

Debreceni Egyetem
Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar
Növénytudományi Intézet
Mezőgazdasági Növényteni, Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék

A mangán-szilícium-baktériumtrágya kölcsönhatás vizsgálata hidropóniásan nevelt kukoricánál

készítette:
Bojtor Csaba
II. éves mezőgazdasági mérnök BSc hallgató

konzulens:
Dr. Tóth Brigitta
egyetemi tanársegéd

Debrecen
2014

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
2. 1. A mangán (Mn)	4
2. 1. 1. Általában a mangánról.....	4
2. 1. 2. A Mn fotoszintézisben betöltött szerepe	4
2. 1. 3. Fehérjék, szénhidrátok és lipidek kapcsolata a mangánnal.....	5
3. 1. 4. Mn-hiánytünetek	5
3. 1. 5. Toxikus tünetek	6
3. 1. 6. Mangán mobilizációja a növényben.....	7
3. 2. A vas (Fe).....	8
3. 2. 1. Általában a vasról.....	8
3. 2. 2. Vas felvétele és mobilizációja a növényben.....	8
3. 2. 3. A Fe (III) – EDTA és a Fe (III) citrát.....	9
3. 3. Szilícium (Si).....	9
3. 3. 1. Általában a szilíciumról	9
3. 3. 2. A Si-felvétele, koncentrációja és eloszlása a növényen belül.....	9
2. 3. 3. A Si növényi anyagcserében játszott szerepe.....	10
2. 3. 4. A Si kedvező hatásai a növényekben	11
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	13
3. 1. A tápoldaton nevelt növényekkel végzett vizsgálatok	13
3. 2. Talajon nevelt növények	13
3. 3. A minták kémiai analízise	15
3. 4. A relatív klorofill tartalom meghatározása (SPAD-Units).....	16
3.5. A klorofill-a, b és karotinoid meghatározása spektrofotometriásan.....	16
3. 6. A száraz tömeg mérése.....	17
3. 7. Az alkalmazott baktériumtrágyák	17
3. 8. Az eredmények statisztikai kiértékelése	17
4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK	18
4. 1. A mangán (Mn) és a baktérium tartalmú trágyák hatásának vizsgálata tápoldatos kísérletben	18
4. 1. 1. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica száraz tömegére.....	18
4. 1. 2. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica relatív klorofill tartalmára	24
4. 1. 3. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica abszolút klorofill tartalmára ...	27
4. 2. A Mn-Fe interakció és a szilícium (Si) hatásának vizsgálata tápoldatos kísérletben...	32
4. 2. 1. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica száraz tömegére Mn-toxikózis mellett.....	32
4. 2. 1. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica relatív klorofill tartalmára Mn-toxikózis mellett	35
4. 2. 2. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica abszolút klorofill tartalmára Mn-toxikózis mellett	37
4. 3. A Mn-iszap lehetséges szerepe a tápanyag-utánpótlásban.....	39
4. 3. 1. Táphengeres kísérlet.....	39
4. 3. 2. Rhizoboxos kísérlet	41
5. KÖVETKEZTETÉSEK	45
ÖSSZEFOGLALÁS	46
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	47
IRODALOMJEGYZÉK.....	48

1. BEVEZETÉS

A mai globalizálódó világunkban az egyik legalapvetőbb cél az emberi szükségletek megfelelő kielégítése. A növekvő népesség megfelelő életszínvonalának biztosítása sok, első-, másod-, és harmadlagos szolgáltató szektoroknak az összehangolt működésének az eredménye. Ezen szektorok közül az egyik legalapvetőbb a mezőgazdaság, amelynek feladata megtermelni a megfelelő tápanyagellátáshoz nélkülözhetetlen élelmet. A mezőgazdaság, egy olyan sajátos szektor, amelynek a működésére használható terület maximuma meghatározott, azt növelni nem lehetséges. A mezőgazdaságban hasznosítható földterületek aránya a másod- és harmadlagos szektorok javára fokozatosan csökken. Ezáltal hatalmas kihívás elé nézünk, ugyanis egyre nagyobb népességet kell ellátni egyre kisebb területen termelve. Mit lehet ilyenkor tenni? A mezőgazdasági termelés technológiai újításai mellett egyre több olyan területet is bevonnak a termelésbe, amelyek nem alapvetően arra szolgálnának, de a termelési kényszer, illetve az agráriumban ugyanúgy megjelenő kapitalista nagy cégek minél nagyobb profitra való törekvései ezt eredményezik. Ezáltal rossz minőségű, szennyezett talajokon is folytatnak mezőgazdasági termelést.

Más oldalról megközelítve a témát, a gazdaság, és az ipar fejlődése révén egyre nagyobb mértékű az iparvárosok, gyárak, feldolgozó üzemek száma és, ezáltal a szigorú és egyre csak szigorodó szabályozások ellenére is, fokozatosan növekszik ezeknek a létesítményeknek a környezetbe való károsanyag-kibocsátása. Megállapítható, hogy ezeknek a központoknak a környezetében jóval nagyobb a környezeti terhelés, úgy a talajban, mint a vizekben, vagy akár a levegőben is, komplex módon érintve az egész ökoszisztémát. Ebből következik, hogy a környezetbe számos olyan szennyező anyag bekerül, és növekszik a koncentrációja, amely addig, azon a területen nem volt jellemző, szokatlan kihívásokkal szembesítve a különböző növény- és állatfajokat. Ezen szennyező anyagok lehetnek különböző peszticidek, kemikáliák, és sok esetben nehézfémek is. A legfontosabb problémát ez utóbbi jelenti, hiszen a nehézfémek felhalmozódása, a növényi, állati szervezetekbe történő bejutása, és megemelkedő koncentrációja visszafordíthatatlan hatással lehet a hatást elszenvedő fajok fejlődésére nézve. Ami pedig a legfontosabb, ha ezek a nehézfémek – származzanak akár üzemek, gyárak környezetszennyező melléktermékeiből, vagy a nem megfelelő talajon végzett mezőgazdasági termelésből – bekerülnek a növényekbe és állatokban, csak idő kérdése, hogy mikor érnek el a tápláléklánc egyik végső tagjához, az emberhez. Akkor pedig nehéz megmondani, hogy milyen káros hatásai lehetnek a népességre?

Célkitűzésem az volt, hogy vizsgáljam a kiválasztott kukorica hibrid (*Zea mays* L. DKC5170) növekedését, illetve a mangán toxicitás szilíciummal való enyhítésének lehetőségeit laboratóriumi körülmények között, különböző koncentrációjú $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ kezelések mellett.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2. 1. A mangán (Mn)

2. 1. 1. Általában a mangánról

A mangán létezhet I, II, III, IV, VI és VII-es oxidációs állapotban, ugyanakkor biológiai rendszerekben legtöbbször II, III és IV-es oxidációs állapotban fordul elő, amelyek közül is a II-es és a IV-es állapotok elfogadhatóan stabilak, a III-as viszont instabil (Hughes és Williams, 1988). Növényi szervezetekben a II-es oxidációs állapotú mangán a meghatározó, amely képes III-as és IV-es formába oxidálódni. Ezáltal kijelenthető, hogy fontos szerepe van a növényekben lejátszódó oxidációs-redukciós folyamatokban. Az O_2 fejlesztő komplex nélkülözhetetlen eleme.

A Mn^{2+} ionsugara (0,075nm) a Mg^{2+} -é (0,065 nm) és a Ca^{2+} -é (0,099 nm) helyezkedik el, ebből adódóan helyettesíthetői vagy versenytársai lehetnek egymásnak különféle reakciókban. Ennek a három ionnak az oxigén donorokból származó ligandumainál fellépő kötőerő is nagyon hasonló (Hughes és Williams, 1988). Ezeknek fontos következményei vannak a Mn^{2+} sejten belüli eloszlásában, illetve a Mn^{2+} és Mg^{2+} közötti kölcsönhatásokban is.

2. 1. 2. A Mn fotoszintézisben betöltött szerepe

A mangán fotoszintézisben betöltött szerepét először zöld algákban mutatták ki (Pirson, 1937). Magasabb rendű növényekben a fotoszintézis egészében, illetve a PS II-ben lejátszódó fotoszintetikus O_2 evolúció az, amely a leginkább érzékeny a mangánkoncentráció változására (Husted et al., 2010). A fotoszintetikus O_2 keletkezése több mint 50%-al csökkent a Mn koncentráció csökkentésekor a *Trifolium subterraneum* fiatal leveleiben, viszont a klorofill koncentrációra vagy a hajtás száraz tömegére csak enyhe hatása volt (Nable et al., 1984). A mangánt visszapótolva a hiánytüneteket produkáló növényekbe egy nap alatt helyreállt a fotoszintetikus O_2 evolúció a normális szintre. Több kísérletben hasonló eredményeket kaptak búzával (Kriedemann et al., 1985) és kukoricával is (Gong et al., 2010).

A mangánhiány okozta átalakulások az O₂ evolúcióban korrelációban álltak a tilakoid membrán ultrastruktúrájának váltoásaival, főként a tilakoid membránban lévő PS II funkcionális egységeinek csökkenésével (Husted et al., 2010). A megfelelő mangánkoncentráció visszapótlása visszaállította a PS II pigment protein egységeinek számát a tilakoid membránrendszerben (Gong et al., 2010).

2. 1. 3. Fehérjék, szénhidrátok és lipidek kapcsolata a mangánnal

Az RNS polimeráz enzim aktivátora a mangán, ugyanakkor a fehérjeszintézis nem gátolt a mangánhiányos szövetekben sem. A mangánhiányban szenvedő növényekben a fehérjekoncentráció hasonló, vagy még magasabb is, mint a normál mangántartalmú növényekben (Lerer és Bar-Akiva, 1976).

Az oldható nitrogén felhalmozódása mangánhiányos szövetekben egy, a csökkent redukált nitrogén szükségletnek és a nitrát redukcióhoz szükséges szénhidrátok és redukáló erők csökkenésének a következmény (Vielemeyer et al, 1969).

A mangán hiáynak a legkomolyabb hatása a szénhidrát koncentrációjára van. Ez a szénhidrát koncentráció csökkenés főleg a gyökerekben észlelhető, és a meghatározó faktora a mangánhiányos növények a csökkent gyökér növekedésének. (Marcar és Graham, 1987).

A mangán szerepe a lipid anyagcserében jóval összetettebb. Mangánhiányos levelekben, a tillakoid membrán összetevők koncentrációja úgy, mint glikolipidek és többszörösen telítetlen zsírsavak akár 50%-al is csökkenhetnek a normál szinthez képest (Constantopoulus, 1970). Ez a kloroplasztiszokban lévő lipidek koncentrációjában bekövetkező csökkenés a mangánnak a zsírsavak, karotinoidok és egyéb összetevők bioszintézisében játszott szerepének tulajdoníthatók.

3. 1. 4. Mn-hiánytünetek

A mangánhoz kapcsolódó hiánytünetek elsősorban az eredetileg is alacsony mangántartalmú talajképző közeten kialakult, illetve az erősen kilúgzott trópusi talajokon fejlődő növények esetében volt jelentős. Mangánhiányos növényeknél megfigyelhető a száraz tömeg mennyiség, a nettó fotoszintézis, illetve a klorofill-tartalom gyors csökkenése (Shenker et al, 2004), ugyanakkor a légzés és párologtatás intenzitása nem változott (Ohki et al., 1979). Ezen növények sokkal hajlamosabbak az alacsony hőmérsékletből adódó fagyási sérülésekre (Buntje, 1979), a talajban lévő gombabetegségek fertőzésére (Rengel et al., 1993), illetve

kétszer annyi időre van szükségük ahhoz, hogy elérjék a hasznos életszakaszt, mint azok a növények, amelyek megfelelő mangánkoncentrációval voltak ellátva (Longnecker et al., 1991b).

Megfigyelhető a csökkenés a szemszámban és a megtermékenyült szemek arányában, ami kombinációja a pollen alacsony termőképességének (Sharma et al., 1991), és a szemtelítődéshez szükséges szénhidrát ellátás hiányának. (Longnecker et al., 1991b).

A kritikus koncentráció, amely hiánytünetekhez vezet, fajonként nagyon hasonló, 10 és 20 mg Mn kg⁻¹dw között ingadozik a teljesen kifejlődött levelekben, függetlenül a különböző fajok közti eltérésekre vagy a termesztési körülményekre.

3. 1. 5. Toxikus tünetek

Ellentétben a fentebb említett kis szórással, ami a hiánytünetekhez vezető koncentrációt jelenti, a kritikus toxikus koncentráció széles spektrumban mozog a különböző fajok és termesztési körülmények függvényében. Ezt az 1. táblázat foglalja össze:

1.táblázat: a kritikus toxikus Mn koncentráció mértéke különböző növényfajoknál

Kritikus toxikus Mn koncentráció mértéke különböző növényfajoknál (amelynél a száraz tömeg termelés mértéke 10%-kal csökkent)

<i>Fajok</i>	<i>Kritikus toxikus koncentráció (mg Mn kg⁻¹ dw)</i>
Kukorica	200
Galamb borsó	300
Szója	750
Gyapot	750
Édes burgonya	1380
Napraforgó	5300

Edwards és Asher, 1982

A kritikus mangánkoncentrációt befolyásoló környezeti tényezők közül ki kell emelni a hőmérséklet hatását, illetve a szilícium jelentőségét. Későbbiekben részletesen kitérek a szilícium hatásaira.

A legtöbb növényfajban a mangán toxicitás tüneteiként barna elszíneződött foltok jelentkeznek a kifejlett, idősebb leveleken. Ezek a foltok oxidált mangánt tartalmaznak, ugyanakkor a barna szín nem a mangánból, hanem polifenolok oxidálódásából származik.

Ezeknek a barna foltoknak a kialakulását megelőzi egy fokozott kallóz képződés ugyanazon az adott területen, jelezve a mangánnak a sejtmembránra kifejtett toxikus hatását, és a fokozott Ca^{2+} beáramlást mint egy jelet a kallóz képződésre (Wissemeier és Horst, 1987).

A barna foltok képződésének intenzitásának vizsgálata egyszerű és gyors módszerként használható a különböző fajok mangán toleranciaszintjének elemzésére (Wissemeier és Horst, 1991; Doncheva et al., 2009).

Ezzel ellentétben a mangán toleráns növényfajok leveleiben, mint például a napraforgó, amelynek a mangántolerancia szintje $5300 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ dw}$, ugyanúgy találhatók barna foltok a trichómák alapjai körül, amelyek mangán oxidokat tartalmaznak és úgy vélik, hogy ezzel segítik elő az oldható mangánkoncentráció csökkentését a növényben (Hughes és Williams, 1988).

Általában a mangán toxicitási tünetekkel együtt jelentkeznek egyéb tápelemek hiánytünetei, mint például kalcium, magnézium, vas és cink. A mangán toxicitás által indukált vas és magnézium hiány a sejtmembránon keresztül történő felvétel gátlása, vagy pedig a sejtszinten történő tápelemek közötti versengés és kiegyensúlyozatlanság miatt jelentkezik. Ezáltal a mangán toxicitás kezelhető magas magnézium tartalmú tápanyagellátással (Davis, 1996).

3. 1. 6. Mangán mobilizációja a növényben

Mivel a mangán a növények számára csak redukált formában (Mn^{2+} , Mn^{4+}) hozzáférhető a szellősebb talajokban, a gyökér által indukált redukció lehet a mangán felvételéhez vezető megfelelő mechanizmus. A redukcióhoz több hatás kombinációja szükséges: a) enzimatisz redukció a gyökér felületén; b) kémiai redukció redukáló hatású anyagok felszabadulásával, mint például a malát; c) mangán redukció a rizoszféra mikroorganizmusainak segítségével (Godo és Reisenauer, 1980).

Ezeknek a mikroorganizmusoknak az aktivitása különös fontosságú a növények mangán ellátásában, mivel képesek közvetíteni a nem mobilizálható mangánt a talajban lévő oxidációs folyamatokhoz ugyanúgy, ahogy a szolubilizálható mangánt a redukációs folyamatokhoz.

A mangánt oxidáló és mangánt redukáló mikroorganizmusok közötti egyensúly fokozott hatással van a mangán hozzáférhetőségéhez a rizoszférában (Rengel, 1997).

3. 2. A vas (Fe)

3. 2. 1. Általában a vasról

A vas a második leggyakrabban előforduló fém a földkéregben az alumínium után. Ugyanakkor a vasnak az oldhatósága rendkívül alacsony, különösen szénsavas, lúgos talajokban. A levegőzött rendszerekben a fiziológiai pH szórásában a Fe^{3+} és Fe^{2+} ionok koncentrációja kevesebb, mint 10^{-15} M, köszönhetően a vas-hidroxidok, vas-oxidok és vas oxihidroxidok képződésének (Lemanceau et al., 2007).

A talajban és a tápoldatokban az oldható vasformák közül a Fe(III) és kisebb mértékben a Fe(II) kelátjai dominálnak. Általában a Fe(II) kelátokat veszik fel a növények könnyebben, a Fe(III)-mal összehasonlításban, ugyanakkor ez függ a különböző növényfajoktól is.

A xylemben végbemenő hosszú távú transzport esetében a Fe(III)-komplexek dominálnak.

A vas, változó vegyértékű elem, jellemzően könnyen tudja az oxidációs állapotát változtatni Fe^{3+} -ból Fe^{2+} -ba és vissza, és ezen felül képes oktahedrális komplexeket képezni több ligandummal is. A kapcsolódó ligandumoktól függően a Fe(II/III) redox potenciálja széles spektrumon váltakozhat. Ez a változékonyság ad magyarázatot a vas fontosságára a biológiai redoxrendszerekben.

3. 2. 2. Vas felvétele és mobilizációja a növényben

A megnövekedett redukció aktivitás a gyökércsúcs utáni részek felszínén tipikus jellemvonása a vashiányos kétszikűek és nem gabonaféle egyszikűek gyökerének. A vas felvétele és mobilizációja néhány lépésen keresztül történik a növényben:

- Fe^{3+} szolubilizációja a rizoszféra elsavasodása által
- komplexképzés különféle kelátkomponensek segítségével
- komplexek redukcióval történő felszakadása Fe^{2+} képződésével, és ezt követő felvétel a IRT1 vas transzporter segítségével (Guerinot, 2000)

Az Fe^{3+} oldható huminsavakkal képzett komplexei és a komplexek későbbi felszakadása Fe^{3+} redukció által szintén hozzájárulhat a vas felvételéhez egyes növényfajoknál (Pinton et al., 1998).

3. 2. 3. A Fe (III) – EDTA és a Fe (III) citrát

A növények tápoldatban történő nevelésénél sarkalatos probléma a megfelelő mennyiségű vas biztosítása. A szervetlen vasvegyületek, mint a FeSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, FeCl_3 , még enyhén savas pH-n is kicsapódnak a tápoldatból. A tápoldatok összeállításánál komplexképző, kelátor vegyületekhez adagolják a vasat (Fodor F., és Zsoldos F., 1998).

Az etilén-diamin-tetraecetsav, általánosan használt rövidítéssel EDTA, színtelen, vízben rosszul oldódó, erős kelátképző tulajdonságú, négyértékű poliamino-karbonsav.

Ez a vegyület képes két- és háromértékű fémionokkal kelátkomplexet alkotni. Az EDTA a fémionokat a négy karboxilát- és két aminocsoportjával oktaéderes komplex formájában köti meg. Különösen erős komplexet képez $\text{Mn}(\text{II})$, $\text{Cu}(\text{II})$, $\text{Fe}(\text{III})$, és $\text{Co}(\text{III})$ ionokkal.

3. 3. Szilícium (Si)

3. 3. 1. Általában a szilíciumról

A szilícium a második leggyakoribb elem a földkéregben. A talajoldatban $\text{pH} < 9$ -nél a legfőbb előforduló formája a szilikonsav $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, töltés nélküli forma, vízben való oldhatósága (25°C -on) átlagosan 2mM. A talajoldatban lévő koncentráció átlagos mértéke 14 és 20 mg Si L^{-1} között van, egy 3,5 és 40 mg közötti szórásképpel, és azzal a tendenciával, hogy minél magasabb a talajoldat pH-ja, annál kevesebb szilícium található benne (Jones és Handreck, 1965).

A szilikonsav sokban hasonlít a bórsavra, mind a kettő nagyon gyenge sav, kölcsönhatásba lének a sejtfalban található pektinnel és polifenollokkal, és leginkább a sejtfalban találhatóak.

A bórsavval ellentétben, a szilikonsav esszenciális hatása a magasabb rendű növényekre nézve csak néhány növényen lett bizonyítva, de azoknál kivétel nélkül pozitív hatásai voltak.

3. 3. 2. A Si-felvétele, koncentrációja és eloszlás a növényen belül

Kijelenthető, hogy minden, talajon nevelt növény tartalmaz valamennyi szilíciumot a szöveteiben. Ugyanakkor a szilícium koncentráció a gyökérben és a hajtásban egyaránt változik, attól függően, milyen növényfajról van szó. Ezeket a különbségeket a 2. táblázat szemlélteti.

2.táblázat: az Si koncentráció a különböző növényfajokban (mg g^{-1} száraz tömeg)

Si koncentráció a különböző növényfajoknál, ugyanolyan kísérleti körülmények között

<i>Fajok</i>	<i>Si koncentráció (mg g^{-1} dw)</i>
Rizs	39,1
Búza	15,4
Sütőtök	13,4
Cukkini	19,8
Borsó	3
Uborka	22,9
Kukorica	21

Ma és Takahashi, 2002.

Ezeket az eltérések a különböző fajok szilícium felvevő képességeinek különbségével lehet magyarázni (Ma and Takahashi, 2002).

A növény a gyökerein keresztül veszi fel a szilíciumot a talajból $\text{Si}(\text{OH})_4$ formájában. Ennek három féle módja van: aktív, passzív és rejektív, fajtoktól függően. Az aktív Si felvételt biztosító transzportfolyamatok Si raktározó fajokban lettek meghatározva úgy, mint rizs, árpa és kukorica.

A kukoricánál a ZmLsi nevű rendszert nevezhetjük meg, amely a szilícium felvételére szolgál. Ezen rendszer a növények epidermális, hipodermális és kortikális sejteiben helyezkedik el. Ezek által képes felvenni a szilíciumot a talajoldatból, és utána továbbítani a szimplazmán át az endodermis-ig ahol aztán az alapszövetbe felszabadul és hasznosul. (Mitani et al., 2011).

A szilíciumnak a gyökérből a hajtás felé irányuló xilémtranszportja miatt az szilíciumnak az eloszlását az egyes szervek között az adott szerv párologtatása határozza meg, és függ a szerv életkorától is (Jones és Handreck, 1969). A legtöbb szilícium az apoplazmában marad, és a víz elpárologása után amorf szilikát formájában raktározódik, főképpen a levelek mindkét oldalán lévő epidermális sejtekben. Ezek a sejtek, ezáltal impregnálva lesznek egy szilícium réteggel, és így hatékony gátként működnek a kutikuláris párologtatás okozta vízvesztés, illetve a gombás megbetegedések ellen.

2. 3. 3. A Si növényi anyagcserében játszott szerepe

A szilíciumnak, a bioszférában való bőséges hozzáférhetősége miatt, nehéz bizonyítani a nélkülözhetetlen mivoltát a magasabb rendű növények fejlődése számára. Ugyanis például meghatározható, hogy még az magas fokon tisztított víz is tartalmaz $2 \cdot 10^{-5}$ mM szilíciumot (Werner and Roth, 1983). Ezáltal, a növényi életciklusban való szükségessége vagy nélkülözhetősége még nem lett bebizonyítva.

Megállapítható, hogy a szilícium hatással lehet a magasabb rendű növények membránjainak stabilitására, illetve ezen felül szabályozza a lignin bioszintézist is. Körülbelül 2 g glükóz szükséges 1 g lignin szintéziséhez, míg a szilícium energiaszükséglete a ligninhez képest 1:20 arányban jelentkezik, azaz hússzorosa a lignin energiaszükséglete a szilíciuménak (Raven, 1983).

A szilícium nem csak a sejtfal merevségét és erősítését segíti, hanem hasonlóképpen képes növelni a sejtfal rugalmasságát a növekedési fázis során. Az elsődleges, primer sejtfalban a szilícium kölcsönhatásba lép egyéb sejtfal alkotókkal, amilyenek a pektinek és polifenolok, ami növeli a sejtfal rugalmasságát a növekedési szakaszban (Emadian és Newton, 1989).

2. 3. 4. A Si kedvező hatásai a növényekben

A szilíciumnak számos, jól dokumentált, látható és mérhető hasznos hatása van a növényekre. Szántóföldi körülmények között, főleg gabonaféléknél, a szilícium képes fokozni a növekedést és a terméshozamot direkt és indirekt módon is (Ma és Takahashi, 2002).

Ezek közül ki kell emelni a területen belül egymás leárnyékolását csökkentő, levél egyenességét fokozó hatást, illetve a biotikus és abiotikus stressz csökkentését egyaránt.

A levelek szilárdsága egy fontos faktor, amely hatással van a napfény hasznosítására sűrű vetésű növényeknél. Egy adott növénykultúrában, a levél merevsége, egyenessége fordított arányosságban van a nitrogén ellátással, azaz minél több nitrogént adunk a növénynek, annál kevésbé lesz egyenes és merev a levél. A szilícium növeli a levelek merevségét, egyenességét, és nagymértékben képes ellensúlyozni a túlzott nitrogén ellátás negatív hatásait a növények fényelnyelésére. Ezen felül szintén képes ellensúlyozni a fokozott nitrogén szárszilárdságra vonatkozó negatív hatásait is (Idris et al., 1975).

A szilícium úgyszintén képes enyhíteni többféle abiotikus stresszt, beleértve a fizikai stresszek sorát, úgy, mint az aszály, a sugárzás, a magas és az alacsony hőmérsékleti hatások, az elfagyás, az UV besugárzás; és a kémiai stresszforrásokat is, mint a magas sótartalom, tápelemek közti egyensúly hiánya, illetve a különböző fémek okozta toxicitás (Ma és Yamaji, 2006).

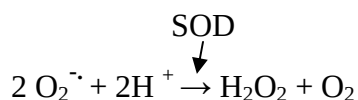
Többféle fém okozta toxikus tünetek enyhítésére is képes lehet, többek Fe, Al, Cd, és Zn, amelyek a szilícium és a fémek közti apoplazmában és szimplazmában létrejövő kölcsönhatásokból erednek.

Fontos kiemelni továbbá, hogy a mangán toxicitás tüneteinek enyhítésére is alkalmazható, többféle növényen vizsgálták hidropóniás körülmények között. Többek között rizs, árpa, bab és sütőtök voltak a kísérleti növények. Ezekben három különböző mechanizmus figyelhető meg. A rizs esetében a szilícium csökkentette a mangán felvételt úgy, hogy a gyökerek mangán oxidáló erejét fokozta (Okuda és Takahashi, 1962). A babbal és az árpával végzett kísérletek esetében megfigyelhető volt, hogy a szilícium nem csökkentette a növények mangán felvételét, de képes volt kiegyenlíteni a felvett mangán eloszlását a levéllemezeken. Ez a folyamat, amely képes az egyensúlyi eloszlást elérni a növényen belül, még tisztázatlan, de valószínűleg a sejtfalnak a szilícium által indukált nagyobb anyagmegkötő kapacitásából adódik.

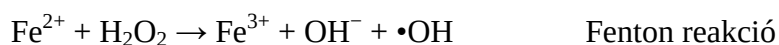
A mangán toxicitási sérülések enyhítése a növényi sejtekben a megfelelő szilícium ellátással ugyancsak kapcsolódhat az antioxidatív védelmi rendszerek stimulálásához a szabad-gyökök okozta oxidatív sejtkárosodások ellen (Inas et al., 2009).

2. 3. 5. A Fenton-reakció

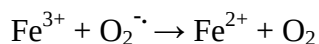
A mitokondriumokban és a mikroszómákban állandóan keletkező szuperoxid semlegesítését a szuperoxid-dizmutázok (SOD) végzik. Az ősi típusú Mn-tartalmú szuperoxid-dizmutáz a prokariótákban és az eukarióták mitokondriumában található. Az eukarióta sejtek citoszoljában a Cu-Zn szuperoxid-dizmutáz mutatható ki.



Fe^{2+} ionok (vagy Cu^{2+}) jelenlétében H_2O_2 -ből rendkívül agresszív, 10^{-9} s reakciósebességű $\bullet\text{OH}$ hidroxilgyökök keletkeznek, amelyek ellen közvetlen enzimatikus védekezés nincs.



Ez olyan ciklusreakció, ahol az oxidált ionok redukáló formájukat a szuperoxiddal ($\text{O}_2^{\cdot-}$) való reakció útján visszanyerik.



3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3. 1. A tápoldaton nevelt növényekkel végzett vizsgálatok

Kísérleti növényként kukoricát (*Zea mays L. cv. DKC5170*) használtam. A magvak felületének fertőtlenítését 6%-os H_2O_2 -dal végeztük el. A fertőtlenített magvakat desztillált vízzel többször öblítettük, majd 10 mM-os CaSO_4 oldatban 4 óráig áztattuk a jobb csírázás érdekében. A magvakat nedves szűrőpapír között csíráztattuk, úgy, hogy a csíranövények polaritása természetes legyen. A termosztát hőmérséklete 22 °C volt. A 4 cm-es koleoptilú kukorica csíranövényeket tápoldatra helyeztük. A növények neveléséhez az alábbi összetételű tápoldatot használtuk: 2,0mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,7mM K_2SO_4 , 0,5mM MgSO_4 , 0,1mM KH_2PO_4 , 0,1mM KCl , 10 μM H_3BO_3 , 1 μM MnSO_4 , 1 μM ZnSO_4 , 0,2 μM CuSO_4 , 0,01 μM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$. A növények a vasat 100 μM $\text{Fe}(\text{III})$ -EDTA, illetve 100 μM Fe -Citrát formában kapták. formában kapták.

A mangán $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ formában került alkalmazásra. A koncentrációk az alábbiak voltak: 0,1; 1; 5; 10; 25; 50; 100 és 200 ppm.

3. 2. Talajon nevelt növények

Az elvégzett kísérletekhez a Debrecen-Látóképről származó mészlepedékes csernozjomot használtunk. A talaj mért paraméteriet a 2. táblázat mutatja be.

A kukorica magvakat a fentebb említett felületi fertőtlenítés után előcsíráztatás nélkül egy erre a célra készített 30 cm magas, 5 cm átmérőjű, alulról zárt műanyag hengerbe helyeztem. A talajt a szántóföldi vízkapacitás 50 %-áig nedvesítettük. A talaj tetejére 1 cm rétegben kvarcot szórtam, a nedvesség párolgásának csökkentése céljából. Az így kapott hengereket táramérlegen lemértem, így az evapotranspiráció által elpárolgott vizet pontosan tudtam pótolni.

Az alábbi kezeléseket állítottuk be négy ismétlésben:

- Kontroll (csernozjom talaj)
- Mangániszap
- Mangániszap+ P baktériumtrágya
- Mangániszap+ B baktériumtrágya
- Mangániszap+ M baktériumtrágya

3. táblázat: a Debrecen-Látóképről származó mészpedékes csernozjom paraméterei

Vizsgált paraméter	
Arany-féle kötöttsége szám (KA)	43
Fizikai talajféleség	csernozjom
pH (H ₂ O)	6,58
pH (KCl)	5,71
KCl-oldható NO ₃ -N+NO ₂ -N (mg kg ⁻¹)	8,04
Al-oldható P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	199
Al-oldható K ₂ O (mg kg ⁻¹)	451
Al-oldható Na (mg kg ⁻¹)	332
KCl-oldható Mg (mg kg ⁻¹)	176
KCl-oldható SO ₄ -S (mg kg ⁻¹)	6,04
KCl-EDTA oldható Cu (mg kg ⁻¹)	5,79
KCl-EDTA oldható Zn (mg kg ⁻¹)	7,90
KCl-EDTA oldható Mn (mg kg ⁻¹)	262

A kísérlethez használt Mn-iszap az úrkuti Mangán Bányászati és Feldolgozó Kft. bocsátotta rendelkezésünkre. A Mn-iszapban található elemek mennyiségét a 3. táblázat mutatja be.

4. táblázat: a Mn-iszapban található elemek mennyisége (mg kg⁻¹)

Al	17232	Mg	3790
B	8,71	Mn	120288
Ba	657	Na	451
Ca	5013	Ni	84,6
Cd	2,43	P	1119
Ce	174	Pb	25,7
Co	131	S	606
Cr	73,7	Sc	5,86
Cu	43,7	Sr	756
Fe	116319	Ti	210
In	652	V	85,3
K	5243	Y	58,7
La	43,6	Yb	4,05
Li	41,8	Zn	55

A rhizoboxos kísérlet során lehetőség van a gyökerek nappali és éjszaki növekedésének nyomon követésére. Az éjszaki növekedést 6 órakor, a nappalit 22 órakor mértem. A gyökerek napszaki növekedését rajzolásos módszerrel követtem, majd milliméterpapír segítségével mértem.

A rhizoboxban végzett kísérlet megfelelő körülményt biztosít gyökerek által kiválasztott szerves savak kimutatására, ugyanis a gyökerek könnyen leemelhetők a talajról.

A gyökerek által kiválasztott szerves savak kimutatásához agar lapokat és bróm-krezol-bíbor indikátort használtunk.

Az agar táptalaj 100 ml desztillált vizet, 0,75 g agar-agart tartalmazott, melyet vízfürdőn forraltunk 15 percig, majd hozzáadtunk 1 ml bróm-krezol-bíbor indikátort (1,25 % BCP-5',5"-dibromo-o-krezolszulfotalein), az indikátor hatására az agar lilás színűvé változott. A gyökerek által kiválasztott szerves savak hatására az agar sárga színűvé változott. Ez egy viszonylag szubjektív módszer a kiválasztott gyökérsav láthatóvá tételére.

3. 3. A minták kémiai analízise

A növényminták 65 °C-on történt szárítása és darálása után 1 g mennyiségét mértünk ki analitikai mérlegen. A növényminták előroncsolása során 10 cm³ cc. HNO₃-at alkalmaztunk 60 °C-on, 30 percig. A főroncsolás előtt 3 cm³ H₂O₂-ot adagoltunk hozzá. A főroncsolás 120 °C-on 90 percig tartott. A roncsolmány lehűlése után 50 cm³-re töltöttük ioncserélt vízzel, majd Filtrak 388 szűrőpapírral szűrtük (MSZ 21470-50, 1998).

Az anyagok roncsolásához Merck gyártmányú (E. Merck, Darmstadt, Németország) analitikai minőségű HNO₃ (65 %) oldatot használtunk. A törzsoldatok készítéséhez Merck és BDH gyártmányú standard oldatokat, valamint REANAL gyártmányú (Budapest) analitikai tisztaságú vegyszereket alkalmaztunk.

A mosogatáshoz, továbbá az oldatok előkészítéséhez használt nagy tisztaságú vizet egy kétlépcsős Millipore (Millipore, Párizs, Franciaország) víztisztító berendezés segítségével állítottuk elő. A csapvízből az első lépcsőben egy fordított ozmózis elvén működő MILLI-RO 5 PLUS berendezés 10-15 µS vezetőképességű vizet állít elő, a második lépcsőben a MILLI-Q RG egy ioncserés, baktériumszűrővel ellátott készülék ezt tisztítja tovább. A MILLI-Q RG készülékből 0,05 µS vezetőképességű, gyakorlatilag baktérium és sómentes vizet kapunk.

Analitikai meghatározáshoz egy OPTIMA 3300 DV típusú induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométert (ICP-OES) alkalmaztunk, melynek a technikai jellemzői az alábbiak:

ICP-OE spektrométer:

típusa:	OPTIMA 3300 DV
gyártó:	Perkin-Elmer Ltd.
optikai rendszer:	Echelle-rendszerű, argon gázzal

	öblített
hullámhossz tartomány:	160-782 nm
RF generátor:	40MHz
detektor:	szilárdtest áramkör detektálás, SCD
plazma megfigyelés:	axiális
porlasztó típusa:	koncentrikus (Meinhard Type A)
a perisztaltikus pumpacső típusa:	fekete-fekete
az optikai rendszer felbontása:	normál
feloldóképesség:	0,007 nm

Az ICP-OES berendezés változtatott paraméterei és értékei:

Kicsatolt teljesítmény:	1300 W
Porlasztógáz áramlási sebesség:	0,8 dm ³ /min.
Hűtőgáz áramlási sebesség:	15 dm ³ /min.
Segédgáz áramlási sebesség:	0,5 dm ³ /min.
Mintabetáplálás sebessége:	1 cm ³ /min.
Plazma megfigyelési magassága:	15 mm

A vizsgálatainkban a háttérmérés helyéül általában 2-pontos, kevés esetben 1-pontos háttérkorrekciót alkalmaztunk. A kalibrációs pontokra általában nemlineáris, kevés esetben lineáris kalibrációs egyenletet illesztettünk.

Az elemtartalom meghatározásához a hajtást és a gyökérzetet külön készítettem elő a roncsoláshoz.

3. 4. A relatív klorofill tartalom meghatározása (SPAD-Units)

A klorofill méréshez a növények második illetve harmadik legfiatalabb, de már teljesen kifejlett leveleit használtuk. A relatív klorofill tartalmat SPAD-502 (MINOLTA, Japán) klorofill mérővel mértük .

3.5. A klorofill-*a*, *b* és karotinoid meghatározása spektrofotometrián

Az abszolút klorofill *a*, *b* és karotinoid tartalmat Metertek SP 80 Spektrométerrel mértem Moran és Porath (1980) alapján. 50 mg friss levélmintát 5 ml N,N-dimetil-formamidban oldottam 4 ° C-on, 72 órán keresztül. Ezt követően a klorofill-*a* mennyiségét 664 nm-en, a klorofill-*b*-t 647 nm-en, a karotinoid-tartalmat 480 nm-en mértem.

Az alábbi képletbe behelyettesítve, a fotoszintetikus pigmentek mennyisége mg g^{-1} -ban, a friss tömegre vonatkoztatva számítható:

$$\text{klorofill-a} = (11,65 \cdot a_{664} - 2,69 \cdot b_{647})$$

$$\text{klorofill-b} = (20,81 \cdot b_{647} - 4,53 \cdot a_{664})$$

$$\text{karotinoidok} = (1000 \cdot \text{car}_{480} - 1,28 \cdot a_{664} - 56,7 \cdot b_{647})$$

A második és harmadik levélben mértem az abszolút klorofill-*a*, *b* és karotinoid tartalmat.

3. 6. A száraz tömeg mérése

A száraz tömeg meghatározásához a mintákat 65°C -on tömegállandóságig szárítottuk, majd szobahőmérsékletre történt visszahűtés után analitikai mérlegen (OHAUS) mértük.

3. 7. Az alkalmazott baktériumtrágyák

Az egyik alkalmazott baktériumtrágya (jelölése „P”) viszkózus folyadék, mely két baktériumot, az *Azotobacter chroococcum*ot ($1\text{-}2 \times 10^9$ db cm^{-3}) és a *Bacillus megaterium*ot ($1\text{-}2 \times 10^8$ db cm^{-3}) tartalmaz, a használata biogazdálkodásban is ajánlott.

A másik baktériumtrágya (jelölése „B”) viszkózus folyadék, mely az alábbi baktériumokat tartalmazza: *Azospirillum brasiliense*, *Azotobacter vinelandii*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus polymyxa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Streptomyces albus*. Az összes csíraszám: $4,3 \times 10^9$ db/ cm^{-3} .

A harmadik baktériumtrágya („M”) a következő baktériumokat tartalmazza: *Azotobacter chroococcum*, *Azospirillum ssp.*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*.

Az alkalmazott biotrágyákat 1 ml dm^{-3} koncentrációban adtuk a tápoldathoz.

3. 8. Az eredmények statisztikai kiértékelése

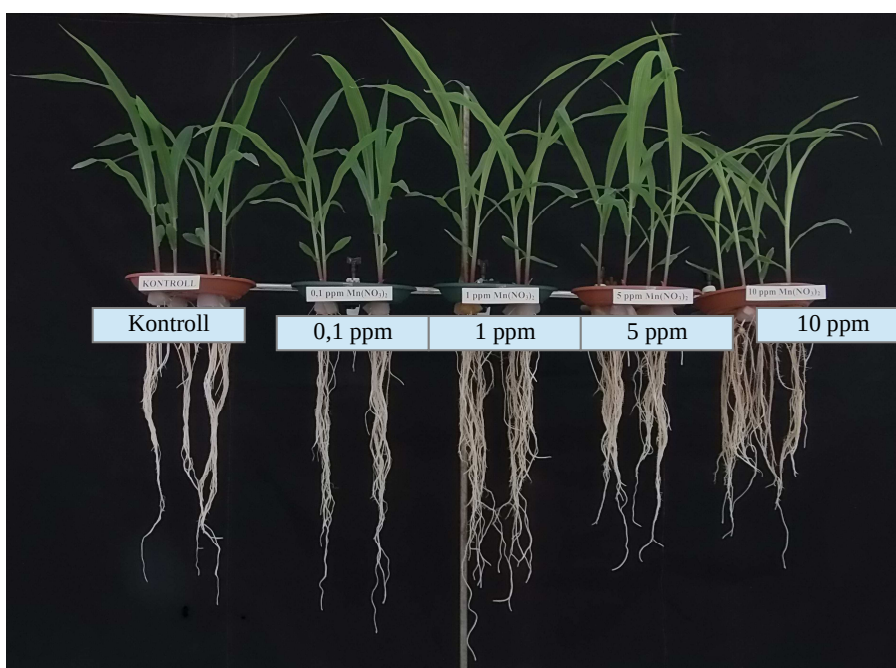
Az eredmények kiértékeléséhez Microsoft Excel 2003 és Sigma Plot 12.0 verziót használtunk.

4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

4. 1. A mangán (Mn) és a baktérium tartalmú trágyák hatásának vizsgálata tápoldatos kísérletben

4. 1. 1. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica száraz tömegére

A növények szerves anyag felhalmozása bonyolult biokémiai folyamatok összessége. Alapvetően a fotoszintézis és a légzés különbsége adja azt a szerves anyag tömeget, ami pl. egy vegetációs periódus végén a biológiai termést jelenti. Ennek egy része a „gazdasági termés”, amit különböző céllal felhasználnak. A környezeti tényezők mindkét folyamat intenzitását meghatározzák, miközben a növény ultrastruktúrája, annak aktivitása a környezeti hatások érvényesülésének a feltételei.



1.kép: a 0,1; 1; 5 és 10 ppm Mn-koncentráció hatása a kukorica növekedésére (Kép: Bojtor Cs., 2014)

5. táblázat: a 0,1 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére., n=9± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01; Szignifikáns különbség a 0,1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^ap<0,05; ^cp<0,001.

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,324± 0,03	0,088± 0,02
0,1	0,347± 0,04	0,107± 0,01 ^{**}
0,1+P	0,306± 0,04 ^a	0,101± 0,01
0,1+B	0,303± 0,03 ^a	0,083± 0,01 ^c
0,1+M	0,257± 0,03 ^c	0,066± 0,01 ^c

A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömege a 0,1 ppm Mn kezelés hatására nőtt a kontrollhoz képest. A gyökér esetében a növekedés szignifikáns. A hajtás száraz tömege 7 %-kal, a gyökéré 18 %-kal nőtt.

A baktériumtrágya kezelések pozitív hatását nem tudtuk kimutatni ilyen kis Mn-koncentrációnál. A „M” jelű baktériumtrágya kezelés hatására csökkent a hajtás és a gyökér száraz tömege a legnagyobb mértékben – a hajtásé 26 %-kal, a gyökéré 25 %-kal, a 0,1 ppm Mn-kezeléshez képest

6. táblázat: a 1 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p < 0,001$; Szignifikáns különbség a 1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^b $p < 0,01$; ^c $p < 0,001$.

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,324± 0,03	0,088± 0,02
1	0,330± 0,02	0,129± 0,01 ^{***}
1+P	0,328± 0,02	0,097± 0,01 ^c
1+B	0,297± 0,04	0,103± 0,02 ^b
1+M	0,232± 0,03 ^c	0,069± 0,01 ^c

Az 1 ppm Mn-kezelés hatására szintén növekedés volt a kukorica hajtásának és gyökerében száraz tömegében. A hajtás száraz tömege 2 %-kal, a gyökéré 32 %-kal szignifikánsan nőtt a kontrollhoz viszonyítva.

Az 1 ppm Mn-kezelésnél sem tudtuk a baktériumtrágyák pozitív hatását kimutatni. A száraz tömegben a legnagyobb csökkenés itt is „M” jelölésű baktériumtrágya kezelésnél tapasztaltunk. A hajtás száraz tömege 30 %-kal, a gyökéré 47 %-kal csökkent az 1 ppm Mn-kezeléshez képest. A csökkenés mind a két esetben szignifikáns.

7. táblázat: a 5 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: * $p < 0,05$; Szignifikáns különbség az 5ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p < 0,05$; ^b $p < 0,01$;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,324± 0,03	0,088± 0,02
5	0,296± 0,04	0,108± 0,02 [*]
5+P	0,261± 0,03 ^a	0,100± 0,02
5+B	0,223± 0,04 ^b	0,084± 0,02 ^a
5+M	0,223± 0,04 ^b	0,079± 0,01 ^b

Az 5 ppm Mn-kezelésnél a kukorica hajtásának száraz tömege 8 %-kal csökkent a kontroll értékhez képest, míg a gyökér száraz tömege 19 %-kal szignifikánsan nőtt.

A kukorica hajtásának száraz tömege mind a három baktériumtrágya kezelés hatására szignifikánsan csökkent az 5 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva.

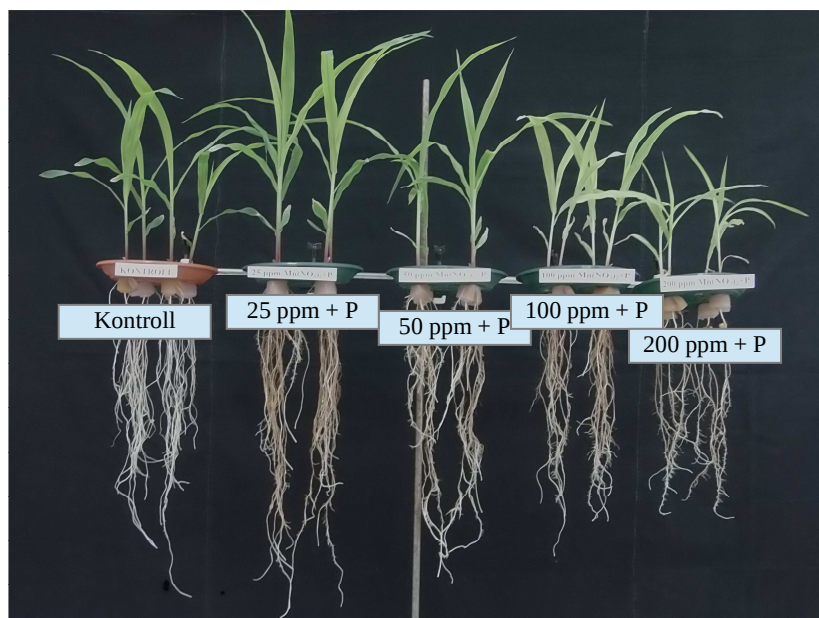
A 10 ppm Mn-kezelésnél a kukorica hajtásának száraz tömege 12 %-kal csökkent a kontrollhoz képest, ezzel ellentétben a gyökér száraz tömege 13 %-kal nőtt.

8. táblázat: a 10 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség a 10 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^ap<0,05; ^cp<0,001

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,324± 0,03	0,088± 0,02
10	0,288± 0,05	0,101± 0,01
10+P	0,305± 0,04	0,104± 0,01
10+B	0,192± 0,03 ^c	0,086± 0,02 ^a
10+M	0,148± 0,02 ^c	0,082± 0,01 ^a

A 10 ppm Mn-kezelésnél már kimutatható a baktériumtrágya-kezelés pozitív hatása. A baktériumtrágya-kezelés kedvező hatását a száraz tömege a „P” jelű baktériumtrágyánál mértük. A hajtás száraz tömege 5 %-kal, a gyökéré 3 %-kal nőtt a 10 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva.

A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömege csökkent a „B” és „M” jelölésű baktériumtrágya kezelésekre a 10 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva.



2. kép: a 25, 50, 100 és 200 ppm Mn és „P” jelű baktériumtrágya kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)

A kukorica hajtásának száraz tömege 5 %-kal csökkent, a gyökér száraz tömege 25 %-kal nőtt a kontrollhoz képest.

Mind a három baktériumtrágya kezelés hatására nőtt a hajtás, valamint a gyökér száraz tömege a 25 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva. Megállapíthatjuk, hogy a 25 ppm Mn-kezelés

növekedés, száraz anyag felhalmozásra kifejtett kedvezőtlen hatása baktériumtrágya-kezeléssel mérsékelhető.

A három baktériumtrágya-kezelés közül a „P” jelű baktériumtrágya képes a legnagyobb mértékben kompenzálni a 25 ppm Mn-kezelést.

9. táblázat: a 25 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ** $p < 0,01$; Szignifikáns különbség a 25ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p < 0,05$; ^b $p < 0,01$; ^c $p < 0,001$;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,197± 0,03	0,062± 0,01
25	0,189± 0,04	0,082± 0,01 **
25+P	0,291± 0,03 ^c	0,114± 0,02 ^c
25+B	0,265± 0,06 ^b	0,113± 0,02 ^c
25+M	0,252± 0,06 ^a	0,096± 0,03 ^b



3. kép: 25, 50, 100 és 200 ppm Mn és „B” jelű baktériumtrágya kezelés hatására a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)

10. táblázat: az 50 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség az 50 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p < 0,05$; ^b $p < 0,01$; ^c $p < 0,001$;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,197± 0,03	0,062± 0,01
50	0,170± 0,04	0,062± 0,01
50+P	0,183± 0,05	0,071± 0,02
50+B	0,219± 0,04 ^a	0,088± 0,02 ^c
50+M	0,236± 0,03 ^b	0,091± 0,01 ^c

A kukorica hajtásának száraz tömege 14 %-kal csökkent a kontrollhoz képest, míg a hajtás száraz tömege megegyezik a kontroll értékkel.

A 25 ppm Mn-kezelésnél tapasztaltakkal megegyezően a baktériumtrágya-kezelés hatásra nőtt a hajtás és a gyökér száraz tömege a csak 50 ppm Mn-kezelést kapott növényekhez képest.

A 25 ppm Mn-kezelés kedvezőtlen hatását a „M” jelölésű baktériumtrágya tudta mérsékelni.

A hajtás száraz tömege 28 %-kal, a gyökéré 32 %-kal nőtt az „M” jelű baktériumtrágya kezelésnél, az 50 ppm Mn-kezeléshez képest.

Az intenzívebb gyökernövekedés kedvező, mert a növény nagyobb felületen tud vizet és tápanyagot felvenni, ezáltal nő a stressztoleranciája is.

Az 50 ppm Mn-kezelésnél már toxikus tünetek figyelhetők meg a kukorica levelén (y. kép).



4. kép: Mn-toxikózis a 50 ppm $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ -mal kezelt kukoricán (fotó: Bojtor Cs., 2014)

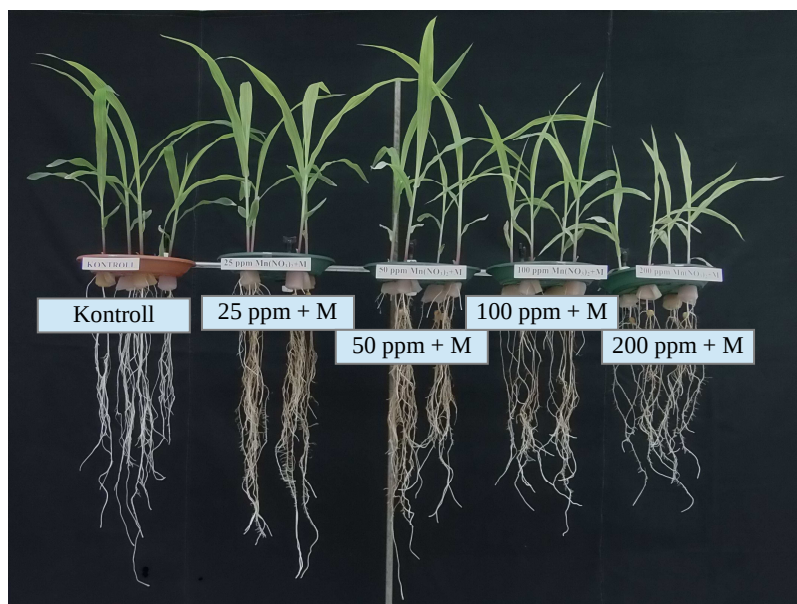
11. táblázat: a 100 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	0,197± 0,03	0,062± 0,01
100	0,147± 0,02 **	0,049± 0,01 *
100+P	0,149± 0,04	0,048± 0,01
100+B	0,144± 0,03	0,052± 0,01
100+M	0,131± 0,03	0,051± 0,01

A 100 ppm Mn-kezelésnél a kukorica hajtásának száraz tömege 25 %-kal, a gyökéré 21 %-kal szignifikánsan csökkent a kontrollhoz képest.

A „P” jelű baktériumtrágya kezelésnél a hajtás és a gyökér száraz tömege kontroll körüli értéket adott. A „B” és „M” kezeléseknél nagyobb mértékű csökkenés figyelhető meg.

A 100 ppm Mn-kezelésnél nem tudtuk a baktériumtrágyák kedvező hatását kimutatni.



5. kép: a 20, 50, 100 és 200 ppm Mn és „M” jelű baktériumtrágya kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)

12. táblázat: a 200 ppm Mn-kezelés és a három baktériumtrágya hatása a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére, $n=9 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p < 0,001$; Szignifikáns különbség a 200 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p < 0,05$; ^b $p < 0,01$; ^c $p < 0,001$;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll	$0,197 \pm 0,03$	$0,062 \pm 0,01$
200	$0,101 \pm 0,02$ ***	$0,031 \pm 0,01$ ***
200+P	$0,099 \pm 0,02$	$0,036 \pm 0,01$
200+B	$0,123 \pm 0,01$ ^b	$0,045 \pm 0,00$ ^c
200+M	$0,127 \pm 0,03$ ^b	$0,050 \pm 0,01$ ^c

A 200 ppm Mn-kezelés hatására a hajtás száraz tömege 49 %-kal, a gyökéré 50 %-kal szignifikánsan csökkent a kontrollhoz viszonyítva.

A gyökér száraz tömege mind a három baktériumtrágya kezelés hatására nőtt a 200 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva.

A hajtás száraz tömege a „B” jelű baktériumtrágya-kezelésnél 18 %-kal, a gyökéré 32 %-kal nőtt a 200 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva. Ezek az értékek a „M” jelű kezelésnél 21 % és 38 %.

4. 1. 2. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica relatív klorofill tartalmára

Hatékony szerves anyag felhalmozás nem lehetséges a fotoszintetikus folyamatok nélkülözhetetlen alkotója, a klorofill nélkül. A Mn-kezelések hatására csökkent a szárazanyag-felhalmozás, ami mögött a csökkent fotoszintetikus aktivitást, illetve a klorofill tartalom változását feltételeztük. Méréseink szerint a kezelések befolyásolták a klorofill tartalmat (12-13. táblázatok).

13. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 0,1 ppm Mn és baktériumtrágya kezelések hatására, $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; Szignifikáns különbség a 0,1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p<0,05$; ^c $p<0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	41,29 $\pm$ 2,05	41,14 $\pm$ 3,87
0,1	38,15 $\pm$ 3,65**	37,95 $\pm$ 2,61*
0,1+P	35,57 $\pm$ 2,62 ^a	36,34 $\pm$ 3,28
0,1+B	40,17 $\pm$ 2,38	39,90 $\pm$ 3,75
0,1+M	43,45 $\pm$ 2,41 ^c	42,03 $\pm$ 2,15 ^c

A kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom megközelítőleg 3 SPAD-egységgel csökkent a 0,1 ppm Mn-kezelés hatására a kontrollhoz képest.

Az „M” jelű baktériumtrágya-kezelés hatására a második levélben mért relatív klorofill tartalom 5 SPAD-egységgel, a harmadik levélben 4 SPAD-egységgel nőtt a 0,1 ppm Mn-kezeléshez képest.

14. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 1 ppm Mn és baktériumtrágya kezelések hatására, Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$; ** $p<0,01$; Szignifikáns különbség az 1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^b $p<0,01$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	41,29 $\pm$ 2,05	41,14 $\pm$ 3,87
1	39,65 $\pm$ 3,33	31,42 $\pm$ 2,47***
1+P	36,66 $\pm$ 2,31 ^b	35,44 $\pm$ 4,23 ^b
1+B	37,59 $\pm$ 2,66	31,16 $\pm$ 2,71
1+M	38,03 $\pm$ 2,64	35,41 $\pm$ 2,44 ^b

A kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom minden kezelés hatására csökkent az 1 ppm Mn-kezelésnél.

15. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 5 ppm Mn és baktériumtrágya kezelések hatására, $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$; Szignifikáns különbség az 5 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^b $p<0,01$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	41,29 $\pm$ 2,05	41,14 $\pm$ 3,87
5	35,96 $\pm$ 3,28***	30,90 $\pm$ 3,62***
5+P	36,72 $\pm$ 2,09	32,13 $\pm$ 3,24
5+B	36,65 $\pm$ 1,54	26,68 $\pm$ 2,78 ^b
5+M	37,82 $\pm$ 2,83	34,40 $\pm$ 2,08 ^b

Az 5 ppm Mn-kezelésnél a kukorica második levelében mért relatív klorofill tartalom 5, a harmadik levélben 10 SPAD-egységgel csökkent a kontrollhoz képest.

A baktériumtrágya kezelések hatására a második levél relatív klorofill tartalma nőtt a kontrollhoz képest. A harmadik levélben a „B” és a „M” jelölésű baktériumtrágya kezeléseknél figyelhető meg növekedés az 5 ppm Mn-kezeléshez képest.

16. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 10 ppm Mn és baktériumtrágya kezelések hatására $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$; Szignifikáns különbség a 10 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^b $p<0,01$; ^c $p<0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	41,29 $\pm$ 2,05	41,14 $\pm$ 3,87
10	35,59 $\pm$ 3,05***	30,17 $\pm$ 4,57***
10+P	35,58 $\pm$ 3,87	34,58 $\pm$ 3,31 ^b
10+B	35,95 $\pm$ 3,35	29,14 $\pm$ 2,69
10+M	30,43 $\pm$ 3,49 ^c	23,82 $\pm$ 2,04 ^c

A 10 ppm Mn-kezelésnél, valamint a 10 ppm Mn+baktériumtrágya kezeléseknél is csökkent a relatív klorofill tartalom. A legnagyobb csökkenés a „M” jelű baktériumtrágya kezelésnél figyelhető meg a harmadik levélben.

17. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 25 ppm Mn és baktériumtrágya kezelések hatására, $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$; Szignifikáns különbség a 25 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^b $p<0,01$; ^c $p<0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	39,52 $\pm$ 2,51	32,25 $\pm$ 2,26
25	32,87 $\pm$ 4,99***	20,82 $\pm$ 4,69***
25+P	34,85 $\pm$ 1,43	27,84 $\pm$ 3,92 ^b
25+B	29,98 $\pm$ 1,86	23,24 $\pm$ 4,02
25+M	29,40 $\pm$ 5,19 ^c	24,48 $\pm$ 4,16 ^c

A kukorica második levelében mért relatív klorofill tartalom megközelítőleg 6,5 SPAD-egységgel, a harmadik levélben 12 SPAD-egységgel csökkent a 25 ppm Mn-kezelés hatására a kontrollhoz képest.

A „P” baktériumtrágya kezelésnél a relatív klorofill tartalom 2 SPAD-egységgel nőtt a második levélben és 7 SPAD-egységgel a harmadikban, a 25 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva.

18. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 50 ppm Mn és baktériumtrágya kezelésekre, n=60± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ***p<0,001;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	39,52± 2,51	32,25± 2,26
50	26,49± 3,93 ^{***}	20,45± 4,97 ^{***}
50+P	24,93± 4,27	20,33± 4,56
50+B	25,80± 3,32	21,79± 4,82
50+M	27,97± 3,64	19,29± 4,72

Az 50 ppm Mn-kezelésnél a második levélben mért relatív klorofill tartalom 13 SPAD-egységgel, a harmadikban 12 SPAD-egységgel csökkent a kontrollhoz viszonyítva.

Az „M” jelű baktériumtrágya a relatív klorofill tartalmat emelte a második levélben, de a harmadikban csökkenést mértünk.

19. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 100 ppm Mn és baktériumtrágya kezelésekre, n=60± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ***p<0,001; Szignifikáns különbség a 100 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^ap<0,05; ^bp<0,01; ^cp<0,001;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	39,52± 2,51	32,25± 2,26
100	21,36± 4,06 ^{***}	18,51± 2,89 ^{***}
100+P	17,59± 3,15 ^b	17,51± 3,99
100+B	18,57± 4,17 ^a	12,20± 3,25 ^c
100+M	21,37± 1,62	16,03± 2,58 ^a

A kukorica második levelében mért relatív klorofill tartalom 18 SPAD-egységgel, a harmadik levélben 14 SPAD-egységgel csökkent a 100 ppm Mn-kezelésnél a kontrollhoz képest. A baktériumtrágya kezelésekre további csökkenés figyelhető meg. Kivéve az „M” jelű baktériumtrágyát, ahol a második levélben kontroll körüli értéket mértem.

20. táblázat: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) alakulása 200 ppm Mn és baktériumtrágya kezelésekre, n=60± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ***p<0,001;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll	39,52± 2,51	32,25± 2,26
200	14,54± 4,71 ^{***}	13,21± 4,69 ^{***}
200+P	14,43± 4,21	14,80± 3,73
200+B	12,84± 3,70	11,45± 2,20
200+M	12,27± 4,19	11,62± 3,69

A 200 ppm Mn-kezelénél figyelhető meg a legnagyobb csökkenés a relatív klorofill tartalomban. A 200 ppm Mn-kezelés már annyira toxikus, hogy a baktériumtrágyák egyáltalán nem voltak képest ezt a negatív hatást mérsékelni.

4. 1. 3. Különböző Mn-koncentrációk hatása a kukorica abszolút klorofill tartalmára

A relatív klorofill tartalom csak egy viszonylagos érték. Éppen ezért mértük a fotoszintetikus pigmentek (klorofill-a, klorofill-b, karotinoidok) mennyiségét a kukorica második és harmadik levélben (20-21. táblázatok).

21. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g^{-1}) a kukorica második és harmadik levelében 0,1 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, $n=3 \pm \text{S.D.}$ Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: * $p<0,05$; Szignifikáns különbség a 0,1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^a $p<0,05$;

2.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,65 $\pm$ 0,21	4,67 $\pm$ 0,08	9,52 $\pm$ 0,35
0,1	14,06 $\pm$ 0,12	4,33 $\pm$ 0,23	9,22 $\pm$ 0,07
0,1+P	13,76 $\pm$ 0,31 ^a	4,49 $\pm$ 0,25	9,76 $\pm$ 0,19
0,1+B	14,03 $\pm$ 0,22	4,34 $\pm$ 0,25	9,68 $\pm$ 0,13
0,1+M	14,38 $\pm$ 0,61	4,64 $\pm$ 0,44	9,56 $\pm$ 0,75
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	15,16 $\pm$ 0,97	5,09 $\pm$ 0,91	9,94 $\pm$ 0,96
0,1	14,22 $\pm$ 0,28*	4,64 $\pm$ 0,32*	9,75 $\pm$ 0,37
0,1+P	13,22 $\pm$ 0,98 ^a	4,36 $\pm$ 0,68	9,63 $\pm$ 0,89
0,1+B	14,51 $\pm$ 0,53	4,95 $\pm$ 0,46	9,66 $\pm$ 0,45
0,1+M	15,05 $\pm$ 0,56	5,34 $\pm$ 0,38	10,41 $\pm$ 0,70

Minden mért fotoszintetikus pigment mennyisége csökkent a 0,1 ppm Mn-kezelés hatására a kontrollhoz képest a kukorica második és harmadik levelében.

A „M” jelölésű baktériumtrágya kezelés hatására a mért pigmentek mennyisége kis mértékben emelkedett a 0,1 Mn-kezeléshez képest.

A második levélben mért klorofill-a mennyisége 3 mg g^{-1} -mal, a klorofill-b és a karotinoidok mennyisége 2 mg g^{-1} -mal csökkent a kontrollhoz képest az 1 ppm Mn-kezelésnél.

Az „M” jelű baktériumtrágya kezelésnél a klorofill-a mennyisége 3, a klorofill-b 1,5 és a karotinoidok mennyisége $1,7 \text{ mg g}^{-1}$ -mal nőtt a 1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva a második levélben.

A kukorica harmadik levelében szintén növekedés figyelhető meg mind a három fotoszintetikus pigment mennyiségében a „M” kezelésnél a 1 ppm Mn-kezeléshez képest.

22. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 1 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; Szignifikáns különbség az 1 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^ap<0,05; ^bp<0,01; ^cp<0,001;

2.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,65± 0,21	4,67± 0,08	9,52± 0,35
1	11,60± 0,15 ***	2,88± 0,28 ***	7,56± 0,03 **
1+P	11,91± 0,80	3,84± 0,83 ^b	7,85± 0,42
1+B	11,58± 0,19	2,72± 0,36	8,64± 1,72 ^b
1+M	13,62± 0,25 ^b	4,56± 0,65 ^c	9,31± 0,34 ^c
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	15,16± 0,97	5,09± 0,91	9,94± 0,96
1	14,11± 0,40 *	4,24± 0,59	9,28± 0,98
1+P	12,15± 0,11 ^b	3,70± 0,32 ^b	8,05± 0,24 ^b
1+B	11,47± 0,25 ^c	3,20± 0,26 ^b	7,78± 0,17 ^c
1+M	14,93± 0,29	5,15± 0,34	10,28± 0,24 ^c

23. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 5 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01; ***p<0,001; Szignifikáns különbség az 5 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

2.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,65± 0,21	4,67± 0,08	9,52± 0,3
5	8,29± 0,94 ***	2,52± 0,28 ***	6,17± 0,33 ***
5+P	11,17± 0,37 ^c	2,86± 0,66	7,44± 0,16 ^b
5+B	8,42± 0,15	2,08± 0,05	5,32± 0,02 ^c
5+M	12,46± 0,97 ^c	3,54± 0,43 ^b	8,18± 0,96 ^b
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	15,16± 0,97	5,09± 0,91	9,94± 0,96
5	14,29± 1,46	3,67± 0,15 **	8,19± 0,95
5+P	12,03± 0,20 ^b	3,88± 0,34	7,94± 0,08
5+B	11,26± 1,03 ^c	3,12± 0,03	7,39± 0,59
5+M	13,09± 0,35 ^b	4,18± 0,52	8,89± 0,19

Az 5 ppm Mn-kezelés hatására a klorofill-a mennyisége 6 mg g⁻¹-mal, a klorofill-b mennyisége 2, a karotinoidoké 3 mg-g⁻¹-mal csökkent a kontrollhoz viszonyítva a kukorica második levelében.

A klorofill-a mennyisége megközelítőleg 3 mg g⁻¹-mal, a karotinoidok mennyisége megközelítőleg 1 mg g⁻¹-mal nőtt a „P” jelű baktériumtrágya kezelésnél az 5 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva a második levelében.

A kukorica második levélben mért klorofill-a mennyisége megközelítőleg 4 mg g⁻¹-mal, a klorofill-b mennyisége 1 mg g⁻¹-mal, a karotinoidoké 2 mg g⁻¹-mal nőtt az 5 ppm Mn-kezeléshez képest.

A 10 ppm Mn-kezelés hatására a klorofill-a mennyisége 6, a karotinoidok mennyisége 3 mg g⁻¹-mal csökkent a kontrollhoz képest.

A „P” jelű baktériumtrágya kezelés hatására a klorofill-a mennyisége 4,5, a karotinoidoké 2 mg g⁻¹-mal nőtt a 10 ppm Mn-kezeléshez képest. A klorofill-a és a karotinoidok mennyiségében szintén növekedés figyelhető meg a „B” jelű kezelésnél a kukorica második levelében.

24. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 10 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01;***p<0,001; Szignifikáns különbség a 10 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

2.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,65± 0,21	4,67± 0,08	9,52± 0,30
10	8,57± 0,67***	4,12± 0,24	6,83± 0,52***
10+P	13,32± 0,12 ^c	4,33± 0,13	8,97± 0,25 ^b
10+B	12,14± 1,34 ^c	1,34± 0,40 ^c	6,91± 0,68
10+M	8,01± 0,33	2,43± 0,86 ^c	5,42± 0,39 ^b
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	15,16± 0,97	5,09± 0,91	9,94± 0,96
10	13,36± 0,49**	4,31± 0,03	9,12± 0,14
10+P	10,70± 0,37 ^c	3,27± 0,05	7,12± 0,17 ^b
10+B	13,79± 1,06	3,71± 0,30	8,23± 0,79
10+M	10,64± 0,29 ^c	3,12± 0,40 ^b	6,76± 0,00 ^b

Minden mért fotoszintetikus pigment mennyisége csökkent az összes alkalmazott kezelésnél a kukorica harmadik levelében.

A fotoszintetikus pigmentek abszolút mennyisége csökkent az összes alkalmazott kezelés hatására a kukorica második levélben.

A klorofill-a mennyisége 2,5, mg g⁻¹-mal nőtt a „M” baktériumtrágya kezelésnél a 25 ppm Mn-kezeléshez képest a kukorica harmadik levelében.

25. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 25 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a 25 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

2. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,27± 0,59	4,95± 0,24	8,57± 0,16
25	14,66± 0,14	5,62± 0,34	9,75± 0,32
25+P	12,13± 0,46 ^c	4,04± 0,45 ^b	9,24± 0,31
25+B	10,05± 0,13 ^c	3,01± 0,16 ^c	6,45± 0,16 ^c
25+M	13,08± 0,27 ^b	4,49± 0,20	7,64± 0,87 ^b

3. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	10,55± 0,19	3,26± 0,56	7,18± 0,82
25	9,65± 0,19	3,01± 0,15	6,11± 0,13
25+P	7,32± 0,12 ^c	2,18± 0,64 ^b	6,22± 0,94
25+B	9,58± 1,39	2,78± 0,31	6,26± 0,49
25+M	12,16± 1,63 ^c	2,61± 0,85	6,43± 1,32

26. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 50 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01; ***p<0,001; Szignifikáns különbség az 50 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

2. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,27± 0,59	4,95± 0,24	8,57± 0,16
50	9,72± 0,80 ^{***}	2,88± 0,17 ^{***}	6,68± 0,51 ^{**}
50+P	10,50± 0,85 ^b	3,25± 0,34 ^b	6,99± 0,48
50+B	8,09± 0,46 ^b	2,17± 0,17	5,19± 0,31 ^b
50+M	8,59± 0,05 ^b	2,40± 0,21	5,21± 0,20 ^b

3. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	10,55± 0,19	3,26± 0,56	7,18± 0,82
50	7,28± 1,20 ^{***}	2,15± 0,23 ^{**}	5,07± 0,67 ^{***}
50+P	6,41± 0,83	1,46± 0,45 ^c	4,44± 0,56 ^b
50+B	8,36± 0,36	2,60± 0,03	6,02± 0,33
50+M	4,53± 0,69 ^b	0,88± 0,12 ^c	3,38± 0,16 ^c

A kukorica második és harmadik levelében mért pigmentek mennyisége csökkent a kezelések hatására. A baktériumtrágyák pozitív hatását nem tudtuk kimutatni 50 ppm Mn-kezelésnél.

A 100 és 200 ppm Mn-kezelésnél a baktériumtrágyák pozitív hatását szintén nem lehetett kimutatni. A 100 és 200 ppm Mn-kezeléshez képest a baktériumtrágya kezelések hatására a fotoszintetikus pigmentek mennyisége tovább csökkent.

27. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 100 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001; Szignifikáns különbség a 100 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

Kezelések	2. levél		
	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,27± 0,59	4,95± 0,24	8,57± 0,16
100	10,53± 0,55 ***	3,04± 0,74 *	6,97± 0,45 **
100+P	6,92± 0,51 ^c	2,17± 0,13 ^b	4,55± 0,10 ^c
100+B	3,85± 0,15 ^b	1,65± 0,43 ^c	3,44± 0,79 ^c
100+M	8,60± 0,77 ^c	2,66± 0,42	5,52± 0,48 ^b

Kezelések	3. levél		
	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	10,55± 0,19	3,26± 0,56	7,18± 0,82
100	7,99± 0,73 ***	2,12± 0,24 *	5,57± 0,24 **
100+P	6,56± 0,04	1,71± 0,38	3,94± 0,89 ^b
100+B	4,28± 0,58 ^b	0,96± 0,27 ^c	3,09± 0,36 ^c
100+M	7,66± 0,90	1,88± 0,37	4,97± 0,55

A legkisebb csökkenés a „M” jelű baktériumtrágyánál figyelhető meg a 100 ppm Mn-kezelésnél. Míg a 200 ppm Mn-kezelésnél a „B” jelű baktériumtrágya kezelésnél tapasztalható a legkisebb csökkenés.

28. táblázat: a klorofill-a, b és karotinoidok mennyisége (mg g⁻¹) a kukorica második és harmadik levelében 200 ppm Mn és baktériumtrágyák hatására, n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ***p<0,001; Szignifikáns különbség a 200 ppm Mn-kezeléshez viszonyítva: ^bp<0,01; ^cp<0,001;

Kezelések	2. levél		
	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	14,27± 0,59	4,95± 0,24	8,57± 0,16
200	6,96± 0,41 ***	1,74± 0,32 ***	4,58± 0,47 ***
200+P	3,50± 0,36 ^c	0,82± 0,23 ^b	2,47± 0,09 ^c
200+B	4,44± 1,55 ^b	1,52± 0,88	3,01± 0,84 ^b
200+M	6,31± 0,13	1,56± 0,41	4,19± 0,02

Kezelések	3. levél		
	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll	10,55± 0,19	3,26± 0,56	7,18± 0,82
200	8,17± 1,02 ***	1,87± 0,19 ***	4,87± 0,83 ***
200+P	4,10± 0,48 ^c	1,16± 0,28	3,36± 0,92
200+B	6,41± 1,29	1,21± 0,75	4,39± 0,79
200+M	4,08± 0,45 ^c	0,91± 0,37	3,05± 0,29 ^b

4. 2. A Mn-Fe interakció és a szilícium (Si) hatásának vizsgálata tápoldatos kísérletben

Az előbbieken ismertetett eredmények alapján az 50, 100 és 200 ppm Mn-koncentrációt ítéltük toxikusnak a kukorica számára. A további vizsgálathoz, melyekben azt vizsgáltuk, hogy a különböző Fe-formák eltérően hatnak-e a kukoricára, illetve, hogy a Mn-toxikózis mérsékelhető-e Si-kezeléssel már csak ezt a három koncentrációt alkalmaztuk.

4. 2. 1. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica száraz tömegére Mn-toxikózis mellett

A különböző Fe-formák és Si együttes hatását a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére a 28. táblázatban foglaltuk össze.

29. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása az 50 ppm Mn-kezelt kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére (g növény⁻¹), n=9± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *p<0,05;***p<0,001;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll Fe-EDTA	0,425± 0,07	0,112± 0,02
Kontroll Fe-citrát	0,359± 0,05	0,108± 0,03
50ppm Mn+Fe-EDTA	0,218± 0,03***	0,084± 0,02*
50ppm Mn+Fe-EDTA+Si	0,184± 0,03***	0,091± 0,02
50ppm Mn+Fe-citrát	0,236± 0,05***	0,093± 0,02
50ppm Mn+Fe-citrát+Si	0,279± 0,02***	0,113± 0,01

A Fe-citrát kezelés hatására a kukorica hajtásának száraz tömeg 15 5-kal, a gyökéré 4 %-kal csökkent a Fe-EDTA kezeléshez képest.

A Fe-EDTA kezelésnél a kukorica hajtásának száraz tömege 49 %-kal, a gyökéré 25 %-kal csökkent az 50 ppm Mn-kezelénél. A Fe-citrát kezelésnél a hajtás száraz tömeg 45, a gyökéré 14 %-kal csökken.

A Si-kezelésnél amikor EDTA formában kapták a növények a vasat a hajtás száraz tömege 15, a gyökéré 8 %-kal nőtt. A Fe-citrát kezelésnél a növekedés 16 és 18 % az 50 ppm Mn-kezeléshez képest.



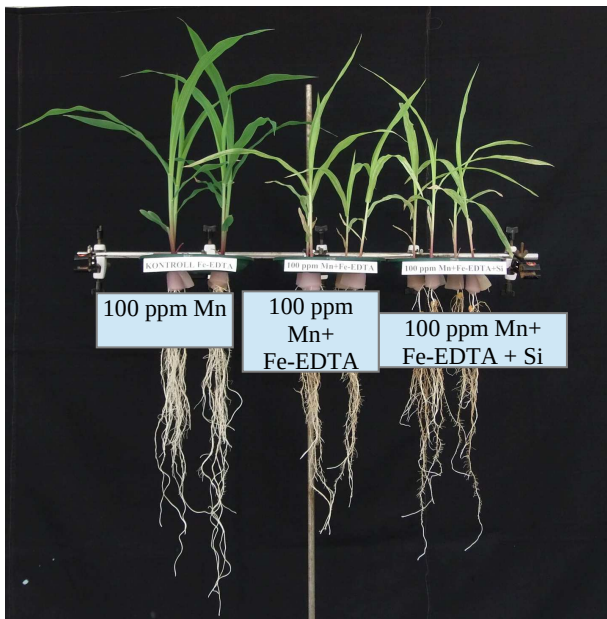
6. kép: az 50 ppm Mn kezelés és Fe-EDTA ellátás, Fe-EDTA+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)



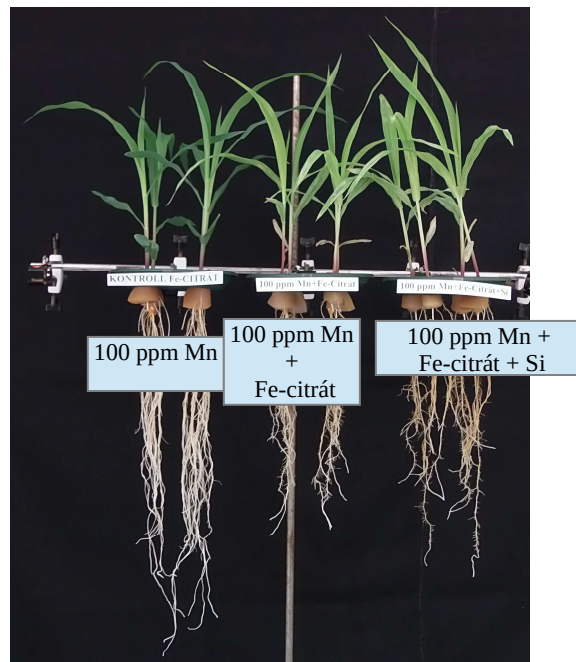
7. kép: az 50 ppm Mn kezelés és Fe-citrát ellátás, Fe-citrát+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)

30. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 100 ppm Mn-kezelt kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegére (g növény⁻¹) n=9± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01;***p<0,001;

Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll Fe-EDTA	0,425± 0,07	0,112± 0,02
Kontroll Fe-citrát	0,359± 0,05	0,108± 0,03
100ppm Mn+Fe-EDTA	0,173± 0,02 ***	0,069± 0,01 ***
100ppm Mn+Fe-EDTA+Si	0,164± 0,03 ***	0,085± 0,01 ***
100ppm Mn+Fe-citrát	0,203± 0,04 **	0,076± 0,01 ***
100ppmMn+Fe-citrát+Si	0,261± 0,05 ***	0,127± 0,03



8. kép: a 100 ppm Mn kezelés és Fe-EDTA ellátás, Fe-EDTA+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)



9. kép: a 100 ppm Mn kezelés és Fe-citrát ellátás, Fe-citrát+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtor Cs., 2014)

A Fe-citrát kezelésnél a hajtás száraz tömege 44 %-kal, a gyökéré 30 %-kal csökkent a kontroll Fe-citrát kezeléshez képest. A Si-kezelés hatására a hajtás száraz tömege 23, a gyökéré 41 %-kal nőtt a 100 ppm Mn+ Fe-citrát kezeléshez képest.

A Fe-citrát kezelésnél a 100 ppm Mn-kezelés száraz tömegre kifejtett negatív hatása Si-kezeléssel mérsékelhető.

31. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 200 ppm Mn-kezelt kukorica hajtásának és gyökérének száraz tömegére (g növény⁻¹) n=9± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01;***p<0,001;

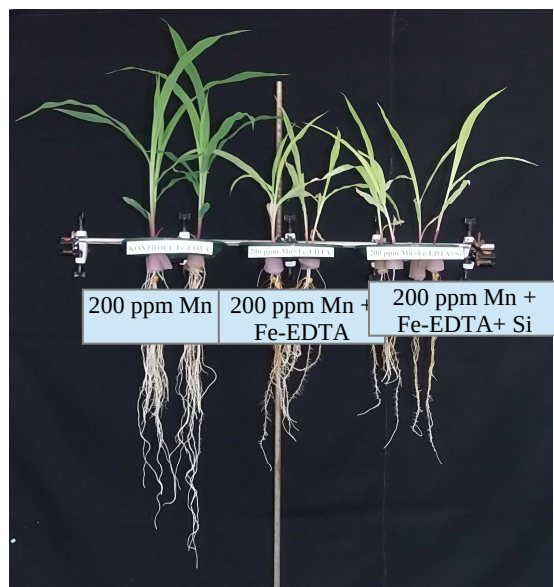
Kezelések	Hajtás	Gyökér
Kontroll Fe-EDTA	0,425± 0,07	0,112± 0,02
Kontroll Fe-citrát	0,359± 0,05	0,108± 0,03
200ppm Mn+Fe-EDTA	0,133± 0,02***	0,055± 0,01***
200ppm Mn+Fe-EDTA+Si	0,135± 0,02***	0,062± 0,01**
200ppm Mn+Fe-citrát	0,130± 0,02***	0,093± 0,02
200ppm Mn+Fe-citrát+Si	0,143± 0,03***	0,096± 0,01

A 200 ppm Mn-kezelésnél tapasztalt száraz tömeg csökkenés mind a két vas-formánál mérsékelhető Si-kezeléssel.

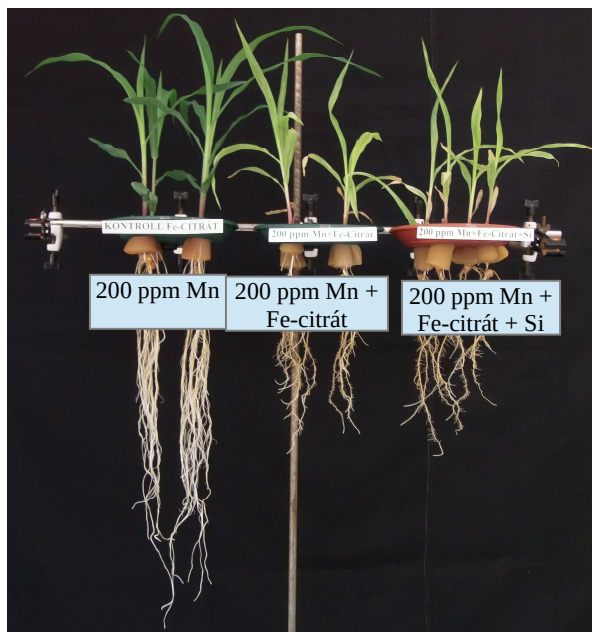
A kukorica hajtásának száraz tömege 2 %-kal, a gyökér száraz tömege 12 %-kal nőtt, amikor a növények Fe-EDTA formájában kapták a vasat és Si-kezelést kaptak, a Si-mentes kezeléshez képest.

A Fe-citrát vas-ellátásnál a hajtás száraz tömege 10, a gyökéré 4 %-kal nőtt, amikor Si-kezelést kaptak a növények a 200 ppm Mn toxikus hatásának mérséklésére.

A fenti eredmények alapján megállítható, hogy a hajtás száraz tömegére a Fe-citrát+Si kezelés, míg a gyökér száraz tömegére a Fe-EDTA+Si kezelés volt kedvezőbb hatással.



10. kép: a 200 ppm Mn kezelés és Fe-EDTA ellátás, Fe-EDTA+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtör Cs., 2014)



11. kép: a 200 ppm Mn kezelés és Fe-citrát ellátás, Fe-citrát+Si kezelés hatása a kukorica növekedésére (fotó: Bojtör Cs., 2014)

4. 2. 1. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica relatív klorofill tartalmára Mn-toxikózis mellett

A kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom alakulása a különböző vas-formák és Si-kezelés hatásár a 32-33. táblázatokban látható.

32. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása az 50 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalmára (SPAD-Units) $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll Fe-EDTA	41,90 $\pm$ 2,84	37,43 $\pm$ 3,27
Kontroll Fe-citrát	43,17 $\pm$ 2,55	38,16 $\pm$ 1,83
50ppm Mn+Fe-EDTA	17,77 $\pm$ 4,87***	14,53 $\pm$ 3,56***
50ppm Mn+Fe-EDTA+Si	18,84 $\pm$ 4,80***	17,47 $\pm$ 4,48***
50ppm Mn+Fe-citrát	28,56 $\pm$ 2,86***	28,55 $\pm$ 3,47**
50ppm Mn+Fe-citrát+Si	26,00 $\pm$ 3,65***	26,21 $\pm$ 3,63**

A kukorica második és harmadik levélben mért relatív klorofill tartalom a Fe-citrát kezelés hatására nagyobb volt, mint a Fe-EDTA kezelésénél.

A Fe-EDTA+Si kezelés hatására a relatív klorofill tartalom nőtt a kukorica második és harmadik levelében az 50 pp Mn-kezelénél.

A Fe-citrát+Si kezelésnél nem nőtt a relatív klorofill tartalom a Fe-citrát kezeléshez képest.

33. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 100 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalmára (SPAD-Units) $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll Fe-EDTA	41,90 $\pm$ 2,84	37,43 $\pm$ 3,27
Kontroll Fe-citrát	43,17 $\pm$ 2,55	38,16 $\pm$ 1,83
100ppm Mn+Fe-EDTA	12,61 $\pm$ 2,84***	15,13 $\pm$ 2,65***
100ppm Mn+Fe-EDTA+Si	12,73 $\pm$ 3,58***	11,27 $\pm$ 2,33***
100ppm Mn+Fe-citrát	21,22 $\pm$ 2,98***	21,34 $\pm$ 2,59***
100ppm Mn+Fe-citrát+Si	16,71 $\pm$ 6,93***	19,99 $\pm$ 4,91***

A második és harmadik levélben mért relatív klorofill tartalom nagyobb volt, amikor Fe-citrát formájában adagoltuk a vasat. A Si-kezelés hatására nem figyelhető meg növekedés a Si-mesten kezeléshez képest a 100 ppm Mn-kezelésnél.

34. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 200 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalmára (SPAD-Units) $n=60 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: *** $p<0,001$;

Kezelések	2. levél	3. levél
Kontroll Fe-EDTA	41,90 $\pm$ 2,84	37,43 $\pm$ 3,27
Kontroll Fe-citrát	43,17 $\pm$ 2,55	38,16 $\pm$ 1,83
200ppm Mn+Fe-EDTA	9,05 $\pm$ 3,63 ***	12,67 $\pm$ 3,12 ***
200ppm Mn+Fe-citrát	11,76 $\pm$ 3,71***	17,60 $\pm$ 3,18 ***
200ppm Mn+Fe-EDTA+Si	7,07 $\pm$ 2,45 ***	10,15 $\pm$ 3,02 ***
200ppm Mn+Fe-citrát+Si	10,55 $\pm$ 3,54***	16,12 $\pm$ 2,53 ***

A 200 ppm Mn-kezelésnél a Si-kezelés pozitív hatását tudtuk kimutatni. A második levélben mért relatív klorofill tartalom a Fe-EDTA kezelésénél 2 SPAD-egységgel nőtt Si-kezelés hatására, míg a Fe-citrát kezelésénél ez a növekedés 3 SPAD-egység volt a második levélben. Ez a növekedés a Fe-EDTA+Si kezelésnél 5, a Fe-citrát+Si kezelésnél 6 SPAD-egység a 200 ppm Mn-nál.

4. 2. 2. A különböző vas-formák és Si hatása a kukorica abszolút klorofill tartalmára Mn-toxikózis mellett

A kukorica második és harmadik levelében mért fotoszintetikus pigmentek mennyisége a különböző vas-formák és Si-kezelés hatására a 35-36. táblázatokban látható.

35. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása az 50 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért klorofill-a, b és karotinoid tartalmára (mg g^{-1}) $n=3 \pm$ S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$;

Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	13,00 $\pm$ 0,84	3,43 $\pm$ 0,08	8,23 $\pm$ 0,61
Kontroll Fe-citrát	15,65 $\pm$ 0,38	5,64 $\pm$ 0,20	11,16 $\pm$ 0,32
50ppm Mn+Fe-EDTA	6,09 $\pm$ 0,08***	1,57 $\pm$ 0,26***	4,59 $\pm$ 0,74***
50ppm Mn+Fe-EDTA+Si	3,16 $\pm$ 0,63***	0,45 $\pm$ 0,31***	2,14 $\pm$ 0,14***
50ppm Mn+Fe-citrát	11,75 $\pm$ 0,02	2,78 $\pm$ 0,72**	7,87 $\pm$ 0,03
50ppm Mn+Fe-citrát+Si	8,07 $\pm$ 0,76**	1,93 $\pm$ 0,35***	5,06 $\pm$ 0,49
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	14,95 $\pm$ 0,43	4,77 $\pm$ 0,20	10,35 $\pm$ 0,33
Kontroll Fe-citrát	15,33 $\pm$ 0,26	5,38 $\pm$ 0,31	10,97 $\pm$ 0,45
50ppm Mn+Fe-EDTA	4,88 $\pm$ 0,88***	1,02 $\pm$ 0,36***	3,59 $\pm$ 0,56***
50ppm Mn+Fe-EDTA+Si	3,22 $\pm$ 0,79***	0,45 $\pm$ 0,07***	2,11 $\pm$ 0,45***
50ppm Mn+Fe-citrát	10,42 $\pm$ 0,66***	2,71 $\pm$ 0,05**	7,21 $\pm$ 0,50**
50ppm Mn+Fe-citrát+Si	6,95 $\pm$ 0,37***	1,48 $\pm$ 0,25***	4,43 $\pm$ 0,34***

A három mért fotoszintetikus pigment mennyisége nagyobb volt a kukorica második és harmadik levélben, amikor citrát formájában kapták a növények a vasat.

Az 50 ppm Mn-kezelésnél nem tudtuk a Si-kezelés pozitív hatását kimutatni se a Fe-EDTA se a Fe-citrát kezelésnél.

A 100 ppm Mn-kezelésnél a mért fotoszintetikus pigmentek mennyisége nagyobb mértékben csökkent, amikor EDTA formájában kapták a növények a vasat.

A 100 ppm Mn-kezelésnél se tudtuk a Si-kezelés pozitív hatását kimutatni.

A 200 ppm Mn-nal kezelt növények második és harmadik levélben mért pigmentek mennyisége nőtt, amikor a növények citrát formájában kapták a vasat, a Si-mentes kezeléshez képest. A 200 ppm Mn ellátásnál Si-kezelés kedvező hatását tapasztaltuk a fotoszintetikus pigmentek mennyiségére a Si-mentes kezeléshez képest.

36. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 100 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért klorofill-a, b és karotinoid tartalmára (mg g⁻¹) n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: ***p<0,001;

2. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	13,00± 0,84	3,43± 0,08	8,23± 0,61
Kontroll Fe-citrát	15,65± 0,38	5,64± 0,20	11,16± 0,32
100ppm Mn+Fe-EDTA	4,46± 0,80***	0,56± 0,25***	3,57± 0,60***
100ppm Mn+Fe-EDTA+Si	3,57± 0,74***	0,59± 0,45***	2,39± 0,39***
100ppm Mn+Fe-citrát	6,57± 0,47***	1,37± 0,32***	4,27± 0,39***
100ppm Mn+Fe-citrát+Si	4,46± 0,44***	0,82± 0,08***	3,01± 0,25***
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	14,95± 0,43	4,77± 0,20	10,35± 0,33
Kontroll Fe-citrát	15,33± 0,26	5,38± 0,31	10,97± 0,45
100ppm Mn+FeEDTA	3,84± 0,16***	0,88± 0,16***	3,31± 0,80***
100ppm Mn+Fe-EDTA+Si	2,42± 0,30***	0,44± 0,18***	1,72± 0,21***
100ppm Mn+Fe-citrát	6,28± 0,62***	1,28± 0,05***	4,18± 0,47***
100ppm Mn+Fe-citrát+Si	3,29± 0,44***	0,86± 0,68***	2,32± 0,18***

37. táblázat: különböző vasformák (Fe-EDTA, Fe-citrát) és Si hatása a 200 ppm Mn-kezelt kukorica második és harmadik levelében mért klorofill-a, b és karotinoid tartalmára (mg g⁻¹) n=3± S.D. Szignifikáns különbség a kontrollhoz viszonyítva: **p<0,01;***p<0,001;

2. levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	13,00± 0,84	3,43± 0,08	8,23± 0,61
Kontroll Fe-citrát	15,65± 0,38	5,64± 0,20	11,16± 0,32
200ppm EDTA	3,03± 0,79***	0,25± 0,09***	1,93± 0,62***
200ppm citrát	1,57± 0,62***	0,66± 0,31***	1,79± 0,60***
200ppm EDTA+Si	3,10± 0,29***	0,43± 0,14***	2,31± 0,37***
200ppm citrát+Si	4,12± 0,74***	0,78± 0,33***	2,87± 0,34***
3.levél			
Kezelések	Klorofill-a	Klorofill-b	Karotinoidok
Kontroll Fe-EDTA	14,95± 0,43	4,77± 0,20	10,35± 0,33
Kontroll Fe-citrát	15,33± 0,26	5,38± 0,31	10,97± 0,45
200ppm EDTA	4,35± 0,62***	0,61± 0,58***	2,98± 0,41***
200ppm citrát	2,43± 0,78***	0,41± 0,00***	1,79± 0,50***
200ppm EDTA+Si	2,85± 0,13***	0,62± 0,00***	1,93± 0,24***
200ppm citrát+Si	4,27± 0,55***	0,54± 0,09***	2,69± 0,38***

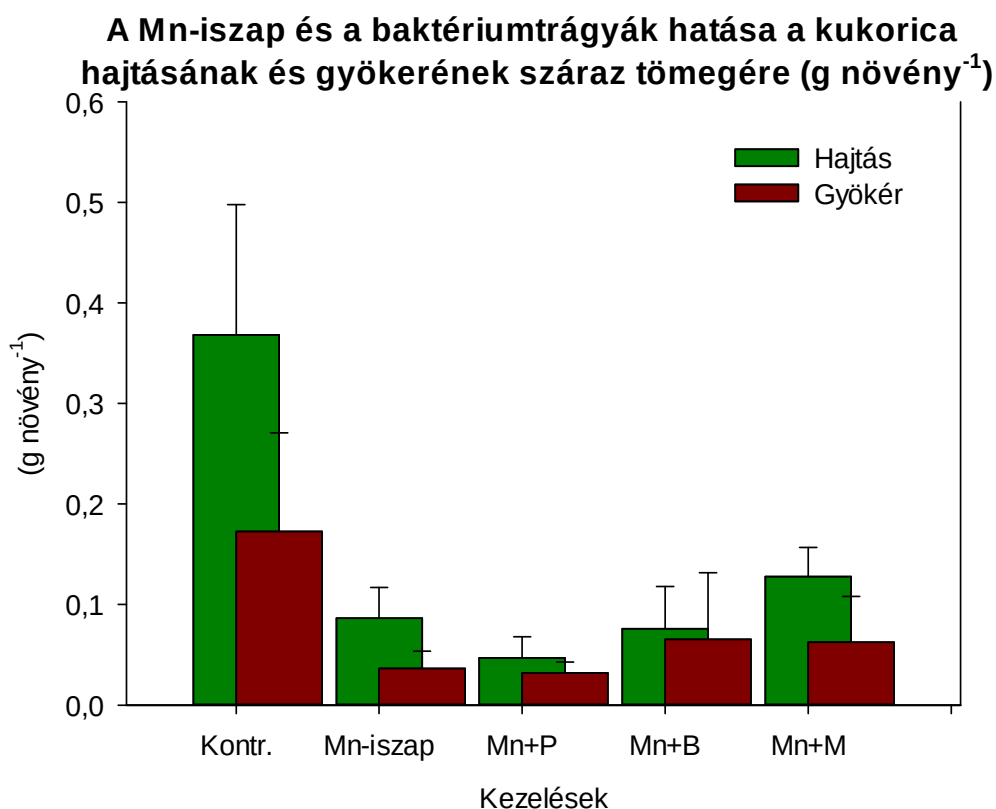
4. 3. A Mn-iszap lehetséges szerepe a tápanyag-utánpótlásban

4. 3. 1. Táphengeres kísérlet

A tápoldatos kísérletben kapott eredmények gyakorlati hasznosíthatósága érdekében magas Mn-tartalmú iszap hatását vizsgáltuk talaj-növény rendszerben.

A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömegét a 1. ábra mutatja be.

A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömege csökkent a kontroll (csernozjom talajon) nevelt növényekhez képest. A Mn-iszap+”M” baktériumtrágya kezelésénél a hajtás és a gyökér száraz tömege nőtt a baktériumtrágya kezelést nem kapott növényekhez képest. A növekedés szignifikáns.

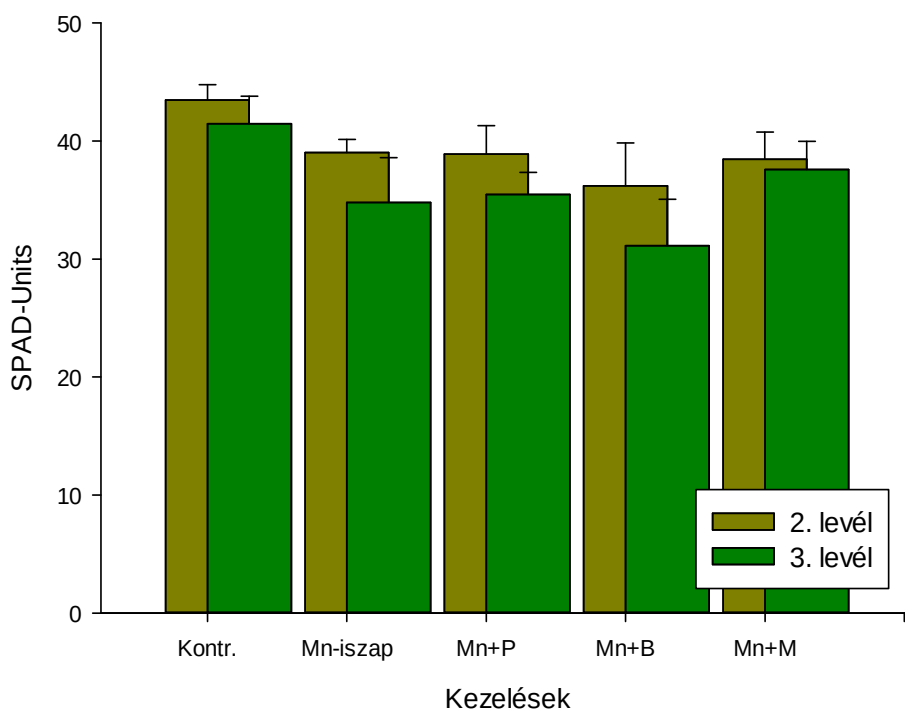


1. ábra: a kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömeg különböző kezelések hatására (g növény⁻¹) (Kontr.: kontroll, Mn-iszap, Mn+P: Mn-iszap+”P” baktériumtrágya, Mn+B: Mn-iszap+”B” baktériumtrágya, Mn+M: Mn-iszap+”M” baktériumtrágya)



12. kép: a táphengerben nevelt kukorica növények növekedése (fotó: Bojtor Cs., 2014)

A relatív klorofill tartalom alakulása a kukorica második és harmadik levelében Mn-iszap és baktériumtrágya kezelésekre



2. ábra: a kukorica második és harmadik levelében mért relatív klorofill tartalom (SPAD-Units) különböző kezelésekre hatására (Kontr.: kontroll, Mn-iszap, Mn+P: Mn-iszap+”P” baktériumtrágya, Mn+B: Mn-iszap+”B” baktériumtrágya, Mn+M: Mn-iszap+”M” baktériumtrágya)

A kukorica második és harmadik levélben mért relatív klorofill tartalom csökkent minden kezelés hatására.

A baktériumtrágya kezelések hatására nem látható növekedés a relatív klorofill tartalomban.

A kísérletben mértük a kukorica hajtás és gyökere által felvett elemek mennyiségét is. A kísérletünk szempontjából fontosabb elemek mennyiségét a 37-38. táblázatokban foglaltuk össze.

38. táblázat: a Mn-iszapon nevelt és különböző baktériumtrágya (P, B, M) kezelést kapott kukorica hajtásában mért elemek(Fe, Mn, Zn) mennyisége (mg kg⁻¹) <KH: kimutatási határérték alatt

Elemek	Kezelések				
	Kontroll	Mn-iszap	Mn-iszap+P	Mn-iszap+B	Mn-iszap+M
Fe	77,1	8,81	27,4	6,6	47,3
Mn	50,9	93,6	179	177	241
Zn	13	0,21	<KH	6,1	9,6

A gyökerek által felvett elemek mennyiségének transzportja a hajtása gátolt volt. A vizsgált elemek a gyökérben halmozódtak fel.

39. táblázat: a Mn-iszapon nevelt és különböző baktériumtrágya (P, B, M) kezelést kapott kukorica gyökerében mért elemek (Fe, Mn, Zn) mennyisége (mg kg⁻¹) <KH: kimutatási határérték alatt

Elemek	Kezelések				
	Kontroll	Mn-iszap	Mn-iszap+P	Mn-iszap+B	Mn-iszap+M
Fe	5287	10153	12413	13830	13267
Mn	180	6342	8143	8934	8644
Zn	15,3	18	18,4	<KH	<KH

A baktériumtrágya kezelések hatására nőtt a gyökér által felvett Mn-mennyisége, ami azzal magyarázható, hogy a baktérium által kiválasztott szerves anyagokkal a Mn-kelátot képezhetett, ezáltal könnyebb volt annak felvétele. A Mn-felvételével párhuzamosan a Fe-felvétele is növekedett. Míg, a Zn mennyisége két kezelésnél is (B, M) a kimutatási határérték alatt maradt.

4. 3. 2. Rhizoboxos kísérlet

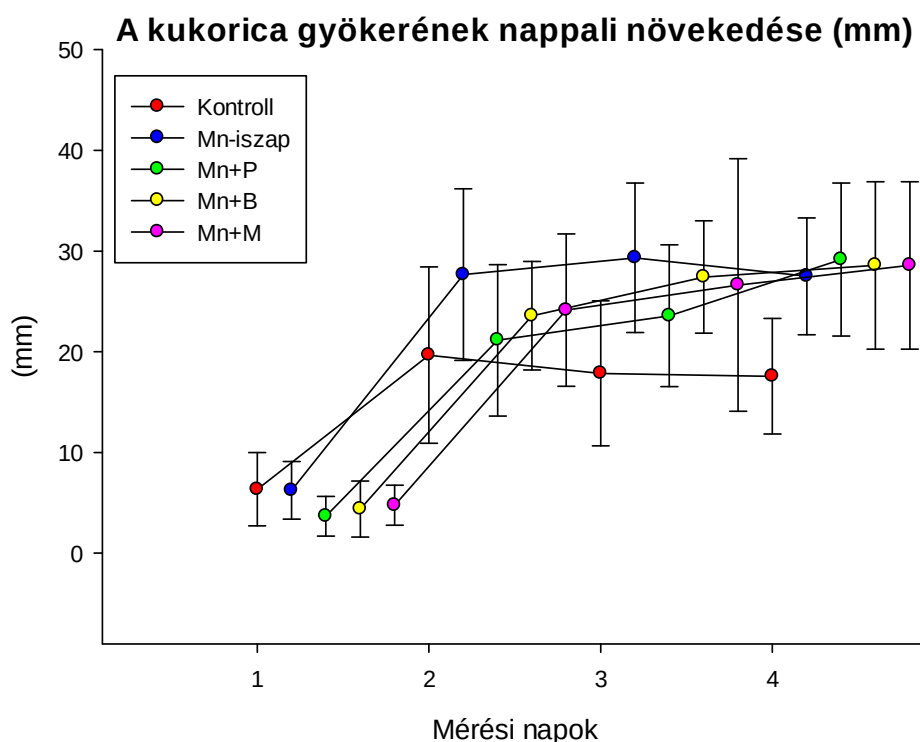
A rhizoboxban nevelt növények gyökének nappali és éjszakai növekedését az x és y. ábrák mutatják be.

A kukorica gyökérének nappali növekedése 72 mm-rel nőtt a mérés második napján a Mn-iszapon nevelt kukoricánál a kontrollhoz viszonyítva. Szintén ezen a mérési napon a „P” jelű baktériumtrágya + Mn-iszap kezelésnél a gyökér hossza 29 mm-rel csökkent a kontrollhoz

képest. Ez a csökkenés a „B” baktériumtrágyánál csak 12 mm. A „M” jelű baktériumtrágyánál növekedés figyelhető meg – 16 mm – a kontroll kukorica gyökérhosszához képest.

A harmadik mérési napon a Mn-iszapon nevelt kukorica gyökerének hossza 139 mm-rel volt nagyobb, mint a kontrollé. A „P” baktériumtrágyánál 40, a „B” baktériumtrágyánál 67, a „M” jelölésűnél 88 mm-rel a kukorica gyökérhossza a kontrollhoz képest.

A Mn-iszapon nevelt kukorica gyökerének nappali hossza 97 mm-rel a kontrollhoz képest. A „P” baktériumtrágyánál 52, a „B” és a „M” baktériumtrágyánál 77 mm növekedés figyelhető meg a negyedik mérési napon.

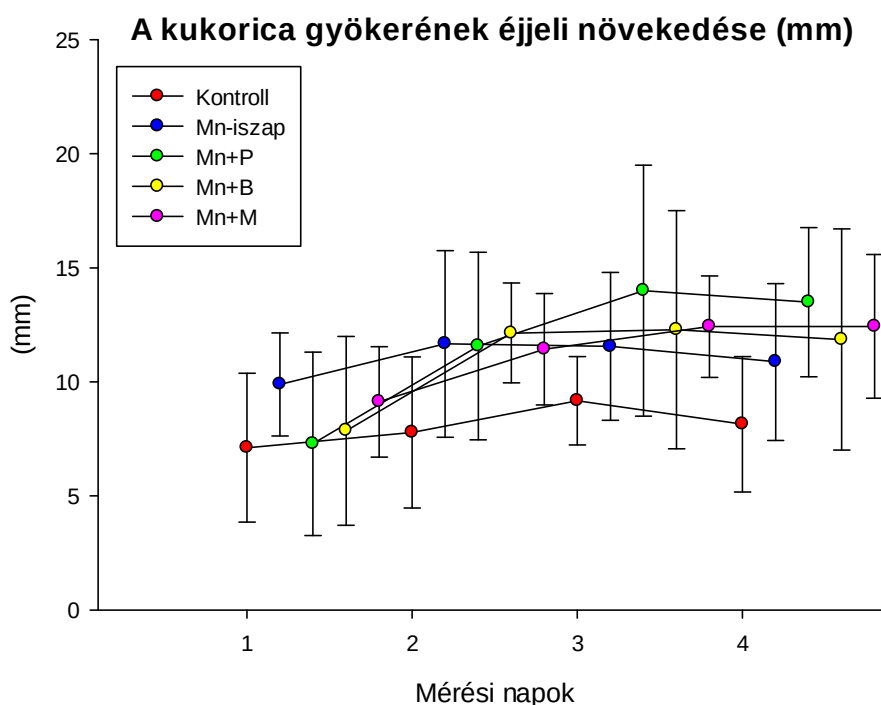


3. ábra: a kukorica gyökerének nappali növekedése (mm) $n=9 \pm S.D.$

A kukorica gyökerének éjjeli növekedése 35 mm-rel nőtt a mérés második napján a Mn-iszapon nevelt kukoricánál a kontrollhoz viszonyítva. Szintén ezen a mérési napon a „P” jelű baktériumtrágya + Mn-iszap kezelésnél a gyökér hossza 11 mm-rel nőtt a kontrollhoz képest. Ez a növekedés a „B” baktériumtrágyánál 15 mm. A „M” jelű baktériumtrágyánál növekedés figyelhető meg – 10 mm – a kontroll kukorica gyökérhosszához képest.

A harmadik mérési napon a Mn-iszapon nevelt kukorica gyökerének hossza 49 mm-rel volt nagyobb, mint a kontrollé. A „P” baktériumtrágyánál 54, a „B” baktériumtrágyánál 31, a „M” jelölésűnél 32 mm-rel a kukorica gyökérhossza a kontrollhoz képest.

A Mn-iszapon nevelt kukorica gyökerének éjjeli hossza 30 mm-rel a kontrollhoz képest. A „P” baktériumtrágyánál 24, a „B” baktériumtrágyánál 26 mm és a „M” baktériumtrágyánál 30 mm növekedés figyelhető meg a negyedik mérési napon.



4. ábra: a kukorica gyökerének nappali növekedése (mm) $n=9 \pm \text{S.D.}$

Az 40. táblázatban a kukorica gyökerének nappali és éjszaki össznövekedése figyelhető meg.

40. táblázat: a kukorica gyökerének nappali és éjjeli össznövekedése (mm) Mn-iszap és Mn-iszap+baktériumtrágya kezelések hatására, $n=9 \pm \text{S.D.}$

Kezelések	nappal (mm)	éjjel (mm)
Kontroll	482± 53,55	246± 27,33
Mn-iszap	789± 87,66	385± 42,77
Mn+P	510± 72,86	311± 44,43
Mn+B	592± 84,57	309± 44,13
Mn+M	644± 92,00	327± 46,71

A kukorica gyökerének nappali és éjszaki növekedésének vizsgálatakor azt tapasztaltuk, hogy a Mn-iszap kezelés hatására a kukorica gyökerének hossza nőtt a kontrollhoz képest. Megállapíthatjuk, hogy a magas Mn-koncentráció kedvező hatással van a kukorica gyökerének kezdeti fejlődésére.



13. kép: a rhizoboxban nevelt kukorica növények gyökérnövekedése (fotó: Bojtor Cs., 2014)



14. kép: a Mn-iszapon nevelt és baktériumtrágyával kezelt növények gyökérsav kiválasztása (foto: Bojtor Cs., 2014)

A 14. képen a Mn-iszapon nevelt kukorica gyökérsav kiválasztása látható. A kontroll növény gyökérsav kiválasztásával összehasonlítva a „M” baktériumtrágya kezelésnél figyelhető meg intenzívebb gyökérsav kiválasztás (sárga szín). Az intenzív gyökérsav kiválasztás nem kedvező, mert a növény a megtermelt szerves anyag 30 %-át is képes a gyökereken keresztül kiválasztani, így azok nem a felépítő folyamatokra fordítódnak.

A baktériumtrágyával nem kezelt Mn-iszapon nevelt kukorica gyökerének gyökércsúcsain látható intenzívebb gyökérsav kiválasztás.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A tápoldatos kísérletekben megállapítottuk, hogy a toxikus tünetek az 50 ppm $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ kezelésnél jelentkeztek. A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömege egyaránt csökkent a kezelés hatására.

Az alacsonyabb (0,1; 1; 5 és 10 ppm) koncentrációjú kezeléseknél a baktériumtrágyák kedvező hatását nem tudtuk kimutatni, mert ezeknél a kezeléseknél nem voltak toxikus tünetek megfigyelhetők.

A vas oxidáltsági fokát a Mn határozza meg. Kísérletünkben vizsgáltuk két vasforma hatását a mangán toxikózisra, valamint a Mn-toxikózis Si-kezeléssel való mérséklésének lehetőségét. Az száraz tömegre kifejtett hatás alapján megállapítható, amikor citrát formájában kapták a növények a vasat, a Si-kezelés kedvezőbb hatásokat eredményezett a Fe-EDTA kezeléshez képest. Ez azzal magyarázható, hogy a vas-citrátot könnyebben fel tudták venni a növények.

A mangán toxikus tüneteinek mérséklésére az irodalom a szilícium (Si) kezelést javasolja. Eredményeink alapján állítjuk, hogy a baktérium tartalmú trágyák alkalmasak lehetnek a mangán növényekre kifejtett toxikus hatásának mérséklésére. Ez a mérséklő hatás a mangán koncentráció, mint stressz, valamint az alkalmazott baktérium faj függvénye.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom általános célkitűzése annak bizonyítása, hogy a nehézfémek – jelen esetben a mangán (Mn) – növények általi felvétele csökkenhető baktérium tartalmú trágyák, illetve szilícium (Si) alkalmazásával.

A növényeket hidropóniás körülmények között, klímaszobában neveltük. A környezeti feltételek szabályozottak voltak. A kísérleti növény a kukorica (*Zea mays* L. DKC5170) volt. A kísérletbe vont baktérium trágyák összetétele az alábbi: (A): *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*; (B): *Azospirillum brasilense*, *Azotobacter vinelandii*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus polymyxa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Streptomyces albus*; (C): *Azotobacter chroococcum*, *Azospirillum* ssp., *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*.

A mangánt $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ formájában alkalmaztuk az alábbi mennyiségekben: 0,1 ppm; 1 ppm; 5 ppm; 10 ppm, 25 ppm; 50 ppm; 100 ppm és 200 ppm.

Kisebb Mn-koncentrációknál a baktérium trágyák pozitív hatását nem tudtuk kimutatni. Irodalmi adatok szerint a kukorica számára a 200 ppm Mn toxikus, ezzel ellentétben mi már 50 ppm Mn-kezelésnél toxikus tüneteket figyeltünk meg. A 25-100 ppm közötti baktérium kezelések több esetben is pozitív eredményt adtak. A kukorica hajtásának és gyökerének száraz tömege a 25 és 50 ppm $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ adagnál nőtt mind a három baktérium trágya hatására a csak $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ kezelést kapottakhoz képest. A 100 ppm $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ + „A” biotrágya kezelés a kukorica hajtásának száraz tömegét, míg a 100 ppm $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ + „B” biotrágya kezelés a kukorica gyökerének száraz tömegét növelte a mangán kezeléshez viszonyítva. A 200 ppm mangán száraz tömegre kifejtett hatását a „B” és a „C” biotrágya mérsékelni tudta.

Az előbbieken ismertetett eredmények alapján az 50, 100 és 200 ppm Mn-koncentrációt ítéltük toxikusnak a kukorica számára. A további vizsgálatokhoz, melyekben azt vizsgáltuk, hogy a különböző Fe-formák miképpen hatnak a kukoricára, illetve, hogy a Mn-toxikózis mérsékelhető-e kiegészítő Si-kezeléssel. A hajtás száraz tömegére a Fe-citrát+Si kezelés, míg a gyökér száraz tömegére a Fe-EDTA+Si kezelés volt kedvezőbb hatással.

Eredményeink alapján állítjuk, hogy a baktérium tartalmú trágyák alkalmasak lehetnek a mangán növényekre kifejtett toxikus hatásának mérséklésére. Ez a mérséklő hatás a mangán koncentráció, mint stressz, valamint az alkalmazott baktérium faj függvénye.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretném köszönetemet kifejezni konzulensemnek, Dr. Tóth Brigitta egyetemi tanársegédnek a kísérletek beállításában, kivitelezésében és a dolgozat elkészítésében nyújtott önzetlen segítségéért.

Külön köszönettel tartozom Prof. Dr. Kovács Béla Róbert professzornak, és az Agrár Műszerközpont munkatársainak az elemtartalom mérésekhez nyújtott segítségükért.

Köszönet illeti Farkas István urat, az úrkuti mangánbánya vezérigazgatóját, a magániszap rendelkezésre bocsátásáért.

Nem utolsó sorban köszönöm a DE MÉK Növénytudományi Intézet, Mezőgazdasági Növényteni, Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék dolgozóinak, különösképpen Csákyiné Faragó Erzsébet laboránsnak a vizsgálataim elvégzéséhez nyújtott segítségét.

IRODALOMJEGYZÉK

- Buntje G.:**1979. Untersuchungen zum Einfluß der Mangan- und Kupferversorgung auf die Kälteresistenz von Winterweizen, Hafer und Mais anhand von Gefäßversuchen. Dissertation, Universität Kiel.
- Constantopoulus G.:** 1970. Lipid metabolism of manganese-deficient algae. I. Effect of manganese deficiency on the greening and the lipid composition of *Euglena gracilis* Z. Plant Physiol. 45, 76-80.
- Davis J. G.:** 1996. Soil pH and magnesium effects on manganese toxicity in peanuts. J. Plant Nutr. 19, 535-550.
- Doncheva S., Poschenrieder C., Stoyanova Z., Georgieva K., Velichkova M., Barcelo J.:** 2009. Silicone amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. Environ. Exp. Bot. 65, 189-197.
- Edwards D. G., Asher C. J.:** 1982. Tolerance of crop and pasture species to manganese toxicity. In Proceedings of the Ninth Plant Nutrition Colloquium, Warwick, England (A. Scaife ed.) pp. 145-150. Commonw. Agric. Bur., Farnham Royal, Bucks.
- Emadian S. F., Newton R. J.:** 1989. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. J. Plant Physiol. 134, 98-103.
- Fodor F., Zsoldos F.: 1998. Növényélettan, a növényi anyagcsere (Láng F. ed), ELTE Eötvös Kiadó Budapest.
- Hughes N. P., Williams R. J. P.:** 1988. An introduction to manganese biological chemistry. In Manganese in Soils and Plants (R. D. Graham, R. J. Hannam and N. C. Uren, eds.) pp. 7-19. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Husted S., Laursen K. H., Hebborn C. A., Schmidt S. B., Pédas P., Haldrup A., Jensen P. E.:** 2010. Manganese deficiency leads to genotypes-specific changes in fluorescence induction kinetics and state transitions. Plant Physiol. 150, 825-833.
- Idris M., Vinther F. P., Jensen V.:** 1975. The effect of silicon on lodging of rice in presence of added nitrogen. Plant Soil 43, 691-995.
- Jones L. H. P., Handreck K. A.:** 1969. Uptake of silica by *Trifolium incarnatum* in relation to the concentration in the external solution and to transpiration. Plant Soil 30, 71-80.
- Godo G. H., Reisenauer H. M.:1980. Plant effects on soil manganese availability. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 993-995.

- Gong X., Wang Y., Liu C., Wang S., Zhao X., Li N., Lu Y., Hong F.:** 2010. Effects of manganese deficiency on spectral characteristics and oxygen evolution in maize chloroplasts. *Biol. Trace Elem. Res.* 136, 372-382.
- Guerinot M. L.:** 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochim. Biophys Acta* 1465, 190-198.
- Kriedemann P. E., Graham R. D., Wiskich J. T.:** 1985. Photosynthetic dysfunction and *in vivo* changes in chlorophyll a fluorescence from manganese-deficient wheat leaves. *Aust. J. Agric. Res.* 36, 157-169.
- Lemanceau P., Bauer P., Kraemer S., Briat J. F.:** 2009. Iron dynamics in the rhizosphere as a case study for analyzing interactions between soils, plants and microbes. *Plant Soil* 321, 513-535.
- Lerer M., Bar-Akiva A.:** 1976. Nitrogen constituents in manganese-deficient lemon leaves-*Phyiol. Plant* 38, 13-18.
- Longnecker N. E., Graham R. D., Card G.:** 1991. Effects of manganese deficiency on the pattern of tillering and development of Marley (*Hordeum vulgare* c.v. Galleon). *Field Crops Res.* 28, 85-102.
- Ma J. F., Yamaji N.:** 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.* 11, 392-397.
- Ma J. F., Takahashi E.:** 2002. *Soil, Fertilizer, and Plant Silicone Research in Japan.* Elsevier, Amsterdam.
- Marcar N. E., Graham R. D.:** 1987. Genotypes variation for manganese efficiency in wheat. *J. Plant Nutr.* 10, 2049-2055.
- Mitani N., Yamaji N., Ago Y., Iwasaki K., Ma J. F.:** 2011. Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation. *Plant J.* 66(2):231-40.
- Moran R., Porath D.:** 1980. Chlorophyll determination in intact tissues using N,N-dimethylformamide. *Plant Physiol.* 65, 478-479.
- Nable R. O., Bar-Akiva A., Loneragan J. F.:** 1984. Functional manganese requirement and its use as a critical value for diagnosis of manganese deficiency in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L. cv. Seaton Park). *Ann. Bot.* 54, 39-49.
- Ohki K., Boswell F. C., Parker M. B., Shuman L. M., Wilson D. O.:** 1979. Critical manganese deficiency level of soybean related to leaf position. *Agron. J.* 71, 233-234.
- Okuda A., Takahashi E.:** 1965. The role of silicon. *Min. Nutr. Rice Plant Proc. Symp. Int. Rice Res. Inst.* 1964. pp. 123-146.

- Pinton R., Cesco S., De Nobili M., Santi S., Varanini Z.:** 1998. Water and pyrophosphate-extractable humic substances fractions as a source of iron for Fe-deficient cucumber plants. *Biol. Fert. Soil* 26, 23-27.
- Pirson A.:** 1937. Ernährungs- und stoffwechselphysiologische Untersuchungen an *Frontalis* und *Chlorella*. *Z. Bot.* 31, 193-267.
- Raven J. A.:** 1983. The transport and function of silicon in plants. *Biol. Rev. Cambridge Philos. Soc.* 58 (2), 179-207.
- Rengel Z.:** 1997. Root exudation and microflora populations in rhizosphere of crop genotypes differing in tolerance to micronutrient deficiency. *Plant Soil* 196, 255-260.
- Rengel Z., Grham R. D., Pedler J. F.:** 1993. Manganese nutrition and accumulation of phenolics and lignin as related to differential resistance of wheat genotypes to the take-all fungus. *Plant Soil* 151, 255-263.
- Sharma C. P., Sharma P. N., Chatterjee C., Agarwala S. C.:** 1991. Manganese deficiency in maize effects pollen viability. *Plant Soil* 138, 139-142.
- Shenker M., Plessner O. E., Tel Or E.:** 2004. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity. *J. Plant Physiol.* 161, 197-202.
- Vielemeyer H. P., Fischer F., Bergmann W.:** 1969. Untersuchungen über den Einfluß der Mikronährstoffe Eisen und Mangan auf den Stickstoff-Stoffwechsel landwirtschaftliche Kulturpflanzen. 2. Mitt.: Untersuchungen über die Wirkung des Mangans auf die Nitratreduktion und der Gehalt an freien Aminosäuren in jungen Buschbohnenpflanzen. *Albrecht-Thaer-Arch.* 13, 393-404.
- Werner D., Roth R.:** 1983. Silica metabolism. In *Encyclopedia of Plant Physiology. New Series* (A. Läuchli and R. L. Bielecki, eds.) Vol. 15B, pp. 682-694. Springer-Verlag. Berlin and New York.
- Wissemeier A. H., Horst W. J.:** 1991. Simplified methods for screening cowpea cultivars for manganese leaf-tissue tolerance. *Crop Sci.* 31, 435-439.