

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Prettl Nándor

Budapest

2025



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**TALAJOLTÁS ÉS KÉMIAI TALAJJAVÍTÁS HATÁSA A NÖVÉNYI
NÖVEKEDÉSRE A TÁPANYAG-ELLÁTOTTSÁG FÜGGVÉNYÉBEN**

Prettl Nándor

Budapest

2025

A doktori iskola

megnevezése: Kertészettudományi Doktori Iskola

tudományága: Növénytermesztési és kertészeti tudományok

vezetője: Zámboriné Dr. Németh Éva, DSc.
tanszékvezető, egyetemi tanár
MATE
Kertészettudományi Intézet, Gyógy- és Aromanövények
Tanszék

Témavezető(k): Dr. Biró Borbála, DSc.
egyetemi tanár, prof. emerita
MATE
Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék

Dr. Juhos Katalin, PhD.
habilitált egyetemi docens
MATE
Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

A növekvő élelmiszerigények fenntartható módon történő megtermelése az egyik legnagyobb globális kihívás, tekintve, hogy a Föld lakossága 2050-re elérheti a 9-10 milliárd főt. Jelenleg a mezőgazdasági termelésben a tápanyagutánpótlás főként szintetikus műtrágyák alkalmazásával történik, mely azonban nem nélkülözheti a szervesanyag növelő és biológiai aktivitást serkentő kiegészítő termesztési technológiákat. A talajok szervesanyaga és a talajlélélények, beleértve a baktériumokat és gombákat, védik a talajokat a szélsőséges időjárási behatásokkal szemben, továbbá javítják a tápanyagfelvételt és a talajok szerkezetét. Fontos, hogy az agrotechnikai elemek hatását a talajegészségre, valamint a növények növekedésére, mérésekkel minél alaposabban alátámasszuk.

Az Európai Bizottság a „Termőföldtől az asztalig” program részeként európai célként tűzte ki a műtrágyák használatának 20%-os csökkentését 2030-ig, továbbá az ENSZ 17 pontos 2030-ig szóló Fenntartható Fejlődés céljainak a mezőgazdaság az egyik kulcsszereplője (Veerman et al., 2020). Ezzel egyidőben a növényegészséget támogató és tápanyag mobilizáló mikrobiológiai oltóanyagok tudományos és gyakorlati szerepe felértékelődik a mezőgazdaságban (Nkebiwe et al., 2024).

Az Agrárminisztérium 2023-ban bevezetett egy ösztönző támogatási formát - Agro-ökológiai program - melynek célja, hogy a gazdálkodók környezeti szempontból hasznos önkéntes vállalatokat tegyenek az éghajlatváltozás mérséklése, a talaj- és vízvédelem, és a biológiai sokféleség védelme érdekében. A program egyik választható eleme a mikrobiológiai készítmények alkalmazása szántóterületeken, mely jelentősen növelte a Magyarországon oltóanyaggal kezelt területek számát. A minisztérium adatközlése alapján 2023-ban Magyarországon legalább az összes szántóterület 14,4 %-án használtak mikrobiológiai készítményeket a földhasználók. Ennek ellenére sokan megkérdőjelezzik a készítmények gyakorlati hatását és létjogosultságát. A felhasználók többsége olyan hatást vár el a készítményektől, melyek többnyire a kedvezőtlen környezeti feltételek miatt egy ideális mikroba-növény kapcsolat esetén sem jöhetnek létre. A készítmények szubjektív vélemények alapján történő megítélése helyett fontos lenne minél több szakszerűen beállított, többféle talajtípuson és évszabványban végzett, főként szabadföldi kísérlet, melyek támogatnák a mikrobiális készítmények gyakorlati felhasználását. Magyarországon kevés tudományosan megalapozott kutatás zajlik az oltóanyagokkal kapcsolatban, a nemzetközi irodalom eredményei pedig meglehetősen egyoldalúak. A külföldi példák többsége nem említi a negatív vagy semleges hatásokat az oltóanyagokkal kapcsolatban, és nagyrészt olyan tudományos eredmények jelennek meg, amelyben a növényekre pozitív hatást tapasztaltak, és a legtöbb publikáció nem a kontinentális éghajlati régióból származik.

A kutatás során mikrobiológiai készítmények (a PSP, Plant Strengthening Products) hatását vizsgáltuk a kukoricára és őszi búzára eltérő tápanyag-ellátottságú és kémhatású talajokban szabadföldi és tenyészedényes körülmények között. A kísérleteket többségében gyenge tápanyag ellátottságú, savanyú agyagbemosódásos barna erdőtalajon és jó tápanyag ellátottságú, semleges réti talajon állítottuk be, vizsgálva a talajbiológiai paraméterek és a kultúrnövény növekedése közötti összefüggéseket is. Munkánk során a következő hipotéziseket fogalmaztuk meg:

Feltételeztük, hogy

- gyengébb tápanyagszolgáltató képesség és talajbiológiai aktivitás mellett a starter műtrágyák alkalmazásának szignifikáns hatása van a kukorica termésére;
- a talajok fizikai-kémiai tulajdonságai közötti különbségek és a műtrágyázás intenzitása alapvetően meghatározzák a baktérium és mikorrhiza oltóanyag készítmények eredményességét;
- a baktérium oltás hatékonysága és a talaj biológiai aktivitása javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj meszezésével;
- a talaj őshonos baktérium közössége a kijuttatott baktérium készítmény hatását befolyásolja, de a hatás függ a talaj tápanyag-ellátottságától;
- az oltóanyagok növényekre gyakorolt hatásai előrejelezhetők a talajbiológiai és a növény növekedési paraméterek monitorozásával.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Szabadföldi kísérletek beállítása

2.1.1. Termőhelyek talajtípusai és művelésük

Szabadföldi kísérleteinket kétféle, egymástól meghatározó tulajdonságaiban jelentősen különböző talajtípuson állítottuk be (1. táblázat). A talajok termőhelyei Baranya vármegyében, a Mecsektől északi irányban helyezkednek el.

1. táblázat: A két kísérleti helyszín 0-25 cm-es rétegben mért talajtulajdonságai a kísérletet megelőzően mérve, még az első termésnövelő készítmény kijuttatása előtt (2020).

Talaj paraméterek	Mérték- egység	Helyszín1 ABET	Helyszín2 RT
Talaj textúra	-	vályog	agyag
pH	-	4,91	6,75
Teljes szerves szén	m/m%	0,94	1,45
Permanganát oxidálható labilis szén- tartalom	mg/kg	371	647
Potenciálisan felvehető P	mg/kg	29	132
Teljes szerves P	mg/kg	27	169
Teljes szervesetlen P	mg/kg	489	819
Elérhető (kicserélhető) K	mg/kg	128	201
Kationcsere kapacitás	meq/100g	12,79	18,78
Szabadföldi vízkapacitás (pF 2.4)	v/v%	26,74	33,46

Az 1. helyszín talajtípusa (agyagbemosódásos barna erdőtalaj, ABET) az alacsony szervesanyag tartalmú és erősen savanyú pH-jú, vályogszerkezetű Luvisol-okhoz (WRB) sorolható. A jó vízkapacitás és kationcserélő kapacitás mellett ez a termőhely jó káliumellátottsággal is rendelkezik. Az összes P mennyisége azonban alacsony, amelyben a savas pH miatt a potenciálisan elérhető hányad is alacsony (a szervesetlen P 6%-a lehet elérhető). A szerves P aránya nagyon alacsony (az összes P 5,5 %-a). Az ABET talajon a rendelkezésre álló cink is kevés. A 2. helyszín talajtípusa (réti talaj, RT) a Gleysol-okhoz (WRB) sorolható, agyagos vályogszerkezetű és az 1. helyszínhez képest magasabb víztartó képességgel és kationcserélő kapacitással rendelkezik. Semleges pH-jú és magasabb szervesanyag tartalmú, mint az ABET. Ezen a talajon az összes szerves és szervesetlen P jelentősen meghaladja az 1. helyszín értékeit. Az RT talajon a rendelkezésre álló P az összes szervesetlen P 16%-a. A semleges pH és a magasabb szervesanyag tartalom hozzájárul a P kedvezőbb felvehetőségéhez.

A rendelkezésre álló kálium és cink mennyisége megfelelő. A talajok biológiai aktivitása közötti különbséget jól szemlélteti a talajok permanganáttal oxidálható labilis szén tartalma, amely érték az RT-n majdnem kétszerese a ABET talajénak.

A kísérleteket négy egymást követő évben végeztük, az első, második és negyedik évben a tesztnövény kukorica (*Zea mays* L.), a harmadik évben pedig őszi búza (*Triticum aestivum* L.) volt. A kísérlet alatt és a kísérletet megelőzően a területeken konvencionális talajművelést folytattak, hagyományos N, P, K műtrágya kijuttatásával. Állati tárgyat nem juttattak ki az elmúlt húsz évben, de a kultúrnövény szármaradványát minden évben a területen hagyták és bedolgozták. A kísérlet ideje alatt forgatásos talajművelést nem alkalmaztak.

2.1.2. Időjárási körülmények

A kísérleti területek meleg nyári, nedves kontinentális éghajlatúak. A két helyszín között félúton kihelyeztünk egy csapadékmérőt és minden eső után feljegyeztük a hullott csapadékmennyiséget. A kukorica tenyészidőszakokban, a 2020-as évben 383 mm, 2021-ben 210 mm, 2023-ban pedig 362 mm csapadékot mértünk. A vizsgált kukorica tenyészidőszakból egy száraznak, a másik kettő lehullott csapadék szempontjából átlagosnak mondható. A 2022-es búza év a tenyészidőszak szempontjából átlagos csapadékmennyiségű volt (458 mm). A csapadék mindkét talajon jelentős hatással volt a növények fejlődésére és termés hozamára.

2.1.3. Kísérletek bemutatása, parcellák kezelése és műtrágyázási szintek

2020, 2021, 2023-as években vizsgáltuk a starter műtrágyázás hatását (Starter) kukorica kultúrnövényben. 2020-2023-ban négy évig vizsgáltuk a baktérium oltás hatását (Bakt1, Bakt2). 2023-ban vizsgáltuk a CaCO_3 -mal történt meszezés hatását, illetve annak kombinációját baktérium oltással (Bakt2). Továbbá 2021-2023-as években vizsgáltuk az arbuszkuláris mikorrhiza gomba oltás (Myc) hatását mindhárom évben kétféle talajtípuson. A kísérletek a négy év során ugyanarra a táblára és talajtípusra kerültek. 2020 évet követően a kísérleti parcellákat a táblán belül áthelyeztük olyan területre, ahol a korábbi években még nem történt kísérleti beállítás, azonban 2021 és 2022-ben az azonos kezelésű kísérleti parcellák egymással megegyező helyre kerültek. A kísérletek beállítása során kifejezetten fontosnak tartottuk, hogy a korábban oltóanyag kezelésben részesült terület rész a következő években ne lehessen kontroll parcella. A kezelésekből 3 ismétlést, véltelen elrendezésben állítottunk be, minden parcella 4,5 méter széles és 100 méter hosszú volt.

Kukorica tesztnövényként minden évben FAO 330, korai éréscsoportú, DKC3972 kukorica hibridet vetettünk 72.000 mag/hektár dózissal. Búza esetén korai éréscsoportú Gaudio őszi búza fajtát vetettünk, 4 millió mag/hektár dózissal.

A kísérletekben alkalmazott műtrágyázási szintek a következők voltak: 2020-ban magas műtrágyázási szint, 120 kg N, 17,5 kg P, 47 kg/ha K hektáronként. 2021-ben magas műtrágyázási szint, 120 kg N, 19 kg P, 55 kg/ha K hektáronként. 2022-ben (búzában) magas műtrágyázási szint, 142,5 kg N, 35 kg P, 17,5 kg/ha K hektáronként. 2023-ban alacsony műtrágyázási szint, 46 kg N, hektáronként, továbbá közepes műtrágyázási szint, 87 kg N hektáronként, továbbá magas műtrágyázási szint, 120 kg N, 9 kg P, 17,5 kg/ha K hektáronként. A műtrágyázási szintekhez kapcsolódó jelölések a dolgozatban: alacsony műtrágyázási szint: 46N; közepes műtrágyázási szint: 87N; magas műtrágyázási szint: 120N, 143N.

2.2. Tenyészedényes kísérletek beállítása

Tenyészedényes kísérleteink két évben, 2022-ben és 2023-ban történtek. 2022-ben kukorica tesztnövényvel, két talajjal állítottunk be meszezési kísérletet. A talajok azonos talajtípushoz, agyagbemosódásos barna erdő talajhoz tartoztak, azonban talajvizsgálati paramétereikben – különösen foszfor ellátottságukban – jelentősen különböztek egymástól: „ABET P100” talaj (pH=4,88; humusz=1,43%; felvehető P_2O_5 =99 mg/kg); „ABET P175” talaj (pH=4,95; humusz=1,73%; felvehető P_2O_5 =173 mg/kg). Talajonként kétféle kezelés került beállításra: Kontroll és CaO meszezőanyaggal kezelt. A CaO dózis 0,1 g/100 g talaj volt, ami 2,66 t/ha mennyiségnek felel meg. Így összesen 16 tenyészedényt állítottunk be, kezelésenként 4 ismételéssel, edényenként 3 kg talajjal dolgoztunk.

2023-ban steril kezeléssel modellkísérletet végeztünk *in vitro* laboratóriumi körülmények között, hogy tanulmányozzuk az élő- és az inaktívvá tett mikrobiális oltóanyagok hatását kétféle hazai, a szabadföldi kísérletekben is használt talajok felhasználásával. Mindkét talajtípust három féle talajkezelésben részesítettük: hűtött, azaz 4°C-on tartott; 22°C-on tartott és melasszal kezelt; steril kezelt (mikrohullámú kezelésben - 2450 MHz, 800W - majd vékony rétegben tárolva egy hétig UV fény kezelésben részesült). Ezeket a talajkezelésű talajokat kombináltuk az oltóanyaggal és annak előlt verziójával: Kontroll, Bakt2, és ElőltBakt2. Így összesen 72 tenyészedényt állítottunk be, melyekbe egyenként 450 g talaj került, kezelésenként 4 ismételéssel dolgoztunk.

2.3. Felhasznált mikrobiológiai és kémiai készítmények

A Bakt1 készítmény egy tápoldat szuszpenzió, mely *Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium* törzseket tartalmaz 10^9 db/cm³ csíraszámában, dózisa: 15l/ha. A Bakt2 készítmény szintén egy tápoldat szuszpenzió, mely *Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederiksbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense* törzseket tartalmaz minimum $1,5 \cdot 10^9$ CFU/cm³ csíraszámában és képes a savanyú talajok alacsony

kémhatásukból adódó termés csökkentő hatását valamelyest kompenzálni, dózisa: 1,5l/ha. A Myc készítmény *Funneliformis*, *Rhizophagus* és *Claroideoglomus* nemzetség spóráit, micéliumait és szárított gyökérfragmenseket tartalmaz. A három gombanemzetségből öt féle gombafajt tartalmaz, így gyártója szerint különböző talajtípusokon is hatásos, dózisa: 10 kg/ha. A kísérleteinkben felhasznált starter műtrágya összetétele: N: 15%, P_2O_5 : 20%, azaz P: 9%, K_2O : 9%, azaz K: 8,3%, MgO: 3%, SO_3 : 10%, cink: 1% és bór: 0,05% volt, dózisa: 150kg/ha. A felhasznált meszezőanyag a gyártó leírása alapján természetes forrásból származó 87% $CaCO_3$ tartalmú ultrafinom készítmény, dózisa: 2 t/ha. A melasz cukorgyártás során keletkező melléktermék, mely talajjavításra és a talajban lévő mikrobák táplálására is használható a mezőgazdaságban, dózisa: 20 ml, 1,2 g/l koncentrációjú oldat 4 alkalommal.

2.4. Mérési módszerek

2.4.1. Talajmintavételek és vizsgálatok

A talajmintavételezéskor parcellánként 10-10 homogén talajmintát vételeztünk 0-20 cm mélységből, mely 10 minta reprezentálta a parcellák teljes hosszát. A talaj enzim vizsgálatokat a hűtött mintákból végeztük, illetve mértük a talajok nedvességtartalmát úgy, hogy azokat szárítókemencébe helyeztük 105°C-ra és mértük a kiszáritott talaj súlyvesztését (m/m%).

Tenyészedényes és szabadföldi kísérletben egyaránt alkalmazott mérési módszerek:

A dehidrogenáz enzim (DHA) aktivitás mérésének módszerét a teljes mikrobiális aktivitás becslésére használják a talajban. A dehidrogenáz enzim mérését Veres et al. (2013) módszere alapján mértük.

A talajok mikrobiális aktivitásának mérésére napjainkban használt módszer a labilis szén mérése (POXC – Permanganate oxidizable carbon). A módszer a növények és mikrobák számára elérhetőbb széntartalmat méri, értéke gyorsabban változik, mint a teljes szerves széntartalom. Mérésünk során Weil et al. (2003) módszerét használtuk.

Szabadföldi kísérletekben alkalmazott mérési módszerek:

A savas foszfatáz enzim (PHO) mérése Sinsabaugh et al. (1999) módszere alapján történt, mely enzim alapján következtetünk a foszfatáz aktivitással rendelkező mikroorganizmusok jelenlétére.

Azonos módszer alapján mértük a minták glükózidáz enzim (GLÜ) mennyiségét (Sinsabaugh et al., 1999). A glükózidázok a szén forgalomban

vesznek részt, fontos szerepet játszanak az alacsony molekulatömegű szénhidrátok bontásában, melynek során cukrok keletkeznek.

A talajminták spórás baktérium sejtszámának megállapításához, a legvalószínűbb élő sejtszám módszert (MPN, Most Probable Number) használtuk (Cochran, 1950), melynek során statisztikai alapon következtetünk a keresett baktériumok számára.

A növényi gyökerek arbuszkuláris mikorrhiza gomba által kolonizált mértékét Phillips és Hayman (1970) módosított módszere alapján állapítottuk meg. A gyökereket a sávok kereszteződéseibe helyeztük, majd a metszéspontban vizsgáltuk mikroszkóp alatt, hogy látható-e gombaképlet a gyökérdarab azon részén vagy sem.

2.4.2. Növényvizsgálatok és termés mérés

A vizsgált négy évben mértük a növények föld feletti száraz biomassa tömegét és termését. A biomassa mérés során a kukorica növényekből parcellánként 8 növény tömegét mértük a termésük nélkül. Az őszi búza esetében 10 x 30 darab növényt csokorba kötöttünk és azok tömegét mértük szintén a termésük nélkül. A termés mérést minden évben kombájn betakarítással végeztük, mely gépből a termést súlymérő padra állított pótkocsira ürítettük. A súlymérés után Wile 200 kézi nedvességmérő eszközzel mértük a termés nedvességtartalmát, korrigálva ezzel a termés mérést azonos nedvességtartalomra.

2023-as évben a kukorica növények virágzásakor azonos növényeken mértük azok magasságát, gyökérnyak átmérőjét, klorofill tartalmát és gyökérkapacitás értékeit. A talajba szúrt elektród és a növényre helyezett elektród közti elektromos kapacitás, a gyökérkapacitás. Kukorica növény esetében szignifikáns pozitív a korreláció, a mért gyökérkapacitás értékek és a kukorica gyökérfelülete, illetve gyökértömege között. A parcellánként 15 darab vizsgált növényt véletlenszerűen választottuk ki. A 2022 és 2023-évi tenyészedényes kísérletekben mértük a növények magasságát és föld feletti száraz biomasszáját.

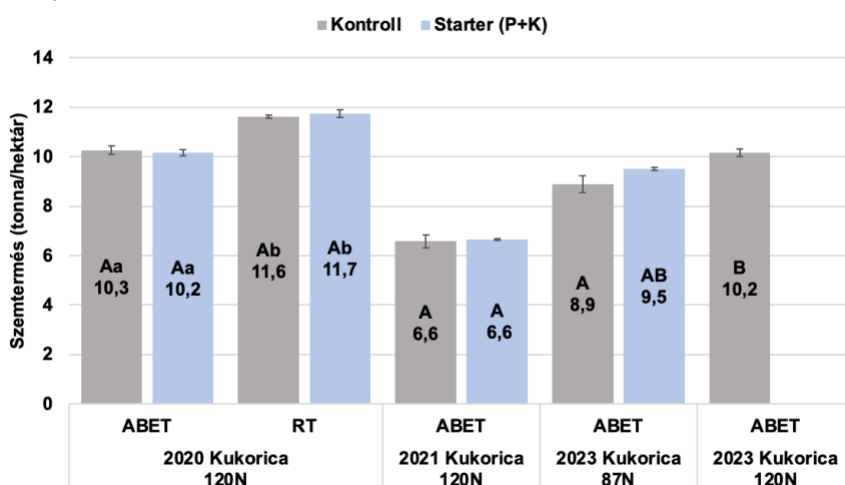
2.4.3. Az adatok matematikai és statisztikai elemzése

A mért paramétereink közti különbséget varianciaelemzéssel (ANOVA) IBM SPSS 27-29 szoftverekkel vizsgáltuk. A mikorrhiza oltás és talajtípus hatását és azok interakciójának hatását a növényi paraméterekre többváltozós varianciaanalízissel (MANOVA) végeztük. Szignifikáns ANOVA-t és MANOVA-t követően a szóráshomogenitás teljesülése esetén Tukey post hoc tesztet, nem teljesülése esetén Games-Howell módszert alkalmaztunk. Az eredményeket minden esetben $p < 0,05$ szinten ismertük el szignifikánsnak.

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

3.1. A foszfor-starter trágyázás hatása két eltérő tápanyag-ellátottságú és talajbiológiai aktivitású talajon

A terméseredményeket tekintve, több év adatai alapján (1. ábra) magas műtrágyázási szinten (120N), illetve közepes műtrágyaszint esetén (87N), nem mutattuk ki a Starter műtrágyázás hatását a kukorica szemtermés eredményekben. Összességében a három vizsgált év alatt a csapadékmennyiségnek volt szignifikáns hatása a termésre, míg a Starter kezelésnek és a kezelés és csapadékmennyiség interakciójának nem mutattuk ki termésbefolyásoló szerepét (2. táblázat).



1. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Starter műtrágya hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényen. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként, a kis betűk a talajtípus hatását kezelésként (a) ($p < 0,05$)

2. táblázat: A Starter kezelés és a csapadékmennyiség interakciói (ANOVA) a termésre 2020, 2021 és 2023 években agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET). A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = $p < 0,05$; *** = $p < 0,001$.

Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h^2)
Starter kezelés	Termés	0,002	ns	0,995
Csapadékmennyiség	Termés	130,152	***	0,879
Starter kezelés				
* Csapadékmennyiség	Termés	0,085	ns	0,005

A biomassa eredmények hasonlóak a terméseredményekhez, szignifikáns különbséget egyik évben sem találtunk a kezelések hatására (bár mérhető volt némi biomassa növekedés).

A növénymagasság tekintetében a gyengébb minőségű ABET talajon minden évben megfigyeltük a Starter műtrágya szemmel látható magasság növelő és foszfor hiánytünet csökkentő hatását. Ugyanezt az RT talajon nem tapasztaltuk, melynek a magasabb tápanyagellátás és kedvezőbb pH lehetett az oka. Ez a kezdeti magasság különbség a 2021-es évben szignifikáns volt a Starter kezelés hatására és a növények ebben az évben is antociános elszíneződés jeleit kevésbé mutatták. Ez a magasságbeli és színbeli különbség az ABET talajon azonban az virágzás idejére minden évben, köztük 2021-ben is kiegyenlítődt.

Mértük a talajminták PHO enzimaktivitás eredményeit a 2021-es évben, a tenyészidőszak alatt három alkalommal. A növények kezdeti fejlődésekor, a növények virágzása idején és az éréskor. A Starter műtrágyázás hatását nem tudtuk kimutatni egyik időpontban és egyik talajmintavételi mélységben sem.

Hároméves kísérletünkben a termésre a tenyészidőszak csapadékmennyiségének volt a legnagyobb hatása, mely hazai körülmények között nagyon gyakori. A 2023-as kísérleteinkben jelentős termésbefolyásoló hatása volt a kijuttatott műtrágya mennyiségének, azonban a felhasznált foszfor tartalmú Starter műtrágya a vizsgált évek egyikében sem tudta növelni a kukorica termését.

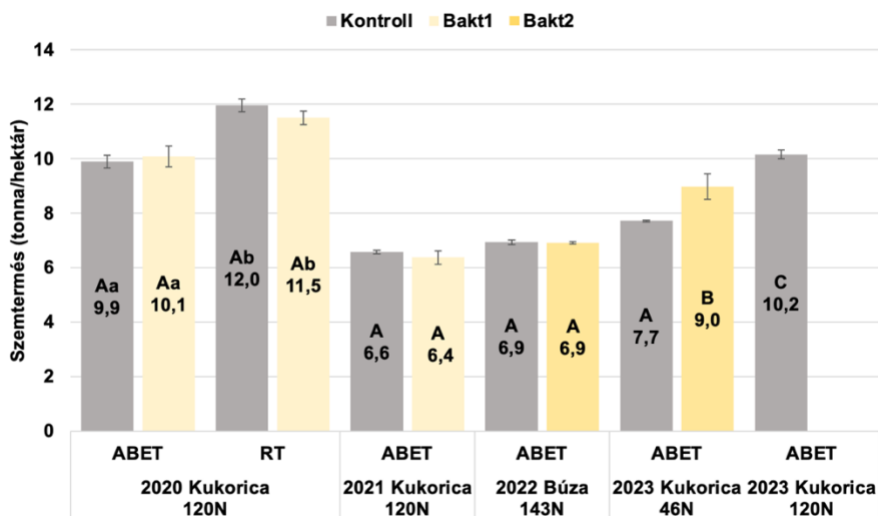
Hasonlót tapasztalt Roller et al. (2022) is, akik számos kukorica hibrid reakcióját vizsgálva megállapították, hogy a kukoricák P-hiány miatti lilulása jelentősen hibridfüggő tulajdonság. Kísérletünkben nem igazolódott Geist et al. (2023) megállapítása miszerint starter foszfor műtrágya alacsony felvehető P mellett javasolt. Több más kutatás, köztük Quinn et al. (2020) is kísérletünkhöz hasonló eredményre jutott. Quinn et al. (2020) metaanalízis vizsgálatukban megállapították, hogy a starter műtrágya termésnövelő hatása 5,2%-ban fordul elő és általánosan csökken a termésszint növekedésével.

Kísérleteinkben sem az alacsonyabb, sem a magasabb termésszintű évjárat nem befolyásolta a starter termésnövelő hatását, melynek oka, hogy a magasabb alpműtrágyázás és a termőhelyek tápanyagellátottsága együttesen elegendő volt a növények megfelelő fejlődéséhez az adott csapadékviszonyok mellett. A Starterrel kezelt növények kezdeti növekedése azonban erőteljesebbnek bizonyult, leginkább a gyengébb minőségű, savanyú kémhatású ABET talajon, mely jelzi a kezdeti tápanyaghiány pótlását, azonban ezek a magasságbeli különbségek a tenyészidőszak végére minden esetben kiegyenlítődték, tehát a növények növekedésük során később felvett tápanyagok kompenzálták a kezdeti hiányokat. Margalef et al. (2021) szerint a P műtrágyázás csökkenti a talaj foszfatáz aktivitását. Kísérletünkben mi ezt nem mutattuk ki, melynek lehetséges oka, hogy a Kontroll parcellákat is érintő alpműtrágyázás is tartalmazott P műtrágyát, melyhez képest a Starter kezelésben részesülő parcellák plusz foszfor mennyisége nem volt elegendő a szignifikáns különbség kialakításához.

Hipotézisünk, miszerint a starter műtrágyák alkalmazásának szignifikáns hatása van a kukorica termésére, nem igazolódott.

3.2. Baktérium oltás hatása a talajtípus és a műtrágyázási szint függvényében

A baktérium oltás (Bakt1 és Bakt2) a magas műtrágyázás éveiben (2020-2022) nem gyakorolt hatást a kukorica, illetve búza terméseredményére (2. ábra). 2020-ban kétféle talajon állítottunk be kísérletet Bakt1 oltással és egyik talajon sem tudtuk kimutatni az oltás szignifikáns hatását, azonban az RT talaj terméseredménye szignifikánsan meghaladta az ABET talaj termését. 2023-ban, az alacsony műtrágyázás évében (2023) a Bakt2 oltás szignifikánsan növelte a kukorica termését, tehát az alacsony tápanyagellátás mellett a kijuttatott baktérium törzsek hozzájárultak a növények tápanyagfelvételéhez a gyengébb tápanyag ellátottságú ABET talajon. Továbbá a műtrágya dózisnak is szignifikáns termésnövelő hatása volt ebben az évben, melyhez hozzájárult az év megfelelő csapadékmennyisége. A Bakt1 kezelés 2020 és 2021 évi eredményei és a 2023-as év 120N kontroll eredményei alapján a Bakt1 kezelésnek nem volt hatása a termésre, míg azt az évek csapadékmennyisége szignifikánsan befolyásolta (3. táblázat). A Bakt1 kezelés és a csapadékmennyiség interakciója nem befolyásolta a termést.



2. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Bakt1 és Bakt2 oltóanyagok hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként, a kis betűk a talajtípus hatását kezelésenként (a) ($p < 0,05$)

3. táblázat: A Bakt1 kezelés és a csapadékmennyiség interakciói (ANOVA) a termésre 2020, 2021 és 2023 (Kontroll kezelés) években agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET). A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = $p < 0.05$; * = $p < 0.001$.**

Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Bakt1 kezelés	Termés	0,095	ns	0,009
Csapadékmennyiség	Termés	260,34	***	0,959
Bakt1 kezelés	Termés	0,351	ns	0,031
* Csapadékmennyiség				

A növények biomassza tömegét a 2023-as alacsony műtrágyázás évében mértük, de a Bakt2 által okozott termésnövekedés nem okozott arányos biomassza növekedést. Az emelt műtrágya mennyisége az átlagot tekintve jelentős, de nem szignifikáns növekedést okozott a biomassza eredményekben.

A 2021-2022-es magas műtrágyázás éveiben (120N, 143N), több időpontban mértük a PHO enzimaktivitást, azonban nem tudtunk szignifikáns különbséget kimutatni a baktérium oltások hatására. A 2023-as alacsony műtrágyázás évében (46N), a terméshez és a növénymagassághoz hasonlóan, a Bakt2 oltás hatására szignifikánsan növekedett a talajminták PHO aktivitása az ABET talajon a kontrollhoz képest.

2023-ban alacsony műtrágyázás mellett (46N), megvizsgáltuk az oltás hatását négy növényi paraméterre, melyben látszik, hogy az oltásnak a növénymagasságra szignifikáns hatása volt, hasonlóan a növények terméséhez. A gyökérnyak átmérő esetében magasabb átlagértéket mértünk, azonban ez nem különbözött szignifikánsan. A gyökérkapacitás és klorofill tartalom tekintetében nem mutattuk ki az oltás hatását.

Négy egymást követő évben beállított kísérleteinkben ABET és RT talajon magas műtrágyázási szinten (143N) nem mutattuk ki a baktérium oltások termésnövelő hatását búza kultúrában, hasonlóan Mayer et al. (2010) eredményeihez. Kukorica kultúrákban magas műtrágyázási szinten (120N) sem találtunk oltáshatást, mely megegyezik Santos et al. (2023) kísérleteiben tapasztaltakkal. Santos et al. (2023) szerint a vetésszerkezetnek jóval nagyobb kukoricatermés meghatározó szerepe van, mint az oltásnak. Ellentétben a magas műtrágyázási szinten kapott eredményekkel, alacsony műtrágyázási szinten (46N) a gyengébb minőségű ABET talajon szignifikáns termésnövekedést tapasztaltunk az oltás hatására kukoricában, melynek oka a talaj alacsony tápanyagtartalmában keresendő.

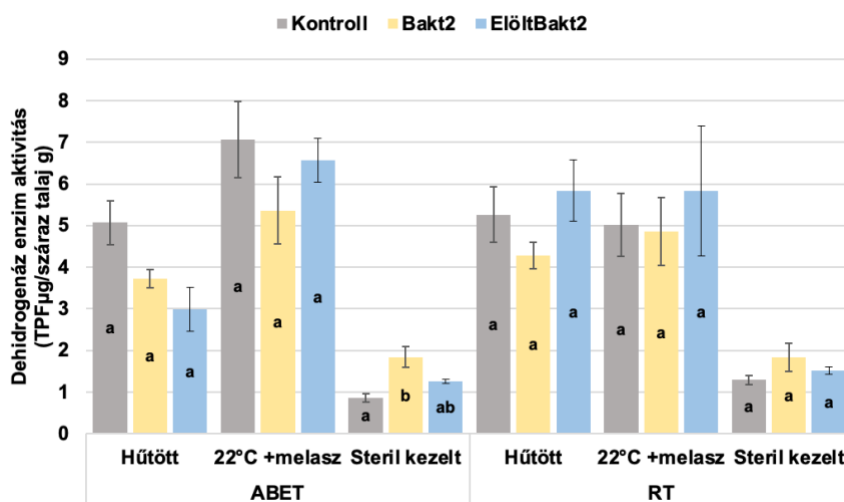
Fontos növény növekedési paraméter a növénymagasság, mely alacsony műtrágyaszintű kísérletünkben képes volt előre jelezni az oltás hatását. Továbbá az oltáshatást kísérletünkben jelezte még a PHO enzimaktivitás növekedés, mely összhangban van Campdelacreu Rocabruna et al. (2024) megállapításával, miszerint hasznos mikrobák használata növelheti a PHO aktivitást és a teljes mikrobiális aktivitás pozitív kapcsolatban van a PHO aktivitással.

Hipotézisünk, miszerint a talajtípus és a műtrágyázás meghatározzák a baktérium oltások eredményességét, részben igazolódott.

3.3. A talajbiológiai állapot hatása a baktérium oltóanyagok hatékonyságára tenyészedényes modellkísérletben

Az eredményekből megállapítható, hogy egyik talajtípuson és talajkezelésnél sem találtunk statisztikailag kimutatható hatást a növények biomassza tömegében. A gyökérkapacitás mérése is hasonló eredményt adott, azonban a gyengébb minőségű ABET talajon a melasszal és ElöltBakt2 oltóanyaggal kezelt növények gyökérkapacitása szignifikánsan meghaladta a kontroll növényekét, a Bakt2 oltás pedig a két kezelés közti értéket vett fel.

Az steril kezelt talajmintáknál mindkét talajtípuson érzékelhető a DHA enzimaktivitás jelentős, akár 80%-os csökkenése a másik két talajkezeléshez viszonyítva. Ezeken a talajokon a DHA enzimaktivitás a Bakt2 oltás hatására láthatóan emelkedett és a gyengébb tápanyagellátású és biológiai aktivitású ABET talajon ez szignifikáns különbséget eredményezett (3. ábra).



3. ábra: Dehidrogenáz enzim mennyiségének alakulása Bakt2 és ElöltBakt2 oltóanyagok hatására tenyészedényes kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (a) jelzik a kezelés hatását talajkezelésenként ($p < 0,05$)

Mértük a talajminták labilis szén tartalmát, de a steril kezelés hatását nem mutattuk ki egyik talajtípuson sem. A 22°C-on inkubált majd melasszal kezelt talajmintáknál az ABET talajon jelentős DHA emelkedés, vagyis általános mikrobiológiai aktivitás növekedés volt érzékelhető, amelyet a könnyen és gyorsan felvehető jelentős cukormennyiség idézett elő (Nugroho et al., 2023c). Az oltás a kedvező hatását steril kezelt talajon is mutatta, mert az eredeti csökkent számú baktérium-tömeg már nem versengett a tápanyagokért, így a steril kezelés miatt felszabadult életteret a bevitt oltóanyag-törzsek könnyebben elfoglalhatták.

Ez az eredmény arra enged következtetni, hogy az oltások hatékonysága szempontjából nagyon meghatározó a talaj eredeti mikroba közösségének a száma, összetétele és fiziológiai állapota is, mely állítás összhangban van Zhang et al. (2011) által megállapítottakkal. Hipotézisünk, miszerint a talaj őshonos baktérium közössége a kijuttatott baktérium készítmény hatását befolyásolja, de a hatás függ a talaj tápanyag ellátottságától, igazolódott.

3.4. Meszezés hatása a növényi növekedésre és a baktérium oltások hatékonyságára 2023-ban

3.4.1. Meszezés hatása a P mobilizálásra, tenyészedényes kísérletben

A kétféle tápanyagellátottságú talajtípus eredményei között nem mutattunk ki szignifikáns különbséget. A talajtípuson belüli eredményeknél a talajminták labilis szén tartalma szignifikánsan növekedett a meszezés hatására, mindkét tápanyag ellátású ABET talajon. A labilis szén mérése jól szemlélteti a biológiai aktivitás különbségét tenyészedényes körülmények között. A növénymagasságot és a biomassza produkciót figyelembe véve magasabb átlag értékeket mértünk a meszezés hatására, azonban egyik eredmény sem volt szignifikáns, csak tendenciájában alakult ki. A meszezés következtében a talajminták KCl-os pH értéke 11 hét alatt 4,91-ről 7,43-ra emelkedett a kísérlet végére. Abdi (2024) megállapítása alapján a meszezés kedvező hatása hosszú távon a pH emelkedés, az elérhető P, kation cserélő kapacitás, mikrobiális aktivitás, szerves szén, teljes nitrogén növekedése és a tápanyagkimosódás és kicserélhető alumínium csökkenésével magyarázható. Hipotézisünk, miszerint a talaj biológiai aktivitása javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj pH meszezésével, igazolódott.

3.4.2. Meszezés hatása a baktériumos oltásokra szabadföldi kísérletben

Mértük a meszezés pH emelő hatását a virágzáskori kontroll és meszezett parcellák talajmintáin. A desztillált vizes pH értéke 6,00-ról 6,70-re, míg a KCl-os pH 4,68-ról 6,24-re növekedett a meszezés hatására. A terméseredmények alapján a meszezés önmagában is magasabb átlagtermést okozott, de szignifikáns termésnövekedést a Bakt2 oltás és a két kezelés kombinációja tudott okozni, azonban a két kezelés kombinációja nem haladta meg a Bakt2 oltás hatását, a kezelések szinergista hatása nem érvényesült.

A növénymagasság tekintetében a három kezelést vizsgálva a meszes és a kombinált kezelés hatására tapasztaltunk szignifikáns különbséget, a baktérium oltáshoz és meszezéshez képes a kombinált kezelés nem okozott további növénymagasság különbséget. A többi növény növekedési paraméter esetében a kezelések nem okoztak szignifikáns változást.

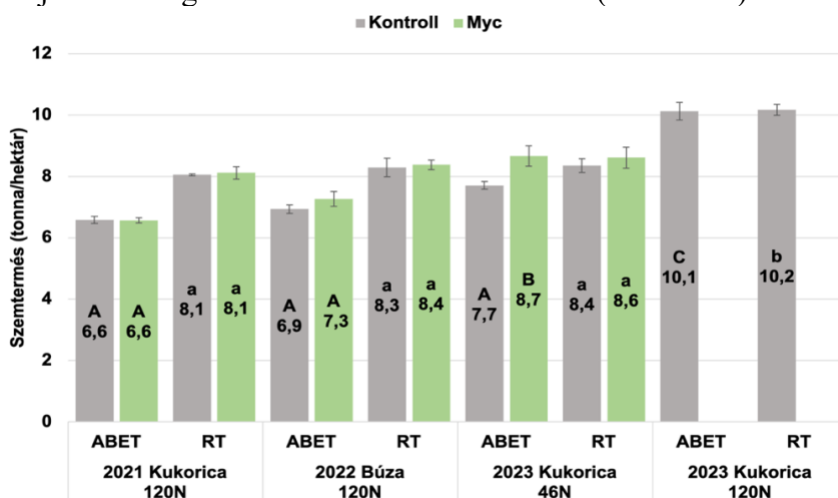
Véleményünk szerint alacsony tápanyagtartalmú ABET talajunkon alacsony műtrágyázás mellett (46N) egy nagyobb dózisú meszezés növelhette

volna a kukorica növények termését hasonlóan Bossolani et al. (2022) eredményeihez. Feltehetőleg a pH emelésével csökkentheti a talajban az alumínium által kötött P mennyiségét (Bossolani et al., 2022), így növelve a felvehető P mennyiségét, ami a dunántúli barna erdőtalajokon nagyon fontos lenne. Hipotézisünk, miszerint a baktérium oltás hatékonysága javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj pH meszezésével, nem igazolódott.

3.5. Mikorrhiza oltás hatása a talajtípus és a műtrágyázási szint függvényében

A szabadföldi kísérletben a terméseredményeket tekintve (4. ábra) magas műtrágyázás mellett (120N), nem mértük a Myc oltás hatását sem kukoricában, sem búzában, egyik talajtípuson sem. Azonban, 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N) a Myc oltás szignifikánsan, 12,5%-kal növelte a kukorica termését a gyengébb minőségű ABET talajon. Az RT talajon a terméshozamra nem volt szignifikáns hatással az oltás, továbbá ezen a tápanyagellátottsági szinten is megfigyelhető volt a RT talajon a Kontroll kezelés szignifikáns terméselőnye az ABET Kontroll kezeléséhez képest. 2023-ban a Kontroll parcellákat tekintve látható, hogy a műtrágyázás szintje jelentős hatással volt a termésre. A magas műtrágya dózis (120N) átlagosan 31,4% és 21,9%-kal növelte a termést a 2023-as évben az oltatlan Kontroll parcellákon az ABET és RT talajokon. Ezt a hatást támogatta, hogy a 2023-as év megfelelő csapadékelátású volt, mely hozzájárult a konvencionális mennyiségű műtrágya felvehetőségéhez (Pepó, 2018).

A 2021 évi eredményeket és 2023-évi kontroll eredményeket együtt megvizsgálva látható, hogy a talajtípusnak, a csapadékmennyiségnek és a kettő interakciójának is szignifikáns hatása volt a termésre (4. táblázat).



4. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását az ABET talajon, míg a kis betűk (a, b) a kezelés hatását az RT talajon ($p < 0,05$)

4. táblázat: A talajtípus és a csapadékmennyiség interakciói (ANOVA) a termésre 2021 és 2023 években Kontroll kezelések esetén, agyaghemosódásos barna erdőtalajon (ABET). A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = $p < 0.05$; * = $p < 0.001$.**

Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Talajtípus	Termés	36,027	***	0,818
Csapadékmennyiség	Termés	510,363	***	0,985
Talajtípus *	Termés	34,454	***	0,812
Csapadékmennyiség				

A biomassa eredmények nagyjából követik a szemtermés eredményeket, azonban nem tudtunk szignifikáns különbségeket kimutatni a Myc oltás hatására.

A Myc kezelés hatását a PHO enzimaktivitásra a 2021 és 2022-es magas műtrágyázás éveiben (120N, 143N) csak egy alkalommal mutattuk ki, 2021-ben a kultúrnövény júliusi virágzásakor a gyengébb minőségű ABET talajon. Az RT talaj PHO enzimaktivitás eredményei több esetben szignifikánsan meghaladták az ABET talajon mért PHO eredményeket, illetve a mintavételi mélységek között több esetben találtunk szignifikáns különbséget. Az alacsony műtrágyázás évében (46N), 2023-ban szignifikáns növekedést mértünk PHO aktivitásban a Myc kezelés hatására az oltatlan azonos műtrágyázású Kontrollhoz képest a gyengébb minőségű ABET talajon. A RT talajon azonban nem volt szignifikáns a különbség.

A 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N) mért növényi paraméterek, a növénymagasság, gyökérkapacitás, gyökérnyak átmérő és klorofill tartalom többségében szignifikáns növekedést mutattak a Myc kezelés hatására. Továbbá a talajtípusnak is szignifikáns hatása volt ebben az évben a növényi paraméterekre, kivéve a növénymagasságot. Megvizsgálva a post-hoc teszt eredményét, a gyökérkapacitás volt a legérzékenyebb paraméter a Myc oltásra ABET talajon, míg az RT talajon a növénymagasság tekinthető annak.

Közepesen erős lineáris regressziós kapcsolatot találtunk a növénymagasság és a többi mért növényi paraméter között. A regressziós vizsgálat a legerősebb összefüggést (R^2) akkor eredményezte, ha a növénymagassághoz hasonlítottuk a többi paramétert. Az ABET talajon erős lineáris kapcsolatot találtunk a növénymagasság és gyökérkapacitás ($R^2=0,5795$), valamint a növénymagasság és gyökérnyak átmérő között ($R^2=0,6091$). Az RT talajon szintén erős lineáris kapcsolatot találtunk a növénymagasság és gyökérkapacitás ($R^2=0,5889$), valamint a növénymagasság és klorofill értékek között ($R^2=0,6963$).

A Myc oltásnak a három vizsgált évben általában szignifikáns hatása volt a gyökérkolonizációra. Egyedüli kivétel volt a 2021-es kukorica gyökérkolonizációja az ABET talajon, de átlagosan itt is magasabb volt a kolonizáció az oltott parcellákon, csak a különbség nem volt szignifikáns. Kukoricában 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N) jelentősen kisebb

gyökérkolonizáció értékeket mértünk, mint 2021-ben szárazabb tenyészidőszakban magas műtrágyázási szinten.

Hároméves kísérletünkben a termésre (4. ábra) a csapadékmennyiségnek (4. táblázat) volt a legnagyobb hatása, amely a műtrágyázás termésnövelő hatását is nagymértékben befolyásolta. A Myc kezelés szemtermést és biomasszát növelő hatását a baktérium oltáshoz hasonlóan csakis a csökkentett N-P-K műtrágyafelhasználás esetében, 2023-ban tapasztaltuk (Prettl et al., 2024), hasonlóan Bakonyi és Csitári (2023) tapasztalataihoz. A szárazabb és átlagos éveken (2021-2022) az RT talaj szemtermése és biomassza tömege szignifikánsan meghaladta az ABET talajét. Ennek oka az RT talaj magasabb tápanyag- és humusztartalma, és jobb vízgazdálkodási tulajdonsága lehetett, amely különösen a szárazabb éveken volt szignifikáns hatású (Juhos et al., 2015). A jobb csapadékeloszlású 2023-as évben a szemtermés és biomassza a két talajtípuson nagyon hasonló volt. Azonban 2023-ban alacsony műtrágyázási szint mellett az ABET talajon jobban megmutatkozott a Myc kezelés hatása a terméseredményekben (4. ábra). Ennek oka véleményünk szerint, hogy a műtrágya csökkentésnek erősebb a negatív hatása az alapvetően gyengébb tápanyag-ellátottságú és kisebb humusztartalmú ABET-on, így a mikorrhiza által szolgáltatott tápanyagok nagyobb hatással bírtak a termésre. Qin et al. (2019) metaanalízisükben megállapítják, hogy a mikorrhiza hatása jelentősebb alacsony szervesanyagtartalom mellett és semleges pH-n. Hipotézisünk, miszerint a talajtípus és a műtrágyázás intenzitása meghatározzák a mikorrhiza oltások eredményességét, igazolódott.

A jobb tápanyag-szolgáltatás ellenére az RT talajon a Myc kezelések szignifikánsan növelték a kukorica növények magasságát, gyökérnyak-átmérőjét és klorofill koncentrációját is, míg az ABET talajon csak a növénymagasság és a klorofill koncentráció változott. Függetlenül attól, hogy a Myc kezeléseknek volt-e szignifikáns hatása a termés hozamokra, az általunk mért összes növényfejlődési paraméterrel ki lehetett mutatni a potenciális tápanyag-felvevő képesség növekedését mindkét talajon. Hasonló következtetésre jutott például Colla et al. (2015) is. A terméshez hasonlóan a talajminták PHO enzimaktivitás értékének szignifikáns növekedését csak az ABET talajon tudtuk kimutatni a kezelés hatására, melynek oka az ABET talajon lévő növények nagyobb tápanyag hiánya (tekintettel arra, hogy kísérletünkben az alacsony műtrágyázás évében nem juttattunk ki P műtrágyát) (Margalef et al., 2021). Hipotézisünk, miszerint az talajbiológiai és növény növekedési paraméterek előrejelezhetik a mikorrhiza oltóanyagok hatását, részben igazolódott.

3.6. A talajbiológiai aktivitás jelentősége a baktérium és mikorrhiza oltások hatékonyságában, a talajbiológiai aktivitás talajtípusokkal való összefüggései

A foszfatáz (PHO) enzimaktivitás mellett a szabadföldi kísérletekben mértük a permanganát oxidálható labilis széntartalmat (POXC), a dehidrogenáz (DHA) és β -glükózidáz (GLÜ) enzimaktivitásokat is a talajban. A kezelések hatását egyik paraméter esetében sem lehetett kimutatni. A mintavételi időpontok és a mintavételi mélységek között azonban jelentős eltérések voltak. A kukorica virágzása esetében a DHA és GLÜ enzimaktivitás eredmények magasabbak voltak a felső 10 cm-es rétegben, míg a búza esetében inkább fordított tendenciát tapasztaltunk. A labilis szén esetében a búza virágzásakor mértünk szignifikáns különbséget a két mélység között a 10-20 cm-es mélység javára.

A három talajparamétert a 2023-as alacsony műtrágyázás (46N) évében vizsgálva a kukorica virágzásakor szignifikáns GLÜ enzimaktivitást mértünk a felső 10 cm-es talajrétegben a Bakt2 oltás hatására. A terméshez, növénymagassághoz és PHO enzimaktivitáshoz hasonlóan, a GLÜ enzimaktivitás értékek is jelezték az oltóanyag hatását. A DHA enzimaktivitás és labilis szén esetében nem találtunk különbséget az oltás hatására 2023-ban sem.

A 2022-es búza főnövény évében magas műtrágyázási szinten (143N) beállított kísérletben a GLÜ enzim szignifikáns lineáris kapcsolatot mutatott a szemterméssel ($R^2=0,412$), míg a DHA enzim ($R^2=0,6003$), PHO enzim ($R^2=0,791$) és a labilis szén ($R^2=0,772$) a szemterméssel összefüggésben erős lineáris kapcsolatot mutattak a két termőhely adatait együttesen vizsgálva.

A 2021-es magas műtrágyázási szint (120N) és a 2023-as alacsony műtrágyázási szint (46N) kukorica főnövény éveit együtt értékelve, a szemtermés, a talajenzimek és a labilis szén paraméterek között találtunk lineáris kapcsolatokat. A GLÜ ($R^2=0,3876$) és PHO ($R^2=0,3663$) enzimek gyenge lineáris kapcsolatot mutattak a terméssel, míg a labilis szén és a szemtermés között erős és szignifikáns lineáris korrelációt ($R^2=0,6581$) találtunk.

A kísérletek során mért talajenzimek és POXC eredmények összesített vizsgálata alapján megállapítottuk, hogy a mintavételi időpont, a talajtípus és azok interakciója szignifikánsan befolyásolták a mért paraméterek alakulását.

Az adatok korrelációs vizsgálata (5. táblázat) alapján a DHA enzim korrelál a PHO enzimmel, továbbá a PHO enzim korrelál a POXC tartalommal és a talajnedvességgel. A GLÜ enzim korrelál a POXC tartalommal és talajnedvességgel, illetve a POXC és a talajnedvesség korrelálnak egymással (5. táblázat). Megállapításaink többségében megegyeznek Nugroho et al. (2024) talajművelési kísérletében leírtakkal.

5. táblázat: A talajenzimek, a talajminták POXC tartalma és a talajnedvesség korrelációja, 2021, 2022 és 2023 években, többféle műtrágyázási szinten. A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = $p < 0.05$; * = $p < 0.001$.**

	DHA	PHO	GLÜ	POXC	Talajnedvesség
DHA	1	0,563**	0,067	-0,31	0,097
PHO	0,563**	1	0,105	0,194**	0,224**
GLÜ	0,067	0,105	1	0,227**	0,480**
POXC	-0,31	0,194**	0,227**	1	0,504**
Talajnedvesség	0,097	0,224**	0,480**	0,504**	1

A 2023-as évben virágzás elején tapasztalt GLÜ aktivitás változásának hátterében az állhatott, hogy a kijuttatott oltóanyaggal növekedett a talaj szervesanyag bontási sebessége, mely a GLÜ aktivitás növekedésében mutatkozott meg.

A szemtermés és az enzim aktivitások, illetve a POXC mennyisége közti korrelációs elemzéseket tekintve megállapítható, hogy a virágzáskor mért talajbiológiai paraméterek összefüggésben állhatnak a termés hozamokkal. Ez valószínűleg annak köszönhető, hogy ezek a paraméterek tulajdonképpen a talaj szervesanyag- és nedvességtartalmának következtében alakulnak ki, és a növények reakcióit is indikálják. Gangwar et al. (2022) vizsgálatukban hasonló eredményekre jutottak szántóföldi művelés alatt álló, eltérő talajtípusú táblákon a DHA és PHO aktivitásokat vizsgálva.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK

Négy egymást követő évben beállított szabadföldi kísérleteinkben a termésre a tenyészidőszak csapadékmennyiségének és a talajtípus víz- és tápanyag-gazdálkodási tulajdonságainak volt a legnagyobb hatása. Ehhez viszonyítva a kijuttatott starter és alaptrágya (PK) hatása jóval kisebbnek bizonyult, de a nitrogén dózisának a kukorica termésére szignifikáns hatása volt mindkét talajon. Kb. 87 kg/ha nitrogén dózis alatt a kukorica termésében csökkenés tapasztalható. A vetéssel egy menetben kijuttatott Starter műtrágya használata a kukoricában, többéves eredmények alapján a vizsgált termőhelyeken nem eredményezett szignifikáns termésmenvelő hatást. Hipotézisünk, miszerint a starter műtrágyák alkalmazásának szignifikáns hatása van a kukorica termésére, nem igazolódott.

Magas műtrágyafelhasználás esetén (120N, 143N) a kijuttatott és talajban lévő tápanyagok valószínűleg elegendőek voltak a növények megfelelő fejlődéséhez mindkét talajtípuson az adott csapadékmennyiség mellett. Ilyen körülmények között a baktérium és mikorrhiza oltásnak nem volt szignifikáns hatása a terméshozamokra, amelynek két oka lehet: 1) a feltételezett tápanyag-mobilizáló hatásukra a növényeknek nem volt szüksége, vagy 2) az oltóanyagokban lévő mikrobák életfeltételei nem voltak megfelelőek. Alacsonyabb nitrogén műtrágyázási (46N) szinten a gyengébb tápanyag-szolgáltató képességű ABET talajon azonban a növényeknek szükségük volt a kívülről bejuttatott baktériumok és gombák tápanyagmobilizáló képességére, így hatásuk megjelent a termésben. A csökkentett nitrogéndózisok miatt azonban a terméshozamok jelentősen csökkentek, amelyet a mikrobiális oltások nem tudtak kompenzálni. Hipotézisünk, miszerint a talajtípus és a műtrágyázás meghatározzák a baktérium és mikorrhiza oltások eredményességét, részben igazolódott.

A baktérium oltás hatását a virágzáskori növénymagasságban és PHO aktivitásban, a mikorrhiza kezelés hatását valamely virágzáskori növényfejlődési paraméterrel is ki lehetett mutatni. Az oltások valószínűleg virágzásig támogatták a növényeket a gyökérszóna mikrobiomja által, de a későbbi vízhiány hatását már nem tudták kompenzálni. A gyökérkolonizáció a mikorrhiza oltás hatásra minden évben mindkét talajon növekedett, függetlenül a műtrágya felhasználástól, tehát a nagyobb gyökérkolonizáció nem feltétlenül jelent termésmenvelő hatást is. Hipotézisünk, miszerint az talajbiológiai és növény növekedési paraméterek előrejelezhetik az oltóanyagok hatását, részben igazolódott.

Szabadföldi kísérletben, alacsony műtrágyázás mellett (46N) a meszezés savanyú ABET talajon önmagában növelte a kukorica növények termését azáltal, hogy feltehetőleg a pH emelésével csökkentette a talajban az alumínium által kötött P mennyiségét, így növelte a felvehető P mennyiségét. Az általunk kijuttatott baktérium törzsek meszezés nélkül is kifejtették kedvező termésmenvelő hatásukat, vagyis nem bizonyított, hogy az oltóanyagok számára a savanyú kémhatás limitáló volt. A meszezéses tenyészedeny kísérlet eredménye arra

enged következtetni, hogy a meszezés a pH emelésével hozzájárulhatott a biológiai aktivitás (POXC) növekedéséhez. Hipotézisünk, miszerint a baktérium oltás hatékonysága és a talaj biológiai aktivitása javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj pH meszezésével, részben igazolódott.

Steril kezeléssel modellkísérletben a DHA enzim, mint a teljes mikrobiális aktivitás mérőszáma, csak a steril kezelt talajon mutatta az oltás hatását. A steril kezelés miatt az eredeti, őshonos baktériumok száma csökkent, így azok kevésbé versengtek a kijuttatott törzsekkel. A steril kezelés során továbbá felszabadulhattak a bevitt mikrobákat segítő felvehető tápanyagok is, segítve a megüresedett élettér elfoglalását és az aktivitás fokozódását. Az eredmény arra enged következtetni, hogy az oltások hatékonysága szempontjából nagyon meghatározó a talaj eredeti mikroba közösségének száma és összetétele. Hipotézisünk, hogy a talaj őshonos baktérium közössége a kijuttatott baktérium készítmény hatását befolyásolja, de a hatás függ a talaj tápanyag ellátottságától, igazolódott.

A kísérleteink alapján a következő javaslatokat fogalmazzuk meg:

- Starter műtrágyák hatékonyságának értékeléséhez további kísérletek lennének szükségesek, a gyengébb ABET talajon a kísérletben szereplő termőhelynél alacsonyabb tápanyagtartalmú talajfoltokon, több kukorica hibrid bevonásával, akár meszezéssel kombinálva. Ebből derülhetne ki, hogy a starter műtrágyáknak milyen P-ellátottsági szintek alatt van igazán létjogosultsága.

- A műtrágya használat a tápanyagfelvételi folyamatokat gyorsítja, így nincs szükség a talajban lévő tápanyagok mobilizálására. Azonban csökkentett műtrágyázási intenzitás esetén a kijuttatott mikrobák segítik a tápanyagfelvételt, de gazdaságilag nem váltják ki a műtrágyák használatát. Ezért a köztes használatuk megoldást jelenthetne, mellyel kezdetben műtrágyával segítjük a növényt, majd később mikrobákkal. Szintén megoldást jelenthetnek a baktérium- és gombakijuttatást kiváltani hivatott különböző agrotechnikai elemek, melyek javítják a talajéletet, például lombtrágyázás, csökkentett talajművelés és takarónövények használata.

- Tenyészedényes modellkísérlettel szabályozott körülmények között igazoltuk a szabadföldi magas műtrágyázási szintű kísérletekhez hasonlítva a mikrobiális oltóanyagok gyakorlati alkalmazásánál a léptéknövelő vizsgálati módszerek szükségességét. Szabadföldi kísérletekben a mikrobiális oltások hatását a talajok gyengébb tápanyagfeltárási képessége pozitívan képes befolyásolni. Fontos lenne azonban az oltóanyagokban előforduló mikrobák egyedi kísérleti vizsgálata, összekötve azzal, hogy előzetesen megismerjük a talajban lévő őshonos baktériumok számát, összetételét és aktivitását.

- Arra a kérdésre, hogy milyen tápanyag-ellátottság és milyen talajállapot mellett lehet szignifikáns hatása a mikrobiális oltóanyagoknak konvencionális növénytermesztésben, a kutatásunk csak részben adott választ. Szabadföldi körülmények között további különböző tápanyag dózisok és különböző oltóanyagok kombinációjával lenne szükséges kísérleteket végezni, akár a talajtípusokon belüli nagyobb tápanyagellátási különbségek keresésével.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Kukorica starter műtrágya használata alacsony foszfor- és szervesanyag-tartalmú savanyú barna erdőtalajon szemmel látható kezdeti biomassza tömegnövekedést és hiánytünet-csökkenést okoz kukoricában. Azonban a vizsgált termőhelyeken több különböző csapadékellátottságú év adata alapján sem okoz terméstöbbletet konvencionális gazdálkodásban, hatása a tenyészidőszak végére ezeken a talajokon termésben kiegyenlítődik.
2. A vizsgált savanyú barna erdőtalajú területről megállapíthatjuk, hogy a kukorica termését leginkább az időjárás, majd a kijuttatott nitrogén mennyisége határozzák meg, és ehhez képest az általunk használt mikrobiológiai oltóanyagok és meszezés befolyásoló hatása jelentősen kisebb.
3. Az általunk használt baktérium- és gombaoltások csak csökkentett műtrágyafelhasználás mellett fejtették ki termésnövelő hatásukat. Az oltások azonban csak kis részben képesek pótolni a kieső műtrágyamennyiség termésnövelő hatását.
4. Kukoricában alkalmazott starter műtrágya termésnövelő hatásának elmaradása előre vetíti a mikrobiális oltóanyagok hatástalanságát is magas műtrágyázási szinten. A starter műtrágya kezdeti növekedés serkentése azonban jelezheti a mikrobiális oltás alacsony N-műtrágyázási szinten várható termésnövelő hatását a kontrollhoz képest.
5. Kimutattuk, hogy a virágzáskor mért talajenzimek (β -glükózidáz, dehidrogenáz, savas foszfátáz) és a permanganát oxidálható labilis széntartalom jól korrelálnak a későbbi őszi búza és kukorica termésmennyiségekkel, mert jelzik a virágzáskori megnövekedett növényi tápanyag-igényt és a tápanyag-felvétel mértékét. Azonban a mikrobiális oltóanyagok talajbiológiai aktivitására gyakorolt hatását nem feltétlenül mutatják.

6. A DOKTORI ÉRTEKEZÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

Folyóirat cikkek:

1. **Prettl, N.,** Biró, B., Nugroho, P. A., Kotroczó, Z., Kabalan, S., Kovács, F., Papdi, E., & Juhos, K. (2024). Limited effect of mycorrhizal inoculation depending on soil type and fertilization level in a central European field trial. *Plant Growth Regulation*, 104(3), 1669–1681. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01251-w>, **Scopus: Q1, Impact factor: 3,6 (2023)**
2. **Prettl, N.,** Biró, B., Nugroho, P. A., & Juhos, K. (2022). Labilis szén, mint a talajbiológiai aktivitás indikátora mikrobiális oltóanyagok és Ca-tartalmú talajjavító alkalmazásánál. *Journal of Central European Green Innovation*, 10(Suppl 3), 13–25. <https://doi.org/10.33038/jcegi.3559>

Teljes terjedelmű konferencia közlemények:

3. **Prettl, N.,** Kotroczó, Zs., Pabar, S.A., Juhos, K., Biró, B. (2021) Starterműtrágya hatás- vizsgálata kukoricában eltérő tápanyag-ellátottságú talajokon a talajbiológiai tulajdonságok tükrében. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 193-199. oldal.
4. **Prettl, N.,** Kotroczó, Zs., Priyo, A.N., Pabar, S.A., Biró, B., Juhos, K. (2022) Mikrobiológiai termésnövelők és foszfor műtrágya hatása a kukorica növekedésére, két különböző talajtípuson. XVII. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia, (Kolozsvár, Románia, 2022. április 6-9.) Absztrakt kötet: ISSN: 1842-9815., 160-166. oldal

Összefoglalók és absztraktok:

5. **Prettl, N.,** Biró, B., Nugroho, P.A., Kotroczó, Zs., Kabalan, S., Kovács, F., Juhos, K., (2024) Baktériumokat és mikorrhiza gombákat tartalmazó talajoltóanyagok hatása kukorica és az őszi búza fejlődésére hároméves szabadföldi kísérletben. XIX. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Április 03-05, 2024, Atommagkutató Intézet, Debrecen), Absztrakt kötet: 46-47. oldal
6. **Prettl, N.,** Juhos, K., Nugroho, P.A., Kotroczó, Zs., Kabalan, S., Kovács, F., Biró, B. (2024) Effect of mycorrhiza inoculation depending on fertilization level and soil type at Central European field trial. Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences (May 19-21, 2024, Florence, Italy) Abstract book: 1276.

7. **Prettl, N.**, Biró, B., Nugroho, P.A., Kotroczó, Zs., Kabalan, S., Juhos, K., (2023) Mikorrhiza gomba oltóanyag hatása konvencionális növénytermesztésben a talajbiológiai tulajdonságok és a termés tükrében. XVIII. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Május 17-19, 2023, Szegedi Egyetem, Szeged), Absztrakt kötet: 51-52. oldal
8. **Prettl, N.**; Kotroczó, Z.; Pabar, S.A.; Nugroho, P.A.; Juhos, K. and Biró, B. (2022) Soil characteristics and soil biological activity is a key in P-supply of corn at cold early spring in Central-European soils. XXII. World Congress of Soil Science (Glasgow, Scotland, 31 July – 5 August 2022.)
9. **Prettl, N.**, Kotroczó, Zs., Pabar, S.A., Juhos, K., Biró, B. (2021) Starterműtrágya hatás- vizsgálata kukoricában eltérő tápanyag-ellátottságú talajokon a talajbiológiai tulajdonságok tükrében. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 100. oldal.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- 1) Abdi, B. T. (2024). Studies on the effects of liming acidic soil on improving soil physicochemical properties and yield of crops: A review. *Middle East Research Journal of Agriculture and Food Science*, 4(03), 95–103. <https://doi.org/10.36348/merjafs.2024.v04i03.001>
- 2) Bakonyi, I., & Csitári, G. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation of winter wheat in an intensive crop producing farm. *Journal of Agriculture and Horticulture Research*, 6, 288–294.
- 3) Bossolani, J. W., Crusciol, C. A. C., Momesso, L., Portugal, J. R., Moretti, L. G., Garcia, A., De Cássia Da Fonseca, M., Rodrigues, V. A., Calonego, J. C., & Dos Reis, A. R. (2022). Surface liming triggers improvements in subsoil fertility and root distribution to boost maize crop physiology, yield and revenue. *Plant and Soil*, 477(1–2), 319–341. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05432-2>
- 4) Campdelacreu Rocabruna, P., Domene, X., Preece, C., & Peñuelas, J. (2024). Relationship among soil biophysicochemical properties, agricultural practices and climate factors influencing soil phosphatase activity in agricultural land. *Agriculture*, 14(2), 288. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020288>
- 5) Cochran, W. G. (1950). Estimation of bacterial densities by means of the „most probable number”. *Biometrics*, 6(2), 105. <https://doi.org/10.2307/3001491>
- 6) Colla, G., Rouphael, Y., Bonini, P., & Cardarelli, M. (2015). Coating seeds with endophytic fungi enhances growth, nutrient uptake, yield and grain quality of winter wheat. *Int. J. Plant Prod*, 9(2), 171–190.
- 7) Gangwar, R., Makádi, M., Bresilla, B., Zain, M., Weldmichael, T., Demeter, I., Tancsics, A., Cserhádi, M., & Szegi, T. (2022). Effects of land uses and soil types on microbial activity and community structure. *International Agrophysics*, 36(4), 323–336. <https://doi.org/10.31545/intagr/155096>
- 8) Geist, L., Wolfer, R., Thiem, R., Thielicke, M., Eichler-Löbermann, B., Eulenstein, F., & Müller, M. E. H. (2023). Alternative starter fertilization strategies in maize (*Zea mays* L.) cultivation: Agronomic potential of microgranular fertilizer and plant growth-promoting microorganisms and their impact on the soil native microbial community. *Agronomy*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy13122900>
- 9) Juhos, K., Czigány, S., Madarász, B., & Ladányi, M. (2019). Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment – A multivariate approach for Central European arable soils. *Ecological Indicators*, 99,

- 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.063>
- 10) Juhos, K., Szabó, S., & Ladányi, M. (2015). Influence of soil properties on crop yield: A multivariate statistical approach. *International Agrophysics*, 29(4), 433–440. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0049>
 - 11) Margalef, O., Sardans, J., Maspons, J., Molowny-Horas, R., Fernández-Martínez, M., Janssens, I. A., Richter, A., Ciais, P., Obersteiner, M., & Peñuelas, J. (2021). The effect of global change on soil phosphatase activity. *Global Change Biology*, 27(22), 5989–6003. <https://doi.org/10.1111/gcb.15832>
 - 12) Mayer, J., Scheid, S., Widmer, F., Fließbach, A., & Oberholzer, H.-R. (2010). How effective are ‘Effective microorganisms® (EM)’? Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology*, 46(2), 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.007>
 - 13) Nkebiwe, P. M., Stevens Lekfeldt, J. D., Symanczik, S., Thonar, C., Mäder, P., Bar-Tal, A., Halpern, M., Biró, B., Bradáčová, K., Caniullan, P. C., Choudhary, K. K., Cozzolino, V., Di Stasio, E., Dobczynski, S., Geistlinger, J., Lüthi, A., Gómez-Muñoz, B., Kandeler, E., Kolberg, F., ... De Neergaard, A. (2024). Effectiveness of bio-effectors on maize, wheat and tomato performance and phosphorus acquisition from greenhouse to field scales in Europe and Israel: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1333249. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1333249>
 - 14) Nugroho, P. A., Kotroczo, Z., Prettl, N., Kovács, F., Madarász, B., & Juhos, K. (2024). *Soil Biological Parameters after a 17-Year Tillage Study: Vertical and Temporal Variability Effect*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5071357>
 - 15) Nugroho, P. A., Prettl, N., Kotroczo, Z., & Juhos, K. (2023c). The Effect of Molasses Application on Soil Biological Indicators and Maize Growth of Different Tillage Soil: A Pot Experiment. *Journal of Environmental Geography*, 16(1–4), 119–124. <https://doi.org/10.14232/jengeo-2023-44670>
 - 16) Pepó, P. (2018). Long-term experiments on chernozem soil in the University of Debrecen. *Acta Agraria Debreceniensis*, 357–369. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/150/1732>
 - 17) Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society*, 55(1), 158–161.
 - 18) Prettl, N., Biró, B., Nugroho, P. A., Kotroczo, Z., Kabalan, S., Kovács, F., Papdi, E., & Juhos, K. (2024). Limited effect of mycorrhizal inoculation depending on soil type and fertilization level in a central European field

- trial. *Plant Growth Regulation*, 104(3), 1669–1681. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01251-w>
- 19) Qin, M., Zhang, Q., Pan, J., Jiang, S., Liu, Y., Bahadur, A., Peng, Z., Yang, Y., & Feng, H. (2019). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil enzyme activity is coupled with increased plant biomass. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.12815>
 - 20) Quinn, D. J., Lee, C. D., & Poffenbarger, H. J. (2020). Corn yield response to sub-surface banded starter fertilizer in the U.S.: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107834>
 - 21) Roller, S., Weiß, T. M., Li, D., Liu, W., Schipprack, W., Melchinger, A. E., Hahn, V., Leiser, W. L., & Würschum, T. (2022). Can we abandon phosphorus starter fertilizer in maize? Results from a diverse panel of elite and doubled haploid landrace lines of maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 1005931. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1005931>
 - 22) Santos, M. H., Aguiar, W. E., Vendruscolo, E. C. G., & Missio, R. F. (2023). Does soil cultivation practices and inoculation with *Azospirillum brasilense* affect the performance of maize genotypes? *Ciência e Agrotecnologia*, 47. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202347005523>
 - 23) Sinsabaugh, R. L., Klug, M. J., Collins, H. P., Yeager, P. E., & Petersen, S. O. (1999). Characterizing soil microbial communities. In *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research* (o. 318–348).
 - 24) Veerman, C., Pinto Correia, T., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., & Cieniciela, E. (2020). Caring for soil is caring for life. *EU Soil Health and Food Mission Board: Brussels, Belgium*.
 - 25) Veres, Z., Kotroczó, Z., Magyaros, K., Tóth, J. A., & Tóthmérész, B. (2013). Dehydrogenase activity in a litter manipulation experiment in temperate forest soil. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 9(1), 25–33. <https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0002>
 - 26) Weil, R. R., Islam, K. R., Stine, M. A., Gruver, J. B., & Samson-Liebig, S. E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3–17. <https://doi.org/10.1079/AJAA2003003>
 - 27) Zhang, G.-Y., Zhang, L.-P., Wei, M.-F., Liu, Z., Fan, Q.-L., Shen, Q.-R., & Xu, G.-H. (2011). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi, organic fertilizer and soil sterilization on maize growth. *Acta Ecologica Sinica*, 31(4), 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2011.04.005>