

Válasz Prof. Dr. Murányi Attilának, az MTA doktorának
Kovács Béla: Molibdén és szelén vizsgálata tápoldat-növény és talaj-növény
rendszerben című MTA doktori értekezéséről készített bírálatára

Köszönöm Opponensemnek, Prof. Dr. Murányi Attilának, az MTA doktorának, hogy elvállalta MTA doktori értekezésem bírálatát. Köszönöm elismerő szavait és jobbitó szándékú megjegyzéseit, javaslatait, továbbá kérdéseit, melyek megválaszolásával remélhetőleg sikerül jobban megvilágítanom egyes, a disszertációban nem teljesen egyértelmű, vagy kevésbé tisztázott részleteket.

Elfogadom Opponensem azon kritikai megjegyzéseit, mely a mértékegységek használatára vonatkozik, ezen belül is igazat kell adnom annak az észrevételének, miszerint $\mu\text{g dm}^{-3}$ az esővizek koncentrációjának helyes mértékegysége. Természetesen Professzor Úr azon véleményét is elfogadom, mely szerint a nagyobb ismétlési szám megbízhatóbb eredményeket biztosítana a következtetések megfogalmazásához. Megfogadom Opponensem azon tanácsát, miszerint „Óvatosan kell fogalmazni a növényekre vonatkozó általános következtetések megfogalmazásánál.”, melyet figyelembe fogok venni a következő publikációk írásánál. Köszönöm az értekezés címének pontosítására tett javaslatát is.

Professzor Úr azt írja a bírálatában, hogy a tápoldat már eleve tartalmazott $0,07 \mu\text{M}$, azaz $6,72 \mu\text{g kg}^{-1}$ molibdén koncentrációt, mely megfelel a növények fiziológiás igényének. A disszertációmban megfogalmazott mondatokat visszaolvasva, tényleg nem egyértelmű a megfogalmazás, nem lehet biztosan tudni, hogy a molibdén kezelések, ezen belül is a kontroll kezelés mennyi molibdént tartalmazott. Természetesen a molibdén kezelések beállításakor, a tápoldatok összeállításakor figyelembe vettük, hogy az „alaptápoldatba” ne adagoljunk pluszban molibdént, így a dolgozatomban feltüntetett molibdén koncentrációkat alkalmaztuk. Ennek megfelelően a tápoldatos kezelések molibdénre vonatkozó koncentrációi a következők voltak: \emptyset , $0,07$; $0,7$; $7 \mu\text{M}$, azaz \emptyset , $6,72$, $67,2$ és $672 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Opponensem a bírálatában megjegyezte, hogy a 37-39. táblázatokban „érdemes lenne bemutatni a teljes csiranövény (gyökér+hajtás) összesített tömegét”. Az alábbiakban teljesítem Opponensem ezen kérését, amelynél a gyökerek és hajtások átlag tömegeit használtam az összesített tömegek kiszámítására:

37. táblázat (módosított): A rizoboxban nevelt kukorica- és napraforgó-csíránövény gyökere, hajtása és a teljes csíránövények száraz tömege (g növény⁻¹) a molibdén kezelések függvényében

Mo-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica-csíránövény			Napraforgó-csíránövény		
	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény
Ø	0,0400	0,0238	0,0638	0,0201	0,0531	0,0732
30	0,0394	0,0267	0,0661	0,0255	0,0608	0,0863
90	0,0374	0,0308	0,0682	0,0156	0,0379	0,0535
270	0,0305	0,0210	0,0515	0,0115	0,0347	0,0462

38. táblázat (módosított): A rizoboxban nevelt kukorica-csíránövény gyökere, hajtása és a teljes csíránövények száraz tömege (g növény⁻¹) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica-csíránövény					
	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény
	Szelenit	Szelenit	Szelenit	Szelenát	Szelenát	Szelenát
Ø	0,0492	0,0309	0,0801	0,0492	0,0309	0,0801
1	0,0431	0,0257	0,0688	0,0623	0,0267	0,0890
3	0,0606	0,0279	0,0885	0,0423	0,0237	0,0660
10	0,0465	0,0241	0,0706	0,0540	0,0226	0,0766
30	0,0463	0,0212	0,0675	0,0309	0,0141	0,0450
90	0,0399	0,0144	0,0543			

39. táblázat (módosított): A rizoboxban nevelt napraforgó-csíránövény gyökere, hajtása és a teljes csíránövények száraz tömege (g növény⁻¹) a szelenit és a szelenát kezelések függvényében

Se-kezelés (mg kg ⁻¹)	Napraforgó-csíránövény					
	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény	Gyökér	Hajtás	Teljes csíránövény
	Szelenit	Szelenit	Szelenit	Szelenát	Szelenát	Szelenát
Ø	0,0240	0,0442	0,0682	0,0240	0,0442	0,0682
1	0,0237	0,0496	0,0733	0,0191	0,0641	0,0832
3	0,0290	0,0475	0,0765	0,0123	0,0542	0,0665
10	0,0200	0,0509	0,0709	0,0077	0,0533	0,0610
30	0,0287	0,0538	0,0825	0,0072	0,0586	0,0658
90	0,0252	0,0347	0,0599			

Külön köszönöm Opponensem azon megállapítását, hogy a dolgozatom tudományos szempontból rendkívül érdekes, és hogy a Kádár Imre mikroelem terhelési kísérletéhez való csatlakozásomat a tudományos értékmentés kategóriájába sorolja.

A válaszom további részében Prof. Dr. Murányi Attila kérdéseire adott válaszaimat abban a sorrendben fogom megfogalmazni, ahogy azok az opponensi bírálatában szerepelnek.

1. kérdés: A kísérleti eredmények alapján mi tekinthető az optimális molibdén, illetve szelén koncentrációnak a karbonátos talajokban?

A molibdén és a szelén esszenciális mikroelemek a növényi táplálkozásban, továbbá az állati, illetve emberi táplálékláncban. Karbonátos talajokon történő alkalmazásuk különös figyelmet igényel, mivel ezek a talajok gyakran lúgos pH-júak, amely alapvetően befolyásolja a molibdén és szelén hozzáférhetőségét a növények számára.

A karbonátos talajok molibdén és szelén koncentrációja optimális szintjének meghatározása egy komplex kérdés, amely kérdés megválaszolásánál többféle szempont szerint is végezhetjük a válasz megfogalmazását. Ezek közül a válaszomban kétféle típusú optimális molibdén és szelén koncentráció meghatározását mutatom be a következőkben, a kutatómunkámban alkalmazott látóképi talajra vonatkozóan:

a. A tápanyag-ellátottság optimalizálása a maximális növényi tömeg elérése érdekében

A molibdén esetében az optimális koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimnél, az Opponensem által kért módosított táblázat (37. táblázat (módosított)) teljes csíranövényre vonatkozó adatai alapján:

kukorica csíranövénynél: 90 mg kg^{-1} ,
napraforgó csíranövénynél: 30 mg kg^{-1} .

Szelenit kezelés esetében az optimális szelén koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimnél, az Opponensem által kért módosított táblázatok (38-39. táblázatok (módosított)) teljes csíranövényre vonatkozó adatai alapján:

kukorica csíranövénynél: 3 mg kg^{-1} ,
napraforgó csíranövénynél: 30 mg kg^{-1} .

Szelenát kezelés esetében az optimális szelén koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimnél, az Opponensem által kért módosított táblázatok (38-39. táblázatok (módosított)) teljes csíranövényre vonatkozó adatai alapján:

kukorica csíranövénynél: 1 mg kg^{-1} ,
napraforgó csíranövénynél: 1 mg kg^{-1} .

A tenyészedényes kísérletben alkalmazott borsó növényre is elvégeztem az egyes növényi részek száraz tömegeinek az összeadását, azaz a teljes növény száraz tömegei meghatározását, mely adatok alapján megállapítottam az Opponensem kérdésének megfelelően az optimális molibdén, illetve szelén koncentrációkat. A molibdén esetében az optimális koncentráció a tenyészedényben végzett kísérleteimnél, a borsó zöldérés, valamint a teljesérés fenofázisában a teljes növényre vonatkozó adatok alapján:

borsó, zöldérés fenofázisban: 30 mg kg^{-1} ,

borsó, teljesérés fenofázisban: 30 mg kg^{-1} .

Szelenit és szelenát kezelés esetében az optimális szelén koncentráció a tenyészedényben végzett kísérleteimnél, a borsó teljesérés fenofázisában a teljes növényre vonatkozó adatok alapján:

borsó, szelenit kezelés: 3 mg kg^{-1} ,

borsó, szelenát kezelés: 0 mg kg^{-1} .

Azaz a szelenát kezelés legkisebb alkalmazott szintjénél (1 mg kg^{-1}) is már a teljes növény száraz tömegének csökkenését tapasztaltuk, a kontroll kezeléshez képest.

b. Fitoremediációs szempontok

Lehetőség van arra, hogy a fitoremediáció egyik speciális ágával, a fitoextrakcióval az alkalmazott növények gyökerei felvegyék a talajoldatban és talajban lévő nagy koncentrációban jelen lévő molibdát-, szelenit- és szelenát-ionokat, majd a potenciális szennyező anyagok a növény föld feletti részeibe kerülnek (levél, szár, mag). Az adott növény föld feletti részének betakarítása után a szennyező anyagokat a biomasszával együtt eltávolítjuk. Ennél a technikánál azt tekinthetjük célnak, hogy a növények minél nagyobb mennyiségű molibdént és szelént halmozzanak fel a növény föld feletti részeiben, amelyet aztán a betakarítással eltávolítunk.

A molibdén esetében az optimális koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimnél, a molibdén tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$) adatok alapján:

kukorica csíranövénynél: 90 mg kg^{-1} ,

napraforgó csíranövénynél: 90 mg kg^{-1} .

Szelenit kezelés esetében az optimális szelén koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimnél, a szelén tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$) adatok alapján:

kukorica csíranövénynél: 90 mg kg^{-1} ,

napraforgó csíranövénynél: 30 mg kg^{-1} .

Szelenát kezelés esetében az optimális szelén koncentráció a rizoboxban végzett kísérleteimmél, a szelén tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$) adatok alapján:

kukorica csíranövénynél: 30 mg kg^{-1} ,

napraforgó csíranövénynél: 30 mg kg^{-1} .

A tenyészedényes kísérletben alkalmazott borsó növényre is megállapítottam az optimális molibdén és szelén koncentrációt, a molibdén és szelén tömege a hajtásban ($\mu\text{g növény}^{-1}$) adatok alapján. Ennek megállapításánál is azt tekintettem célnak, hogy a borsó növények minél nagyobb mennyiségű molibdént és szelént halmozzanak fel a növény föld feletti részeiben, amelyet aztán a betakarítással eltávolíthatunk. Minél nagyobb szintű volt a molibdén, szelenit, vagy a szelenát kezelés, annál nagyobb mértékű volt a borsó föld feletti részei által felvett molibdén vagy szelén mennyisége. Ennek megfelelően mind a molibdénnél, mind a szelenitnél, valamint a szelenátnál is az általam használt legnagyobb kezelések (egyfajta optimális koncentrációk) adták azt a legnagyobb molibdén és szelén mennyiséget, melyet a borsó növények föld feletti részei tartalmaztak. Ezek a legnagyobb koncentrációjú kezelések a következők voltak:

molibdén kezelés, teljesérés fenofázisban: 270 mg kg^{-1} ,

szelenit kezelés, teljesérés fenofázisban: 90 mg kg^{-1} ,

szelenát kezelés, teljesérés fenofázisban: 1 mg kg^{-1} .

2. kérdés: Az értekezés erőssége a négy különböző módszer (tápoldatos, rizoboxos, tenyészedényes és szántóföldi kísérletek) alkalmazása a molibdén és szelén felvételének vizsgálatára. Megfogalmazhatók-e olyan szintetizált következtetések, amit a különböző módszerek eredményei külön-külön is alátámasztanak? Tovább emelnék az értekezés értékét az eltérő kísérletek által igazolt új tudományos eredmények.

Az MTA doktori kutatómunkám során molibdén (molibdát) és szelén (szelenit és szelenát) adagolást végeztem tápoldatos, rizoboxos, tenyészedényes és szabadföldi kísérletekben, melyeknél egyszikű és kétszikű teszt növényeket alkalmaztam. Eredetileg én is azt terveztem, hogy majd a fenti négy típusú kísérletben elért közös eredményeket fogok megfogalmazni. Többféle típusú eredményt (pl. akkumulátor, vagy hiperakkumulátor növény, fitotoxikus hatás, bioakkumulációs (BAF) és transzlokációs faktor (TF) értékek, a gyökérben volt nagyobb az adott elem, vagy a hajtásban) állapítottam meg az értekezésemben és hasonlítottam össze, de egyik esetén sem tudtam ugyanazt a mintázatot megállapítani, mely mind a négy típusú kísérletre igaz lett volna. Természetesen olyan közös megállapításokat tehettem volna, mint például: minél nagyobb volt a molibdát, szelenit, vagy szelenát kezelés, annál nagyobb molibdén és szelén koncentrációkat mértünk a növényi részekben. Ezt a nyilvánvaló tény azonban nem kívántam

feltüntetni „közös motívumnak”. Megjegyzem, a szintetizált következtetések levonását az is befolyásolta, hogy nem minden esetben tudtuk ugyanazokat a növényeket termesztani ugyanolyan termesztési körülmények között, így a megállapítások levonása is korlátokkal terhelt.

Az így szerzett adatok egyértelműen alátámasztják, hogy a molibdén és szelén különböző koncentrációjú kezelése a különböző növényi rendszerekben hasonló biológiai reakciókat indukáltak, de a növényi típusok és a kezelési módok között jelentős különbségek voltak. Ezért úgy gondolom, hogy a molibdén és szelén növényi felvételével és transzlokációjával kapcsolatos mechanizmusok tanulmányozásához további kutatások szükségesek.

3. kérdés: A tenyészedényes kísérletben használt látóképi talaj 6,04 mg kg⁻¹ ként is tartalmaz szulfát formájában. A borsó tesztnövény kéntartalma is mérésre került. A növényi felvétel során kialakult-e kompetíció a nagy adagú szelénformák és a szulfátionok között? Amennyiben igen, akkor az eredmények nemzetközi érdeklődésre tarthatnak számot és publikálni kellene egy színvonalas nemzetközi tudományos folyóiratban. (E kérdés megválaszolása nem tartozik szorosan az értekezés megvédéséhez.)”

Amint Opponensem írja, „E kérdés megválaszolása nem tartozik szorosan az értekezés megvédéséhez”. Mivel az értekezésem célkitűzései nem irányultak ilyen irányú kérdések megválaszolására, ez így is van, viszont szeretnék erre vonatkozóan is választ adni, legalábbis amennyi kiértékelt eredménnyel már rendelkezem.

A növényi felvétel során valóban kialakulhat kompetíció a szelénformák, különösen a szelenát ionok, és a szulfátionok között. Ennek oka, hogy mindkét ion azonos transzportmechanizmusokon keresztül kerül felvételre a növényekben, főként az ATP-függő szulfátion-transzporterek révén. Ezért a talajban lévő nagy mennyiségű szulfátion csökkentheti a szelenát-felvétel hatékonyságát. Érdeemes megjegyezni, hogy a szelenit ionok felvétele más mechanizmusokon keresztül történik, így a szulfátionokkal való kompetíció főként a szelenátra korlátozódik. Ezért a szelenit alkalmazása csökkentheti a szulfátionokkal való versengés hatását.

A kísérletekben a molibdénen és szelénen kívül számos elem nagyműszeres vizsgálatát elvégeztük. A mérési adatok közül viszont nem mindegyik adatsor kiértékelése történt meg. Sajnálatos módon éppen a szelenit-szelenát kezelésű tenyészedényes kísérletekben még csak a szelén mérési eredmények kerültek kiértékelésre. Így az MTA doktori értekezésemben található eredményeken túlmenően, erre vonatkozó eredményekkel nem tudok szolgálni.

A tenyészedényes kísérletben a molibdén kezeléseket viszont már kiértékeljük, amelynél a következő kompetíció alakult ki: ha a molibdát koncentrációt növeltük a talajban, a foszfor tartalom nőtt a borsó részekben általában a 30 mg kg⁻¹-os molibdén kezelés biztosította a legnagyobb foszfor koncentrációt. A kén tartalom alakulását vizsgálva pedig megállapítható, hogy már a 3 mg kg⁻¹ molibdén kezelés is csökkentette a borsó növényi részek kén tartalmát, kivéve a borsóhüvelyt, ahol a 3-90 mg kg⁻¹ koncentráció tartományban szignifikáns kén tartalom növekedést értünk el.

A szelenit-szulfát, szelenát-szulfát kompetícióra viszont a rizoboxos kísérlet során már vannak kiértékelte eredményeim. A kukorica csíranövényt szelenittel és szelenáttal kezelve egyaránt az 1 mg kg⁻¹-os szelén kezelés szelenit és szelenát formájában megnövelte a csíra és gyökér kén tartalmát, viszont a nagyobb kezelések már jelentős mértékben csökkentették a kén tartalmukat. Ugyanez majdnem elmondható a napraforgó csíranövényre is, viszont a napraforgó csíranövény gyökerének kén tartalma a 3 mg kg⁻¹-os kezelés hatására megközelítően negyed részére esett vissza.

Végezetül külön szeretném megköszönni Opponensemnek, hogy az új tudományos eredményeim közül külön kiemelte, legfontosabbnak ítélte azokat a tézispontokat, amelyek a tenyészedényes kísérletre és a Nagyhöröcsöki szabadföldi kísérletre vonatkoznak.

A válaszom végén szeretném ismételt megköszönni Murányi Attilának, az MTA doktorának, hogy az értekezésemet alaposan áttanulmányozta, részletesen értékelte, és kérem Opponensem, hogy a megjegyzéseire és a kérdéseire adott válaszaimat legyen szíves elfogadni.

Debrecen, 2025.01.26.



Dr. Kovács Béla