 53. táblázat adatait értékelve hasonló gondolatok fogalmazhatók meg, mint amilyeneket a fentiekben is már részleteztem: a növekvő molibdén adagok, a borsó minden egyes növényi részénél növelték a kivont molibdén mennyiségét, ami a 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelés kivételével, mindegyik kezelés szignifikáns növekedést is jelentett. A 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelésben csak a borsóhévely által felvett molibdén mennyisége eredményezett szignifikáns növekedést. Ezen adatok alapján szintén azt állapíthatnánk meg, hogy a borsóhévely volt a növény legérzékenyebb válaszadó szerve, alaposan megvizsgálva azonban a valóság mást mutat számunkra. A kontroll mintához képest, a 270 mg kg^{-1} -os molibdén kezelésnél, amíg az egy növényre vonatkozó borsóhévely által felvett molibdén mennyisége (39,2±2,1 mg kg) közel 65-szörösére nőtt, addig a levélben kissé több mint 300-szorosára emelkedett (398±16 mg kg). Ezen megállapításnak megfelelően, e tekintetben a levél érzékenyebben reagált a talajnak molibdénrel történő kezelésére. A legkisebb relatív növekedést pedig a borsómag adta, melyben a molibdén mennyisége, a legnagyobb adagú molibdén kezelés hatására, csupán 35-szörösére növekedett. Az is észrevehető, hogy míg a kontroll kezelésben, a teljes borsónövényben található molibdén össztömegéhez képest a levél által kivont molibdén mindössze 25%-ot képviselt, addig a 270 mg kg^{-1} -os molibdén kezelésnél már az összes felvett molibdén 50%-a volt megtalálható a levélben. Amennyiben egy hasonló talajtulajdonságokkal rendelkező molibdénrel szennyezett terület molibdén koncentrációjának csökkentését fitoremediációs úton kívánánk elérni, akkor fontos lehet tudnunk, hogy míg a kontroll talajnál az összes molibdén 87%-a volt elérhető a növény föld feletti részében, addig a 270 mg kg^{-1} -os molibdén kezelésnél (a talaj 360-szor nagyobb molibdén koncentrációjánál), ahol a növény által felvett molibdén mennyisége közel 155-szörösére növekedett, már az összmolibdén 91%-a volt megtalálható a zöldborsónövény föld feletti részében. A molibdén adagok növelése és a teljes növény által kivont molibdén mennyisége (53. táblázat) között telítési görbe jellegű az összefüggés amely azt jelenti, hogy minél inkább növeljük/növekedik a talajban megjelenő molibdenát mennyisége, relatíve annál kevesebb molibdént fog felvenni a teljes borsónövény.

A tenyészedényes kísérlet során azt is nyomon követtük, hogy az egyes fenofázisokban hogyan változott a borsónövény vegetatív részei által kivont molibdén mennyisége (10-12. ábra). Az ábrák alapján általánosságban elmondható, hogy a zöldborsó fejlődése során folyamatosan emelkedett a borsó növényi részei által kivont molibdén mennyisége, és a vizsgált fenofázisok között több esetben is szignifikáns növekedést tapasztaltunk.

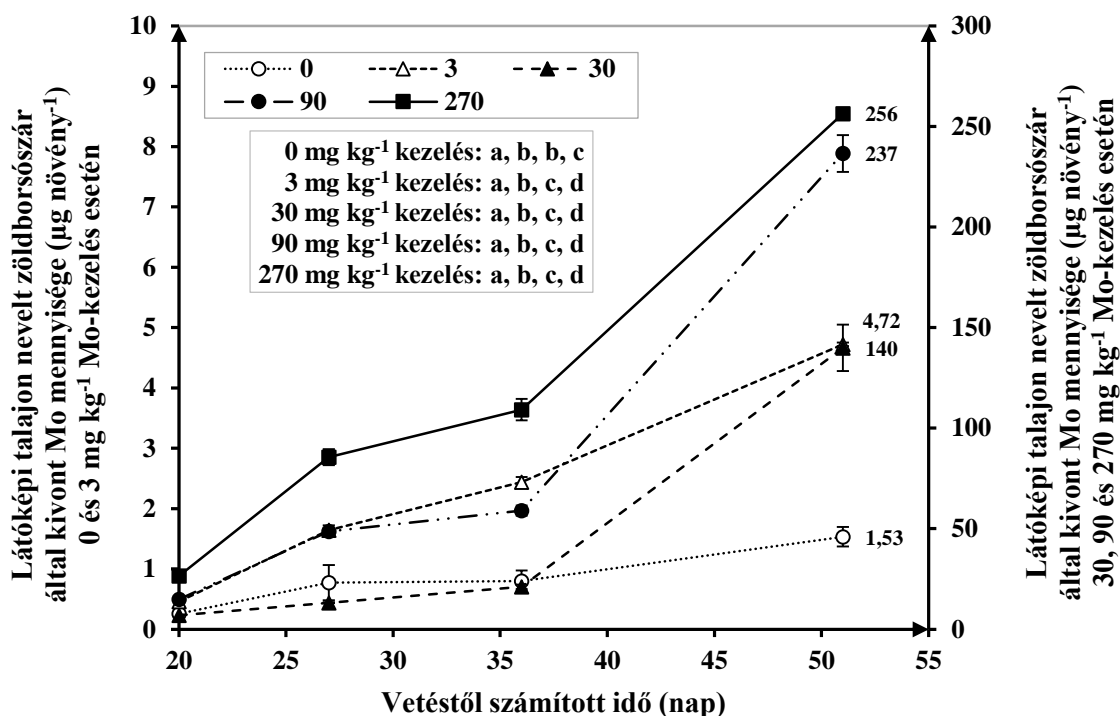


10. ábra: A látóképi talajon termesztett zöldborsógyökér által kivont molibdén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$) az egyes fenofázisok függvényében (20. nap: 4 nóduszos állapot; 27. nap: virágzás kezdete; 36. nap: zöldérés; 51. nap: teljesérés), különböző molibdén kezelések esetén
Az egyes molibdén kezelésekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=3$)

A 10. ábrán bemutatott eredmények alapján látható, hogy a \emptyset és a 3 mg kg^{-1} -os molibdén kezelések alkalmazásakor, a négy vizsgált fenofázisban a gyökér által kivont molibdén mennyisége csak csekély mértékben emelkedett. Továbbá az is megállapítható, hogy a \emptyset , 30, 90 és a 270 mg kg^{-1} -os molibdén kezeléseknél, a virágzás kezdete és a zöldérés fenofázisok között nem lehetett statisztikailag is igazolt különbséget kimutatni. A borsó gyökerében, a négy nóduszos állapothoz képest, a teljesérés fenofázisban 1,8-6,6-szer nagyobb volt a gyökér által kivont molibdén mennyisége. Minden egyes vegetatív szervnél (gyökér, szár és levél) a 30 mg kg^{-1} -os molibdén kezelés eredményezte a kivont molibdén mennyiségének a legnagyobb arányú növekedését a látóképi talajon termesztett zöldborsó vetésétől számított 20. nap (négy nóduszos állapot) és a betakarításig (51. nap: teljesérés) eltelt időpontok között.

A 11. ábra a zöldborsószár által kivont molibdén mennyiséget mutatja. Láthatjuk, hogy a kisebb molibdén adagok (a \emptyset és a 3 mg kg^{-1}) a vetéstől eltelt idő függvényében viszonylag

egyenletes molibdén felvételt biztosítottak, míg a 30-270 mg kg⁻¹-os molibdén kezelések a zöldérés és a teljesérés fenofázisok között fokozott molibdén akkumulációt idéztek elő. Minden egyes fenofázis között (kivéve a kontroll kezelésnél csak a virágzás kezdete és a zöldérés fenofázisok között) statisztikailag is igazolt különbségeket tudunk kimutatni. A borsó szárában, a négy nódusos állapothoz képest, a teljesérés fenofázisban mért értékekhez képest, a kontrolltól a 30 mg kg⁻¹-os molibdén kezelésig emelkedő, majd a 30 mg kg⁻¹-os kezelést követően pedig csökkenő arány volt tapasztalható. Ezek alapján a borsó szárában, a teljesérés fenofázisban 6-20-szor nagyobb volt a szár által kivont molibdén mennyisége, a négy nódusos állapothoz viszonyítva.

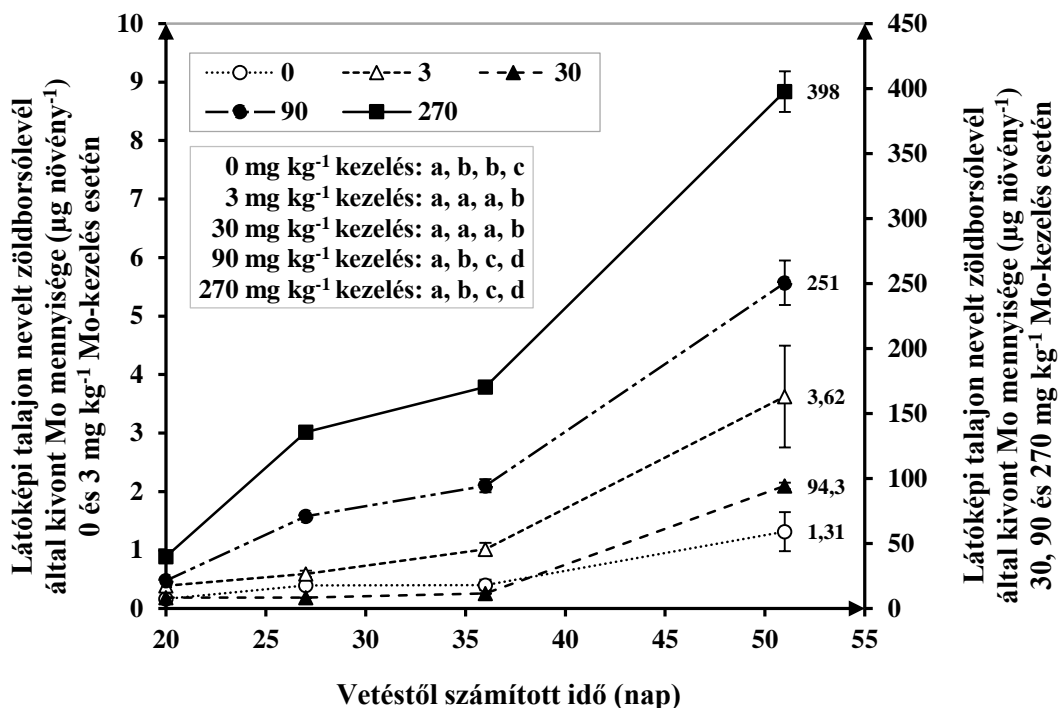


11. ábra: A látóképi talajon termesztett zöldborsószár által kivont molibdén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$) az egyes fenofázisok függvényében (20. nap: 4 nódusos állapot; 27. nap: virágzás kezdete; 36. nap: zöldérés; 51. nap: teljesérés), különböző molibdén kezelések esetén

Az egyes molibdén kezelésekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=3$)

A 12. ábrán bemutatott zöldborsólevél által kivont molibdén mennyiségek értékei alapján látható, hogy a négy nódusos és a teljesérés fenofázisok között mindegyik molibdén kezelés szignifikáns növekedést eredményezett. Sőt a 90 és a 270 mg kg⁻¹ molibdén adagok, minden egyes fenofázis között, statisztikailag is igazolt növekedést mutattak. A kisebb molibdén dózisok (0-30 mg kg⁻¹) azonban a virágzás kezdete és a zöldérés fenofázisok között nem eredményeztek szignifikáns növekedést. A borsó levelében, a négy nódusos fenofázishoz képest, a kisebb molibdén kezeléseknél eleinte emelkedő (8-11,5-szeres), majd kissé csökkenő (11,5-10-szeres) tendenciájú arányt tapasztaltunk. Ezek alapján a borsó levelében, a teljesérés fenofázisban 8-11,5-szer nagyobb volt a levél által kivont molibdén mennyisége, mint amit a négy nódusos fenofázishoz viszonyítva kaptunk.

A fentiekben részletezett arányokat összegezve megállapítható, hogy a négy nóduszos fenofázishoz képest, a teljesérés fenofázisban a borsó gyökerében átlag 3-szoros, a borsó szárában 12-szeres, míg a borsó levelében 10-szeres volt az adott növényi részek által kivont molibdén mennyisége.



12. ábra: A látóképi talajon termesztett zöldborsólevél által kivont molibdén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$) az egyes fenofázisok függvényében (20. nap: 4 nóduszos állapot; 27. nap: virágzás kezdete; 36. nap: zöldérés; 51. nap: teljesérés), különböző molibdén kezelések esetén
Az egyes molibdén kezelésekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=3$)

5.3.3. A tenyészedényben nevelt borsó szelén koncentrációjának változása

A szelén felvételének tenyészedényben végzett vizsgálatánál szintén a látóképi mészlepedékes csernozjom talajt (13. táblázat) használtuk, mely kísérlet talajának szelén koncentrációja, a látóképi talaj eredetileg is jelen lévő $0,812 \text{ mg kg}^{-1}$ szelén tartalmától (kontroll kezeléstől= \emptyset) indult. Természetesen az általunk alkalmazott szelén kezelések (4.1.3. alfejezet) ehhez az értékhez adódtak még hozzá. A különböző fejlődési stádiumban lévő borsótesztnövényeink különböző részei szelén analízisének mérési eredményei, a szelénit kezelés függvényében az 54., a szelenát kezelés függvényében pedig az 55. táblázatban található meg.

54. táblázat: A látóképi talajon termesztett különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó különböző vegetatív részeinek szelén koncentrációja (mg kg^{-1}), a szelenit kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg^{-1})	4 nódusos állapot	Virágzás kezdete	Teljesérés
	A gyökér szelén koncentrációja (mg kg^{-1})		
Ø	5,28±0,73 ^a	1,66±0,08 ^a	0,838±0,161 ^a
1	3,06±0,58 ^a	58,0±5,5 ^a	3,87±0,00 ^a
3	27,6±6,5 ^{ab}	126±25 ^{ab}	49,4±3,5 ^a
10	87,5±36,4 ^b	272±24 ^{bc}	147±46 ^b
30	209±56 ^c	377±32 ^c	541±57 ^c
90	514±64 ^d	1046±277 ^d	1401±45 ^d
	A szár+levél szelén koncentrációja (mg kg^{-1})		
Ø	0,434±0,118 ^a	1,25±0,13 ^a	0,316±0,029 ^a
1	2,07±0,17 ^a	1,52±0,04 ^a	0,358±0,011 ^a
3	4,23±0,28 ^a	3,64±0,15 ^{ab}	3,83±0,35 ^a
10	8,12±0,32 ^a	11,5±0,9 ^b	10,0±0,4 ^b
30	24,5±4,8 ^b	30,5±2,0 ^c	21,0±0,9 ^c
90	47,6±21,0 ^c	107±11 ^d	56,4±4,6 ^d

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

55. táblázat: A látóképi talajon termesztett különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó különböző vegetatív részeinek szelén koncentrációja (mg kg^{-1}), a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg^{-1})	4 nódusos állapot	Virágzás kezdete	Teljesérés
	A gyökér szelén koncentrációja (mg kg^{-1})		
Ø	5,28±0,73 ^a	1,66±0,08 ^a	0,838±0,161 ^a
1	712±118 ^b	1106±161 ^b	1220±0 ^b
	A szár+levél szelén koncentrációja (mg kg^{-1})		
Ø	0,434±0,118 ^a	1,25±0,13 ^a	0,316±0,029 ^a
1	1017±47 ^b	349±30 ^b	886±6 ^b

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

Az 54. és az 55. táblázatok mérési eredményeit megvizsgálva általánosságban megállapíthatjuk, hogy (a négy nódusos fenofázisban lévő gyökérminta legkisebb szelén szintjének kivételével) a szelén adagok növelésével a borsó minden egyes vegetatív növényi részénél (gyökér, szár+levél együtt), minden vizsgált fenofázisban a szelén koncentráció növekedése következett be. A szelenittel történő kezelésnél (a négy nódusos fenofázisban lévő szár+levél-minta szelén koncentrációjának a kivételével) a 10 mg kg^{-1} volt az a legkisebb adagú szelén kezelés, amely minden egyes fenofázisban, a borsó minden egyes vegetatív növényi része szelén tartalmának a statisztikailag is igazolható növekedését idézte elő. A szelenáttal történő kezelésnél hasonló általánosan megfogalmazott megállapításokat nem áll módunkban tenni egyrészt azért, mert az 1 mg kg^{-1} szelén kezelést meghaladó szelenát adagok értékelhetetlen eredményt idéztek elő a borsónövénynél (Mellékletek 16-19. fotók), másrészt azért, mert már az

1 mg kg⁻¹ Se(VI) adag is rendkívül nagy szelén tartalom növekedést okozott a borsó vegetatív növényi részeiben. Ez a növekedés az 1 mg kg⁻¹ szelenát kezelés hatására a gyökér mintában hasonló nagyságrendű szelén tartalmat eredményezett, mint amely a szelenit kezelésben a 90 mg kg⁻¹ dózissal volt elérhető. A szár+levél mintáknál pedig megközelítően 10-20-szor nagyobb szelén akkumulációt idézett elő az 1 mg kg⁻¹ szelenát kezelés, mint amelyet a szelenit 90 mg kg⁻¹-os dóziséval kaptunk. Így aztán az 1 mg kg⁻¹ szelenát kezelés, a kontroll borsó mintákhoz képest, minden egyes vegetatív növényi résznél (gyökér, szár+levél együtt), minden vizsgált fenofázisban szignifikáns növekedést idézett elő. A tudományos kíváncsiságunk kielégítése miatt ugyan elvégeztük az 1 mg kg⁻¹ fölötti szelenát adagokkal kapott borsóminták szelén tartalmának a meghatározását is, de ezen eredmények helyessége már megkérdőjelezhető, csupán a kapott értékek nagyságrendje az, amelyet az értékelésbe bevonhatunk.

Az összes általunk beállított szelenit és szelenát kezelésre, a tenyészedényben nevelt teljesérés fenofázisban lévő zöldborsónövény elemzésével kapott szelén koncentrációkból viszont kiszámoltuk a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktor (TF) értékeket (56. táblázat), melyek közül természetesen az összes szelenit kezelésre és a szelenáttal kezelt minták közül az 1 mg kg⁻¹ dózissal vonatkozó értékeket tekinthetjük teljesen megfelelőnek. A többi szelenát kezelésre vonatkozó BAF és TF érték pontossága talán nem teljesíti, szigorúan véve, a tudományos dolgozattal szemben elvárt követelményeket, de arra mindenképpen alkalmasak, hogy láthassuk a kezelések következtében kialakult nagyságrendeket és tendenciákat.

56. táblázat: A szelén kezelés hatása a szelénre vonatkozó bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktorra (TF) (tenyészedényben nevelt teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó)

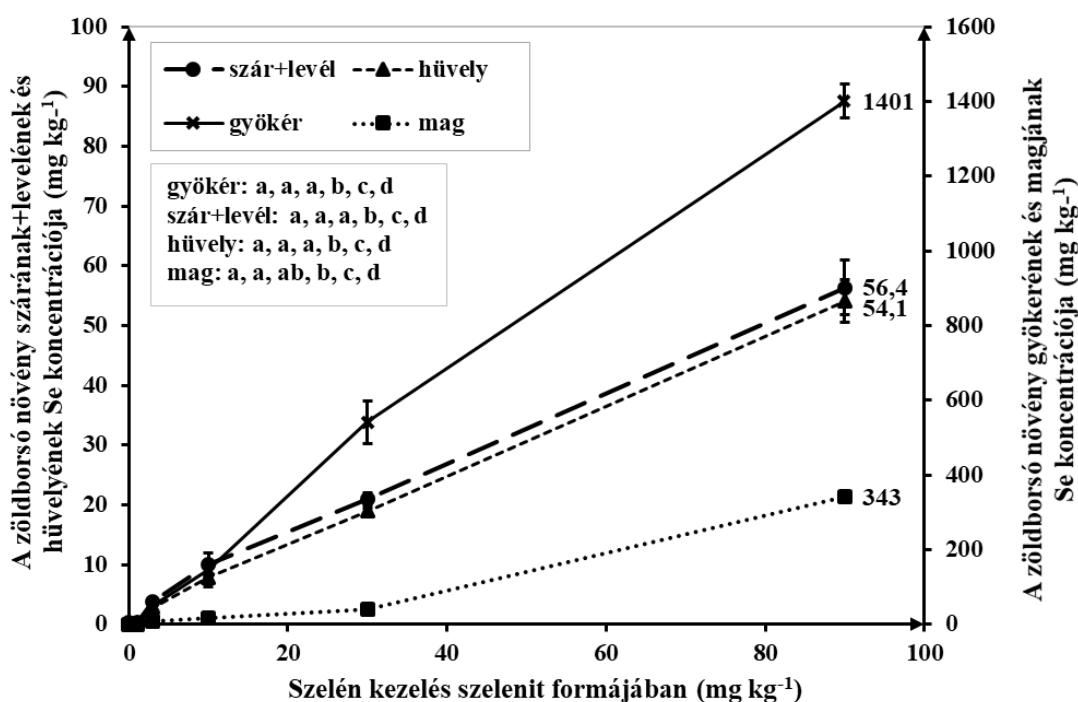
Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	BAF zöldborsó (C _{szár+levél} /C _{talaj})		TF zöldborsó (C _{szár+levél} /C _{gyökér})	
	Szelenit	Szelenát	Szelenit	Szelenát
Ø	0,430	0,430	0,377	0,377
1	0,19	493	0,093	0,726
3	1,10	277	0,078	0,640
10	0,92	120	0,068	0,757
30	0,67	133	0,039	1,58
90	0,592		0,040	

Az 54. táblázat felső részében az látható, hogy a szelenit kezelés hatására a borsógyökér ugyan nagyobb mint 1000 mg kg⁻¹ szelént akkumulált, viszont a szár+levél minták szelén koncentrációja messze elmarad a fenti érték mögött. Ennek megfelelően, Pilon-Smits (2017), valamint White (2015) és Adriano (2001) által meghatározott peremfeltételeknek megfelelően, a szelenitre nézve, a zöldborsó nem hiperakkumulátor-növény, sőt a teljesérés fenofázisban lévő szár+levél minták szelén koncentrációja alapján (54. táblázat alsó része), még az akkumulátornövény feltételeit (>100 mg kg⁻¹ szelén tartalom) sem teljesíti. Az 55. táblázatban viszont azt látjuk, hogy a szelenát kezelés hatására megjelenő szelén tartalom megközelíti az 1000 mg kg⁻¹ szelén koncentrációt, amely értéknél még gondolkozhatnánk, hogy ne csak akkumulátornak, hanem hiperakkumulátornak is tekinthessük. Ehhez viszont még

hozzágondolhatjuk a táblázatban nem található hajtás szelén tartalmakat is, melyek a 10 mg kg^{-1} -os szelén kezelésnél 1400 mg kg^{-1} szelén koncentrációnak (Mellékletek 17. és 19. fotók), a 30 mg kg^{-1} -nál pedig 4000 mg kg^{-1} , azaz 0,4% szelén tartalomnak (Mellékletek 18. és 19. fotók) adódtak. Ezen értékek ismeretében kijelenthetjük, hogy a borsó, a szelenátra nézve hiperakkumulátor-növény. Rezvani és Zaefarian (2011) publikációjának a figyelembevételével, az 56. táblázat adatai alapján is az állapítható meg, hogy a borsó a szelenitre nézve nem akkumulátornövény, mivel a BAF értékek általában kisebbek, mint egy ($\text{BAF} > 1$). A szelenátra vonatkozóan pedig (a kontrollt kivéve) minden kezelésben nagyobb volt a bioakkumulációs faktor értéke, mint egy ($\text{BAF} > 1$), sőt talán az is kijelenthető, hogy az 1 mg kg^{-1} -os szelenát kezelés után, az adagok növelésével csökkenő tendencia jelent meg, de mint a fentiekben is említettem, ezen értékek pontossága kérdéses lehet. A transzlokációs faktor (TF) értékek alapján (56. táblázat) pedig azt a kijelentést tehetjük, hogy a szelenitre vonatkozó TF értékek minden kezelésben egy alatt maradtak ($\text{TF} < 1$), mely azt jelenti, hogy a szelenit kezelésben, a szelénnek a gyökérből a levélbe irányuló transzlokációja nem hatékonyan ment végbe. A szelenát kezelésben, a szelén transzlokációja egy nagyságrenddel hatékonyabban, de Rezvani és Zaefarian (2011) publikációjában található meghatározás figyelembevételével, az sem hatékonyan ment végbe. A szelenit kezelés esetén még az is kijelenthető, hogy a gyökérből a levélbe irányuló szelén transzlokáció hatékonysága, a szelenit adagok növelésével csökkent.

A 13. ábrán, a látóképi talajon termesztett, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részeinek szelén tartalma (mg kg^{-1}) látható, melyet a szelenit kezelés függvényében ábrázoltam. Az 57. táblázatban is ugyanezen vizsgálatok eredményei láthatók, melyek között találunk olyan adatokat is, amelyek már a 13. ábrán is szerepeltek, de ebben a táblázatban az ugyanolyan nagyságú szelenit és szelenát kezelések hatását szeretném összehasonlítani. Amennyiben a látóképi talaj szelén tartalmát szelenittel növeljük, akkor a teljesérés fenofázisban lévő borsónövények különböző részeinek szelén tartalma a kezelés koncentrációjával szinte egyenes arányban növekszik. A legkisebb szelén koncentráció mindig a hüvelyben, míg a legnagyobb a gyökérben jelenik meg. Ennek megfelelően, ha a borsóhüvely szelén koncentrációjához, mint viszonyítási alaphoz hasonlítjuk a többi növényi rész szelén tartalmát akkor látható, hogy a szelenit adagok növelésével szinte folyamatosan nő a szelén tartalom, a magban (1,2-6-szoros) és a gyökérben (4-30-szoros), míg a szár+levél mintákban a hüvelyhez hasonló szelén tartalom mérhető. A kontroll borsószár+levél mintájában még közel 60%-kal nagyobb a szelén koncentráció, mint ugyanazon növény hüvelyében, viszont a szelén adagok növelésével fokozatosan csökken ez az arány, és a legnagyobb alkalmazott szelenit adag esetén (90 mg kg^{-1}) már csak 4%-kal mértünk nagyobb értéket. Az első 3 dózisonál (a kontroll kezelés, valamint az 1 és a 3 mg kg^{-1}) nem tudtunk statisztikailag is eltérő növekedést kimutatni, viszont a további három dózis már nem minden kezelésnél és minden növényi résznél szignifikáns szelén tartalom növekedését idézte elő. Az 57. táblázatban található mérési eredmények hasonló mintázatot követnek, mint amelyet a rizoboxos vizsgálatok során tapasztaltunk, csak ebben az esetben hosszabb termesztési idő állt rendelkezésre a növény számára, hogy megmutassa számunkra a

szelenit és szelenát eltérő felvételi mechanizmusa közötti különbséget. Amíg az 1 mg kg^{-1} szelenit adagolás a gyökérnél négyszeres, és a borsó többi részénél pedig csak néhány százalékos szelén tartalom növekedést okoz, addig az ugyanolyan nagyságú (1 mg kg^{-1}) szelenát dózis már két-három nagyságrendnyi növekedést idéz elő (a borsóhüvelynél és a magnál 900-szoros, a gyökérnél 1500-szoros, míg a szár+levél mintánál 2800-szoros). Feltételezéseink szerint, a kisebb szelenit dózisok ($1\text{-}3 \text{ mg kg}^{-1}$) nagyobb hányada a látóképi talaj agyagásványain és a vas-oxidokon adszorbeálódhatott, ezáltal a növény számára hozzáférhető szelén tartalom nem növekedett meg jelentős mértékben, és nem is jelenhetett meg a borsónövényben. A látóképi talaj közel semleges, kissé savanyú pH-ján (13. táblázat) viszont a szelenát nagyobb hányada hozzáférhető a növény számára, ezáltal a szelén tartalom jelentős mértékben képes megnövekedni a borsónövény összes részében.



13. ábra: A látóképi talajon termesztett, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részeinek szelén tartalma (mg kg^{-1}) a szelenit kezelések függvényében
Az egyes növényi részekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

57. táblázat: A látóképi talajon termesztett, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részeinek szelén tartalma (mg kg^{-1}) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg^{-1})	Szelén koncentráció (mg kg^{-1})			
	Gyökér	Szár+levél	Hüvely	Mag
Szelenit				
Ø	$0,838 \pm 0,161^a$	$0,316 \pm 0,029^a$	$0,193 \pm 0,009^a$	$0,240 \pm 0,040^a$
1	$3,87 \pm 0,00^a$	$0,358 \pm 0,011^a$	$0,229 \pm 0,024^a$	$0,259 \pm 0,025^a$
Szelenát				
Ø	$0,838 \pm 0,161^a$	$0,316 \pm 0,029^a$	$0,193 \pm 0,009^a$	$0,240 \pm 0,040^a$
1	$1220 \pm 0,00^b$	886 ± 6^b	178 ± 4^b	214 ± 16^b

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag±szórás, $n=3$)

58. táblázat: A látóképi talajon termesztett, különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó gyökere és föld feletti növényi része, valamint a teljes növény által kivont szelén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$), a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg^{-1})	4 nóduszos állapot	Virágzás kezdete	Teljesérés
	A gyökér által kivont szelén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$)		
Szelenit			
\emptyset	0,123 \pm 0,015 ^a	0,067 \pm 0,015 ^a	0,060 \pm 0,010 ^a
1	0,110 \pm 0,017 ^a	2,57 \pm 0,24 ^a	0,240 \pm 0,026 ^a
3	1,14 \pm 0,31 ^{ab}	8,18 \pm 0,70 ^b	2,89 \pm 0,25 ^a
10	3,48 \pm 0,50 ^b	13,8 \pm 2,4 ^c	8,52 \pm 2,51 ^b
30	7,25 \pm 0,51 ^c	15,2 \pm 4,0 ^c	23,1 \pm 1,2 ^c
90	15,7 \pm 3,2 ^d	41,5 \pm 1,6 ^d	59,6 \pm 3,0 ^d
Szelenát			
0	0,123 \pm 0,015 ^a	0,067 \pm 0,015 ^a	0,060 \pm 0,010 ^a
1	24,1 \pm 4,3 ^b	64,3 \pm 6,5 ^b	63,1 \pm 0,3 ^b
	A föld feletti növényi rész által kivont szelén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$)		
Szelenit			
\emptyset	0,063 \pm 0,017 ^a	0,261 \pm 0,036 ^a	0,347 \pm 0,052 ^a
1	0,303 \pm 0,047 ^a	0,633 \pm 0,103 ^a	0,410 \pm 0,049 ^a
3	0,630 \pm 0,089 ^a	1,94 \pm 0,01 ^{ab}	6,26 \pm 0,66 ^b
10	1,07 \pm 0,12 ^{ab}	4,03 \pm 0,48 ^b	13,6 \pm 1,0 ^c
30	2,58 \pm 0,13 ^b	8,84 \pm 1,05 ^c	22,5 \pm 4,5 ^d
90	4,16 \pm 2,12 ^c	19,5 \pm 3,6 ^d	32,4 \pm 2,6 ^c
Szelenát			
0	0,063 \pm 0,017 ^a	0,261 \pm 0,036 ^a	0,347 \pm 0,052 ^a
1	134 \pm 54 ^b	163 \pm 8 ^b	607 \pm 34 ^b
	A teljes növény által kivont szelén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$)		
Szelenit			
\emptyset	0,187 \pm 0,011 ^a	0,328 \pm 0,044 ^a	0,408 \pm 0,054 ^a
1	0,412 \pm 0,063 ^a	3,21 \pm 0,35 ^a	0,649 \pm 0,027 ^a
3	1,78 \pm 0,37 ^a	10,1 \pm 0,7 ^b	9,14 \pm 0,76 ^b
10	4,56 \pm 0,38 ^b	17,9 \pm 2,6 ^c	22,1 \pm 2,6 ^c
30	9,81 \pm 0,60 ^c	24,1 \pm 3,6 ^d	45,6 \pm 4,4 ^d
90	19,9 \pm 2,7 ^d	61,0 \pm 4,7 ^e	91,9 \pm 5,1 ^e
Szelenát			
0	0,187 \pm 0,011 ^a	0,328 \pm 0,044 ^a	0,408 \pm 0,054 ^a
1	158 \pm 58 ^b	228 \pm 15 ^b	670 \pm 35 ^b

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól (átlag \pm szórás, $n=3$)

A molibdénnel végzett tenyészedényes kísérlethez (5.3.2. alfejezet) hasonlóan, a szelenit és a szelenát adagolásával kapott mérési adatok (száraz tömeg és koncentráció értékek) felhasználásával szintén kiszámoltuk, hogy egy borsónövény és annak adott részei mennyi (μg) szelént vontak ki a kezelt látóképi talajokból. A kapott számítási eredmények egyrészt az 58. táblázatban találhatóak, mely a három vizsgált fenofázisban mutatja be a borsó gyökere (a táblázat felső harmada) és a teljes föld feletti növényi része (a táblázat középső harmada) által kivont szelén mennyiségét, valamint e kettő összegét, azaz egy teljes növényben lévő szelén mennyiségét (a

táblázat alsó harmada), másrészt az 59. táblázatban a borsó különböző részei által felvett szelén mennyisége látható $\mu\text{g növény}^{-1}$ mértékegységben.

59. táblázat: A különböző szelén formák hatása a tenyészedényben nevelt, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részei által felvett szelén mennyiségére

Se-kezelés (mg kg^{-1})	A zöldborsó különböző részei által felvett szelén mennyisége ($\mu\text{g növény}^{-1}$)				
	Gyökér	Szár+levél	Hüvely	Mag	Teljes növény
Szelenit					
Ø	0,060±0,010 ^a	0,244±0,034 ^a	0,052±0,006 ^a	0,050±0,010 ^a	0,407
1	0,240±0,026 ^a	0,230±0,020 ^a	0,087±0,025 ^a	0,093±0,021 ^a	0,650
3	2,89±0,25 ^a	2,39±0,28 ^b	1,06±0,10 ^b	2,81±0,35 ^{ab}	9,15
10	8,52±2,51 ^b	5,56±0,23 ^c	2,42±0,18 ^c	5,58±0,64 ^{bc}	22,1
30	23,1±1,2 ^c	9,87±2,29 ^d	4,31±0,69 ^d	8,36±2,10 ^c	45,6
90	59,6±3,0 ^d	11,2±1,1 ^d	6,21±0,46 ^e	15,0±3,3 ^d	91,9
Szelenát					
Ø	0,060±0,010 ^a	0,244±0,034 ^a	0,052±0,006 ^a	0,050±0,010 ^a	0,407
1	63,1±0,3 ^b	509±20 ^b	56,0±4,1 ^b	42,6±10,5 ^b	670

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban (átlag±szórás, $n=3$)

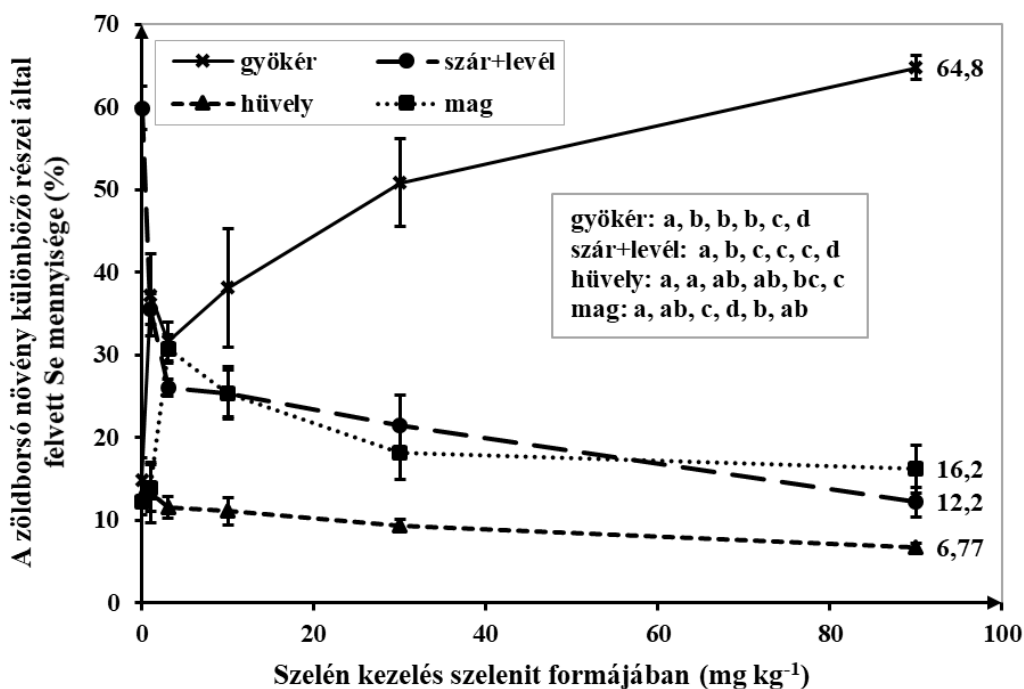
Az 58. és az 59. táblázatokban található mérési eredmények alapján, általánosságban azt állapíthatjuk meg, hogy a szelén adagok növelésével, minden vizsgált fenofázisban, a borsó minden egyes növényi része által kivont szelén mennyiségének a szigorúan monoton növekedése következett be. Az más kérdés, hogy statisztikailag is igazolható módon mindez a 3-10 mg kg^{-1} adagú kezelésektől kezdve volt tapasztalható. Amennyiben a szelenittel és a szelenáttal történő kezeléseket által kivont szelének mennyiségét hasonlítjuk össze akkor az látható, hogy míg a gyökér által kivont szeléneknél a 90 mg kg^{-1} szelenit adag produkált hasonló kivont szelén mennyiséget, mint az 1 mg kg^{-1} szelenát dózis (tehát ugyanolyan nagyságú szelén felvételéhez, a szelenitből közel két nagyságrenddel nagyobb szelén koncentrációra volt szükség), addig ez az érték a föld feletti növényi résznél, szelenát esetén még további 20-szor nagyobb felvett szelént idézett elő. Az 1 mg kg^{-1} szelenit és szelenát dózisok összehasonlításával megállapíthatjuk, hogy a szelenát a szelenithez képest 200-400-szor vont ki nagyobb mennyiségű szelént a négy nóduszos állapotban, majd ez az arány kisebb-nagyobb mértékben, de minden esetben csökkent a virágzás kezdetén, majd a teljesérés fenofázisában, a gyökérnél több mint 250-szeresére, a föld feletti növényi résznél pedig 1500-szorosára nőtt. Ha egy esetleges szelén szennyezést feltételezünk, melyet szelén-só okoz, akkor az esetben a talaj „gyógyításának” a legkedvezőbb költségű és környezetbarát módja egy fitoremediációs technológia alkalmazása lehet. Egy fitoremediációs eljárás alkalmazásánál elengedhetetlen tudnunk, több egyéb tényező mellett, hogy az adott növény szelén felvételének hány százaléka dúsul a növény föld feletti részében, amely betakarításkor eltávolítható a helyszínről. A borsó kontroll kezelésénél az összes szelén 85%-a található a növény föld feletti részében, míg ugyanez az érték az 1 mg kg^{-1} dózisú szelenát kezelésnél, már több mint 90% (60. táblázat). Szelenit szennyezést feltételezve ugyancsak 1 mg kg^{-1} dózissal, a borsó által felvett

összes szelénnek csupán 63%-a található meg a föld feletti részében, és még ez az arány is nagymértékben lecsökken a 90 mg kg⁻¹ dózisú szelénit szennyezés esetén, ahol már csak 35%-a lesz a borsó föld feletti részében. Ez utóbbi adatok részletesebb tanulmányozását teszi lehetővé számunkra számszerűen a 60. táblázat és vizuálisan a 14. ábra.

60. táblázat: A különböző szelén formák hatása a tenyészeményben nevelt, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részei által felvett szelén százalékos arányára

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	A zöldborsó különböző részei által felvett szelén (%)				
	Gyökér	Szár+levél	Hüvely	Mag	Föld feletti rész
Szelenit					
Ø	14,9±2,7 ^a	59,9±2,7 ^a	12,9±0,8 ^a	12,3±1,7 ^a	85,1
1	37,2±5,0 ^b	35,6±1,9 ^b	13,3±3,6 ^a	13,9±2,9 ^{ab}	62,8
3	31,7±2,4 ^b	26,0±1,0 ^c	11,6±1,3 ^{ab}	30,7±1,7 ^c	68,3
10	38,1±7,1 ^b	25,4±3,2 ^c	11,1±1,6 ^{ab}	25,4±2,8 ^d	61,9
30	50,9±5,3 ^c	21,5±3,6 ^c	9,43±0,68 ^{bc}	18,1±3,2 ^b	49,1
90	64,8±1,4 ^d	12,2±1,8 ^d	6,77±0,46 ^c	16,2±2,9 ^{ab}	35,2
Szelenát					
Ø	14,9±2,7 ^a	59,9±2,7 ^a	12,9±0,8 ^a	12,3±1,7 ^a	85,1
1	9,43±0,06 ^b	75,9±2,2 ^b	8,37±0,67 ^b	6,37±1,65 ^b	90,6

Az oszlopokon belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által kivont szelén mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban (átlag±szórás, $n=3$)



14. ábra: A látóképi talajon termesztett, teljesérés fenofázisban lévő zöldborsó különböző részei által felvett szelén százalékos arányára

Az egyes növényi részekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=3$)

A szelenit kezelés hatására a borsó vizsgált részeiben növekvő, csökkenő, valamint maximum görbe jellegű változásokat (tendenciákat) tapasztalhatunk (14. ábra). A gyökérben lévő szelén aránya folyamatosan növekedett 15%-tól egészen 65%-os részesezésig (60. táblázat). Mindamelllett a szár+levél által felvett szelén aránya 60%-ról 12%-ra, a hüvelyé pedig 13%-ról, kevesebb mint 7%-ra csökkent. A szelenit kezelés nagysága és a borsómagban lévő szelén százalékos aránya között viszont maximum görbe jellegű az összefüggés (60. táblázat).

5.4. Nagyhöröcsöki szabadföldi kísérlet

A Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete (MTA TAKI) Nagyhöröcsöki Kísérleti telepén Dr. Kádár Imre vezetésével indult egy rendkívül érdekes és gyakorlatilag megismételhetetlen szabadföldi kísérlet. Ebben a kísérletben 21 m² területű parcellákon 13 elem (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Sr és Zn), egyenként 4-4 terhelési szinten, két ismétlésben végzett, számos paraméterre terjedő vizsgálata folyt. 1991 és 2004 között minden évben új növényfaj (összesen 14 féle) termesztése, vizsgálata történt meg. A fenti kísérlethez Dr. Kádár Imre segítségével és tanácsaival tudtam bekapcsolódni számos elem vizsgálatába, melynek során rendelkezésemre bocsátotta az akkor még meglévő talaj- és növénymintákat. Ezek közül a jelen dolgozat elkészítéséhez a molibdén és a szelén adagolásával kapcsolatos összes parcella talajmintáját, valamint a rendelkezésemre álló növényminták közül a fentiekben már vizsgált növényfajokat, a kukorica, a borsó és a napraforgó mintákat választottam ki.

5.4.1. A nagyhöröcsöki szabadföldi kísérletből származó talajminták vizsgálata

A nagyhöröcsöki kísérletből feltalaj és mélységi talajminták vétele is történt. A molibdénnel és a szelénnel kezelt parcellákról az összesen öt alkalommal (1991, 1992, 1994, 1997 és 2000) vett feltalaj minták, míg a mélységi talaj mintavételénél, három évben (1993, 2000 és 2005) vett minták vizsgálatára nyílt lehetőségem (Kádár, 2012). Minden rendelkezésemre álló talajmintából kettő (Mo kezelésnél) vagy háromféle (Se kezelésnél) elemtartalmi vizsgálatot végeztünk: 1.) HNO₃-H₂O₂ nedves roncsolásos mintaelőkészítést követően a talaj „összes” elem tartalma (Mo és Se tartalom) (4.2.2.2. alfejezet), 2.) a növény számára felvehető (oldható) elemtartalom Lakanen-Erviö-féle kivonószerezrel (4.2.2.1. alfejezet), valamint 3.) a szelénnel kezelt talajmintákból szelén formák (szelén-módosulatok) meghatározása, nagyhatékonyságú folyadékkromatográf induktív csatolású plazma tömegspektrométerrel (HPLC-ICP-MS), úgy nevezett kapcsolt analitikai rendszer segítségével (4.2.4. alfejezet).

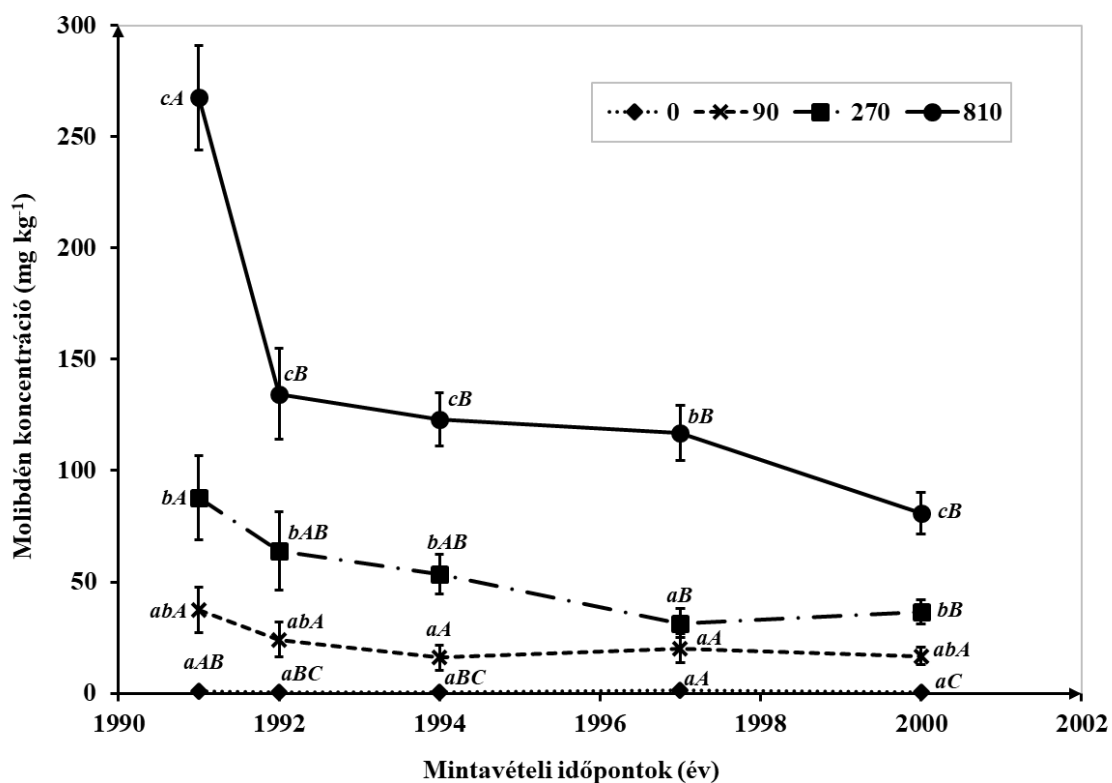
5.4.1.1. A feltalaj minták vizsgálata

A feltalaj minták mintavételénél a parcellák nettó területéről a szántott rétegből 20-20 pontminta egyesítésével képződtek az átlagminták. A kezelések elem koncentrációi kiszámításának az volt az alapja, hogy a kb. 20 cm szántott talajréteg (1,5 kg dm⁻³ átlagos térfogattömeggel számolva) hektáronként mintegy 3 millió kg tömeget jelent, azaz a 90 kg ha⁻¹ terhelés 30 mg kg⁻¹ kezelésnek felel meg. A kísérletben alkalmazott 0 (30 Se esetén), 90, 270, 810 kg ha⁻¹ terhelési szintek 0 (10 Se esetén), 30, 90 és 270 mg kg⁻¹ kezeléseknak felelnek meg.

Elvégeztük a nagyhőrcsöki kísérletből származó talaj- és növényminták multieleemes vizsgálatát, melyek közül a molibdénrel kezelt parcellák feltalajai molibdén koncentrációjára vonatkozó mérési eredményeket a 15. ábra tartalmazza. A molibdén adataihoz hasonlóan, a 16. ábra a mintavételi évek és a szelén kezelések függvényében, a szelénrel kezelt parcellák feltalaj mintái szelén tartalmának mérési eredményeit mutatja be.

A molibdénrel kezelt parcellák feltalajai, ugyanazon évben mért molibdén tartalma, azaz a kezelések között, általában statisztikailag is kimutatható eltéréseket lehetett kimutatni. Minden esetben szignifikáns eltérés volt tapasztalható a legnagyobb (810 kg ha^{-1}) és a 270 kg ha^{-1} molibdén kezelés között, míg a legkisebb mértékű kezelés (90 kg ha^{-1}) és a kontroll parcella talajmintái molibdén koncentrációja között már statisztikailag nem tudunk különbséget kimutatni.

A különböző mintavételi években megvizsgált ugyanazon szintű molibdénrel kezelt parcellák feltalajai között nem találtunk jelentős eltéréseket. A legnagyobb különbséget a 810 kg ha^{-1} molibdén kezelésnél tapasztaltuk, amelynél az első évben mért molibdén tartalom szignifikánsan különbözött a további vizsgált években mért értékektől (1992-2000 években).



15. ábra: Molibdén koncentráció a feltalajban, a mintavételi évek és a molibdén kezelések (kg ha^{-1}) függvényében

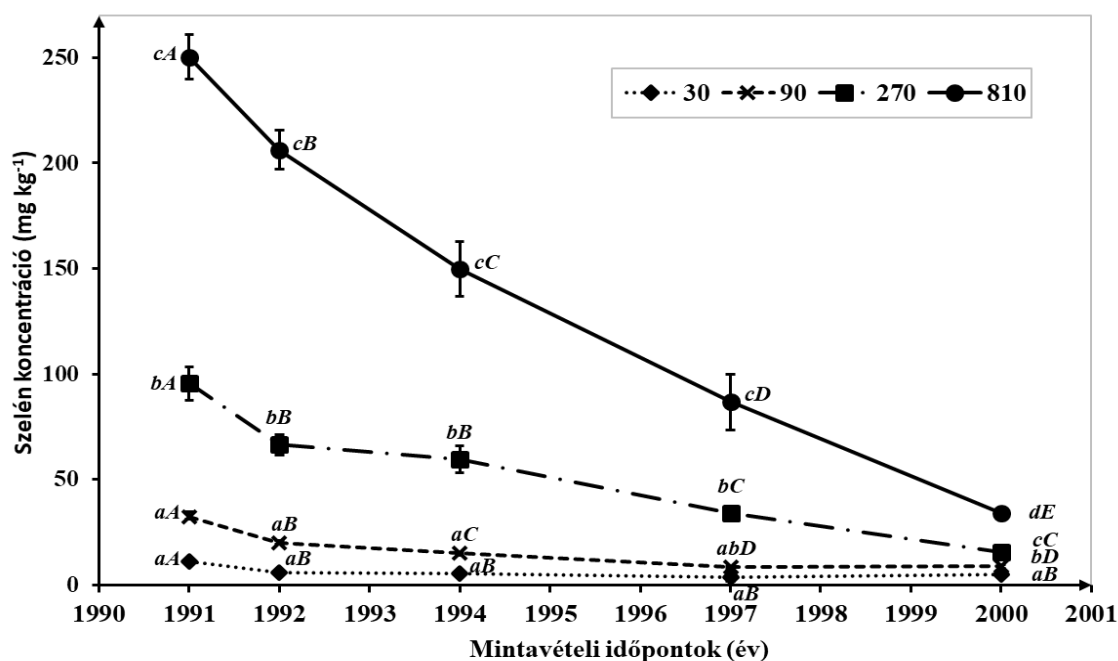
Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezeléson belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag±szórás, $n=2$)

A 15. és a 16. ábrák (molibdén és szelén parcellák) külső megjelenését összehasonlítva látható, hogy az első évben mind a két elemnél (Mo és Se) hasonló módon visszamérhetőek voltak a kezelési adagok, viszont már az első évben és a további mintavételi években is a molibdénrel kezelt parcelláknál, nagyobb szórású méréseket tudunk kivitelezni. Ez a viszonylag nagyobb

szórás vagy a kísérlet nem egyenletes területi eloszlásával, vagy a nem ugyanolyan minőségű mintavétellel magyarázható. Mivel ez a nagyobb szórás több éven keresztül is tapasztalható, ezért azt tartom inkább elképzelhetőnek, hogy a kísérlet beállítását követően egy intenzívebb csapadék (zápor, felhőszakadás) lehetett (Kádár, 2012), amely a feltalajban lévő molibdén eloszlásban kisebb mértékű lokális eltéréseket idézhetett elő.

A két legnagyobb szelén dózissal (270 és 810 kg ha^{-1}) kezelt parcellák feltalajai (16. ábra) összes szelén tartalma a mintavételi éveken belül szignifikánsan különbözött egymástól és a többi kisebb nagyságú szelén kezeléstől is. A két legkisebb szelén dózissal (30 és 90 kg ha^{-1}) parcellák feltalajai szelén tartalmai között viszont, a 2000. évben vett feltalaj minták kivételével, nem találtunk statisztikailag is kimutatható eltérést.

A kísérlet beállítását (1991) követő mintavételi években a feltalaj minták szelén tartalma folyamatosan csökkent. A 810 kg ha^{-1} dózissal kezelt parcellánál volt a legkifejezettebb az évről évre megjelenő szelén tartalomban tapasztalt különbség, mely minden évben szignifikáns változást is jelentett. A legkisebb szelén dózissal, azaz a 30 kg ha^{-1} -os parcellák feltalajai szelén tartalmai között viszont csak az első év mért adatai különböztek, statisztikailag is, a további vizsgált évek mért adataitól.

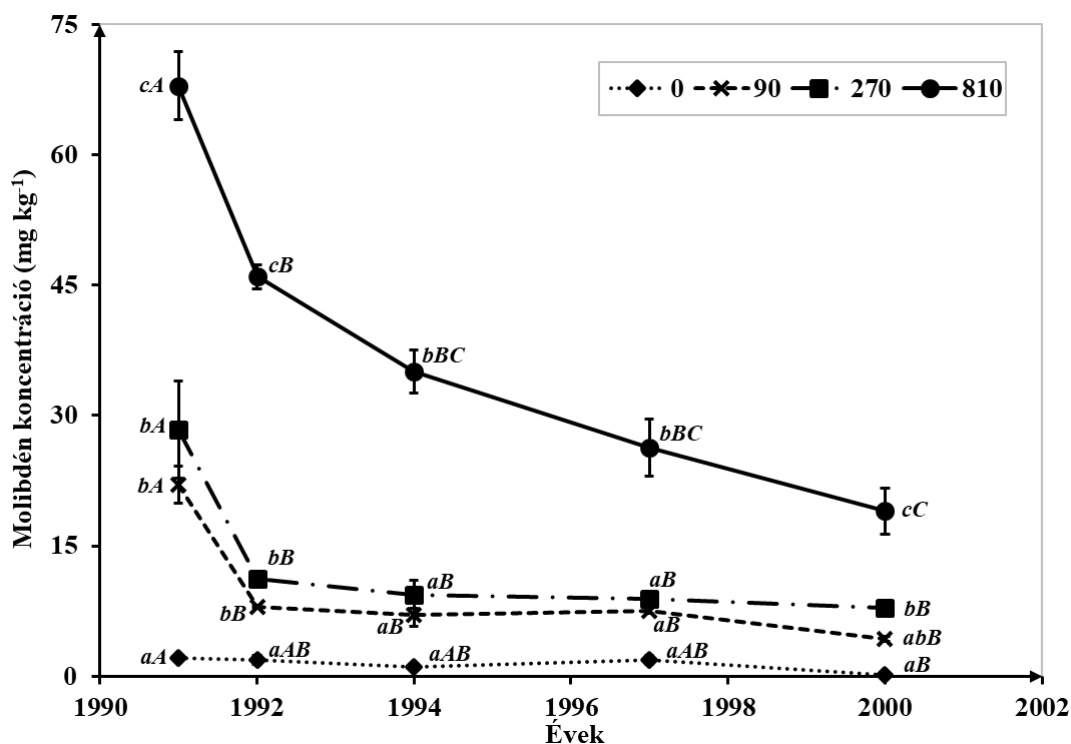


16. ábra: Szelén koncentráció a feltalajban, a mintavételi évek és a szelén kezelések (kg ha^{-1}) függvényében

Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezeléson belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag \pm szórás, $n=2$)

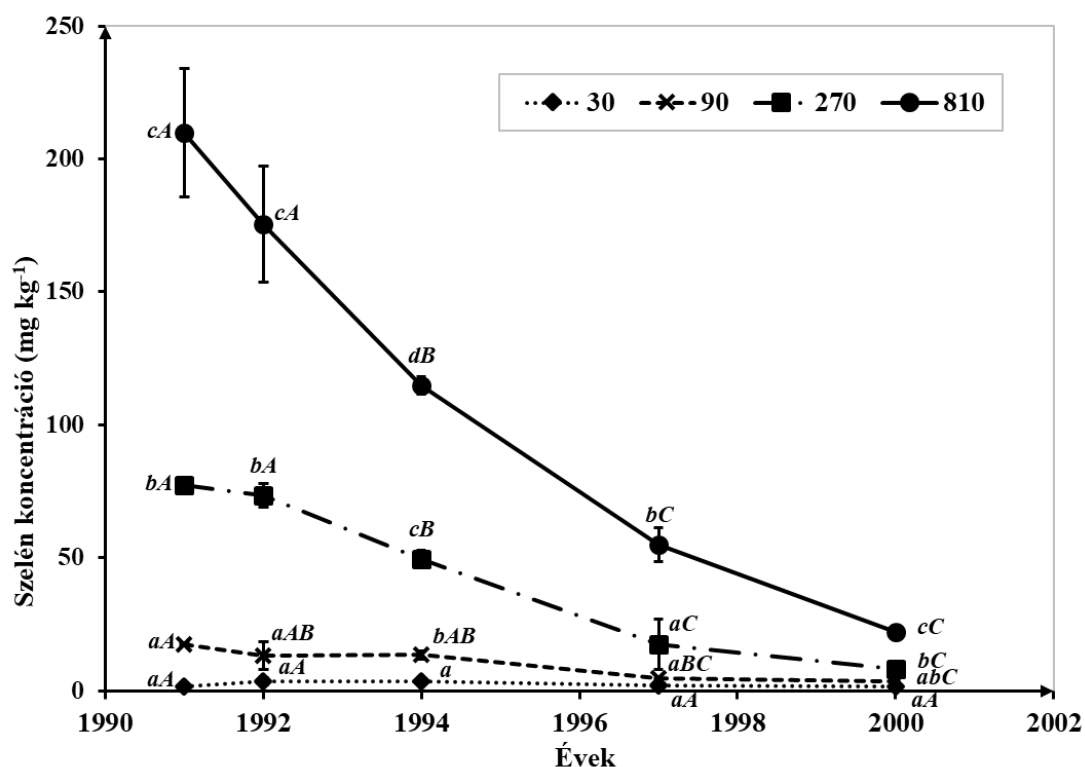
Annak érdekében, hogy becsülni tudjuk a nagyhőrcsöki kísérletből származó feltalaj mintáknak a növény által hozzáférhető molibdén és szelén tartalmát, ezért meghatároztuk a fenti feltalaj minták Lakanen-Erviö-féle kivonatban oldható molibdén és szelén koncentrációját (17-18. ábrák). A Lakanen-Erviö-féle kivonatból mért molibdén és szelén tartalom tendenciája hasonlóan alakult, mint az összes elem (Mo és Se) tartalom (15. és 16. ábrák). Ha azt kiszámoljuk,

hogy az összes elemtartalomnak hány százaléka a Lakanen-Erviö-féle kivonatban oldható molibdén és szelén koncentrációja, akkor megállapíthatjuk, hogy a molibdén kezeléseknél 18-59%-a volt a mobilis molibdén aránya, míg a szelénnel kezelt feltalajoknál a növény által hozzáférhető szelén mennyisége megközelítően 14 és 90% között változott. Ezen arányok alakulásában tendencia nem volt megfigyelhető csupán annyi, hogy a molibdénnél inkább a kisebb molibdén adagok idéztek elő nagyobb mértékű növény számára hozzáférhető molibdént, míg ezzel ellentétben a szelénnél a nagyobb dózisoknál lehetett kimutatni nagyobb arányszámokat.



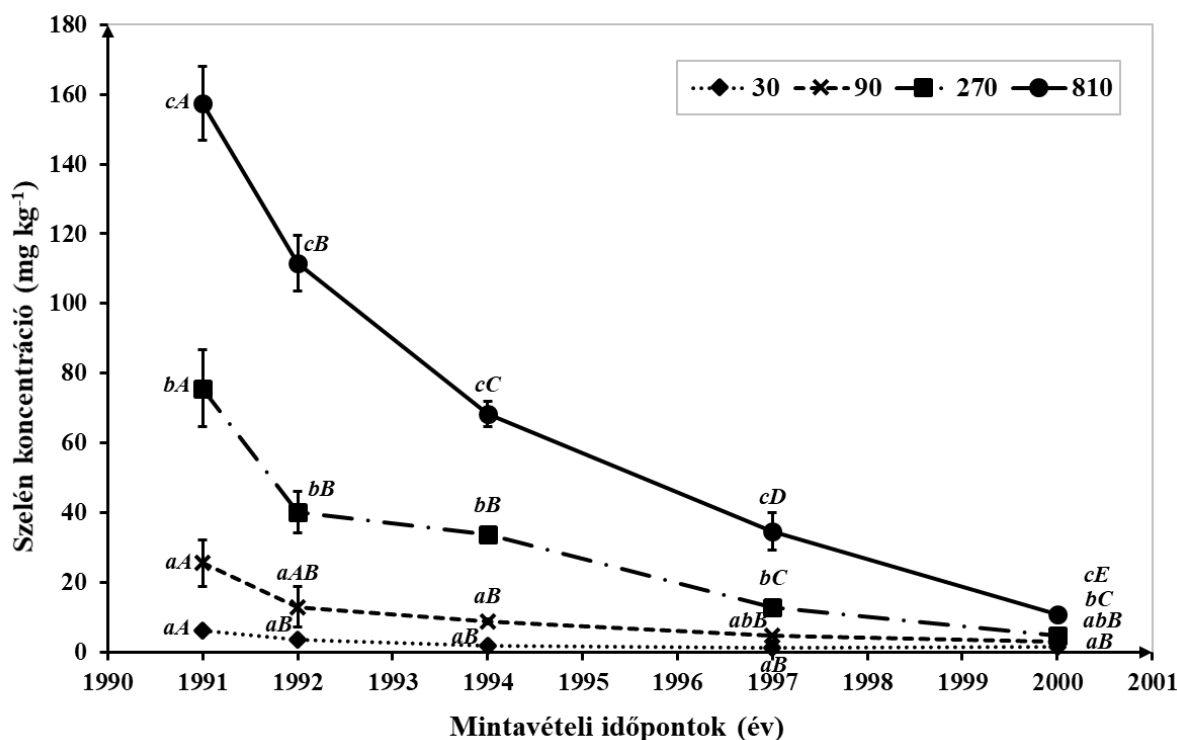
17. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható molibdén koncentráció a feltalajban a mintavételi évek és a molibdén kezeléseknél (kg ha^{-1}) függvényében. Az eltérő kisbetűk a kezeléseknél, míg az eltérő nagybetűk egy kezeléssel belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag \pm szórás, $n=2$)

A szelénnel kezelt parcellák talajmintái szelén tartalmával kapcsolatos értékeléséhez fontos ismernünk a talajban található szelén formák típusát és azok mennyiségét, mivel ezen paraméterektől függ a szelén növény általi felvehetősége és kimosódása. A szelén formák koncentrációjának meghatározásához az egyik legalkalmasabb extrakciós oldat a 0,1 M NaOH, mellyel egyrészt viszonylag nagy mértékű kioldási hatékonyság érhető el, másrészt a mintaelőkészítés és a mérés során a szelén formák között átalakulás nem következik be (vagy legalábbis elhanyagolható), továbbá az általunk alkalmazott kapcsolt analitikai rendszerünk működéséhez is megfelelő (Stanciu-Burileanu et al., 2015; Tolu et al., 2010). Annak érdekében, hogy össze tudjuk hasonlítani a rendelkezésünkre álló talajminták 0,1 M NaOH oldható, a Lakanen-Erviö oldható, valamint az összes szelén tartalmát, ezért meghatároztuk a 0,1 M NaOH extrakciós oldat szelén tartalmát is (19. ábra). Ugyanezen oldatból végeztük el a szelén(IV) (20. ábra) és a szelén(VI) (21. ábra) koncentrációjának az elemzését is.



18. ábra: Lakanen-Erviő-féle kivonat által oldható szelén koncentráció a feltalajban a mintavételi évek és a szelén kezelések (kg ha⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezeléson belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag±szórás, $n=2$)



19. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén koncentráció a feltalajban a mintavételi évek és a szelén kezelések (kg ha⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezeléson belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag±szórás, $n=2$)

A 19. ábrán a nagyhőrcsöki kísérletből származó feltalaj minták 0,1 M NaOH extraháló oldat által oldható szelén koncentrációja látható, melynek tendenciája természetesen nagyon hasonlít a Lakanen-Erviö oldható szelén tartalom alakulásához. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy a 0,1 M NaOH extrakciós oldatban mért szelén koncentráció mind a mintavételi évek, mind a szelén kezelések függvényében végzett statisztikai számítások, szinte ugyanazokat a szignifikáns változásokat mutatják, mint amelyeket a Lakanen-Erviö oldható szelén tartalom értékelésénél tapasztaltunk (18. ábra).

Ha kiszámítjuk, hogy az összes szelén tartalomnak hány százaléka, valamint a Lakanen-Erviö-féle kivonatban oldható szelén koncentrációnak is hány százaléka volt a 0,1 M NaOH extraháló oldat által oldható szelén koncentrációja, akkor a következő két megállapítást tehetjük:

1.) A 0,1 M NaOH extraháló oldat a talajban lévő összes szelén tartalomnak 32-79%-át oldotta ki, mely a kísérlet beállításának évében 55-79%-ot jelentett, míg az utolsó mintavételi évben már csak 32-36%-os kivonási hatékonyságot biztosított. Véleményem szerint ez a hatékonyság csökkenés azért következhetett be, mivel a kísérlet első 9 éve során a 30 kg ha⁻¹ dózisú kezelés a felére, a 90 kg ha⁻¹ a negyedére, a 270 kg ha⁻¹ a hatodára, a 810 kg ha⁻¹ adagú parcella összes szelén tartalma pedig megközelítően a nyolcadára csökkent. Ezáltal a kisebb szelén tartalomból, mint kisebb tápanyagtökből, a talajban lévő aktív adszorpciós helyek relatíve nagyobb hányadú szelén megkötésére voltak képesek, így kisebb részük maradt oldható formában.

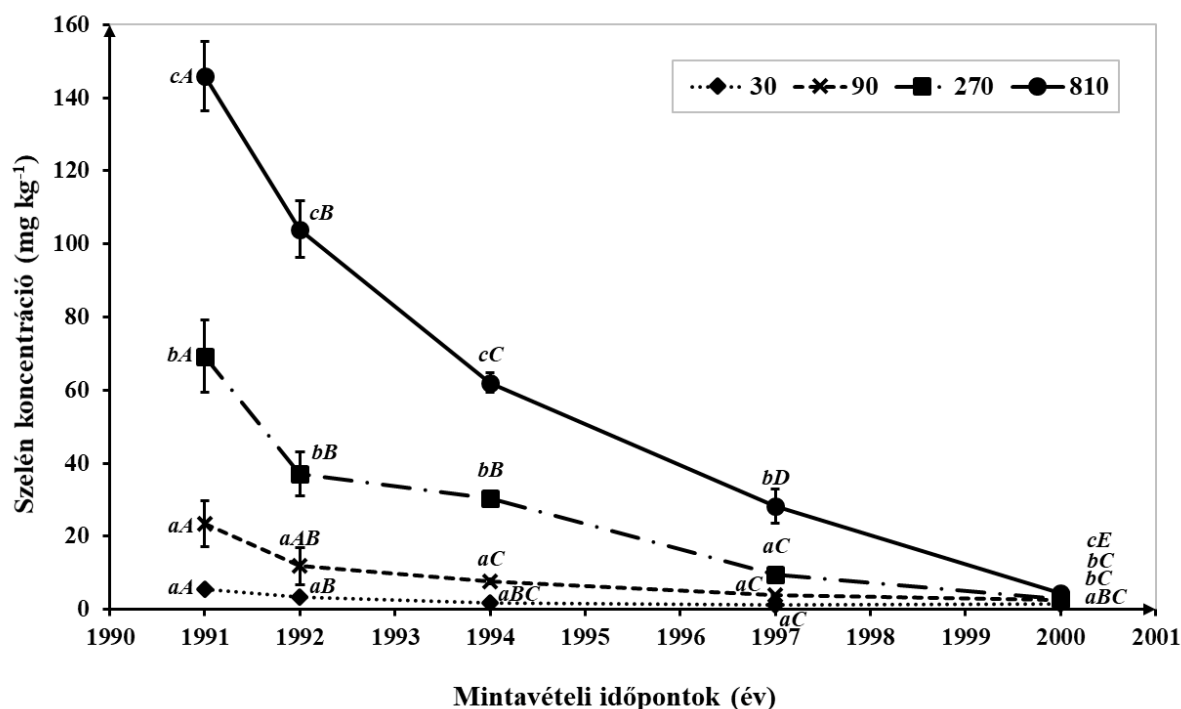
2.) A kísérlet beállításának kezdő évében, a 0,1 M NaOH extraháló oldat a Lakanen-Erviö oldható szelén tartalomhoz képest, minden egyes kezelési szinten, viszonylag nagyobb szelén kihozatalokat produkált, mint a további mintavételi években. A következő 8 évben (1992-2000 években) a 30 és 90 kg ha⁻¹-os kezeléseknél a 100%-os értékhez közel álló kihozatali arányokat eredményezett, amely a két extrakciós módszer viszonylag jó egyezésének nevezhető. A két nagyobb szelén dózissal (270 és 810 kg ha⁻¹-os kezeléseknél) viszont a 0,1 M NaOH extraháló oldatba a szelénnek már csak 50-75%-a oldódott ki ahhoz képest, mint annak a szelénnek a mennyisége, melyet a Lakanen-Erviö oldattal tudtunk kivonni. A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a viszonylag kisebb szelén tartalmak (<90 kg ha⁻¹ szelén adag, azaz <30 mg kg⁻¹ talaj szelén koncentráció) esetén, mind a 0,1 M NaOH, mind a Lakanen-Erviö extraháló oldatok alkalmasak a növény számára felvehető (oldható) szelén tartalom meghatározásához.

A nagyhőrcsöki kísérletből származó talajmintákat 0,1 M NaOH extrakciós oldattal készítettük elő, majd az extraktumban megelemeztük a szelén formákat, mely kromatogramok alapján megállapítottuk, hogy az előkészített oldatban a szelén(IV) és a szelén(VI) specieszeken kívül a többi szelén speciesz elhanyagolható mennyiségben van jelen. Így a műszeres analízis (HPLC-ICP-MS csatolt rendszer alkalmazása) során csak a szelén(IV) és a szelén(VI) specieszek koncentrációjának a meghatározása volt lehetséges. A fenti indokok alapján a dolgozatban a szelén(IV) és a szelén(VI) szelén specieszek értékelését végeztem el.

A talajokban a szelén mennyisége folyamatos dinamikus változáson megy keresztül. A talaj szelén tartalmát a különböző szelén formák egymásba való átalakulása, az adszorpciós-

deszorpciós tulajdonságok, a növény általi felvétele, továbbá a szelén kimosódása, valamint a biológiai metiláció (főként anaerob baktériumok közreműködésével) és az azt követő gáz halmazállapotú szerves szelén vegyületek (szelenidek) párologási viszonyai is befolyásolják. A vizsgálataink során pontos szelén mérleget nem tudtunk felállítani. A talajban lévő szelén tartalom mérhető, a növényi felvételek jól nyomon követhetők, azonban az egyéb veszteségforrások, mint pl. a szelenidek párologása nehezen becsülhető.

A nagyhőrcsöki feltalaj minták 0,1 M NaOH extrakciójával, majd az oldatban lévő szelén formák (Se(IV) és Se(VI)) analízisével előálló 20. és 21. ábrák elemzésével megállapítható, hogy a kísérlet első 9 éve során a szelenit koncentrációja a 30 kg ha⁻¹ dózisu kezelésnél a negyedére, a 90 kg ha⁻¹-nál a kilencedére, a 270 kg ha⁻¹-nál a huszonnegyedére (4,2%-ára), a 810 kg ha⁻¹ adagú parcellánál pedig a harminckettedére (3,1%-ára) csökkent. A szelenát koncentrációja viszont nem mutatott ilyen nagy változást, sőt a szelén (szelenit) kezelések nagyságától más-más szinten ugyan, de az első év kivételével, meglehetősen hasonló (szinte konstans) szelenát koncentráció értékeket mutattak (21. ábra).

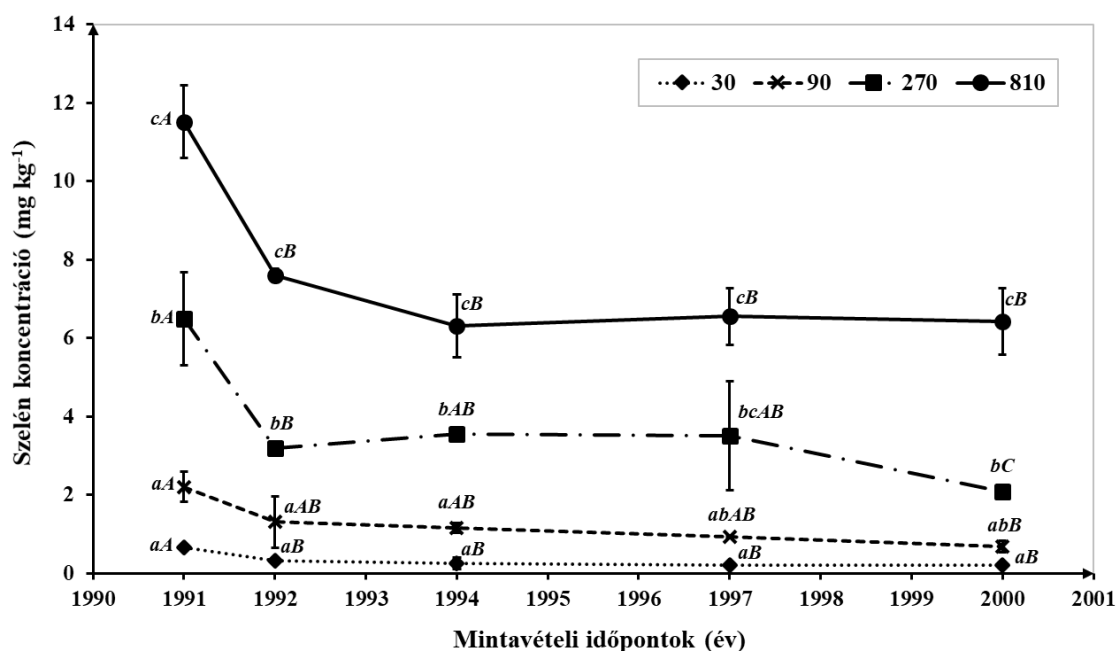


20. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) koncentráció a feltalajban a mintavételi évek és a szelén kezelések (kg ha⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezelésen belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag±szórás, $n=2$)

Ha a szelenit-szelenát arányokat vizsgáljuk akkor kijelenthető, hogy az első két évben a kezelt talajmintákban megközelítően tízszer (8,5-12,7) annyi szelén(IV) volt megtalálható, mint amennyi szelenátot (szelén(VI)) tartalmaztak a minták. A szelenit-szelenát aránya 1991-ben a kezelések függvényében növekvő arányt mutatott: míg a 30 kg ha⁻¹-os kezelésnél 8,5 volt, addig a 810 kg ha⁻¹-os parcellánál már 12,7 volt ez az érték. A mintavételi évek során a kezelési szinteken ez az arány változott, a 30 kg ha⁻¹-os kezelés kivételével (ahol 6,2-10,6 között volt). Minél

nagyobb volt a kezelés nagysága, annál inkább ki volt téve a szelenit-szelenát aránya a változásnak. Az utolsó mintavételi évben a szelenit-szelenát aránya már a következő értékeket vette fel: 30 kg ha⁻¹ dózisznál 7,3, a 90 kg ha⁻¹-nál 3,7, a 270 kg ha⁻¹ adagnál 1,4, míg a 810 kg ha⁻¹ adagú parcellánál 0,7 volt. Összefoglalva a fentieket: 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 (2000-ben) a legnagyobb kezelésnél, a 810 kg ha⁻¹-os adagnál a szelenát koncentrációja már meg is előzte a szelenit mennyiségét a talajban. Természetesen ennek kialakulását az előző oldalon felsorolt folyamatok komplex hatása, folytonos változásának megléte idézte ezt elő.



21. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(VI) (szelenát) koncentráció a feltalajban a mintavételi évek és a szelén kezelések (kg ha⁻¹) függvényében

Az eltérő kisbetűk a kezelések közötti, míg az eltérő nagybetűk egy kezelésen belül, a vizsgált évek közötti szignifikáns ($p < 0,05$) különbségeket jelzik. (átlag±szórás, $n=2$)

5.4.1.2. A mélységi talajminták vizsgálata

A TAKI szakemberei a Nagyhörcsöki Kísérleti telepen nemcsak a feltalaj minták mintavételét végezték el, hanem mélységi talajminták vételére is sor került. A mélységi talajminták vétele 1993-ban, 2000-ben, valamint 2005. évben került kivitelezésre, mely talajmintákból a molibdén vizsgálata során, összmolibdén (22-24. ábrák) és Lakanen-Erviö oldható molibdén tartalom (25-27. ábrák) meghatározását végeztük el. Az első alkalommal a mélységi talajmintavétel (1993-ban) a kontroll és a maximális terhelésű parcellák 0-20, 20-40 és 40-60 cm-es rétegéből botfúróval történt (kézzel végezve), 20-20 db lefűrés/nettó parcella anyagának átlagolásával. Mindegyik további mélységi mintavétel a kontroll és a maximális terhelésű (810 kg ha⁻¹) parcellákból történt, 5-5 fűrólyuk használatával, ahol a fűrólyukak az átló mentén 1-1 m távolságra helyezkedtek el oly módon, hogy a parcella szegélyétől 1-1 m volt elhagyva. 2000. és 2005. évben (0-30, 30-60, 60-90, 100-130, 130-160, 160-190, 200-230, 230-260, 260-290 cm) patronos talajminta kiemelés történt, mely során a legvékonyabb fűrósorozat került használatra

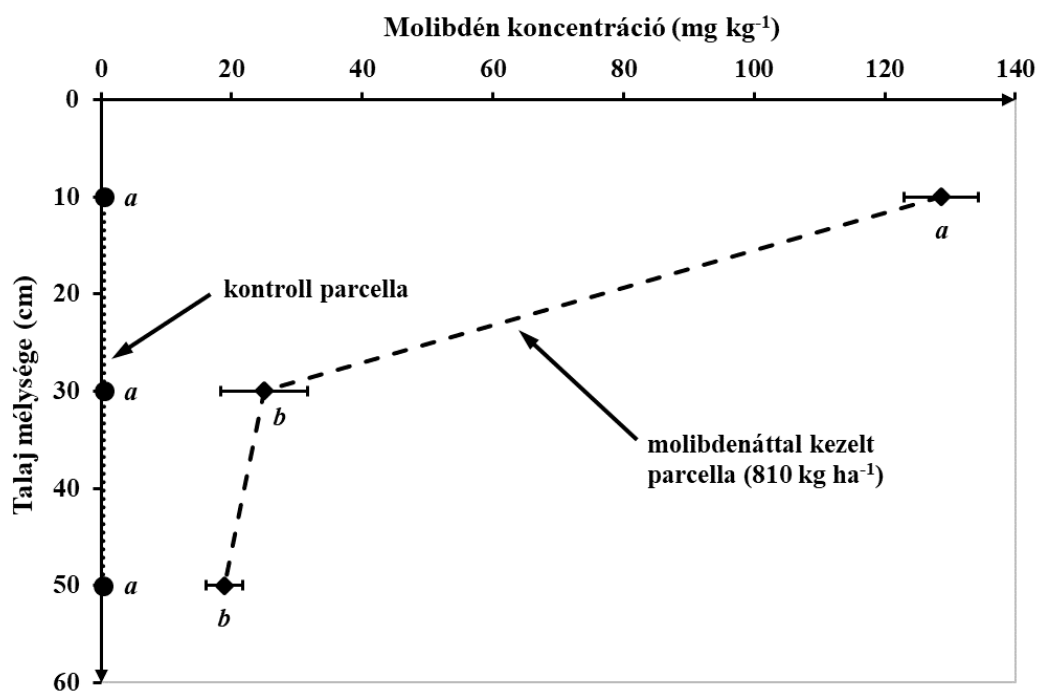
azért, hogy minimálisra csökkentsék (elkerüljék) a rétegek közötti talajszennyezést, továbbá ha száraz volt a talajfelszín, akkor a fúrólukak környezetét öntözték (Kádár és Németh, 2003).

Fontos kiemelni, hogy a vizsgálatok korlátokkal terheltek:

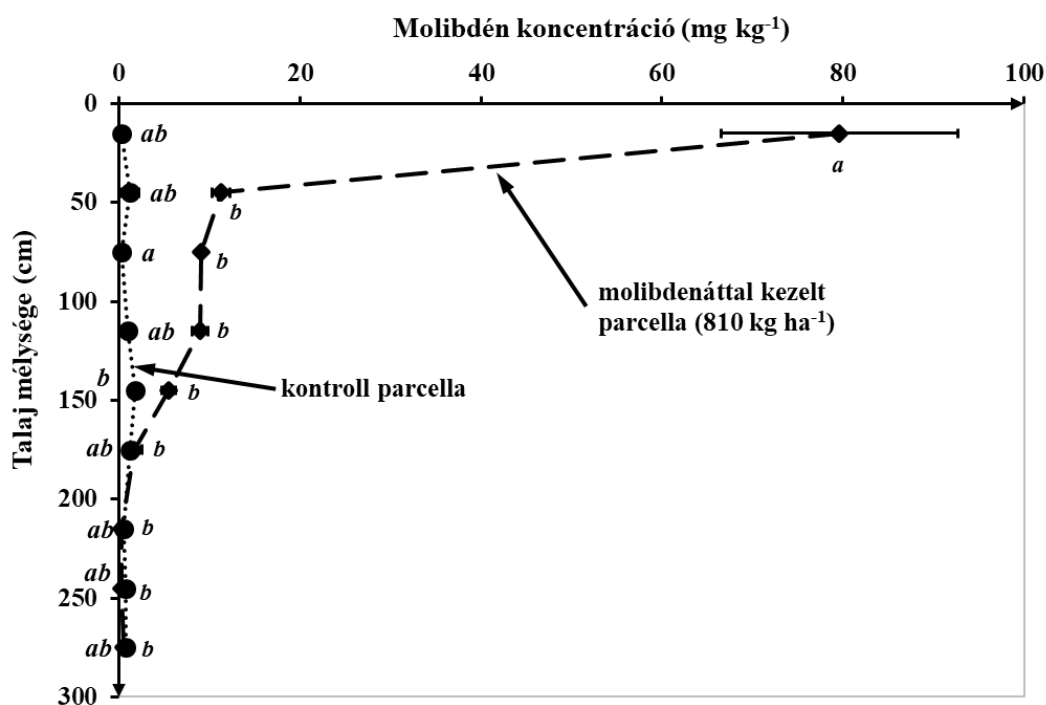
- A gondos mintavétel ellenére sem lehetett teljes mértékben elkerülni a fúrás során a mélységi talajminták bizonyos mérvű szennyezését.
- A kísérlet időtartamában domináltak az aszályos évek, a csapadékhiány miatt a talaj gyakran mélyen kiszáradt. Nem ismertek a talaj nedvességállapotának változásai és a tényleges vízmozgási adatok sem, ennek megfelelően szabatos vízmérleggel sem rendelkezünk. Továbbá a kapilláris úton felfelé irányuló víz- és elemmozgás, kilúgzást ellensúlyozó esetleges hatásai sem ismertek.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a mélységi talajminta vizsgálatával kapcsolatos eredmények csupán tájékoztató jellegű információknak tekinthetők, a trendek alapján viszont a molibdén és a szelén vertikális mobilitása és felvehetősége értékelhető (Kádár és Németh, 2003).

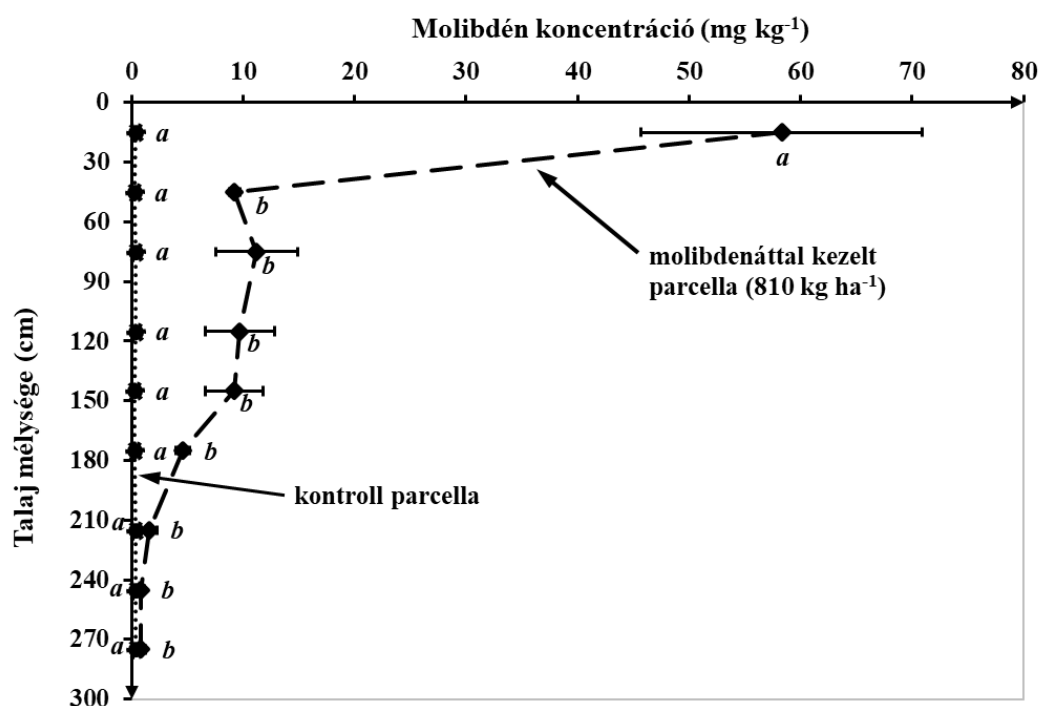
A 22. ábrán látható, hogy a nagyhőrcsöki kísérlet harmadik évében (1993) a kontroll és a 810 kg ha⁻¹ molibdén dózissal kezelt parcellák mélységi talajmintáinak összmolibdén koncentrációja között jelentős a különbség, vizuálisan is értékelhető, hogy a legnagyobb dózissal kezelt felső rétegeből (feltalajából) lefelé irányuló, jelentős mértékű molibdén mozgás tapasztalható, mely mobilitás a későbbi vizsgált években (2000 és 2005) is tovább tartott (23. és 24. ábrák).



22. ábra: A molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban. Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)



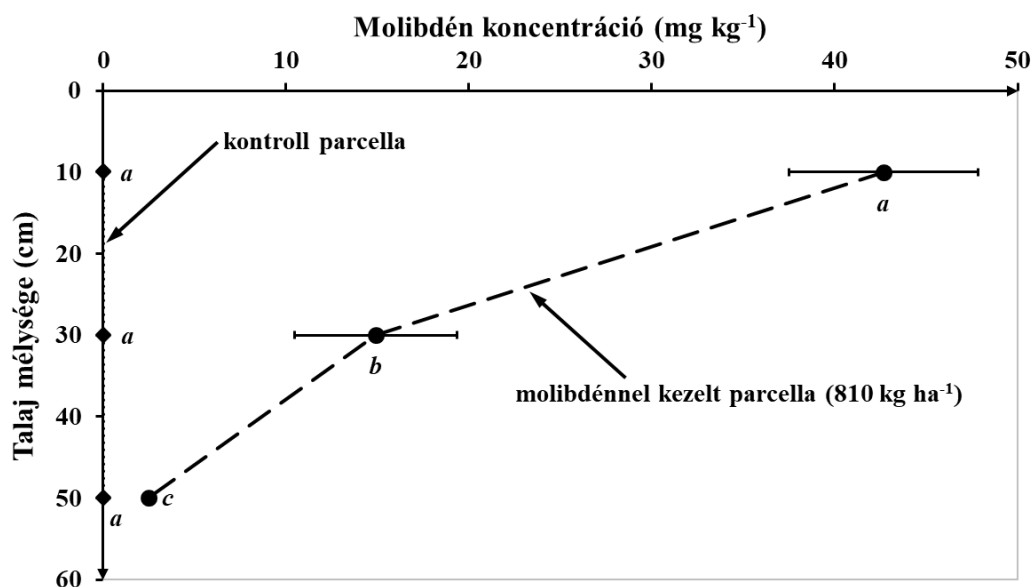
23. ábra: A molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben. Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



24. ábra: A molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben. Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

Az 1993-as mérési adatokból az is észrevehető, hogy a nagyhőrcsöki kísérletből eltelt közel két év alatt a molibdén olyan nagy vertikális mobilitást mutatott, hogy a 60 cm mélységű talajmintavétel már nem volt elegendő, hogy kimutassuk a molibdén teljes kilúgzási profilját.

Véleményem szerint a molibdén talajbani nagy mobilitása a következőkkel magyarázható: a molibdénterheléses parcellák dózisaihoz használt ammónium-molibdenát $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, talajban való diszpergálásánál, a pH-tól függően főként vagy HMoO_4^- vagy MoO_4^{2-} anion formák keletkeznek. A nagyhorcsöki talaj pH-ja közel semleges, mérsékelt lúgos tartományban található ($\text{pH}(\text{KCl})=7,3$) (Kádár és Németh, 2003), ahol a MoO_4^{2-} forma az uralkodó, a pH csökkenésével viszont egyre inkább a HMoO_4^- anion lesz az uralkodó molibdén forma (Kabata-Pendias és Szteke, 2015; Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007; Adriano, 2001). Mivel a molibdenát anion (MoO_4^{2-}) a legmobilisabb molibdén forma, ezért a talajban lévő, a talajba kerülő nedvesség hatására a jó vízoldható tulajdonságokkal rendelkező molibdenát anion (MoO_4^{2-}) könnyen mobilizálódik a talaj mélyebb rétegeibe. A molibdén folyamatos kilúgzódásával a maximális terhelésű (810 kg ha^{-1}) parcella összmolibdén tartalma folyamatosan csökken (22-24. ábrák). Ennek megfelelően a 2000. évben (23. ábra) a molibdén mennyisége a feltalajban kisebb, mint amennyi 1993-ban volt. Ez annak köszönhető, hogy közel 9 év alatt a molibdén koncentráció profilja elérte megközelítően a 175 cm-es (160-190 cm-es) mélységet. Ez a folyamat tovább folytatódott a következő 5 évben is, amelynek következtében a feltalaj molibdén koncentrációja tovább csökkent, az összmolibdén koncentráció profilja pedig elérte a talaj 200-230 cm-es mélységét. Ezen túlmenően ebben az öt évben a 2000-ben tapasztalható 10-12 mg kg^{-1} -os koncentráció plató (45-115 cm között) tágulása figyelhető meg. 2005. évben már a 45-145 cm-es talaj mélységben volt kimutatható és az eltelt öt évben az összmolibdén nagysága sem változott jelentős mértékben a talajnak ebben a mélységében.

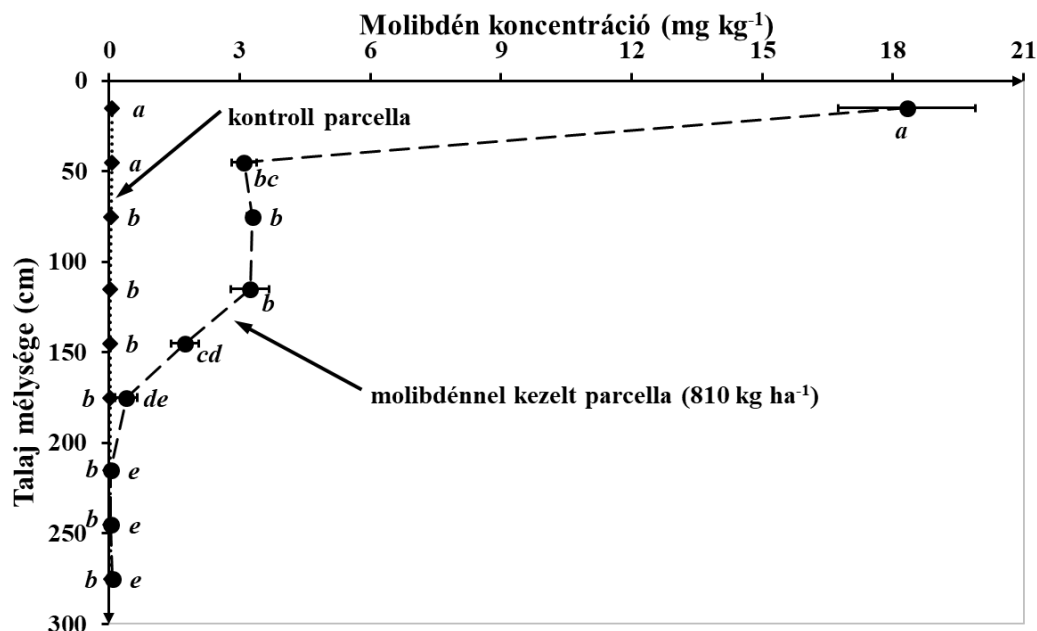


25. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban

Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

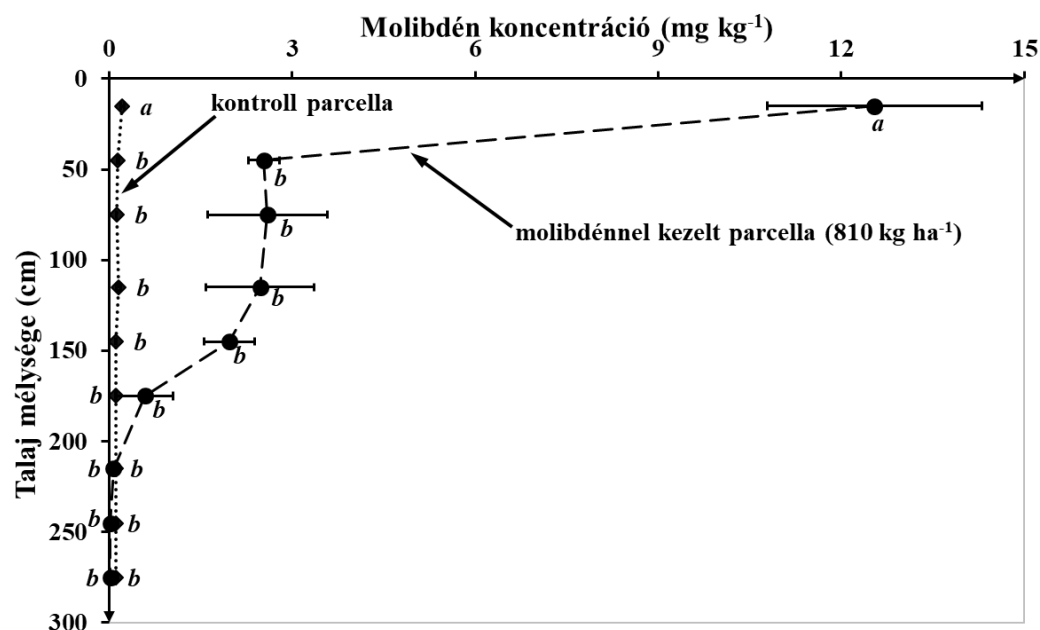
A Lakanen-Erviö-féle kivonatból mért molibdén tartalom tendenciája is hasonlóképpen alakult (25-27. ábrák) mint az összmolibdén tartalom (22-24. ábrák), annyi eltéréssel, hogy a növény számára hozzáférhető molibdén (LE oldható) tartalom nagysága minden egyes mérésnél kisebb értéket mutatott, mint amennyi az összmolibdén tartalom volt. Az 1993-as mintavétel 20-

40 cm-es mélységből vett talajmintájában közel 60%-a volt a felvehető molibdén a növény számára. A többi talajminta molibdén tartalmának a koncentrációjától függően sokkal kisebb mennyisége volt a növény számára hozzáférhető formában: az összes molibdénnek általában 10-35%-a volt kimutatható a Lakanen-Erviö-féle kivonatból, kivéve a 2005-ös 200 cm-nél mélyebb rétegekben található mintáknál, amelyeket a kontroll parcella molibdén tartalmához hasonlítva, kisebb mint 5%-a volt csak a növények számára felvehető formában (27. ábra).



26. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben

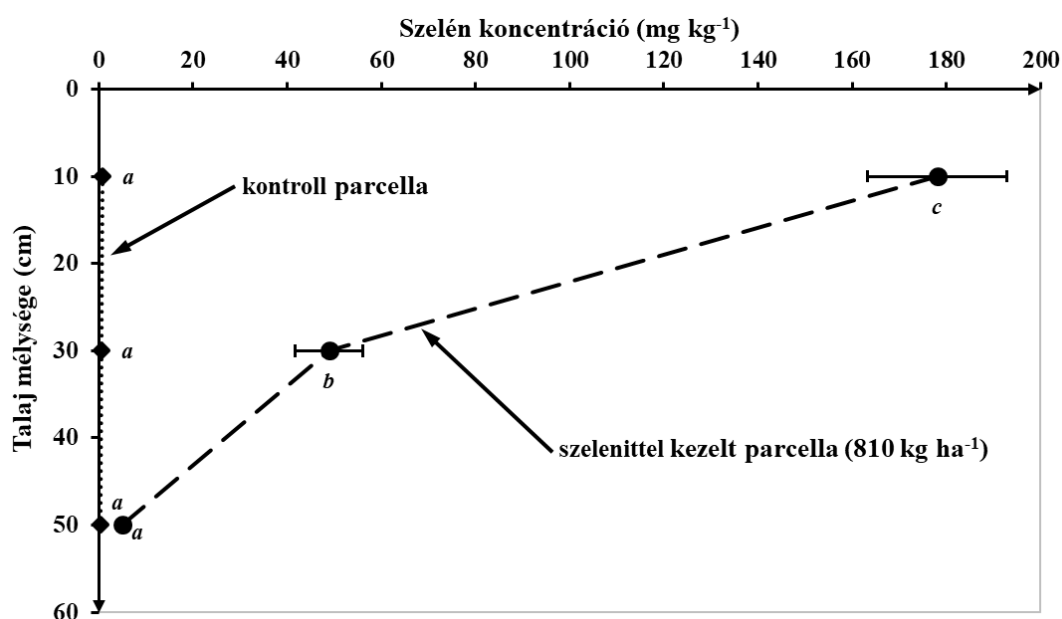
Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)



27. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható molibdén koncentráció a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben

Az egyes molibdén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)

A fentiekben részletezett, molibdénrel kezelt talajok vizsgálatához hasonlóan, a nagyhorcsöki elemterheléses kísérlet, szelénrel kezelt mélységi talajmintái mintavétele is 1993, 2000 és 2005 években történtek, mely talajminták összes szelén (28-30. ábrák), valamint Lakanen-Erviö oldható szelén tartalmát (31-33. ábrák) is megelemeztük. Ugyanezen mélységi talajmintákat 0,1 M NaOH oldattal is extraháltuk, majd a kapott extrakciós oldatokban meghatároztuk a szelenit és szelenát (szelén(IV) és szelén(VI)) koncentrációját. A vizsgálati értékekből kiszámoltam a talajra vonatkozó szelén(IV) és szelén(VI) mennyiségét (34., 36. és 38. ábrák). Mivel a talajmintákban csak a szerves formában lévő szelén (Se(IV) és Se(VI) specieszek) fordul elő meghatározható mennyiségben, így a szelenit és szelenát koncentrációjának összegét 100%-nak tekintve, kiszámoltam a talajban található relatív mennyiségüket (%-os arányukat) is (35., 37. és 39. ábrák).

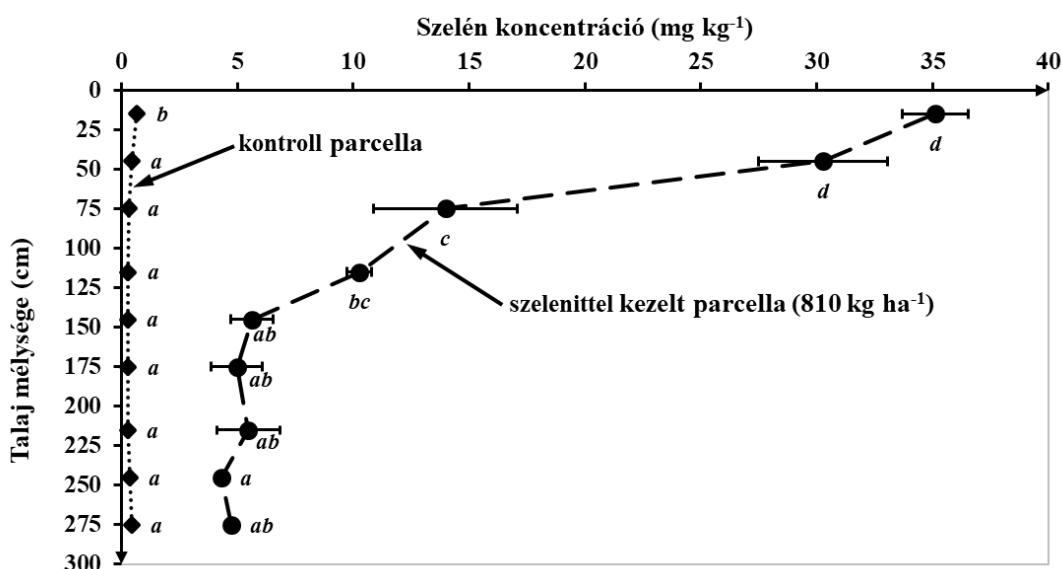


28. ábra: Szelén koncentráció (mg kg⁻¹) a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban. Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)

A mélységi talajmintavételek a kontroll és a 810 kg ha⁻¹-os maximális terhelésű parcellákból történtek, 1993-ban a talaj 0-20, 20-40 és 40-60 cm-es, 2000-ben a 0-30, 30-60, 60-90, 100-130, 130-160, 160-190, 200-230, 230-260, 260-290 cm-es rétegekből, míg a 2005-ös mintavételnél a 0-30, 30-60, 60-90, 100-130, 130-160, 160-190, 200-230, 230-260, 260-290, 300-330, 330-360, 360-390, 400-430, 430-460, 460-490, 500-530, 530-560, 560-590 cm mélységű talajrétegekből származnak a szelénrel kezelt parcellák mélységi talajmintái.

A 22. és a 28. ábrákon található molibdén és szelén eredmények összehasonlításával megállapíthatjuk, hogy két évvel a szántóföldi kísérlet beállítását követően (1993-ban) a kontroll és a 810 kg ha⁻¹ dózisú szelén kezelésű parcellák mélységi talajmintái összes szelén koncentrációja között is nagyon nagy koncentrációbeli különbségek adódtak, a szelén esetén viszont nem látszik olyan nagy intenzitású, a feltalajból a talaj mélyebb rétegei felé irányuló mobilitás, mint amelyet a molibdén esetén tapasztaltunk (22. ábra). Szűcs (1965) publikációja alapján a Nagyhorcsöki

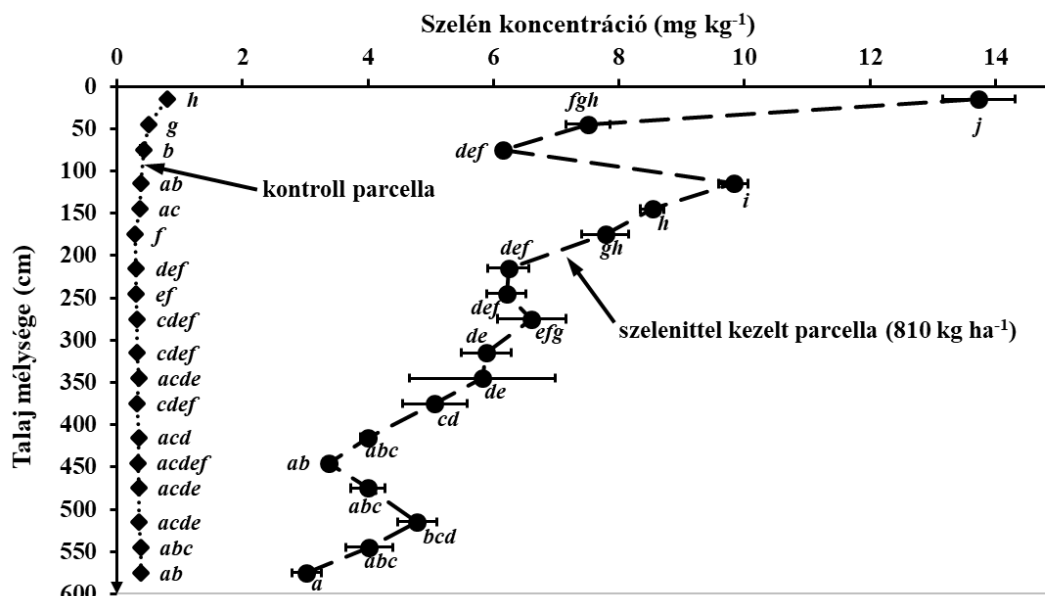
Kísérleti telep talaja 50-100 cm humuszréteggel rendelkezik, B-szintje 32-37 cm mélységtől kezdődik és 52-70 cm mélységben fejeződik be. A C-szintje 70-90 cm-től indul, a B- és C-talajsintek között pedig a BC átmeneti szint található. Ezen megállapítások figyelembevételével (Szűcs, 1965), valamint a mélységi talajok általunk kapott elemzési adatai alapján kijelenthetjük, hogy a szelén a kísérlet első két évében még a nagyobb adszorpciós kapacitású, sok szervesanyagot (2,8-3,6% humusz) tartalmazó morzsalékos szerkezetű, jó víz- és tápanyag-gazdálkodású humuszos szintben vándorolt, és nem érte el a 3. évben a C-szintet (70-90 cm-es réteget, ahol már csak megközelítően 1% a humusz mennyisége). A következő években tovább tartott a molibdén és a szelén vándorlása a talaj mélyebb rétegeibe. 2000-ben a molibdén lemosódás elérte a 160-190 cm-es, 2005-ben pedig a 230-260 cm-es réteget (23-24. ábrák). A szelénnél viszont ettől eltérő a szelén lemosódási profil, ugyanis az első 9 évben (1991-től 2000-ig) a 100-130 cm-es talajréteggel való intenzívebb szelén lemosódás utáni talajrétegekben (a 29. ábrán a 130-160 cm-es talajrétegtől kezdődően), egy megközelítően állandó 4,5-5,5 mg kg⁻¹ koncentrációjú szelén plató alakult ki.



29. ábra: Szelén koncentráció (mg kg⁻¹) a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben. Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag ± szórás, $n=2$)

A 29. és a 30. ábrák eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy mind a 2000-ben, mind a 2005-ben végzett mélységi talajmintavétel nem volt elegendő mélységű, ugyanis ezek a mintavételek nem biztosították, hogy elérjük a szelén kimosódási profil végét. A Nagyhörsöki Kísérleti telep mészlepedékes csernozjom típusú talajában, a 810 kg ha⁻¹ dózisú szelén kezelésű parcella esetén, a szelén kimosódás 2 év alatt megközelítően 60 cm volt, 9 év elteltével több mint 300 cm, míg 14 év alatt a szelén adagolás hatására, a szelén 600 cm-nél mélyebb rétegekbe volt képes vándorolni. Természetesen nagyon összetett multifaktoriális hatások eredőjeként kapjuk meg mind a molibdén, mind a szelén kimosódási profilját, de annyi mindenképpen megállapítható, hogy az első 2 évben nagyobb volt a molibdén kimosódási sebessége, mint a szeléné, viszont a további vizsgált időszakban ez megfordult, a molibdén vándorlási sebessége lelassult, a szeléné viszont megnőtt. Az is kijelenthető, hogy abban a talajrétegben volt a szelén lemosódás vándorlási

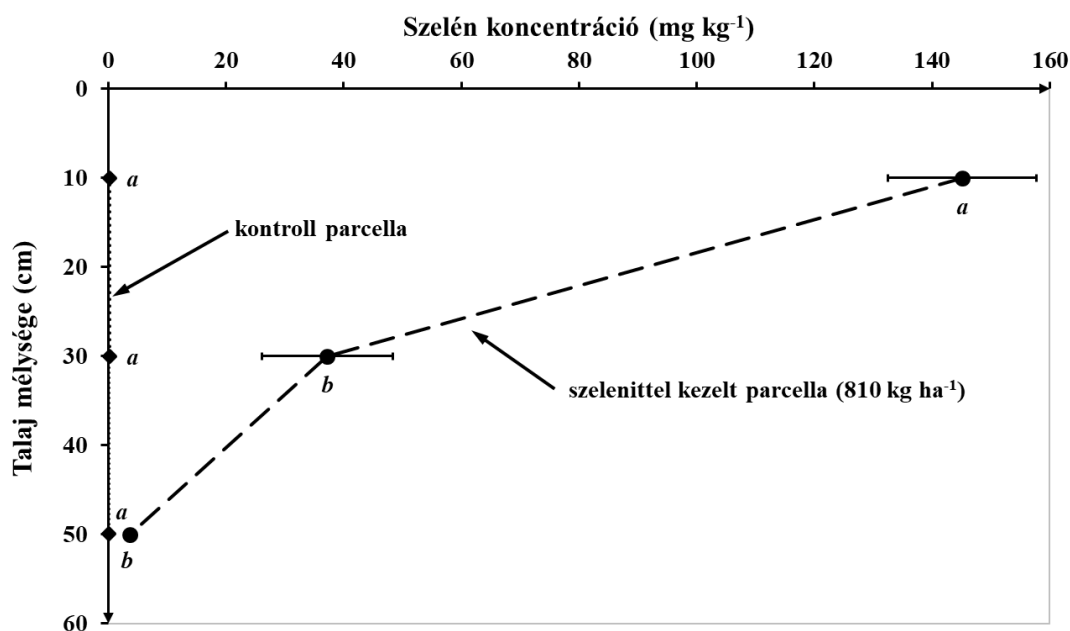
sebessége a kisebb, ahol kisebb volt a mész- és nagyobb a humusztartalom ($\text{CaCO}_3=6\text{-}20\%$, humusz=2-4%), és abban a C-talajsztintben, valamint az alatti talajrétegben volt gyorsabb a szelén kimosódás sebessége, ahol nagyobb mész- és kisebb humusztartalom ($\text{CaCO}_3=20\text{-}30\%$, humusz=0,5-1%) jellemezte a nagyhőrsöki talajt.



30. ábra: Szelén koncentráció (mg kg^{-1}) a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben. Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

A 810 kg ha^{-1} -os legnagyobb dózisu szelénrel kezelt parcellák mélységi talajmintái Lakanen-Erviö-féle extrakciójából mért szelén koncentrációk (31-33. ábrák) tendenciája többnyire hasonlóképpen alakult, mint az összes szelén tartalom (28-30. ábrák), viszont 2005. évben a felső 60 cm-es talajrétegben lévő két talajmintánál alacsony volt a Lakanen-Erviö-féle extrakció hatásfoka. 0-30 cm-nél csupán 25%, míg a 30-60 cm mélységű talajrétegben 54%-os extrakciós hatásfokot tapasztaltunk. Az eredmények alapján azt a feltételezést tehetjük, hogy ennek az alacsony extrakciós hatásfoknak a kialakulásához döntő módon legalább három tényező járulhatott hozzá: 1) egyrészt a feltalaj 1991. évi, azaz a kísérlet kezdetén beállított 810 kg ha^{-1} -os (270 mg kg^{-1} -os) dózisu parcella összes szelén tartalma, főként a kimosódás következtében, meglehetősen lecsökkent (a 0-30 és a 30-60 cm-es mélységekben $13,7 \text{ mg kg}^{-1}$ és $7,51 \text{ mg kg}^{-1}$), 2) a talajszelvény azon részében tapasztaltuk ezt a jelenséget, ahol a szervesanyag-tartalom is magasabb értéket mutatott (Szűcs, 1965), amely nagyobb szelén adszorpciós kapacitást eredményezett, 3) végezetül az is kijelenthető, hogy ennek kialakulásához viszonylag hosszabb, jelen esetben 14 év időtartam állt rendelkezésre. A kísérlet első 9 éve után viszont, még nem tapasztaltunk ennyire alacsony extrakciós hatásfokot. A kísérlet 10. évében (azaz 9 évvel később) a legnagyobb dózisu parcella felső 60 cm-ében az összes szelén tartalom megközelítően 68%-a volt a növény számára hozzáférhető formában (Lakanen-Erviö oldható). A fentiekben említett kivételeken kívül, az összes mintavételi évet és az összes vizsgált talajréteget tekintve, az összes szelén tartalom nagyobb mint 74%-a került a Lakanen-Erviö-féle extrakcióval oldható állapotba.

Nemcsak a 810 kg ha⁻¹-os legnagyobb dózisu parcella mélységi talajrétegei mintavétele történt meg, a kezeletlen parcellák mélységi talajmintái összes szelén (28-30. ábrák) és Lakanen-Erviö-féle oldható szelén tartalmát is megmeleztük (31-33. ábrák). Mivel a kezeletlen parcellák szelén tartalma jelentősen nem változott sem az évek között, sem a talajmélység függvényében, ezért a következő általános megállapítás tehető: a kezeletlen parcellák mélységi talajmintái összes szelén tartalmának átlaga 0,408±0,151 mg kg⁻¹ volt, a Lakanen-Erviö-féle oldható szelén tartalmak átlaga pedig 0,282±0,058 mg kg⁻¹. Ezen átlagos mérési adatok figyelembevételével számítható, hogy a szelén dózist nem kapott talajok esetén az átlagos extrakciós hatásfok 69,1%-os volt, míg az egyes talajminták mérési adatai összehasonlításával egyenként nagyobb mint 30%-os extrakciós hatásfok adódott.

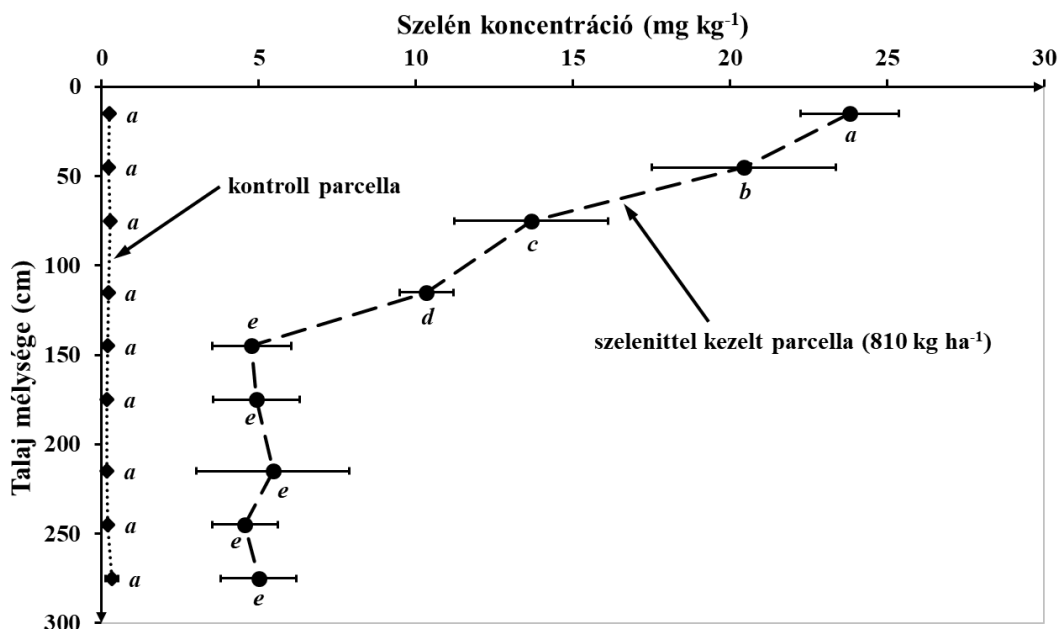


31. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható szelén koncentráció (mg kg⁻¹) a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban

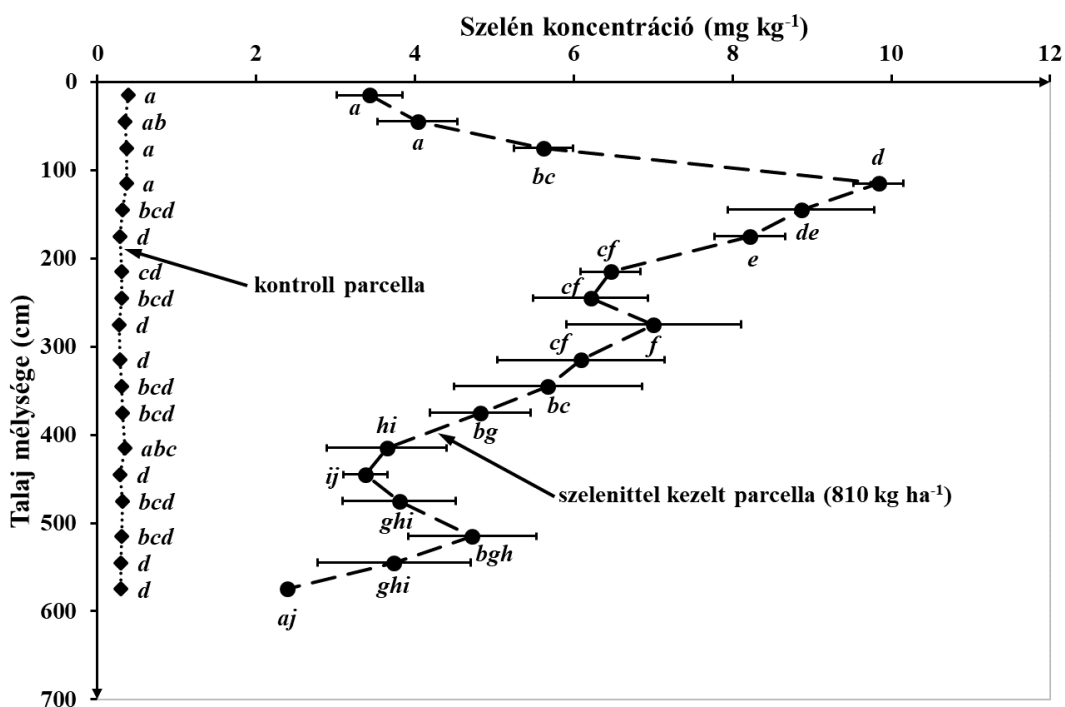
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)

A Nagyhörsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet szelennel kezelt parcellái feltalaj mintái elemzésénél nemcsak összes szelén tartalmát, valamint Lakanen-Erviö oldható szelén tartalmát vizsgáltam, hanem 0,1 M NaOH oldható szelén tartalmát is. Erre azért volt szükség, mivel a 0,1 M NaOH extrakciót követően lehetőségünk volt a talajmintákban található szelén formák koncentrációjának az analízisére. A talajminták extrakciójához azért a 0,1 M NaOH oldatot alkalmaztuk, mert az ismert típusú extraháló oldatok közül egyrészt a talajmintákban előforduló szelén formák koncentrációjának a meghatározásához ez megfelelőnek bizonyult a rendelkezésünkre álló kapcsolt analitikai rendszer segítségével, másrészt az egyik legnagyobb mértékű kioldási hatékonyságot is a 0,1 M NaOH oldat biztosítja számunkra (Stanciu-Burileanu et al., 2015; Tolu et al., 2010). A mélységi talajminták 0,1 M NaOH oldattal végzett extrakcióját követően, szelén speciációs mérési módszer alkalmazásával határoztuk meg a szelén(IV) és szelén(VI) koncentrációkat. A talaj mélysége függvényében a szelén(IV) (szelenit)

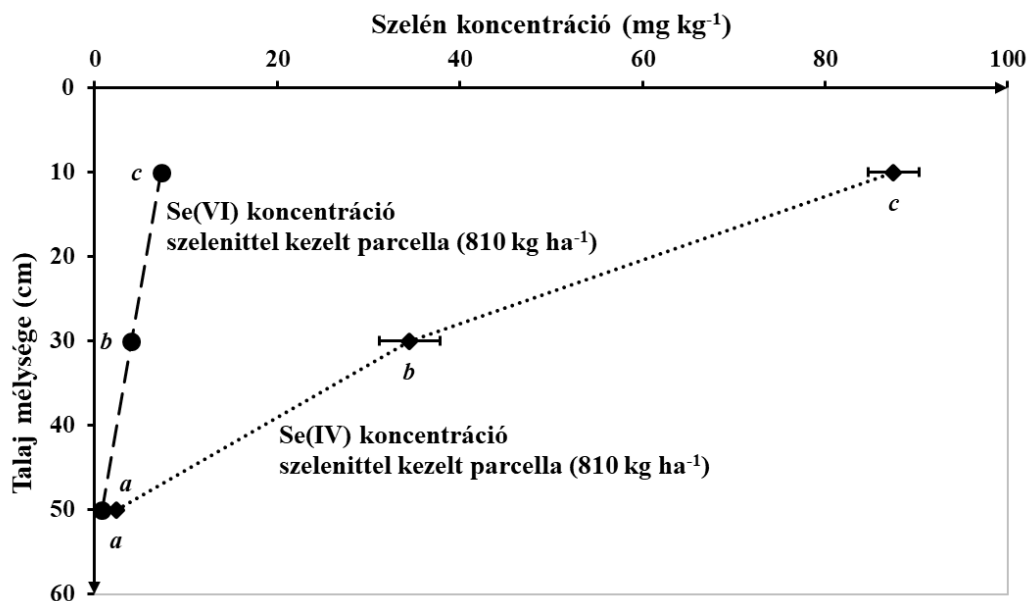
és a szelén(VI) (szelenát) koncentrációkat a 34., 36. és 38. ábrákon ábrázoltam, valamint a szelenit és szelenát specieszekben lévő szelén koncentrációk összegét 100%-nak feltételezve, kiszámoltam ezen szelének (szelén(IV) és szelén(VI)) százalékos megoszlását. A százalékos arányok kiszámolásából kapott értékeket a 35., 37. és 39. ábrákon mutatom be.



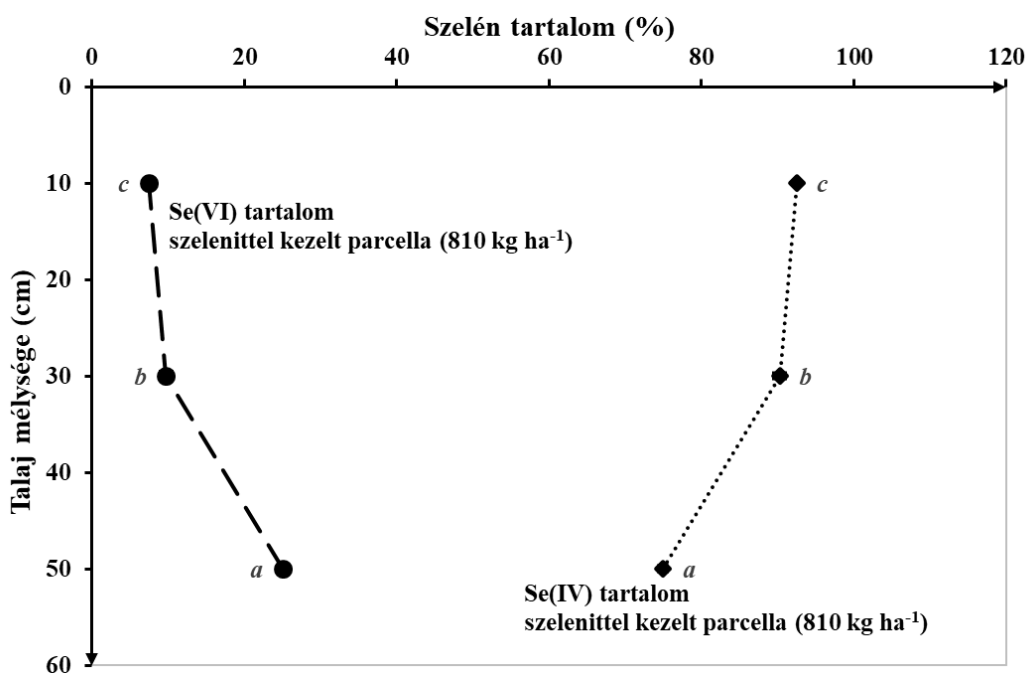
32. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható szelén koncentráció (mg kg^{-1}) a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



33. ábra: Lakanen-Erviö-féle kivonat által oldható szelén koncentráció (mg kg^{-1}) a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



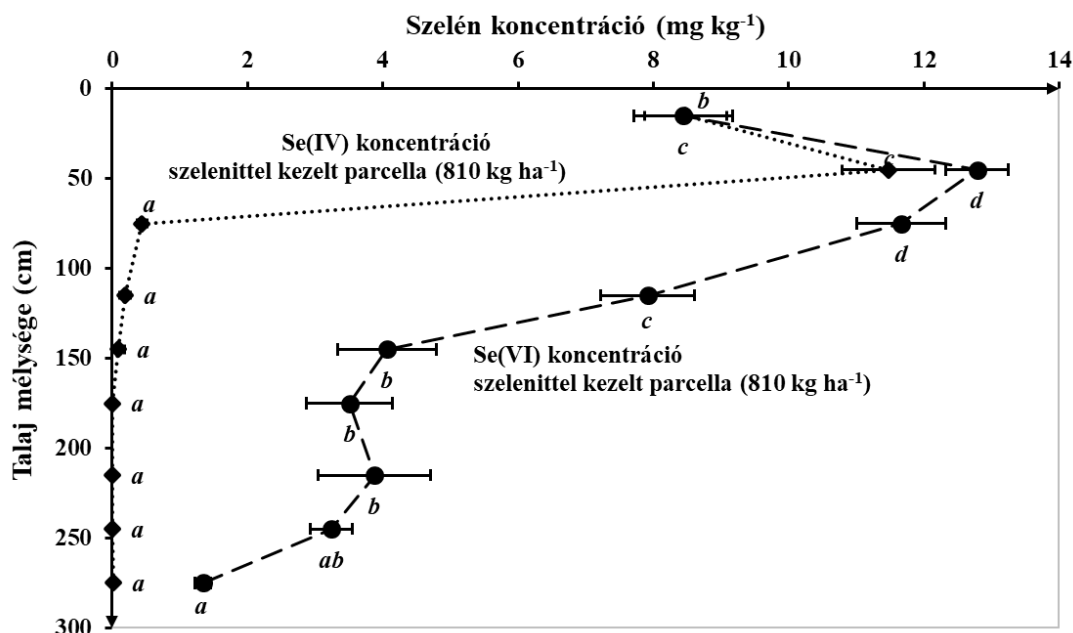
34. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) koncentráció (mg kg⁻¹) a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



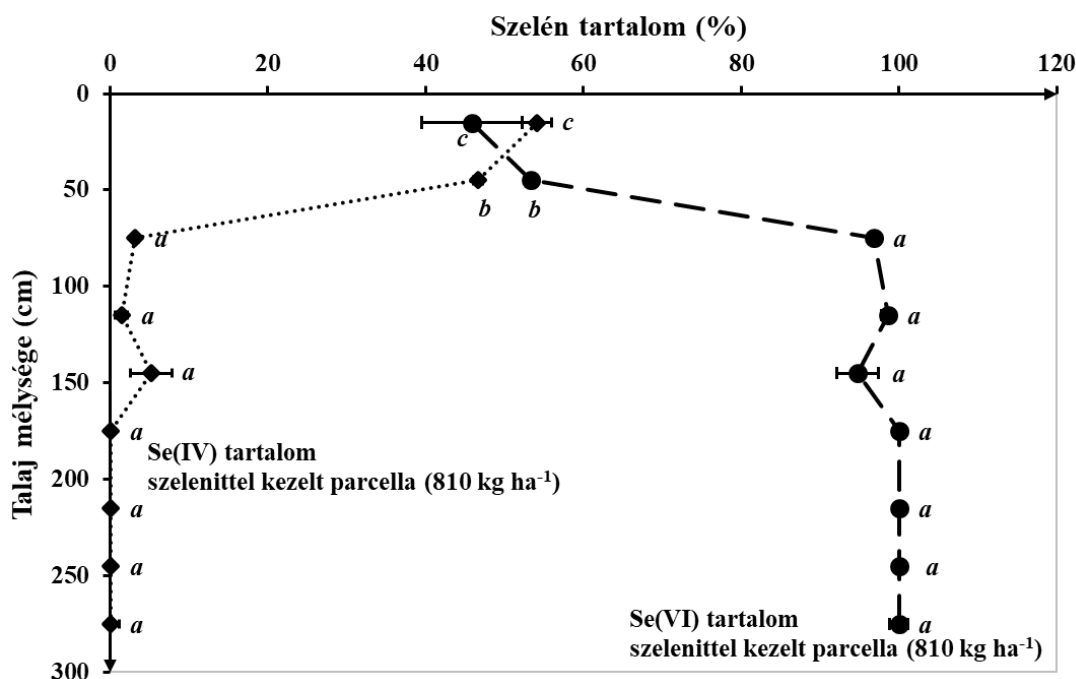
35. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) tartalom (%) a talajszelvény mélysége függvényében 1993-ban
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

Mivel az egyes mintavételi években vett talajminták mélységei (60 cm, 300 cm és 600 cm) között jelentősek az eltérések, ezért nem lehetséges a különböző mintavételi éveket összehasonlítani a mélységi talajmintákból kioldódó szelén mennyisége alapján, viszont minden további megjegyzés/értékelés nélkül kijelenthető, hogy az egyes extrakciós hatásfokokat átlagolva, 1993-ban a 0,1 M NaOH oldattal végzett extrakció az összes szelén 65%-át volt képes

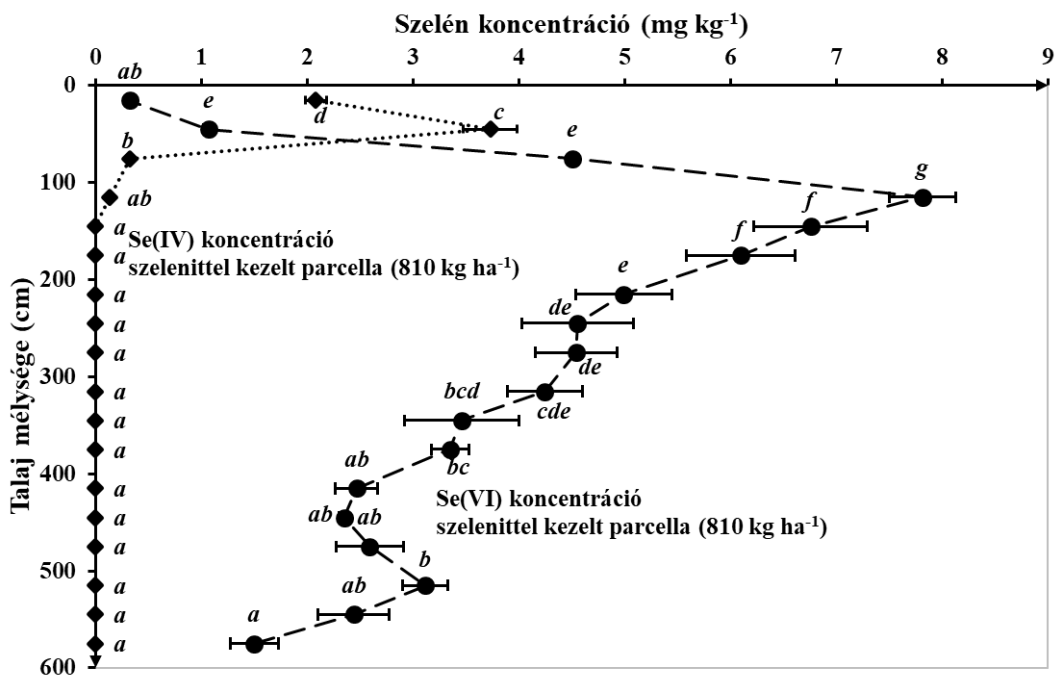
mobilizálni, 2000-ben az 58%-át, 2005-ben pedig az 59%-át. Hasonló összehasonlításban, ha a 0,1 M NaOH oldattal végzett extrakciót nem az összes szelén tartalmához, hanem a Lakanen-Erviö oldható szelén tartalomhoz viszonyítjuk: 1993-ban 85%, 2000-ben 76%, míg 2005-ben 73% értékeknek adódott. Ezen adatok is azt támasztják alá, hogy a 0,1 M NaOH extrakció viszonylag nagy mértékű kioldási hatékonyságot biztosít, szelén specicszek vizsgálata esetén.



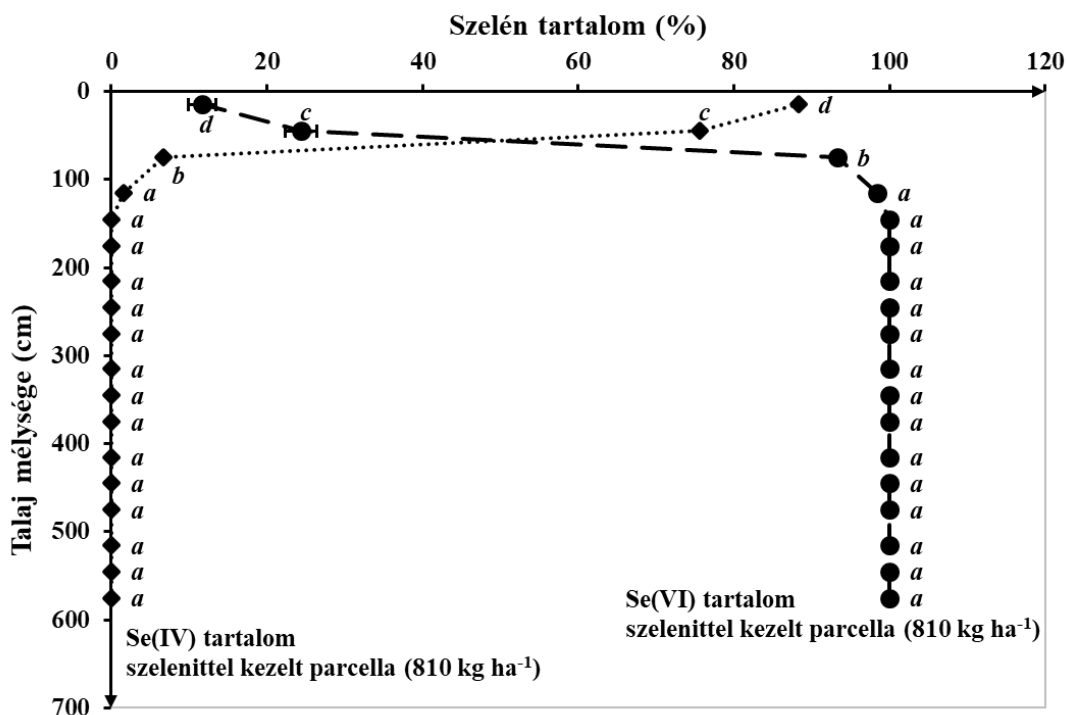
36. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) koncentráció (mg kg^{-1}) a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



37. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) tartalom (%) a talajszelvény mélysége függvényében 2000-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



38. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) koncentráció (mg kg^{-1}) a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)



39. ábra: 0,1 M NaOH által oldható szelén(IV) (szelenit) és szelén(VI) (szelenát) tartalom (%) a talajszelvény mélysége függvényében 2005-ben
Az egyes szelén kezeléseken belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

A több mint 20 évvel ezelőtt, a Kádár Imrével való megbeszélés során a következő tudományos problémafelvetés adódott: az 1991-ben a Nagyhorcsöki Kísérleti telepen beállított

szabadföldi kísérlet nagyobb adagú szelénnel kezelt parcelláin az évek múlásával egyre jelentősebb hatásokat lehetett tapasztalni, amely jelentősebb hatások egészen 2000-ig, azaz 10 éven keresztül voltak tapasztalhatók. 2000-ben a Nagyhörcsöki telepen kísérleti növényként őszi árpát használtak. A 90 és a 270 mg kg⁻¹ (270 és 810 kg ha⁻¹) szelén adagokkal kezelt parcellákon nemcsak az őszi árpa, de még a gyomnövényzet teljes pusztulása is bekövetkezett, mely a Mellékletekben található 20. fotón vizuálisan is jól látható. Többek között ennek értelmezésére dolgoztunk ki mintaelőkészítő és mérő módszereket, valamint állítottuk be a fentiekben is részletezett tápoldatban, rizoboxban, továbbá tenyésztedényben, szelén adagolásával kivitelezett kísérleteinket.

Kádár (2012) publikációja részletekbe menően mutatja be a Nagyhörcsöki Kísérleti telep talajának mind fizikai, mind kémiai paramétereit, melyben megtalálható, hogy az ott lévő talaj szántott rétegének a pH-ja: pH(H₂O)=7,6-8,0; pH(CaCl₂)=7,2-7,5; pH(KCl)=7,2-7,8.

Az azóta megjelent cikkekben (Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Szteke, 2015) is megtalálható, hogy a savanyú talajokban a szelén inkább Se(IV) oxidációs állapotban fordul elő, míg bázikus talajokban a szelén Se(VI) oxidációs állapotban található. A szelenátok [Se(VI)] mobilisak, különösen közel semleges és lúgos kémhatású talajokban. Mivel a nagyhörcsöki talaj a fenti pH értékek miatt bázikus talaj, így a szelenát tartalom az 1993-ban megvizsgált mélységi talajminta feltalajában (0-30 cm) 7,27 mg kg⁻¹ (34. ábra), azaz megközelítően 7,5% (35. ábra) volt, amely megfelel a fentiekben említett ismeretanyagoknak. Továbbá Szücs (1965) vizsgálatai alapján a Nagyhörcsöki Kísérleti Telep egyik talajszelvényének a feltalaja 8,0 pH értéket (H₂O) mutat, míg a 90-130 cm-es mélységben már ugyanez 8,6. Valószínűleg ez vezethetett oda, hogy a kísérlet első két évében a nagyobb mélységek felé egyre növekedett a szelenát %-os aránya (35. ábra).

A nagyhörcsöki kísérlet következő 7 évében (36-37. ábrák) tovább folytatódott ez a folyamat, azaz a szelenit is kissé lemosódott a mélyebb rétegek felé, de két fő körülmény jellemezte a szelén koncentrációk alakulását: 1.) a lúgos talaj-pH-n a szelenit átalakult szelenáttá, 2.) mivel a szelenát a bázikus talajokban rendkívül mobilis, így egyre inkább kimosódott a talaj mélyebb rétegei felé. A 2000-ben vett mélységi talajminták feltalajában (0-30 cm) megközelítően 8,5 mg kg⁻¹ volt mind a szelenit, mind a szelenát mennyisége (36. ábra), amely ennek megfelelően 50-50%-nak felelt meg (37. ábra). A következő talajréteg (30-60 cm) szelenit és szelenát tartalma egyaránt szignifikánsan nagyobb mint amit a feltalajban mértünk, a szelenit és szelenát mennyiségének aránya viszont megközelíti az 50-50%-ot (37. ábra). A továbbiakban viszont már rendkívül nagy a különbség a szelenit és a szelenát mennyisége között. A 30-60 cm-es mélységben uralkodó szelenit tartalomhoz képest a következő szintben (60-90 cm) már csak megközelítően 25-öd mennyiség, azaz 0,438 mg kg⁻¹ szelenit található (kb. 3%), amely a következő két szintben lecsökken a mérés kimutatási határa alá (36. ábra). A szelenit mennyisége azért „tűnik el”, mert a kísérlet kezdetén adagolt szelenit [Se(IV)] nagyrészt átalakult szelenáttá [Se(VI)], amely aztán elkezdett lemosódni a mélyebben fekvő talajrétegek irányába. Ennek megfelelően a szelenát mennyisége a 30-60 cm-es mélységben még 12,8 mg kg⁻¹, majd a lemosódás és a folyamatos

vándorlás miatt szignifikáns csökkenés jellemzi a 130-160 cm-es mélységig, ahol egy szelenát plató tapasztalható 3 talajmélységnél (130-230 cm), majd ismételt szelenát koncentráció csökkenés figyelhető meg. A kísérlet 9 éve alatt olyan nagymértékű szelenát lemosódás volt megfigyelhető, hogy a 3 m mélységű talajmintavétellel nem értük el a lemosódás végét.

A következő öt évben ugyanez a folyamat látható azzal a különbséggel, hogy a szelenit egy része a feltalajban megközelítően $2,1 \text{ mg kg}^{-1}$, a 30-60 cm-es mélységben viszont majdnem 4 mg kg^{-1} ($3,73 \text{ mg kg}^{-1}$) adszorbeálódott a kristályvizet tartalmazó szeszkvioxidokhoz és a szervesanyagokhoz (Kabata-Pendias, 2011; Kabata-Pendias és Szteke, 2015). A folyamatos szelenát lemosódás következtében a legnagyobb szelenát tartalom (szelenát-csúcs) a talaj mélyebb rétegeibe tolódott (100-130 cm), majd szelenát tartalom csökkenés figyelhető meg a talaj mélyebb rétegeiben. 500 és 530 cm között egy lokális minimum figyelhető meg, amely után tovább folytatódik a szelenát mennyiségének csökkenése. Itt is ugyanaz fogalmazható meg, mint a 2000. évben végzett mélységi talajminta vételezésnél: olyan további nagymértékű szelenát lemosódás volt megfigyelhető, hogy a 6 m-es mélységű talajmintavétel nem volt elegendő mélységű ahhoz, hogy elérjük a szelenát lemosódás végét (38. ábra). A 39. ábrán látható, hogy a két felső talajmintában még a szelenit van nagyobb mennyiségben (88,3 és 75,6%). A következő talajrétegben viszont megfordult a helyzet, már a szelenát volt nagyobb mennyiségben (93,2%), amely a továbbiakban csak további növekedést produkált, egészen 100%-ig.

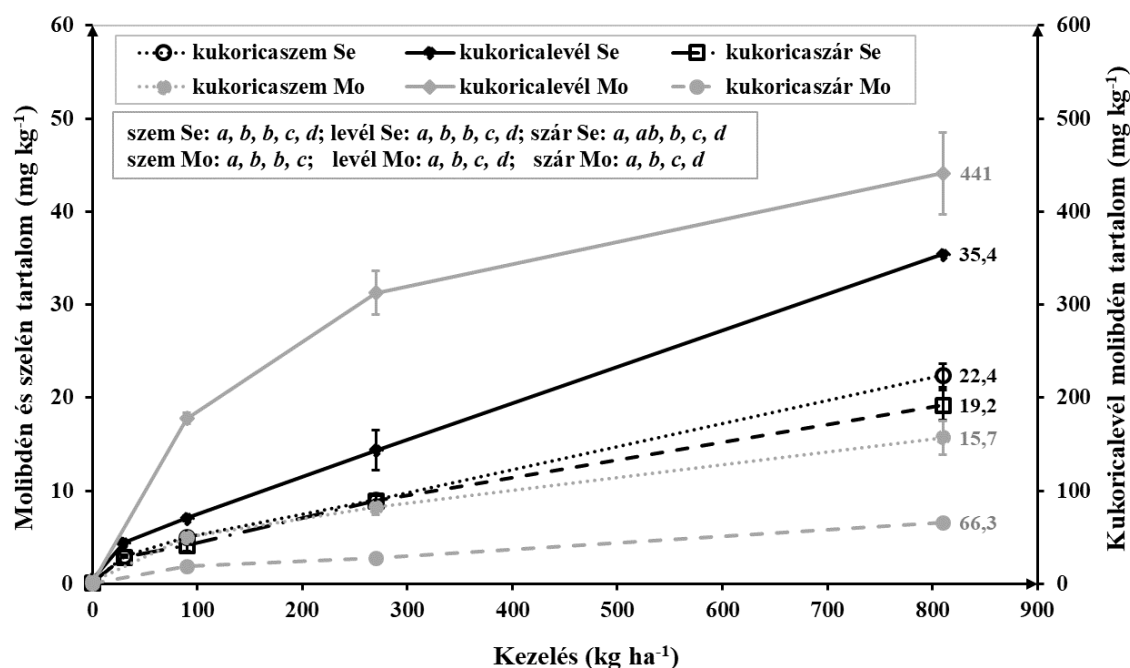
A fenti okok vezettek oda, hogy az 1991-ben a Nagyhörcsöki Kísérleti telepen beállított szabadföldi kísérlet nagyobb adagú szelénnel kezelt parcelláin az évek múlásával egyre jelentősebb hatásokat lehetett tapasztalni, ugyanis egyre inkább nőtt a szelenát mennyisége a szántott rétegben, egyre nagyobb növényi pusztulást eredményezve. 2000-ben a Nagyhörcsöki kísérleti telep 90 és 270 mg kg^{-1} szelén adagú parcelláin a jelentős mértékű toxikus hatás az őszi árpa teljes pusztulását eredményezte (Melléklet 20. fotó). A 10 éven keresztül tapasztalt toxikus hatás 2000 után viszont elkezdett csökkenni. A következő évben, 2001-ben repcét használtak kísérleti növényként, amelynél a föld feletti biomassza a maximális 810 kg ha^{-1} , azaz maximális szelén-terhelésnél 92%-os csökkenés volt megfigyelhető (gyakorlatilag a gyomnövényzettel együtt kipusztult) (Kádár, 2012). Ismételten egy év elteltével 2002-ben mákot alkalmazva kísérleti növényként, a maximális adagú szelén parcellán már csak felére esett a mag és a tok hozama, a kontroll parcella termésmennyiségéhez viszonyítva (Kádár, 2012). Ezek a tények is azt támasztják alá, hogy a kísérleti talaj felső rétegeiben a szelenát lemosódás következtében tovább tartott a szelén mennyiségének a csökkenése, amely oda vezetett el, hogy 2005-ben már 100 cm alatt volt a legnagyobb szelenát koncentrációt tartalmazó talajréteg (38. ábra).

5.4.2. Nagyhörcsöki szabadföldi kísérletből származó növényminták vizsgálata

5.4.2.1. A kukoricakísérlet

A fentiekben a molibdén és szelén felvételével kapcsolatos tápoldatban, rizoboxban és tenyészedényben elvégzett vizsgálatok eredményeit mutattam be. Ezekon kívül a HUN-REN ATK Talajtani Intézet (TAKI) Nagyhörcsöki Kísérleti telepén beállított szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet növénymintái közül, a még elérhető kukorica-, borsó- és napraforgóminták vizsgálatát is elvégeztem. Ebben az alfejezetben a kukoricalevél, -szár és -szem minták analitikai eredményeit mutatom be.

A kukoricalevél minták mintavétele 1991. augusztus 8-án, a kukorica virágzása idején történt. Nettó parcellánként 20-20 db cső alatti levelet gyűjtöttek össze. A kísérleti telepen beállított 13 elemből igazolható termés-csökkenést négy elem okozott, a molibdén, a szelén, a króm, valamint az ólom. Kádár (2012) vizsgálatai alapján ezen elemek közül, a legnagyobb dózisu molibdén és szelén kezelés, a kontrol parcellához képest, megközelítően 40-50%-os termés-csökkenést okozott. A kukoricaszem- és -szár minták mintavételét a kukorica betakarításakor, azaz 1991. november 25-én végezték, amely során nettó parcellánként 20-20 csöves szármintát vettek, majd a teljes magtermést parcellakombájn segítségével aratták le (Kádár, 2012). A kukorica virágzása idején vett levélminták, valamint a kukorica betakarításakor begyűjtött kukoricaszem- és -szár minták molibdén és szelén tartalmát a 40. ábrán láthatjuk.



40. ábra: A kukoricaszem, -levél és -szár molibdén és szelén tartalma (mg kg⁻¹) a nagyhörcsöki talaj molibdén és szelén kezelésének függvényében, 1991-ben

Az egyes növényi részekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)

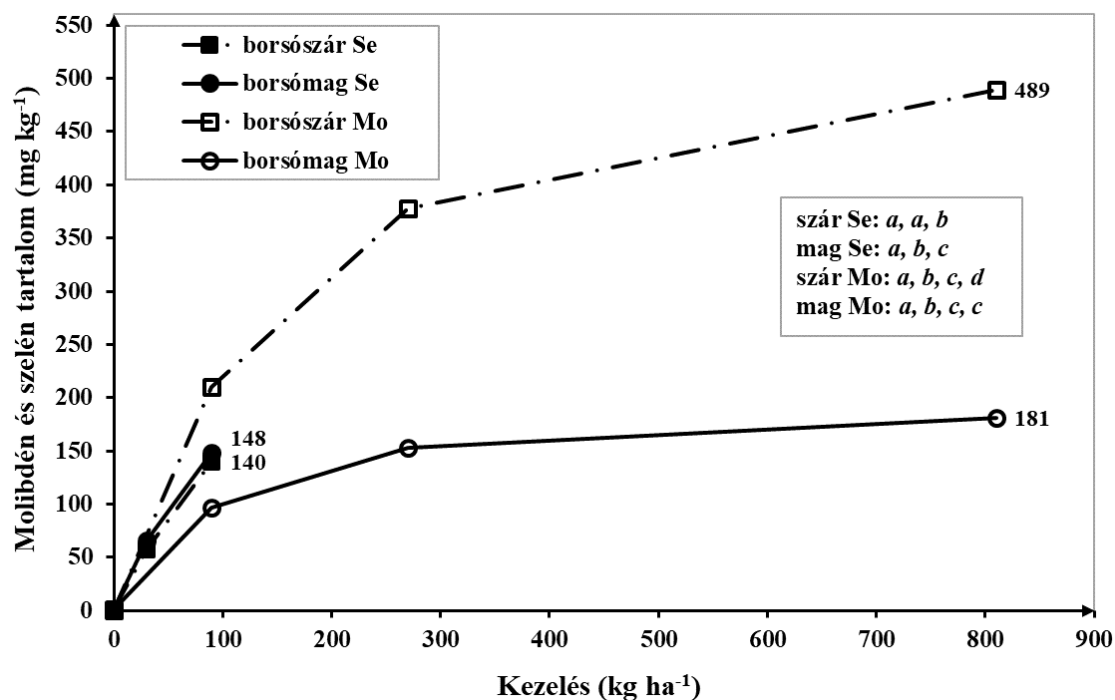
A mérési adataim alapján látható (40. ábra), hogy a provokatív dózisok eredményeként, mind a molibdén, mind a szelén tartalmak monoton növekedése tapasztalható a kukorica vizsgált növényi részeiben, mely kevés kivételtől eltekintve többnyire szignifikáns molibdén és szelén

tartalom növekedést is jelentett. A legnagyobb dózisu kezeléseket (810 kg ha^{-1}) jelentős mértékű dúsulást mutattak a kontrollhoz képest. A molibdén kezelésnél a kukoricalevélben tapasztaltam a legnagyobb, azaz 700-szoros dúsulást, a szárban megközelítően 300-szoros, míg a szemben csupán 60-szoros molibdén tartalom növekedést mértem. Egy lehetséges szelén szennyezést feltételezve, a kontroll talajon termesztett kukorica szelén tartalmához viszonyítva, a 810 kg ha^{-1} dózisu kukoricaszem jelentős, több mint két nagyságrendű (140-szeres) akkumulációt, míg a kukoricalevélnél 80-szoros, a szárnál pedig éppen 100-szoros szelén tartalom növekedést eredményezett. Mivel mind a molibdén, mind a szelén esszenciális elemek így megállapíthatjuk, hogy a kukoricaszem genetikailag nem védett a káros molibdén-, vagy szelén felvétellel szemben. Ezen értékek alapján megállapítható, hogy a kukorica vegetatív részeibe irányuló szelén felvételhez viszonyítva, a molibdén mobilitás megközelítően egy nagyságrenddel (közel kilencszer), a szárhoz pedig háromszor volt intenzívebb. A kukorica generatív részénél (a szemnél) viszont fordított volt a helyzet, azaz a szelén mobilitás megközelítően kétszer volt intenzívebb a kukoricaszembe, mint amit a molibdén felvételénél tapasztaltam.

Amennyiben megfogalmazzuk azt a kérdést, hogy a kukorica képes-e a molibdénnel vagy a szelénnel szennyezett talajok tisztítására, fitoremediációjára, akkor a fenti elemtartalmi eredmények, valamint a kukoricára vonatkozó, Kádár (2012) által közölt termésmennyiségek (száraz tömegek) felhasználásával meghatározhatjuk annak szükséges időtartamát. A számolási eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy az egyes növényi részek akkumulációs képessége eltérő, és a kísérletre alkalmazott nagyhorcsöki meszes talajon előidézett molibdén és szelén szennyezés megtisztításához legalább ezer, vagy akár több ezer évre is szükség lenne, ha kukoricát használnánk erre a célra. Ez azt jelenti, hogy a molibdénnel és/vagy a szelénnel szennyezett talajok talajtisztítását csak a sokkal kevésbé szennyezett területeken lehet kivitelezni kukorica használatával.

5.4.2.2. A borsókísérlet

1994-ben az Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani és Agrokémiai Intézete (ATK TAKI) Nagyhorcsöki Kísérleti telepén beállított szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet növénymintájaként a borsót választották ki. A borsóminták mintavételét 1994. július 18-án, a borsó betakarításakor (szárazborsóként) végezték el (Kádár, 1995, 2012). A borsónövénynek a mag és a szár növényi részei vizsgálatára nyílt lehetőségem. A betakarított borsómag- és -szár minták molibdén és szelén tartalmát a 41. ábrán mutatom be. Mint ahogyan azt már az 5.4.1.2. alfejezetben is említettem, a Nagyhorcsöki szabadföldi kisparcellás mikroelem-terhelési kísérlet 1991-es bevezetését követően eleinte egyre nagyobb mértékben növekedett a szelénnel terhelt két legnagyobb dózisu (a 90 és a 270 mg kg^{-1} , azaz a 270 és 810 kg ha^{-1} szelén adagú) parcelláknál a kísérleti növények termésesökkenése. Mivel ezen a két parcellán olyan mértékű volt a termésesökkenés, hogy a kis mennyiségű szár mintából nekem már nem jutott, borsómag minta viszont nem is állt rendelkezésre, így ennek következtében ezek vizsgálatára nem nyílt lehetőségem.



41. ábra: A borsómag és szár molibdén és szelén tartalma (mg kg^{-1}) a nagyhorcsöki talaj molibdén és szelén kezelésének függvényében, 1994-ben
Az egyes növényi részekben belül a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag \pm szórás, $n=2$)

A fentiek figyelembevételével a rendelkezésre álló analitikai eredményeim alapján megállapítható (41. ábra), hogy a dózisok nagyságának növelésével a molibdén és a szelén tartalmak egyaránt monoton növekedtek, mind a borsómag, mind a borsószár mintákban. Ezek a változások a borsónövénynél is (a kukoricához hasonlóan), kevés kivételtől eltekintve, többnyire szignifikáns molibdén és szelén tartalom növekedéseket eredményeztek. A vizsgált legnagyobb dózisú kezelések (a szelénnél a 90 kg ha^{-1} , míg a molibdénnél a 810 kg ha^{-1} adagú kezelések) az adott kontroll mintákhoz képest jelentős mértékű dúsulást mutattak. A molibdén kezelésnél a borsószárban megközelítően háromszor akkora koncentráció értéket mértem, mint a borsómagban. A szelénrel kezelt parcellákon termesztett borsómag és -szár mintái szelén tartalmában viszont nem tapasztaltam jelentős eltérést. Ez alapján megállapíthatjuk, hogy a szelén felvétel intenzitása hasonló nagyságú volt a borsószárban, mint a -magban.

A tenyészedényben és a szántóföldön a borsó molibdén felvételével kapcsolatos eredményeink összehasonlítása alapján nagyobb biztonságú megállapítás csak a koncentrációarányok alapján tehető, a növényi részek abszolút értékének összehasonlítása viszont kevésbé lehetséges. Míg a tenyészedényben termesztett borsószárban megközelítően 2,1-4,4-szer nagyobb molibdén értékeket mértünk, mint a mag mintákban, addig a Nagyhorcsökön termesztett borsónál ugyanezen arányok 2,2-2,7 értéket mutattak. A szelénes kezelések esetén már nem lehet ilyen egyszerű összehasonlítást tennünk, aminek az az oka, hogy a tenyészedényben szelénit és szelénát kezelést is alkalmaztunk, míg a nagyhorcsöki talajban eredetileg csak szelénit adagolás történt, de mint ahogyan már a fentiekben is részleteztem, a kísérlet kezdete óta eltelt időintervallumban számos egyéb változás is történt (pl. a szelén lemosódása a talajban, a szelénit

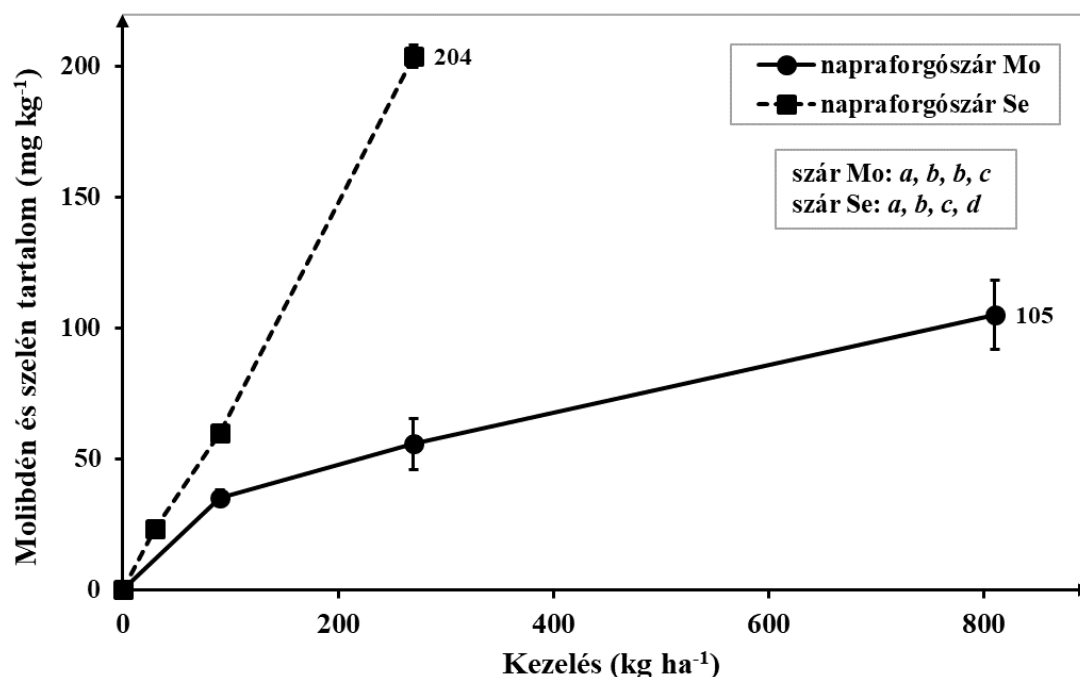
egy részének átalakulása szelenáttá stb.). A fentiekben már látható volt, hogy a nagyhőrcsöki borsószár- és -mag minták hasonló szelén koncentrációkat tartalmaztak, tehát azok aránya ezáltal megközelítően egy volt. Abban az esetben viszont, amikor a tenyészvényben szelenit kezelést alkalmaztunk, akkor a szárban és a magban mért szelén koncentrációk aránya a szelenit dózisos növelésével 1,38-ról folyamatosan 0,16 értékre csökkent. Mivel a szelenát adagolásánál csak a legkisebb dózisonál kaptunk magtermést, így csak egy koncentrációarányt lehet kiszámolni, amely 4,14-nek adódott. Ezek a tények azt jelentik, hogy a szelén felvétel intenzitása szelenit formájában, kevésbé irányul a borsómagba, mintha ugyanezt szelenáttal végezzük. A molibdén és szelén abszolút koncentrációinak az összehasonlítása viszont azért nem tehető meg megfelelő alapossággal, mivel 1.) 1994-ben, a nagyhőrcsöki feltalajban már csak a 43-61%-a volt megtalálható, mint amennyi molibdén adagolását eredetileg végezték 1991-ben, szelénből pedig ugyanez az érték 46-62%-nak adódott. 2.) A borsónövény gyökérrendszere orsó alakú főgyökérből és elágazó oldalgyökerekből áll, amely gyökérzet a talajba 60-100 cm-ig hatol le. A borsó gyökerének 80-90 %-a a művelt rétegben helyezkedik el (Antal et al., 2005, 2007). A 22. és 23. ábrák, valamint az előbbi mondatok alapján látható, hogy a borsónövény részére nem csak hogy relatíve kisebb molibdén koncentrációk állnak rendelkezésre, hanem a gyökér nem minden szintjén ugyanannak a molibdén koncentrációnak a felvételével kell számolnunk. 3.) Természetesen még egyéb talajparaméterek változása is jelentősen befolyásolhatja a felvett molibdén abszolút mennyiségét. A szelén felvétel értékelésénél a fentiekben már látható volt, hogy egy 4. pontot is figyelembe kell vennünk, még pedig, hogy melyik szelén speciesről van szó, azaz, hogy a potenciális szelén szennyezés szelenit vagy szelenát formában található.

Amennyiben megfogalmazzuk a borsó esetén is azt a kérdést, hogy a borsó képes-e a molibdénnel vagy a szelénnel szennyezett talajok tisztítására, fitoremediációjára, akkor a fenti elemtartalmi eredmények, valamint a borsóra vonatkozó, Kádár (2012) által közölt termésmennyiségek (száraz tömegek) felhasználásával meghatározhatjuk annak szükséges időtartamát. A számolások elvégzése után megállapíthatjuk, hogy a nagyhőrcsöki meszes talajon előidézett legnagyobb dózisu molibdén és szelén szennyezés megtisztításához néhány száz évre lenne szükség, ha borsót használnánk. Ez azt jelenti, hogy a molibdénnel és/vagy a szelénnel szennyezett talajok fitoremediációját csak a kevésbé szennyezett területeken lehet kivitelezni borsó alkalmazásával.

5.4.2.3. A napraforgókísérlet

1998-ban kísérleti növénymintaként napraforgót termesztettek az ATK TAKI Nagyhőrcsöki Kísérleti telepén. A napraforgóminták mintavételét 1998. szeptember 22-én, a napraforgó betakarításával egyidőben végezték (Kádár, 2012). 1998-ban a napraforgónövény tesztelésénél levél-, szár-, tányér-, kaszat- és mag minták mintavétele történt meg, viszont a napraforgó elemzéséhez én csak napraforgószár mintákat kaptam, mivel a többi növényi minta akkorra már elfogyott, vagy az történt, amit már a borsómag mintáknál is említettem, miszerint a szelénnel terhelt két legnagyobb dózisu (a 90 és a 270 mg kg⁻¹, azaz a 270 és 810 kg ha⁻¹ szelén adagú) parcelláknál alig, vagy egyáltalán nem képződött magtermés. Így ezek vizsgálatára sem nyílt volna

lehetőségem, de a kisebb szelén dózisu mag mintákból sem tudtam az elemtartalmi vizsgálatokat elvégezni, mivel már azok a minták is elfogytak az egyéb elemzések során.



42. ábra: A napraforgószár molibdén és szelén tartalma (mg kg⁻¹) a nagyhorcsöki talaj molibdén és szelén kezelésének függvényében 1998-ban

A napraforgószár, molibdén és szelén mérésén belül, a különböző betűindexet kapott értékek szignifikánsan ($p < 0,05$) különböznek egymástól. (átlag±szórás, $n=2$)

A fentiekben részletezett indokok miatt a legnagyobb szelén dózisu parcella kivételével csupán a napraforgószár minták elemzését tudtam elvégezni. A 42. ábrán látható mérési eredmények alapján megállapítható, hogy az alkalmazott dózisok növekedésével, a napraforgószár minták molibdén és szelén tartalmának a monoton növekedése volt tapasztalható. A 42. ábrán feltüntettem a kezelések statisztikai értékelésének eredményeit is, mely alapján kijelenthető, hogy a 90 mg kg⁻¹, azaz a 270 kg ha⁻¹ molibdén adag kivételével mindegyik kezelés (a Mo és a Se is) szignifikáns molibdén és szelén tartalom növekedéseket eredményezett. A mérési eredmények (42. ábra) alapján megállapíthatjuk, hogy a napraforgószár minták szelén felvételének intenzitása nagyobb volt, mint amit molibdén felvételénél tapasztaltunk. Azt a tényt, hogy a napraforgó szárnál a szelén felvétel intenzitása nagyobb mértékű, mint a molibdén esetén még inkább alátámaszthatjuk, ha figyelembe vesszük a 15-16. ábrák adatait is, amelyeken nagy biztonsággal megbecsülhetjük azt is, hogy a legnagyobb dózisu talajoknál a feltalaj szelén tartalma kisebb volt, mint amennyi molibdént tartalmazott a hasonló legnagyobb dózisu molibdén parcella. A kontroll parcella elemfelvételéhez képest (1998-ban az alkalmazott parcellák talajának aktuális molibdén és szelén tartalma mellett) a 90 kg ha⁻¹ molibdén és szelén adagú kezelések megközelítően 370-szer nagyobb molibdén és szelén koncentrációkat eredményeztek a napraforgószár mintákban. A vizsgált legnagyobb dózisu kezelésekből (a szelénél a 270 kg ha⁻¹, míg a molibdénél a 810 kg ha⁻¹ adagú kezelésekből) mértem hasonló mértékű dúsulást az adott kontroll mintákhoz képest. Ez a dúsulás a szelén esetén megközelítően 1300-szoros, míg a molibdénél (a szelénhez

képest háromszor nagyobb adagú kezelésnél) 1100-szoros molibdén tartalom dúsulása következett be.

Mivel a napraforgókísérlet eredményei értékelésénél csupán a szárminták vizsgálatára nyílt lehetőségem, így a napraforgó különböző növényei részei elemtartalmának összehasonlítása nem volt lehetséges. Továbbá az elemtartalmi kísérlet 1991-es beállítása óta eltelt idő alatt (7 év), a nagyhőrcsöki talaj összes molibdén és szelén tartalmában, valamint ezen elemeknek a növény számára való hozzáférhetőségében beállt változások (pl. lemosódások, átalakulások) következtek be, ezért a napraforgószár elemfelvételi viszonyait nem tudjuk tudományos alapossággal összehasonlítani sem a tápoldaton, sem a rizoboxban termesztett napraforgó növényi részei elem tartalmához. Ezenkívül a Kádár (2012) publikációjában található napraforgó betakarításkori légszárak szártermésének adatait és az általam mért napraforgószár molibdén és szelén koncentrációkat figyelembevéve, a napraforgó potenciális alkalmazásánál is azt vélelmezhetjük, hogy egy molibdénnel, vagy szelénnel nagymértékben elszennyezett talaj (mely talaj tulajdonságaiban hasonlít a nagyhőrcsöki mikroelem-terhelési mészlepedékes csernozjom talajhoz) fitoremediációs tisztításához néhány száz évre lenne szükség.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A fentiekben részletezett MTA doktori kutatómunka eredményei értékelésével a következő elméleti és gyakorlati jellegű új tudományos eredményeket állapítottam meg, mely kutatási tevékenység során molibdén (molibdenát) és szelén (szelenit és szelenát) adagolást végeztünk tápoldatos, rizoboxos, tenyészedényes 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 mg kg^{-1}).
2. A tápoldatban alkalmazott növekvő szelenát kezeléseknél a napraforgó, mint kétszikű tesztnövény reagált érzékenyebben a szelenát kezelésre (már a 30 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 hatását 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 dóziszú 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 sajátságú 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.

Nagyhörcsöki szabadföldi kísérlet

9. Bizonyítottam, hogy a mészlepedékes csernozjom talajok szelén formái (specieszei) vizsgálatára kiválóan alkalmas a 0,1 M NaOH extraháló oldat, melyhez mérőműszerként HPLC–ICP–MS csatolt rendszert használtunk.
10. Megállapítottam, hogy a mészlepedékes csernozjom talajban lévő kisebb mint 30 mg kg⁻¹ szelén koncentráció esetén, mind a 0,1 M NaOH, mind a Lakanen-Erviö extraháló oldatok egyaránt alkalmasak a növény számára felvehető (oldható) szelén tartalom meghatározásához.
11. Meghatároztam, hogy a nagyhörcsöki mészlepedékes csernozjom talajon beállított szabadföldi kísérlet első két évében, a 810 kg ha⁻¹ kezelésű parcellákon, a molibdén vertikális mobilitása volt a jelentősebb, mint a szeléné (a Se megközelítően 60 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 cm, a molibdén lemosódása pedig csak 160-190 cm volt. 14 év alatt a szelén vertikális mobilitása meghaladta a 600 cm-t, a molibdén kilúgzódása viszont csak a 230-260 cm-es rétegig történt meg.
12. Bebizonyítottam, hogy a nagyhörcsöki mészlepedékes csernozjom talajon beállított szabadföldi kísérlet 270 és 810 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.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az MTA doktori disszertációm elkészítésénél, molibdén és szelén adagolás, növények növekedésére és elemfelvételére gyakorolt hatását vizsgáltuk, melyhez egyszikű és kétszikű növényeket alkalmaztunk, tápoldatos, rizoboxos, tenyészedényes és szabadföldi kísérletekben.

Tápoldatos kísérletek

A tápoldatos kísérletekben egy egyszikű (kukorica (*Zea mays* L. cv. Norma SC)) és egy kétszikű tesztnövényt (napraforgót (*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 μM -os molibdén kezelésnél tapasztaltunk szignifikáns csökkenést (gyökér 17%-os, a hajtás 20%-os) a kontroll kezeléshez képest. A 7 μM -os molibdén kezelés hatására a napraforgó kísérletben, a napraforgó gyökerének a tömege megközelítően 20%-kal csökkent, viszont a hajtásának a tömege 30%-kal növekedett meg.

Az egyszikű kukorica és a kétszikű napraforgó-tesztnövények szelén kezelésénél (szelenit és szelenát formában) mind a két szervetlen 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^{-3}) életképes maradt, addig a szelenát kezelésben már a 30 mg dm^{-3} szelenát kezelés a napraforgónövény teljes pusztulását okozta.

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 ($\text{BAF} = C_{\text{hajtás}}/C_{\text{tápoldat}}$), valamint transzlokációs faktort ($\text{TF} = C_{\text{hajtás}}/C_{\text{gyökér}}$).

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 tesztnövényünkben, mind a gyökér és hajtás mintákban, mely tesztnövények közül a napraforgó, mint kétszikű növény, reagált érzékenyebben a szelenát kezelésre, amit az is mutat, hogy a legnagyobb dóziszú szelenát (30 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 rendelkeznek.

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 ($BAF > 1$), sőt még hiperakkumulátor-növénynek is tekinthető, mivel a napraforgóhajtás szelén koncentrációja meghaladta az 1000 mg kg^{-1} határértéket. Sőt a szelenit kezelésben a napraforgóhajtás szelén tartalma megközelítően 14000 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. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy kukoricánál a 30 mg kg^{-1} , napraforgónál a 30 és a 90 mg kg^{-1} molibdén kezelések kedvezően hatottak a hajtás szárazanyag-termékumára. Viszont a kukorica-teszt növényeken fitotoxicitásra utaló tünetek még a legnagyobb dózis esetén sem jelentkeztek, míg a napraforgó-csíránövényeknél a 90 és 270 mg kg^{-1} molibdén kezelés már fitotoxikus tüneteket okozott. 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.

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 mg kg^{-1} -os, míg a szelenát 30 mg kg^{-1} -os szelénre vonatkoztatott koncentrációjánál tapasztaltunk toxicitási tüneteket.

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^{-1} molibdént és szelént tartalmazott. A molibdén kezelések növelésével jelentős mértékben nőtt a gyökerek és a hajtások molibdén koncentrációja, amely növekedés eleinte egyenes arányban történt.

A rizoboxban nevelt napraforgónövény szelén (szelenit és szelenát) kezeléseinek eredményei tendenciájukban nagyon hasonlítanak a kukoricánövénynél kapott mérési eredményekhez. A napraforgó talajának szelenittel 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.

A kukoricaminták szelén tartalmának értékelésén kívül kiszámoltuk a rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövények növényi részei által kivont molibdén és szelén mennyiségeket. A kontroll kezelésekből 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^{-1} -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 molibdénél, vagy akár az a szelenitnél valósul meg.

Az előző információk után 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 ($\text{BAF} > 1$). Szelenit használatával viszont csak a napraforgónál teljesült, hogy a $\text{BAF} > 1$. 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^{-1} határértéket. A három vizsgált oxoanion 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, 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 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 mg kg⁻¹ molibdén dózis adta. A szelénés kísérletben bármennyi szelenitet, vagy szelenátot is adagoltunk a látóképi kontroll talajhoz, a borsó vegetatív részeinek szárazanyag-produktumában folyamatos csökkenés következett be. Az 1-10 mg kg⁻¹ szelenit adagokkal mind a hüvely, mind a mag szárazanyag-produktumában pozitív hatás mutatkozott, a további kezeléseknél viszont már fitotoxikus hatást lehetett tapasztalni. A látóképi talajhoz adagolt 1 mg kg⁻¹ szelenát kezelésen kívül a további három szint alaposabb vizsgálatára nem volt lehetőség, mivel a borsó már a 3 mg kg⁻¹-os szelenát kezelésben sem volt képes termés képzésére.

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±132 mg kg⁻¹) és a levél molibdén koncentrációi (1050±41 mg kg⁻¹) alapján hiperakkumulátor-növénynek tekinthetjük. A tenyészedényben 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. 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. Az 1 mg kg⁻¹ Se(VI) adagú gyökér mintában hasonló nagyságrendű szelén tartalom volt, mint amilyen a 90 mg kg⁻¹ dózisú szelenit kezelésűben. Az eredményeink szerint a szelenit kezelés hatására a borsógyökér ugyan nagyobb mint 1000 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 mg kg⁻¹, sőt a 30 mg kg⁻¹-os kezelésnél 4000 mg kg⁻¹ szelén koncentrációt mértünk a borsó hajtásában. A fentiekben mért molibdén (és szelén) eredményekből kiszámoltuk, hogy egy borsónövény mennyi (µg) 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 ($TF < 1$). A szelenát kezelésben, a szelén transzlokációja ugyan egy nagyságrenddel hatékonyabban történt, de ez sem nevezhető hatékony transzlokációnak.

Nagyhörcsöki szabadföldi kísérlet

A TAKI Nagyhörcsöki Kísérleti telepen 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, szelénél háromféle elemtartalmi vizsgálatot végeztünk ($\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ nedves roncsolásos „összes” elemtartalom, Lakanen-Erviö-féle kivonószerezrel a növény számára felvehető elemtartalom, valamint a szelénrel kezelt talajmintákból szelén formák meghatározása).

A molibdénrel 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 szelénelt 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 szelénrel a nagyobb dózisoknál lehetett kimutatni nagyobb arányszámokat.

A szelénrel 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 szelén 32-79%-át oldotta ki, valamint hogy a Lakanen-Erviö oldathoz képest az oldható szelén legalább 50%-át oldotta ki.

A nagyhörcsöki 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⁻¹ dózisú kezelésnél megközelítően 25%-ára, míg a 810 kg ha⁻¹ 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 Nagyhörcsöki 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⁻¹ 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 a szelén 810 kg ha⁻¹ 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 Nagyhörcsöki kísérletben a szelénrel 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 Nagyhörcsöki Kísérleti telepen beállított szabadföldi kísérlet nagyobb adagú szelénrel kezelt parcelláin, az évek múlásával, a megnövekedett szelenát tartalom vezetett oda, hogy a 270 és 810 kg ha⁻¹ 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 elérhetőek, mint 7 évvel korábban, a kísérlet kezdetekor, de az adott kontroll mintákhoz képest, a molibdén 810 kg ha^{-1} adagú kezelésű parcelláján 1100-szoros molibdén tartalom dúsulást, a szelénél a 270 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 nagyhőrcsöki meszes talajhoz hasonló sajátosságokkal rendelkező molibdén és szelén szennyezés (legnagyobb dózisú) megtisztításához, kukoricával legalább ezer évre, míg borsóval, vagy napraforgóval is megközelítően néhány száz évre lenne szükség.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- Adriano D. C.: (1986) Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Adriano D. C.: (2001) Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Agarwala S. C., C. P. Sharma, S. Farooq, C. Chatterjee: (1978) Effect of molybdenum deficiency on the growth and metabolism of corn plants raised in sand culture. *Canadian Journal of Botany*. **56**:1905-1908.
- Agarwala S. C., E. J. Hewitt: (1954) Molybdenum as a plant nutrient. III. The interrelationships of molybdenum and nitrate supply in the growth and molybdenum content of cauliflower plants grown in sand culture. *Journal of Horticultural Sciences*. **29**:278-290.
- Akbulut M., S. Çakır: (2010) The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* **48**:160-166.
- Alfthan G., A. Aro: (2005) Environmental effects of selenium fertilization – Is there a potential risk? In: Eurola M. (ed.): Twenty Years of Selenium Fertilization. Helsinki, Finland. 33-35.
- Ali M., T. R. Choudhury, B. Hossain, M. P. Ali: (2014) Determination of traces of molybdenum and lead in foods by X-ray fluorescence spectrometry. *Springer Plus*. **3**(341):1-9.
- Allaga J., Bódis J.: (2014) Növénytan-Növényélettan. Kaposvári Egyetem, Pannon Egyetem, Szegedi Gabonakutató Nonprofit Kft. Digitális Tankönyvtár.
- Anbar A. D.: (2004) Molybdenum stable isotopes: observations, interpretations and directions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. **55**:429-454.
- Anderson A. J.: (1942) Molybdenum deficiency on a South Australian ironstone soil. *The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*. **8**:73-75.
- Andrási D., Puskás-Preszner A., Tarján Zs., Kovács B., Györi Z.: (2012) Induktív csatolású plazma tömegspektrométer (ICP-MS) mérési paramétereinek optimalítása arzén és szelén mérésére. *Agrártudományi Közlemények (Acta Agraria Debreceniensis)*. **50**:59-64.
- Anke M., M. Seifert, S. Holzinger, R. Müller, U. Schäfer: (2007) The biological and toxicological importance of molybdenum in the environment and in the nutrition of plants, animals and man. Part 2: Molybdenum in animals and man. *Acta Biologica Hungarica*. **58**(3):325-333.
- Anke M., M. Seifert, W. Arnhold, S. Anke, U. Schäfer: (2010) The biological and toxicological importance of molybdenum in the environment and in the nutrition of plants, animals and man. Part V: essentiality and toxicity of molybdenum. *Acta Alimentaria*. **39**(1):12-26.
- Anke M., M. Seifert: (2007) The biological and toxicological importance of molybdenum in the environment and in the nutrition of plants, animals and man. Part 1: Molybdenum in plants. *Acta Biologica Hungarica*. **58**(3):311-324.
- Anke M.: (2004) Molybdenum. In: Merian E., M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepler (eds.) *Elements and their compounds in the environment*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. 1007-1037.
- Antal J., Birkás M., Hidvégi Sz., Izsáki Z., Iványi I., Jolánkai M., Kajdi F., Kismányoky T., Késmárki I., Kruppa J., Nagy J., Pepó P., Sárvári M., Simonné Kiss I., Szabó M., Tóth Z.: (2007) Növénytermesztés. Debreceni Egyetem Agrár- és Műszaki Tudományok Centruma, Agrárgazdasági és Vidékfejlesztési Kar. Debrecen.

Antal J., Izsáki Z., Kruppa J., Pocsai K., Schmidt R., Fazekas M., Kajdi F., Késmárki I., Reszkető P., Sárvári M., Szabó L., Tóth Z., Varga S., Barnáné Bacsa M., Iványiné dr. Gergely I., Janowszky J., Janowszky Zs., Gyuricza Cs., Lesznyák M., Máté A., Pepó P., Szabó M., Balázs J., Csajbók J., Győri T., Hoffmann S., Kassai K., Makai S., Mikó P., Nagy J., Nagy L., Nyárai Horváth F., Petróczki F., Szentpétery Zs.: (2005) *Növénytermesztés* 2. Mezőgazda Kiadó, Budapest.

Arnon D. I., P. R. Stout: (1939) Molybdenum as an essential element for higher plants. *Plant Physiology*. **14**:599-602.

Arnon D. I.: (1937) Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen-ion concentration, manganese, copper, and oxygen supply. *Soil Science*. **44**(2):91-121.

Arnon D. I.: (1938) Microelements in culture-solution experiments with higher plants. *American Journal of Botany*. **25**:322-325.

Aspila P.: (2005) History of selenium supplemented fertilization in Finland. In: Euroala M. (ed.): *Twenty Years of Selenium Fertilization*. Helsinki, Finland. 8-13.

ATSDR=Agency for Toxic Substances and Disease Registry: (1996) Toxicology profile for selenium. US Department of Health and Human Services, Washington DC.

Aubert H., M. Pinta: (1977) *Trace elements in soils*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

Babbitt B., C. G. Groat: (2001) *Mineral commodity summaries 2001*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Bacsainé Bódi Éva: (2017) *Növények molibdén kezelése és hatásvizsgálata a növekedési paraméterekre és a tápelemfelvételre*. Doktori (PhD) értekezés. Debrecen.

Bagheri A. R., A. R. Jafari: (2012) Effect of salinity and molybdenum application on photosynthesis, nitrogenase activity and yield of barley inoculated with *Azospirillum brasilense*. *Cereal Research Communications*. **40**(2):235-245.

Bambara S., P. A. Ndakidemi: (2010) The potential roles of lime and molybdenum on the growth, nitrogen fixation and assimilation of metabolites in nodulated legume: a special reference to *Phaseolus vulgaris* L. *African Journal of Biotechnology*. **8**(17):2482-2489.

Bankhofer H.: (1994) *Bio-szelén*. Golden Book Kiadó, Budapest.

Barceloux D. G.: (1999) Molybdenum. *Clinical Toxicology*. **37**(2):231-237.

Barclay M. N. I., A. MacPherson, J. Dixon: (1995) Selenium content of a range of UK foods. *Journal of Food Composition and Analysis*. **8**:307-318.

Barker A. V., D. J. Pilbeam: (2007) *Handbook of plant nutrition*. Taylor and Francis Group, Boca Raton.

Basak A., L. N. Mandal, M. Haldar: (1982) Interaction of phosphorus and molybdenum in relation to uptake and utilization of molybdenum, phosphorus, zinc, copper and manganese by rice. *Plant and Soil*. **68**:261-269.

Bauer F.: (1997) Selenium in soils in the western united states. *Electronic Green Journal*. **1**(7):1-8.

Baum M. K., M. J. Miguez-Burbano, A. Campa, G. Shor-Posner: (2000) Selenium and interleukins in persons infected with human immunodeficiency virus type 1. *The Journal of Infectious Diseases*. **182**(Suppl 1):S69-S73.

- Beath O. A., J. H. Draize, H. F. Eppson, C. S. Gilbert, O. C. McCreary: (1934) Certain poisonous plants of Wyoming activated by selenium and their association with respect to soil types. *Journal of the American Pharmaceutical Association*. **XXIII**(2):94-97.
- Berg D., E. Steinnes: (1997) Recent trends in atmospheric deposition of trace elements in Norway as evident from the 1995 moss survey. *The Science of the Total Environment*. **208**:197-206.
- Berglund M., M. E. Wieser: (2011) Isotopic compositions of the elements 2009 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. **83**(2):397-410.
- Bibak A., O. K. Borggaard: (1994) Molybdenum adsorption by aluminum and iron oxides and humic acid. *Soil Science*. **158**(5):323-328.
- Birke M., C. Reimann, A. Demetriades, U. Rauch, H. Lorenz, B. Harazim, W. Glatté: (2010) Determination of major and trace elements in European bottled water – Analytical methods. *Journal of Geochemical Exploration*. **107**:217-226.
- Bittner F.: (2014) Molybdenum metabolism in plants and crosstalk to iron. *Frontiers in Plant Science*. **5**(28):1-6.
- Bódi É., Peles F., Andrási D., Fekete I., Kovács B.: (2012) Funkcionális élelmiszerek előállítása étkezési csírákból molibdénnel, illetve szelén kezeléssel. *Növénytermelés*. **61**(4):5-34.
- Bódi É., Sz. Veres, F. Garousi, Sz. Várallyay, B. Kovács: (2015) Effects of molybdenum treatments on maize and sunflower seedlings. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Biological, Food, Veterinary and Agricultural Engineering*. **9**(5):357-360.
- Borowska K.: (1998) Distribution of total and the DTPA-extractable selenium in soil profiles from Kujawy Upland (Poland). In: *Proceedings of the XVI. Congress of the International Society of Soil Science, Montpellier, France*. Scientific registration No: 1338.
- Bortels H.: (1930) Molybdän als Katalysator bei der biologischen Stickstoffbindung. *Archiv für Mikrobiologie*. **1**:333-342.
- Bouyssiére B., R. Lobinski and J. Szpunar: (2003) Chapter 19. Hyphenated techniques in environmental speciation analysis. *Gdansk University of Technology, Centre of Excellence in Environmental Analysis and Monitoring*. 389-410.
- Bradberry S.: (2007) Methaemoglobinaemia. *Medicine*. **35**(10):552-553.
- Bradberry S.: (2011) Methaemoglobinaemia. *Medicine*. **40**(2):59-60.
- Braithwaite E. R.; J. Haber: (1994) Molybdenum: an outline of its chemistry and uses. *Studies in inorganic chemistry* 19. Elsevier, Amsterdam.
- Bremner I.: (1979) The toxicity of cadmium, zinc and molybdenum and their effects on copper metabolism. *Proceedings of the Nutrition Society*. **38**:235-242.
- Brewer G. J., P. Hedera, K. J. Kluin, M. Carlson, F. Askari, R. B. Dick, J. Sitterly, J. K. Fink: (1996) Treatment of Wilson disease with ammonium tetrathiomolybdate. III. Initial therapy in a total of 55 neurologically affected patients and follow-up with zinc therapy. *Archives of Neurology*. **53**:1017-1025.
- Brewer G. J., R. D. Dick, V. Yuzbasiyan-Gurkin, R. Tankanow, A. B. Young, K. J. Kluin: (1991) Initial therapy of patients with Wilson's disease with tetrathiomolybdate. *Archives of Neurology*. **48**:42-47.

- Broadley M. R., P. J. White, R. J. Bryson, M. C. Meacham, H. C. Bowen, S. E. Johnson, M. J. Hawkesford, S. P. McGrath, F.-J. Zhao, N. Breward, M. Harriman, M. Tucker: (2006) Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society*. **65**:169-181.
- Broadley M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel, F. Zhao: (1995) Function of nutrients: micronutrients. In: H. Marschner: *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London. 191-248.
- Brown T. A., A. Shrift: (1982) Selenium: toxicity and tolerance in higher plants. *Biological Reviews*. **57**:59-84.
- Burgess B. K., D. J. Lowe: (1996) Mechanism of molybdenum nitrogenase. *Chemical Reviews*. **96**:2983-3011.
- Butterman W. C., R. D. Brown, Jr.: (2004) Selenium. *Mineral Commodity Profiles*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-018.
- Bügel S., B. Sandström, L. H. Skibsted: (2004) Pork meat: a good source of selenium? *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **17**(4):307-311.
- 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.
- Calonego J. C., E. U. Ramos-Junior, R. D. Barbosa, G. H. P. Leite, H. G. Filho: (2010) Adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro com suplementação de molibdênio via foliar (Nitrogen topdressing fertilization on common bean with leaf spray of molybdenum). *Revista Ciência Agronômica*. **41**(3):334-340.
- Campbell W. H.: (1999) Nitrate reductase structure, function and regulation: bridging the gap between biochemistry and physiology. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. **50**:277-303.
- Cantone M. C., D. de Bartolo, N. Molho, L. Pirola, G. Gambarini, Ch. Hansen, P. Roth, and E. Werner: (1992) Molybdenum metabolism studied by means of stable tracers. *Medical Physics*. **19**(2):439-449.
- Cappa J. J., E. A. H. Pilon-Smits: (2014) Evolutionary aspects of elemental hyperaccumulation. *Planta*. **239**(2):267-275.
- Caroli S., A. Alimonti, E. Coni, F. Petrucci, O. Senofonte, N. Violante: (1994) The assessment of reference values for elements in human biological tissues and fluids: a systematic review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. **24**(5-6):363-398.
- Chatterjee C., N. Nautiyal, S. C. Agarwala: (1985) Metabolic changes in mustard plants associated with molybdenum deficiency. *The New Phytologist*. **100**:511-518.
- Chen J., H. Lindmark-Månsson, M. Drevelius, P. Tidehag, G. Hallmans, E. Hertervig, Å. Nilsson, B. Åkesson: (2004) Bioavailability of selenium from bovine milk as assessed in subjects with ileostomy. *European Journal of Clinical Nutrition*. **58**:350-355.
- Chipman E. W., D. C. MacKay, U. C. Gupta, H. B. Cannon: (1970) Response of cauliflower cultivars to molybdenum deficiency. *Canadian Journal of Plant Science*. **50**:163-167.
- Christensen M. J., M. Janghorbani, F. H. Steinke, N. Istfan, V. R. Young: (1983) Simultaneous determination of absorption of selenium from poultry meat and selenite in young men: application of a triple stable-isotope method. *British Journal of Nutrition*. **50**:43-50.
- Christophersen O. A., G. Lyons, A. Haug, E. Steinnes: (2013) Selenium. In: Alloway B. J.(ed.): *Heavy Metals in Soils*. Springer, Dordrecht. 429-463.

- Coleman M. D., N. A. Coleman: (1996) Drug-induced methaemoglobinaemia. *Drug Safety*. **14**(6):394-405.
- Combs G. F. Jr., S. B. Combs: (1984) The nutritional biochemistry of selenium. *Annual Review of Nutrition*. **4**:257-280.
- Combs G. F., L. C. Clark, B. W. Turnbull: (2001) An analysis of cancer prevention by selenium. *Biofactors*. **14**:153-159.
- Combs G. F.: (2001) Selenium in global food systems. *British Journal of Nutrition*. **85**:517-547.
- Cornelis R., H. Crews, J. Caruso, K. Heumann: (2003) Handbook of elemental speciation: techniques and methodology. John Wiley & Sons, Ltd.
- Cox D. A.: (1992) Foliar-applied molybdenum for preventing or correcting molybdenum deficiency of poinsettia. *Hortscience*. **27**(8):894-895.
- Cranston D. A.: (1985) Selenium and tellurium. In: Canadian minerals yearbook 1983-1984: review and outlook. Catalogue No. M38-5/33E Mineral Resources Branch, Energy, Mines and Resources of Canada, Ottawa.
- Csathó P.: (1994) Nehézfém- és egyéb toxikus elem-forgalom a talaj-növény rendszerben. *Agrokémia és Talajtan*. **43**(3-4):371-398.
- Cser M. Á., Sziklainé L. I.: (1998) A szelén szerepe a humán medicinában. In: Cser M. Á., Sziklainé L. I.: A szelén szerepe a környezetben és egészségvédelemben. FRAG Bt., Budapest. 28-45.
- Davis R. D., P. H. T. Beckett, E. Wollan: (1978) Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. *Plant and Soil*. **49**:395-408.
- De Vos W., T. Tarvainen: (2006) Geochemical Atlas of Europe. Part 2 – Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps, and related publications. Geological Survey of Finland, Otamedia Oy, Espoo.
- Dhillon K. S., S. K. Dhillon: (2003) Quality of underground water and its contribution towards selenium enrichment of the soil-plant system for a seleniferous region of northwest India. *Journal of Hydrology*. **272**:120-130.
- Dumont E., F. Vanhaecke, R. Cornelis: (2006) Selenium speciation from food source to metabolites: a critical review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. **385**:1304-1323.
- Eisler R.: (1989) Molybdenum hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review. Contaminant Hazard Reviews, Report 19, Biological Report, 85(1.19).
- Eisler R.: (2007) Eisler's encyclopedia of environmentally hazardous priority chemicals. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Ekholm P., M. Eurola, E. R. Venäläinen: (2005) Selenium content of foods and diets in Finland. In: Eurola M. (ed.): Twenty Years of Selenium Fertilization. Helsinki, Finland. 39-45.
- El Mehdawi A. F., E. A. H. Pilon-Smits: (2012) Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation. *Plant Biology*. **14**(1):1-10.
- El-Ramady H. R., É. Domokos-Szabolcsy, T. A. Shalaby, J. Prokisch, M. Fári: (2015) Selenium in agriculture: water, air, soil, plants, food, animals and nanoselenium. In: Lichtfouse E., J. Schwarzbauer, D. Robert (eds.): CO₂ sequestration, biofuels and depollution. Springer International Publishing, Heidelberg.
- Erickson B. E., G. R. Helz: (2000) Molybdenum(VI) speciation in sulfidic waters: Stability and lability of thiomolybdates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **64**(7):1149-1158.

- Eriksson J.: (2001) Concentrations of 61 trace elements in sewage sludge, farmyard manure, mineral fertilizers, precipitation and in oil and crops. Swedish Environmental Protection Agency Report 5159, Stockholm.
- Eurola M., G. Alfthan, A. Aro, P. Ekholm, V. Hietaniemi, H. Rainio, R. Rankanen, E.-R. Venäläinen: (2003) Results of the Finnish selenium monitoring program 2000-2001. MTT Agrifood Research Finland, Jokioinen.
- Eurola M.: (2005) Twenty years of selenium fertilization. Helsinki, Finland.
- Evans L. J., S. J. Barabash: (2010) Molybdenum, silver, thallium and vanadium. In: Hooda P. S. (ed.): Trace elements in soils. Wiley, Blackwell Publishing Ltd., West Sussex, UK. 515-550.
- Fairbridge R. W.: (1972) The encyclopedia of geochemistry and environmental sciences. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Ferreiro E. A., A. K. Helmy, S. G. de Bussetti: (1985) Molybdate sorption by oxides of aluminium and iron. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. **148**(5):559-566.
- Fleming G. A.: (1962) Selenium in Irish soils and plants. Soil Science. **94**:28-35.
- Flohé L., W. A. Günzler, H. H. Schock: (1973) Glutathione peroxidase: a selenoenzyme. Febs Letters. **32**(1):132-134.
- Fordyce F. M.: (2013) Selenium deficiency and toxicity in the environment. In: Selinus O., B. Alloway, J. A. Centeno, R. B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, P. Smedley: Essentials of medical geology. Springer, Dordrecht. 375-416.
- Fordyce F.: (2005) Selenium deficiency and toxicity in the environment. In: Selinus O., B. J. Alloway, J. A. Centeno, R. B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, P. Smedley (eds.): Essentials of medical geology. Elsevier Academic Press. Amsterdam, the Netherlands. 373-415.
- Forrer R., K. Gautschi, H. Lutz: (2001) Simultaneous measurement of the trace elements Al, As, B, Be, Cd, Co, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Rb, Se, Sr, and Zn in human serum and their reference ranges by ICP-MS. Biological Trace Element Research. **80**:77-93.
- Fox T. E., E. G. H. M. Van den Heuvel, C. A. Atherton, J. R. Dainty, D. J. Lewis, N. J. Langford, H. M. Crews, J. B. Luten, M. Lorentzen, F. W. Sieling, P. van Aken-Schneyder, M. Hoek, M. J. J. Kotterman, P. van Dael, S. J. Fairweather-Tait: (2004) Bioavailability of selenium from fish, yeast and selenate: a comparative study in humans using stable isotopes. European Journal of Clinical Nutrition. **58**:343-349.
- Franson J. C., J. A. Schmutz, L. H. Creekmore, A. C. Fowler: (1999) Concentrations of selenium, mercury, and lead in blood of emperor geese in western Alaska. Environmental Toxicology and Chemistry. **18**(5):965-969.
- Gabryszuk M., K. Słoniewski, E. Metera, T. Sakowski: (2010) Content of mineral elements in milk and hair of cows from organic farms. Journal of Elementology. **15**(2):259-267.
- Gad N., H. Kandil: (2013) Evaluate the effect of molybdenum and different nitrogen levels on cowpea (*Vigna anguiculata*). Journal of Applied Sciences Research. **9**(3):1490-1497.
- Gad N.: (2012) Influence of molybdenum on groundnut production under different nitrogen levels. World Journal of Chemistry. **7**(2):64-70.
- Gaillardet J., J. Viers, B. Dupré: (2003) Trace elements in river waters. In: Turekian K. K., H.D. Holland (eds.): Treatise on Geochemistry Volume 5. Elsevier, Oxford. 225-227.
- Gaillardet J., J. Viers, B. Dupré: (2014) Trace elements in river waters. In: Holland H. D., K. K. Turekian (eds.): Treatise on Geochemistry Volume 7. Elsevier, Oxford. 195-235.

- Garousi F., B. Kovács, É. Domokos-Szabolcsy, Sz. Veres: (2017a) Biological changes of green pea (*Pisum Sativum* L.) by selenium enrichment. *Acta Biologica Hungarica*. **68**(1):60-72.
- Garousi F., É. Domokos-Szabolcsy, M. Jánószky, A. Balláné Kovács, Sz. Veres, Á. Soós, B. Kovács: (2017b) Selenoamino acid-enriched green pea as a value-added plant protein source for humans and livestock. *Plant Foods for Human Nutrition*. **72**(1):1-8.
- Garousi F.: (2016) Accumulation of selenium in the main parts of crops grown in soils and hydroponics. Doctoral (PhD) dissertation. Debrecen.
- Gartrell J. W.: (1981) Distribution and correction of copper deficiency in crops and pastures. In: J. F. Loneragan, A. D. Robson and R. D. Graham (eds.): *Copper in Soils and Plants*, Academic Press, New York.
- George M. W.: (2005) Selenium and tellurium. U.S. Geological survey minerals yearbook 2004. Washington DC.
- Gerloff G. C., P. R. Stout, L. H. P. Jones: (1959) Molybdenum-manganese-iron antagonisms in the nutrition of tomato plants. *Plant Physiology*. **34**:608-613.
- Giovanni F.: (2005) *Feeding the world: an economic history of agriculture, 1800-2000*. Princeton University Press. New Jersey, United Kingdom.
- Goldberg S., H. S. Forster, C. L. Godfrey: (1996) Molybdenum adsorption on oxides, clay minerals, and soils. *Soil Science Society of America Journal*. **60**:425-432.
- Goldberg S., H. S. Forster: (1998) Factors affecting molybdenum adsorption by soils and minerals. *Soil Science*. **163**(2):109-114.
- Goldberg S., S. M. Lesch, and D. L. Suarez: (2002) Predicting molybdenum adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. *Soil Science Society of America Journal*. **66**:1836-1842.
- Gondi F., Gy. Pantó, J. Fehér, G. Bogye, G. Alfthan: (1992) Selenium in Hungary. The rock-soil-human system. *Biological Trace Element Research*. **35**:299-306.
- Gowariker V., V. N. Krishnamurthy, S. Gowariker, M. Dhanorkar, K. Paranjape: (2009) *The fertilizer encyclopedia*. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- Grant K., N. M. Carey, M. Mendoza, J. Schulze, M. Pilon, E. A. H. Pilon-Smits, D. Van Hoewyk: (2011) Adenosine 5'-phosphosulfate reductase (APR2) mutation in *Arabidopsis* implicates glutathione deficiency in selenate toxicity. *Biochemical Journal*. **438**:325-335.
- Greenwood E. A. K., E. G. Hallsworth: (1960) Studies on the nutrition of forage legumes. II. Some interactions of calcium, phosphorus, copper and molybdenum on the growth and chemical composition of *Trifolium subterraneum* L. *Plant and Soil*. **XII**(2):97-127.
- Greenwood N. N., A. Earnshaw: (2004) *Az elemek kémiája*. Nemzeti Tankönyvkiadó.
- Gropper S. S., J. L. Smith: (2012) *Advanced nutrition and human metabolism*. Cengage Learning, Wadsworth, USA.
- Gungula D. T., Y. Garjila: (2006) The effects of molybdenum application on growth and yield of cowpea in Yola, Nigeria. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. **1**(2):96-101.
- Gupta M., S. Gupta: (2017) An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*. **7**(2074):1-14.
- Gupta U. C., E. W. Chipman, D. C. MacKay: (1978) Effects of molybdenum and lime on the yield and molybdenum concentration of crops grown on acid sphagnum peat soil. *Canadian Journal of Plant Science*. **58**:983-992.

- Gupta U. C., J. Lipsett: (1981) Molybdenum in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*. **34**:73-115.
- Gupta U. C., L. B. MacLeod: (1975) Effects of sulfur and molybdenum on the molybdenum, copper and sulfur concentrations of forage crops. *Soil Science*. **119**(6):441-447.
- Gupta U. C., P. V. Leblanc, E. W. Chipman: (1990) Effect of molybdenum applications on plant molybdenum concentration and crop yields on sphagnum peat soils. *Canadian Journal of Soil Science*. **70**(4):717-721.
- Gupta U. C., S. C. Gupta: (1998) Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implications for management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **29**:1491-1522.
- Gupta U. C.: (1970) Molybdenum requirement of crops grown on a sandy clay loam soil in the greenhouse. *Soil Science*. **110**(4):280-282.
- Gupta U. C.: (1971) Boron and molybdenum nutrition of wheat, barley, and oats grown in Prince Edward island soils. *Canadian Journal of Soil Science*. **51**:415-422.
- Gupta U. C.: (2007a) Soil and plant factors affecting molybdenum uptake by plants. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 71-91.
- Gupta U. C.: (2007b) Deficient, sufficient, and toxic concentrations of molybdenum in crops. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 150-159.
- Gupta U. C.: (2007c) Symptoms of molybdenum deficiency and toxicity in crops. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 160-169.
- Gupta V. K., D. S. Mehla: (1980) Influence of sulphur on the yield and concentration of copper, manganese, iron and molybdenum in berseem (*Trifolium alexandrinum*) grown on two different soils. *Plant and Soil*. **56**:229-234.
- Győri D., Tölgyesi Gy.: (1968) Vadontermő növények (*Trifolium repens*, *Galium mollugo*, *Achillea millefolium*) mikroelemtartalmát befolyásoló tényezők vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan*. **17**(1-2):77-90.
- Győri D.: (1958) Néhány talajtípus mikroelem készlete. *Agrokémia és Talajtan*. **7**(2):97-108.
- Győri D.: (1984) A talaj termékenysége. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Hall J. O.: (2007) Molybdenum. In: R. C. Gupta (ed.): *Veterinary toxicology: basic and clinical principles*. Elsevier – Academic Press, Oxford. 449-452.
- Hamlin R. L.: (2007) Molybdenum. In: A. V. Barker, D. J. Pilbeam (eds.): *Handbook of plant nutrition*. Taylor and Francis Group, Boca Raton. 375-394.
- Harmer M. A., A. G. Sykes: (1980) Kinetics of the interconversion of sulfido- and oxomolybdate(VI) species $\text{MoO}_x\text{S}_{4-x}^{2-}$ in aqueous solutions. *Inorganic Chemistry*. **19**:2881-2885.
- Hartikainen H.: (2005) Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **18**:309-318.
- Hawrylak-Nowak B., R. Matraszek, M. Pogorzelec: (2015) The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. **37**:41. (1-13).
- Hawrylak-Nowak B.: (2008) Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *Journal of Elementology*. **13**(4):513-519.
- Haygarth P. M.: (1994) Global importance and cycling of selenium. In: Frankenberg W. T., S. Benson: (1994) *Environmental chemistry of selenium*. Marcel Dekker Inc., New York. 1-28.

Helz G. R., C. V. Miller, J. M. Charnock, J. F. W. Mosselmans, R. A. D. Patrick, C. D. Garner, and D. J. Vaughan: (1996) Mechanism of molybdenum removal from the sea and its concentration in black shales: EXAFS evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* **60**(19):3631-3642.

Heuwinkel H., E. A. Kirkby, J. Le Bot, H. Marschner: (1992) Phosphorus deficiency enhances molybdenum uptake by tomato plants. *Journal of Plant Nutrition.* **15**(5):549-568.

Hille R., C. Schulzke, M. L. Kirk: (2017) Molybdenum and tungsten enzymes: bioinorganic chemistry. The Royal Society of Chemistry. United Kingdom, Croydon.

Hille R.: (1996) The mononuclear molybdenum enzymes. *Chemical Reviews.* **96**:2757-2816.

Howerde E. S., R. P. Dowdy, J. H. Skala: (1973) Laboratory tests for the assessment of nutritional status. *CRC Optical Reviews in Clinical Laboratory Sciences.* 215-340.

Howerde E. S.: (1999) Laboratory tests for the assessment of nutritional status. CRC Press LLC, New York, USA.

Hristozkova M., I. Stancheva, M. Geneva, G. Georgiev: (2005) Effect of different foliar fertilizer concentrations on pea plants nodulation at reduced Mo supply. In: B. Gruev, Nikolova M., Donev A. (eds.): *Proceedings of Balkan Scientific Conference of Biology.* Plovdiv. 365-372.

Huang Y., Q. Wang, J. Gao, Z. Lin, G. S. Bañuelos, L. Yuan, X. Yin: (2013) Daily dietary selenium intake in a high selenium area of Enshi, China. *Nutrients.* **5**(3):700-710.

Hugouvieux V., C. Dutilleul, A. Jourdain, F. Reynaud, V. Lopez, J. Bourguignon: (2009) Arabidopsis putative selenium-binding protein1 expression is tightly linked to cellular sulfur demand and can reduce sensitivity to stresses requiring glutathione for tolerance. *Plant Physiology.* **151**:768-781.

Hunashikatti M. G., H. T. Channal, P. A. Sarangamath, H. M. Manjunathaiah, N. S. Hebsur: (2000) Effect of sulphur and molybdenum on the dry matter yield and uptake of S and Mo by cabbage. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences.* **13**(4):840-845.

I1: <https://portal.nebih.gov.hu/-/magyarorszag-talajtipusai>

I2: <https://alchetron.com/Carl-Wilhelm-Scheele-1093252-W#demo>

I3: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Adolf_von_Baeyer_\(1905\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Adolf_von_Baeyer_(1905).jpg)

I4: http://www.sil.si.edu/DigitalCollections/hst/scientific-identity/CF/by_name_display_results.cfm?scientist=Berzelius,%20Jons%20Jakob

I5: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Gahn_Johan_Gottlieb.jpg

I6: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Selenomethionine#/media/File:L-Selenomethionine.svg>

I7: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/L-Selenocysteine.svg>

Ip C., H. E. Ganther: (1994) Novel strategies in selenium cancer chemoprevention research. In: Burk R. F. (ed.): *Selenium in biology and human health.* Springer-Verlag, New York. 169-180.

Ishizuka J.: (1982) Characteristics of molybdenum absorption and translocation in soybean plants. *Soil Science and Plant Nutrition.* **28**(1):63-78.

Ivchenko V. I.: (1988) Molybdenum in metabolism of plants. In: Pais I. (ed) *New results in the research of hardly known trace elements and their role in the food chain.* University of Horticulture and Food Industry, Budapest. 51-65.

Jarrell W. M., A. L. Page, A. A. Elsewi: (1980) Molybdenum in the environment. In: Gunther F. A., J. D. Gunther (eds.): *Residues of pesticides and other contaminants in the total environment.* Residue Reviews. Springer-Verlag, New York. 1-44.

- Jewell S., S. M. Kimball: (2014) Mineral commodity summaries 2014. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Jewell S., S. M. Kimball: (2015) Mineral commodity summaries 2015. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Jewell S., S. M. Kimball: (2016) Mineral commodity summaries 2016. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Johnson C. C., F. M. Fordyce, M. P. Rayman: (2010) Factors controlling the distribution of selenium in the environment and their impact on health and nutrition. Symposium on 'Geographical and geological influences on nutrition'. Proceedings of the Nutrition Society. **69**:119-132.
- Johnson C. M., G. A. Pearson, P. R. Stout: (1952) Molybdenum nutrition of crop plants. II. Plant and soil factors concerned with molybdenum deficiencies in crop plants. *Plant and Soil*. **4**(2):178-196.
- Jones J. B. Jr.: (1967) Interpretation of plant analysis for several agronomic crops. In: Hardy G. W. (ed.): *Soil testing and plant analysis*. Madison, WI: SSSA. 49-58.
- Kabata-Pendias A., A. B. Mukherjee: (2007) *Trace elements from soil to human*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kabata-Pendias A., B. Szteke: (2015) *Trace elements in abiotic and biotic environments*. CRC Press Taylor and Francis Group. Boca Raton.
- Kabata-Pendias A., H. Pendias: (2001) *Trace elements in soils and plants*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Kabata-Pendias A., W. Sadurski: (2004) Trace elements and compounds in soil. In: E. Merian, M. Anke, M. Ihnat and M. Stoeppler (ed): *Elements and their compounds in the environment*, Wiley-VCH, Weinheim. 79-99.
- Kabata-Pendias A.: (2011) *Trace elements in soils and plants*. CRC Press Taylor and Francis Group.
- Kádár I., Németh T.: (2003) Mikroelem-szennyezők kimosódásának vizsgálata szabadföldi terheléses tartamkísérletben. *Agrokémia és Talajtan*. **52**(3-4):315-330.
- Kádár I., Pálvölgyi L.: (2003) Mikroelem-terhelés hatása a napraforgóra karbonátos csernozjom talajon. *Agrokémia és Talajtan*. **52**(1-2):79-92.
- Kádár I.: (1995) A talaj-növény-állat-ember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon. Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet, Budapest.
- Kádár I.: (1998) Szelén forgalma a talaj-növény rendszerben. In: Cser M. Á. és Sziklai L. I. (ed.): *A szelén szerepe a környezetben és egészségvédelemben című országos kongresszus előadásainak gyűjteménye*. FRAG Bt., Budapest. 6-19.
- Kádár I.: (2001) Mikroelem-terhelés hatása a borsóra karbonátos csernozjom talajon I. Termés és ásványi összetétel. *Agrokémia és Talajtan*. **50**(1-2):62-82.
- Kádár I.: (2012) A főbb szennyező mikroelemek környezeti hatása. Magyar Tudományos Akadémia, Agrártudományi Kutatóközpont, Talajtani és Agrokémiai Intézete, Akaprint Nyomdaipari Kft., Budapest.
- Kaiser B. N., K. L. Gridley, J. N. Brady, T. Phillips, S. D. Tyerman: (2005) The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of Botany*. **96**:745-54.

- Kannan S., S. Ramani: (1978) Studies on molybdenum absorption and transport in bean and rice. *Plant Physiol.* **62**:179-181.
- Kápolna E., Fodor P.: (2007) Bioavailability of selenium from selenium-enriched green onions (*Allium fistulosum*) and chives (*Allium schoenoprasum*) after 'in vitro' gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Sciences and Nutrition.* **58**(4):282-296.
- Karpagam J., N. Rajesh: (2014) Molybdenum application for enhancing growth, yield and soil health on green gram (*Vigna radiata* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences.* **14**(12):1378-1381.
- Katyal J. C., N. S. Randhawa: (1983) Micronutrients (molybdenum). *FAO: Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.* **7**:69-76.
- Kaur N., S. Sharma, S. Kaur, H. Nayyar: (2014) Selenium in agriculture: a nutrient or contaminant for crops? *Archives of Agronomy and Soil Science.* **60**(12):1593-1624.
- Kemphorne D., M. D. Myers: (2008) Mineral commodity summaries 2008. U.S. Geological Survey, Washington.
- Kessi J., M. Ramuz, E. Wehrli, M. Spycher, R. Bachofen: (1999) Reduction of selenite and detoxification of elemental selenium by the phototrophic bacterium *Rhodospirillum rubrum*. *Applied and Environmental Microbiology.* **65**(11):4734-4740.
- Kevresan S., N. Petrovic, M. Popovic, J. Kandrac: (2001) Nitrogen and protein metabolism in young pea plants as affected by different concentrations of nickel, cadmium, lead, and molybdenum. *Journal of Plant Nutrition.* **24**(10):1633-1644.
- Kirsch R. K., M. E. Harward, R. G. Petersen: (1960) Interrelationships among iron, manganese and molybdenum in the growth and nutrition of tomatoes grown in culture solution. *Plant and Soil.* **XII**(3):259-275.
- Kirsch R. K.: (1958) Interrelationships among iron, manganese and molybdenum in the growth and nutrition of tomatoes grown in nutrient solution. PhD Thesis. Oregon State College.
- Kisker C., H. Schindelin, D. C. Rees: (1997) Molybdenum-cofactor-containing enzymes: structure and mechanism. *Annual Review of Biochemistry.* **66**:233-267.
- Kiss F., Szalai M.: (2009) Környezeti ásványtan. <http://asvanytan.nyf.hu/>
- Kłapcińska B., S. Poprzęcki, A. Danch: (2006) Blood Selenium Concentration of Residents of Upper Silesia: Relation to Age and Gender. *Polish Journal of Environmental Studies.* **15**(5):753-758.
- Klapec T, M. L. Mandić, J. Grgić, Lj. Primorac, A. Perl, V. Krstanović: (2004) Selenium in selected foods grown or purchased in eastern Croatia. *Food Chemistry.* **85**:445-452.
- Koch S.: (1966) Magyarország ásványai. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Kotecki A.: (1991) Effect of molybdenum nutrition applied to the leaves on yield in pea varieties. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Rolnictwo.* **52**:121-132.
- Kovács B., A. Puskás-Preszner, L. Huzsvai, L. Lévai, É. Bódi: (2015) Effect of molybdenum treatment on molybdenum concentration and nitrate reduction in maize seedlings. *Plant Physiology et Biochemistry.* **96**:38-44.
- Kovács B., András D., Bódi É.: (2014) Molibdén, valamint szelén kezelés hatása búza- és borsócsírák elemtartalmára. In: Pepó Péter: A fenntartható növénytermesztés fejlesztési lehetőségei. Prof. Dr. Sárvári Mihály 70. születésnapja alkalmából rendezendő ünnepi tudományos ülés. DE MÉK MTA Talajtani, Vízgazdálkodási és Növénytermesztési Tudományok Bizottsága. 126-137.

- Kovács B., Csapó J.: (2015a) Az élelmiszervizsgálatok műszeres analitikai módszerei. Debreceni Egyetem, Debrecen.
- 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. Bódi, Á. Soós and D. András: (2014) Application of ICP-MS in various fields of research. 28th Indian Society for Mass Spectrometry Symposium cum Workshop on Mass Spectrometry” (28th ISMAS-WS-2014), India, Parwanoo. 69-80.
- 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.
- Kovács B., I. Kádár, É. Széles, J. Prokisch, Z. Győri, L. Simon: (2005) Investigation of selenium using soil and plant samples from a long-term field experiment. In: Eurola M. (ed.): *Twenty Years of Selenium Fertilization*. Helsinki, Finland. 79.
- Kovács B., J. Csapó: (2015b) *Modern methods of food analysis*. University of Debrecen, Debrecen.
- Kovács B., M. Borbély: (2011) Advantages and disadvantages of application of inductively coupled plasma mass spectrometry for analysis of trace elements. In: S.K. Aggarwal, P.G. Jaison, V.M. Telmore (ed) *International discussion meet on elemental mass spectrometry in health and environmental sciences*. Prudents Arts and Fab Private Limited, Navi Mumbai, India. 68-78.
- Kovács B., Z. Győri: (2009) Possibility of application of inductively coupled plasma mass spectrometry for analysis of trace elements in food samples. *Trace Elements in the Food Chain*. Eds.: M. Szilágyi and K. Szentmihályi. Bakai Beáta Press, Szeged. 457-461.
- Kovács B.: (1998) Mintaelőkészítési és plazmaemissziós paraméterek optimalásának értékelése növények elemtartalmának meghatározásához. Doktori (PhD) értekezés. Debrecen.
- Kovács B.: (2020) Can selenium and molybdenum be a potential hazard in our food raw materials? *Food Quality and Texture in Sustainable Production and Healthy Consumption*. ISEKI Food Association. E-Conferences. Vienna, Austria. Book of abstracts. Bucharest. 44.
- Kovács B.: (2021) Investigation on molybdenum and selenium in nutrient solution -plant and soil-plant systems. *International Discussion Meeting on Future of Accelerator Applications and Radiotracers Research*. Kolkata, India. Book of abstracts 31.
- Krebs R. E.: (2006) *The history and use of our earth’s chemical elements: a reference guide*. Greenwood Press, Connecticut, USA.
- Kubota J., E. R. Lemon, W. H. Allaway: (1963) The effect of soil moisture content upon the uptake of molybdenum, copper, and cobalt by alsike clover. *Soil Science Society of America Proceedings*. **27**:679-683.
- Kumar V., M. Singh: (1980) Interactions of sulfur, phosphorus, and molybdenum in relation to uptake and utilization of phosphorus by soybean. *Soil Science*. **130**(1):1-56.

- Leblanc, J. C., T. Guérin, L. Noël, G. Calamassi-tran, J. Volatier, P. Verger: (2005) Dietary exposure estimates of 18 elements from the 1st French Total Diet Study. *Food Additives and Contaminants*. **22**(7):624-641.
- Lévai L., B. Kovács: (2001) The influence of IAA and TIBA on iron concentration of maize seedlings. In: W. J. Horst, M. K. Schenk, A. Bürkert, N. Claassen, H. Flessa, W. B. Frommer, H. Goldbach, H.-W. Olf, V. Römheld, B. Sattelmacher, U. Schmidhalter, S. Schubert, N. v. Wirén, L. Wittenmayer: (eds.), *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 154-155.
- Lindsay W. L.: (1972) Inorganic phase equilibria of micronutrients in soil. In: Mortvedt J. J., P. M. Giordano, W. L. Lindsay (eds.): *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. 41-57.
- Liu H., C. Hu, X. Hu, Z. Nie, X. Sun, Q. Tan, H. Hu: (2010) Interaction of molybdenum and phosphorus supply on uptake and translocation of phosphorus and molybdenum by *Brassica napus*. *Journal of Plant Nutrition*. **33**:1751-1760.
- Liu L., W. Xiao, M. Ji, C. Yang, L. Li, D. Gao, X. Fu: (2017) Effects of molybdenum on nutrition, quality, and flavour compounds of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch. cv. Akihime) fruit. *Journal of Integrative Agriculture*. **16**(7):1502-1512.
- Loch J., Nosticzius Á.: (1992) *Agrokémia és növényvédelmi kémia*. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- Loch J., Nosticzius Á.: (2004) *Agrokémia és növényvédelmi kémia*. Mezőgazda Kiadó, Digitális Tankönyvtár.
- Lyi S. M., L. I. Heller, M. Rutzke, R. M. Welch, L. V. Kochian, L. Li: (2005) Molecular and Biochemical Characterization of the Selenocysteine Se-Methyltransferase Gene and Se-Methylselenocysteine Synthesis in Broccoli. *Plant Physiology*. **138**:409-420.
- Magyar Élelmiszerkönyv: (2001) 1-1-90/496 számú előírás. Az élelmiszerek tápértékének jelölése. Módosított kiadás.
- Manjusha R., K. Dash, D. Karunasagar: (2007) UV-photolysis assisted digestion of food samples for the determination of selenium by electrothermal atomic absorption spectrometry (ETAAS). *Food Chemistry*. **105**:260-265.
- Mansouri A., A. A. Lurie: (1993) Concise review: methemoglobinemia. *American Journal of Hematology*. **42**:7-12.
- Marczenko Z., R. Lobinski: (1991) Determination of molybdenum in biological materials. *Pure and Applied Chemistry*. **63**(11):1627-1636.
- Marino R., R. W. Howarth, F. Chan, J. J. Cole, G. E. Likens: (2003) Sulfate inhibition of molybdenum-dependent nitrogen fixation by planktonic cyanobacteria under seawater conditions: a non-reversible effect. *Hydrobiologia*. Kluwer Academic Publishers. **500**:277-293.
- Marks J. A., S. S. Perakis, E. K. King, J. Pett-Ridge: (2015) Soil organic matter regulates molybdenum storage and mobility in forests. *Biogeochemistry*. **125**:167-183.
- Marro N.: (1996) *The 1994 Australian Market Basket Survey*. Canberra: Australian Government Publishing Service.
- Marschner H.: (1995) *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, New York.
- Marschner P.: (2012) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Elsevier Ltd. London, UK.

- Martens D. A., D. L. Suarez: (1997) Selenium speciation of soil/sediment determined with sequential extractions and hydride generation atomic absorption spectrophotometry. *Environmental Science & Technology*. **31**(1):133-139.
- Martin S., D. Saco, M. Alvarez: (1995) Nitrogen metabolism in *Nicotiana rustica* L. grown with molybdenum: II. flowering stage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **26**(11-12):1733-1747.
- Mayland H. F., L. F. James, K. E. Panter, J. L. Sonderegger: (1989) Selenium in seleniferous environments. In: Jacobs L. W. (ed.): *Selenium in agriculture and the environment*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Special publication. **23**:15-50.
- McNaughton S. A., G. C. Marks: (2002) Selenium content of Australian foods: a review of literature values. *Journal of Food Composition and Analysis*. **15**:169-182.
- McNeal J. M., Balistrieri L. S.: (1989) Geochemistry and occurrence of selenium: an overview. In: Jacobs L. W. (ed.): *Selenium in agriculture and the environment*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Special publication. **23**:1-13.
- Mendel R. R., F. Bittner: (2006) Cell biology of molybdenum. *Biochimica et Biophysica Acta*. **1763**:621-635.
- Mendel R. R., R. Hänsch: (2002) Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants. *Journal of Experimental Botany*. **53**(375):1689-1698.
- Mendel R. R., T. Kruse: (2012) Cell biology of molybdenum in plants and humans. *Biochimica et Biophysica Acta*. **1823**:1568-1579.
- Mendel R. R.: (2005) Molybdenum: biological activity and metabolism. *Dalton Transactions*. 3404-3409.
- Mendel R. R.: (2011) Cell biology of molybdenum in plants. *Plant Cell Reports*. **30**:1787-1797.
- Mendel R. R.: (2013) The molybdenum cofactor. *Journal of Biological Chemistry*. **288**(19):13165-13172.
- Mengel K., E. A. Kirkby, H. Kosegarten, T. Appel: (2001) *Principles of plant nutrition*. Springer Science+Business Media, Dordrecht.
- Mengel K., E. A. Kirkby: (1987) *Principles of plant nutrition*. International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Mertz W.: (1986) *Trace elements in human and animal nutrition*. Academic Press Inc., London.
- Michalski R., M. Jabłońska-Czapla, A. Łyko and S. Szopa: (2013) Hyphenated methods for speciation analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. 1-17.
- Migaszewski Z. M., A. Gałuszka, J. G. Crock, P. J. Lamothe, S. Dołęgowska: (2009) Interspecies and interregional comparison of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from Poland and Alaska. *Atmospheric Environment*. **43**:1464-1473.
- Miller E. R., Lei X., D. E. Ullrey: (1991) Trace elements in animal nutrition. In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman, R. M. Welch (eds): *Micronutrients in agriculture*, Soil Science Society of America, Madison. 593-662.
- Momčilović B.: (1999) A case report of acute human molybdenum toxicity from a dietary molybdenum supplement – a new member of the "Lucor metallicum" family. *Acute Human Molybdenum Toxicity*. **50**(3):289-297.
- Morrison W.: (2015) *Selenium dietary sources, properties and role in human health*. Nova Science Publishers Inc. New York.

- Mortvedt J. J.: 2007. Sources and Methods for Molybdenum Fertilization of Crops. In: Gupta U. C. (ed.): Molybdenum in agriculture, Cambridge University Press, Cambridge. 171-181.
- 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.
- Mulder E. G.: (1948) Importance of molybdenum in the nitrogen metabolism of microorganisms and higher plants. *Plant and Soil*. **1**:94-119.
- Mutanen M. L., H. M. Mykkänen: (1984) Effect of dietary fat on plasma glutathione peroxidase levels and intestinal absorption of ⁷⁵Se-labeled sodium selenite in chicks. *Journal of Nutrition*. **114**(5):829-834.
- Nagy K., Lévai L., Kovács B.: (2010) A szelénellátás hatása a kukorica és napraforgónövényekre. *Növénytermelés*. **59**:61-84.
- Navarro-Alarcon M., C. Cabrera-Vique: (2008) Selenium in food and the human body: a review. *Science of the Total Environment*. **400**:115-141.
- Navarro-Alarcón M., M. C. López-Martínez: (2000) Essentiality of selenium in the human body: relationship with different diseases. *The Science of the Total Environment*. **249**:347-371.
- Nayyar V. K., N. S. Randhawa, N. S. Pasricha: (1977) Molybdenum accumulation in forage crops part 3 screening of forage species for their capacity to accumulate molybdenum on molybdenum toxic soils. *Journal of Research Punjab Agricultural University*. **14**(4):406-410.
- Nelson A. A., O. G. Fitzhugh, H. O. Calvery: (1943) Liver tumor following cirrhosis caused by selenium in rats. *Cancer Research*. **3**:230-236.
- Németh A.: (2015) Application of hyphenated analytical techniques in the investigation of selenium speciation of different plants. PhD Doctoral Thesis. Budapest.
- Neumüller O-A.: (1983) Römpp vegyészeti lexikon. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Newton D. E.: (2010) *Chemical Elements*. Gale Cengage Learning, London.
- Norton G. A., C. G. Groat: (2002) *Mineral commodity summaries 2002*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Norton G. A., P. P. Leahy: (2006) *Mineral commodity summaries 2006*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Nowak J., K. Kaklewski, D. Klódka: (2002) Influence of various concentrations of selenic acid (IV) on the activity of soil enzymes. *The Science of the Total Environment*. **291**:105-110.
- 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.
- Oldfield J. E.: (2002) *Selenium world atlas*. Oregon State University, Corvallis.
- Osman K. T.: (2013) *Soils: principles, properties and management*. Springer Science and Business Media, Dordrecht, The Netherlands.
- Ördög V., Molnár Z.: (2011) *Növényélettan*. Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem. Digitális Tankönyvtár.
- Pais I.: (2000) *A mikroelemek jelentősége az életben*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Pappa E. C., A. C. Pappas, P. F. Surai: (2006) Selenium content in selected foods from the Greek market and estimation of the daily intake. *Science of the Total Environment*. **372**:100-108.

- Papp-Topa Emőke, Nyeste Erika, Soós Áron, Bódi Éva, Várallyay Szilvia, Czipa Nikolett, Kovács Béla: (2017) Egy rektori elképzelés továbbgondolása: egy induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométer optimalizálása. *Növénytermelés*. **66**(3):75-93.
- Pasricha N. S., N. S. Randhawa: (1972) Interaction effect of sulphur and molybdenum on the uptake and utilization of these elements by raya (*Brassica juncea* L.). *Plant and Soil*. **37**:215-220.
- Patterson E. L., R. Milstrey, E. L. R. Stokstad: (1957) Effects of selenium in preventing exudative diathesis in chicks. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*. **95**(4):617-620.
- Pau R. N.: (2004) Molybdenum uptake and homeostasis. In: W. Klipp, B. Masepohl, J. R. Gallon, W. E. Newton (ed): *Nitrogen fixation: origins, applications, and research progress*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 225-256.
- Pelsy F., M. Caboche: (1992) Molecular genetics of nitrate reductase in higher plants. *Advances in Genetics*. **30**:1-40.
- Pilon-Smits E. A. H.: (2017) Mechanisms of plant selenium hyperaccumulation. In: Pilon-Smits E. A. H., L. H. E. Winkel, Z-Q. Lin (eds.): *Selenium in plants*. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland. 53-66.
- Plant W.: (1951) The control of molybdenum deficiency in lettuce under field conditions. *Annual Report Long Ashton Agricultural Horticultural Research Station*. 113-115. www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19520303872
- Poblaciones M. J., S. M. Rodrigo, O. Santamaría: (2013): Evaluation of the potential of peas (*Pisum Sativum* L.) to be used in selenium biofortification programs under mediterranean conditions. *Biological Trace Element Research*. **151**:132-137.
- Preedy V. R.: (2015) *Selenium chemistry, analysis, function and effects*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Presta L., M. Fondi, G. Emiliani, R. Fani: (2015) *Molybdenum cofactors and their role in the evolution of metabolic pathways*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.
- Rabbi A. K. M. Z., A. K. Paul, J. R. Sarker: (2011) Effect of nitrogen and molybdenum on the growth and yield of garden pea (*Pisum sativum* L.). *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*. **2**(2):230-235.
- Rabbi A. K. M. Z.: (2007) Effect of nitrogen and molybdenum on the growth and yield of garden pea (*Pisum sativum* L.). Thesis, Sher-e-Bangla Agricultural University, Dhaka. Reg. No. 02157.
- Rader L. F. Jr., W. L. Hill: (1936) Occurrence of selenium in natural phosphate, superphosphates and phosphoric acid. *Journal of Agricultural Research*. **51**(12):1071-1083.
- Rajagopalan K. V., J. L. Johnson: (1992) The pterin molybdenum cofactors. *The Journal of Biological Chemistry*. **267**(15):10199-10202.
- Rajagopalan K. V.: (1988) Molybdenum: an essential trace element in human nutrition. *Annual Review of Nutrition*. **8**:401-427.
- Ráthonyi G., Várallyai L., Kovács B.: (2010) Molibdén vizsgálata a táplálékláncban statisztikai módszerekkel. *Acta Agraria Kaposváriensis*. **14**(3):323-333.
- Rayman M. P., H. G. Infante, M. Sargent: (2008) Food-chain selenium and human health: spotlight on speciation. *British Journal of Nutrition*. **100**:238-253.
- Rayman M. P.: (2000) The importance of selenium to human health. *The Lancet*. **356**:233-241.
- Reddy K. J., L. C. Munn, L. Wang: (2007) *Chemistry and Mineralogy of Molybdenum in Soils*. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 4-22.

- Reilly C.: (1996) Selenium in food and health. Doyle Graphics Ltd. Tullamore, Ireland.
- Reilly C.: (2002) Metal contamination of food: Its significance for food quality and human health. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK.
- Reilly C.: (2004) The nutritional trace metals. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK.
- Reilly C.: (2006) Selenium in food and health. Springer Science+Business Media, LLC, USA.
- Reimann C., P. de Caritat: (1998) Chemical elements in the environment. Factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Reisenauer H. M., A. A. Tabikh, P. R. Stout: (1962) Molybdenum reactions with soils and hydrous oxides of iron, aluminum and titanium. Soil Science Society of America. **26**(1):23-27.
- Rezvani M., F. Zaefarian: (2011) Bioaccumulation and translocation factors of cadmium and lead in *Aeluropus littoralis*. Australian Journal of Agricultural Engineering. **2**(4):114-119.
- Rimmer D. L., R. S. Shiel J. K. Syers, M. Wilkinson: (1990): Effects of soil application of selenium on pasture composition. Journal of the Science of Food and Agriculture. **51**:407-410.
- Ríos J. J., B. Blasco, L. M. Cervilla, M. M. Rubio-Wilhelmi, J. M. Ruiz, L. Romero: (2008) Regulation of sulphur assimilation in lettuce plants in the presence of selenium. Plant Growth Regulation. **56**:43-51.
- Risher J., A. R. McDonald, M. J. Citra, S. Bosch, R. J. Amata: (2003) Toxicological profile for selenium. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia.
- Robb D. A., W. S. Pierpoint: (1983) Metals and micronutrients: uptake and utilization by plants. Academic Press, London.
- Rose M., M. Baxter, N. Brereton, C. Baskaran: (2010) Dietary exposure to metals and other elements in the 2006 UK Total Diet Study and some trends over the last 30 years. Food Additives & Contaminants. **27**(10):1380-1404.
- Rosenfeld I., O. A. Beath: (1964) Selenium. Geobotany, biochemistry, toxicity and nutrition. Academic Press Inc., London.
- Rotruck J. T., A. L. Pope, H. E. Ganther, A. B. Swanson, D. G. Hafeman, W. G. Hoekstra: (1973) Selenium: biochemical role as a component of glutathione peroxidase. Science. **179**:588-590.
- Sager M.: (2006) Selenium in agriculture, food, and nutrition. Pure and Applied Chemistry. **78**(1):111-133.
- Saji V. S., C. W. Lee: (2012) Molybdenum, molybdenum oxides, and their electrochemistry. ChemSusChem. **5**(7):1146-1161.
- Salazar K., M. K. McNutt: (2010) Mineral commodity summaries 2010. U.S. Geological Survey, Washington.
- Salazar K., M. K. McNutt: (2011) Mineral commodity summaries 2011. U.S. Geological Survey, Washington.
- Salazar K., M. K. McNutt: (2012) Mineral commodity summaries 2012. U.S. Geological Survey, Washington.
- Salazar K., M. K. McNutt: (2013) Mineral commodity summaries 2013. U.S. Geological Survey, Washington.
- Salonen J. T., G. Alfthan, J. K. Huttunen, J. Pikkarainen, P. Puska: (1982) Association between cardiovascular death and myocardial infarction and serum selenium in a matched-pair longitudinal study. The Lancet. **320**(8291):175-179.

- Salonen J. T., G. Alfthan, J. K. Huttunen, P. Puska: (1984) Association between serum selenium the risk of cancer. *American Journal of Epidemiology*. **120**(3):342-349.
- Sanchez-Echaniz J., J. Benito-Fernández, S. Mintegui-Raso: (2001) Methemoglobinemia and consumption of vegetables in infants. *Pediatrics*. **107**(5):1024-1028.
- Sardesai V. M.: (1993) Molybdenum: an essential trace element. *Nutrition in Clinical Practice*. **8**(6):277-281.
- Schalscha E. B., M. Morales, P. F. Pratt: (1987) Lead and molybdenum in soils and forage near an atmospheric source. *Journal of Environmental Quality*. **16**(4):313-315.
- Schiavon M., I. Moro, E. A. H. Pilon-Smits, V. Matozzo, M. Malagoli, F. D. Vecchia: (2012) Accumulation of selenium in *Ulva* sp. and effects on morphology, ultrastructure and antioxidant enzymes and metabolites. *Aquatic Toxicology*. **122-123**:222-231.
- Schrauzer G. N.: (2004) Selenium. In: E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoeppler (ed.) *Elements and their compounds in the environment*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. 1365-1406.
- Schwarz G., R. R. Mendel, M. W. Ribbe: (2009) Molybdenum cofactors, enzymes and pathways. *Nature*. 460:839-847.
- Schwarz K., C. M. Foltz: (1957) Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. *Journal of the American Chemical Society*. **79**:3292-3293.
- Seifert M., W. Dorn, R. Müller, S. Holzinger, M. Anke: (2009) The biological and toxicological importance of molybdenum in the environment and in the nutrition of plants, animals and man: Part III. Molybdenum content of the food. *Acta Alimentaria*. **38**(4):471-481.
- Selinus O., B. Alloway, J. A. Centeno, R. B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, P. Smedley: (2013) *Essentials of medical geology*. Springer, Dordrecht.
- Selinus O., B. J. Alloway, J. A. Centeno, R. B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, P. Smedley: (2004) *Essentials of medical geology*. Elsevier Academy Press, London.
- Shacklette H. T.: (1980) *Elements in fruits, and vegetables from areas of commercial production in the Conterminous United States*. U. S. Geological Survey. United States Government Printing Office, Washington.
- Sharma C. P., C. Chatterjee: (1997) Molybdenum availability in alkaline soils. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 131-149.
- Shil N. C., S. Noor, M. A. Hossain: (2007) Effects of boron and molybdenum on the yield of chickpea. *Journal of Agriculture and Rural Development*. **5**(1-2):17-24.
- Simon L.: (1999) A talajok szennyeződése szerves anyagokkal. In: Simon L. (ed.): *Talajszennyeződés, talajtisztítás. Környezetgazdálkodási Intézet Környezet- és Természetvédelmi Szakkönyvtár és Információs Központ*, Budapest.
- Simon L.: (2004) Fitoremediáció. *Környezetvédelmi Füzetek*. Azonosító: 2318. BMKE OMIKK, Budapest. 1-59.
- Simon L.: (2007) Toxikus elemek akkumulációja, fitoindikációja és fitoremediációja a talaj-növény rendszerben. Doktori (DSc) értekezés.
- Singh R. M., T. C. Jain: (1968) Effect of phosphate and molybdate on the uptake of N and P by Russian giant cowpea. *Annals of Arid Zone*. **7**:140-146.
- Singh V., A. N. Garg: (2006) Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake. *Food Chemistry*. **94**:81-89.

- Sirichakwal P. P., P. Puwastien, J. Polngam, R. Kongkachuichai: (2005) Selenium content of Thai foods. *Journal of Food Composition and Analysis*. **18**:47-59.
- Škarpa P., E. Kunzová, H. Zúkalová: (2013) Foliar fertilization with molybdenum in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant, Soil and Environment*. **59**(4):156-161.
- Smith K. S., L. S. Balistreri, S. S. Smith, R. C. Severson: (1997) Distribution and mobility of molybdenum in the terrestrial environment. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 23-46.
- Smrkolj P., M. Germ, I. Kreft, V. Stibilj: (2006) Respiratory potential and Se compounds in pea (*Pisum sativum* L.) plants grown from Se-enriched seeds. *Journal of Experimental Botany*. **57**(14):3595-3600.
- Snowball K., A. D. Robson: (1991) *Nutrient deficiencies and toxicities in wheat: a guide for field identification*. Mexico, D.F.: Cimmyt.
- Soil Remediation Circular: (2013) Rijkswaterstaat Environment.
- Soós Á, É. Bódi, Sz. Várallyay, Sz. Molnár, B. Kovács: (2021) Microwave-assisted sample preparation of Hungarian raw propolis in quartz vessels and element analysis by ICP-OES and ICP-MS for geographical identification. *Talanta*. **233**:122613.
- Srivastava P. C.: (2007) Biochemical significance of molybdenum in crop plants. In: Gupta U. C. (ed.): *Molybdenum in agriculture*, Cambridge University Press, Cambridge. 47-70.
- Stanciu-Burileanu M. M., V. M. Stroe, M. Musat, C. Luca, R. Lacatusu: (2015) Quantification of selenium compounds from soil samples by HPLC-ICP-MS. *Revista De Chimie*. **66**(5):611-614.
- Steinberg R. A.: (1936) Relation of accessory growth substances to heavy metals, including molybdenum, in the nutrition of *Aspergillus niger*. *Journal of Agricultural Research*. **52**:439-448.
- Steiner F., T. Zoz: (2015) Foliar application of molybdenum improves nitrogen uptake and yield of sunflower. *African Journal of Agricultural Research*. **10**(17):1923-1928.
- Stiefel E. I., H. H. Murray: (2002) Molybdenum. In: B. Sarkar: *Heavy metals in the environment*. Marcel Dekker Inc., New York. 503-530.
- Stiefel E. I.: (1997) Chemical keys to molybdenum enzymes. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*. 3915-3923.
- Stojek M.: (2013) The concentration of molybdenum and copper in rocks, soils and plants in the area of Jabłonki (Eastern Beskids Mts.). *Environmental Protection and Natural Resources*. **24**(3):13-17.
- Supriatin S., L. Weng, R. N. J. Comans: (2015) Selenium speciation and extractability in Dutch agricultural soils. *Science of the Total Environment*. **532**:368-382.
- Svensson B.-G., A. Schfütz, A. Nilsson, I. Åkesson, B. Åkesson, S. Skerfving: (1992) Fish as a source of exposure to mercury and selenium. *The Science of the Total Environment*. **126**:61-74.
- Szabó A., Pokovai K., Ragályi P., Rékási M., Sándor R., Bernhardt B., Koncz J., Kremper R., Csathó P: (2019) Nehézfémm- és egyéb toxikus mikroelem-terhelés tartamhatása a talajból mért visszanyerési százalékok alakulására szabadföldi kísérletekben. *Agrokémia és Talajtan*. **68**(2):293-314.
- Szabó S. A., Regiusné Mócsényi Á., Győri D., Szentmihályi S.: (1987) *Mikroelemek a mezőgazdaságban I. (Esszenciális mikroelemek)*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

- Szebeni A., I. Varga I., B. Kovács, Gy. Tolvaj and A. Zalatnai: (2011) Microanalytical determination of trace elements from liver biopsy materials of patients with chronic diffuse liver diseases with different ultrasound attenuation. In: Hirokazu Takahashi (Ed.) Liver Biopsy. InTech, Rijeka, Croatia. 63-86.
- Széles É., Kovács B., Prokisch J. Győri Z.: (2005) Ütközési cella (CCT) alkalmazása az ICP-MS technikában. Agrártudományi Közlemények (Acta Agraria Debreceniensis). **16**(különszám):120-125.
- Széles É., Kovács B., Prokisch J. Győri Z.: (2006) Szelén-speciációs vizsgálatok talajmintákból ionkromatográffal összekapcsolt induktív csatolású plazma-tömegspektrométer (IC-ICP-MS) alkalmazásával. Agrártudományi Közlemények (Acta Agraria Debreceniensis). 23:106-111.
- Széles É.: (2007) Szelénvegyületek átalakulásának vizsgálata tartamkísérletből származó talaj- és növénymintákban. Doktori (PhD) értekezés. Debrecen.
- Szpunar J., R. Lobinski (Eds): (2003) Hyphenated techniques in speciation analysis. The Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK.
- Szűcs L.: (1965) A mészlepedékes csernozjomok osztályozásának továbbfejlesztése és alkalmazása. Agrokémia és Talajtan. **14**(3-4):153-170.
- Takács S.: (1992) Környezet, ember, mikroelemek. Triorg Kft., Budapest.
- Takács S.: (2001) A nyomelemek nyomában. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest.
- Takeo N.: (2005) Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases, Geological Survey of Japan, Open File Report No. 419. <http://www.eosremediation.com>
- Tamaoki M., J. L. Freeman, E. A. H. Pilon-Smits: (2008) Cooperative ethylene and jasmonic acid signaling regulates selenite resistance in *Arabidopsis*. Plant Physiology. **146**:1219-1230.
- Tamás M.: (2015) Eltérő típusú talajokon termesztett búza szeléntartalmának és szelén formáinak vizsgálata Románia különböző tájegységein. Doktori (PhD) értekezés. Debreceni Egyetem, Debrecen.
- Terry N., A. M. Zayed, M. P. de Souza, A. S. Tarun: (2000) Selenium in higher plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. **51**:401-432.
- The New Dutch List: (2000) Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Tolu J., I. Le Hécho, M. Bueno, Y. Thiry, M. Potin-Gautier: (2010) Development of an analytical methodology for ultra-trace selenium speciation determination in soils. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 35-38.
- Tolu J., I. Le Hécho, M. Bueno, Y. Thiry, M. Potin-Gautiera: (2011) Selenium speciation analysis at trace level in soils. Analytica Chimica Acta. **684**:126-133.
- Turakainen M., H. Hartikainen, M. M. Seppänen: (2004) Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. Journal of Agricultural and Food Chemistry. **52**:5378-5382.
- Underwood E. J.: (1977) Trace elements in human and animal nutrition. Academic Press Inc., London.
- Valenciano J. B., J. A. Boto, V. Marcelo: (2011a) Chickpea (*Cicer arietinum* L.) response to zinc, boron and molybdenum application under field conditions. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. **39**(4):217-229.

- Valenciano J. B., V. Marcelo and M. M. Miguelez-Frade: (2011b) Effect of different times and techniques of molybdenum application on chickpea (*Cicer arietinum*) growth and yield. Spanish Journal of Agricultural Research. **9**(4):1271-1278.
- Van Campen D. R.: (1991) Trace elements in human nutrition. In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman, R. M. Welch (eds.): Micronutrients in agriculture, Soil Science Society of America, Madison. 663-701.
- Van Dael P., L. Davidsson, E. E. Ziegler, L. B. Fay, D. Barclay: (2002) Comparison of selenite and selenate apparent absorption and retention in infants using stable isotope methodology. Pediatric Research. **51**(1):71-75.
- Van Hoewyk D.: (2013) A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. Annals of Botany. **112**:965-972.
- Van Rensburg S. J., J. M. Hall, D. B. Du Bruyn: (1985) Effects of various dietary staples on esophageal carcinogenesis induced in rats by subcutaneously administered N-nitrosomethylbenzylamine. Journal of the National Cancer Institute. **75**(3):561-566.
- Varga I., Á. Szebeni, N. Szoboszlai, B. Kovács: (2005) Determination of trace elements in human liver biopsy samples by ICP-MS and TXRF: hepatic steatosis and nickel accumulation. Analytical and Bioanalytical Chemistry. **383**(3):476-482.
- Ventura M. G., M. D. C. Freitas, A. Pacheco, T. van Meerten, H. T. Wolterbeek: (2007) Selenium content in selected Portuguese foodstuffs. European Food Research and Technology. **224**:395-401.
- Vieira R. F., E. J. B. N. Cardoso, C. Vieira, S. T. A. Cassini: (1998) Foliar application of molybdenum in common beans. I. Nitrogenase and reductase activities in a soil of high fertility. Journal of Plant Nutrition. **21**(1):169-180.
- Vyskočil A., C. Viau: (1999) Assessment of molybdenum toxicity in humans. Journal of Applied Toxicology. **19**:185-192.
- Waddell R., C. Lewis, W. Hang, C. Hassell and V. Majidi: (2005) Inductively coupled plasma mass spectrometry for elemental speciation: applications in the new millennium. Applied Spectroscopy Reviews. **40**:33-69.
- Wagstaff D. J.: (2008) International poisonous plants checklist: an evidence-based reference. Taylor and Francis Group, Boca Raton.
- Wang Z. Y., Y. L. Tang, F. S. Zhang: (1999) Effect of molybdenum on growth and nitrate reductase activity of winter wheat seedlings as influenced by temperature and nitrogen treatments. Journal of Plant Nutrition. **22**(2):387-395.
- Ward G. M.: (1978) Molybdenum toxicity and hypocuprosis in ruminants: a review. Journal of Animal Science. **46**(4):1078-1085.
- White P. J., H. C. Bowen, P. Parmaguru, M. Fritz, W. P. Spracklen, R. E. Spiby, M. C. Meacham, A. Mead, M. Harriman, L. J. Trueman, B. M. Smith, B. Thomas, M. R. Broadley: (2004) Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. Journal of Experimental Botany. **55**(404):1927-1937.
- White P. J., P. H. Brown: (2010) Plant nutrition for sustainable development and global health. Annals of Botany. **105**:1073-1080.
- White P. J.: (2015) Selenium accumulation by plants. Annals of Botany. **117**:217-235.
- White P. J.: (2017) The genetics of selenium accumulation by plants. In: Pilon-Smits E. A. H., L. H. E. Winkel, Z-Q. Lin (eds.): Selenium in plants. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland. 143-163.

WHO (World Health Organization): (2011a) Evaluation of certain food additives and contaminants. Arsenic and mercury. WHO Technical Report Series 959. Geneva, Switzerland: WHO.

WHO (World Health Organization): (2011b) Molybdenum in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. WHO/SDE/WSH/03.04/11/Rev/1. WHO Press, Geneva, Switzerland.

WHO (World Health Organization): (2011c) Selenium in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. WHO/HSE/WSH/10.01/14

Williams R. J. P., J. J. R. Frausto da Silva: (2002) The involvement of molybdenum in life. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. **292**:293-299.

Woollins J. D., R. S. Laitinen: (2011) Selenium and tellurium chemistry: from small molecules to biomolecules and materials. Springer-Verlag, Berlin.

Wright R. O., W. J. Lewander, A. D. Woolf: (1999) Methemoglobinemia: etiology, pharmacology, and clinical management. *Annals of Emergency Medicine*. **34**(5):646-656.

Wu L. L.: (1994a) Selenium accumulation and uptake by crop and grassland plant species. In: Frankenberg W. T., R. A. Engberg (eds.): *Environmental chemistry of selenium*. Marcel Dekker Inc., New York. 657-686.

Wu L., A. Enberg, K. K. Tanji: (1993) Natural establishment and selenium accumulation of herbaceous plant species in soils with elevated concentrations of selenium and salinity under irrigation and tillage practices. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **25**:127-140.

Wu L.: (1994b) Selenium accumulation and colonization of plants in soils with elevated selenium and salinity. In: Frankenberg W. T., S. Benson (eds.): *Selenium in the environment*. New York: Marcel Dekker. 279-326.

Xu N., W. Braida, C. Christodoulatos, J. Chen: (2013) A review of molybdenum adsorption in soils/bed sediments: speciation, mechanism, and model applications. *Soil and Sediment Contamination*. **22**:912-929.

Xue T., H. Hartikainen, V. Piironen: (2001) Antioxidative and growth-promoting effect of selenium in senescing lettuce. *Plant and Soil*. **237**:55-61.

Yaneva I., G. Mack, R. Vunkova-Radeva, R. Tischner: (1996) Changes in nitrate reductase activity and the protective effect of molybdenum during cold stress in winter wheat grown on acid soil. *Journal of Plant Physiology*. **149**:211-216.

Yang G, R. Zhou, S. Yin, L. Gu, B. Yan, Y. Liu, X. Li: (1989) Studies of safe maximal daily dietary selenium intake in seleniferous area in China. I. selenium intake and tissue levels of the inhabitants. *Journal of Trace Elements and Electrolytes in Health and Disease*. **3**:77-87.

Yang G., S. Wang, R. Zhou, S. Sun: (1983) Endemic selenium intoxication of humans in China. *The American Journal of Clinical Nutrition*. **37**:872-881.

Yaws C. L.: (2011) *Yaws handbook of properties of the chemical elements*. Knovel.

Ysart G., P. Miller, H. Crews, P. Robb, M. Baxter, C. De L'Argy, S. Lofthouse, C. Sargent, N. Harrison: (1999) Dietary exposure estimates of 30 elements from the UK Total Diet Study. *Food Additives and Contaminants*. **16**(9):391-403.

Yu M., C. Hu, X. Sun, Y. Wang: (2010) Influences of Mo on nitrate reductase, glutamine synthetase and nitrogen accumulation and utilization in Mo-efficient and Mo-inefficient winter wheat cultivars. *Agricultural Sciences in China*. **9**(3):355-361.

Zachara B. A., Pilecki A.: (2000) Selenium concentration in the milk of breast-feeding mothers and its geographic distribution. *Environmental Health Perspectives*. **108**(11):1043-1046.

Zaijun L., Y. Yuling, T. Jian, P. Jiaomai: (2005) 9-(2,4-dihydroxyphenyl)-2,3,7-trihydroxyl-6-fluorone as analytical reagent for spectrophotometric determination of molybdenum in plant tissues. *Journal of Food Composition and Analysis*. **18**:561-569.

Zakikhani H., M. K. Yusop, A. R. Anuar, O. Radziah, A. Soltangheisi: (2014b) Effects of different levels of molybdenum on uptake of nutrients in rice cultivars. *Asian Journal of Crop Science*. 1-9.

Zakikhani H., M. K. Yusop, A. Soltangheisi: (2014a) Effects of molybdenum on phosphorus concentration in rice (*Oryza sativa* L.). *World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*. **8**(7):633-635.

Zamberlin Š., N. Antunac, J. Havranek, D. Samaržija: (2012) Mineral elements in milk and dairy products. *Mljekarstvo*. **62**(2):111-125.

Zarcinas B., A., B. Cartwright, L. R. Spouncer: (1987) Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **18**:131-146.

Zayed A., C. M. Lytle, N. Terry: (1998) Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta*. **206**:284-292.

Zdunek-Zastocka E., H. S. Lips: (2003) Plant molybdoenzymes and their response to stress. *Acta Physiologiae Plantarum*. **25**(4):437-452.

Zhao C., J. Ren, C. Xue, E. Lin: (2005) Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake. *Plant and Soil*. **277**:197-206.

Zimmer W., R. Mendel: (1999) Molybdenum metabolism in plants. *Plant Biology*. **1**:160-168.

9. 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 Imrénének†, aki egyrészt azt javasolta, hogy ne csak a szelén vizsgálatával foglalkozzak, hanem egyéb elemek vizsgálatát is végezzem el, másrészt a Nagyhörcsöki 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 kivitelezhettük 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 kivitelezhettük 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.

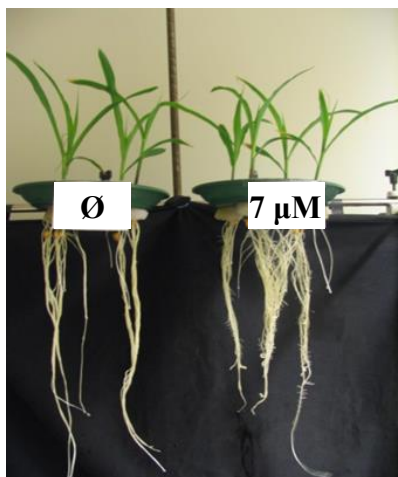
Köszönettel tartozom Prof. Dr. Sárvári Mihálynak és Prof. Dr. Csapó Jánosnak, hogy a disszertáció végleges formájának elkészítéséhez számos szakmai és grammatikai tanácsot nyújtottak, továbbá köszönöm Dr. Huzsvai Lászlónak a statisztikai elemzésekhez nyújtott tanácsait.

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.

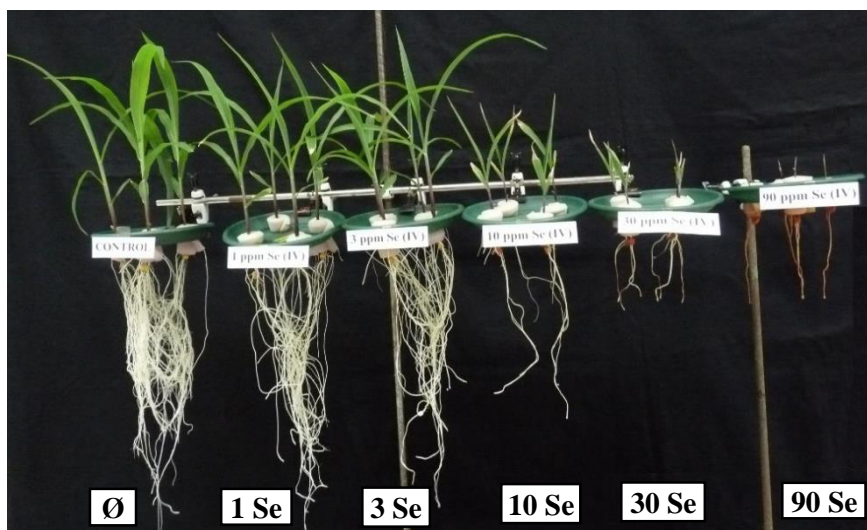
10. MELLÉKLETEK



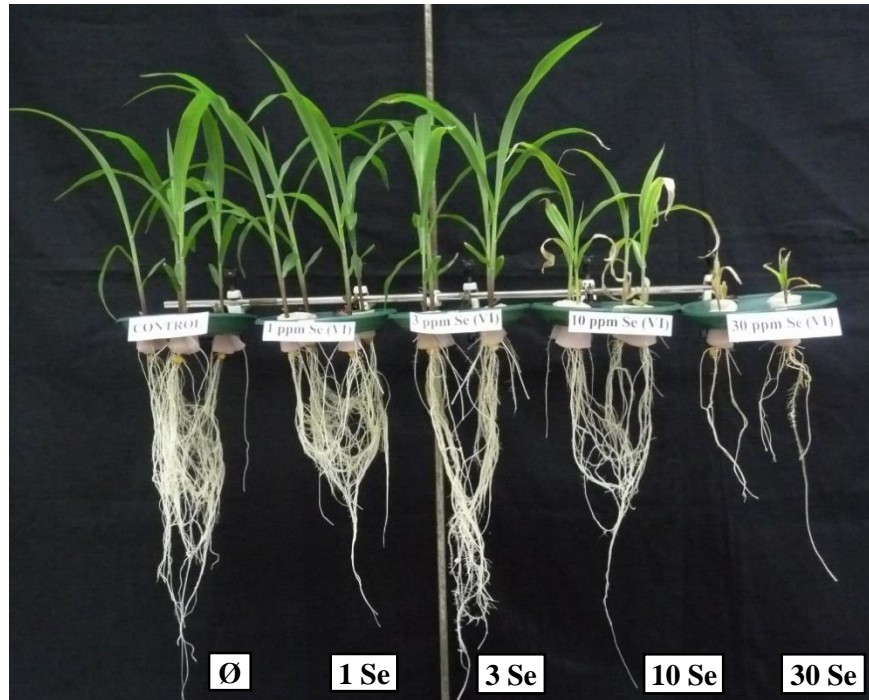
1. fotó: Molibdén kezelés (kontroll és 7 µM) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



2. fotó: Molibdén kezelés (kontroll és 7 µM) hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



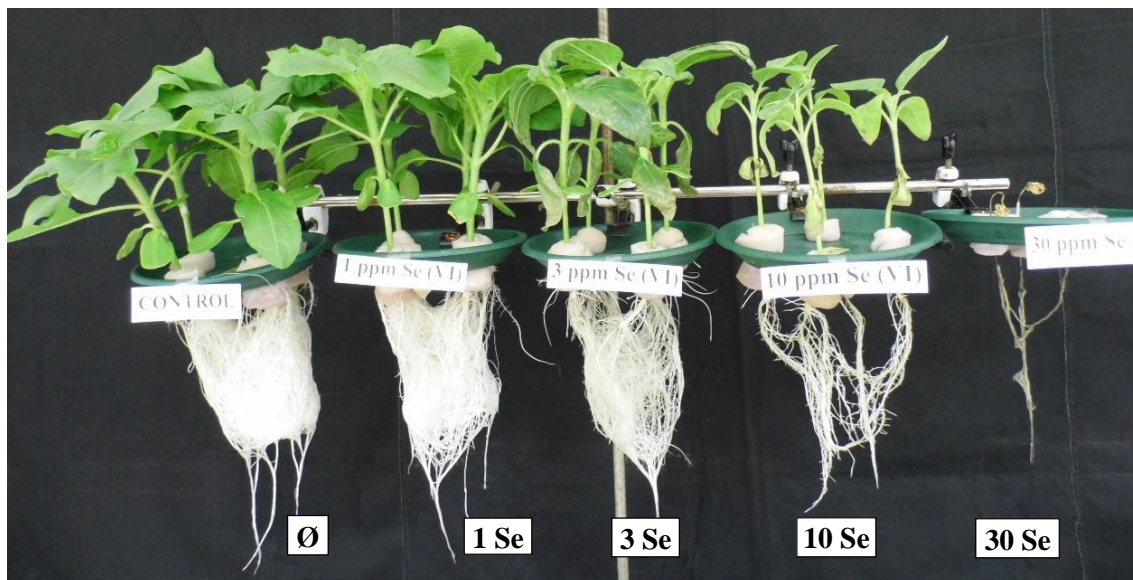
3. fotó: Szelenit (Se(IV)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg dm⁻³) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



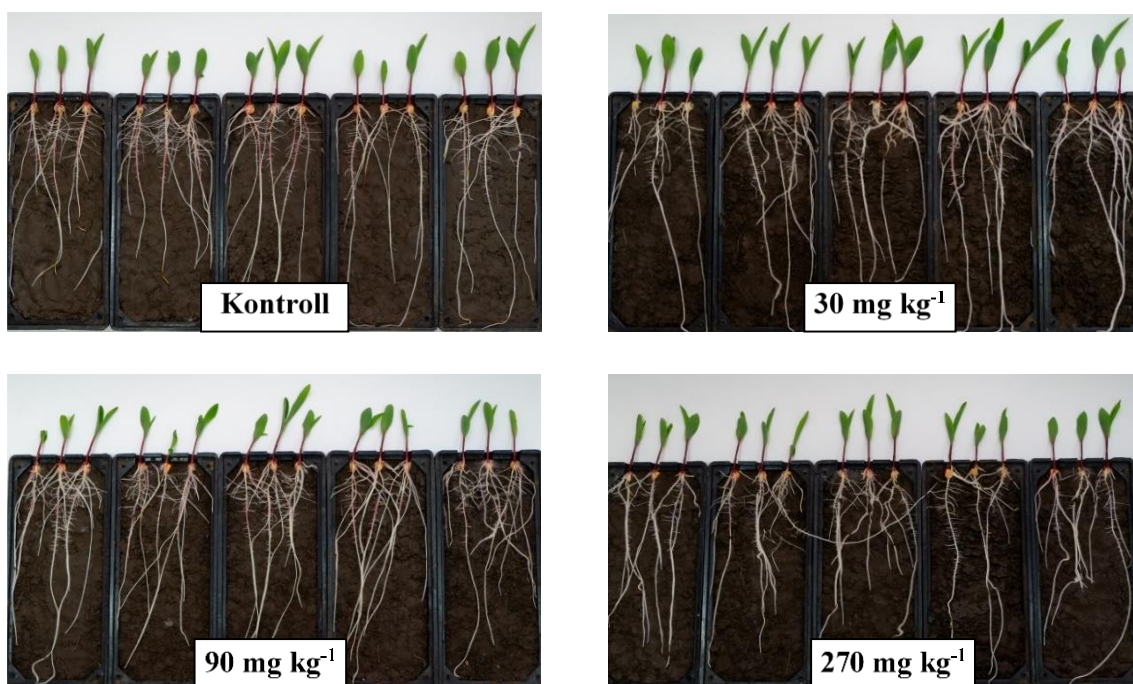
4. fotó: Szelenát (Se(VI)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 mg dm⁻³) hatása a tápoldaton nevelt kukorica-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



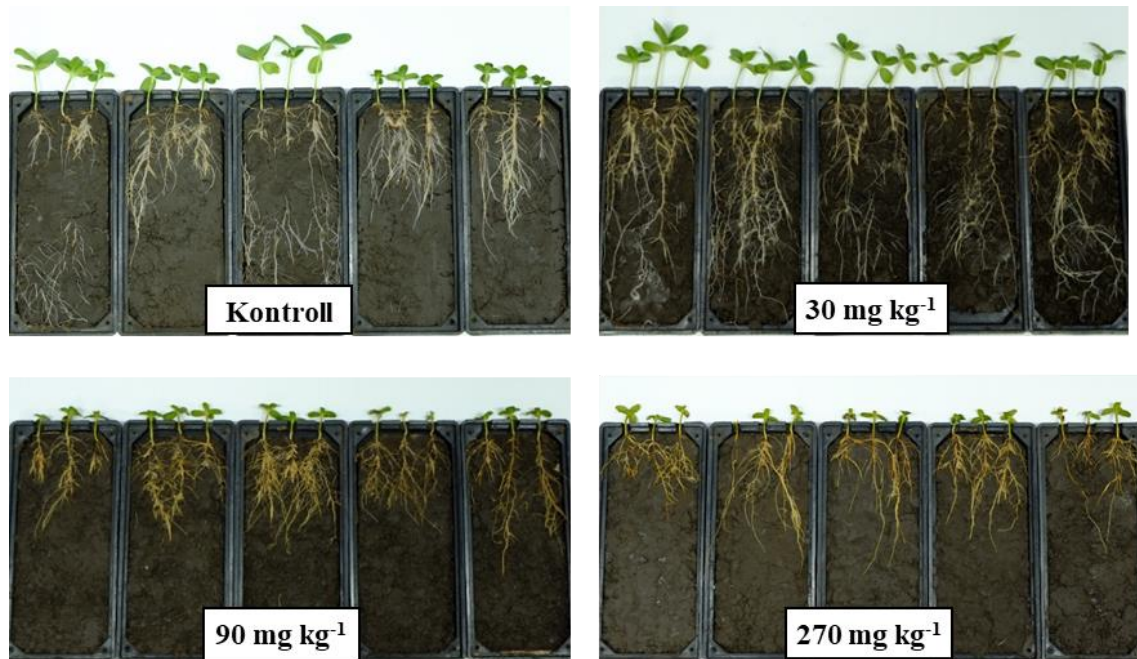
5. fotó: Szelenit (Se(IV)) kezelés (kontroll, 1, 3, 10, 30 és 90 mg dm⁻³) hatása a tápoldaton nevelt napraforgó-csíránövény gyökér és hajtás növekedésére



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



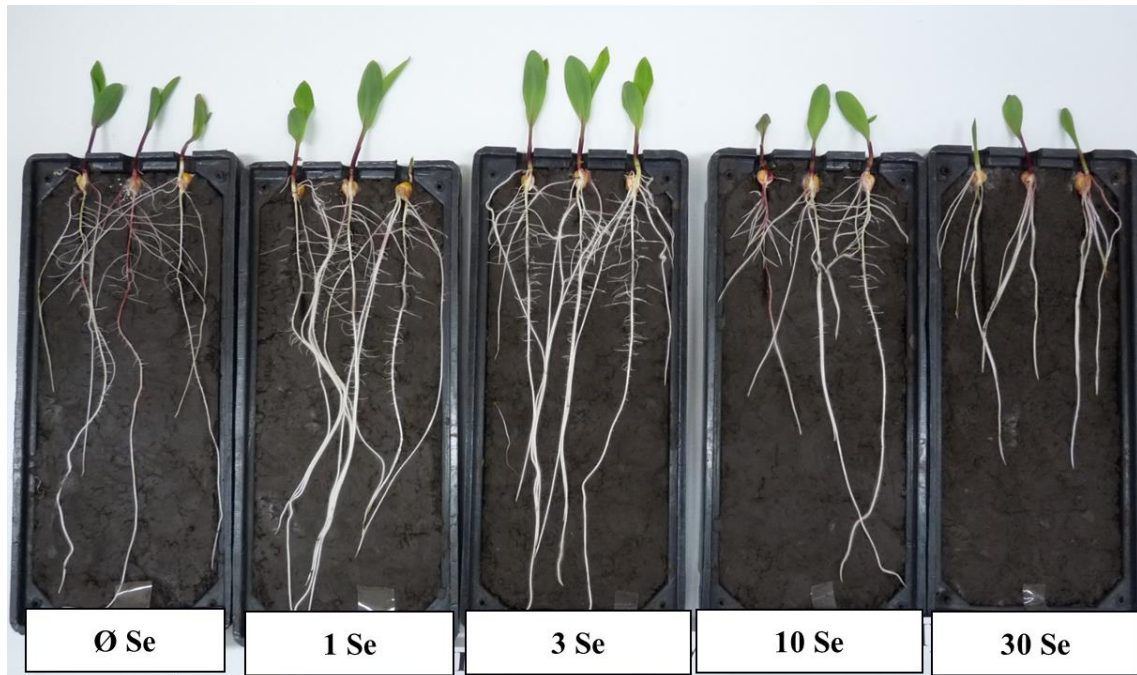
7. fotó: Molibdén kezelés (kontroll, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) hatása a rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény fejlődésére



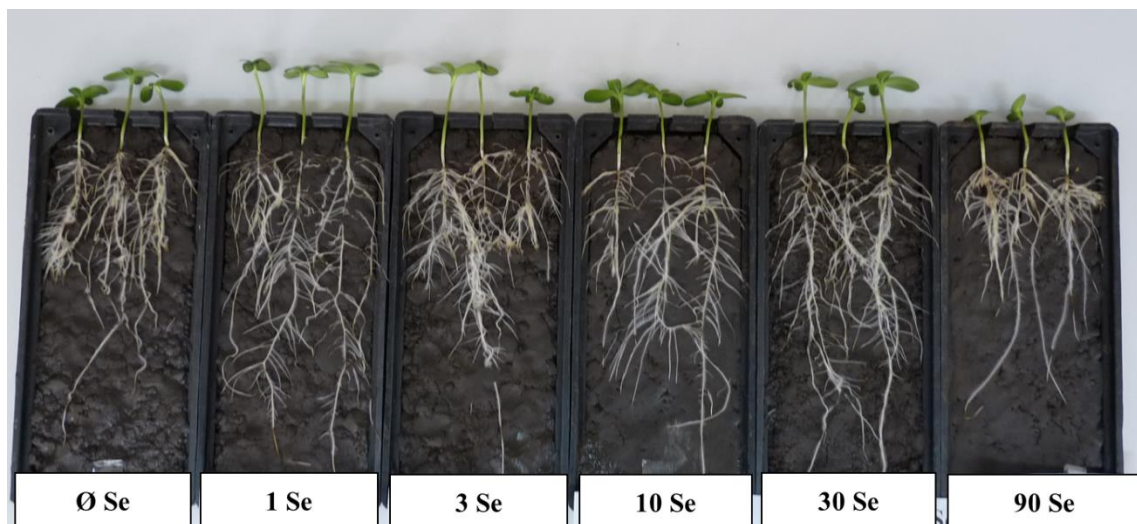
8. fotó: Molibdén kezelés (kontroll, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) hatása a rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény fejlődésére



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



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



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



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



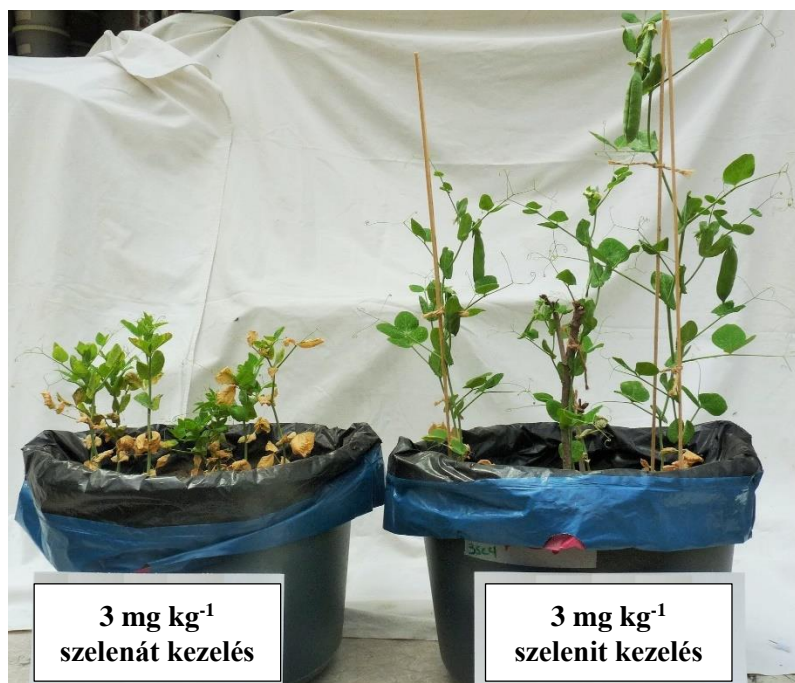
13. fotó: Molibdén kezelés (0, 3, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) hatása a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére, virágzás kezdetén, azaz a 2. mintavétel alkalmával



14. fotó: Molibdén kezelés (0, 3, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) hatása a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére, zöldérés fenofázisban



15. fotó: Az 1 mg kg⁻¹-os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére



16. fotó: A 3 mg kg⁻¹-os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére



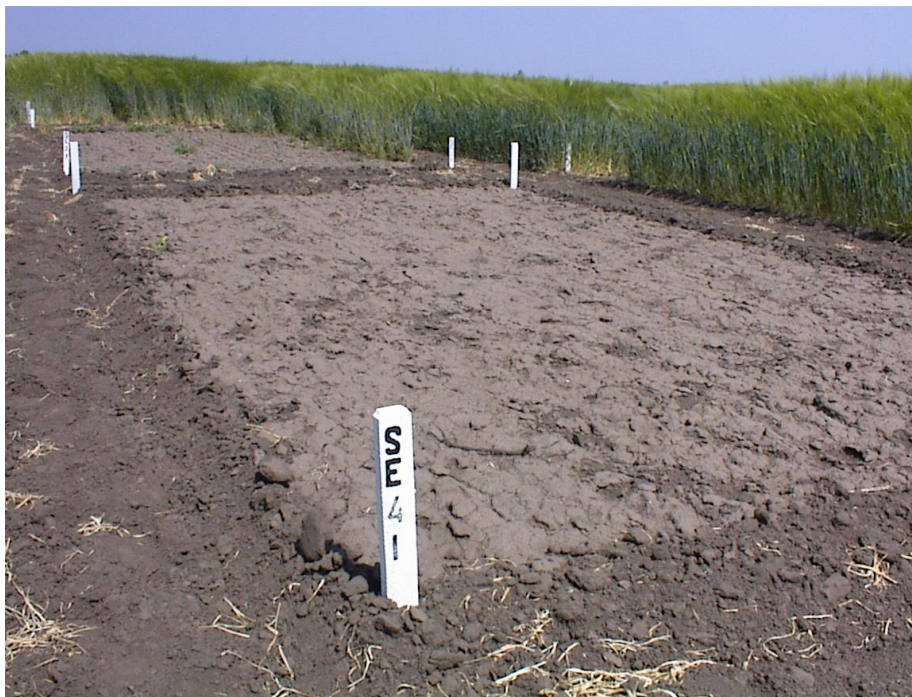
17. fotó: A 10 mg kg⁻¹-os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére



18. fotó: A 30 mg kg⁻¹-os szelén kezelés hatása szelenát formában (bal oldali fotó) és szelenit formában (jobb oldali fotó), a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére



19. fotó: A 10 mg kg⁻¹-os (bal oldali fotó) és a 30 mg kg⁻¹-os szelenát kezelés hatása a tenyészedényben nevelt borsó fejlődésére, felülről nézve



20. fotó: A nagyhőrsöki szabadföldi kísérlet Se₄I-es parcellája (előtérben), valamint a Se₃I-es parcellája (háttérben), melyen kísérleti növényként, a kísérlet 10. évében (2000-ben) őszi árpát alkalmaztak. Az I-es szám a kísérlet első ismétlését jelenti, míg a 4-es és a 3-as számok a 270 mg kg⁻¹-os (810 kg ha⁻¹), illetve a 90 mg kg⁻¹-os (270 kg ha⁻¹) szelén dózisokat jelöli.