

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Prettl Nándor

Budapest

2025



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

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

DOI: 10.54598/007340

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

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK	2
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	4
2.1. A növények, köztük a kukorica és búza tápanyagfelvételét befolyásoló tényezők..	4
2.1.1. Talajban lévő tápanyagok felvehetősége	4
2.1.2. A kukorica és búza tápanyag igénye és műtrágyareakciói	9
2.1.3. Talaj-mikroba-növény kölcsönhatások jelentősége.....	15
2.1.4. A mikrobiális tápanyagmobilizálás hatásmechanizmusai	22
2.1.5. A mikrobiális aktivitás indikátorai, a talajenzimek	24
2.2. Mikrobiális talajoltó készítmények hatása búzában és kukoricában.....	26
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	31
3.1. Szabadföldi kísérletek beállítása.....	31
3.1.1. Termőhelyek talajtípusai és művelésük.....	31
3.1.2. Időjárási körülmények	33
3.1.3. Kísérletek bemutatása, parcellák kezelései és műtrágyázási szintek	33
3.2. Tenyészedényes kísérletek beállítása	38
3.3. Felhasznált mikrobiológiai és kémiai készítmények	40
3.4. Mérési módszerek.....	43
3.4.1. Talajmintavételek és vizsgálatok	43
3.4.2. Növényvizsgálatok és termésmérés	46
3.4.3. Az adatok matematikai és statisztikai elemzése	48
4. EREDMÉNYEK.....	49
4.1. A foszfor-starter trágyázás hatása két eltérő tápanyag-ellátottságú és talajbiológiai aktivitású talajon.....	49
4.2. Baktérium oltás hatása a talajtípus és a műtrágyázási szint függvényében	54
4.3. A talajbiológiai állapot hatása a baktérium oltóanyagok hatékonyságára tenyészedényes modellkísérletben.....	60
4.4. Meszezés hatása a növényi növekedésre és a baktérium oltások hatékonyságára 2023-ban	64
4.4.1. Meszezés hatása a P mobilizálásra, tenyészedényes kísérletben	64
4.4.2. Meszezés hatása a baktériumos oltásokra szabadföldi kísérletben.....	66
4.5. Mikorrhiza oltás hatása a talajtípus és a műtrágyázási szint függvényében.....	67
4.6. A talajbiológiai aktivitás jelentősége a baktérium és mikorrhiza oltások hatékonyságában, a talajbiológiai aktivitás talajtípusokkal való összefüggései.....	78
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK.....	86
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	89
7. ÖSSZEFOGLALÁS	90
8. SUMMARY.....	92
M1. IRODALOMJEGYZÉK	94
PUBLIKÁCIÓS LISTA.....	115
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	118

1. BEVEZETÉS ÉS 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 (Smith és Gregory, 2013). 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 (Dudás, 2017). A talajok szervesanyaga és a talajélőlények, 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 (Kurniawati et al., 2023; Scharfy et al., 2017; Veerman et al., 2020). Ezzel egyidőben a növényegészséget támogató és tápanyag mobilizáló mikrobiológiai oltóanyagok tudományos és gyakorlati szerepe felértékelődik a mezőgazdaságban (Elliott et al., 2021), melyhez hozzájárulhattak az elmúlt évek kiszámíthatatlan műtrágyapiaci trendjei, a műtrágyák árának sokszorozódása, elérhetőségük csökkenése és a műtrágyák iránti növekvő igény (FAO, 2019). A mikrobiológiai oltóanyagok és egyéb „biofertilizer” termékek 2024-ben a Földön 1,38 billió dollár értéket képviseltek, míg az előrejelzések szerint 2025-2030-as időszakban ez a piaci részesedés 12,8%-kal nőni fog. Ezen termékek összértékének 40%-át szántóföldi gabonatermesztésben használták 2024-ben (Grand view research, 2024).

Az Agrárminisztérium 2023-ban bevezetett egy ösztönző támogatási formát - Agro-ökológiai program - melynek célja, hogy a gazdálkodók környezeti szempontból hasznos önkéntes vállalkozásokat tegyenek az éghajlatváltozás mérséklése, a talaj- és vízvédelem, illetve a biológiai sokféleség védelme érdekében. A program egyik válaszható eleme a mikrobiológiai készítmények alkalmazása szántóterületeken, mely jelentősen növelte a Magyarországon oltóanyaggal kezelt területek számát. A minisztérium adatközlése alapján 2023-ban Magyarországon az összes szántóterület legalább 14,4 %-án használtak mikrobiológiai készítményeket a földhasználók. Ennek ellenére sokan megkérdőjelezik 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. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A növények, köztük a kukorica és búza tápanyagfelvételét befolyásoló tényezők

2.1.1. Talajban lévő tápanyagok felvehetősége

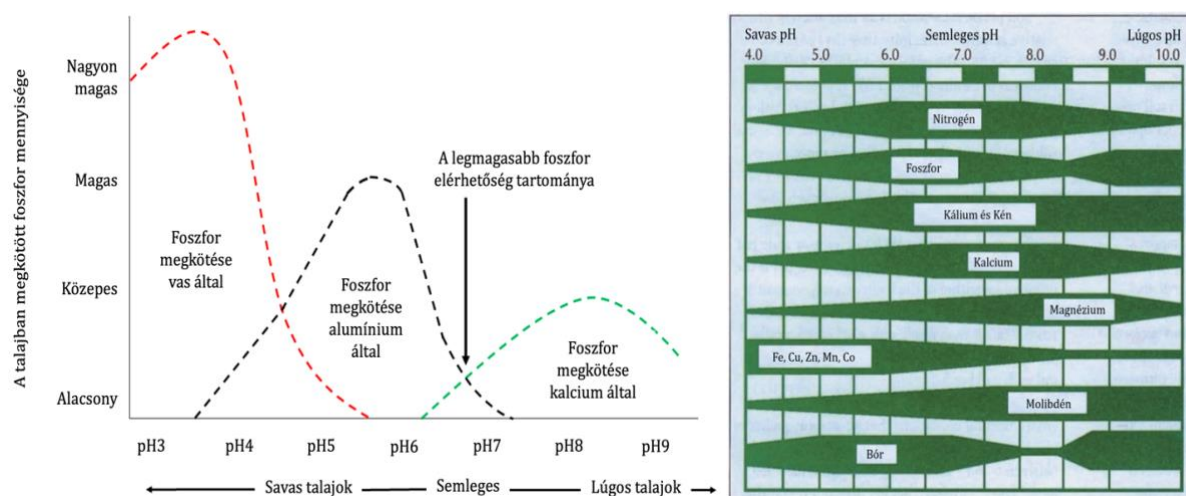
Körülbelül 19 elem számít esszenciálisnak a növények fejlődése szempontjából, melyből a C, H és O felvétele általában gázokból vagy folyadékból történik. A maradék 16 elem felvétele a talajból történik (Reid és Hayes, 2003), ahol a gyökér és a talaj szilárd fázisa között alapvetően a talajoldat a közvetítő közeg (Kádár, 1992). A tápelemek az oldatból diffúzió és a tömegáramlás révén jutnak a gyökerek közelébe, amelyhez a növény is hozzájárul a gyökérszövetének növekedésével. A kevésbé mozgékony tápelemek (P és K) felvehetősége nagyobb mértékben függ a talajadottságoktól, míg a mozgékony elemek felvételét (pl. N, S) nagyobb mértékben a növény határozza meg. A tápanyagfelvétel és termésmenés javítása szempontjából elsősorban a gyökérkörnyezet befolyásolása a feladat, melyhez tápanyagfelvételi és talaj tápanyag-szolgáltatási modellek használatára és fejlesztésére van szükség a mezőgazdasági gyakorlatban (Rengel, 1993).

A műtrágyafelhasználás szempontjából a legfontosabb elem a nitrogén, melynek szinte egészét a gyökérükön keresztül veszik fel a növények. A légkör nitrogéntartalma 78%, ezt a növények mégsem képesek hasznosítani a nitrogén atomok között létrejött hármaskötés miatt. Néhány baktériumfaj képes megbontani a hármaskötést és felvehetővé alakítani a légköri nitrogént (Kumar et al., 2020). A nitrogén három leggyakoribb formája a talajoldatban a nitrát, ammónium és aminosavak. Felvételében kukorica esetében a tömegáramlás körülbelül négyszer nagyobb szerepet játszik mint a diffúzió (Miller és Cramer, 2005). A nitrogén szerves formában történő felvétele sokáig kevésbé kutatott téma volt, mióta kimutatták laboratóriumi és szabadföldi kísérletekben a szerves nitrogén talajoldatból történő növényi felvételét, vita tárgyát képezi ennek jelentősége a növények teljes nitrogén felvételében és tápanyagutánpótlásában (Näsholm et al., 2009). Búza kísérletek alapján a szerves nitrogén jelentős forrást jelenthet a búza növények számára. Azonban a szerves nitrogén felvétele búzában önállóan gyorsabb, mint a szerves aminosav formáé és együtt alkalmazva őket, mindkét nitrogénforma felvétele egységesen lassabb felvételi (Gioseffi et al., 2012). Kukorica kísérletek szerint a talaj szerves nitrogénjéből ammonifikálással előállított nitrogén meg is haladhatja a kukorica nitrogén igényét. Fontos jövőbeli kutatási irány az ammonifikáció mérése növénytermesztési rendszerekben, továbbá felszabadult ammónium ion növénybe kerülésének vagy egyéb sorsának vizsgálata (Osterholz et al., 2017).

A legtöbb művelt talaj nagy mennyiségű foszfor-tartalékkal rendelkezik, amelynek azonban csupán töredéke jelenik meg a talajoldatban, továbbá a kijuttatott oldható szerves foszfor

igen nagy hányada a kijuttatás után azonnal leköttődik (Cong et al., 2020; Igual et al., 2001; Simonné Dudás, 2021). A növények foszforfelvételének 90%-a általában nem a kijuttatott foszforból, hanem a talajban lévő könnyen felvehető foszforkészletből származik (Johnston et al., 1986). A növények a foszfort orto-foszfát ionként (H_2PO_4^- és HPO_4^{2-}) veszik fel a talajoldatból (Tisdale és Nelson, 1966), amely folyamat részletesen kutatott része a növények tápanyag ellátásának (Lambers, 2022). A foszfor felvételében meghatározó szerepet játszhatnak a foszfor mobilizáló mikroorganizmusok (Kalayu, 2019), amelyek által mobilizált és felvett foszfor körforgása gyors (Hinsinger et al., 2015). A foszfor felvételét a biotikus tényezőkön kívül abiotikus tényezők is befolyásolják.

A **kémhatás** eltérően hat a szervetlen és a szerves foszforformákra. Általánosan ismert, hogy minél savanyúbb egy talaj, annál nagyobb az anionadszorpció, illetve minél lúgosabb egy talaj, annál nagyobb a kationadszorpció. A savanyú kémhatás nagymértékben képes növelni a foszfátok, illetve a nehézfémek felvehetőségét, azonban csak egy bizonyos határig (Fülek, 1999; Penn és Camberato, 2019). Kivételek lehetnek azok a növények, melyek savas körülmények között jobban fejlődnek. Ilyenkor a foszfor felvehetősége rosszabb a talajban, de ezek a növények mégis foszforhoz jutnak alacsonyabb pH-n is (Penn és Camberato, 2019). A foszfátion Ca-hoz kötődik gyengén lúgos és lúgos talajokban, savanyú közegben pedig Al- és Fe ionokhoz (Fülek, 1999; Grafe et al., 2002; Igual et al., 2001; Newcomb, 2015). Az ionantagonizmusok többsége is a kémhatással van összefüggésben, a foszfor esetében a legfontosabbak a foszfor-cink és a foszfor-kalcium antagonizmusok. A cinket és a kalciumot elsősorban lúgos pH-n képes a foszfor lekötni. A mikroelemek a molibdénen kívül inkább savanyú pH-n vehetők fel jobban a növények számára (1. ábra.)



1. ábra: Balra: A talajban levő foszfor általános elérhetősége a pH függvényében (Penn és Camberato, 2019), jobbra: a tápelemek felvehetősége a pH függvényében (Kumar et al., 2020).

A ***hőmérséklet*** jelentősen befolyásolja a tápelemfelvételt, mivel a gyökérlégzés a hőmérséklet emelkedésével fokozódik, így több energiája lesz a növényeknek az aktív tápelemfelvételhez. Alacsony hőmérsékleten csökken a gyökérnövekedés, így a növény nem éri el a lassan mozgó foszfort, illetve csökken a foszfor diffúziója (Itoh, 2002). Hőmérséklet emelkedés hatására a víz viszkozitása, a növényi sejtfalak vízáteresztő képessége megnövekszik, míg alacsony hőmérsékleten egyes növényi fajoknál lassul a gyökerek tápelemfelvétele (Füleky, 1999). A magasabb talajhőmérséklet azáltal is növelheti az oldható foszfor mennyiségét, hogy növeli a szerves foszfor ásványosodását vagy a szerves foszfor kémiai lebomlását (Power et al., 1964). A talajoldat egyensúlyi foszforkoncentrációja is növekszik a magasabb hőmérséklet hatására (Arambarri és Talibudeen, 1959). Azonban a túl magas hőmérséklet csökkentheti a foszfortartalmat a lekötődés és a kémiai fixáció miatt. Az előjelzések szerint a Föld átlagos hőmérséklete és a levegő CO₂ szintje növekedni fog, ami növelheti a talajban lévő foszfor felvehetőségét (Bhattacharyya et al., 2014). Ezen kívül a klímaváltozás nagy valószínűséggel növelni fogja a foszfor készletek talajból vizekbe kerülését is (McDowell et al., 2017).

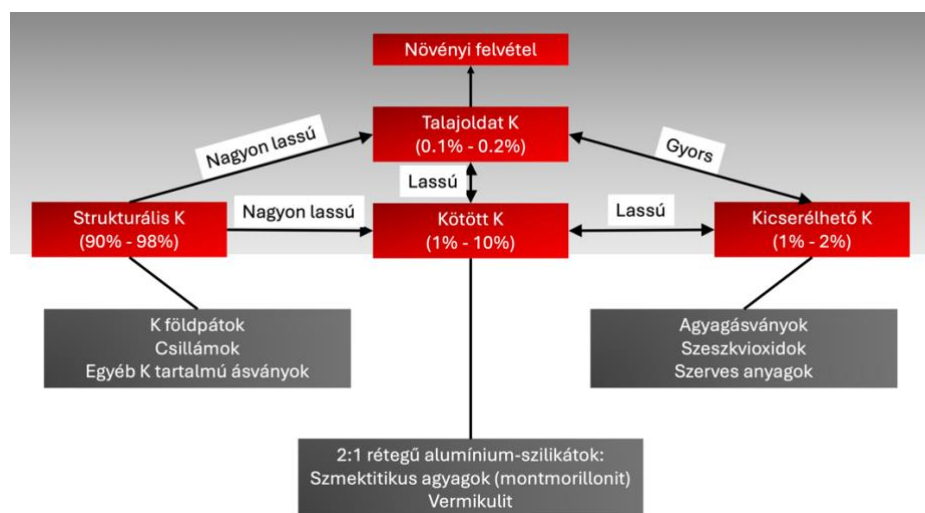
A humifikáció és ásványosodás egyensúlya, üteme is jelentősen befolyásolja a növények számára felvehetővé váló tápanyagok mennyiségét (Füleky, 1999). A humusz jelenléte növeli a fém foszfátok és rockfoszfát oldhatóságát, a Fe- és Al-komplexek képzésével (Del Re és mtsai., 1978; Tan, 2014). Yusran (2018) szerint, amennyiben szerves anyagot adunk a talajhoz, növelhetjük a foszfor felvehetőségét, mert a szerves foszfor ásványosodása és lebomlása növekszik, illetve mint abiotikus tényezőként a megkötött foszfor lecserélődik (ligandum-csere hatás).

A talajkolloidok felületén végbemenő folyamatokat nagymértékben befolyásolják a redukcióval és oxidációval kapcsolatos redoxviszonyok. A műtrágyák és a talajban lévő komplexképző anyagok hatással vannak a talaj redoxviszonyaira, így befolyásolják a tápanyagok felvehetőségét is. A foszfor a vegyértékváltó vassal együtt mozog, így minden, ami a vas felvételét befolyásolja, hatással van a foszfor felvételére is. Amennyiben a talaj redukzív, akkor a vas mozgékonyabb, így a foszfor is. Ellentétben, oxidatív körülmények között, oldhatatlan vas-foszfátok keletkeznek (Füleky, 1999).

A kálium az egyik legfontosabb makrotápelem, a hagyományos műtrágyázás egyik alapeleme, felvehető mennyisége meghatározó a gazdasági növények termése szempontjából. A kálium nagy mennyiségben van jelen a talajokban, nagy részük mégsem felvehető a növények számára. Négy formában található a talajban: kicserélhető, nem kicserélhető, ásványi nem kicserélhető és a talajoldatban levő kálium (2. ábra). Az ásványi nem kicserélhető a forma a talajban lévő kálium 90-98%-a. A növények számára nem felvehető kálium felvehetővé

alakításában játszhatnak szerepet a kálium mobilizáló mikroorganizmusok (Kumar et al., 2020; Zörb et al., 2014). A gabonafélék megfelelő káliumtartalma, a humán táplálkozás és egészség szempontjából is fontos (Zörb et al., 2014).

A talajoldat kálium koncentrációjának (és általában más kationkoncentrációjának) és a talaj adszorpciós felületei (főleg ásványi kolloidok) között dinamikus egyensúlyi folyamatok zajlanak. Minél nagyobb a talajok kationcsere kapacitása, potenciálisan annál nagyobb kálium és egyéb kationtartalékokkal rendelkeznek, de az adszorpció-deszorpció dinamikája viszont annál lassabb (Füleky és mtsai., 1999; Juhos 2021). Ez meghatározza a kálium műtrágyázás hatékonyságát is.



2. ábra: A talajban lévő K formái és növényi elérhetősége (Kumar et al., 2020).

A talajok tápanyag-szolgáltató képességének jellemzéséhez minden európai ország a saját mérési módszereit használja a műtrágyázási szaktanácsadásban. A különböző laboratóriumi módszerek eltérő felvehető tápanyag-tartalmakat állapítanak meg, illetve azonos módszerek más laboratóriumban mért eredményei között is lehet különbség az alkalmazott mérés technológia eltérései miatt. Minden kivonószer eltérő kémiai tulajdonságokkal rendelkezik, és eltérő mennyiségben oldja például a különböző P formákat. A kivont foszfor mennyiségének sorrendje (Neyroud és Lischer, 2003) szerint a következő: $P_{total} > P_{oxal.} > P_{AL} > P_{Me3} > P_{Bray} > P_{AAEDTA}, P_{DL}, P_{CAL} > P_{Olsen} > P_{paper\ strip}, P_{AAAc}, P_{Morgan} > P_{H2O}, P_{CO2}, P_{CaCl2}$. A kevés foszfort kivonó, könnyen felvehető P-t mérő szerek eredménye hasznos lehet az azonnali műtrágyázási ajánlásban, míg a sok P-t kivonó szerek eredménye a hosszú távú műtrágyázási stratégiák kialakításában. Az, hogy melyik módszer eredményét, melyik talajtani paraméter befolyásolja, nehéz megállapítani a talajok eltérő műtrágyázási és szervesanyag-gazdálkodási múltja miatt. Európában a műtrágya ajánlások csökkentése megfontolandó, mert az ajánlásokhoz képest a talajok valójában több felvehető P-t tartalmaznak (Lumbanraja et al., 2017; Neyroud és Lischer, 2003).

A talajok felvehető foszfortartalmát 3,75 pH-jú ammónium-laktátos (AL) kivonószerezrel mérik Magyarországon, a tapasztalatok szerint azonban ez kismértékben korrelál a növények által felvett foszfor mennyiségével. Az AL, a meszes talajokon a növények számára csak lassan felvehetővé váló Ca- foszfátokat is oldatba viszi. Léteznek azonban AL-korrektációs modellek, melyek javíthatnak az eredmények felhasználhatóságán (Csathó, 2002). A talajok foszforszolgáltató képességét azonban nem csak az oldhatósági viszonyok határozzák meg. A kémiai talajvizsgáló módszerek nem veszik figyelembe a szerves foszfor vegyületek mineralizációját, a baktériumok foszfatáz aktivitását és a gyökerek által kibocsátott foszfatáz enzim mennyiségét, melyek szintén jelentős hatással vannak, illetve lehetnek a növények tápelem-felvételére.

A felvehető kálium meghatározására is több talajvizsgáló módszer létezik (Bell et al., 2021). Számos tanulmány kimutatta, hogy a CaCl_2 kivonószerez kevesebb káliumot old, mint az ammónium acetát, Mechlich 3 vagy az ammónium laktát kivonószerezek, melyek hatékonyabban behatolnak az agyagásványok rétegrácsai közé és a mikropórusokba. A Ca^{2+} K^+ -al történő cseréjének intenzitása csökken, ha a talaj agyagosabb. (Csathó, 2005b) az 1960 és 2000 között publikált szabadföldi kísérletek adatbázisa alapján arra a következtetésre jutott, hogy az AL-módszer megbízható kálium vizsgáló módszer, különböző talajtulajdonságok esetén is. Haney et al. (2010) javasoltak egy új H3A nevű kivonószerez használatát, mely a rizoszférában levő, gyökerek által kibocsátott oldatot szimulálja (citrát, oxalát, malát). Az USA-ban vizsgált 60 talajmintán végzett vizsgálatok alapján a H3A kivonószerez az ammóniummal oldható K-nak körülbelül az egyharmadát oldotta. Haney et al. (2017) nemrég módosították a H3A kivonószerez, kihagyták belőle a lítium citrátot (H3A-4) és véleményük szerint a H3A-4 alkalmas kivonószerez a növények számára elérhető tápanyagok pontos mérésére (Bell et al., 2021). A H3A-4 kivonószerezes mérés kálium mellett foszfor, nitrogén és egyéb felvehető tápanyagok mérésére is alkalmas (Haney et al., 2017).

Magyarországon a növények számára felvehető mikroelemek mérésére a KCl-EDTA oldatot használjuk, az eredményeink azonban nagyrészt összevethetők a más országok által használt kivonószerezekkel mért eredményeivel (Kremper et al., 2008). Mikroelemtartalom tekintetében a talajok nagy diverzitást mutatnak. Az intenzív növénytermeléssel sok mikroelem elkerülhet a talajokból, azonban a mikroelemek tekintetében inkább azok relatív hiánya (gátolt felvétele) fordulhat elő, így a mérlegszámítás elve nem megfelelő a tápanyagutánpótlás tervezésében (Kádár, 1992; Tóth et al., 2017). A magyarországi talajok 9%-a rézzel gyengén ellátott, míg 46%-a cinkben gyengén ellátottnak minősül (Kádár, 2008).

Jelenleg kémiai oldószerezes módszerekkel történik a talajminták laboratóriumi vizsgálata, amelyeknek, tehát megvannak a korlátai, hiszen nem lehet minden fizikai, kémiai és biológiai

folyamatot modellezni a laboratóriumban. Azonban megjelent az igény a gyorsabb, illetve a kevesebb vagy vegyi anyagokat egyáltalán nem igénylő talajvizsgálati módszerek alkalmazására, melyek közül talán a legnagyobb jelentőségű a spektrometria talajtani alkalmazása (Vona et al., 2020). A növények tápelem-felvételi folyamataiba azonban ezek sem engednek mélyebb betekintést.

2.1.2. A kukorica és búza tápanyag igénye és műtrágyareakciói

A növények tápanyagigénye és tápanyagreakciói szempontjából fontos megemlíteni a növények genetikai adottságait. Vannak fajták melyek hatékonyan átalakítják a tápanyagokat szárazanyaggá és vannak melyek kifejezetten hatékonyak, mikor néhány tápanyagból hiányt szenvednek. A genetika meghatározza a növények mikroelem igényét is, amellett, hogy számos munka fókuszált arra, hogy mely fajták stressztoleránsak, fontos felismerni, hogy egyformán jelentős, hogy a kijuttatott műtrágyákat mely fajták tudják a legjobban hasznosítani (Vose, 1984; Weih et al., 2017).

Egy tanulmány szerint az EU szántóterületeinek 85%-án a levegőbe és vízbe történő nitrogén-veszteség mértéke meghaladja a kritikus küszöbértéket (Schulte-Uebbing és De Vries, 2021). 2009-2011 között vizsgált időszakban 30-30 német farmon történt mérések alapján azt találták, hogy a nitrogénfelhasználás hatékonysága (NUE, nitrogen-use efficiency) konvencionális termesztésben 77%, míg organikus gazdálkodásban 83% volt (Chmelíková et al., 2021). Ezért is szabályozzák az EU-ban a tápanyag mérleget a környezetvédelmi szempontok miatt (Csathó és Radimszky, 2012). A NUE javítható nitrogént jobban hasznosító növények nemesítésével és PGPR baktériumok alkalmazásával (Zeffa et al., 2019), leginkább alacsony műtrágyázási szinten (Galindo et al., 2024). *Azospirillum brasilense* oltás fokozza kukoricában a NUE-t nitrogénhiány esetén és növeli a termést. A magvak kezelése a baktériummal környezetvédelmi szempontból fenntartható kukoricatermesztési stratégiának tekinthető (Di Salvo et al., 2018a; Zeffa et al., 2019). Annak érdekében, hogy elkerüljük a baktériumok peszticidekkel való érintkezését lehetséges a kukorica levélpermetezése is (Fukami et al., 2016).

A növények nitrogén és egyéb tápanyag felhasználási hatékonyságára számos mutatót használnak, melyek közül a terméshozamra és növényben lévő nitrogén mennyiségére vonatkozó mutatók korrelálnak egymással, azonban a nitrogén felvételére vonatkozó indexek nem (Weih et al., 2018). A nitrogénfelvétel hatékonyságát jelentősen befolyásolja az egyéb tápelemek hozzáférhetősége is, köztük a kén szinergista hatása emelhető ki, mint mezoelem. A talajok manapság kénhiányosak, mivel kevesebb kén kerül a levegőből a talajokba és a szármadaradványokat nagyobb mértékben elviszik a termőföldről. Az új típusú elemi ként

tartalmazó, de ammónium szulfátot nem tartalmazó műtrágyák az új kutatások szerint sok esetben nem biztosítják a növények számára szükséges kén mennyiségét (Chien et al., 2016).

A magyarországi tápanyagutánpótlás és szaktanácsadási rendszerek a MÉM-NAK kézikönyv 1979-es kiadásán alapulnak, és a talajvizsgálati módszerek azóta jelentősen nem változtak. A műtrágyák világszerte 1989-es bevezetése lehetetlenné tette az addigi műtrágyadózisok felhasználását, ezért az intenzív MÉM-NAK rendszer helyett, azóta számos kisebb NPK ajánlásokat használó szaktanácsadási rendszert dolgoztak ki, néhány tartamkísérletre épít (Csathó et al., 1998, 2009), másokból hiányzik a tartamkísérletekből kapott összefüggések felhasználása (Debreczeni és Németh, 2009; Vona et al., 2020). Jelenleg a változó klimatikus körülmények és az új hibridek megjelenése indokoltá teheti az újabb kísérletek beállítását, továbbá a kémiai vizsgálatok mellett talajbiológia vizsgálatok elvégzését is.

Őszi búza esetében 65 magyarországi, többféle talajtípuson végzett tartamkísérletek adatai alapján, átlagosan 74%-os termés érhető el nitrogén műtrágya nélkül. Az értékek 25-től 100%-ig terjednek, mely jelzi a búza nitrogén igényességét. A humusztartalom emelkedésével a nitrogén hatás csökken, illetve a nitrogén hatás homoktalajon a legerősebb, agyagos-vályogtalajon a legkisebb. A növekvő humusztartalommal felére csökken a megfelelő gazdaságos terméshez szükséges nitrogén műtrágya szükséglet. 2% humusztartalom alatt 56-65 % os termés, 3% humusztartalom felett 87-88 %-os termés érhető el nitrogén nélkül (Csathó, 2003a). Az 1960-as éveket követő kutatási eredmények és gyakorlati tapasztalatok megerősítették, hogy a kukorica az egyik legtrágyaigényesebb szántóföldi kultúránk. A makrotápelemek közül leginkább a nitrogént igényli. 4%-os humusztartalomig a humusztartalom emelkedésével nitrogén trágyázás nélkül növekszik a termés. 4% humusztartalom felett a nitrogén műtrágyázás átlagosan 0,3 t/ha-al növeli a kukoricatermést. 3% humusztartalom felett azonban már csak 88-94% közötti termés érhető el N-műtrágyázás nélkül. A talaj fizikai félesége szempontjából az agyagos talajokon a homokos vályogtalajokhoz képest felére csökkenhet a nitrogén szükséglet (150-160 kg/ha-ról 70-80 kg/ha-ra). 69 vizsgált tartamkísérlet átlagában a gazdaságos terméshez szükséges nitrogén mennyisége 106 kg/ha volt. Nitrogén trágyázás nélkül 77% termést lehet elérni kukoricában (Csathó, 2003b). Mivel az intenzív talajműveléssel és a csekély mértékű állati trágyakijuttatással általánosságban csökken a szántóföldek humusztartalma, tápanyagellátottsága és mikrobiológiai aktivitása (Káta et al., 2022), a jól hasznosuló, megfelelően kijuttatott nitrogén műtrágya hatása felértékelődik, illetve minden nitrogéngyűjtő és azt mobilizáló mikroorganizmusé is.

Az 1960 és 2000 között publikált szabadföldi kísérletek alapján őszi búzában 0 és 3 t/ha közötti szemterméstöbbletet okozhat a foszforműtrágyázás. Azonban egy bizonyos talaj AL-P₂O₅ koncentráció felett már nem mutatható ki a foszfor hatása. Savanyú talajon 100 mg/kg, míg meszes talajon 15 mg/kg ez az érték. Őszi búzában átlagosan 82%-os termés érhető el foszfortrágyázás

nélkül, az átlagosan 5-10 kg/ha P_2O_5 -műtrágyamennyiség kijuttatása nem elegendő a maximális őszi búza termés eléréséhez (Csathó, 2003d). He et al. (2002) vizsgálataikban megállapították, hogy 30%, 45%, 60%, és 75%-os talajnedvesség esetén, foszfor műtrágya hozzáadása nélkül a talaj 75%-os víztartalmánál, míg foszfor műtrágyázással kiegészítve a talaj 60%-os víztartalmánál maximális a tavaszi búza foszforfelvétele. Szignifikánsan növekszik a tavaszi búza vízhasznosítása foszfor műtrágyázás esetén (He et al., 2002). A kukorica foszforra kevésbé igényes, a foszfor hatására a kukorica szemtermése növekedhet maximum 1,5 t/ha-al, azonban ez a mérték a talaj növekvő AL-P tartalmával csökken. Általánosságban savanyú talajokon 70 mg/kg AL- P_2O_5 tartalom felett már nem mutatnak ki foszfor hatást (Csathó, 2003c). A túlzott foszfortartalom esetében azonban létrejön P-Zn antagonizmus, ami relatív Zn hiányt okoz és több tonna kukorica termés kiesést is eredményezhet (Csathó et al., 2019).

Az 1960 és 2000 között publikált szabadföldi kísérletek alapján őszi búzában a kálium hatás elenyésző 140-170 mg/kg AL- K_2O tartalom fölött, ahol a kálium trágya nélküli őszi búza termés átlagosan 97%-os (Csathó, 2005b). A kalászos gabonák csak homokos szerkezetű vagy láptalajokon reagálnak a káliumra, és mivel a kálium nagy része a főnövény melléktermékében halmozódik fel, így a melléktermék területen hagyásával jelentősen csökkenthető a növények K kijuttatási igénye (Kádár, 2011). Kálium szempontjából a kukorica jó műtrágya reakciójú növény, a kálium hatás átlagosan 180-200 mg/kg AL- K_2O szinten szűnik meg. Kálium nélkül átlagosan 90%-os termés érhető el és az AL-módszer megfelelő képet ad a talajok kálium szolgáltató képességéről, talajtulajdonságoktól függetlenül (Csathó, 2005a). A három makroelemet követően a kén a legfontosabb tápelem a kukorica számára, hiánya termésvesztést okozhat (Ariraman et al., 2020). Az országos műtrágyázási tartamkísérletekben azonban nem vizsgálták a mezo- és mikroelemek kijuttatásának hatását (Debreczeni és Németh, 2009).

Az NPK műtrágyázással kapcsolatban fontos megemlíteni a Liebig-féle minimum elvet, mely szerint a növények növekedését a legszűkebb erőforrás (korlátozó tényező) határozza meg. A törvény nemcsak a tápelemekre vonatkozik, hanem kiterjed bármely a növényi élethez elengedhetetlen környezeti tényezőre, melynek szintje kritikus minimum alatt van, vagy meghaladja a maximálisan tolerálható szintet (Gorban et al., 2011). Waggoner és Norvell (1979) kukoricában végzett műtrágyázási kísérletei alapján, N és P tápelemek tekintetében a minimum elv jó összefüggést mutat a növények terméseredményével. Kukorica növények szabadföldi termesztése során, öntözés hiányában a csapadék által szolgáltatott vízmennyiség lehet az egyik legfontosabb növény növekedését korlátozó tényező. Kukorica növények esetében a szárazságtűrő hibridek nemesítése hozzájárulhat a növények nagyobb tápanyagfelvételéhez, mivel a szárazságtűrő hibridek nagyobb, több talajt behálózó gyökeret fejlesztenek, mely magasabb felvett tápanyagot eredményez (Rosa et al., 2019). A minimum elv tekintetében irodalmi adatok alapján

Justus von Liebig mellett honfitársa és kollégája, Carl Sprengel munkássága alapján egyaránt tekinthető a mezőgazdasági kémia és a minimum elv megalapítójának (Van Der Ploeg et al., 1999).

A mérsékelt égöv területein a kukorica termése és egészsége szempontjából a korai vetésidő fontos agrotechnikai elem. Száraz területeken, ahol az öntözés nem megoldható, a talaj víztartalma a felmelegedés hatására csökken, így a koratavaszi vetésidővel biztosítható a gyökérszövet megfelelő megerősödése. Az időbeni vetés csökkenti a későbbi kukoricamoly és gombák kártételét a kukorica növényekben (Blandino et al., 2009, 2022). Továbbá lehetővé teszi a hosszabb tenésztidőt, magasabb termésre képes növények vetését és a kukorica előbb érésének lehetőségét, mellyel megszáradhat a termőföldön, csökkentve a termelési költségeket (Gupta, 1985). Összességében a korai vetés hozzájárulhat a magasabb terméshez, azonban fontos a növények megfelelő hidegtűrése (Rodríguez et al., 2007), mivel a korai tápanyaghiányt a talaj tápanyagellátottsági szintjétől függetlenül okozhatja a talajok alacsony hőmérséklete (Touchton és Karim, 1986). Manapság a kukoricatermesztésben elterjedt műtrágyázási technológia a vetéssel egy menetben kijuttatott többek között foszfort tartalmazó starterműtrágya, melynek alapvető szerepe, hogy a kevésbé mozgékony tápelemeket azonnal biztosítsa a megjelenő gyökerek számára, serkentsen a növekedést és csökkentse a gyengébb tápanyagellátottságú talajokon megjelenő foszforhiánytüneteket (3. ábra). A könnyebb felvehetőség miatt fontos a foszfort tartalmazó starter trágya mag közelébe helyezése, vagy a magfelületre történő csávázása, azonban a túl magas műtrágya koncentrációt kerülni kell a növények megfelelő csírázása érdekében (Füleky, 1999; Makaza és Khiari, 2023). A starter műtrágyát általában a vetőmag mellé és alá helyezik el, 5-5 cm-es távolságra a magtól, a kijuttatott mennyiség függ a talaj tápanyagellátottságától (Geist et al., 2023).



3. ábra: Balra: A kísérleti barna erdőtalaj területeken és azok közelében jellemző foszforhiány tünetek és gyenge növekedés kukoricában. Jobbra: A hiánytünet megszüntethető a mag közelébe adagolt foszfor tartalmú starter műtrágyával: jobbra starterrel kezelt növények hiánytünet nélkül, erősebb növekedéssel (Fotó: Prettl N.).

A starter műtrágyázás hatékonyságával kapcsolatban megoszló tudományos vélemények:

- A starter műtrágya terméshozadék hatása függ a kukorica hibridtől, következésképp a nemesítésnek fontos jövőbeli szerepe lehet. Gordon és Pierzynski (2006) USA-ban, Kansas Scandiában, meleg kontinentális klímán, homokos vályog talajon, alacsony humusz és foszfor-ellátottság mellett, Roller et al. (2022) Németországban, Hohenheimben és Eckartsweierben mérsékelt óceáni klímán, megfelelő vagy magas P ellátottság mellett, míg Teare és Wright (1990) USA, Floridában, meleg óceáni klímán, homokos vályog talajon, gyenge P ellátottság mellett jutottak erre a megegyező következtetésre.

- A starter trágya elhagyása csökkenti a kukorica korai növekedését és biomasszáját, azonban a termésére általában nincs hatással. Bermudez és Mallarino (2002) USA Iowa területén, meleg kontinentális klímán, 11 farm kísérlete alapján, Bullock et al. (1993) USA, Illinois, Urbana településen, meleg kontinentális klímán, iszapos agyagos vályog talajon, gyenge P ellátottság mellett végzett kísérlete alapján, míg Roller et al. (2022) Németországban, Hohenheimben és Eckartsweierben mérsékelt óceáni klímán, megfelelő vagy magas P ellátottság mellett végzett kísérlete alapján mindhárman az említett következtetésre jutottak.

- Bundy és Widen (1992), USA, Wisconsin, Arlington területén, mérsékelt kontinentális klímán, iszapos vályog talajon, hároméves kísérletükben no-till és hagyományos művelésű, különböző vetésidőjű kísérletükben megállapították, hogy a starter műtrágya 24-ből 20 esetben növelte a kukorica termését és 24-ből 19 esetben volt profitábilis. Az alapműtrágyázás mennyiségéről azonban nincs megfelelő információ a cikkben.

- A starter műtrágya használata gazdasági megtérülést okozott Bundy és Andraski (1999) 30 USA államban, 64 farmon végzett néhol többéves kísérletében.

- Vetsch és Randall (2002) USA, Rochester NY területen, mérsékelt kontinentális klímán, iszapos vályog talajon, magas P ellátottság mellett megállapították, hogy az USA Corn Belt északi részén, talajművelési rendszertől függetlenül, a starter műtrágya használata megfontolandó 30 mg/kg Bray P és 150 mg/kg kicserélhető K értékek alatt.

- Kaiser et al. (2005) USA, Iowa, Maryland, Carolina, államokban meleg kontinentális klímán, 5-77 mg/kg Bray-P tartalmú talajokon négy évig végzett kísérletek alapján megállapították, hogy az alap (talajfelszínre szórt) NPK műtrágyázás mellett használt vetéssel egyenletben talajba juttatott starter műtrágya nem növelte a növények termését. A két műtrágyázás kombinációja egyik esetben sem növelte jobban a növények kezdeti növekedését, mint valamelyik műtrágyázás önállóan alkalmazva. A két műtrágyázási típus néhány helyszínen hasonló termésmennyiséget eredményezett, annak ellenére, hogy a starter műtrágya a tápanyagok egynolcadát tartalmazta az alapműtrágyázáshoz képest.

- Kaiser et al. (2016) USA, Minnesota, Lamberton és Waseca településeken, vályog és agyagos vályog talajokon 10-23 mg/kg Bray-P tartalom mellett, különböző kukorica hibridekkel és vetésidővel három évig végzett kísérletek alapján megállapították, hogy a starter műtrágyázás növeli a kukorica növények kezdeti magasságát, korábbi virágzást eredményez és csökkenti a kukorica betakarításkori szemnedvesség tartalmát. A növénymagasságot leginkább a korai vetéssel együtt növeli. A starter műtrágyázás valószínűleg nincs hatással a kukorica betakarításkori biomassza tömegére és termésére a közepes és magas P tartalmú talajokon. A kísérletekben alapműtrágyaként 157 kg/ha nitrogén műtrágyát használtak P kijuttatás nélkül.

- Preston et al. (2019) USA, Kansas, Scandia és Ottawa területeken, meleg kontinentális klímán, iszapos vályog talajokon, alacsony P ellátottság mellett 10 éves kísérlet eredménye alapján megállapították, hogy a starter műtrágya az alacsony P ellátottságú talajon növeli a kukorica termését. A kísérletben szereplő scandiai terület not-till és öntözött, az Ottawa-i hagyományos művelésű és öntözetlen.

- Blandino et al. (2022) Olaszországban, Carmagnola településen, meleg óceáni klímán, háromféle talajon és háromféle P-ellátottság mellett végzett 4 éves szabadföldi kísérletükben megállapították, hogy a starter műtrágyák közül minden talajon hatékonyabb a nitrogént és foszfort együttesen tartalmazó készítmény, mint amely csak egy tápelemet tartalmaz. A kukorica termése minden esetben növekedett a starter műtrágyázás hatására, azonban az alapműtrágyázás mennyiségéről nincs megfelelő információ a cikkben.

- Geist et al. (2023) Németországban, Wanna településen, mérsékelt óceáni klímán, gyengén iszapos homoktalajon, magas P-ellátottság mellett végzett kísérletük alapján megfogalmazták, hogy magas felvehető P tartalom mellett a foszfor starter műtrágya használata nem javasolt, helyette inkább kombinált mikrobiális oltás ajánlott a termésmenvelés érdekében.

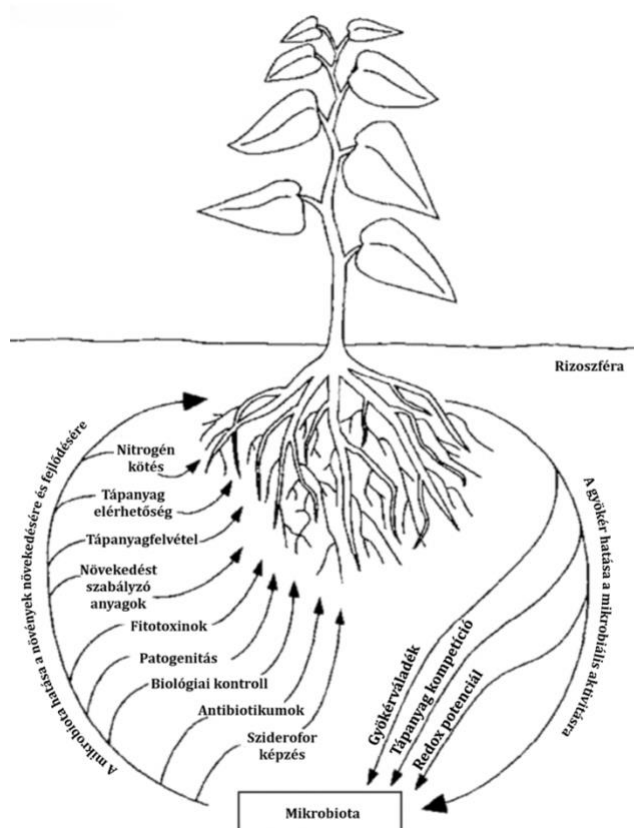
- Dorissant et al. (2025) USA, Dél-Dakotában, három helyszínen, Brookinsban, South Shore-ban és Bresford településeken, meleg és mérsékelt kontinentális klímán, iszapos és agyagos vályogtalajokon három évig végzett kísérletekben megállapították, hogy a növények vetési ideje nem befolyásolta a starter műtrágyázás hatását. A starter műtrágya következetesen növelte a kukorica korai fejlődési paramétereit, azonban ezek az előnyök nem jelentek meg a teljes szezonális szárazanyag termelés, tápanyagfelvétel és termés növekedésében. Véleményük szerint a starter műtrágya használata nem szükséges az adott régióban, amikor a talaj P szintje eléri vagy meghaladja a kritikus P szint értéket (Bray-1 P: 12-58 mg/kg).

A talajtípus hatását ezekből az eredményekből nehéz megállapítani, viszont érzékelhető, hogy a starter termésmenvelő hatása inkább az alacsonyabb P ellátottsághoz kapcsolódik.

2.1.3. Talaj-mikroba-növény kölcsönhatások jelentősége

A Földön becslések szerint több mint százezer baktériumfaj található, melyeknek csupán 3-10%-a azonosított vagy tanulmányozott. A gyökérzónában található baktérium nemzetségek, melyek a növénynövekedésre előnyös tulajdonsággal rendelkeznek: *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Streptomyces spp.* (Dimkpa et al., 2009; Gray és Smith, 2005). Tápanyagszegény környezetben a növények által felvett nitrogén és foszfor túlnyomó többségét a mikrobák biztosítják (Van Der Heijden et al., 2008). A talajban lévő mikroorganizmusok hasznos tulajdonságai és funkciói az agrárökoszisztémákban széles körben kutatott téma, amelyet a következőképpen foglalhatunk össze (4. ábra):

- oldhatatlan szerves tápanyagformákat mobilizálnak, főként ásványi foszfátot
- szerves maradványokat bontanak és tápanyagokat szabadítanak fel
- növény növekedés szabályzó anyagokat termelnek, mint az auxin, abszcizinsav, citokininek, etilén és gibberellinek
- tápanyagfixálásra is képesek, szimbiotikus nitrogén kötők például *Rhizobiumok*, *Bradyrhizobiumok*, *Azorhizobium*, *Allorhizobium*, *Sinorhizobium* és *Mezorhizobium*, míg szabadonélő nitrogénkötők az *Azotobacterek*, *Azospirillumok*, *Enterobacterek* és *Pseudomonasok*
- javítják a talaj aggregátum szerkezetét és vízgazdálkodását
- segíthetik a növényvédőszer bomlását és toxikus nehézfémeket köthetnek meg
- a növényi növekedés serkentését a növénypatogének kontrollálásával, például sziderofor és antibiotikum termelésükkel is segíthetik, továbbá rezisztenciát indukálhatnak a növényekben (Andreatta et al., 2024; Hayat et al., 2010; Kennedy et al., 2004; M. Kumar et al., 2020; Matics és Biró, 2015).



4. ábra: Növény-mikroba kölcsönhatások melyek befolyásolják a növénynövekedést (Kennedy et al., 2004).

Baktériumok mechanizmusai a növények nitrogén ellátására:

- biológiai nitrogénkötés és annak biztosítása a növény számára
- talajban lévő szerves nitrogénformák mobilizálása
- oldható nitrogénformák megkötése, később elérhetővé tétele
- növényi gyökérrendszer erősítése auxin termeléssel
- a növényi etilénszint szabályozása ACC deamináz enzim termelésével (Kumar et al., 2020)

Baktériumok mechanizmusai a növények foszfor ellátására:

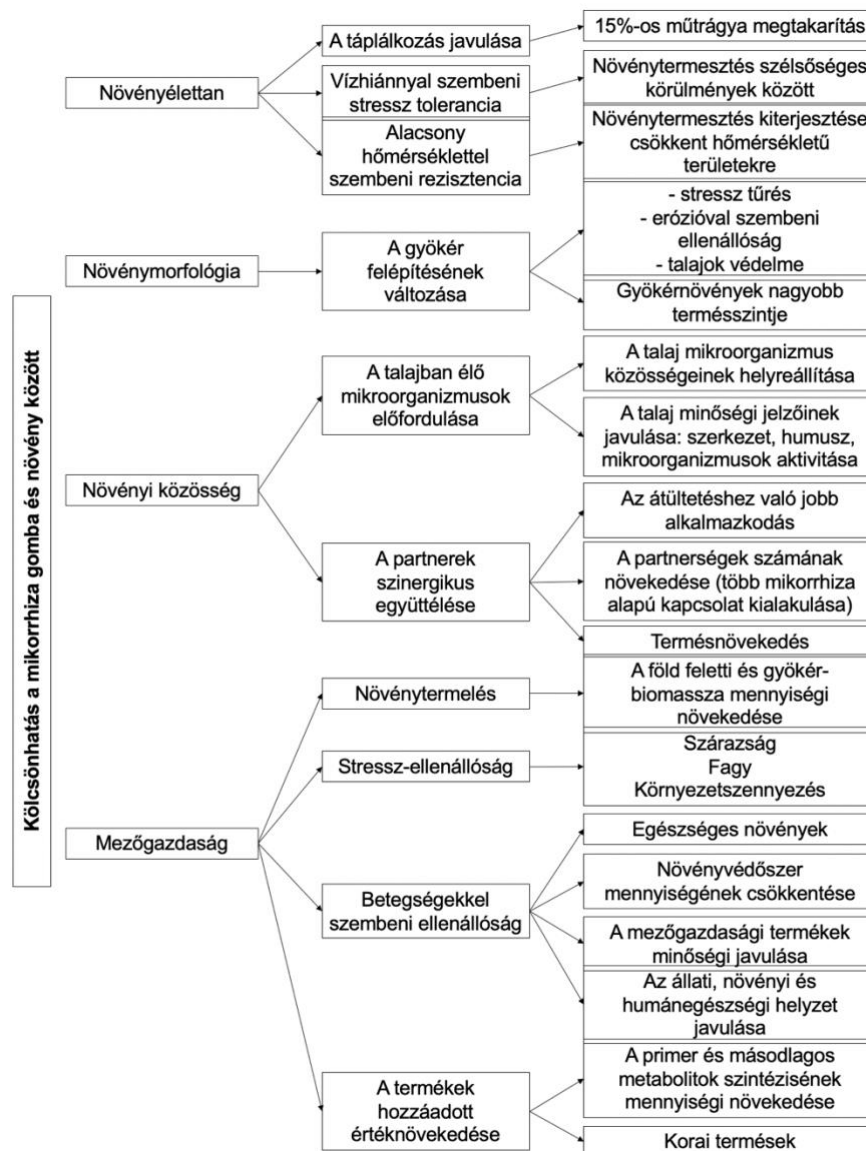
- szerves vagy szervetlen foszfor mobilizálása például: *Streptomyces sp.*, *Agrobacterium sp.*, *Azospirillum brasilense*, *Bacillus sp.*, *Arthrobacter sp.*, *Enterobacter*, *Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Nitrosomonas sp.*, *Nitrobacter sp.*, fajok által, melyek közül a legfontosabbak a *Pseudomonas* és a *Bacillus* törzsek (Kumar et al., 2020; Sharma et al., 2013).
- pH csökkentése, szerves savak termelése
- ACC deamináz enzim termelése, szideroforok termelése (Glick, 2012; Gyaneshwar et al., 2002)
- foszfatáz enzim termelése (Kumar et al., 2020)

A talajmikrobák hiányában a tápanyagfelvétel sokkal lassabb lenne, mivel a szerves és nehezen hozzáférhető ásványi tápanyagok mobilizációját, felvehetővé alakítását a mikrobák enzimtermelésükkel végzik, és aktivitásuk függ a talaj víztartalmától, hőmérsékletétől és levegőzöttségétől (Miller és Cramer, 2005). A műtrágya használat a tápanyagfelvételi folyamatokat gyorsítja, de önmagában csak egy bizonyos határig lehet hatékony, hiszen a mikrobiális aktivitást nem támogatja. Ellenben az állati trágya kijuttatása általánosságban növeli a talajok mikrobiális aktivitását (Csitári et al., 2021; Kennedy et al., 2004), továbbá a gazdag vetésforgó és nagymennyiségű növénymaradvány, növényi borítottság szintén növelik a mikrobiális biomassza mennyiségét (Gangwar et al., 2019; Moore et al., 2000). A változatos vetésforgó használata mellett a talajok szerves anyagainak növelése alapvető stratégia a megfelelő mikrobiális összetétel szempontjából. A szerves anyagok szubsztrátot szolgáltatnak a mikrobáknak, javítják a talaj fizikai féleségét, víztartását, tápanyag szolgáltatását. A hagyományos talajműveléshez képest kímélő művelés és agrotechnika alkalmazása szintén növeli a talajok mikrobiológiai aktivitását, szervesanyag tartalmát és tápanyagszolgáltató képességét (Nugroho et al., 2023b). Azonban a műtrágya kijuttatás csökkenti a mikrobiális biomasszát és negatívan befolyásolja a talaj mikrobiális összetételét (Balla Kovács et al., 2024). Tufail et al. (2022) metaanalízisükben megállapították, hogy vízhiányos körülmények között mind a baktérium mind a gomba készítményekkel történő oltások serkentik egyaránt a C4 és C3-as növények növekedését. A használt oltóanyagok akár PCR technikával nyomon követhetők, fennmaradásuk ellenőrizhető kijuttatásuk után (Mosimann et al., 2017).

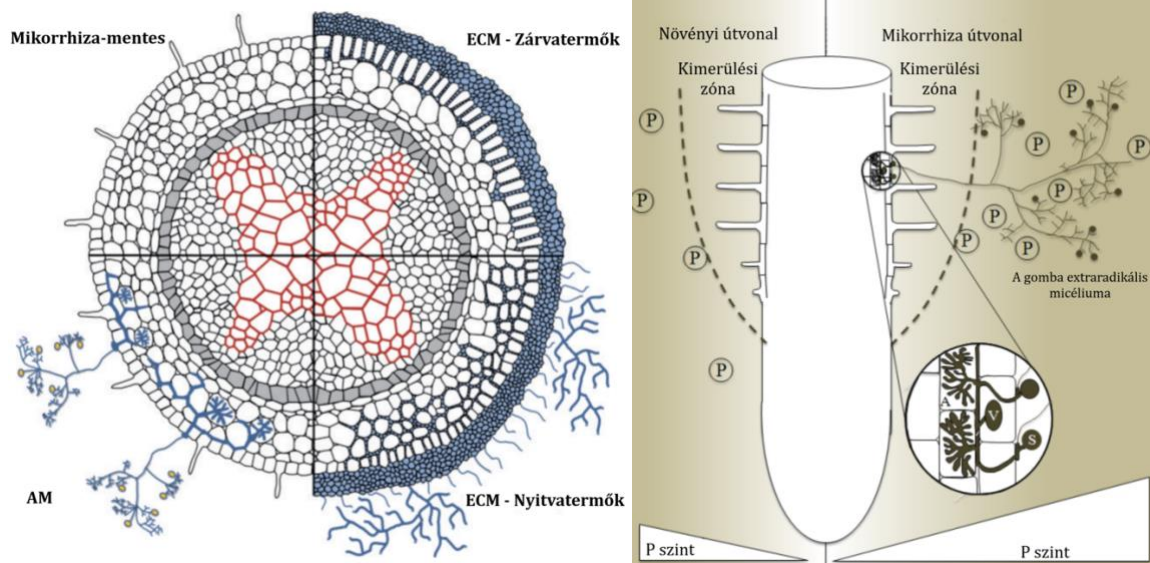
A mikorrhizagomba-növény szimbiózis 400 – 450 millió évre vezethető vissza és a többségük kölcsönösen előnyös a partnerek számára (5. ábra). Összehasonlításképpen a nitrogén kötő baktériumokkal létrejött szimbiózis sokkal később, körülbelül 60 millió évvel ezelőtt alakult ki és egy növényi családot érint. A mikorrhiza gombáknak több fajtája van, a gyakoribb arbuskuláris mikorrhiza (AM) és ektomikorrhiza (ECM), melyek a szerkezeti felépítésükben és kapcsolatra képes fajokban különböznek egymástól. Az AM esetében a gombák behatolnak a növényi gyökérsejtekbe, míg az ECM esetén csak a sejtek közötti térbe (Bucking et al., 2012) (6. ábra).

A natív arbuskuláris mikorrhiza gombák, így az ezeket tartalmazó fajok és törzsek, mint kereskedelmi oltóanyagok segíthetik a növények több mint 80%-ának a növekedését, beleértve a gazdasági takarmánynövényeinket is (Bucking et al., 2012; Xavier Martins, 2023), a káposztafélék körülbelül 70%-a kivétel (Nichols és Wright, 2004). Az oltóanyagok többsége gyorsan szaporodó és agresszíven infektáló endomikorrhiza fajokat tartalmaz. Ilyen például a *Glomus intraradices* (mai nevén – *Rhizophagus irregularis*), vagy a *Glomus etunicatum* (mai nevén – *Claroideoglomus*

etunicatum) mikorrhizagomba faj, amelyek nagyon gyakoriak a kereskedelmi készítményekben (Biró et al., 2016). Ellátják a növényeket tápanyagokkal köztük foszforral és nitrogénnel, növelik a tápanyagfelvételt, segítik a szárazságtűrést és együttműködnek más hasznos talajmikroorganizmussal (5. ábra). Cserébe a növények a fotoszintézisük során termelt szén 4-20%-át átadják a gombának. Szerepük felértékelődhet a növények stressznek kitett állapotában és a növényi növekedés különböző fázisaiban (Bucking et al., 2012; Xavier Martins, 2023).



5. ábra: A mikorrhiza gomba és növény közötti szimbiózis hatásai (Kátai, 2011).



6. ábra: Az arbuskuláris mikorrhiza (AM) és ektomikorrhiza közötti morfológiai különbség (bal oldal). A P felvétele a növény és a mikorrhiza (AM) által (jobb oldal) (Bucking et al., 2012).

A mikorrhiza gomba növényi foszforfelvételtre gyakorolt hatásai Bucking et al. (2012) szerint a következők:

- A növényi gyökereknél nagyobb talajtérfigatát hálóznak be a gombahifák, melyek P-t szállítanak a növénynek
- A kis hifaátmérő, mely lehetővé teszi az apró talajszemcsék közti behatolást és P elérést
- A mikorrhiza gomba a P-t polifoszfát formában tárolja, mely javítja a P szállítást a koncentrációkülönbség miatt
- A gomba savas foszfátot és szerves savakat termel, melyek mobilizálják a szerves komplexeket

A mikorrhiza kapcsolat csökkenti a növényi patogének, főleg a patogén gombák mennyiségét, javítja a növény védekezési mechanizmusait, továbbá a nehézfém szennyezett talajokban felveszi a kadmiumot és ólmot megvédve tőlük a növényeket és az élelmiszereket. Elősegíti a vízálló aggregátumok kialakítását, javítva ezzel a talajszerkezetet, illetve javítja a talaj mikrobiális összetételét a gyökerek exudátum termelésének serkentésén keresztül (Nichols és Wright, 2004).

Biró et al. (2016) *Tagetes patula* dísznövény foszforfelvételét vizsgálták mikorrhiza oltással és különböző oldhatóságú foszforformák kijuttatásával. Megállapították, hogy a könnyen felvehető foszforformák hasznosítását nem, de a nehezebben felvehető foszforvegyületekét a mikorrhiza kezelés javítja. A foszfor felvétel szempontjából is fontos lehet a talaj víztartalmának

optimalizálása, ami a gombák esetében a teljes szabadföldi vízkapacitás 60%-ánál javasolt (Borowik és Wyszowska, 2016).

Clark et al. (2024) vizsgálatai alapján a gomba hifák folyadékszállítása mikrofluidikus eszköz és fluoreszcint tartalmazó táptalaj kombinációjával, fluoreszcens mikroszkópiával meghatározható és számszerűsíthető. Méréseik szerint a gomba hifa folyadékszállítása még dinamikusabb, mint eddig gondolták és sejtszinten kétirányú is lehet. A hifák általi folyadékszállítás valószínűleg összefüggésben áll a hifák növekedésével és a hálózat fejlődésével. A folyadékmozgást befolyásoló biotikus és abiotikus paraméterek vizsgálata a jövőben elengedhetetlen lépés a gombák folyadékszállításának megértése érdekében, melyhez ez a módszertan lehetőséget biztosít. Továbbra sem tisztázott, hogy a gomba hifa folyadékszállítása fajspecifikus-e és a tömegáramlásnak vagy egy szabályozható képességnek köszönhető (Clark et al., 2024). A gomba hifa nem csak tápanyagok szállítására képes, hanem kommunikációs csatornának is tekinthető a növények között. Amennyiben az egyik növényt patogén támadás éri, a hifán keresztül jelzés érkezik a másik növényhez, mely a védekező mechanizmusait aktiválhatja, mielőtt őt is elérné a kórokozó (Song et al., 2010).

A mikorrhiza gomba hatását befolyásolhatja, hogy a főnövényre C3 vagy C4 típusú fotoszintézis jellemző. A C3-as növények kevésbé jól reagálnak a mikorrhiza szimbiózisra, mint a C4-es növények (Treseder, 2013), azonban a C3-as növények is reagálhatnak magasabb P-felvétellel és biomasszával a magasabb mikorrhiza diverzitásra (Frew, 2019). (Chandrasekaran et al., 2016) vizsgálataikban megállapították, hogy szikes talajokon a mikorrhiza C3 és C4 növényekben is segíti a növény-növekedést és tápanyagfelvételt. *Funneliformis mossae* inkább a C3, míg a *Rhizophagus fasciculatus* inkább C4 növényekkel hatékony. Megfigyelték továbbá, hogy a szimbiózis hatékony alacsony és magas sótartalomnál, míg legkevésbé hatékony mérsékelt sótartalom esetén. A jövőben fontos kutatási irány lehet, hogy a C3 növények közül az évelők és a C4 egynyári növények esetén miért kevésbé hatékony a szimbiózis és miért hatékonyabb a C4 növények esetében a versenyképes K^+ ion felvétel (Chandrasekaran et al., 2016).

A növények mikorrhiza függősége fordítottan arányos a gyökérmorfológiával, mint a gyökerek hossza, száraz tömege, a hajszálgökerek hossza és sűrűsége, mely paraméterek a növények nemesítése során javulhatnak (Tawaraya, 2003). Turrini et al. (2005) vizsgálatai alapján kimutatták, hogy bizonyos transzgenikus növények gyökérváladékai csökkenthetik a mikorrhiza gomba hifa növekedését a nem transzgenikus növényekhez képest. A növényi fajták mikorrhiza fogékonyságával kapcsolatban Londoño et al. (2019) végzett kísérletet, melyben egy tájfajta, kettő konvencionális hibrid és a két hibrid genetikailag módosított változatának mikorrhiza kapcsolatát vizsgálták. A genetikai módosítás nem, de a genotípus befolyásolta az oltás hatékonyságát, a tájfajta esetén volt a legerősebb a szimbiózis, míg a hibridek esetén változó volt annak mértéke.

An et al. (2010) 141 beltenyésztett vonal, 38 hibrid és 76 tájfajtával végzett kukorica kísérletek alapján megállapították, hogy a modern növénynevelés nem feltétlenül jár együtt a mikorrhiza kolonizáltság csökkenésével.

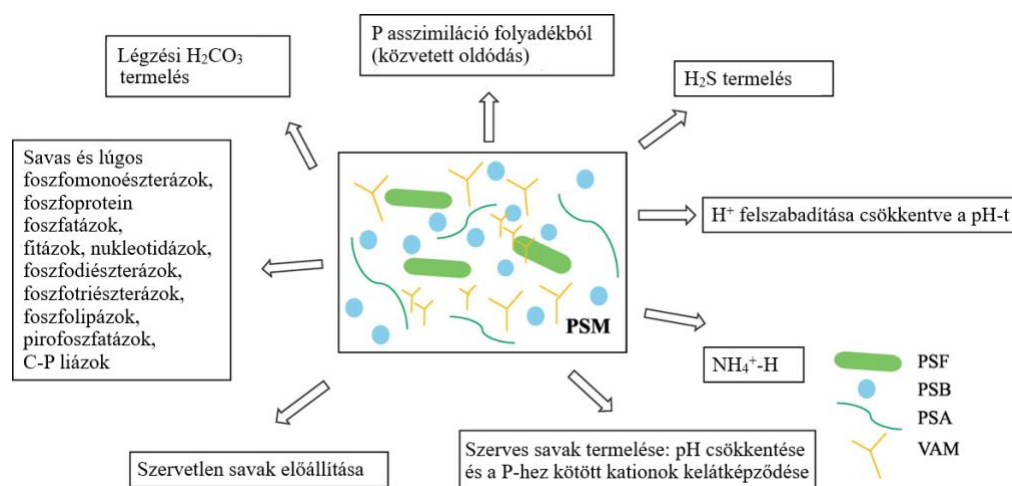
A növényi gyökerek kolonizáltságának mérése többféle mikroszkópos vizsgálati módszerrel történhet (Giovannetti és Mosse, 1980; Kabalan et al., 2022; László et al., 2019; McGonigle et al., 1990). Treseder (2013) metaanalízis vizsgálata alapján a gyökérkolonizáció mértékének növekedésével a növények növekedése és P-tartalma gyakran növekszik, azonban a kolonizáltság adatok szórása magas.

Sasvári et al. (2012) hosszú időtartamú monokultúras termesztésből és különböző vetésciklusú rendszerekben vizsgálták a talaj mikorrhiza gomba összetételét és a különböző növényi gyökerek gomba kolonizáltságát és megállapították, hogy az 50 éves kukorica monokultúra is jelentős mikorrhiza állománnyal rendelkezik, de összetétele jelentősen eltér az egyéb kultúrák mikorrhiza gomba összetételétől, továbbá a pillangós növények jelenléte is befolyásolja a gombafaj összetételét. A kolonizáltság és a mikorrhiza gombák spóra vizsgálata a mikorrhiza fajokról nem adnak teljes információt, hiszen vannak fajok melyek nem sporulálnak, ezért a gombaközösség azonosítását csak molekuláris módszerekkel lehet vizsgálni (Sasvári et al., 2012).

A talajba szúrt elektród és a növényre helyezett elektród közti elektromos kapacitás (gyökérkapacitás) mérése szintén alkalmas lehet a növényi gyökerek mikorrhiza gomba általi kolonizáció mértékének megállapítására (Cseresnyés et al., 2016b; Dalton, 1995). Kukorica növény esetében szignifikáns pozitív a korreláció, a mért gyökérkapacitás értékek és a kukorica gyökérfelülete, illetve gyökértömege között (Chloupek, 1972). A gombák kolonizációja nem váltja ki a gyökérfelület növekedését, hanem a gyökérkapacitás valószínűleg a gomba hifák által okozott megnövekedett abszorpciós felületet jelzi. A módszer alkalmas lehet a kolonizáció in situ vizsgálatára (Cseresnyés et al., 2013). A gyökérkapacitás a szántóföldi növényeknél növekszik a virágzásig, azután csökkenni kezd (Cseresnyés et al., 2018). Kísérletekben megfigyelték, hogy száraz talaj esetén az elektromos áram pontosabban halad a gyökéren keresztül, mint nedves talaj esetén, tehát a talajnedvesség befolyásolja a mérés pontosságát, illetve megnehezíti a különböző időpontokban, eltérő talajnedvesség mellett történő mérések összehasonlítását (Gu et al., 2021). A módszer alkalmas továbbá fajtaspecifikus jellegek in situ monitorozására, így fajtaválasztásra, stressz ellenálló képesség és a biomasszában történő változások nyomon követésére, szemtermés előrejelzésére (Cseresnyés et al., 2016a, 2022). Cseresnyés et al. (2016b) szójakísérletekben igazolták, hogy a gyökérkapacitás csökkenés $\pm 5\%$ -os pontossággal jelezte a hajtástömeg és levélfelület csökkenést minden vizsgált fajtánál, illetve megállapították, hogy a gyökértömeg csökkenés lényegesen kisebb is lehet, mint a gyökérkapacitás csökkenése.

2.1.4. A mikrobiális tápanyagmobilizás hatásmechanizmusai

A foszfátoldó mikroorganizmusok széles körben ismertek, a pontos működési mechanizmusuk nem teljesen tisztázott. A lehetséges módokat a 7. ábra mutatja, beleértve a mikrobák által termelt exudátumokat. Az ásványi foszfátok oldásának fő mechanizmusa a szerves savak termelése, amelyben a foszfatáz enzimek kiemelt fontosságúak. Az oldhatatlan foszfor formák közé tartoznak többek között a trikálcium foszfát (Ca_3PO_4), az alumínium-foszfát (Al_3PO_4) és a vas-foszfát (Fe_3PO_4) (Behera et al., 2014; Khan et al., 2014; Zhu et al., 2018). Li et al. (2015) kísérletükben igazolták, hogy *Aspergillus niger* baktérium képes volt oldani különböző foszfátokat (Ca-P, Mg-P, Al-P és Fe-P) főként oxálsav termelésén keresztül, míg a nyers-foszfát (rock phosphate) oldását borkősav kiválasztásával, többféle talajtípuson is ellátta.



7. ábra: A kötött foszfor lehetséges oldási mechanizmusai foszfátoldó mikroorganizmusok (PSM) által. PSF: foszfátoldó gomba, PSB: foszfátoldó baktérium, PSA: foszfátoldó aktinomicéta, VAM: vezikuláris-arbuszkuláris mikorrhiza (Zhu et al., 2018).

Az növények számára oldhatatlan szervetlen foszfátok oldása történhet szerves savak termelésével, mint a citromsav, glükonsav, oxálsav és borkősav. A savak a foszfátokhoz kötött kationok kelátképzésével, a pH csökkentésével, a foszfátokhoz kötött fémionok komplexképzésével vagy a foszfor adszorpciós helyeinek elfoglalásával oldhatják a foszforformákat. A szerves savak termelése protonok termelésével jár, mely csökkenti a pH-t (Kishore et al., 2015; Rawat et al., 2021). A felszabaduló protonok mennyiségét befolyásolja továbbá a mikroorganizmusok által használt nitrogénforrás típusa. Amennyiben az NH_4^+ a fő nitrogénforrás, akkor magasabb az oldott P mennyisége és a pH csökkenés mértéke. Egyes mikroorganizmusok esetén az ammónium által kiváltott protonfelszabadulás az egyetlen foszfor oldó mechanizmus, míg másoknál nem lehet a szerepét kimutatni. Szervetlen savak is képesek kisebb mennyiségű szervetlen P oldására, például a *Nitrosomonas* és *Thiobacillus* esetén termelt

H₂SO₄ és HNO₃. Néhány baktérium termelhet H₂S-t, mely reakcióba lép vas-foszfáttal, melynek során vas-szulfát és P képződik (Kishore et al., 2015).

A biofilmképzés és stressz miatt a mikrobák által termelt magas molekulatömegű exopoliszacharidok (EPS) is szerepet játszanak a foszfor mobilizálásában. Yi et al. (2008) kísérletükben kimutatták, hogy a baktériumok melyek EPS-t termelnek, magasabb P-oldási képességgel rendelkeznek, mint az EPS-t nem termelők. A termelt EPS és a szerves sav szinergista hatása függ az EPS koncentrációjától. A szideroforok, melyek kis molekulatömegű nagy affinitású vas-kelátképző vegyületek, szintén szerepet játszanak a foszfor mobilizálásában. A szideroforokat növények és szinte az összes mikroorganizmus termeli vashiány esetén. Körülbelül 500 sziderofort ismerünk, melyek alapvető szerepe, hogy segítse azon mikroorganizmusok kompetícióját, melyek a növényi betegségek biokontrolljában és a növekedésserkentésben fontosak (Crowley, 2006). A szideroforok a talajban lévő Fe-P komplexekben lévő vas tartalmával képezhetnek kelátokat, így javítva a foszfátoldást, azonban a mechanizmus jelentőségének megítélése érdekében további vizsgálatok szükségesek (Rawat et al., 2021).

A talajban lévő foszfor körülbelül 15-80 %-a szerves foszfor, melynek mobilizálására a mikroorganizmusok általában enzimeket termelnek (Kumar és Shastri, 2017). A legfontosabb enzimek a foszfomonoészterázok (savas és lúgos foszfátáz), a fitázok és a C-P liázok. A szerves vegyületek foszfoésztereinek vagy foszfoanhidrid kötéseinek defoszforilációját foszfátázok katalizálják. A fitázok katalizálják a fitátvegyületekből történő foszforfelszabadítást, míg a C-P liázok segítik a szerves foszfor C-P kötéseinek felbontását (Rawat et al., 2021; Sharma et al., 2013). Genetikai kutatások szerint néhány gén irányítja a foszformobilizálást, melyek akár átvihetők egyik mikroorganizmusról a másikra, így fokozva az agráriumban felhasznált oltóanyagok hatékonyságát (Sharma et al., 2013).

A levegő nitrogénjének megkötésére a baktériumok és az algák viszonylag kis csoportja képes. A nitrogénkötők élhetnek szimbiózisban a növényvel, mely két csoportra jellemző. A *Rhizobium* baktériumok és a pillangósvirágúak családjába tartozók között jöhet létre, illetve a cianobaktériumok és a moszatpáfrányfélék családjába tartozók között. A nitrogénkötők továbbá lehetnek szabadon élő és nem szimbiotikus nitrogénkötők, melyek elsősorban a talaj és gyökér közötti térben élnek, de behatolhatnak a gyökerek belsejébe is. A szabadon élő nitrogénkötők, mint az *Azospirillum*, *Herbaspirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bulkolderia* a rizoszférában, valamint endofitaként többek között a búzában, rizsben és kukoricában fordulnak elő (Alomari et al., 2024; Ladha et al., 2022). A N₂ fixációt a nitrogenáz enzim katalizálja, mely egy enzimkomplex, ami két fém komponenssel alkot komplexet (dinitrogenáz MoFe és dinitrogenáz reduktáz). Az enzimet és a nitrogénkötésben résztvevő számos szabályzó fehérjét a *nif* gének kódolják (Soumare et al., 2020). A nitrogenáz enzim O₂ érzékeny, ezért az aerob nitrogén

kötőknek anaerob mikrokörnyezetet kell teremteniük a megfelelő működésükhöz (Nonaka et al., 2019). A sejten belüli alacsony oxigénszint eléréséhez az *Azotobacter* baktériumok erős légzési rátát alkalmaznak, illetve megváltoztathatják a nitrogén konformációját, így védett és inaktivált állapotban tartva azt (Soumare et al., 2020).

A tápanyagmobilizáló mikroorganizmusok képesek különböző hormonok és vitaminok termelésére, melyekkel fokozzák a növények növekedését, gyökérfejlődését, így a tápanyagfelvételüket is. Ilyen növényi hormonok az indolecetsav, gibberellinsav, citokininek és etilén (Kishore et al., 2015; Rawat et al., 2021). Bader et al. (2020) vizsgálataikban kimutatták, hogy *Trichoderma* gombák indolecetsavat termeltek és foszfort mobilizáltak, míg Guasin et al. (2015) baktériumok esetén jutottak hasonló következtetésre. A növények stressz esetén (szárazság, elárasztás, sóstressz, patogének, szennyezések) általában etilént termelnek, mely csökkenti a növényi növekedést. Ilyenkor bizonyos baktériumok csökkenthetik az etilénszintet az általuk termelt ACC deamináz enzim segítségével, mely hasítja az ACC-t a növényekben az etilén közvetlen prekursorát (Gamalero és Glick, 2015; Glick et al., 1998). Összességében a tápanyagmobilizálás és a növényi növekedés serkentése, több hatásmechanizmus együttes eredményeként alakul ki.

2.1.5. A mikrobiális aktivitás indikátorai, a talajenzimek

A talaj enzim aktivitások nagyon érzékeny, gyorsan változó (hónapoktól 1-2 év) indikátorai a talajt érő mind természetes, mind mesterséges hatásoknak, valamint a tápanyag-szolgáltató képességnek (Alkorta et al., 2003; Kaur et al., 2020; Kumar et al., 2013). A talajban lévő mikrobák fontos jellemzői: aktivitás, biomassza, összetétel, diverzitás (Szili-Kovács et al., 2011). A talajban lévő foszfatázok (PHO) széles körben tanulmányozottak, mert a növények és mikrobák által felvehető foszfát felszabadításában, a foszfor körforgásban vesznek részt (Nannipieri et al., 2011; Adetunji et al., 2017). Míg a savas foszfatázt a növényi gyökerek és a mikroorganizmusok termelik, addig az alkalikus foszfatázt csak a mikroorganizmusok (Spohn és Kuzyakov, 2013). A gombák többségében savas foszfatázt, a baktériumok többségében alkalikus foszfatázt termelnek, de a baktériumok közül számos mindkettő termelésére képes (Dotaniya et al., 2019). Spohn et al. (2015) árpával végzett kísérletükben megállapították, hogy a savas és alkalikus foszfatáz mennyiségét is csökkentheti foszfor műtrágyázás mértéke. Továbbá, foszfor műtrágya hatására a savas foszfatáz inkább a gyökérmentes talajban csökken, a rizoszférában kevésbé, míg az alkalikus foszfatáz a gyökérmentes talajban kevésbé csökken, a rizoszférában nagyobb mértékben. A vizsgálatból az is kiderült, hogy az árpa növények rizoférájában a savas foszfatáz elhelyezkedése és a baktériumok gyűjtőhelye térben elkülönül egymástól. Margalef et al. (2017) szerint a szerves P mennyiségéből lehet a legerősebben következtetni a foszfatáz aktivitás

mennyiségére, de a teljes nitrogén, a klimatikus viszonyok és a talajtípus is jelentős befolyásoló tényezők. Iyyemperumal és Shi (2008) kísérlete alapján a nitrogén műtrágyázás növeli a PHO aktivitást. Kalembasa és Symanowicz (2012) kísérlete alapján a komplex műtrágyázás növeli a PHO aktivitást. Margalef et al. (2021) metaanalízis vizsgálatukban részletesebb megállapítást tesz, miszerint a N műtrágyázás növeli, a P műtrágyázás csökkenti a foszfatáz enzim aktivitást. Dodor és Tabatabai (2003) vizsgálatai szerint a különböző vetésforgók is eltérően befolyásolják a foszfatáz mennyiségi alakulását.

A dehidrogenáz enzim (DHA) minden élő sejtben megtalálható, a talaj mikrobiális aktivitásának jó indikátora (Garcia et al., 1997; Järvan et al., 2014), a mikrobák anyagcsere állapotának mérésére, az életképes, ép mikrobák meghatározására használható, extracellulárisan nincs jelen (Kumar et al., 2013; Watts et al., 2010). A dehidrogenáz aktivitás a talaj azonnali, vizsgálat időpontjában mért állapotát mutatja. A talaj nedvességtartalma és hőmérséklete közvetett módon befolyásolja a dehidrogenáz aktivitást, mivel hatással van a talaj oxidációs és redukciós állapotára, a dehidrogenáz aktivitás erősen korrelál a redoxpotenciál és oxigén diffúzió értékével (Brzezińska et al., 1998). Érzékeny indikátora a talajba került szervesanyagok szennyezőknek (Wilke, 1988), azonban gyenge vízellátottság mellett kevésbé érzékeny a talajművelési gyakorlatok megváltozására (Nugroho et al., 2023a). Kukorica hibridtől függően az *Azotobacter* oltás növelheti a talajok dehidrogenáz enzim aktivitását, és szintén hibridektől függően növelheti a növények termését (Wani et al., 2016).

A β -glükozidáz enzim (GLÜ) a szén ciklushoz kapcsolódik, a cellobiózt alakítja glükózzá, irodalmi adatok alapján fontos indikátora a talajművelési hatásoknak is (Almeida et al., 2015; Bandick és Dick, 1999). Az enzim hatása alapvető fontosságú a szerves vegyületek bontásában és a molekulaméret csökkentésével hozzájárul a további mikrobiális enzimaktivitáshoz (Sardans et al., 2008). A β -glükozidáz érzékeny a talaj pH változására és az extrém magas talajnedvességre, ezért alkalmas indikátora a talajsavanyodásból következő ökológiai változásoknak (Kotroczó et al., 2022), továbbá sokkal aktívabb a felső talajrétegben (0-15cm), mint a mélyebbekben (Nugroho, 2024; X.-C. Wang és Lu, 2006). Befolyásolják a mennyiségét a talajba kerülő növénymaradványok a szervesanyag mennyisége és a talajművelés gyakorisága is (Adetunji et al., 2017; Nugroho et al., 2023a; Sinsabaugh et al., 2008). Turner et al. (2002) 29 féle talajon végzett vizsgálataik alapján megállapították, hogy a β -glükozidáz aktivitást a mikrobiális szén és a teljes szén mennyisége befolyásolja, továbbá a talaj agyagtartalma, mely fizikai védelmet biztosít a szervesanyagoknak, mikrobáknak, enzimeknek és tápanyagoknak. Kotroczó et al. (2014) kimutatták, hogy a talajban lévő növényi gyökerek hiánya jelentősen csökkenti mind a β -glükozidáz és foszfatáz enzimek aktivitását. A β -glükozidáz aktivitás pozitív korrelációt mutat a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságaival, így alkalmas lehet a talaj biológiai minőségének

megfigyelésére. Számos tanulmány kimutatta, hogy a különböző szerves anyagok talajba juttatása növelte a β -glükózidáz aktivitást, ezért az enzim megbízható talajminőség indikátorként szolgálhat (Adetunji et al., 2017).

Veres et al. (2015) szerint a foszfatáz és glükózidáz enzimek a könnyű szén frakcióhoz és annak elérhetőségéhez kötődnek, és a teljes széntartalomhoz kevésbé. Egyes enzimek aktivitásából azonban nehézkes talajfunkciókra következtetni. Ennek okai, hogy a talajfolyamatokban több enzim együttesen vesznek részt, a jelenlegi vizsgálatok potenciális és nem valós aktivitásokat határoznak meg, melyek között az összefüggés ismeretlen, az aktivitások jelentése ismeretlen, továbbá számos közvetlen és közvetett hatás befolyásolja az enzimaktivitások változását (Nannipieri et al., 2012).

2.2. Mikrobiális talajoltó készítmények hatása búzában és kukoricában

Az EU által támogatott BIOFEKTOR projektben 94 tenyészedényes és 47 szabadföldi kísérletet végeztek különböző klímájú területeken, Európában és Izraelben, melyek során többségében baktériumokat tartalmazó oltóanyagot használtak (Nkebiwe et al., 2024). Az eredmények szerint a terméshozadékreakciók függetlenek voltak az oltóanyag típusától a P-elérhetőségtől és talaj pH-jától. Az oltóanyag kategóriák melyek hatékonysága között nem találtak szignifikáns különbséget a következők voltak: önálló baktérium törzsek, önálló gomba törzsek (nem mikorrhizagomba), élő mikrobát nem tartalmazó kezelések, és a különböző kategóriák keverékei. A metaanalízis az összes eredményt tartalmazza, nem szelektálja a szignifikáns eredményeket, és megállapítása szerint az oltóanyagok kijuttatása a jövőben műtrágyát takaríthat meg, azonban hatékonyságuk függ a környezettől és a termesztési rendszertől. Az oltóanyagok hatékonysága erősebb, ha szerves trágyákkal kombinálják és gyengébb, ha a talaj tápanyagellátottsága magasabb (Nkebiwe et al., 2024). Rubin et al. (2017) metaanalízise feltárta, hogy jó vízellátottság esetén a PGPR baktériumokkal történő oltás átlagosan 19%-kal növelte a termést, míg száraz körülmények között 40%-kal. Az analízisben szereplő termésadatok 70%-a szabadföldi kísérletekből származott és a kísérletek 39%-a használt búza vagy kukorica tesztnövényt. Fulchieri és Frioni (1994) és Galindo et al. (2024) azt állapították meg, hogy a magas N-műtrágyázási szint csökkenthető, a növények nitrogén igénye részben kiváltható mikrobiális oltóanyag használatával, csökkentve ezzel a műtrágyázás okozta környezetterhelést.

A szakirodalom áttekintése alapján azonban elmondható, hogy kevés a baktérium oltóanyaggal végzett kísérlet Magyarországon és a tudományos irodalomban található más országokból származó eredmények sokszor egymással ellentétesek (1. táblázat). Ezt jól mutatja Caires et al. (2021) és (Galindo et al., 2024) kísérlete melyekben egymással ellenkező eredményekre jutottak azzal kapcsolatban, hogy kukoricában használt baktérium készítmény

hatékonysága szempontjából 240 kg/ha vagy 170 kg/ha az optimális kijuttatandó nitrogén hatóanyag (1. táblázat). A tudományos közlemények áttanulmányozása után sem egyértelmű az egyes készítmények esetében, hogy használatuk mely talajtípuson és éghajlaton, milyen talajadottságok és műtrágyázási szint mellett javasolt. Az eredmények sokfélék, ha áttekintjük az irodalmat akkor sem tudjuk meghatározni, hogy mikor, hol, mely termelési szinten, milyen oltóanyagot javasolt használni.

1. táblázat: A kukoricában és búzában használt baktérium oltóanyagok szabadföldi kísérletek irodalmi áttekintése, talajtípus, éghajlat és műtrágyázási szint ismeretében. A szignifikáns pozitív hatás félkövéren jelölve.

Helyszín és éghajlat (Köppen)	Talaj tulajdonságok és tápanyag-ellátottság	Műtrágyázás (kg/ha)	Alkalmazott törzsek	Baktérium oltás hatása a kultúrnövényre	Hivatkozás
Magyarország, Kiszombor, (Dfb)	pH 7,14; Humusz: 2,3%; P és K ellátottság: jó	N=251; P=100	<i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , és <i>Pseudomonas putida</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére	<i>Kálmán et al., 2024</i>
Kanada, Southwestern Ontario, Delhi, (Dfb)	pH 6,0-6,4; Humusz: 1,2%; vályogos homoktalaj	N=55, 110; P=20; K=110	<i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Azospirillum zeae</i> , <i>Sphingobacterium canadense</i> , <i>Burkholderia phytofirmans</i>	Kukorica termését nem befolyásolta az oltás és az oltás-műtrágyázás interakciója sem, továbbá nem hatott a növények magasságára és klorofill tartalmára	<i>Mehnaz et al., 2010</i>
Argentína, Pehuajó, (Cfa)	pH 5,8; Humusz: 3,2%; iszapos vályog, P ellátás alacsony	N=0, 90, 180; P=20	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére	<i>Di Salvo et al., 2018a</i>
Argentína, Coronel Pringles, Cfa)	pH: 6,2; Humusz: 4,2%, P ellátás alacsony	N=0, 45; P=0	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Az oltás nem okozott szignifikáns búza termésváltozást	<i>Naiman et al., 2009</i>
Argentína, Rio Cuarto, (Cwa)	pH:6,5; Humusz: 1,6%; homokos vályog; P ellátás alacsony	N:0	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azospirillum lipoferum</i>	Szignifikáns termésvnövekedés kukoricában	<i>Fulchieri és Frioni, 1994</i>
Argentína, Navarro, Villa Moll, (Cfa)	pH 6,1; Humusz: 3,9%; homokos vályogtalaj, P ellátás alacsony	N=0, 46	<i>Azospirillum brasilense</i>	Búza termését az oltás nem befolyásolta, de megváltozott a talaj mikrobiális összetétele	<i>Di Salvo et al., 2018b</i>
Brazília, Ponta Grossa, (Cfb)	pH:5,2; Szerves szén: 23,5; Oxisol talaj; P ellátás alacsony	Kukorica: N:0, 40, 80, 120; P:25-40, K: 100 Búza: N:0, 80, 160, 240, P:25-40, K: 100	<i>Azospirillum brasilense</i>	Termésvnövekedés kukoricában magas műtrágyázás esetén és búzában alacsony műtrágyázás esetén	<i>Caires et al., 2021</i>

Brazília, Selvária, (Aw)	pH: 5,4; Szerves anyag: 23 g/dm ³ , agyagos talaj P ellátás alacsony	N=0, 60, 120, 180, 240; P=98, K=56	<i>Azospirillum brasilense</i> <i>Bacillus subtilis</i>	Szignifikáns kukorica biomassza és termésnövekedés, leginkább az alacsony műtrágyázási szint esetén	<i>Galindo et al., 2024</i>
Brazília, Selvária, (Aw)	pH: 5,3; Szerves anyag: 24 g/dm ³ , agyagos talaj P ellátás alacsony	N=150; P=0, 17,5, 35, 70, 105	<i>Azospirillum brasilense, Bacillus subtilis, Pseudomonas fluorescens</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére, és foszforfelhasználásának hatékonyságára	<i>Pereira et al., 2020</i>
Olaszország, Alessandria, (Cfa)	pH 8.2; Humusz: alacsony; agyagos vályog talaj	P=161, N=63	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica növekedési paramétereire	<i>Berta et al., 2014</i>
Uttar Pradesh India, Uttar Pradesh, Uttarakhand és Haryana (Cwa, Cwb)	pH 7.59-7,76; SOC 0.35-0,42%; homok és vályog; alacsony P, megfelelő K ellátottság	N=0; P=0 N=70; P=11	<i>Pseudomonas jessenii, Pseudomonas synxantha</i>	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére	<i>Mäder et al., 2011</i>
India, Uttar Pradesh, Aligarh (Cwa)	pH 7,2; Szerves szén: 0.4%; homokos vályogtalaj mérsékelt P ellátottság	N=0; P=0	<i>Azotobacter chroococcum Penicillium variabile Bacillus sp</i>	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére, AMF gombával történő kombináció esetén is	<i>Khan és Zaidi, 2007</i>
Olaszország, Legnaro (Cfb)	pH:8,0; Szerves anyag:17g/kg, iszapos vályogtalaj; P és K ellátás alacsony	N=80, 120, 160; P:96; K:96	<i>Azotobacter vinelandii</i>	Baktérium oltás mikorrhiza oltással kombinálva nem befolyásolta a búza termését	<i>Dal Cortivo et al., 2018</i>
Magyarország, Csehország, Németország, Svájc, Olaszország, Dánia, Észak- Írország, Románia, Izrael	Egymástól jelentősen különböző	Különböző	Többféle, köztük: <i>Pseudomonas, Bacillus, Paenibacillus, Proradix, Azotobacter</i>	Paradicsom > kukorica > búza termését átlagosan 9,3%-kal növelte az oltás, de a különbség átlagosan nem szignifikáns	<i>Nkebiwe et al., 2024 (metaanalízis)</i>
Magyarország, Nyírbátor (Dfb)	pH:4,33, humusz: 0,645%; homoktalaj	N=0, P=0	<i>Azotobacter chroococcum Bacillus megaterium</i>	Silókukorica zöldtömege jelentősen növekedett a baktérium oltás hatására	<i>Makádi et al., 2007</i>

A szabadföldi kukorica és búza kutúrákban történt mikorrhiza oltás tudományos irodalmát áttekintve (2. táblázat), megállapítható, hogy az oltás általában szignifikáns pozitív hatással van a kukorica és búza növekedésére, főleg szárazabb éghajlatokon és alacsonyabb műtrágyázási szinten. Azonban alig található mikorrhiza oltóanyaggal végzett kísérlet melyek semleges vagy negatív eredményekről számolnak be. Mérsékelt éghajlatú területeken az oltás hatása a talajtípustól és a talajtulajdonságoktól is jelentősen függ (Bender et al., 2019).

2. táblázat: A kukoricában és búzában használt mikorrhiza oltóanyagok szabadföldi kísérletek irodalmi áttekintése, talajtípus, éghajlat és műtrágyázási szint ismeretében. A szignifikáns pozitív hatás félkövéren jelölve, általában az alacsonyabb tápanyagellátáshoz társul.

Helyszín és éghajlat (Köppen)	Talaj tulajdonságok és tápanyag-ellátottság	Műtrágyázás (kg/ha)	Alkalmazott törzsek	Mikorrhiza hatása a kultúrnövényre	Hivatkozás
India, Ludhiana (Cwa)	pH 7,5; Szerves szén: 0,49%; agyagos homok; elegendő P és K ellátottság	N=0; P=0 N=120; P=60	<i>Rhizophagus irregularis</i> , <i>Rhizophagus proliferus</i> <i>Claroideoglossum etunicatum</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica gyökérkolonizációjára Kukoricára nem volt hatással	<i>Varinderpal-Singh et al., 2020</i>
Magyarország, Szeged, Öthalom (Dfb)	réti csernozjom talaj	NPK:60-0-0 NPK:90-30-30 NPK:120-60-60 NPK:150-60-60	<i>Glomus mossae</i> (mai nevéen: <i>Funneliformis mosseae</i>) <i>Glomus intraradices</i> (mai nevéen: <i>Rhizophagus irregularis</i>) <i>Trichoderma atroviride</i>	Minden szinten termésnövekedés (107-140%) legjobban a 90kg nitrogén esetén. A 4., legmagasabb szinten volt legkevesebb hatás	<i>Szentpéteri et al., 2023</i>
Magyarország, Nagyhörcsök, (Dfb)	csernozjom talaj, pH 7,27; Humusz: 1,61%, megfelelő P és K ellátottság	NPK: 0 NPK: 130-78-60	<i>Glomus mossae</i> (mai nevéen: <i>Funneliformis mosseae</i>), <i>Rhizophagus irregularis</i>	Szignifikáns termé- és gyökérkolonizáció növekedés búzában, csakis NPK kijuttatás hiányában	<i>Bakonyi és Csitári, 2023</i>
USA, Florida, Gainesville (Cfa)	pH 5,8; finom homoktalaj; magas P ellátottság	N=250; P=0	<i>Glomus etunicatum</i> (mai nevéen: <i>Claroideoglossum etunicatum</i>)	A növekvő szárazság stresszel, szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére, biomasszájára és a gyökérkolonizációjára	<i>Sylvia et al., 1993</i>
USA, Texas, Lubbock (BSk)	homokos vályog; pH 7,3; Humusz: 1,3%; mérsékelt P ellátottság	N=75; P=0	<i>Glomus mosseae</i> (mai nevéen: <i>Funneliformis mosseae</i>) <i>Glomus etunicatum</i> (mai nevéen: <i>Claroideoglossum etunicatum</i>)	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére, biomasszájára és gyökérkolonizációjára	<i>Al-Karaki et al., 2004</i>
Uttar Pradesh India, Uttar Pradesh, Uttarakhand és Haryana (Cwa, Cwb)	pH 7,59-7,76; SOC 0,35-0,42%; homok és vályog; alacsony P, megfelelő K ellátottság	N=0; P=0 N=70; P=11	<i>Glomus intraradices</i> (mai nevéen: <i>Rhizophagus irregularis</i>), őshonos természetes AMF együttes	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére és gyökérkolonizációjára, búza-rizs és búza-hüvelyes vetéskombinációban	<i>Mäder et al., 2011</i>
Irán, Semnan (BSk)	pH 8,3; Szerves szén: 0,33%; agyagos vályog; alacsony P ellátottság	N=140; P=0	<i>Glomus intraradices</i> (mai nevéen: <i>Rhizophagus irregularis</i>)	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére és gyökérkolonizációjára	<i>Ansori és Gholami, 2015</i>
Irán, Karaj (BSk)	pH 8,1; Szerves szén: 0,73%; agyagos vályogtalaj; alacsony P ellátottság	N=74; P=17	<i>Funneliformis mosseae</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica termésére és gyökérkolonizációjára és klorofill tartalmára	<i>Ghorchiani et al., 2018</i>
India, Uttar Pradesh, Aligarh (Cwa)	pH 7,2; Szerves szén: 0,4%; homokos vályogtalaj mérsékelt P ellátottság	N=0; P=0	<i>Glomus fasciculatum</i>	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére és gyökérkolonizációjára, PGPR baktériummal való kombináció esetén is	<i>Khan és Zaidi, 2007</i>

Svájc (Dfb)	pH 5,9–8,0; Szerves szén: 1,0–2,27%, homokos vályog, iszapos vályog és vályog; alacsony- közepes P ellátottság	N=115–221; P=28–108	<i>Glomus intraradices</i> (mai névén: <i>Rhizophagus</i> <i>irregularis</i>)	Pozitív hatás a kukoricára csak abban az esetben, amikor az oltás növelte a gyökérekolonizációt és a hatás negatívan korrelált a P trágyázással	<i>Bender et al., 2019</i>
Olaszország, Viterbo, (Csa)	pH 7,8; Humusz: 1,1%; homokos vályogtalaj, alacsony- közepes P ellátottság	N=36; P=40	<i>Glomus intraradices</i> (mai névén: <i>Rhizophagus</i> <i>irregularis</i>) <i>Glomus mosseae</i> (mai névén: <i>Funneliformis</i> <i>mosseae</i>) <i>Trichoderma atroviride</i>	Szignifikáns pozitív hatás az őszi búza termésére, biomasszájára, gyökérekolonizációjára és klorofill tartalmára	<i>Colla et al., 2015</i>
Pisa, Olaszország, (Csa)	pH: 8,4; Szerves szén: 1.0 %; vályogtalaj, alacsony P ellátottság	N=0; P=0 N=40; P=40	<i>Glomus intraradices</i> (mai névén: <i>Rhizophagus</i> <i>irregularis</i>)	Szignifikáns pozitív hatás az durum búza gyökérekolonizációjára, de a termésére nem Durum búzára nem volt hatással	<i>Ercoli et al., 2017</i>
Olaszország, Alessandria, (Cfa)	pH 8,2; Humusz: alacsony; agyagos vályog talaj	N=63; P=161	<i>Rhizophagus</i> <i>intraradices</i> , <i>Glomus</i> <i>aggregatum</i> , <i>Glomus</i> <i>viscosum</i> <i>Glomus</i> <i>etunicatum</i> (mai névén: <i>Claroideoglomus</i> <i>etunicatum</i>), <i>Glomus</i> <i>claroideum</i>	Szignifikáns pozitív hatás a kukorica biomasszájára, gyökérekolonizációjára és gyökérnyakátmérőjére	<i>Berta et al., 2014</i>
Olaszország, Pisa (Csa)	pH 8,0; Szerves anyag: 1,73% homokos vályog; mérsékelt P ellátottság	alacsony	<i>Funneliformis mosseae</i>	Szignifikáns pozitív hatás az utónövény kukorica gyökérekolonizációjára	<i>Pellegrino et al., 2012</i>
India, Uttar Pradesh, Bhavnipur (Cwa)	pH 7,2; homokos vályog; alacsony P és K ellátottság	N=23; P=0	<i>talajból izolált őshonos AMF együttes</i>	Szignifikáns pozitív hatás a búza gyökérekolonizációjára	<i>Roesti et al., 2006</i>

Fontos megjegyezni, hogy a különböző kukorica hibridek kolonizáltsága eltérő lehet egymástól (Liu et al., 2000), illetve a mikorrhiza oltóanyagok hatékonyságával kapcsolatban felmerült kétségek, a tudományos irodalom szerint sem alaptalanok. Különböző oltóanyag vizsgálatok szerint több esetben az oltóanyagok nem okoznak gyökérekolonizáció növekedést (Salomon et al., 2022), illetve sok esetben nem, vagy csak részben a címkéjüknek megfelelő törzseket tartalmazzák (Faye et al., 2013; Vahter et al., 2023). *Rhizophagus* fajokkal történő oltás esetén az oltás hatására nem feltétlenül változik meg a talaj mikorrhiza összetétele, feltehetőleg azért mert már eredetileg is megtalálhatók voltak a talajban a kijuttatott törzsek (Renaut et al., 2020). Hu et al. (2020) szerint a jövőbeli kutatásoknak a gomba által okozott molekuláris mechanizmusokra lenne szükséges fókuszálniuk.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Szabadföldi kísérletek beállítása

3.1.1. Termőhelyek talajtípusai és művelésük

Szabadföldi kísérleteinket kétféle, egymástól meghatározó tulajdonságaiban jelentősen különböző talajtípuson állítottuk be (3. táblázat). A talajok termőhelyei Baranya vármegyében, a Mecsektől északi irányban helyezkednek el. Az agyagbemosódásos barna erdőtalaj (ABET) termőhely Ligeten (1. helyszín: N: 46° 12' 56" E: 18 09' 47"; tszf. magasság: 208 m), a típusos réti talaj (RT) Bodolyabéren (2. helyszín: N: 46° 12' 44" E: 18 06' 52"; tszf. magasság: 133 m) található.

Az 1. helyszín talajtípusa az alacsony szervesanyag tartalmú és erősen savanyú pH-jú, vályogszerkezetű Luvisol-okhoz (WRB) sorolható (3. táblázat). 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 szerves 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 a Gleysol-okhoz (WRB) sorolható, agyagos vályogszerkezetű és az 1. helyszínhez képest magasabb víztartó képességgel és kationcserélő kapacitással rendelkezik (3. táblázat). Semleges pH-jú és magasabb szervesanyag tartalmú, mint az ABET. Ezen a talajon az összes szerves és szerves P jelentősen meghaladja az 1. helyszín értékeit. Az RT talajon a rendelkezésre álló P az összes szerves 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.

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

Talaj paraméterek	Mérték-egység	Helyszín1 ABET	Helyszín2 RT	Alkalmazott módszer
Talaj textúra	-	vályog	agyag	Plaszticitás index (Magyar szabvány MSZ-08-0205:1978; Juhos et al., 2019)
pH	-	4,91	6,75	1 M KCl oldatban (Magyar szabvány MSZ-08-0206-2:1978)
Szénsavas mész	m/m% CaCO ₃	<0,10	1,03	volumetrikus (Magyar szabvány MSZ-08-0206-2:1978)
Teljes szerves szén	m/m%	0,94	1,45	Tyurin módszer (Kononova, 1966)
Permanganát oxidálható labilis szén-tartalom	mg/kg	371	647	0.02 M KMnO ₄ oxidációs módszer (Weil et al., 2003)
Potenciálisan felvehető P	mg/kg	29	132	ammónium laktátos kivonás (Egnér et al., 1960)
Teljes szerves P	mg/kg	27	169	égetés + 1 M HCl kivonat (Teljes P – Szervetlen P), (Pardo et al., 2003)
Teljes szervetlen P	mg/kg	489	819	1 M HCl kivonat (Pardo et al., 2003)
Elérhető (kicserélhető) K	mg/kg	128	201	ammónium laktátos kivonás (Egnér et al., 1960)
Potenciálisan felvehető Zn	mg/kg	1,16	3,28	1 N KCl+EDTA kivonószer (Magyar szabvány MSZ 20135:1999)
Kationcsere kapacitás	meq/100g	12,79	18,78	Na-acetát/etanol/NH ₄ -acetát csere-módszer (Chapman, 1965)
Szabadföldi vízkapacitás (pF 2.4)	v/v%	26,74	33,46	bolygatatlan talajminta telítése, majd gravitációs víz eltávolítása után tömegvisszamérés (McKenzie et al., 2002)

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 kísérletek a négy év során ugyanarra a táblára és talajtípusra kerültek. Továbbá 2021 és 2022-ben az azonos kezelésű kísérleti parcellák egymással megegyező helyre kerültek, míg a többi évben a parcellák helyét a területen belül átfedés nélkül elmozgattuk. A kísérlet alatt és a kísérletet megelőzően a területeken konvencionális talajművelést folytattak, hagyományos N, P, K műtrágya kijuttatásával. Állati tárgyát nem juttattak ki az elmúlt húsz évben, de a kultúrnövény szármagját minden évben a területen hagyták és bedolgozták. Az első két évben és a negyedik évben középmező lazítás (35-40 cm mély) és sekély lazítás (15 cm mély) volt a kukoricavetést megelőző alapművelés, míg a harmadik évben a búzavetést megelőzően csupán 15 cm mély lazítás történt. A kísérlet ideje alatt forgatásos talajművelést nem alkalmaztak.

3.1.2. 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 2020-as évben 644 mm, 2021-ben 552 mm, 2022-ben 631 mm, 2023-ban pedig 885 mm éves csapadékot mértünk. A vizsgált négy tenyészidőszakból egy száraznak, a másik három lehullott csapadék szempontjából átlagosnak mondható (4. táblázat és 5. táblázat). A csapadék mindkét talajon jelentős hatással volt a növények fejlődésére és termés hozamára.

4. táblázat: Meteorológiai paraméterek a négy kísérleti évben. Hőmérsékleti adatok: Magyar Meteorológiai Szolgálat, pécsi meteorológiai állomás, N: 46° 04' 40,1" E: 18° 12' 25,9"; Csapadék adatok: saját mérés.

Éves adatok				
Év	2020	2021	2022	2023
Csapadékmennyiség (mm)	644	552	631	848
Átlag hőmérséklet (C°)	13,0	12,5	13,4	13,7
Tenyészidőszak adatai				
Tenyészidőszak (vetés és betakarítás ideje)	04.15-09.28.	05.01-09.15.	10.01-07.08.	05.01-09.25.
Kultúrnövény	kukorica	kukorica	őszi búza	kukorica
Átlag hőmérséklet (C°)	20,2	21,4	10,2	21,4
Hőségnapok száma (30 C° feletti hőmérsékleti maximum)	43	50	–	42
Csapadékmennyiség (mm)	383	210	458	362
Értékelés	átlagos	száraz	átlagos	átlagos

5. táblázat: Havi csapadékmennyiségek összehasonlítása a kukorica tenyészidőszakok alatt (saját mérés).

Havi csapadékmennyiség (mm)	2020	2021	2023
Április	20,0	40,7	51,0
Május	48,0	79,1	114,0
Június	92,0	13,9	74,0
Július	106,0	64,6	68,0
Augusztus	85,7	41,9	75,0
Szeptember	35,6	25,0	31,0

3.1.3. Kísérletek bemutatása, parcellák kezelése és műtrágyázási szintek

2020, 2021, 2023-as években vizsgáltuk a starter műtrágyázás hatását (Starter) kukorica kultúrnövényben (6. táblázat). 2020-2023-ban négy évig vizsgáltuk a baktérium oltás hatását

(Bakt1, Bakt2) (7. táblázat és 8. táblázat). 2023-ban vizsgáltuk a CaCO₃-mal történt meszezés hatását, illetve annak kombinációját baktérium oltással (Bakt2) (9. táblázat). Továbbá 2021-2023-as években vizsgáltuk a mikorrhiza oltás (Myc) hatását mindhárom évben kétféle talajtípuson (10. táblázat).

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. 2021 és 2022-ben az azonos kezelésű kísérleti parcellák egymással megegyező helyre kerültek, tehát a kontroll parcellák a kontroll parcellák helyére, míg a kezelt parcellák az azonos kezelések helyére. 2023-ban a kísérleti parcellákat a táblán belül ismét áthelyeztük a tábla olyan részére, ahol a korábbi években még nem történt kísérleti beállítás. 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.

Vetési paraméterek:

- 2020. április 15. FAO 330, korai éréscsoport, DKC3972 kukorica 72.000 mag/hektár dózis
- 2021. április 25. FAO 330, korai éréscsoport, DKC3972 kukorica 72.000 mag/hektár dózis
- 2022. október 31. korai éréscsoport Gaudio őszi búza fajta, 4 millió mag/hektár dózis
- 2023. április 29. FAO 330, korai éréscsoport, DKC3972 kukorica 72.000 mag/hektár dózis

Műtrágyázási szintek:

- 2020-as évre, magas műtrágyázási szint (120N):

2019 őszi: 16 kg/ha N, 17,5 kg/ha P és 47 kg/ha K

2020 tavasz: 81 kg/ha N, vetéssel egy menetben 22,41 kg/ha N

A tavaszi nitrogén trágyák NH₄NO₃ + CaMg(CO₃)₂, formában, 27%N + 7%CaO + 5%MgO tápanyagtartalommal került kijuttatásra.

A 2020 évi Starterrel kezelt parcellák további 13 kg/ha P, és 12,5 kg/ha K tápanyagot kaptak vetéssel egy menetben starter műtrágya formájában. A N ellátásuk megegyezett a többi parcellával, P és K tápanyagokból kaptak többletet.

- 2021-es évre, magas műtrágyázási szint (120N):

2020 őszi: 17,6 kg/ha N, 19 kg/ha P és 55 kg/ha K

2021 tavasz: 80,5 kg/ha N, vetéssel egy menetben 22 kg/ha N

A tavaszi nitrogén trágyák $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, formában, 27%N + 7%CaO + 5%MgO tápanyagtartalommal került kijuttatásra.

A 2021 évi Starterrel kezelt parcellák további 13 kg/ha P, és 12,5 kg/ha K tápanyagot kaptak vetéssel egy menetben starter műtrágya formájában. A N ellátásuk megegyezett a többi parcellával, P és K tápanyagokból kaptak többletet.

- 2022-es évre, magas műtrágyázási szint (143N):

2021 őszi: 44,5 kg/ha N, 35 kg/ha P és 17,5 kg/ha K

2022 tavasz: 98 kg/ha N fejtrágyaként, 2 adagban

A tavaszi nitrogén trágyák $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, formában, 27%N + 7%CaO + 5%MgO tápanyagtartalommal került kijuttatásra.

- 2023-as évre:

Alacsony műtrágyázási szint (46N): 2023. tavasz: 46 kg/ha N (N-NH₂ műtrágya formájában)

Közepes műtrágyázási szint (87N): 2023. tavasz: 87 kg/ha N (N-NH₂ műtrágya formájában)

Magas műtrágyázási szint (120N): 2023 tavasz: 113 kg/ha N (92 kg/ha N-NH₂ műtrágya formájában, 21 kg N, $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$ formában) + 9 kg/ha P és 17,5 kg/ha K

A 2023 évi Starterrel kezelt parcellák további 42 kg/ha N, 25 kg/ha P, és 23 kg/ha K tápanyagot kaptak vetéssel egy menetben starter műtrágya formájában. A 2023-as évben képeztünk Starter Kontroll parcellákat, melyek a Starterral kezelt parcellákkal megegyező mennyiségű nitrogént kaptak.

6. táblázat: Kísérleti Starter kezelések és az összes felhasznált műtrágya mennyisége 2020-2023-ban. Műtrágyázási szintek: közepes (87N) és magas (120N). Az aláhúzással jelölt számok mutatják a vetéssel egy menetben kijuttatott műtrágya mennyiségét. Kontroll: Starterrel nem kezelt; Starter: többelemű starter műtrágya (N, P, K, Mg, S, B, Zn).

Évek és kezelések	2020		2021		2023		Kontroll
	Kontroll	Starter	Kontroll	Starter	Kontroll	Starter	
Kultúrnövény	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica
Talajtípus	kétféle	kétféle	ABET	ABET	ABET	ABET	ABET
Műtrágyázás szintje	magas	magas	magas	magas	közepes	közepes	magas
N Műtrágya (N kg/ha)	97+ <u>22</u>	97+ <u>22,5</u>	98+ <u>22</u>	98+ <u>22,5</u>	46+ <u>41</u>	46+ <u>42</u>	121
P Műtrágya (P kg/ha)	17,5	17,5+ <u>13</u>	19	19+ <u>13</u>	–	<u>25</u>	9
K Műtrágya (K kg/ha)	47	47+ <u>12,5</u>	55	55+ <u>12,5</u>	–	<u>23</u>	17,5

2020-2023-ban négy évig vizsgáltuk a baktérium oltás hatását (Bakt1, Bakt2). 2020, 2021, 2023 években kukorica növényen, míg 2022-ben búza kultúrnövényen (7. táblázat és 8. táblázat). A Bakt1 készítmény *Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium* összetételű, a Bakt2 készítmény *Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense* összetételű volt. A Bakt1 és Bakt2 készítményeket vetés előtt talajra permetezve juttattuk ki, majd azonnal bedolgoztuk a talajba (10. ábra).

7. táblázat: Kísérleti baktérium kezelések és az összes felhasznált műtrágya mennyisége 2020-2021-ben. Műtrágyázási szintek: magas (120N). Kontroll: Baktérium oltóanyaggal nem kezelt; Bakt1 készítmény összetétele: *Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium*.

Évek és kezelések	2020		2021	
	Kontroll	Bakt1	Kontroll	Bakt1
Kultúrnövény	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica
Talajtípus	kétféle	kétféle	ABET	ABET
Műtrágyázás szintje	magas	magas	magas	magas
N Műtrágya (N kg/ha)	97+22	97+22	120,1	120,1
P Műtrágya (P kg/ha)	17,5	17,5	19	19
K Műtrágya (K kg/ha)	47	47	55	55
Bakt1 oltóanyag (l/ha)	–	10	–	10

8. táblázat: Kísérleti baktérium kezelések és az összes felhasznált műtrágya mennyisége 2022-2023-ban. Műtrágyázási szintek: alacsony (46N) és magas (143N). Kontroll: Baktérium oltóanyaggal nem kezelt; Bakt2 készítmény összetétele: *Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense*.

Évek és kezelések	2022		2023		
	Kontroll	Bakt2	Kontroll	Bakt2	Kontroll
Kultúrnövény	búza	búza	kukorica	kukorica	kukorica
Talajtípus	ABET	ABET	ABET	ABET	ABET
Műtrágyázás szintje	magas	magas	alacsony	alacsony	alacsony
N Műtrágya (N kg/ha)	142,5	142,5	46	46	121
P Műtrágya (P kg/ha)	35	35	–	–	9
K Műtrágya (K kg/ha)	17,5	17,5	–	–	17,5
Bakt2 oltóanyag (l/ha)	–	10	–	10	–

2023-ban a savanyú kémhatású ABET talajon a kultúrnövény vetését megelőzően talajjavító meszezőanyagot (CaCO₃) juttatunk ki a megfelelő parcellákra, annak érdekében, hogy a talaj pH javításával hozzájáruljunk a talaj biológiai aktivitásának növeléséhez. A parcellák keskeny szélessége miatt a kijuttatás kézi szórással történt.

9. táblázat: Kísérleti meszezési kezelések és azok kombinációja Bakt2 készítménnyel 2023-ban. Műtrágyázási szintek: alacsony (46N). Kontroll: Baktérium oltóanyaggal és meszezéssel nem kezelt; CaCO₃: meszezőanyaggal kezelt; Bakt2 készítmény összetétele: *Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense*.

Évek és kezelések	2023			
	Kontroll	Bakt2	CaCO ₃	Bakt2 +CaCO ₃
Kultúrnövény	kukorica	kukorica	kukorica	kukorica
Talajtípus	ABET	ABET	ABET	ABET
Műtrágyázás szintje	alacsony	alacsony	alacsony	alacsony
N Műtrágya (N kg/ha)	46	46	46	46
P Műtrágya (P kg/ha)	–	–	–	–
K Műtrágya (K kg/ha)	–	–	–	–
Bakt2 oltóanyag (l/ha)	–	10	–	10
CaCO ₃ (kg/ha)	–	–	2000	2000

2021-2023-ban három évig vizsgáltuk a mikorrhiza oltás hatását (Myc). 2021 és 2023 években kukorica növényben, míg 2022-ben búza kultúrnövényben (10. táblázat). Az alkalmazott mikorrhiza oltóanyag termék (Myc) szilárd granulátum, mely *Funneliformis*, *Claroideoglossum*, *Rhizophagus* mikorrhiza gombanemzetségekből tartalmaz fajokat. A Myc oltás a kukorica években vetéssel egy menetben a talajba került kijuttatásra, míg a búzavetés évében közvetlenül vetést megelőzően szórtuk a talajra dolgoztuk be (10. ábra).

10. táblázat: Kísérleti mikorrhiza kezelések és 2021-2023-ban. Műtrágyázási szintek: alacsony (46N) és magas (120N, 147N). Kontroll: Mikorrhiza oltóanyaggal nem kezelt; Myc: mikorrhiza oltóanyag (*Funneliformis*, *Claroideoglossum*, *Rhizophagus*).

Évek és kezelések	2021		2022		2023		Kontroll
	Kontroll	Myc	Kontroll	Myc	Kontroll	Myc	
Kultúrnövény	kukorica	kukorica	búza	búza	kukorica	kukorica	kukorica
Talajtípus	kétféle	kétféle	kétféle	kétféle	kétféle	kétféle	ABET
Műtrágyázás szintje	magas	magas	magas	magas	alacsony	alacsony	magas
N Műtrágya (N kg/ha)	120,1	120,1	142,5	142,5	46	46	121
P Műtrágya (P kg/ha)	19	19	35	35	–	–	9
K Műtrágya (K kg/ha)	55	55	17,5	17,5	–	–	17,5
Mikorrhiza granulátum (kg/ha)	–	10	–	10	–	10	–

3.2. Tenyészedényes kísérletek beállítása

Tenyészedényes kísérleteinket két évben, 2022-ben és 2023-ban végeztük. 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 P₂O₅=99 mg/kg),

– „ABET P175” talaj (pH=4,95; humusz=1,73%; felvehető P₂O₅=173 mg/kg).

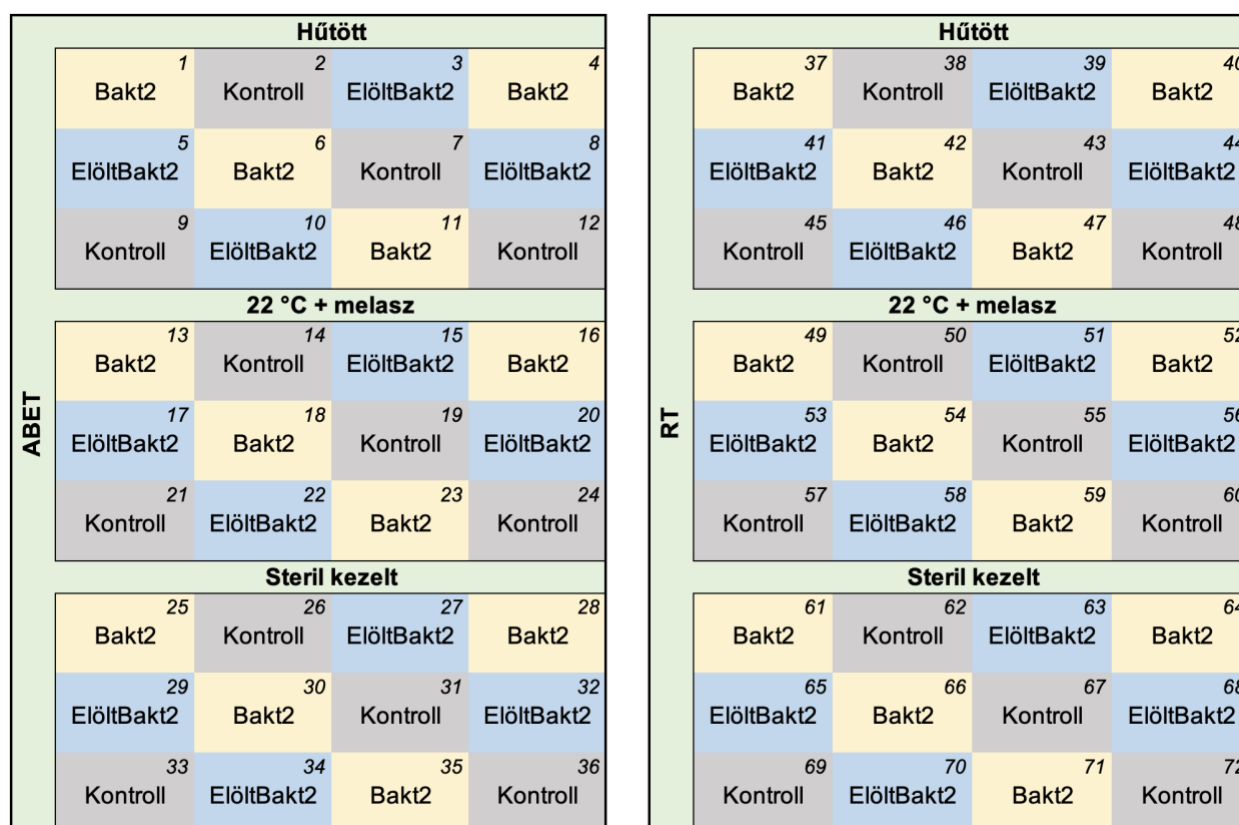
Talajtípusonként nyolc tenyészedényt használtunk, melyekbe edényenként 3 kg talaj került. Talajonként kétféle kezelés került beállításra: Kontroll és CaO meszezőanyaggal kezelt (8. ábra). A CaO dózis 0,1 g/100 g talaj volt, ami 2,66 t/ha mennyiséget jelent az 1,33 g/cm³ átlagos térfogattömegű talaj 20 cm-es rétegeire vonatkoztatva. Így összesen 16 tenyészedényt állítottunk be, kezelésként 4 ismétléssel. A kísérlet beállítása és a növények vetése 2022.05.12-én, felszámolása 2022.07.20-án történt a MATE Budai Campusának Agrárkörnyezettani Tanszékén. A talajok CaO kezelése és a kukorica magok elvetése előtt két héttel valósult meg. Edényenként két szem kukorica magot vetettünk el, majd kelésük után a kettőből egy növényt hagytunk meg. Az edények öntözése szükség szerint egyenletesen történt, elrendezésük váltott felosztású volt, elhelyezésük a szabad ég alatt valósult meg.

ABET P100				ABET P175			
1 CaO	2 Kontroll	3 CaO	4 Kontroll	9 CaO	10 Kontroll	11 CaO	12 Kontroll
5 Kontroll	6 CaO	7 Kontroll	8 CaO	13 Kontroll	14 CaO	15 Kontroll	16 CaO

8. ábra: 2022 évi tenyészedényes kísérleti elrendezése, kétféle ABET talajon, Kontroll és CaO meszezési kezeléssel.

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. Savanyú kémhatású gyenge P-ellátottságú és alacsony szervesanyag tartalmú agyagbemosódásos barna erdőtalajt (pH=4,9; humusz=1,64%; felvehető P₂O₅=66 mg/kg), és semleges kémhatású magas P és szervesanyag tartalmú típusos réti talajt (pH=6,75; humusz=2,53%; felvehető P₂O₅=303 mg/kg) használtunk. A kísérlethez szükséges talajmennyiséget a kísérletbeállítást megelőző napon vételeztük 0-20 cm-es mélységből. Az oltóanyagok alkalmazásához szervesanyag-kiegészítést (melaszt) is alkalmaztunk és a hőmérséklet befolyásoló hatását is ellenőriztük. 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 ElöltBakt2. Így összesen 72 tenyészedénnyel dolgoztunk (9. ábra), melyekbe egyenként 450 g talaj került. Az edényeket véletlen elrendezésben 4 ismétlésben (9. ábra) helyeztük el szabad ég alatt a MATE Budai Campusának Agrárkörnyezettani Tanszékén, majd egységesen öntöztük őket.



9. ábra: 2023 évi tenyészedényes kísérlet elrendezése, kétféle talajtípuson, három talajkezeléssel (Hűtött, 22°C-on tartott és melasszal kezelt, Steril kezelt) és talajkezelésenként három kezeléssel (Bakt1, Kontroll, ElöltBakt2).

A Bakt2 készítmény összetétele: *Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense*. Bakt2 készítményből edényenként 2,4 µl oltóanyagot juttattunk ki. Az ElöltBakt2 készítmény a Bakt2 készítmény autoklávval (120°C-on, 1 bar nyomáson, 20 percig) inaktívvá tétele utáni felhasználását jelentette. A talajkezeléseket 2023. május 21-én végeztük, a vetést 2023. május 30-án, minden edénybe két szem kukorica magot vetettünk, majd kelésük után a kettőből egy növényt hagytunk meg. A melasz (Rapunzel 57%) hozzáadásra négy alkalommal került sor: május 30-án, június 10-én, június 17-én és június 24-én, minden alkalommal 20 ml 1,2 g/l koncentrációjú melasz oldattal. A többi edényhez a melasz oldat mennyiségével megegyező vizet adtunk. A kísérlet felszámolása 2023. július 30-án történt.

3.3. Felhasznált mikrobiológiai és kémiai készítmények

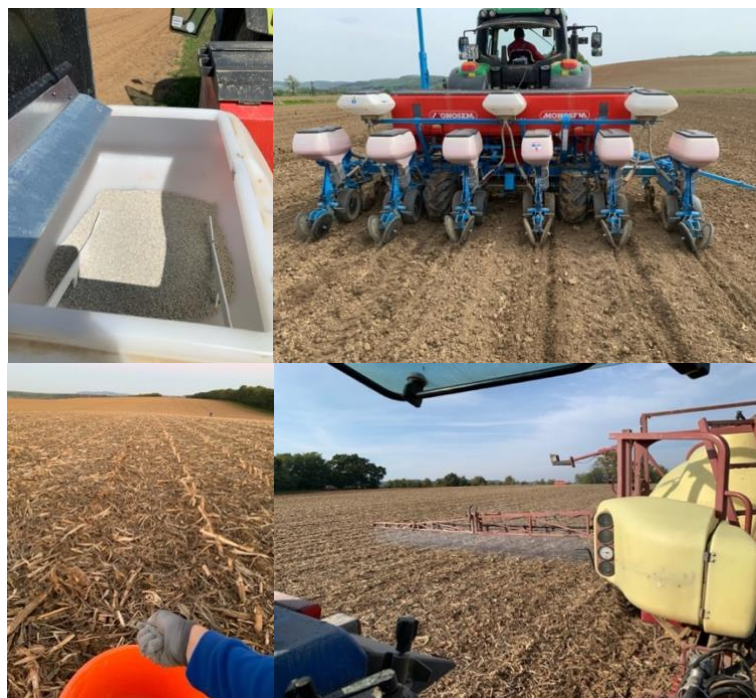
Az alkalmazott készítmények listáját az 11. táblázat tartalmazza. A Bakt1 készítmény egy tápoldat szuszpenzió, mely *Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium* törzseket tartalmaz 10^9 db/cm³ csíraszámában. A gyártó leírása alapján a kijuttatott baktériumok a növények gyökerén felszaporodnak, a növény érdekében vízdoldhatatlan tápanyagok mobilizálását végzik és a növény számára kedvező hormonszerű anyagokat termelnek. Összességében jobb tápanyag- és vízellátásban részesítik a kultúrnövényt, kiegészítik a műtrágyázás hatékonyságát. Az *Azotobacter chroococcum* a 6 tagú *Azotobacter* genusz leggyakrabban előforduló faja. Nagymértékű nitrogénkötés jellemzi, miközben az oxigén jelenlétére nem érzékeny. Az *Azotobacter* spp. évente 20 kg/ha N megkötésére képes. Ezen túl növekedésserkentő hormonokat (IAA, gibberellinek és citokininek), vitaminokat, szideroforokat, gomba- és baktériumellenes anyagokat termel. *Bacillus* sp., *Bacillus megaterium* serkenti a búza növények növekedését és növelheti azok termését (Chandra et al., 2021). A felhasználás előtt baktérium táptalajon teszteltük a készítményt és megállapítottuk, hogy tartalmaz baktériumokat.

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. 4-7,5 pH értékkel rendelkező talajokon javasolt a használata. A készítményben baktériumok stressztűrő típusai találhatóak, melyek a teljes tenyészidőszak alatt kifejthetik kedvező hatásukat. Nitrogént kötnek, felvehetővé teszik a talajban kötött állapotban lévő foszfort és káliumot és közben javítják a talajok szerkezetét. A felhasználás előtt baktérium táptalajon teszteltük a készítményt és megállapítottuk, hogy tartalmaz baktériumokat.

A szabadföldi oltóanyag kísérletekben gyakori törzs a *Pseudomonas* sp. (1. táblázat), melyek foszfor mobilizálására képesek és növelhetik a kukorica növények növekedését a hajtás-és gyökérbiomassza, és foszforfelvétel serkentésével (Sarikhani et al., 2020). Az általunk használt Bakt2 oltóanyagban található *Pseudomonas frederiksbergensis* az egyik leghatékonyabb foszformobilizáló baktérium, melynek foszformobilizáló aktivitása, minél több oldható foszfor jelenlétében csökken. Foszfor mobilizálási képességét egyszerű Ca-foszfát agar táptalajon kialakult körkörös tisztulási zóna monitorozásával állapították meg. Jövőbeli kutatási irány a baktérium génmanipulációja, melynek okán enzimtermelése kevésbé függene a foszfor jelenlététől (Zeng et al., 2016). *Paenibacillus peoriae* (1) egy PGPR baktérium, amely növény növekedés serkentő anyagokat (MVOCs), illetve növénypatogén gombák elleni anyagot termel (K. Wang et al., 2023). *Exiguobacterium acetylicum* foszformobilizáló hatású, indol-ecetsavat, szideroforokat,

és hidrogén-cianidot termel, működési tartománya 4-42°C-on van, mely alapján hidegtűrő törzsnek nevezhető. Tenyészedényes kísérletekben, a baktériummal történő magkezelés pozitívan hatott a búza növények tápanyagfelvételére és növekedésére (Selvakumar et al., 2010).

A Myc készítmény *Funneliformis*, *Rhizophagus* és *Claroideoglossum* nemzetség spóráit, micéliumait és szárított gyökérfragmenseket tartalmaz. A három gombanemzetségből öt féle gombafajt tartalmaz, így gyártója szerint különböző talajtípusokon is hatásos. A növényi gyökér közelébe juttatva szimbiotikus kapcsolatot alakít ki a kultúrnövénnyel, segíti a vízfelhasználást, fokozza a tápanyagok felvételét, fokozza a növények ellenállóképességét, növeli a termést. *Funneliformis* és *Rhizophagus* törzsek együttes oltása magasabb toleranciát nyújt vízhiány és magas hőmérséklet esetén szója növényekben és serkenti a növények növekedését (G. N. Al-Karaki és Williams, 2021; Jumrani et al., 2022). Basiru et al. (2020) 68 darab, 28 gyártótól származó mikorrhiza készítmény adatai alapján megállapították, hogy a készítmények 90%-a szilárd (65% por és 25% granulátum), és csak 10 százalékuk folyékony halmazállapotú. A termékek 100%-a *Glomeraceae* családon alapszik, melyekből 3 faj dominál a termékekben: *Rhizophagus irregularis* (39%), *Funneliformis mosseae* (21%), *Claroideoglossum etunicatum* (16%). A termékek 44%-a csak mikorrhizát tartalmaz, míg a többi kombinált más növekedésserkentő összetevővel. A kijuttatás szempontjából a talajba juttatás dominál, és a legtöbb terméket gabonatermesztésben használják (Basiru et al., 2020).



10. ábra: Felül: Myc kijuttatása vetéssel egy menetben, Alul: Myc kijuttatása kézzel, baktérium oltóanyag kijuttatása permetezőgéppel.

A kísérleteinkben felhasznált starter műtrágya összetétele: N: 15%, P₂O₅: 20%, azaz P: 9%, K₂O: 9%, azaz K: 8,3%, MgO: 3%, SO₃: 10%, cink: 1% és bór: 0,05%. A műtrágya összetétele kedvező a kukoricánövény korai fejlődéséhez, valamint gyors és könnyen felvehető tápanyagellátást biztosít, a kialakuló erősebb gyökérzet miatt növeli a növények stressztűrését. A termék kijuttatásával a talajból alacsony hőmérsékleten nehezen mobilizálható N és P tápelemeket adunk közel a növény gyökeréhez, felvehető formában. Ezzel látható hatást lehet elérni már kisebb dózisok alkalmazásával is. A műtrágyát vetéssel egy menetben, közel a növények gyökeréhez szükséges kijuttatni. A műtrágyában lévő két különböző cink forma miatt (cink-szulfát és cink-ammóniumfoszfát) a tápelem akár több évig hatásos, mert a cink-szulfát gyorsan, míg a cink-ammóniumfoszfát lassan disszociál.

A felhasznált meszezőanyag a gyártó leírása alapján természetes forrásból származó 87% CaCO₃ tartalmú ultrafinom készítmény. Talajjavítóként alkalmazható savas talajok pH-ját javítja, biztosítja a növényi sejtfaj szempontjából nélkülözhetetlen kalciumot. Az ultrafinom szemcsézettségnek köszönhetően a kijuttatást követően gyorsan kifejti hatását, könnyen elérhető kalciumot biztosít a növények számára kalcium hiányos, savanyú talajokon. A kultúrnövény bármely vegetációs fázisában kijuttatható, csapadékban gyorsan oldódik. A tenyészedényes kísérletben 100%-os égetett meszet (CaO) használtunk, melynek talaj pH-emelő hatása hevesebb, ezért kisebb mennyiség is elegendő belőle. Azonban hatása kevésbé tartós, mint a CaCO₃ esetében. A szabadföldi kísérletben kijuttatott meszező dózis a hazai tartamkísérletek alapján a leghatékonyabb meszező dózisonál alacsonyabb, a barna erdőtalajon feltehetőleg nem elegendő a savanyúság teljes megszüntetésére, de számottevő hatása várható (Csathó, 2001b, 2001a).

A melasz cukorgyártás során keletkező melléktermék, mely talajjavításra és a talajban lévő mikrobák táplálására is használható a mezőgazdaságban, mert a baktériumok számára könnyen hozzáférhető cukrot tartalmaz. Ezen kívül vitaminokat és ásványi anyagokat is tartalmaz.

11. táblázat: A kísérletekhez használt termésmenvelő, kereskedelmi talajoltó készítmények, műtrágya és meszezőanyag, melasz.

Készítmény neve	Hatóanyag	Dózis (előírt)	Dózis (felhasznált)	Készítmény típusa	Hatóanyag típusa
Bakt1	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus circulans</i> , <i>Bacillus megaterium</i>	10-20 l/ha	15 l/ha	mikrobiológiai készítmény	baktérium (CFU/cm ³ : legalább 1 x 10 ⁹)
Bakt2	<i>Bacillus simplex</i> , <i>Pseudomonas frederiksbergensis</i> , <i>Agreia pratensis</i> , <i>Paenibacillus peoriae</i> , <i>Exiguobacterium acetylicum</i> , <i>Azospirillum largimobile</i> , <i>Azospirillum brasilense</i>	Szabadföldön: 1-1,5 l/ha	Szabadföldön: 1-1,5 l/ha Tenyészedényben: 2,4 µl /edény	mikrobiológiai készítmény	baktérium (CFU/cm ³ : legalább 1,5 x 10 ⁹)
Myc	<i>Funneliformis</i> , <i>Claroideoglosum</i> , <i>Rhizophagus</i>	10 kg/ha	10 kg/ha	mikrobiológiai készítmény	mikorrhiza gomba
Starter	N: 15%, P ₂ O ₅ : 20% (P: 9%), K ₂ O: 10% (K: 8,3%), MgO: 3%, SO ₃ : 10%, Zn: 1%, B: 0,05%	nincs meghatározva	150 kg/ha	műtrágya	ásványi anyag
CaCO₃	CaCO ₃ : 87,5%, MgO: 2,4%,	nincs meghatározva	2000 kg/ha	meszezőanyag	ásványi anyag
CaO	100% CaO (égetett mész)	nincs meghatározva	0,1 g/100 g talaj (2600 kg/ha)	meszezőanyag	ásványi anyag
Melasz	cukor 57g/100g	nincs meghatározva	20 ml, 1,2 g/l koncentrációjú oldat 4 alkalommal	cukor	szénhidrát

3.4. Mérési módszerek

3.4.1. Talajmintavételek és vizsgálatok

Szabadföldi talajmintavételek az alábbi időpontokban történtek:

- 2021.06.08. kukoricavetés után 2 héttel
- 2021.07.26. kukorica virágzásakor
- 2021.10.04. kukorica betakarítását követően
- 2022.04.06. őszi búza szárbaindulásakor
- 2022.05.27. őszi búza virágzásakor
- 2023.07.12. kukorica virágzása kezdetén
- 2023.08.09. kukorica virágzása után

A talajmintavételezéskor parcellánként 10-10 homogén talajmintát vételeztünk 0-20 cm mélységből, mely 10 minta reprezentálta a parcellák teljes hosszát. A minták frissen tartása érdekében mintánként 100 g talaj zárt műanyag zacskóban 4°C-os hűtőbe került a vizsgálat megkezdéséig (a mintákat maximum 4 hétig tároltuk)(Lee et al., 2007). 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 talajmintavételek az alábbi időpontokban történtek:

- 2022.05.26. kukorica 30-40 cm magasságú állapotában (POXC)
- 2023.06.23. kukorica 30-50 cm magasságú állapotában (POXC és DHA)

Tenyészedényes és szabadföldi kísérletben egyaránt alkalmazott mérési módszerek:

A dehidrogenáz enzim (DHA) aktivitás mérésének módszerét a teljes mikrobiális aktivitás becslésére használják a talajban (Wolinska és Stepniewsk, 2012). A DHA enzim mérését használják talaj gazdálkodási gyakorlatok által okozott változások kimutatására. A dehidrogenáz enzim mérését Veres et al. (2013) módszere alapján mértük, a friss vagy hűtőben tárolt talajmintákat trifenil-tetrazólium-kloriddal reagáltattuk, majd inkubáltuk 24 órát át 30 °C-os hőmérsékleten. Az inkubáció letelte után metanol hozzáadásával leállítottuk a reakciót, majd spektrofotométerrel mértük a minták fényelnyelését 546 nm hullámhosszúságon.

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 szén tartalom (Sparling et al., 1998). A labilis szén az elő szerves anyagot és az éppen bomlásnak indult szerves anyag mennyiségét határozza meg. A labilis szén a szerves anyag azon része, mely jó tápanyagszolgáltató lesz, a mikrobák hasznosítják, így magasabb értéke esetén magasabb termés is várható. Mérésünk során Weil et al. (2003) módszerét használtuk, 1 g-os talajmintákhoz adtunk kálium-permanganátot, rázatás után centrifugáltuk, majd 565 nm-en fotometráltuk. A mért abszorpciós értékek oldat koncentrációra történő átszámításához a mérést megelőzően kalibrációs görbét készítettünk különböző koncentrációjú KMnO_4 oldatok fényelnyelését vizsgálva. A labilis széntartalom arányos a kálium-permanganát fogyasztásával, annak lila színének halványulásával, azaz a minél kisebb abszorpciós értékekkel. Az eredményeket számszerűsítettük, miszerint 1 mol MnO_4 fogyasztás ($\text{Mn}^{7+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$) 0,75 mol C oxidálása eredményezi.

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. A mérés során p-nitrofenol-foszfát (pNP-PO₄) szintetikus szubsztrát enzimátikus hidrolízisekor felszabaduló p-nitrofenol mennyiségét mérjük. Talajszuszpenziót készítettünk, hozzáadtuk a szubsztrátot, majd inkubáltuk a mintákat 1 órán át 30°C-on. A reakció leállítását után 410 nm-en spektrofotométerrel állapítottuk meg a talajminták PHO enzim mennyiségét.

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 mérés során a szintetikus p-nitrofenol β-glükózidáz-ból (PnP- β-G) egy színes termék (p-nitrofenol) keletkezik. Talajszuszpenziót készítettünk, hozzáadtuk a szubsztrátot, majd inkubáltuk a mintákat 2 órán át 30°C-on. A reakció leállítását után 410 nm-en spektrofotométerrel állapítottuk meg a talajminták GLÜ enzim mennyiségét.

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 méréshez nutrient táplevest használtunk. A szélesztési módszerrel ellentétben ez a módszer sok minta időben gyors feldolgozását teszi lehetővé. A vizsgálandó talajmintákból szuszpenziót készítettünk, a szuszpenziót 80°C-on 20 percig vízfürdőn inkubáltuk, majd decimális alapon hígítottuk és 5-7 napig inkubáltuk. Létrehoztuk a kulcsszámot, amely egy három jegyű szám, három egymást követő hígításon a pozitív csövek száma. Ezt követően a Hoskins-féle táblázatban megkerestük a kulcsszámhoz tartozó alapértéket, amit felszoroztunk a kulcsszám első tagjához tartozó hígítási fokkal. A kapott értéket normál alakba hoztuk, így kaptuk meg az eredményeket.

A növényi gyökerek arbuskuláris mikorrhiza gomba által kolonizált mértékét Phillips és Hayman (1970) módosított módszere alapján állapítottuk meg. A méréshez minden évben a növények virágzásakor vételeztük parcellánként 5-5 növényből gyökérmintákat, mivel a mikorrhiza gyökérekolonizáció ekkor éri el a maximumát. A gyűjtés után a gyökereket vízzel tisztítottuk, majd 10%-os KOH oldatba helyeztük 5-10 perc időtartamra 90°C-os hőmérsékleten. Ezután ismét vízzel mostuk a gyökereket háromszor, majd 3 percre 1%-os HCL oldatba helyeztük őket. A gyökerek festését 0,01%-os Tripánkék oldattal végeztük szobahőmérsékleten 1 órán keresztül. A gyökerek mikroszkópos vizsgálatáig Laktofenolkék desztillált vizes oldatában tároltuk azokat. A mikroszkópos vizsgálatához mintánként 30 darab 1 cm-es gyökérdarabot képeztünk, melyeket sávokkal ellátott petricsészére helyeztünk. Az egymásra merőleges sávok

egymástól 1 cm-es távolságra helyezkedtek el, körülbelül 50-60 darab 1 cm²-es négyzetet képezve. A gyökereket a sávok kereszteződéseibe helyeztük, majd a metszéspontban vizsgáltuk mikroszkóp alatt, hogy látható-e gombaképlet a gyökérdarab azon részén vagy sem. Ezek alapján számítottuk ki a gyökérminták százalékos mikorrhizáltsági gyakoriságát.

3.4.2. Növényvizsgálatok és termésérés

Szabadföldi növényi paraméter mérések:

A vizsgált négy évben mértük a növények föld feletti száraz biomassza tömegét és termését. A biomassza mérés során a kukorica növényekből parcellánként 8 növény tömegét mértük a termésük nélkül, a dolgozatban csak ennyi számú mintavételen alapuló eredmények szerepelnek. Az őszi búza esetében 10 x 30 darab növényt csokorba kötöttünk és azok tömegét mértük szintén a termésük nélkül. A mintavétel után a növényi szárak tömegét kiszáradásuk után mértük. A termésérést 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 termésérést azonos nedvességtartalomra.

2023-as évben a kukorica növények virágzásakor (július 12.) azonos növényeken mértük azok magasságát, gyökérnyak átmérőjét, klorofill tartalmát és gyökérkapacitás értékeit. A parcellánként 15 darab vizsgált növényt véletlenszerűen választottuk ki. A növénymagasságot a talajfelszíntől egyenes vonalban a címer legmagasabb pontjáiig mértük. A gyökérnyak átmérőt digitális tolómérővel mértük a talajfelszín közvetlen közelében a gyökérnyak átmérőjű irányában. A levelek klorofill tartalmának méréséhez a pontos és megbízható eredményeket szolgáltató Apogee MC-100 eszközt használtuk. A készülék érzékelőjét a levelekre csíptettük, mely a klorofill koncentrációt abszolút értékben jelezte ki $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$ mértékegységben. Korábbi vizsgálatokban az Apogee MC-100 készülék másik három klorofill mérő műszerrel összehasonlítva a legpontosabbnak bizonyult (Padilla et al., 2018). A gyökérkapacitás méréséhez Voltcraft LCR-300 eszközt használtunk, mely módszer előnye, hogy a mért értékek nemcsak a gyökér méretével, de az aktivitásával is összefüggésben vannak. Ezért a módszer információt szolgáltat a gyökér aktuális funkcionalitásáról is, illetve korrelációt mutat a gyökér biomasszájával (Cseresnyés et al., 2018). A módszer hátránya, hogy a mérést erősen befolyásolja a talaj típusa és aktuális nedvességtartalma (Gu et al., 2021). A szabadföldön végzett méréseket a 12. táblázatban foglaltuk össze.

Tenyészedényes növényi paraméter mérések:

A 2022 évi kísérletben mértük a növények magasságát 2022.05.26-án és föld feletti száraz biomasszáját 07.20-án. Magasság esetén növények föld feletti részét mértük a növények leghosszabb levelét véve végpontnak. Biomassza esetén a levágott növénymintákat egyesével papírzacskóba, majd szárítószekrénybe helyeztük 85°C-on 48 órára, majd tömegállandóságig szárítottuk. A szárítás után mértük a növények száraz biomassza tömegét.

2023 évi kísérletünkben mértük a növények föld feletti száraz biomassza mennyiségét. A biomasszához a mintát a kísérlet felszámolásának napján vételeztük. A növénymintákat egyesével papírzacskóba, majd szárítószekrénybe helyeztük 85°C-on 48 órára, majd tömegállandóságig szárítottuk. A szárítás után mértük a növények száraz biomassza tömegét. A biomassza mellett mértük a növények gyökérkapacitás értékét a szabadföldi méréshez hasonlóan Voltcraft LCR-300 műszerrel 2023.06.28-án.

12. táblázat: Összefoglaló táblázat a szabadföldön végzett mérésekről a négy egymást követő évben végzett kísérletekben.

	2020	2021	2022	2023
	Kukorica	Kukorica	Búza	Kukorica
Talajparaméterek				
POXC		4 leveles, virágzás, aratás	Szárbaingulás, virágzás	Virágzás
DHA		4 leveles, virágzás, aratás	Szárbaingulás, virágzás	Virágzás
PHO		4 leveles, virágzás, aratás	Szárbaingulás, virágzás	Virágzás
GLÜ		4 leveles, virágzás, aratás	Szárbaingulás, virágzás	Virágzás
Talajnedvesség		4 leveles, virágzás, aratás	Szárbaingulás, virágzás	Virágzás
Spórások száma		Vetés előtt, 4 leveles, virágzás, aratás		Virágzás
Növényi paraméterek				
Növénymagasság		4 leveles, virágzás, aratás		Virágzás
Klorofill tartalom		4 leveles, virágzás		Virágzás
Gyökérekolonizáció		Virágzás	Virágzás	Virágzás
Gyökérkapacitás				Virágzás
Gyökérnyak átmérő				Virágzás
Biomassza szár	Aratás	Aratás	Aratás	Aratás
Termés	Aratás	Aratás	Aratás	Aratás

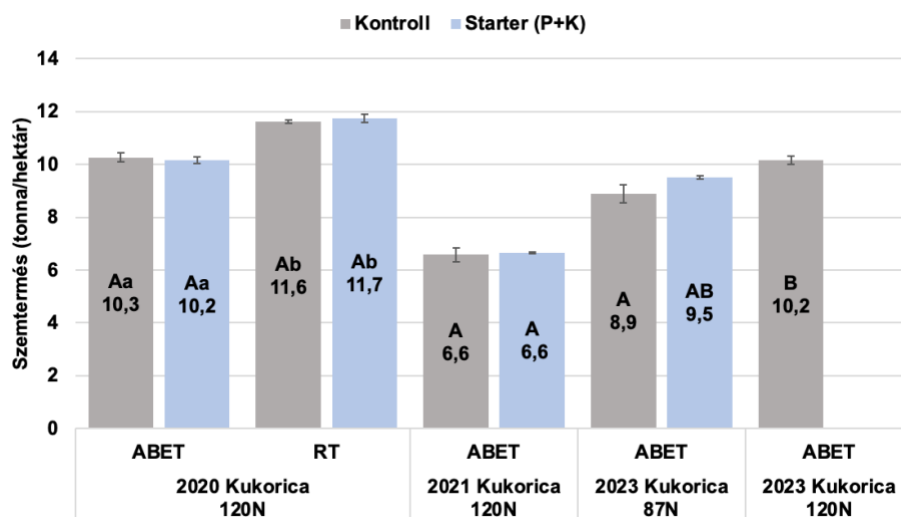
3.4.3. Az adatok matematikai és statisztikai elemzése

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. A növényi paraméterek közti lineáris kapcsolat vizsgálatára regresszióanalízist végeztünk.

4. EREDMÉNYEK

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

A kiválasztott talajok foszforszolgáltató képességének és a növényi foszforfelvétel nehézségeinek jobb megértése érdekében szabadföldi kísérletet állítottunk be P-t tartalmazó starterműtrágya kezeléssel. A terméseredményeket tekintve, több év adatai alapján (11. ábra) magas műtrágyázási szinten (120N), illetve közepes műtrágyaszint esetén (87N), nem mutattuk ki a Starter műtrágyázás hatását a kukorica szemtermés eredményekben. 2020-ban két talajtípuson kísérleteztünk, melynek eredményei alapján az is látható, hogy az RT talaj termése szignifikánsan meghaladta az ABET talajét, melynek oka az RT talaj jobb tápanyag és vízellátásában keresendő. A vizsgált három év ABET talajon végzett kísérletei alapján megállapítható, hogy a Starter műtrágya csapadékosabb évben (2021) és száraz évben (2022) sem növelte szignifikánsan a termést. A 2023-as megfelelő csapadékellátású évben, közepes műtrágyázási szinten (87N) is hasonló eredményt kaptunk. Ebben az évben azonban a műtrágya jelentős termésnövelő hatása megfigyelhető, a Kontroll parcellákat tekintve a magas műtrágyázás (120N) szemtermése 15%-kal meghaladta a közepes műtrágyázási (87N) szintű Kontroll parcella eredményét, melyhez hozzájárult a 2023-as év tenyészidőszakának kielégítő csapadékmennyisége (13. táblázat).



11. 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) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként, a kis betűk a talajtípus hatását kezelésként (a) ($p < 0,05$)

2020 Talaj: $n=6$; $F(1,8)=72,188$; $p < 0,001$

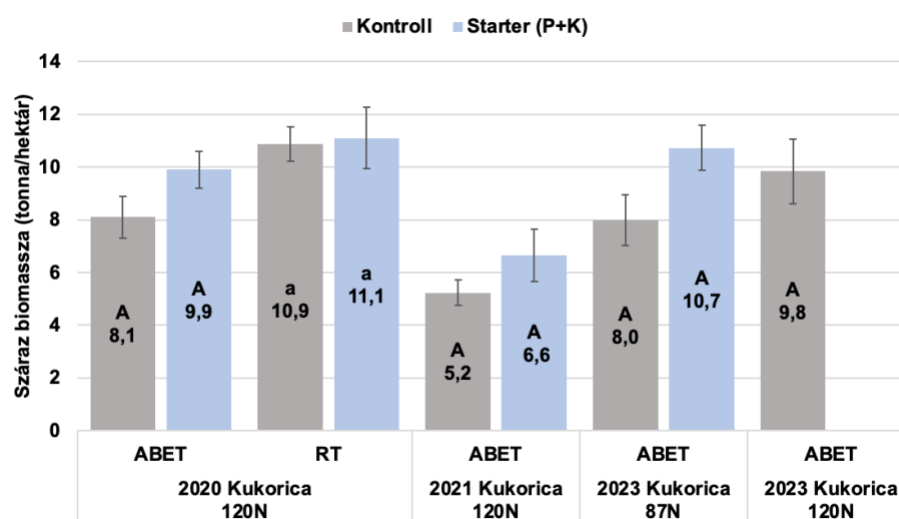
2023 ABET: $n=3$; $F(2,6)=8,154$; $p=0,019$.

Összességében a három vizsgált év alatt a csapadékmennyiségnek szignifikáns hatása volt a termésre, míg a Starter kezelésnek, illetve a kezelés és csapadékmennyiség interakciójának nem mutattuk ki termésbefolyásoló szerepét (13. táblázat).

13. 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 *	Termés	0,085	ns	0,005
Csapadékmennyiség				

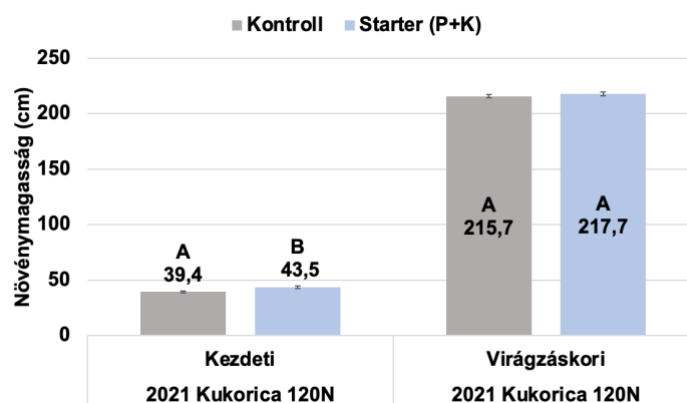
A biomassa eredmények (12. ábra) hasonlóak a terméseredményekhez, szignifikáns különbséget egyik évben sem találtunk a kezelések hatására (bár mérhető volt némi biomassa növekedés).



12. ábra: Száraz biomassa mennyiségének alakulása Starter műtrágya 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 betűk (a, A) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként, ($p < 0,05$).

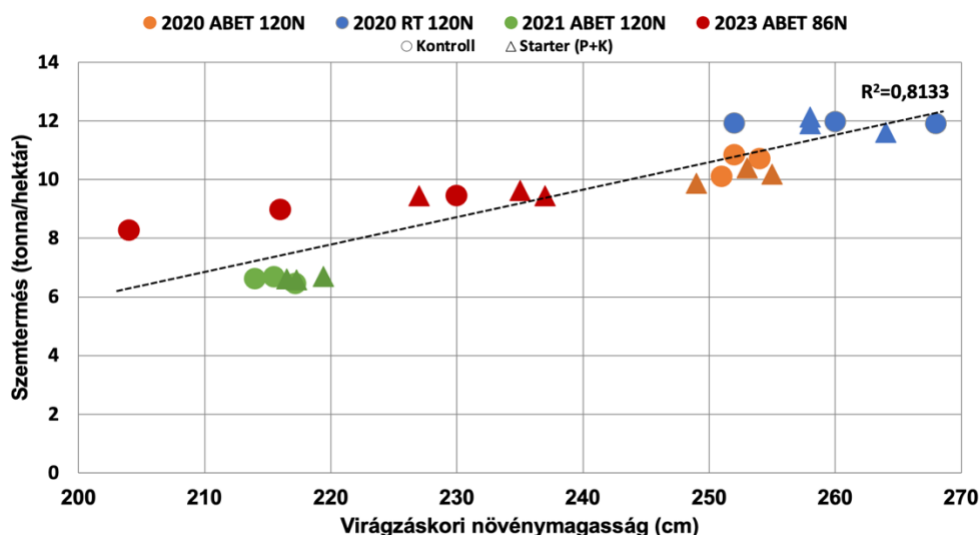
A növénymagasság tekintetében a gyengébb minőségű ABET talajon minden évben megfigyeltük a Starter műtrágya szemmel látható magasság növelő és foszfor hiánytünet csökkentő hatását. Ugyanezt az RT talajon nem tapasztaltuk, melynek a magasabb tápanyagellátás és kedvezőbb pH lehetett az oka. Ez a kezdeti magasság különbség a 2021-es évben (13. ábra) 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 a virágzás idejére minden évben, köztük 2021-ben is kiegyenlített (13. ábra). Feltehetően a növények növekedésük során gyökereikkel jobban elérték a talaj mélyebb rétegeiben lévő tápanyagokat, illetve a talaj felmelegedésével egyidőben a tápanyagok könnyebben felvehetővé váltak, mellyel a kezdeti növekedésbeli különbség kompenzálódott a tenyészidőszak még hátralévő nagyobb hányadában.



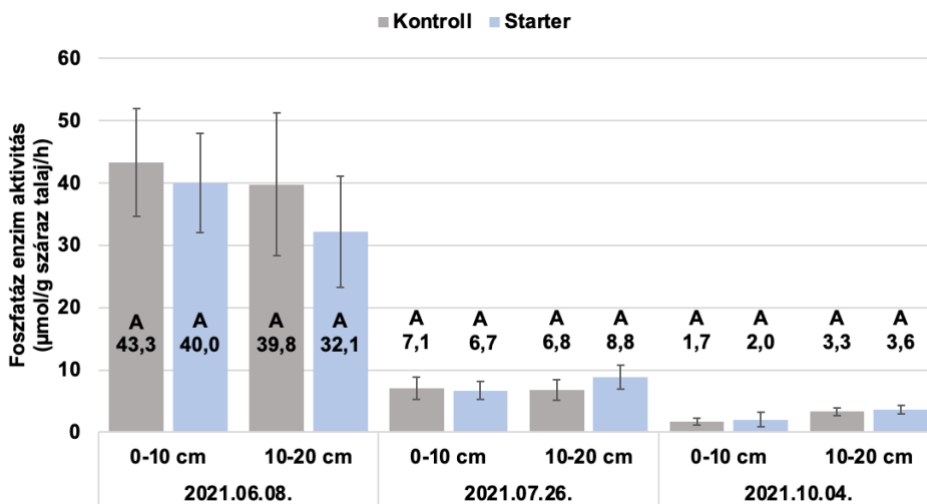
13. ábra: Növénymagasság alakulása Starter műtrágya hatására szabadföldi kísérletben 2021-ben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként ($p < 0,05$)
2021 Kezdeti: $n_{Kontroll}=45$, $n_{Starter}=60$; $F(1,103)=11,033$; $p=0,001$.

A 14. ábra alapján látható a virágzáskori növénymagasság és szemtermés összefüggései kezelésként. Látható, hogy azonos színű, de eltérő szimbólumok többnyire nem különülnek el egymástól, egyik talajon és egyik évben sem, azaz a Starter műtrágya és a kontroll parcellák virágzáskori növénymagassága és termése sem különbözött egymástól. Megfigyelhető azonban az évek eltérő csapadékmennyisége okozta jelentős termés és növénymagasságbeli különbség, tehát a növénymagasságból következtethetünk a várható termésre.



14. ábra: Virágzáskori növénymagasság és szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Starter műtrágya hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek.

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 (15. ábra). A Starter műtrágyázás hatását nem tudtuk kimutatni egyik időpontban és egyik talajmintavételi mélységben sem.



15. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Starter műtrágya hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását mintavételi időpontokként ($p < 0,05$).

Hároméves kísérletünkben a termésre a tenyészidőszak csapadékmennyiségének volt a legnagyobb hatása (13. táblázat), mely hazai körülmények között nagyon gyakori (Nyéki et al., 2021). A 2023-as kísérleteinkben jelentős termésbefolyásoló hatása volt a kijuttatott műtrágya mennyiségének, azonban a felhasznált foszfor tartalmú Starter műtrágya a vizsgált évek egyikében

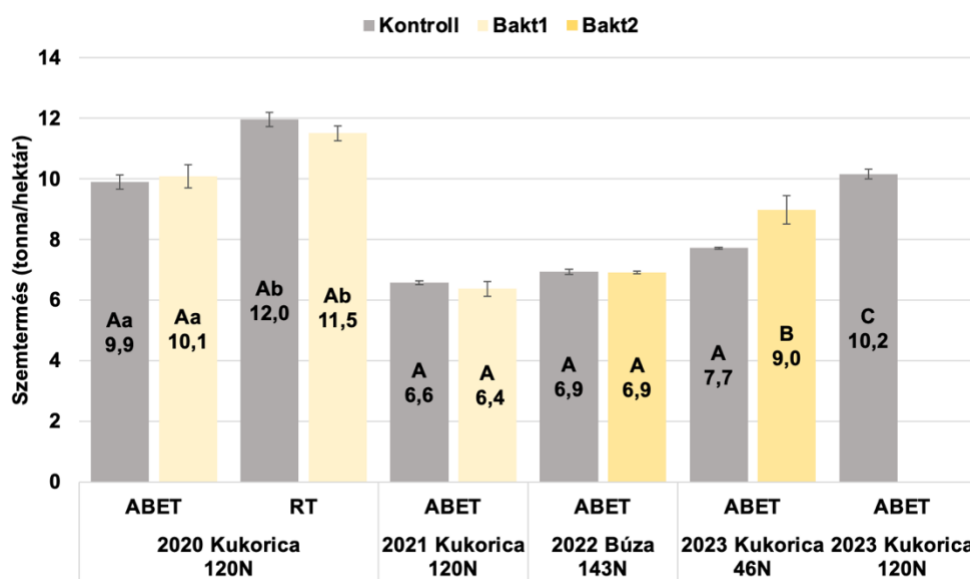
sem tudta növelni a kukorica termését. Hipotézisünk, miszerint a starter műtrágyák alkalmazásának szignifikáns hatása van a kukorica termésére, nem igazolódott. Hasonlót tapasztalt Roller et al. (2022) is, akik számos kukorica hibrid reakcióját vizsgálva megállapították, hogy a kukoricák P-hiány miatti lilulása jelentősen hibridfüggő tulajdonság. Kísérletünkben nem igazolódott Geist et al. (2023) megállapítása miszerint starter foszfor műtrágya alacsony felvehető P mellett javasolt. Kísérletünkben ugyanis az ABET talajon 29 mg/kg felvehető foszfor és 128 mg/kg felvehető kálium és a kijuttatott magas (120N) és közepes műtrágyázás (87N) elegendő volt a használt kukorica hibrid megfelelő fejlődéséhez. Gordon és Pierzynski (2006) szerint a különböző hibridek eltérő gyökérmorfológiája miatt, néhány hibrid jól fejlődik és felveszi a tápanyagokat alacsony talajhőmérséklet mellett is. Több más kutatás, mint Bullock et al. (1993); Vetsch és Randall (2002); Bermudez és Mallarino (2002); Quinn et al. (2020) is kísérletünkhöz hasonló eredményre jutott. Quinn et al. (2020) metaanalízis vizsgálatukban megállapították, hogy a starter műtrágya termésmenővelő 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 termésmenővelő 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. McGrath és Binford (2012) szerint a talaj P tartalmán kívül számos más faktor befolyásolja a starter műtrágya termésmenővelő hatását, köztük a konkrét helyszín és az évjárat. A terméseredmények ellenére a starterrel kezelt növények biomassza tömege (12. ábra) észlelhetően, de nem szignifikánsan meghaladta a Kontroll parcellákét, melynek oka lehet, hogy a kezdeti növekedésbeli különbségek a biomassza tekintetében kevésbé tudtak kiegyenlítődni, és ez a többlet biomassza a talajba kerülve a következő években megtérülést is okozhat.

Margalef et al. (2021) szerint a P műtrágyázás csökkenti a talaj foszfatáz aktivitását. Kísérletünkben mi ezt nem mutattuk ki (15. ábra), melynek lehetséges oka, hogy a Kontroll parcellákat is érintő alpműtrágyázás is tartalmazott P műtrágyát (6. táblázat), melyhez képest a Starter kezelésben részesülő parcellák plusz foszfor mennyisége nem volt elegendő a szignifikáns különbség kialakításához. Eredményeinkhez hasonlóan tapasztalt Almási et al. (2025) hosszútávú szennyvíziszap komposzt kezelés kísérletében, melynek során növekedett a talaj tápanyagtartalma, de nem mérték változás a talajok savas PHO enzimaktivitásában.

A PHO aktivitás időbeli alakulása jól mutatja, hogy a virágzást követő időszak P-felvételi aktivitása jelentősen csökkent.

4.2. 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 termésére (16. ábra). 2020-ban kétféle talajon állítottunk be kísérletet Bakt1 oltással és egyik talajon sem tudtuk kimutatni az oltás szignifikáns hatását, azonban az RT talaj termésére 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 termésmenővelő hatása volt ebben az évben, melyhez hozzájárult az év megfelelő csapadékmennyisége. A feltételezésünk, hogy gyengébb tápanyag-ellátottságú talajon van nagyobb hatása az oltásoknak, csak részben igazolódott.



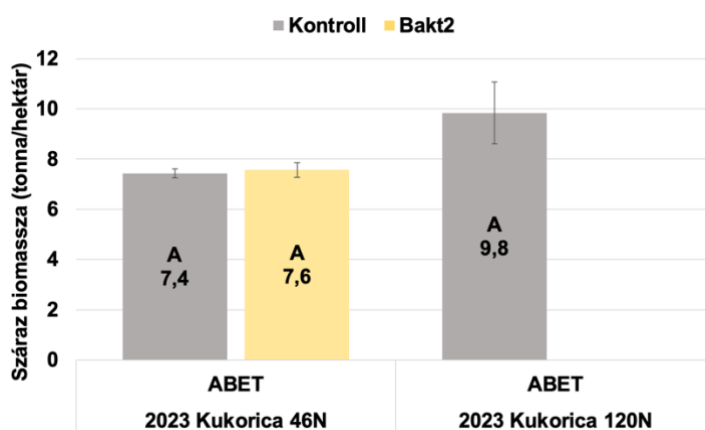
16. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Bakt1 és Bakt2 oltóanyagok hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként, a kis betűk a talajtípus hatását kezelésként (a) ($p < 0,05$)
2020 Talaj: $n=6$; $F(1,8)=38,257$; $p < 0,001$
2023: $n=3$; $n_{Kontroll}=4$ $F(2,7)=24,335$; $p < 0,001$.

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 (14. táblázat). A Bakt1 kezelés és a csapadékmennyiség interakciója nem befolyásolta a termést.

14. 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: * = $p < 0.05$; * = $p < 0.001$.**

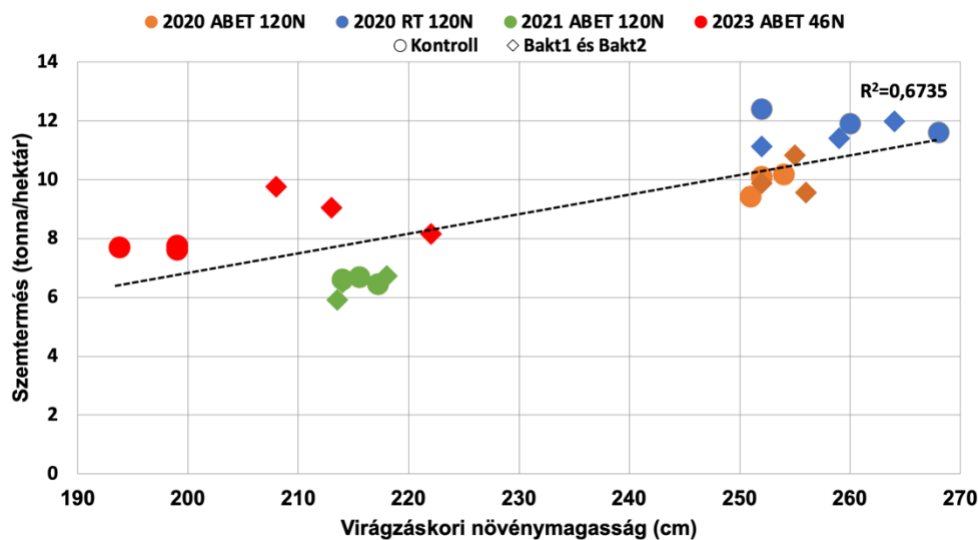
Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Bakt1 kezelés	Termés	0,095	ns	0,009
Csapadékmennyiség	Termés	260,34	***	0,959
Bakt1 kezelés *	Termés	0,351	ns	0,031
Csapadékmennyiség				

A növények biomassa tömegét a 2023-as alacsony műtrágyázás évében mértük (17. ábra), mely ábrán látható, hogy a Bakt2 által okozott termésnövekedés nem okozott arányos biomassa növekedést. Az emelt műtrágya mennyisége az átlagot tekintve jelentős, de nem szignifikáns növekedést okozott a biomassa eredményekben (17. ábra).



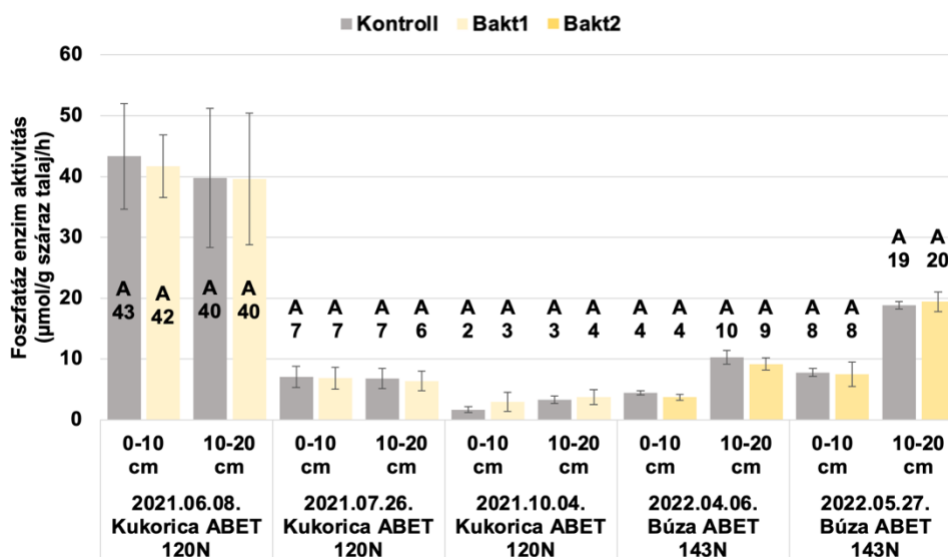
17. ábra: Száraz biomassa mennyiségének alakulása Bakt2 oltás hatására 2023-ban szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) talajon kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását ($p < 0,05$).

A szemtermés és növénymagasság értékeit tekintve (18. ábra), szignifikáns lineáris összefüggés mutatható ki a két paraméter között az összes évet együtt tekintve. Továbbá a 2023-as alacsony műtrágyázási szint esetében (piros szín) látható, hogy a Bakt2 oltás hatására a szemtermés növekedése mellett a növénymagasság is növekedett, az értékek láthatóan elkülönülnek egymástól (18. ábra). Ezek alapján alacsony műtrágyázási szinten (46N) a gyengébb minőségű ABET talajon a növénymagasság előre jelezte a várható termésnövekedést, azonban biomassa növekedést nem mértünk. A többi évben sem a termés, sem a növénymagasság nem változott a baktérium oltások hatására.



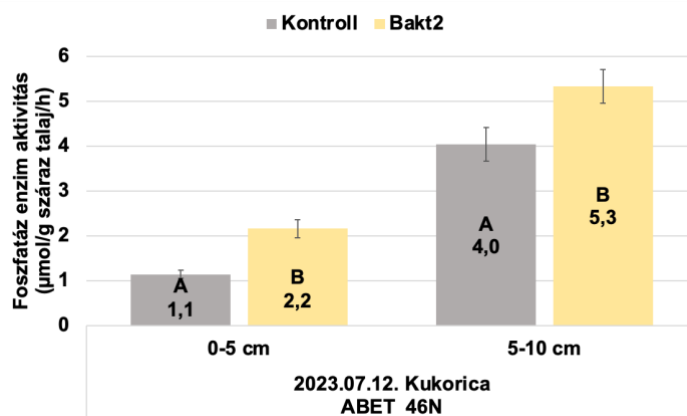
18. ábra: Virágzáskori növénymagasság és szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Bakt1 és Bakt2 oltások hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek.

A Bakt1 és Bakt2 oltások hatását a talajminták PHO aktivitására a 19. ábra mutatja. 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, egyik mintavételi mélységben sem. Ennek lehetséges oka a magas műtrágyázási szint lehetett, mely esetén a növényeknek nem volt szükségük az általunk kijuttatott törzsek és a saját PHO enzim termelésükre és további tápanyagok mobilizálására. A mintavételi mélységek eredményei között a 2022-es évben búza kultúrában tapasztaltunk szignifikáns különbséget, mindkét esetben a mélyebb talajmintában mértünk szignifikánsan magasabb PHO aktivitást.



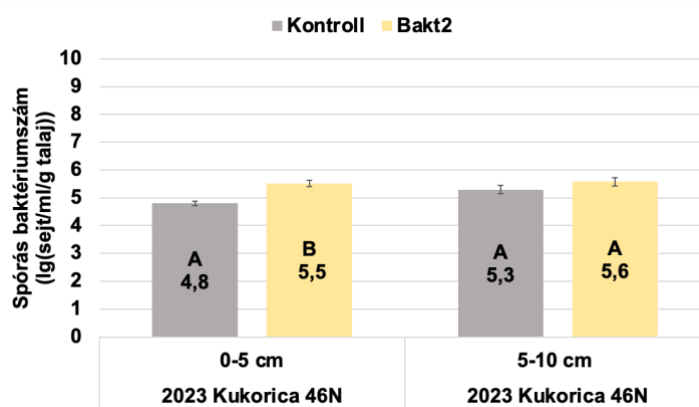
19. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Bakt1 és Bakt2 oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi időpontonként és talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)
 2022.04.06. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=46,365$; $p < 0,001$
 2022.05.27. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=71,337$; $p < 0,001$.

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 (20. ábra). Ezek alapján alacsony műtrágyázási szinten (46N) a növényeknek jobban volt szüksége az általunk kijuttatott baktérium törzsek segítségére, mint a korábbi években magas műtrágyázási szinten (120N, 143N). A virágzáskori PHO enzimaktivitás a növénymagassághoz hasonlóan előre jelezte a baktérium oltás hatására várható terméshozadékot, alacsony műtrágyázási szinten (46N), gyengébb tápanyagellátású ABET talajon (20. ábra).



20. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Bakt2 oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)
 0-5 cm: $n=4$; $F(1,6)=21,269$; $p=0,004$
 5-10 cm: $n=7$; $F(1,12)=6,071$; $p=0,030$.

A talajban lévő spórás baktériumok számát is vizsgáltuk a kísérletben (21. ábra). Az eredményekből látható, hogy a Bakt2 oltás hatására szignifikánsan növekedett a spórás baktériumok száma a 0-5 cm-es talajmintavételi mélységben. Ugyanez a különbség az 5-10 cm-es mélységben nem volt kimutatható.



21. ábra: Spórás baktérium eredmények alakulása Bakt2 oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)
 0-5 cm: $n=6$; $F(1,10)=27,561$; $p < 0,001$.

2023-ban alacsony műtrágyázás mellett (46N), megvizsgáltuk az oltás hatását négy növényi paraméterre (15. táblázat), melyben látszik, hogy az oltásnak a növénymagasságra szignifikáns hatása volt, hasonlóan a növények terméséhez (16. ábra). A gyökérnyak átmérő esetében magasabb átlagértéket mértünk, azonban ez nem különbözött szignifikánsan. A gyökérkapacitás és klorofill tartalom tekintetében nem mutattuk ki az oltás hatását (15. táblázat).

15. táblázat: Virágzáskori növénymagasság, gyökérkapacitás, gyökérnyak átmérő és klorofill tartalom alakulása Bakt2 oltás hatására 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N) szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel.

Növényi paraméterek	F-érték	Kontroll Átlag±Szórás.Szig	Bakt2 Átlag±Szórás.Szig	p
Növénymagasság (cm)	6,022	197,27±18,86a	214,4±19,37b	*
Gyökérkapacitás (nFarad)	0,441	7,43±0,46a	7,32±0,43a	ns
Gyökérnyak átmérő (mm)	1,439	22,66±2,93a	24,11±3,66a	ns
Klorofill tartalom (CCI)	0,147	31,25±5,14a	30,50±4,75a	ns

Négy egymást követő évben beállított kísérleteinkben ABET és RT talajon magas műtrágyázási szinten (143N) nem mutattuk ki a baktérium oltások termésmenvelő hatását búza kultúrában, hasonlóan (Mayer et al., 2010) eredményeihez. Kukorica kultúrákban magas műtrágyázási szinten (120N) sem találtunk oltáshatást, mely megegyezik Kálmán et al. (2024), Pereira et al. (2020) és 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 termésmenvekedést tapasztaltunk az oltás hatására kukoricában, melynek oka a talaj alacsony tápanyagtartalmában keresendő, hasonlóan Galindo et al. (2024), Mäder et al. (2011) és Makádi et al. (2007) megállapításaihoz. Hipotézisünk, miszerint a talajtípus és a műtrágyázás meghatározzák a baktérium oltások eredményességét, részben igazolódott.

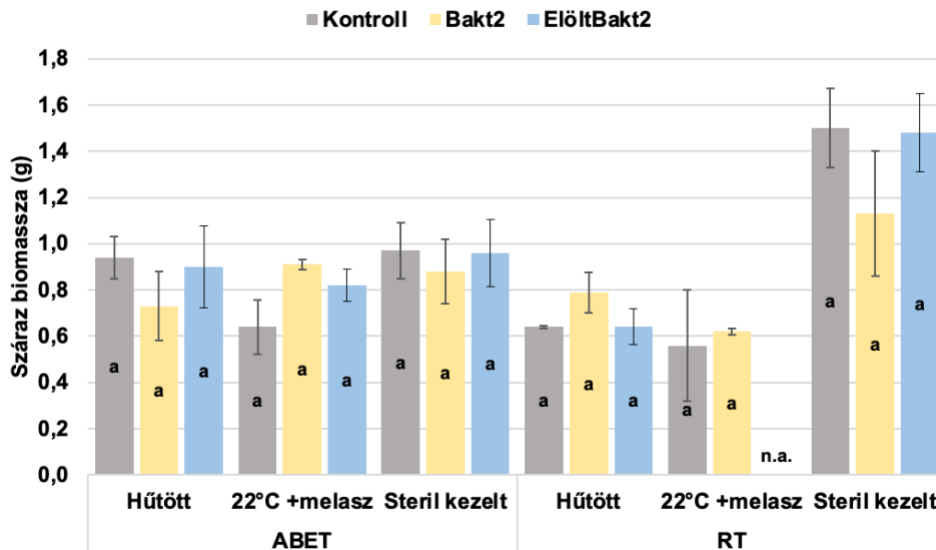
Fulchieri és Frioni (1994) alacsony humusztartalmú homokos vályogtalajon végzett kísérletükben megállapították, hogy kukoricában három *Azospirillum* faj keverékével történő oltás, műtrágyázás nélkül helyettesítette 60 kg N hatóanyag hatását. Khan és Zaidi (2007) kísérletükben műtrágyázás nélkül alacsony szervesanyag tartalmú homokos vályogtalajon különböző baktérium oltásokkal növelték a búza termését. A szakirodalomban azonban neutrális eredmények is találhatók. Például Hett et al. (2023) kukorica kísérletük alapján nem tudták igazolni, hogy a mikrobiális oltás hatékonyabb alacsonyabb tápanyagutánpótlású rendszerekben, illetve búza esetén is többen beszámolnak alacsony műtrágyázás melletti elmaradt oltáshatásról (Dal Cortivo et al., 2018; Di Salvo et al., 2018b; Naiman et al., 2009). Dal Cortivo et al. (2018) szerint az oltáshatást az éghajlat, a növény genetikája és a talajban lévő eredeti mikroba közösség befolyásolja. Mehnaz et al. (2010) alacsony humusztartalmú vályogos homoktalajon, 55 kg/ha N és 110 kg műtrágyázás mellett nem tudták kimutatni a baktérium oltások hatását, melynek

lehetséges okát a baktériumok kijuttatás utáni nem megfelelő túlélésében és a gyenge növényi felhalmozódásukban látják. Eredményünk nem erősíti meg Pabar et al. (2024) eredményét, miszerint az agyagosabb talajszerkezet jobban kedvez a kijuttatott oltóanyagok hatékonyságának. A magas műtrágyafelhasználás éveiben a kijuttatott és talajban lévő tápanyagok véleményünk szerint elegendőek voltak a növények megfelelő fejlődéséhez, a növényeknek nem volt szükségük a kijuttatott törzsek tápanyag-mobilizálására.

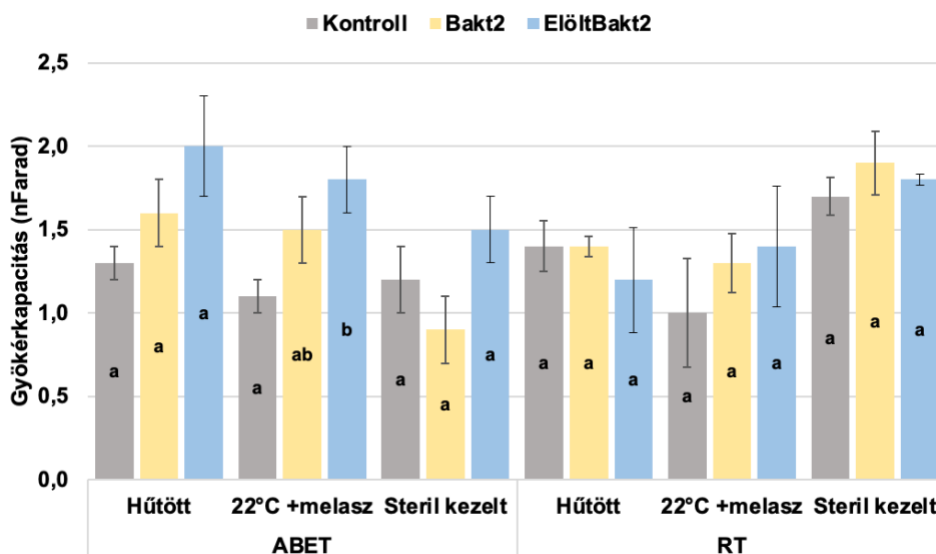
Fontos növény növekedési paraméter a növénymagasság, mely alacsony műtrágyaszintű kísérletünkben képes volt előre jelezni az oltás hatását. Továbbá az oltáshatást kísérletünkben jelezte még a PHO enzimaktivitás növekedés, mely összhangban van Campdelacreu Rocabrana et al. (2024) megállapításával, miszerint hasznos mikrobák használata növelheti a PHO aktivitást és a teljes mikrobiális aktivitás pozitív kapcsolatban van a PHO aktivitással. Véleményünk szerint az oltással kijuttatott mikrobák a növények igénye szerint termelik a tápanyagmobilizáló PHO enzimet, és mivel 2023-ban nem juttatunk ki P műtrágyát ezért a növényeknek nagyobb szükségük volt a kijuttatott mikrobák tevékenységére, és ők maguk is termelhettek PHO enzimet (Lopes E Silva et al., 2023; Margalef et al., 2021). Hipotézisünk, miszerint az talajbiológiai és növény növekedési paraméterek előrejelezhetik a baktérium oltások hatását, részben igazolódott.

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

Steril kezeléssel, tenyészedény modell kísérletben vizsgáltuk a különböző talajkezelések és azon belül a kétféle baktériumos oltás (Bakt2 és ElöltBakt2) hatását a kukorica növények száraz biomasszájára (22. ábra) és gyökérkapacitására (23. ábra). 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.



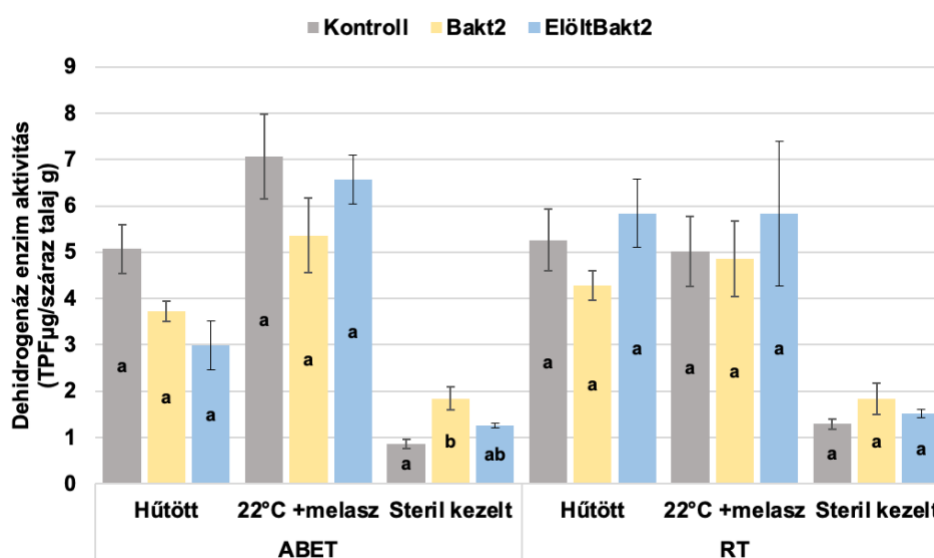
22. ábra: Száraz biomasza mennyiségének alakulása Bakt2 és ElöltBakt2 oltóanyagok hatására tenyészedényes kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (a) jelzik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



23. ábra: Gyökérkapacitás értékek alakulása Bakt2 és ElöltBakt2 oltóanyagok hatására tenyészedényes kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (a, b) jelzik a kezelés hatását talajkezelésenként ($p < 0,05$)
 ABET, 22°C +melasz: $n=4$; $F(2,9)=5,027$; $p=0,034$.

Steril kezeléssel, tenyészedényes modell kísérletben vizsgáltuk továbbá a különböző talajkezelések és azon belül a kétféle oltás (Bakt2 és ElöltBakt2) DHA enzimaktivitásra gyakorolt hatását (24. ábra). 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

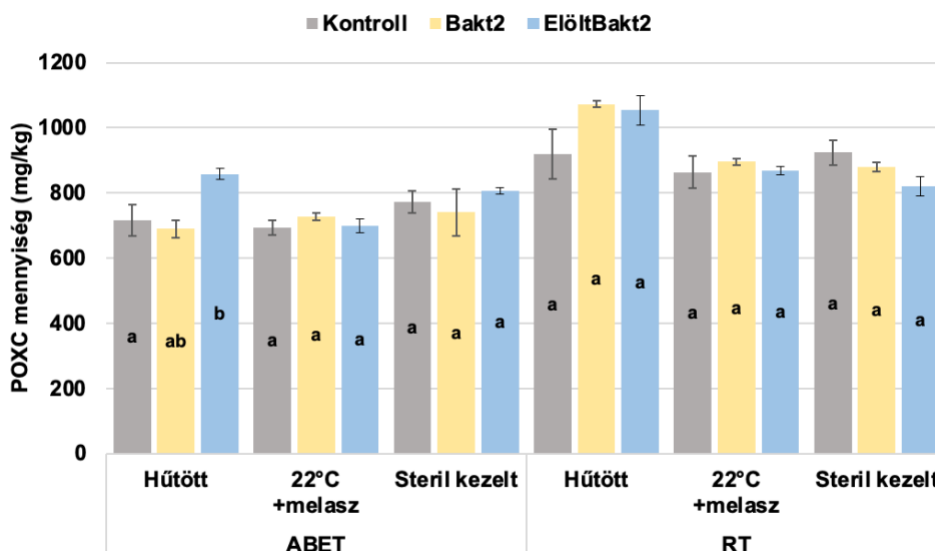
tápanyagellátású és biológiai aktivitású ABET talajon ez szignifikáns különbséget eredményezett. A másik két talajkezelésnél A Bakt2 oltás nem befolyásolta a talajminták DHA aktivitását. Az oltóanyag elölt verziójának hatását nem mutattuk ki a steril kezelés esetében, mivel a Kontroll és Bakt2 oltás közti értéket eredményezte, egyiktől sem különbözött szignifikánsan (24. ábra). Az ABET talaj esetében a melasszal biztosított felvehető cukrok nagyobb DHA enzimaktivitást eredményeztek az RT talajhoz viszonyítva.



24. 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 talajkezelésként ($p < 0,05$)

ABET, Steril kezelt: $n=4$; $F(2,9)=9,770$; $p=0,006$.

Mértük a talajminták labilis szén tartalmát, de a steril kezelés hatását nem mutattuk ki egyik talajtípuson sem. Ennek lehetséges oka, hogy a steril kezeléssel elölt baktérium tömeg széntartalma a talajmintákban maradt, mely szintén a labilis szén által mért paraméter (25. ábra). Az RT talajon a hűtött talajmintáknál látható a labilis szén tartalomban növekedés. Ezen kívül az oltások hatását nem mértük labilis szén tartalom változásban. A két talajtípus értékei között azonban megfigyelhető szignifikáns különbség minden esetben az RT talaj javára, amit annak a nagyobb felvehető tápanyagtartalmával és a szerves anyagokat aktívabban hasznosítani képes biológiai aktivitással magyarázhatunk.



25. ábra: Labilis szén (POXC) 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, b) jelzik a kezelés hatását talajkezelésenként ($p < 0,05$)

ABET, Hűtött: $n=4$; $F(2,9)=6,642$; $p=0,017$.

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 baktériumtömeg 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, Simonné Dudás, 2021) által megállapítottakkal. Hipotézisünk, miszerint a talaj őshonos baktérium közössége a kijuttatott baktérium készítmény hatását befolyásolja, de a hatás függ a talaj tápanyag ellátottságától, igazolódott.

A talajban lévő baktérium közösség az általunk kijuttatott baktérium készítmény hatását jelen esetben visszafogta, mely ellentétes Dias et al. (2018) megállapításaival. Az általa tesztelt mikorrhiza gomba készítmények alkalmazásánál, a sterilizált körülmények között elmaradt a mikorrhiza hatás. Ennek oka az lehet, hogy a sterilizálás többlet tápanyagokat tár fel a talajban, ami javítja a növények biomasszá-termelő képességét. A nagyobb, lazább szerkezetű és mikorrhiza-mentes növényekben a parazita nematódák nagyobb mértékű fertőzése is bekövetkezett. A labilis szén a talajban a baktériumok előléréssel szignifikánsan nem, vagy csak tendenciájában változott, vagyis az élőlények és a fizikai kémiai abiotikus tényezők által feltárt,

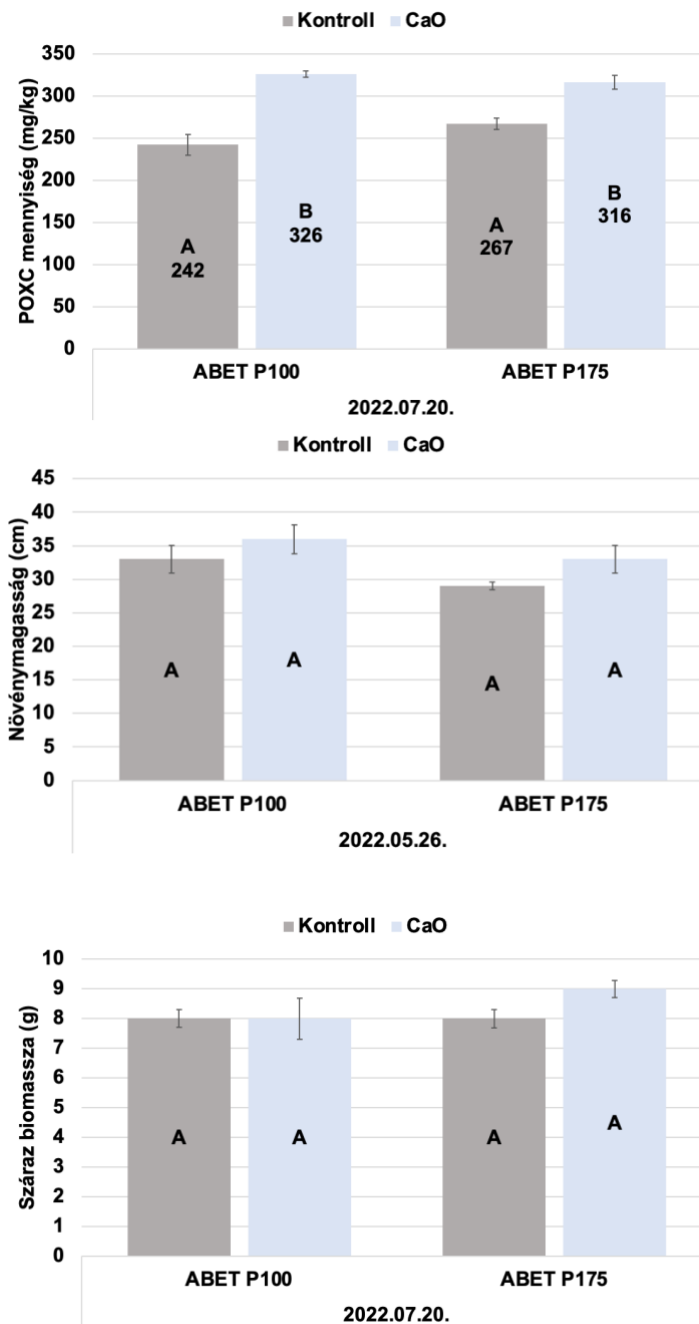
valamint a frissen elhalt szerves anyagokat is kimutató paraméter itt nem volt alkalmas a mikrobiális változások nyomonkövetésére.

A szabályozott körülmények között zajlott tenyészedényes kísérletben a Bakt2 oltóanyag önmagában a szabadföldi kísérlethez hasonlóan sem tudta kifejteni pozitív hatását, mely arra enged következtetni, hogy nem a szabadföldi kísérletekben lévő adott évi időjárási körülmények okozták az oltáshatás elmaradását. A modellkísérlet eredményei alapján is az oltóanyagoktól várható hatás korlátozott.

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

4.4.1. Meszezés hatása a P mobilizálásra, tenyészedényes kísérletben

Tenyészedényes kísérletben vizsgáltuk a talaj kémhatás és meszezés hatását a növényi növekedésre és az általános talajbiológiai aktivitásra a talaj tápanyag-tartalom függvényében. 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. Ennek oka, hogy a talajok kémhatása jelentősen befolyásolja a biológiai aktivitást, melyet a CaO kezelés közvetve a kémhatás emelésével szignifikánsan növelt. A labilis szén mérése jól szemlélteti a biológiai aktivitás különbségét tenyészedényes körülmények között. A növénymagasságot és a biomassza termelést figyelembe véve magasabb átlag értékeket mértünk a meszezés hatására, azonban egyik eredmény sem volt szignifikáns, csak tendenciájában alakult ki (26. ábra). Ennek okaként feltételezzük, hogy a tenyészedény mérete is befolyásoló tényező, ami akadályozhatta a kukorica növények megfelelő növekedését. A meszezés következtében a talajminták KCl-os pH értéke 11 hét alatt 4,91-ről 7,43-ra emelkedett a kísérlet végére.



26. ábra: Labilis szén (POXC), a növénymagasság és a száraz biomasza alakulása CaCO₃ meszezés hatására tenyészedényes kísérletben 2023-ban, kétféle P tartalmú agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását ($p < 0,05$)

Labilis szén, ABET P100: $n=4$; $F(1,6)=41,134$; $p < 0,001$

Labilis szén, ABET P175: $n=4$; $F(1,6)=21,666$; $p=0,003$

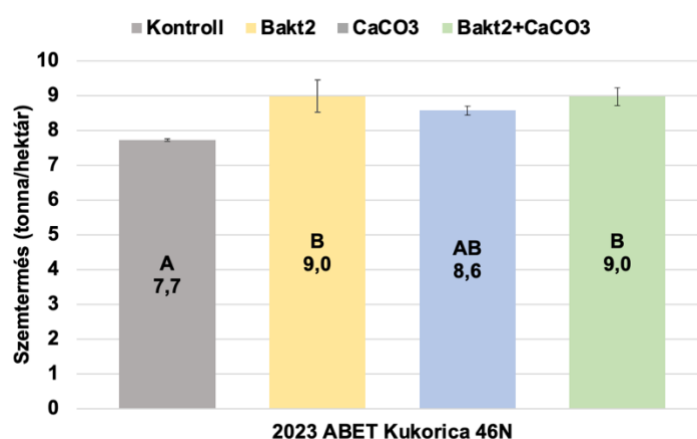
Száraz biomasza, ABET P175: $n=4$; $F(1,6)=5,673$; $p=0,055$.

A talaj meszezéssel történő pH javítása során a tenyészedényes kísérletben nem tudtunk kimutatni növényi növekedés serkentést, sem nagyobb biomasza produkciót és növénymagasság növekedést sem. A talajminták labilis szén mennyisége azonban szignifikánsan nőtt vélhetően a meszezés hatására bekövetkező nagyobb biológiai aktivitás miatt. Hipotézisünk, miszerint a talaj

biológiai aktivitása javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj pH meszezésével, igazolódott. 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.

4.4.2. Meszezés hatása a baktériumos oltásokra szabadföldi kísérletben

A korábbiakban bemutatott Bakt2 oltás mellett a 2023-as alacsony műtrágyázási szinten (46N), szabadföldön talajjavító meszezést is alkalmaztunk, továbbá kombináltuk a Bakt2 oltással a savas pH-jú ABET talajon. Mértük a meszezés pH emelő hatását a virágzaskori 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 terméseredményeket tekintve látható, hogy 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 (27. ábra).



27. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Bakt2 oltóanyag, CaCO₃ és Bakt2xCaCO₃ kombinációja esetén 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A) jelzik a kezelés hatását ($p < 0,05$) $n=3$, $n_{Kontroll}=4$; $F(3,9)=6,327$; $p=0,013$.

A növénymagasság tekintetében a három kezelést vizsgálva a meszes és a kombinált kezelés hatására tapasztaltunk szignifikáns különbséget (16. táblázat), 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.

16. táblázat: Virágzáskori növénymagasság, gyökérkapacitás, gyökérnyak átmérő és klorofill tartalom alakulása Bakt2 oltás, CaCO₃ meszezés és azok kombinációja hatására 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N) szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel.

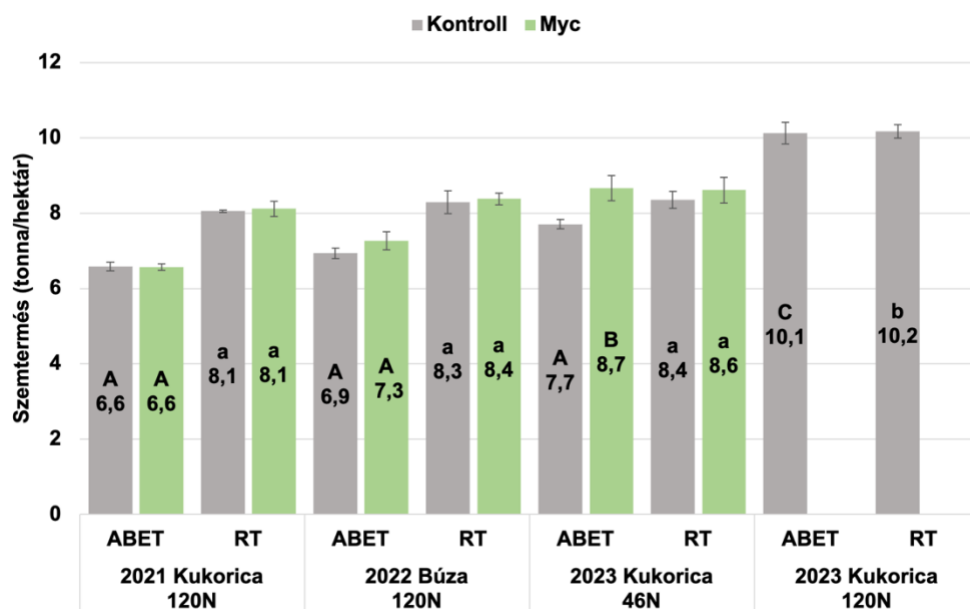
Növényi paraméterek	F-érték	Kontroll	Bakt2	CaCO ₃	Bakt2+CaCO ₃	P
		Átlag±Szórás.Szig	Átlag±Szórás.Szig	Átlag±Szórás.Szig	Átlag±Szórás.Szig	
Növénymagasság (cm)	3,400	197,27±18,86a	214,4±19,37a	218,53±26,19b	217,93±18,80b	*
Gyökérkapacitás (nFarad)	2,337	7,43±0,46a	7,32±0,43a	7,15±0,41a	7,10±0,15a	ns
Gyökérnyak átmérő (mm)	1,577	22,66±2,93a	24,11±3,66a	21,52±3,18a	22,79±3,11a	ns
Klorofill tartalom (CCI)	4,073	31,25±5,14b	30,50±4,75b	25,02±5,20a	29,86±6,44ab	*

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), Brozović et al. (2023), Ocaña-Reyes et al. (2024), Opala (2017), és Kovačević és Rastija (2010) eredményeihez. Feltehetőleg a pH emelésével csökkentheti a talajban az alumínium által kötött P mennyiségét (Bossolani et al., 2022; Wakwoya et al., 2022), így növelve a felvehető P mennyiségét (Haynes, 1982), ami a dunántúli barna erdőtalajokon nagyon fontos lenne. Kovačević és Rastija (2010) meszezési kísérletében a meszezés hatására növekedett a P, Ca, Mg és Mo koncentráció a kukorica levelekben, míg a Mn csökkent. A tápanyagellátáson kívül a meszezés javíthatja továbbá a gyökérzet állapotát, a növények vízellátását, így a növények szárazságtűrését (Brozović et al., 2023). Kísérletünkben igazolódott, hogy a meszezés a pH emelésével hozzájárulhatott a biológiai aktivitás növekedéséhez, ezáltal a talajban kötött állapotban lévő tápanyagok jobb feltáráshoz, azonban az általunk kijuttatott baktérium törzsek meszezés nélkül is kifejtették szignifikáns terménynövelő hatásukat az ABET talajon. Hipotézisünk, miszerint a baktérium oltás hatékonysága javítható savanyú barna erdőtalajon a talaj pH meszezésével, nem igazolódott.

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

A szabadföldi kísérletben a terméseredményeket tekintve (28. 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 termés hozamra nem volt szignifikáns hatással az oltás, továbbá ezen a tápanyagellátottsági szinten is megfigyelhető volt a RT talajon a Kontroll kezelés szignifikáns terméslőnye 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 csapadékellátású volt, mely hozzájárult a konvencionális mennyiségű műtrágya felvehetőségéhez (Pepó, 2018). Azonos műtrágyázási szinten a csapadékmennyiség a 2021-es és 2023-as évek között 60,4% terméstöbbletet okozott az ABET talajon és 46,6%-ot az RT talajon. A szárazabb 2021-es évben látható az RT talaj terméslőnye az ABET-hez képest, amely a nagyobb víz- és tápanyag-kapacitásnak köszönhető. 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 (17. táblázat).

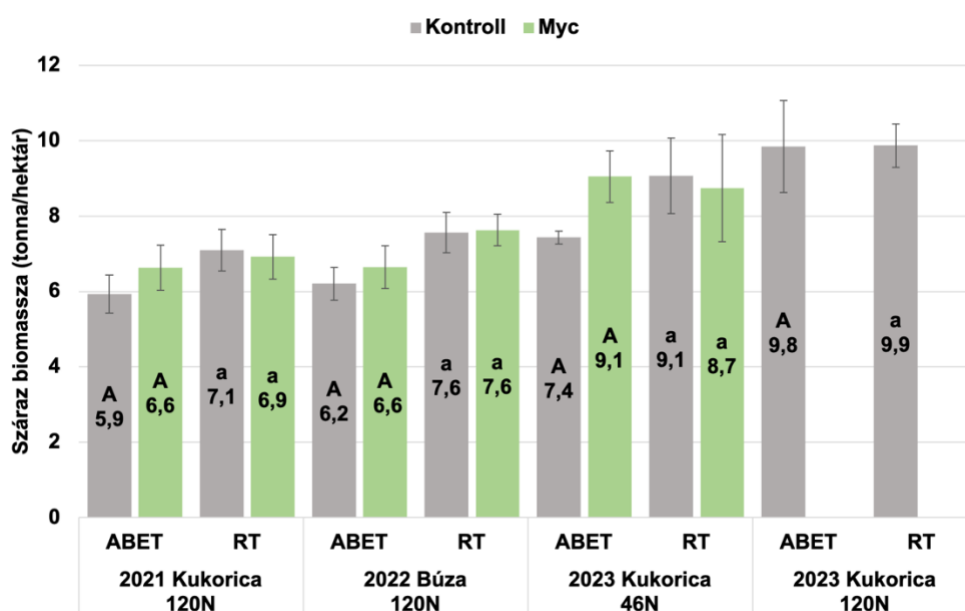


28. ábra: Szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását az ABET talajon, míg a kis betűk (a, b) a kezelés hatását az RT talajon ($p < 0,05$)
2023 ABET: $n=3$; $n_{kontroll}=4$ $F(2,7)=77,077$; $p < 0,001$
2023 RT: $n=3$; $n_{kontroll}=4$ $F(2,7)=16,280$; $p=0,002$.

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

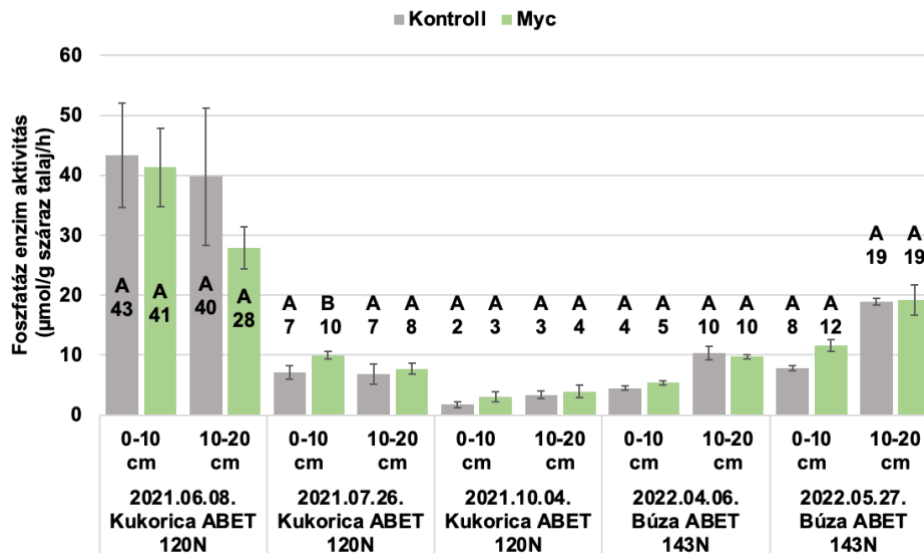
Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Talajtípus	Termés	36,027	***	0,818
Csapadékmennyiség	Termés	510,363	***	0,985
Talajtípus * Csapadékmennyiség	Termés	34,454	***	0,812

A biomassa eredmények (29. ábra) nagyjából követik a szemtermés eredményeket, azonban nem tudunk szignifikáns különbségeket kimutatni a Myc oltás hatására. A 2023-as évben az eltérő műtrágyával kezelt Kontroll parcellák esetében sem mértünk szignifikáns biomassa növelő hatást a N-trágyázás hatására (bár az átlagok növekvő tendenciát mutattak).



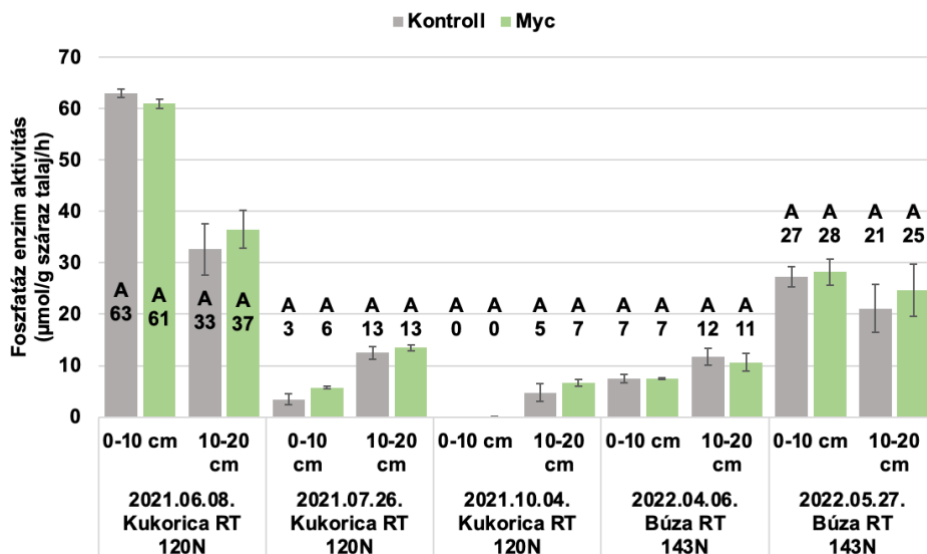
29. ábra: Száraz biomassa mennyiségének alakulása Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk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

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 (30. ábra és 31. ábra). A mintavételi időpontok közötti PHO eredmények között jelentős különbséget tapasztaltunk.



30. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Myc oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi időpontonként és talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)

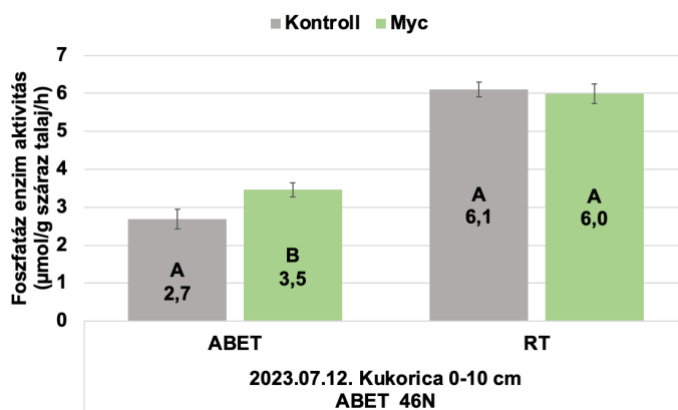
2021.07.26. Kezelés: $n=6$; $F(1,10)=5,270$; $p < 0,045$
 2022.04.06. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=59,995$; $p < 0,001$
 2022.05.27. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=36,827$; $p < 0,001$.



31. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Myc oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi időpontonként és talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)

2021.06.08. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=175,738$; $p < 0,001$
 2021.07.26. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=59,149$; $p < 0,001$
 2021.10.04. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=52,583$; $p < 0,001$
 2021.04.06. Mélység: $n=6$; $F(1,8)=9,055$; $p = 0,017$.

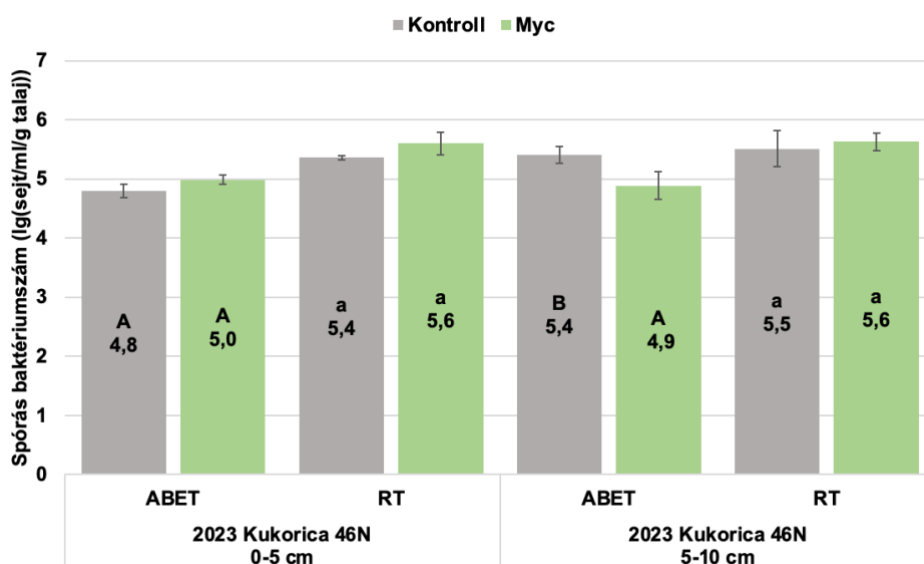
Az alacsony műtrágyázás évében (46N), 2023-ban szignifikáns növekedést mértünk PHO aktivitásban a Myc kezelés hatására az oltatlan azonos műtrágyázású Kontrollhoz képest a gyengébb minőségű ABET talajon (32. ábra). A RT talajon azonban nem volt szignifikáns a különbség.



32. ábra: Foszfátáz enzim alakulása Myc oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását talajtípusonként ($p < 0,05$)

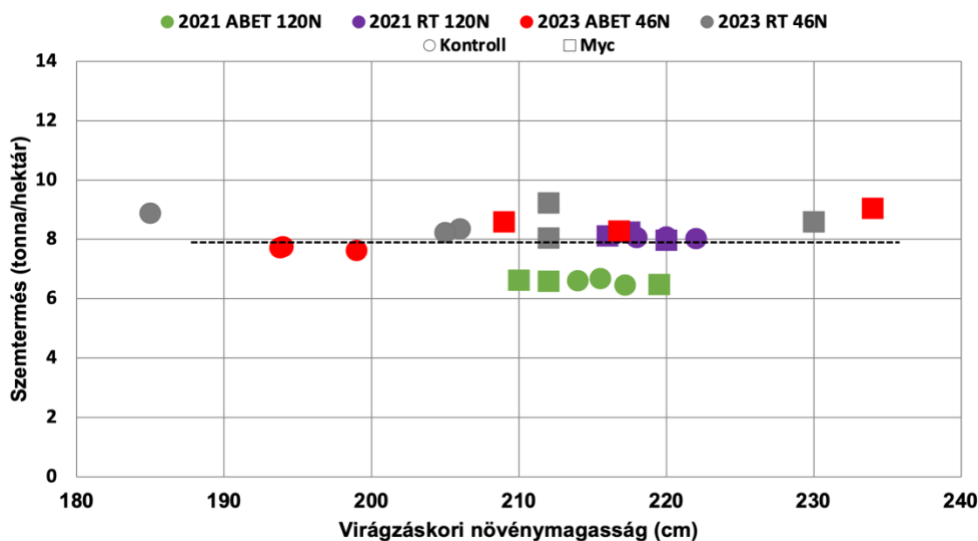
2023 ABET: $n=8$; $F(1,14)=6,463$; $p=0,023$.

A talajban lévő spórás baktériumok számát vizsgálva (33. ábra) megállapítható, hogy a gyengébb minőségű ABET talajon 5-10 cm-es mintavételi mélységben a Myc oltás hatására csökkent a talajban lévő spórás baktériumok száma, melynek oka az lehetett, hogy a mikorrhiza ellátta a növényt a megfelelő és hiányzó foszforral, így a spórás baktériumok foszfor mobilizáló képességére már kevésbé lehetett szüksége a növényeknek. A baktérium szám csökkenését, ha a növényi foszfor igény más úton kerül kielégítésre, ennek tudhatjuk be (Posta és Füleky, 1997).

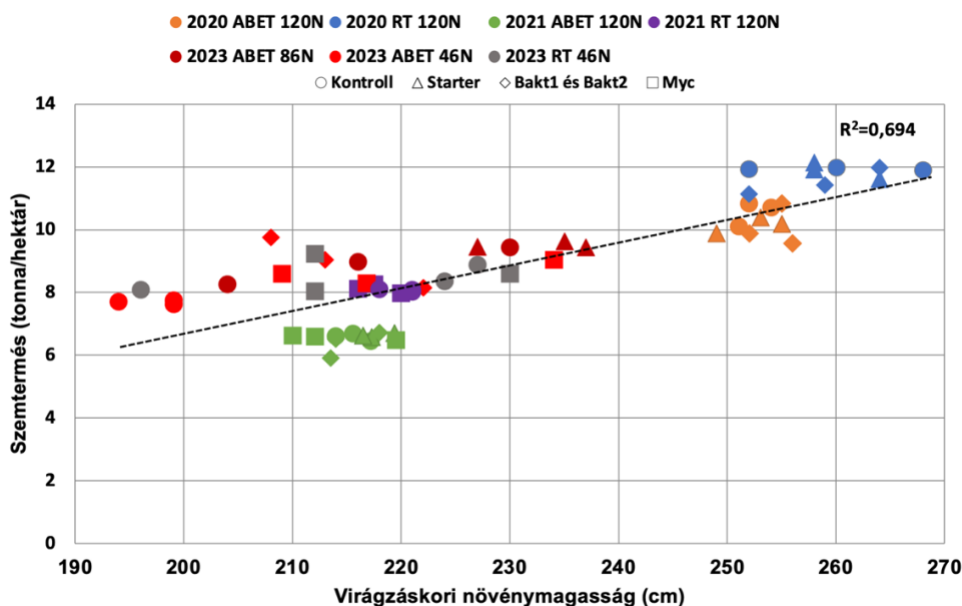


**33. ábra: Spórás baktérium eredmények alakulása Myc oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$)
5-10 cm: $n=6$; $F(1,10)=9,506$; $p=0,012$.**

A 34. ábra bemutatja a kukorica növénymagasság és szemtermés összefüggéseit kezelésként. Szignifikáns lineáris összefüggés nem mutatható ki a két paraméter között a vizsgált két kukorica évet együtt tekintve. Azonban a 2023-as alacsony műtrágyázási szint (46N) esetében a Myc oltott és Kontroll növények magassága és termése is jelentősen elkülönül egymástól az ABET talajon, valamint szignifikáns lineáris összefüggés van a két paraméter 2023 évi értékei között ($R^2=0,8493$). A 2023-évi RT talaj eredményei, valamint a 2021 évi magas műtrágyázás esetében (120N) azonban a szemtermés és a növénymagasság között nincs egyértelmű lineáris kapcsolat. A 35. ábrán látható a növénymagasság és szemtermés összefüggése a Starter kísérletek, a baktérium és mikorrhiza oltási kísérletek esetén együttesen. A többféle kísérleti eredmények együttes vizsgálata alapján erős szignifikáns korreláció van a kukorica virágzáskori növénymagassága és a szemtermése között.



34. ábra: Virágzáskori növénymagasság és szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek.



35. ábra: Virágzáskori növénymagasság és szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) Starter kezelés, Bakt1, Bakt2 oltás és Myc oltás hatására szabadföldi kísérletekben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) teszt növényvel. Átlag értékek.

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 (18. táblázat). Továbbá a talajtípusnak is szignifikáns hatása volt ebben az évben a növényi paraméterekre, kivéve a növénymagasságot. A kezelés és a talajtípus interakciója szignifikánsan hatott a gyökérkapacitásra és a klorofill tartalomra, tehát a mikorrhiza oltás hatása különbözött a két talajtípuson. 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 (19. táblázat). Az ABET talajon a Myc oltás hatására szignifikáns növekedést tapasztaltunk növénymagasságban, gyökérkapacitásban és klorofill tartalomban. Az RT talajon hasonló eredményeket tapasztaltunk, azonban a klorofill tartalom helyett a gyökérnyak átmérőben mértünk szignifikáns emelkedést.

18. táblázat: A Myc kezelés és a talajtípus interakciói (MANOVA) a növényfejlődési paraméterekre 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N). A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = $p < 0.05$; * = $p < 0.001$.**

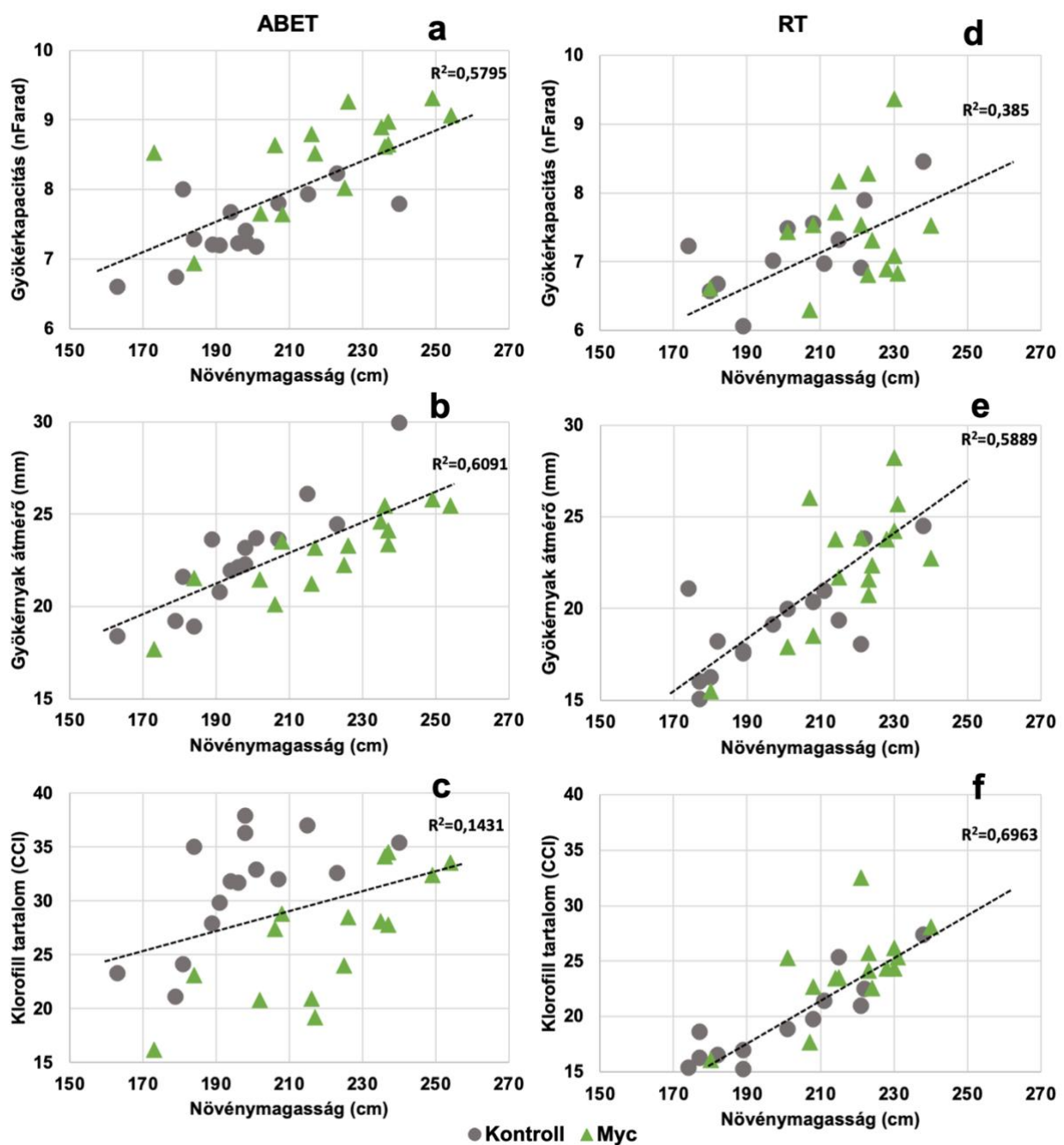
Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Myc kezelés	Növénymagasság	18,32	***	0,25
	Gyökérkapacitás	20,01	***	0,26
	Gyökérnyak átmérő	5,65	*	0,92
	Klorofill tartalom	0,41	ns	0,01
Talajtípus	Növénymagasság	0,00	ns	0,00
	Gyökérkapacitás	20,49	***	0,26
	Gyökérnyak átmérő	7,03	*	0,11
	Klorofill tartalom	36,95	***	0,39
Myc kezelés	Növénymagasság	0,12	ns	0,00
	Gyökérkapacitás	2,48	ns	0,04
Talajtípus	Gyökérnyak átmérő	4,34	*	0,07
	Klorofill tartalom	15,97	***	0,22

19. táblázat: Virágzáskori növénymagasság, gyökérkapacitás, gyökérnyak átmérő és klorofill tartalom alakulása Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényen.

Növényi paraméterek	Talajtípus	Kontroll N46	Myc N46	p
		Átlag±Szórás.Szig.	Átlag±Szórás.Szig.	
Növénymagasság (cm)	ABET	197,27±18,86a	220,33±22,85b	*
	RT	198,73±19,76a	218,33±14,91b	*
Gyökérkapacitás (nFarad)	ABET	7,44±0,46a	8,50±0,67b	***
	RT	6,92±0,78a	7,43±0,77a	ns
Gyökérnyak átmérő (mm)	ABET	22,66±2,93a	22,87±2,23a	ns
	RT	19,21±2,69a	22,46±3,32b	*
Klorofill tartalom (CCI)	ABET	31,25±5,14a	26,63±5,75a	*
	RT	18,97±3,88a	24,09±3,83b	***

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 (36. ábra). Az ABET talajon erős lineáris kapcsolatot találtunk a növénymagasság és gyökérkapacitás ($R^2=0,5795$),

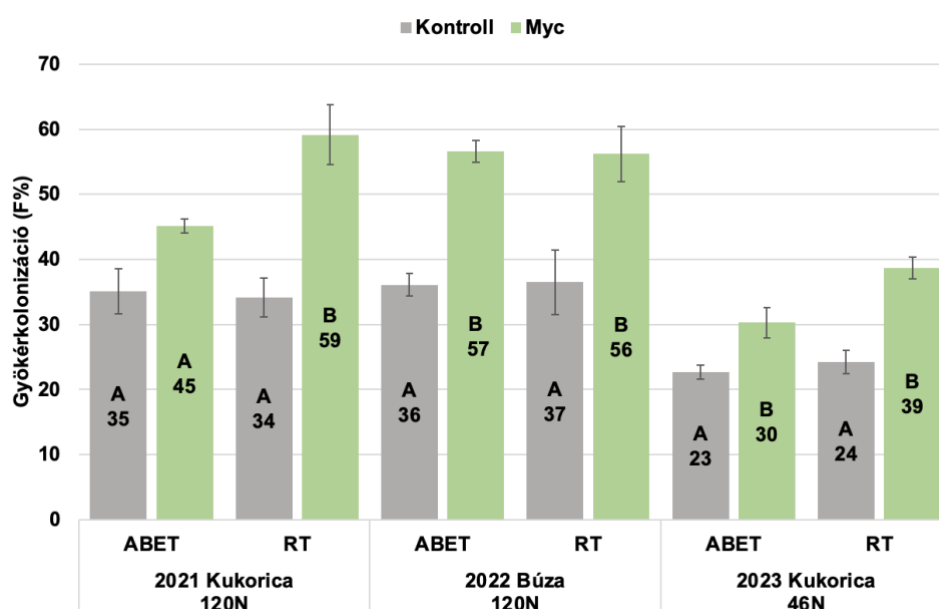
valamint a növénymagasság és gyökérnyak átmérő között ($R^2=0,6091$). Az RT talajon szintén erős lineáris kapcsolatot találtunk a növénymagasság és gyökérkapacitás ($R^2=0,5889$), valamint a növénymagasság és klorofill értékek között ($R^2=0,6963$).



36. ábra: A növénymagasság és egyéb növényi paraméterek közti lineáris kapcsolat szabadföldi kísérletben 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényel.

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 gyökérkolonizáció 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 (120N) (37. ábra). Mivel nem volt minden évben több N-dózissal beállítva a kísérlet, nem tudjuk egyértelműen megállapítani, hogy az időjárás vagy a műtrágyázási szint volt jelentősebb hatással a növény-gomba kölcsönhatás kialakulására. 2023-ban jelentősen több, és megfelelő eloszlású csapadék hullott, ami növelhette a talaj tápanyagainak hozzáférhetőségét, így a növényeknek kevésbé volt szüksége a gombára és a szimbiózisra, mint a száraz, 2021-es évben. Hasonló következtetésre jutott Colla et al. (2015) kétéves szabadföldi kísérletben őszi búzában magas N-műtrágyázási szinten, továbbá más termesztett növénynél is ismert a mikorrhiza oltás pozitív hatása a szárazságstresszel szembeni ellenálló képességére (Nemeskéri et al., 2023; Posta és Hong Duc, 2020). Az irodalomban azonban vitatott, hogy a vízellátottságnak egyértelműen szignifikáns hatása lenne a kukorica vagy az őszi búza gyökérkolonizációjára (Al-Karaki et al., 2004; Sylvia et al., 1993).



37. ábra: Gyökérkolonizáció százalékos mennyiségének alakulása Myc oltás hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) teszt növényekkel. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő nagy betűk (A, B) jelzik a kezelés hatását talajonként ($p < 0,05$)

2021 RT: $n=3$; $F(1,4)=20,455$; $p=0,011$

2022 ABET: $n=3$; $F(1,4)=55,115$; $p=0,002$

2022 RT: $n=3$; $F(1,4)=8,987$; $p=0,040$

2023 ABET: $n=3$; $F(1,4)=9,091$; $p=0,039$

2023 RT: $n=3$; $F(1,4)=35,158$; $p=0,004$.

Hároméves kísérletünkben a termésre (28. ábra) a csapadékmennyiségnek (17. táblázat) volt a legnagyobb hatása, amely a műtrágyázás termésmenvelő hatását is nagymértékben befolyásolta, ami az adott éghajlati régióban öntözés nélküli körülmények között várható volt (Pepó, 2018;

Széles et al., 2012, Ragán et al., 2024). 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 Al-Karaki et al. (2004), Bakonyi és Csitári (2023) és Khan és Zaidi (2007) tapasztalataihoz. Irodalmi adatok alapján a mikorrhiza oltásnak kukoricára és őszi búzára leggyakrabban szárazabb régiókban, alacsonyabb műtrágyázás mellett van szignifikáns hatása, azonban kevés a neutrális hatásokat bemutató tudományos közlemény. Mérsékelt éghajlatú területeken a mikorrhiza oltás hatása a talajtípustól jelentősen függ (Bender et al., 2019).

A talajtípusnak szintén meghatározó hatása volt a termésre és biomasszára (28. ábra és 29. ábra). A szárazabb és átlagos években (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 években 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 (28. 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. Schütz et al. (2018) és Qin et al. (2019) metaanalízisüben megállapítják, hogy a mikorrhiza hatása jelentősebb alacsony szervesanyag-tartalom mellett és semleges pH-n. Kísérletünkben az ABET talajon az alacsony felvehető foszfortartalom (29 mg/kg) mellett az alacsony pH (4,91) szintén akadályozhatta a növények foszforfelvételét. Hipotézisünk, miszerint a talajtípus és a műtrágyázás intenzitása meghatározzák a mikorrhiza oltások eredményességét, igazolódott.

A gyengébb gyökérfejlődés az RT talajon valószínűleg összefügg a talaj nagyobb víz- és tápanyag-kapacitásával, vízháztartásával a ABET-hoz képest. A jobb tápanyag- és vízellátottság következménye lehet, hogy az RT talajon alacsonyabb klorofill értékeket mérünk az ABET talajhoz képest, vagyis a klorofill tartalom az RT talajon még nem érte el a telítődési pontját (Széles et al., 2012, 2023).

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 terméshozamokra, az általunk mért összes növényfejlődési paraméterrel ki lehetett mutatni a potenciális tápanyag-felvevő képesség

növekedését mindkét talajon. Hasonló következtetésre jutott például Cseresnyés et al. (2018), Berta et al. (2014) és Colla et al. (2015) is.

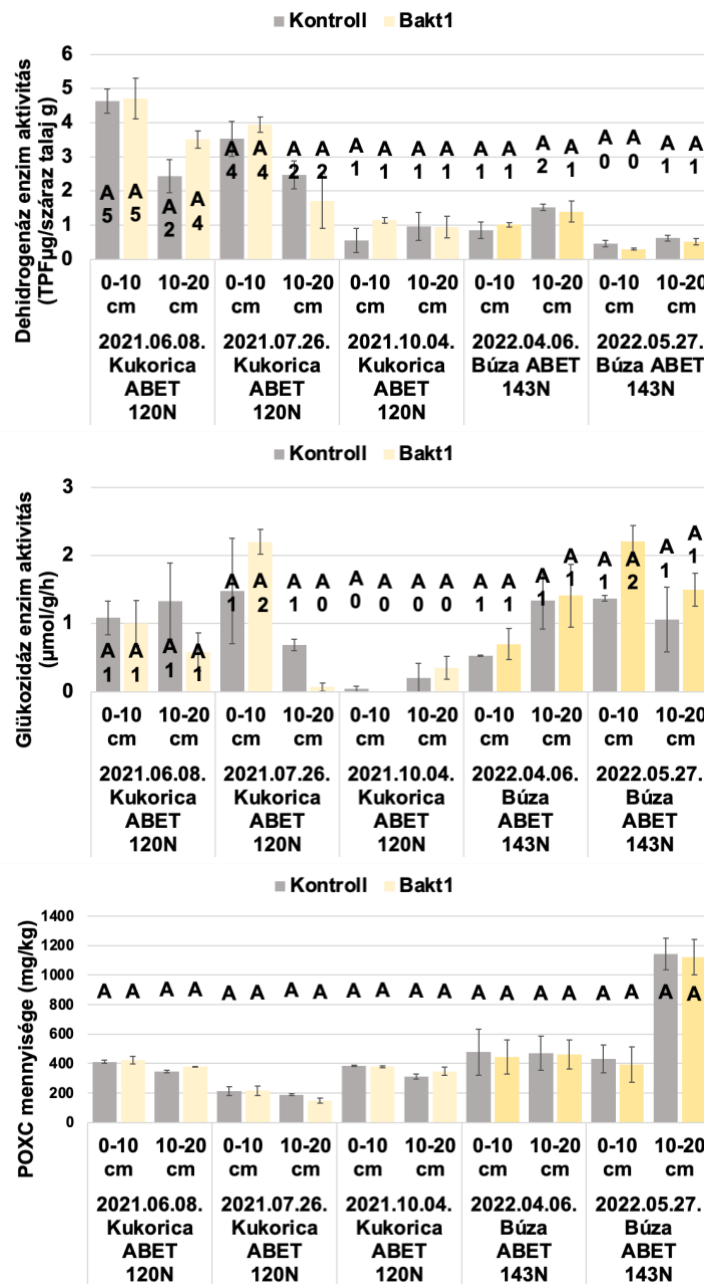
A terméshez hasonlóan a talajminták PHO enzimaktivitás értékének szignifikáns növekedését csak az ABET talajon tudtuk kimutatni a kezelés hatására, melynek oka az ABET talajon lévő növények nagyobb tápanyag hiánya (tekintettel arra, hogy kísérletünkben az alacsony műtrágyázás évében nem juttattunk ki P műtrágyát) (Allison et al., 2007; Margalef et al., 2021). Hipotézisünk, miszerint az talajbiológiai és növény növekedési paraméterek előrejelezhetik a mikorrhiza oltóanyagok hatását, részben igazolódott.

Kísérletünkben nem igazolódott, hogy kevesebb műtrágyával a mikorrhiza gomba nagyobb mértékben kolonizálja a gyökereket. A gyökérkolonizáció minden évben mindkét talajon növekedett a Myc oltás kezelés hatására, függetlenül attól, hogy mennyi műtrágyát használtunk. Tapasztalataink összhangban vannak Tian et al. (2013), Varinderpal-Singh et al. (2020) és Ercoli et al. (2017) eredményeivel, mely szerint a N szint hatására a gyökérkolonizáció nem változik szignifikánsan. Azt nem igazoltuk, hogy a P csökkentés növelte-e a gyökér kolonizációt, ahogyan azt számos kutatás már bizonyította (Al-Karaki, 1998; Füzy et al., 2023; Varinderpal-Singh et al., 2020). A kísérletünkben 2023-ban a P kijuttatást 0-ra csökkentettük, de az előző évek P kijuttatásának hatása még jelen lehetett 2023-ban is, illetve a kedvezőbb csapadékelátottság miatt a talajok P-tartalma is jobban elérhető lehetett a kukorica számára (Koide, 1991; Sárdi, 2015; Szigeti et al., 2023). A nagyobb gyökérkolonizáció tehát nem feltételül jelent termésmenvelő hatást is. Valószínűleg a mikorrhiza kolonizáció egy meghatározott műtrágyázási szint mellett a legnagyobb (Liu et al., 2000). Ha túl sok a műtrágya, akkor kevésbé van szükség a gomba segítségére, csökken a kolonizáció. Amennyiben túlságosan csökkentjük a műtrágyát, akkor is csökken a kolonizáció, mert a növénynek nincs elegendő tápanyaga a szimbiózis fenntartásához. Kísérletünkben lehetséges, hogy ez utóbbi szituáció állt elő.

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

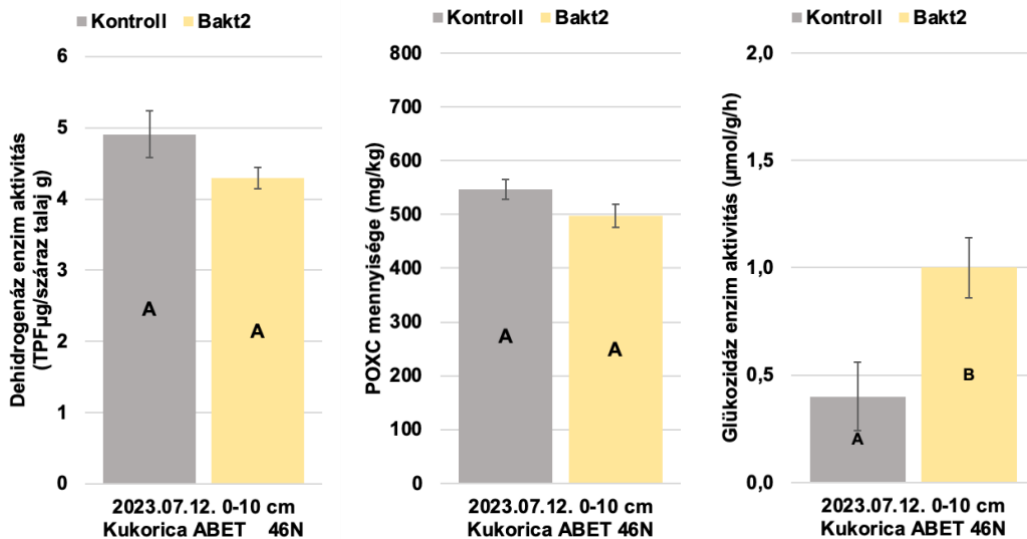
A foszfatáz (PHO) enzimaktivitás mellett a szabadföldi kísérletekben mértük a permanganát oxidálható labilis széntartalmat (POXC), a dehidrogenáz (DHA) és β -glükozidáz (GLÜ) enzimaktivitásokat is a talajban. A Bakt1 és Bakt2 oltások esetében a DHA és GLÜ enzimaktivitás eredményeket, illetve a talajminták POXC tartalmát 2021-2022 években a 38. ábra mutatja be. A kezelések hatását egyik paraméter esetében sem lehetett kimutatni. A mintavételi időpontok és a mintavételi mélységek között azonban jelentős eltérések is láthatók. A kukorica virágzása esetében a DHA és GLÜ enzimaktivitás eredmények magasabbak voltak a felső 10 cm-es rétegben, míg a búza esetében inkább fordított tendencia látható. A labilis szén esetében a búza

virágzásakor mértünk szignifikáns különbséget a két mélység között a 10-20 cm-es mélység javára.



38. ábra: Dehidrogenáz enzim, Glükózidáz enzim és labilis szén (POXC) mennyiségének alakulása Bakt1 és Bakt2 oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) és búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényen. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását talajmintavételi időpontoként és talajmintavételi mélységenként ($p < 0,05$).

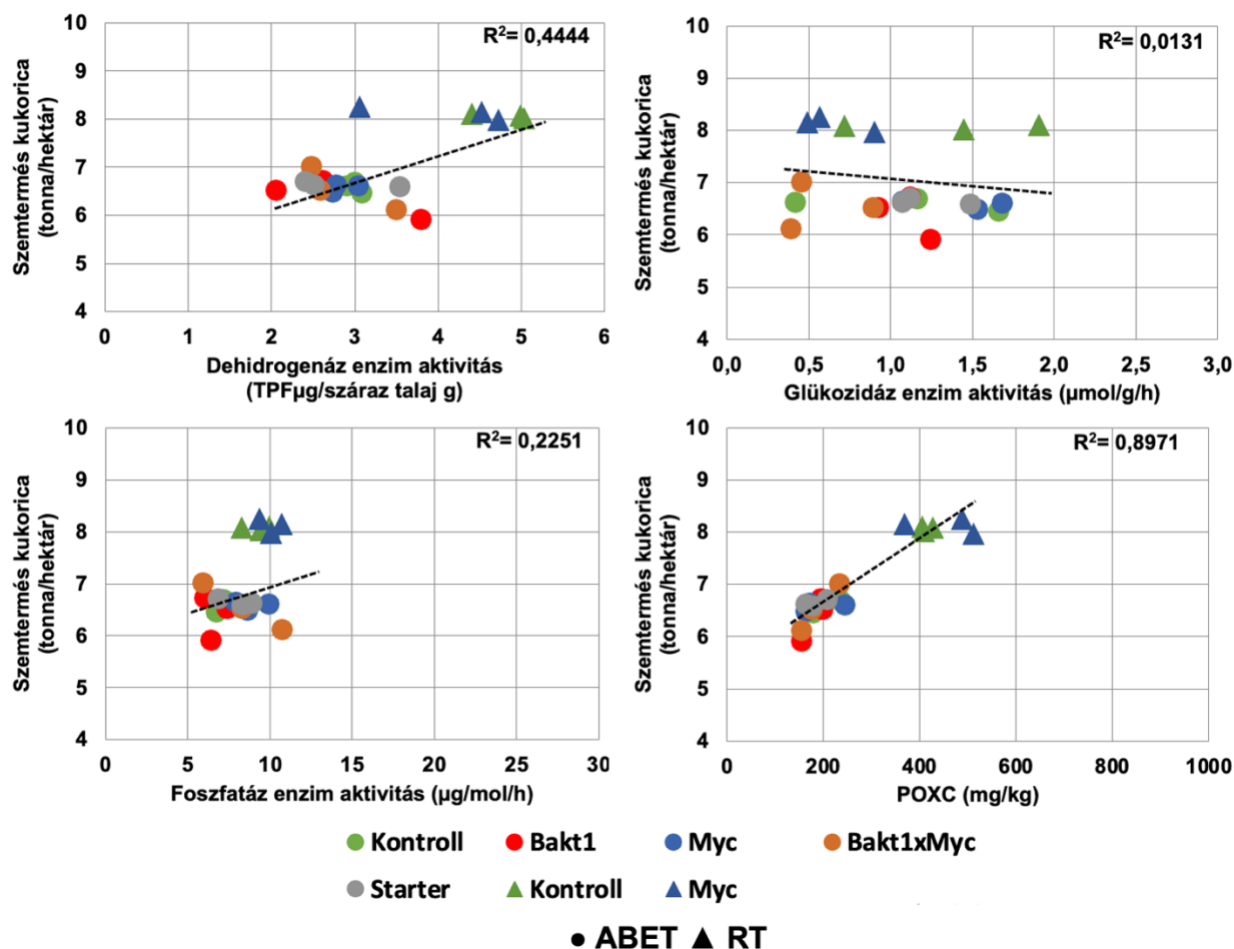
A három talajparamétert a 2023-as alacsony műtrágyázás (46N) évében vizsgálva (39. ábra) a kukorica virágzásakor szignifikáns GLÜ enzimaktivitást mértünk a felső 10 cm-es talajrétegben a Bakt2 oltás hatására. A terméshez, növénymagassághoz és PHO enzimaktivitáshoz hasonlóan, a GLÜ enzimaktivitás értékek is jelezték az oltóanyag hatását. A DHA enzimaktivitás és labilis szén esetében nem találtunk különbséget az oltás hatására 2023-ban sem.



**39. ábra: Dehidrogenáz enzim, labilis szén (POXC) és glükózidáz enzim mennyiségének alakulása Bakt2 oltóanyag hatására szabadföldi kísérletben, 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényen. Átlag értékek és standard hiba. Az oszlopokban lévő betűk (A) jelzik a kezelés hatását ($p < 0,05$)
GLÜ: $n=6$; $F(1,10)=12,629$; $p=0,005$.**

A 2021-es magas műtrágyázási szintű (120N) kukorica évre vonatkozóan (40. ábra) megállapíthatjuk, hogy a DHA enzim és a labilis szén talajtípusonként szignifikánsan különbözik. Lineáris kapcsolatot találtunk a szemtermés és DHA enzim ($R^2=0,4444$), valamint erős lineáris kapcsolatot szemtermés és a labilis szén között ($R^2=0,8971$), mely lineáris összefüggések csak a két talajtípus adatait egyben elemezve állnak fenn. A PHO és GLÜ enzim esetén a szemterméssel összefüggésben nem találtunk hasonló tendenciát.

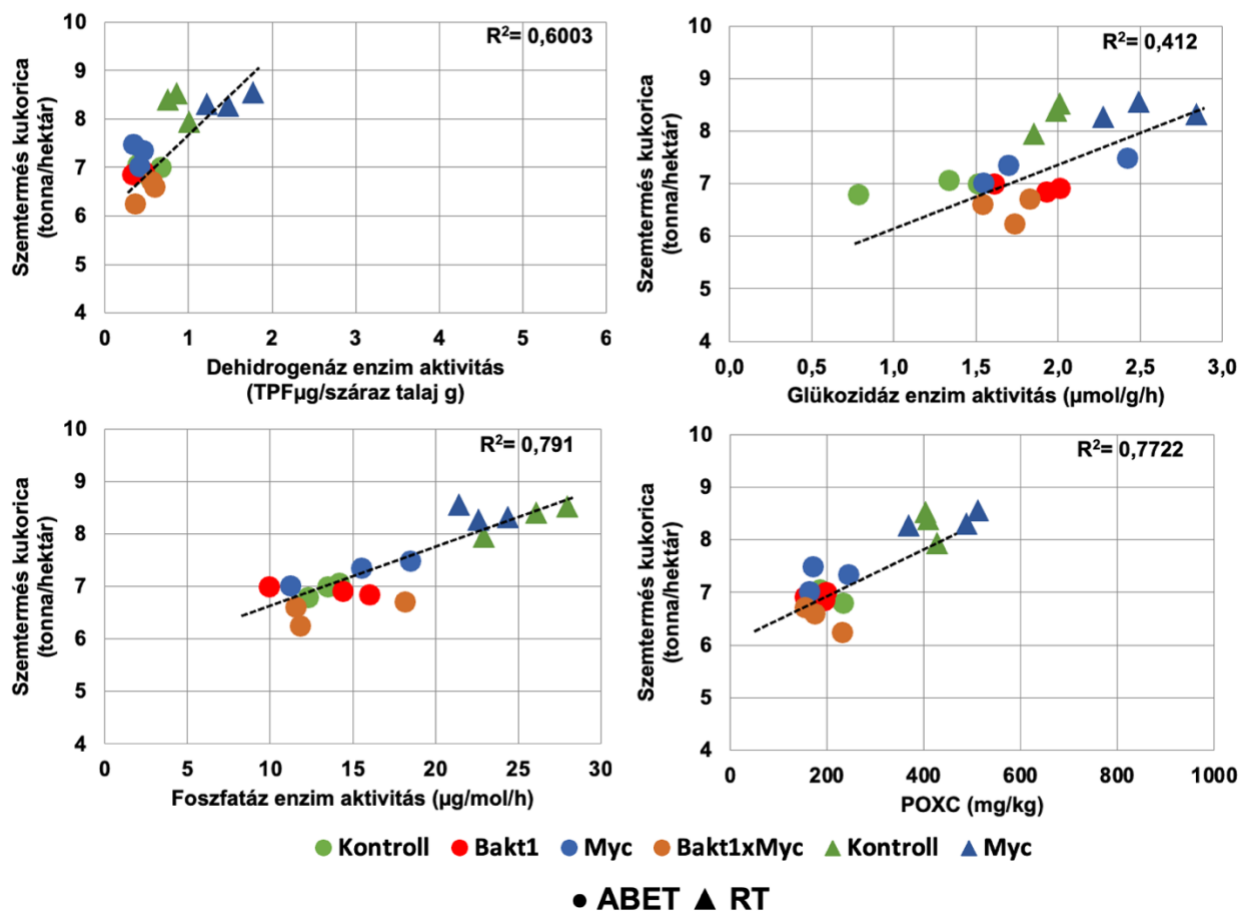
2021–Kukorica



40. ábra: A szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) és a virágzáskori (2021.07.26.) talajenzimek és POXC (labilis szén) közti lineáris kapcsolat szabadföldi kísérletben 2021-ben magas műtrágyázási szinten (120N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényen.

A 2022-es búza főnövény évében magas műtrágyázási szinten (143N) beállított kísérletben (41. ábra) 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.

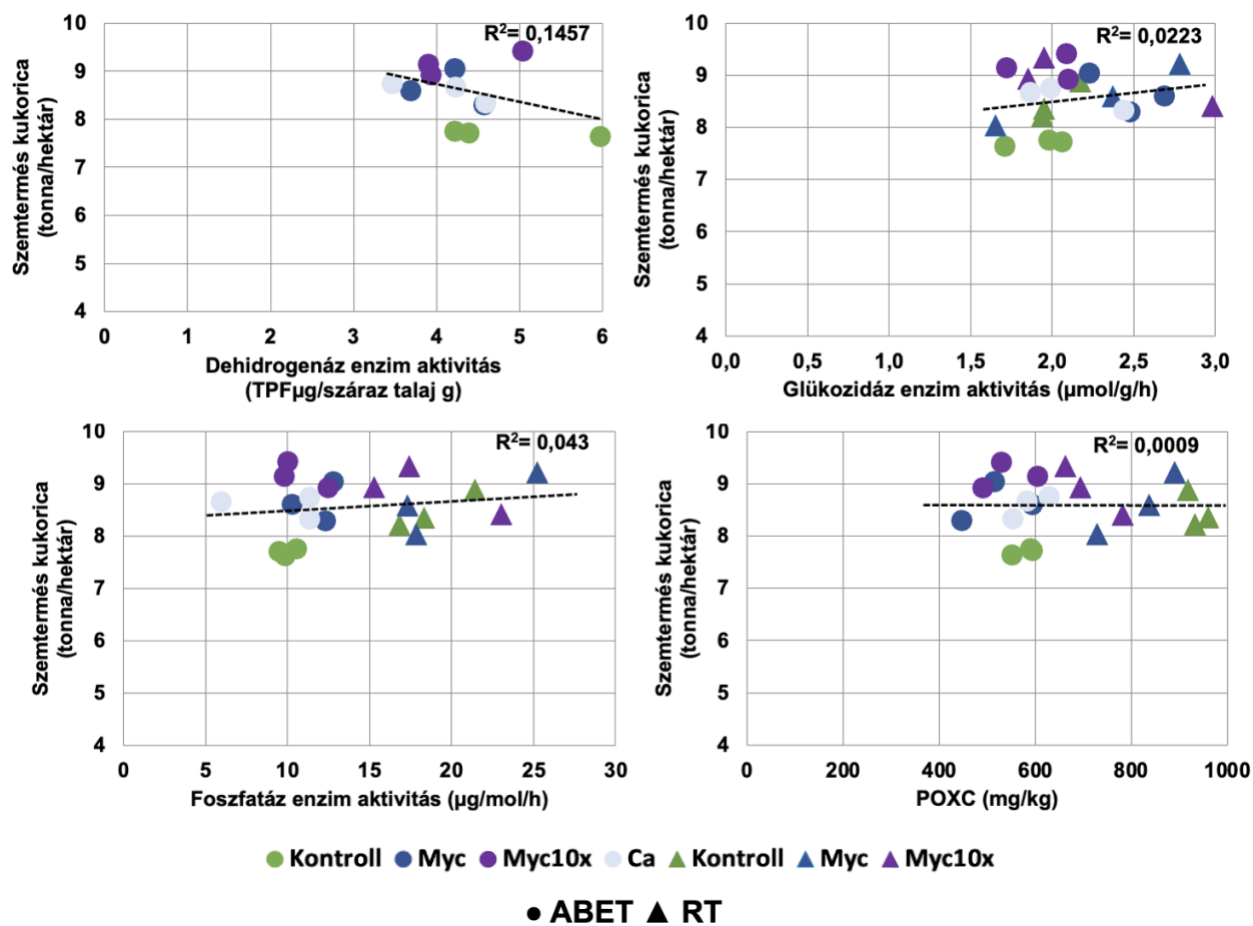
2022–Búza



41. ábra: A szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) és a virágzás kori (2022.05.27.) talajenzimek és POXC (labilis szén) közti lineáris kapcsolat szabadföldi kísérletben 2022-ben magas műtrágyázási szinten (143N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) búza (*Triticum aestivum*) tesztnövényvel.

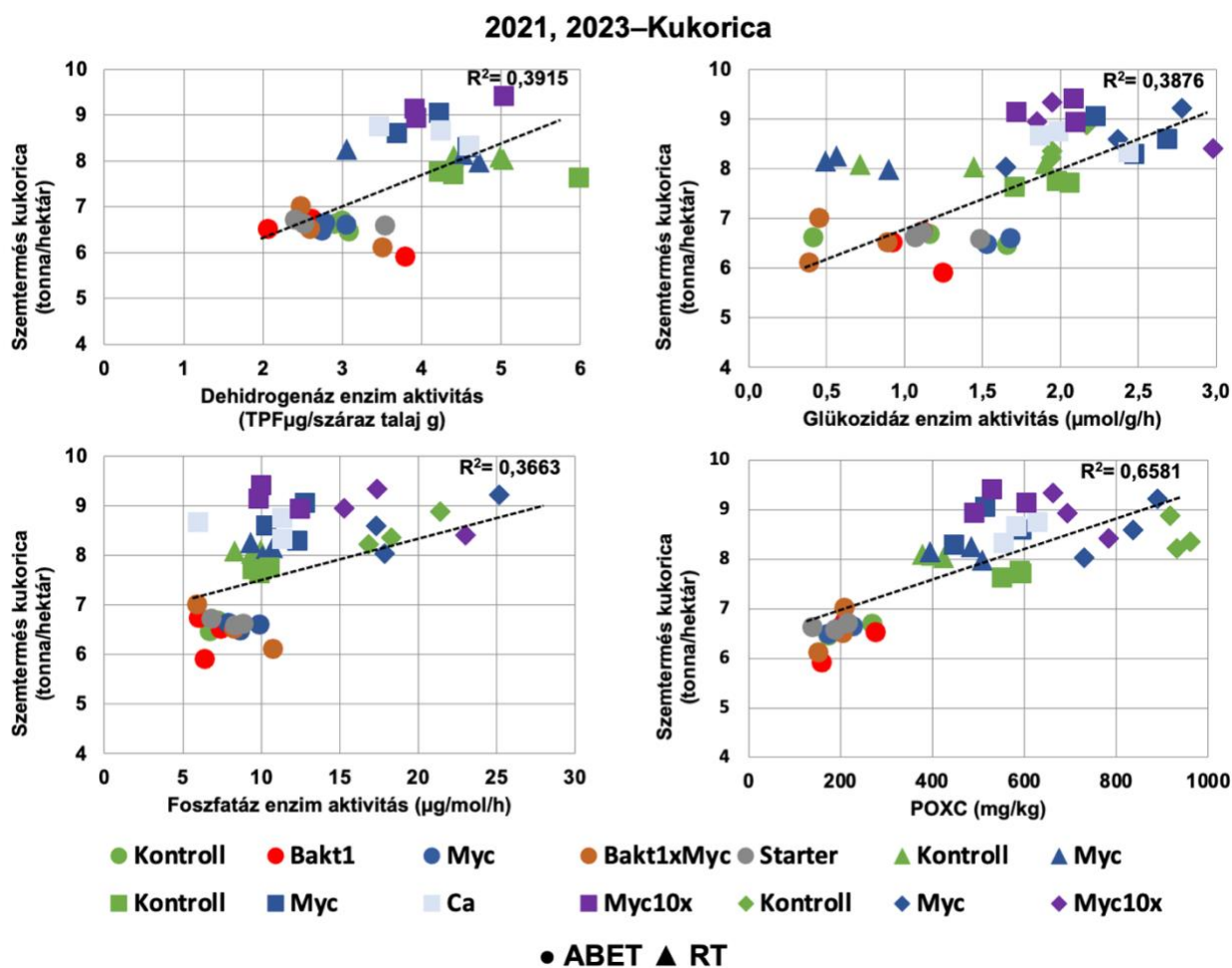
A 2023-as alacsony műtrágyázási szint (46N), kukorica főnövény évében (42. ábra) a GLÜ, PHO enzimek és a labilis szén esetén a magasabb tápanyagellátású RT talajon magasabb értékeket mértünk az ABET-hez képest, azonban a két talaj között 2023-ban nem volt tapasztalható terméskülönbség az év csapadékmennyisége miatt, így nem volt kimutatható lineáris kapcsolat a talajbiológiai paraméterek és a termés között.

2023–Kukorica



42. ábra: A szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) és a virágzás végén (2023.08.09.) mért talajenzimek és POXC (labilis szén) közti lineáris kapcsolat szabadföldi kísérletben 2023-ben alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényvel.

A 2021-es magas műtrágyázási szint (120N) és a 2023-as alacsony műtrágyázási szint (46N) kukorica főnövény éveit együtt értékelve (43. ábra), 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.



43. ábra: A szemtermés mennyiségének alakulása (86% szárazanyagtartalom) és a virágzáskori (2021.07.26., 2023.08.09.) talajenzimek és POXC (labilis szén) közti lineáris kapcsolat szabadföldi kísérletben 2021-ben magas műtrágyázási szinten (120N) és 2023-ban alacsony műtrágyázási szinten (46N), agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és típusos réti talajon (RT) kukorica (*Zea mays* FAO 330) tesztnövényen.

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 (20. táblázat). Az adatok korrelációs vizsgálata alapján (21. táblázat) 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 (21. táblázat). Megállapításaink többségében megegyeznek Nugroho et al. (2024) által leírtakkal, azonban DHA és POXC összefüggésünk ellentétes Kotroczó et al. (2023) 0-5 cm-es mélységben végzett vizsgálatainak eredményével.

20. táblázat: A mintavételi időpont és a talajtípus interakciói (MANOVA) a talajenzimre és a talajminták POXC mennyiségére, 2021, 2022 években, magas műtrágyázási szinten (120N). A szignifikanciát a csillagok jelzik: * = p<0.05; * = p<0.001.**

Faktor	Függő változó	F-érték	Szig.	Hatásnagyság (h ²)
Mintavételi időpont	DHA	80,784	***	0,627
	PHO	172,24	***	0,782
	GLÜ	23,458	***	0,328
	POXC	40,292	***	0,456
Talajtípus	DHA	84,071	***	0,305
	PHO	17,439	***	0,083
	GLÜ	4,310	*	0,022
	POXC	125,148	***	0,395
Mintavételi időpont	DHA	4,903	***	0,093
	PHO	5,161	***	0,097
* Talajtípus	GLÜ	2,998	*	0,059
	POXC	1,457	ns	0,029

21. 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 (39. ábra) háttérben az állhatott, hogy a kijuttatott oltóanyaggal növekedett a talaj szervesanyag bontási sebessége, mely a GLÜ aktivitás növekedésében mutatkozott meg. Bongiorno et al. (2019) szerint a labilis szén alkalmas indikátor a talajhasználatok és a mikrobiális aktivitás kimutatására, azonban a 2023-as kísérleti évben (39. ábra) a talaj labilis szén tartalmának növekedését nem tudtuk kimutatni az oltás hatására. Kísérletünkben a növényi szármaradványok a betakarítás után minden évben a talajba kerültek visszajuttatásra melyek Y. Wang et al. (2021) eredményeihez hasonlóan kezelésektől függetlenül növelhették a talajok labilis szén tartalmát. Nem vizsgáltuk azonban több időpontban is a talajbiológiai paramétereket, így a folyamatos monitoring hiányában messzemenő következtetéseket nem vonhatunk le a szervesanyag-lebontási és mineralizációs dinamikáról, és az oltóanyagok közvetlen hatásáról.

A szemtermés és az enzim aktivitások, illetve a POXC mennyisége közti korrelációs elemzéseket tekintve megállapítható, hogy a virágzáskor mért talajbiológiai paraméterek összefüggésben állhatnak a terméshozamokkal. 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).

5. KÖVETKEZTETÉSEK, 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 képest a kijuttatott starter és alaptrágya (PK) hatása jóval kisebbnek bizonyult, de a nitrogén dózisének 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 termés hozamokra, 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 baktériumok és gombák tápanyagmobilizáló képességére, így hatásuk megjelent a termésben. Sajnos a csökkentett nitrogéndózisok miatt a termés hozamok 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 virágzás kori növény magasságban és PHO aktivitásban, a mikorrhiza kezelés hatását valamely virágzás kori 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 gyökérszóna kolonizáció a mikorrhiza oltás hatására minden évben mindkét talajon növekedett, függetlenül a műtrágya felhasználástól, tehát a nagyobb gyökérszóna kolonizáció nem feltétlenül jelent termésmenvelő hatást is. Hipotézisünk, miszerint a 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 tenyészedény 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 modellkísérletünkben a DHA enzim, mint a teljes mikrobiális aktivitás mérőszáma, csak a steril kezelt talajon mutatta az oltás hatását. A steril kezeléssel az eredeti, őshonos baktériumok száma csökkent, így azok kevésbé versengtek a kijuttatott törzsekkel. A steril kezeléssel 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, illetve a bevitt mikrobák életterének és fizikai aktivitásának biztosítása. Hipotézisünk, miszerint a talaj őshonos baktérium közössége a kijuttatott baktérium készítmény hatását befolyásolja, de a hatás függ a talaj tápanyag ellátottságától, igazolódott. Az oltás hatása a növényekre a talaj steril kezelése esetén sem volt szignifikáns egyik talajon sem, ami valószínűleg azért lehetett, mert rövid távon elegendő tápanyag állt rendelkezésre a növényeknek. A gyengébb ABET talajban elölt oltóanyag rövid távon pozitívabb hatással volt a növények fejlődésére, mint az élő oltóanyag. Az RT talajban, ahol eleve szignifikánsan magasabb a mikrobiális aktivitás, a steril kezelés hatása mutatott rá az elölt mikrobák növény táplálásban betöltött szerepére. Nem zárhatjuk ki a steril kezelésnek, mint kezelésnek fizikai-kémiai tápanyag-mobilizáló hatását sem. A gyakorlatban ez komoly kérdést jelent, hogy milyen, a tápanyag-feltáródásra nem, vagy csak kevésbé ható sterilizálási módszert alkalmazzanak a mikrobiális oltóanyagok tesztelésénél. Eredményeink arra engednek következtetni, hogy a használt Bakt2 oltóanyag szabadföldi kísérletekben magas műtrágya szinten (143N) tapasztalt hatástalansága, nem az adott évi időjárási körülmények következménye. A tenyészedényes kísérletek általában a szabadföldi kísérletek első lépését jelentik a gyakorlati „felskálázás” során. Az eredményeink ráirányítják a figyelmet a tenyészedényes mikrobiális kísérletek lehetséges korlátaira is. Fontos limitáló tényező lehet az edényméret, azok megfelelő elhelyezése, a környezeti körülmények pontosítása (sötét, aktív periódusok hossza), a talaj víztartalma, és a megfelelő kontrollok előállítása, a rendszerint használt sterilizálás tápanyag-feltáró hatása miatt.

A kísérleteink alapján a következő javaslatokat fogalmazzuk meg:

- Starter műtrágyák hatékonyságának tekintetében 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 modellkísérletünkben, 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 tápanyagfeltáró 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.

- A mikrobiológiai oltóanyagokkal végzett kísérletek során fontos kutatási irány lehet a növények termésének mennyiségi mérése mellett a termés beltartalmi értékeinek monitorozása, melyek a termésmennyiség változatlansága esetén is javulást mutathatnak.

- 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 dózisos és különböző oltóanyagok kombinációjával lenne szükséges kísérleteket végezni, akár a talajtípusokon belüli nagyobb tápanyagellátási különbségek keresésével. Az oltáshatást összevetve szükséges értékelní a tápanyagellátás befolyásoló szerepével.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az általunk négy egymást követő évben végzett szabadföldi kísérletek és a tenyészedényes kísérletek eredményeiből az alábbi új tudományos eredményeket emelem ki:

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 terméstudbletet 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 terméstudvelő hatásukat. Az oltások azonban csak kis részben képesek pótolni a kieső műtrágyamennyiség terméstudvelő hatását.
4. Kukoricában alkalmazott starter műtrágya terméstudvelő 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 terméstudvelő hatását a kontrollhoz képest.
5. Kimutattuk, hogy a virágzáskor mért talajenzimek (β -glükózidáz, dehidrogenáz, savas foszfataáz) és a permanganát oxidálható labilis széntartalom jól korrelálnak a későbbi őszi búza és kukorica terméstudmennyiségekkel, mert jelzik a virágzáskori megnövekedett növényi tápanyag-igény és tápanyag-felvétel mértékét. Azonban az oltóanyagok talajbiológiai aktivitására gyakorolt hatását nem feltétlenül mutatják.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során talajon keresztül ható növényi növekedésserkentő biológiai és kémiai módszerek hatását vizsgáltuk, kukoricában és búzában, két Magyarországon jellemző talajtípuson, szabadföldi és tenyészedenyes körülmények között. Kémiai módszereink a starter műtrágya és meszezőanyag alkalmazása, míg biológiai módszereink baktérium és mikorrhiza készítményekkel történő oltások voltak. Feltételeztük, hogy ezen módszerek hatékonyságát a növényi növekedésben a talajtulajdonságok és a műtrágyázás intenzitása jelentősen befolyásolják.

Szabadföldi kísérleteinket kétféle talajon végeztük. Egy alacsony szervesanyag tartalmú és erősen savanyú pH-jú, vályog textúrájú agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABET) és egy agyagos vályog típusos réti talajon (RT). Az első, második és negyedik évben a tesztnövény kukorica (*Zea mays* L.), a harmadik évben pedig őszi búza (*Triticum aestivum* L.) volt. Az éveket tekintve többféle oltóanyagot – Bakt1 (*Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium*), Bakt2 (*Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense*), Myc (*Funneliformis*, *Claroideoglomus*, *Rhizophagus*) –, továbbá starter műtrágyát és meszezőanyagot használtunk. A kezelésekből 3 ismétlést véletlen elrendezésben állítottunk be, minden parcella 4,5 méter széles és 100 méter hosszú volt. Tenyészedenyes kísérletünket 2022-ben kukorica tesztnövényvel, két eltérő foszfortartalmú ABET talajjal végeztük, talajonként kétféle kezeléssel Kontroll és CaO meszezőanyaggal kezelt. 2023 évi tenyészedenyes kísérletünkben a használt két talajtípus három féle talajkezelésben részesült: hűtött; 22°C-on tartott és melasszal kezelt; steril kezelésben részesült. Az így kezelt talajokat oltóanyaggal és annak elölt verziójával oltottuk: Kontroll, Bakt2, és ElöltBakt2.

Mértük a talajminták dehidrogenáz (DHA) aktivitását, savas foszfatáz (PHO) aktivitását, β -glükozidáz (GLÜ) aktivitását és permanganát oxidálható labilis széntartalmát (POXC). Növényi paraméterek közül vizsgáltuk a növényi gyökerek arbuskuláris mikorrhiza gomba által kolonizált mértékét, a növények föld feletti száraz biomassza tömegét és termését. 2023-ban mértük a kukorica növények virágzáskori magasságát, gyökérnyak átmérőjét, klorofill tartalmát és gyökérkapacitás értékeit.

Kísérleteinkben a tenyészidőszak csapadékmennyiségének és a talajtípusnak meghatározó hatása volt a termésre és biomasszára. A szárazabb és átlagos évekből (2021-2022) az RT talaj szignifikánsan felülmúlta az ABET talaj termését, melynek oka az RT talaj jobb tápanyag- és humusztartalma, vízgazdálkodási tulajdonságai lehettek. Különböző műtrágya dózisu kísérletünkben (2023) jelentős termésbefolyásoló hatása volt a kijuttatott alapműtrágya

mennyiségének, azonban a felhasznált foszfor tartalmú Starter műtrágya a vizsgált évek egyikében sem tudta növelni a kukorica termését.

Többéves szabadföldi kísérleteinkben magas műtrágyázási szinten (120N, 143N) ABET és RT talajon nem mutattuk ki a baktériumoltások termésmenvelő hatását kukorica és búza kultúrákban, azonban alacsony műtrágyázási szinten (46N) a gyengébb minőségű ABET talajon szignifikáns termésmenvekedést tapasztaltunk kukoricában. A baktériumoltás azonban csak részben volt képes műtrágyahelyettesítő hatást betölteni. A mikorrhiza oltás szemtermést és biomasszát növelő hatását a baktérium oltáshoz hasonlóan csakis a csökkentett N-P-K műtrágyafelhasználás esetében, ABET talajon tudtuk kimutatni. Az általunk mért valamely növényfejlődési paraméterrel ki lehetett mutatni a potenciális tápanyag-felvevő képesség növekedését mikorrhizaoltás esetében, mindkét talajon. A gyökérekolonizáció a mikorrhiza oltás hatására minden évben, mindkét talajon növekedett, a nagyobb gyökérekolonizáció tehát nem feltételül jelentett termésmenvelő hatást is.

Szabadföldi kísérletünkben alacsony műtrágyázás mellett (46N), a meszezés önmagában növelte a kukorica növények termését, feltehetőleg a pH emelésével csökkentette a talajban az alumínium által kötött foszfor mennyiségét, mely hatást a növénymagasság virágzáskori alakulása is jelezte. A meszezés hatása hasonló mértékű volt a baktériumoltás hatásával, annak eredményességét nem növelte. Steril kezeléssel modellkísérletünk eredménye arra enged következtetni, hogy az oltások hatékonysága szempontjából nagyon meghatározó a talaj eredeti mikroba közösségének száma és összetétele, az oltás hatását csak steril kezelt talajon tudtuk kimutatni.

Starter műtrágyák és mikrobiális tápanyag-mobilizálás hatékonyságának tekintetében további kísérletek lennének szükségesek további alacsonyabb tápanyagtartalmú talajfoltokon, több kukorica hibriddel. A termésmenvelők köztes használata megoldást jelenthetne, mellyel kezdetben műtrágyával segítenénk a növényt, majd később mikrobiológiai oltásokkal.

Szabályozott környezetben, tenyészedényben a szabadföldi kísérletek többségéhez hasonlóan nem igazoltuk a kijuttatott baktériumok termésmenvelő hatását. Ez visszaigazolja a szabadföldi kísérletek eredményét is, ahol még több környezeti korlátozó tényezővel lehet számolni. Fontos lenne a mikrobiális oltóanyagokban található törzsek egyedi, egyenkénti vizsgálata, továbbá az oltóanyagban található fajoknak a talajban lévő őshonos társainak az előzetes vizsgálata is. Az oltás során azoknak és a bevitt törzseknek a folyamatos, a növényi vegetáció során is a nyomon követése, ellenőrzése lenne szükséges.

Összességében az általunk vizsgált oltóanyagoktól korlátozott hatás várható konvencionális szántóföldi növénytermesztésben, amennyiben a termőhely jó vízgazdálkodású (réti talajok) vagy ha gyengébb, erózióra hajlamos és alacsony szervesanyag-tartalmú (dombvidéki barna erdőtalajok). Az esetleges hatásokat pedig nagyban befolyásolja a műtrágyázás intenzitása.

8. SUMMARY

In our research, we investigated the effects of biological and chemical methods of plant growth promotion through the soil in corn and wheat, on two soil types common in Hungary, in field and pot conditions. Our chemical methods involved the application of starter fertilizer and lime, while our biological methods involved inoculation with bacteria and mycorrhiza preparations. We hypothesised that the effectiveness of these methods in plant growth would be significantly influenced by soil properties and fertilisation intensity.

We conducted our field experiments on two types of soil. One was forest soil (ABET) with low organic matter content, strongly acidic pH, with loamy texture and the other was meadow soil (RT) with clay loam texture. In the first, second and fourth years, the test crop was corn (*Zea mays* L.), and in the third year, it was winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Over the years, we have used different types of microbial inoculants – Bakt1 (*Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium*), Bakt2 (*Bacillus simplex*, *Pseudomonas frederikbergensis*, *Agreia pratensis*, *Paenibacillus peoriae*, *Exiguobacterium acetylicum*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum brasilense*), Myc (*Funneliformis*, *Claroideoglomus*, *Rhizophagus*) –, and also starter fertilizer and lime. Each treatment consisted of three replications and every plot measured 4.5 m wide and 100 m long. Our pot experiment in 2022 was conducted with corn test plants and two types of ABET soils with different phosphorus contents, each receiving two types of treatment: Controll and CaO liming. In our pot experiment in 2023, the two soil types used were treated in three ways: cooled; kept in 22°C and treated with molasses; and received sterile treatment. The soils treated in this way were inoculated with microbial inoculant and its autoclaved version: Controll, Bakt2, and AutoclavedBakt2.

We measured the dehydrogenase (DHA) activity, acid phosphatase (PHO) activity, β -glucosidase (GLU) activity, and permanganate-oxidizable labile carbon content (POXC) of the soil samples. Among plant parameters, we examined the extent of plant root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi, the above-ground dry biomass of the plants, and their yield. In 2023, we measured the height of corn plants at flowering time, root neck diameter, chlorophyll content, and root capacity of plants.

In our experiments, both yield and biomass were mostly influenced by precipitation during the growing season and soil type. In drier and average years (2021-2022), RT soil significantly outperformed ABET soil in terms of yield, which may be explained by the better nutrient and humus content and water management properties of RT soil. In our trials with different fertilizer doses (2023), the amount of base fertilizer applied had a significant effect on yield, but the

phosphorus-containing starter fertilizer used did not increase corn yields in any of the years studied.

In our multi-year field investigations, at high fertilizer levels (120N, 143N) on ABET and RT soils, we were not detected the yield-enhancing effect of bacterial inoculation in corn and wheat crops, but at low fertilization level (46N) on lower quality ABET soil, we observed a significant increase in corn yield. However, the bacterial inoculant was only partially able to replace the base fertilizer application. Similar to bacterial inoculation, the effect of mycorrhizal inoculation on increasing grain yield and biomass could only be demonstrated on ABET soil with reduced base N-P-K fertilizer use. The increase in potential nutrient uptake capacity in the case of mycorrhizal inoculation could be demonstrated with the plant development parameters we measured on both soils. Root colonization increased every year on both soils as a result of mycorrhizal inoculation, so greater root colonization did not necessarily mean an increase in yield.

In our field experiment, with low fertilization (46N), liming alone increased the yield of corn plants, presumably by raising the pH and reducing the amount of phosphorus bound by aluminium in the soil, an effect that was also indicated by the plant height at flowering. The result of liming was similar to that of bacterial inoculation and did not increase its effectiveness. Our sterile treatment experiment result indicate that the number and composition of the original microbial community in the soil are very important for the efficacy of inoculation, as we were only able to demonstrate the effect of inoculation on sterile soil.

Further trials would be necessary to assess the efficacy of starter fertilizers and microbial nutrient mobilization on addition soils with lower nutrient content and with more corn hybrids. The intermediate use of yield enhancers could be a solution, providing initial support to the plant with fertilizer and later with microbial inoculation.

In pot experiments with controlled environment, similar to most field experiments, we did not confirm the yield-enhancing effect of the applied bacterial inoculant. This confirms the results of field experiments, where even more environmental limiting factors can be expected. It would be important to examine the strains of the inoculants individually, as well as to conduct preliminary tests on the native counterparts of the species found in the inoculant. During inoculation, it would be necessary to continuously monitor all the strains throughout the vegetation period.

Overall, the inoculants we tested are expected to have limited effect in conventional arable crop production, if the soil has good water management (meadow soils) or if it is weaker, prone to erosion, and low in organic matter (forest soils). Potential inoculation effects are greatly influenced by the fertilization intensity.

M1. 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) Adetunji, A. T., Lewu, F. B., Mulidzi, R., & Ncube, B. (2017). The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 794–807. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300018>
- 3) Al-Karaki, G., McMichael, B., & Zak, J. (2004). Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14(4), 263–269. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0265-2>
- 4) Al-Karaki, G. N. (1998). Benefit, cost and water-use efficiency of arbuscular mycorrhizal durum wheat grown under drought stress. *Mycorrhiza*, 8(1), 41–45. <https://doi.org/10.1007/s005720050209>
- 5) Al-Karaki, G. N., & Williams, M. (2021). Mycorrhizal mixtures affect the growth, nutrition, and physiological responses of soybean to water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(5), 75. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03250-0>
- 6) Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amézaga, I., & Garbisu, C. (2003). Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Reviews on Environmental Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1515/REVEH.2003.18.1.65>
- 7) Allison, V. J., Condrón, L. M., Peltzer, D. A., Richardson, S. J., & Turner, B. L. (2007). Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), 1770–1781. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.006>
- 8) Almási, C., Orosz, V., Tóth, T., Mansour, M. M., Demeter, I., Henzsel, I., Bogdányi, Z., Szegi, T. A., & Makádi, M. (2025). Effects of sewage sludge compost on carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur ratios and soil enzyme activities in a long-term experiment. *Agronomy*, 15(1), 143. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010143>
- 9) Almeida, R. F., Naves, E. R., & Mota, R. P. (2015). Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. *Global Journal of Agricultural Research and Reviews*, 3, 2, 146-450.
- 10) Alomari, S. M., Hasan, R. S., Najim, A. N. A., & Saadi, A. M. (2024). Nitrogen-fixing bacteria and their applications in the environment: A review. *International Journal of Medical and All Body Health Research*, 5(4), 178–187. <https://doi.org/10.54660/IJMBHR.2024.5.4.178-187>
- 11) An, G.-H., Kobayashi, S., Enoki, H., Sonobe, K., Muraki, M., Karasawa, T., & Ezawa, T. (2010). How does arbuscular mycorrhizal colonization vary with host plant genotype? An example based on maize (*Zea mays*) germplasms. *Plant and Soil*, 327(1–2), 441–453. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0073-3>
- 12) Andreato, M. F. L., Afonso, L., Niekawa, E. T. G., Salomão, J. M., Basso, K. R., Silva, M. C. D., Alves, L. C., Alarcon, S. F., Parra, M. E. A., Grzegorzcyk, K. G., Chryssafidis, A. L., & Andrade, G. (2024). Microbial fertilizers: A study on the current scenario of brazilian inoculants and future perspectives. *Plants*, 13(16), 2246. <https://doi.org/10.3390/plants13162246>
- 13) Ansori, A., & Gholami, A. (2015). Improved nutrient uptake and growth of maize in response to inoculation with *Thiobacillus* and mycorrhiza on an alkaline soil.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, 46(17), 2111–2126.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1048251>

- 14) Arambarri, P., & Talibudeen, O. (1959). Factors influencing the isotopically exchangeable phosphate in soils: Part III. The effect of temperature in some calcareous soils. *Plant and Soil*, 11(4), 364–376. <https://doi.org/10.1007/BF01371735>
- 15) Ariraman, R., Kumar, A. P., Selvakumar, S., Sowmya, S., & Mansingh, M. D. I. (2020). Effect of sulphur nutrition on growth parameters, yield parameters, yield, nutrient uptake, quality and economics of maize: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(6), 1632–1636. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i6x.13181>
- 16) Bader, A. N., Salerno, G. L., Covacevich, F., & Consolo, V. F. (2020). Native *Trichoderma harzianum* strains from Argentina produce indole-3 acetic acid and phosphorus solubilization, promote growth and control wilt disease on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 867–873. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.04.002>
- 17) 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.
- 18) Balla Kovács, A., Juhász, E. K., Béni, Á., Kincses, I., Tállai, M., Sándor, Z., Kátai, J., Rátónyi, T., & Kremper, R. (2024). Changes in microbial community and activity of chernozem soil under different management systems in a long-term field experiment in Hungary. *Agronomy*, 14(4), 745. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040745>
- 19) Bandick, A. K., & Dick, R. P. (1999). Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1471–1479. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6)
- 20) Basiru, S., Mwanza, H. P., & Hijri, M. (2020). Analysis of arbuscular mycorrhizal fungal inoculant benchmarks. *Microorganisms*, 9(1), 81. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010081>
- 21) Behera, B. C., Singdevsachan, S. K., Mishra, R. R., Dutta, S. K., & Thatoi, H. N. (2014). Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(2), 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>
- 22) Bell, M. J., Thompson, M. L., & Moody, P. W. (2021). Using soil tests to evaluate plant availability of potassium in soils. In T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton, & M. L. Thompson (Eds.), *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops* (pp. 191–218). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_8
- 23) Bender, S. F., Schlaeppli, K., Held, A., & Van der Heijden, M. G. A. (2019). Establishment success and crop growth effects of an arbuscular mycorrhizal fungus inoculated into Swiss corn fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.12.003>
- 24) Bermudez, M., & Mallarino, A. P. (2002). Yield and early growth responses to starter fertilizer in no-till corn assessed with precision agriculture technologies. *Agronomy Journal*, 94(5), 1024–1033. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1024>
- 25) Berta, G., Copetta, A., Gamalero, E., Bona, E., Cesaro, P., Scarafoni, A., & D'Agostino, G. (2014). Maize development and grain quality are differentially affected by mycorrhizal fungi and a growth-promoting pseudomonad in the field. *Mycorrhiza*, 24(3), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0523-x>

- 26) Bhattacharyya, P., Roy, K. S., Dash, P. K., Neogi, S., Shahid, Md., Nayak, A. K., Raja, R., Karthikeyan, S., Balachandar, D., & Rao, K. S. (2014). Effect of elevated carbon dioxide and temperature on phosphorus uptake in tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.). *European Journal of Agronomy*, *53*, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.008>
- 27) Biró, B., Sumalan, R., Sumalan, R., Farkas, E., & Schmidt Brigitta. (2016). Az arbuskuláris mikorrhiza-(AM) gombák hatásának vizsgálata *Tagetes patula* L. foszforfelvételére és fejlődésére modellkísérletben. *Kertgazdaság*, *48*, 45–52.
- 28) Blandino, M., Battisti, M., Vanara, F., & Reyneri, A. (2022). The synergistic effect of nitrogen and phosphorus starter fertilization sub-surface banded at sowing on the early vigor, grain yield and quality of maize. *European Journal of Agronomy*, *137*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126509>
- 29) Blandino, M., Reyneri, A., Vanara, F., Tamietti, G., & Pietri, A. (2009). Influence of agricultural practices on *Fusarium* infection, fumonisin and deoxynivalenol contamination of maize kernels. *World Mycotoxin Journal*, *2*(4), 409–418. <https://doi.org/10.3920/WMJ2008.1098>
- 30) Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mäder, P., Brussaard, L., & de Goede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, *99*, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>
- 31) Borowik, A., & Wyszowska, J. (2016). Soil moisture as a factor affecting the microbiological and biochemical activity of soil. *Plant, Soil and Environment*, *62*(No. 6), 250–255. <https://doi.org/10.17221/158/2016-PSE>
- 32) 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>
- 33) Brozović, B., Jug, I., Đurđević, B., Ravlić, M., Vukadinović, V., Rojnica, I., & Jug, D. (2023). Initial weed and maize response to conservation tillage and liming in different agroecological conditions. *Agronomy*, *13*(4), 1116. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041116>
- 34) Brzezińska, M., Stępniewska, Z., & Stępniewski, W. (1998). Soil oxygen status and dehydrogenase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, *30*(13), 1783–1790. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00043-1)
- 35) Bucking, H., Liepold, E., & Ambilwade, P. (2012). The role of the mycorrhizal symbiosis in nutrient uptake of plants and the regulatory mechanisms underlying these transport processes. In N. K. Dhal (Ed.), *Plant Science*. InTech. <https://doi.org/10.5772/52570>
- 36) Bullock, D. G., Simmons, F. W., Chung, I. M., & Johnson, G. I. (1993). Growth analysis of corn grown with or without starter fertilizer. *Crop Science*, *33*(1), 112–117. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300010021x>
- 37) Bundy, L. G., & Widen, P. C. (1992). Corn response to starter fertilizer: Planting date and tillage effects. *Better Crops Plant Food*, *76*(1), 20–23.
- 38) Caires, E. F., Bini, A. R., Barão, L. F. C., Haliski, A., Duart, V. M., & Ricardo, K. D. S. (2021). Seed inoculation with *Azospirillum brasilense* and nitrogen fertilization for no-till cereal production. *Agronomy Journal*, *113*(1), 560–576. <https://doi.org/10.1002/agj2.20488>

- 39) 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>
- 40) Chandra, P., Khobra, R., Sundha, P., Sharma, R. K., Jasrotia, P., Chandra, A., Singh, D. P., & Singh, G. P. (2021). Plant growth promoting *Bacillus*-based bio formulations improve wheat rhizosphere biological activity, nutrient uptake and growth of the plant. *Acta Physiologiae Plantarum*, *43*(11), 139. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03310-5>
- 41) Chandrasekaran, M., Kim, K., Krishnamoorthy, R., Walitang, D., Sundaram, S., Joe, M. M., Selvakumar, G., Hu, S., Oh, S.-H., & Sa, T. (2016). Mycorrhizal symbiotic efficiency on C3 and C4 plants under salinity stress – A meta-analysis. *Frontiers in Microbiology*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01246>
- 42) Chapman, H. D. (1965). Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties. In *Cation-exchange capacity*. (pp. 891–901).
- 43) Chien, S. H., Teixeira, L. A., Cantarella, H., Rehm, G. W., Grant, C. A., & Gearhart, M. M. (2016). Agronomic effectiveness of granular nitrogen/phosphorus fertilizers containing elemental sulfur with and without ammonium sulfate: A review. *Agronomy Journal*, *108*(3), 1203–1213. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0276>
- 44) Chloupek, O. (1972). The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots. *Biologia Plantarum*, *14*(3), 227–230. <https://doi.org/10.1007/bf02921255>
- 45) Chmelíková, L., Schmid, H., Anke, S., & Hülsbergen, K.-J. (2021). Nitrogen-use efficiency of organic and conventional arable and dairy farming systems in Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *119*(3), 337–354. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10126-9>
- 46) Clark, A. J., Masters-Clark, E., Moratto, E., Junier, P., & Stanley, C. E. (2024). Visualizing liquid distribution across hyphal networks with cellular resolution. *Biomicrofluidics*, *18*(5), 054109. <https://doi.org/10.1063/5.0231656>
- 47) 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>
- 48) Colla, G., Roupael, 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.
- 49) Cong, W.-F., Suriyagoda, L. D. B., & Lambers, H. (2020). Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes. *Trends in Plant Science*, *25*(10), 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.04.013>
- 50) Crowley, D. E. (2006). Microbial siderophores in the plant rhizosphere. In *Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms* (pp. 169–198). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-4743-6_8
- 51) Csathó, P. (2001a). Összefüggés a talajsavanyúság mértéke és a mészhatások között, a hazai meszezési tartamkiérletek adatbázisán, 1950-1998: II. A kísérleti növények, a mészforma és a meszezés óta eltelt idő szerepe a mészhatások megjelenésében. *Agrokémia És Talajtan*, *50*(3–4), 509–523. <https://doi.org/10.1556/Agrokem.50.2001.3-4.21>
- 52) Csathó, P. (2001b). Összefüggés a talajsavanyúság mértéke és a mészhatások között a hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán, 1950-1998: I. A mészformák és a talajtulajdonságok szerepe a mészhatások megjelenésében. *Agrokémia És Talajtan*, *50*(1–2), 103–118. <https://doi.org/10.1556/Agrokem.50.2001.1-2.9>

- 53) Csathó, P. (2002). Az AL-P korrekciós modell értékelése a hazai szabadföldi őszi búza P-kísérletek adatbázisán, 1960–2000. *Agrokémia És Talajtan*, 51(3–4), 351–380. <https://doi.org/10.1556/agrokem.51.2002.3-4.7>
- 54) Csathó, P. (2003a). Factors affecting winter wheat responses to N fertilization, obtained in the database of the Hungarian field trials, published between 1960 and 2000. *Növénytermelés*, 52, 41–59.
- 55) Csathó, P. (2003b). Kukorica N-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Agrokémia És Talajtan*, 52(1–2), 169–184. <https://doi.org/10.1556/agrokem.52.2003.1-2.14>
- 56) Csathó, P. (2003c). Kukorica P-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Agrokémia És Talajtan*, 52(3–4), 455–472. <https://doi.org/10.1556/agrokem.52.2003.3-4.15>
- 57) Csathó, P. (2003d). Őszi búza P-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Növénytermelés*, 52, 679–701.
- 58) Csathó, P. (2005a). Kukorica K-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Növénytermelés*, 54, 447–465.
- 59) Csathó, P. (2005b). Őszi búza K-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Növénytermelés*, 54(3), 197–213.
- 60) Csathó, P., Árendás, T., Fodor, N., & Németh, T. (2009). Evaluation of different fertilizer recommendation systems on various soils and crops in Hungary. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(11–12), 1689–1711. <https://doi.org/10.1080/00103620902895797>
- 61) Csathó, P., Árendás, T., Szabó, A., Sándor, R., Ragályi, P., Pokovai, K., Tóth, Z., & Kremper, R. (2019). Phosphorus-induced zinc deficiency in maize (*Zea mays* L.) on a calcareous chernozem soil. *Agrokémia És Talajtan*, 68(Supplement), 40–52. <https://doi.org/10.1556/0088.2018.00016>
- 62) Csathó, P., & Radimsky, L. (2012). Sustainable agricultural NP turnover in the 27 European countries. In E. Lichtfouse (Ed.), *Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health* (Vol. 9, pp. 161–186). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4113-3_7
- 63) Csathó, P., Árendás, T., & Németh, T. (1998). New environmentally friendly fertiliser advisory system, based on the data set of the Hungarian long-term field trials set up between 1960 and 1995. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(11–14), 2161–2174. <https://doi.org/10.1080/00103629809370100>
- 64) Cseresnyés, I., Pokovai, K., Bányai, J., & Mikó, P. (2022). Root electrical capacitance can be a promising plant phenotyping parameter in wheat. *Plants*, 11(21), 2975. <https://doi.org/10.3390/plants11212975>
- 65) Cseresnyés, I., Rajkai, K., & Takács, T. (2016a). Indirect monitoring of root activity in soybean cultivars under contrasting moisture regimes by measuring electrical capacitance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(5), 121. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2149-z>
- 66) Cseresnyés, I., Rajkai, K., & Takács, T. (2016b). Szójafajták gyökernövekedésének és szárazságtűrésének in situ vizsgálata elektromos kapacitás mérésével. *Agrokémia És Talajtan*, 65(2), 243–257. <https://doi.org/10.1556/0088.2016.65.2.5>
- 67) Cseresnyés, I., Szitár, K., Rajkai, K., Füzy, A., Mikó, P., Kovács, R., & Takács, T. (2018). Application of electrical capacitance method for prediction of plant root mass and activity

- in field-grown crops. *Frontiers in Plant Science*, 9, 93. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00093>
- 68) Cseresnyés, I., Takács, T., Végh, K. R., Anton, A., & Rajkai, K. (2013). Electrical impedance and capacitance method: A new approach for detection of functional aspects of arbuscular mycorrhizal colonization in maize. *European Journal of Soil Biology*, 54, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.11.001>
- 69) Csitári, G., Tóth, Z., & Kökény, M. (2021). Effects of organic amendments on soil aggregate stability and microbial biomass in a long-term fertilization experiment (IOSDV). *Sustainability*, 13(17), 9769. <https://doi.org/10.3390/su13179769>
- 70) Dal Cortivo, C., Barion, G., Ferrari, M., Visioli, G., Dramis, L., Panozzo, A., & Vamerali, T. (2018). Effects of field inoculation with VAM and bacteria consortia on root growth and nutrients uptake in common wheat. *Sustainability*, 10(9), 3286. <https://doi.org/10.3390/su10093286>
- 71) Dalton, F. N. (1995). In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and Soil*, 173(1), 157–165. <https://doi.org/10.1007/BF00155527>
- 72) Debreczeni, B., & Németh, T. (2009). *Az Országos műtrágyázási tartamkísérletek (OMTK) kutatási eredményei, 1967-2001*. Akadémia Kiadó.
- 73) Di Salvo, L. P., Cellucci, G. C., Carlino, M. E., & García De Salamone, I. E. (2018a). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation and nitrogen fertilization increase maize (*Zea mays* L.) grain yield and modified rhizosphere microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 126, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.010>
- 74) Di Salvo, L. P., Ferrando, L., Fernández-Scavino, A., & García De Salamone, I. E. (2018b). Microorganisms reveal what plants do not: Wheat growth and rhizosphere microbial communities after *Azospirillum brasilense* inoculation and nitrogen fertilization under field conditions. *Plant and Soil*, 424(1–2), 405–417. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3548-7>
- 75) Dias, T., Correia, P., Carvalho, L., Melo, J., De Varennes, A., & Cruz, C. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungal species differ in their capacity to overrule the soil's legacy from maize monocropping. *Applied Soil Ecology*, 125, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.025>
- 76) Dimkpa, C., Weinand, T., & Asch, F. (2009). Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant, Cell & Environment*, 32(12), 1682–1694. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02028.x>
- 77) Dodor, D. E., & Tabatabai, M. A. (2003). Effect of cropping systems on phosphatases in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), 7–13. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390016>
- 78) Dorissant, L., Clark, J., & Kovács, P. (2025). Corn growth and yield response to starter fertilizer in phosphorus-sufficient soils. *Agronomy Journal*, 117(3). <https://doi.org/10.1002/agj2.70079>
- 79) Dotaniya, M. L., Aparna, K., Dotaniya, C. K., Singh, M., & Regar, K. L. (2019). Role of soil enzymes in sustainable crop production. In *Enzymes in Food Biotechnology* (pp. 569–589). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00033-5>
- 80) Dudás, A. (2017). Sporeforming *Bacillus* biofactors for healthier fruit quality of tomato in pots and field. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 1399–1418. https://doi.org/10.15666/aeer/1504_13991418
- 81) Egnér, H., Riehm, H., & Domingo, W. R. (1960). Untersuchungen über die chemische

Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. *Chemische Extraktionsmethoden Zur Phosphor-Und Kaliumbestimmung. Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler*, 26, 199–215.

- 82) Elliott, A. J., Daniell, T. J., Cameron, D. D., & Field, K. J. (2021). A commercial arbuscular mycorrhizal inoculum increases root colonization across wheat cultivars but does not increase assimilation of mycorrhiza-acquired nutrients. *Plants, People, Planet*, 3(5), 588–599. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10094>
- 83) Ercoli, L., Schüßler, A., Arduini, I., & Pellegrino, E. (2017). Strong increase of durum wheat iron and zinc content by field-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi at different soil nitrogen availabilities. *Plant and Soil*, 419(1–2), 153–167. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3319-5>
- 84) FAO. (2019). *World fertilizer trends and outlook to 2022*. <http://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf>.
- 85) Faye, A., Dalpé, Y., Ndung'u-Magiroy, K., Jefwa, J., Ndoye, I., Diouf, M., & Lesueur, D. (2013). Evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(6), 1201–1208. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-326>
- 86) Frew, A. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungal diversity increases growth and phosphorus uptake in C3 and C4 crop plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 248–250. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.015>
- 87) Fukami, J., Nogueira, M. A., Araujo, R. S., & Hungria, M. (2016). Accessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasilense*. *AMB Express*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13568-015-0171-y>
- 88) Fulchieri, M., & Frioni, L. (1994). *Azospirillum* inoculation on maize (*Zea mays*): Effect on yield in a field experiment in central argentina. *Soil Biology and Biochemistry*, 26(7), 921–923. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90308-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90308-5)
- 89) Füleky, G. (1999). *Tápanyag-gazdálkodás*. Mezőgazda Kiadó.
- 90) Füzy, A., Parádi, I., Kelemen, B., Kovács, R., Cseresnyés, I., Szili-Kovács, T., Árendás, T., Fodor, N., & Takács, T. (2023). Soil biological activity after a sixty-year fertilization practice in a wheat-maize crop rotation. *Plos One*, 18(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292125>
- 91) Galindo, F. S., Pagliari, P. H., Da Silva, E. C., De Lima, B. H., Fernandes, G. C., Thiengo, C. C., Bernardes, J. V. S., Jalal, A., Oliveira, C. E. S., De Sousa Vilela, L., Furlani Junior, E., Nogueira, T. A. R., Do Nascimento, V., Teixeira Filho, M. C. M., & Lavres, J. (2024). Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: The role of beneficial microbial inoculation interactions. *BMC Plant Biology*, 24(1), 268. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04971-3>
- 92) Gamalero, E., & Glick, B. R. (2015). Bacterial modulation of plant ethylene levels. *Plant Physiology*, 169(1), 13–22. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00284>
- 93) Gangwar, R. K., Makádi, M., Fuchs, M., Csorba, Á., Michéli, E., Demeter, I., Tánácsics, A., & Szegi, T. (2019). Talajmikrobiológiai paraméterek változása szántóként és rétként hasznosított réti szolonyec talajokban. *Agrokémia És Talajtan*, 68(1), 155–175. <https://doi.org/10.1556/0088.2019.00024>
- 94) Gangwar, R., Makádi, M., Bresilla, B., Zain, M., Weldmichael, T., Demeter, I., Tánácsics, 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>

- 95) Garcia, C., Hernandez, T., & Costa, F. (1997). Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(1–2), 123–134. <https://doi.org/10.1080/00103629709369777>
- 96) 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>
- 97) Ghorchiani, M., Etesami, H., & Alikhani, H. A. (2018). Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.016>
- 98) Gioseffi, E., De Neergaard, A., & Schjoerring, J. K. (2012). Interactions between uptake of amino acids and inorganic nitrogen in wheat plants. *Biogeosciences*, 9(4), 1509–1518. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1509-2012>
- 99) Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 489–500.
- 100) Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- 101) Glick, B. R., Penrose, D. M., & Li, J. (1998). A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*, 190(1), 63–68. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0532>
- 102) Gorban, A. N., Pokidysheva, L. I., Smirnova, E. V., & Tyukina, T. A. (2011). Law of the minimum paradoxes. *Bulletin of Mathematical Biology*, 73(9), 2013–2044. <https://doi.org/10.1007/s11538-010-9597-1>
- 103) Gordon, W. B., & Pierzynski, G. M. (2006). Corn hybrid response to starter fertilizer combinations. *Journal of Plant Nutrition*, 29(7), 1287–1299. <https://doi.org/10.1080/01904160600767591>
- 104) Grafe, M., Eick, M. J., Grossl, P. R., & Saunders, A. M. (2002). Adsorption of arsenate and arsenite on ferrihydrite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Journal of Environmental Quality*, 31(4), 1115–1123. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1115>
- 105) Grand view research. (2024). *Biofertilizers market size, share & trends analysis report by product (nitrogen fixation, phosphate solubilizing), by application (seed treatment, oil treatment), by crop type, by region, and segment forecasts, 2025–2030*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biofertilizers-industry>
- 106) Gray, E. J., & Smith, D. L. (2005). Intracellular and extracellular PGPR: Commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(3), 395–412. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.030>
- 107) Gu, H., Liu, L., Butnor, J. R., Sun, H., Zhang, X., Li, C., & Liu, X. (2021). Electrical capacitance estimates crop root traits best under dry conditions—A case study in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant and Soil*, 467(1–2), 549–567. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05094-6>
- 108) Guasin, Y. S., Kamal, R., Mehta, C. M., Singh, U. S., & Sharma, A. K. (2015). Phosphate solubilizing and indole-3-acetic acid producing bacteria from the soil of Garhwal Himalaya aimed to improve the growth of rice. *Journal of Environmental Biology*, 36(1), 301.

- 109) Gupta, S. C. (1985). Predicting corn planting dates for moldboard and no-till tillage systems in the corn belt. *Agronomy Journal*, 77(3), 446–455. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700030021x>
- 110) Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245(1), 83–93. <https://doi.org/10.1023/A:1020663916259>
- 111) Haney, R. L., Haney, E. B., Hossner, L. R., & Arnold, J. G. (2010). Modifications to the new soil extractant H3A-1: A multinutrient extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(12), 1513–1523. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.482173>
- 112) Haney, R. L., Haney, E. B., Smith, D. R., & White, M. J. (2017). Removal of lithium citrate from H3A for determination of plant available P. *Open Journal of Soil Science*, 07(11), 301–314. <https://doi.org/10.4236/ojss.2017.711022>
- 113) Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. *Annals of Microbiology*, 60(4), 579–598. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1>
- 114) Haynes, R. J. (1982). Effects of liming on phosphate availability in acid soils: A critical review. *Plant and Soil*, 68(3), 289–308. <https://doi.org/10.1007/BF02197935>
- 115) He, Y. Q., Zhu, Y. G., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2002). Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. *Journal of Plant Nutrition*, 25(4), 913–925. <https://doi.org/10.1081/PLN-120002969>
- 116) Hett, J., Döring, T. F., Bevivino, A., & Neuhoff, D. (2023). Impact of microbial consortia on organic maize in a temperate climate varies with environment but not with fertilization. *European Journal of Agronomy*, 144(126743). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126743>
- 117) Hinsinger, P., Herrmann, L., Lesueur, D., Robin, A., Trap, J., Waithaisong, K., & Plassard, C. (2015). Impact of roots, microorganisms and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. In *Annual Plant Reviews* (pp. 375–407). <https://doi.org/10.1002/9781118958841.ch13>
- 118) Igual, J. M., Valverde, A., Cervantes, E., & Velázquez, E. (2001). Phosphate-solubilizing bacteria as inoculants for agriculture: Use of updated molecular techniques in their study. *Agronomie*, 21(6–7), 561–568. <https://doi.org/10.1051/agro:2001145>
- 119) Itoh, S. (2002). Application of mechanistic model for phosphorus uptake by barley under low temperature conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48(3), 441–445. <https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409223>
- 120) Iyyemperumal, K., & Shi, W. (2008). Soil enzyme activities in two forage systems following application of different rates of swine lagoon effluent or ammonium nitrate. *Applied Soil Ecology*, 38(2), 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.10.001>
- 121) Järvan, M., Edesi, L., Adamson, A., & Võsa, T. (2014). Soil microbial communities and dehydrogenase activity depending on farming systems. *Plant, Soil and Environment*, 60(10), 459–463. <https://doi.org/10.17221/410/2014-PSE>
- 122) Johnston, A. E., Lane, P. W., Mattingly, G. E. G., Poulton, P. R., & Hewitt, M. V. (1986). Effects of soil and fertilizer P on yields of potatoes, sugar beet, barley and winter wheat on a sandy clay loam soil at Saxmundham, Suffolk. *The Journal of Agricultural Science*, 106(1), 155–167. <https://doi.org/10.1017/S0021859600061864>
- 123) Juhos, K., Czígány, 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>

- 124) 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>
- 125) Jumrani, K., Bhatia, V. S., Kataria, S., Alamri, S. A., Siddiqui, M. H., & Rastogi, A. (2022). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi alleviates the adverse effects of high temperature in soybean. *Plants*, 11(17), 2210. <https://doi.org/10.3390/plants11172210>
- 126) Kabalan, S., Juhos, K., Tóth, E., & Biró, B. (2022). Impact of symbiotic mycorrhiza interrelation in some soil biological parameters and growth of five cover crops. *Agrokémia És Talajtan*, 71(1), 135–147. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00117>
- 127) Kádár, I. (1992). *A Növénytáplálás Alapelvei és Módszerei*. Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete Budapest.
- 128) Kádár, I. (2008). A mikroelemkutatások eredményeiről, különös tekintettel a Cu és Zn elemekre. *Acta Agronomica Óváriensis*, 50(1), 9–13.
- 129) Kádár, I. (2011). A műtrágyázási szaktanácsadás alapelve és módszere. *Növénytermelés*, 60(2), 137–155. <https://doi.org/10.1556/Novenyterm.60.2011.2.8>
- 130) Kaiser, D. E., Coulter, J. A., & Vetsch, J. A. (2016). Corn hybrid response to in-furrow starter fertilizer as affected by planting date. *Agronomy Journal*, 108(6), 2493–2501. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0124>
- 131) Kaiser, D. E., Mallarino, A. P., & Bermudez, M. (2005). Corn grain yield, early growth, and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization. *Agronomy Journal*, 97(2), 620–626. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0620>
- 132) Kalayu, G. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: Promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- 133) Kalembasa, S., & Symanowicz, B. (2012). Enzymatic activity of soil after applying various waste organic materials, ash, and mineral fertilizers. *Pol. J. Environ. Stud*, 21(6), 1635–1641.
- 134) Kálmán, C. D., Nagy, Z., Berényi, A., Kiss, E., & Posta, K. (2024). Investigating PGPR bacteria for their competence to protect hybrid maize from the factor drought stress. *Cereal Research Communications*, 52(1), 129–150. <https://doi.org/10.1007/s42976-023-00388-0>
- 135) Kátai, J. (2011). *Talajökológia*. Debreceni Egyetem.
- 136) Kátai, J., Zsuposné Oláh, Á., Makádi, M., Henzsel, I., & Tállai, M. (2022). Effect of mineral and organic fertilizers on some soil chemical and biological properties in a 90-year-old long-term experiment. *Agrokémia És Talajtan*, 71(1), 101–118. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00094>
- 137) Kaur, J., Gosal, S. K., & Khurana, S. (2020). Soil enzymes: An agricultural perspective. In *New Perspectives in Agricultural Sciences* (pp. 59–75).
- 138) Kennedy, A. C., Stubbs, T. L., & Schillinger, W. F. (2004). Soil and crop management effects on soil microbiology. In *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture* (pp. 295–316).
- 139) Khan, M. S., & Zaidi, A. (2007). Synergistic effects of the inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria and an arbuscular mycorrhizal fungus on the performance of wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31(6), 355–362.
- 140) Khan, Md. S., Zaidi, A., & Ahmad, E. (2014). Mechanism of Phosphate Solubilization

- and Physiological Functions of Phosphate-Solubilizing Microorganisms. In M. S. Khan, A. Zaidi, & J. Musarrat (Eds.), *Phosphate Solubilizing Microorganisms* (pp. 31–62). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5_2
- 141) Kishore, N., Pindi, P. K., & Ram Reddy, S. (2015). Phosphate-solubilizing microorganisms: A critical review. In *Plant Biology and Biotechnology* (pp. 307–333). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6_12
- 142) Koide, R. T. (1991). Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytologist*, *117*(3), 365–386. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00001.x>
- 143) Kononova, M. M. (1966). *Soil Organic Matter*. Pergamon Press, Oxford.
- 144) Kotroczó, Z., Fekete, I., Juhos, K., Prettl, N., Nugroho, P. A., Várbiro, G., Biró, B., & Kocsis, T. (2023). Characterisation of luvisols based on wide-scale biological properties in a long-term organic matter experiment. *Biology*, *12*(7), 909. <https://doi.org/10.3390/biology12070909>
- 145) Kotroczó, Z., Kocsis, T., Juhos, K., Halász, J., & Fekete, I. (2022). How does long-term organic matter treatment affect the biological activity of a Centre European forest soil? *Agronomy*, *12*(10), 2301. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102301>
- 146) Kotroczó, Z., Veres, Z., Fekete, I., Krakomperger, Z., Tóth, J. A., Lajtha, K., & Tóthmérész, B. (2014). Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, *70*, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.028>
- 147) Kovačević, V., & Rastija, M. (2010). Impacts of liming by dolomite on the maize and barley grain yields. *Poljoprivreda*, *16*(2), 3–8.
- 148) Kremper, R., Berényi, S., Nagy, P. T., Balláné, K. A., & Loch, J. (2008). Összefüggések a különböző talaj-kivonószerekkel kivont mikroelem-tartalom és a fontosabb talajtulajdonságok között. *Talajvédelem Különszám*, 441–446.
- 149) Kumar, M., Kumar, V., & Prasad, R. (Eds.). (2020). *Phyto-Microbiome in Stress Regulation*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2576-6>
- 150) Kumar, R., & Shastri, B. (2017). Role of phosphate-solubilising microorganisms in sustainable agricultural development. In *Agro-Environmental Sustainability* (pp. 271–303). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_13
- 151) Kumar, S., Chaudhuri, S., & Maiti, S. K. (2013). Soil dehydrogenase enzyme activity in natural and mine soil—a review. *Middle-East Journal of Scientific Research*, *13*(7), 898–906.
- 152) Kurniawati, A., Stankovics, P., Hilmi, Y. S., Toth, G., Smol, M., & Toth, Z. (2023). Understanding the future of bio-based fertilisers: The EU's policy and implementation. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, *3*, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100033>
- 153) Ladha, J. K., Peoples, M. B., Reddy, P. M., Biswas, J. C., Bennett, A., Jat, M. L., & Krupnik, T. J. (2022). Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research*, *283*, 108541. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108541>
- 154) Lambers, H. (2022). Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, *73*(1). <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>
- 155) László, B. J., Begum, S. R., Erős-Honti, Zs., Ladányi, M., Szalay, L., & Biró, B. (2019). Mikorrhiza kolonizáció különböző fagyatúrású, M9 alanyú alma-és vadalyanyú

kajszifajtáknál a téli nyugalmi időszak alatt. *Horticulture/Kertgazdaság*, 51(4).

- 156) Lee, Y. B., Lorenz, N., Dick, L. K., & Dick, R. P. (2007). Cold storage and pretreatment incubation effects on soil microbial properties. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1299–1305. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0245>
- 157) Li, X., Luo, L., Yang, J., Li, B., & Yuan, H. (2015). Mechanisms for solubilization of various insoluble phosphates and activation of immobilized phosphates in different soils by an efficient and salinity-olerant *Aspergillus niger* strain An2. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(5), 2755–2768. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1465-2>
- 158) Liu, A., Hamel, C., Hamilton, R. I., & Smith, D. L. (2000). Mycorrhizae formation and nutrient uptake of new corn (*Zea mays* L.) hybrids with extreme canopy and leaf architecture as influenced by soil N and P levels. *Plant and Soil*, 221(2), 157–166. <https://doi.org/10.1023/A:1004777821422>
- 159) Londoño, D. M. M., Meyer, E., González, D., Hernández, A. G., Soares, C. R. F. S., & Lovato, P. E. (2019). Landrace maize varieties differ from conventional and genetically modified hybrid maize in response to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 29(3), 237–249. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00883-5>
- 160) Lopes E Silva, L., Andrade, J. A. D. C., Maltoni, K. L., & Lannes, L. S. (2023). Potential of root acid phosphatase activity to reduce phosphorus fertilization in maize cultivated in Brazil. *Plos One*, 18(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292542>
- 161) Lumbanraja, J., Mulyani, S., Utomo, M., & Sarno, S. (2017). Phosphorus extraction from soil constituents using bray P-1, Mehlich-1 and Olsen solutions. *Journal of Tropical Soils*, 22(2), 67–76. <https://doi.org/10.5400/jts.2017.v22i2.67-76>
- 162) Mäder, P., Kaiser, F., Adholeya, A., Singh, R., Uppal, H. S., Sharma, A. K., Srivastava, R., Sahai, V., Aragno, M., Wiemken, A., Johri, B. N., & Fried, P. M. (2011). Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat–rice and wheat–black gram rotations in India. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.031>
- 163) Makádi, M., Tomócsik, A., Orosz, V., Lengyel, J., Biró, B., & Márton, Á. (2007). Biogázüzemi fermentlé és Phylazonit MC baktériumtrágya hatása a silókukorica zöldtömegére és a talaj biológiai aktivitására. *Agrokémia És Talajtan*, 56(2), 367–378. <https://doi.org/10.1556/agrokem.56.2007.2.12>
- 164) Makaza, W., & Khiari, L. (2023). Too salty or toxic for use: A tale of starter fertilizers in agronomic cropping systems. *Agronomy*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy13112690>
- 165) Margalef, O., Sardans, J., Fernández-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I. A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D., & Peñuelas, J. (2017). Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>
- 166) 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>
- 167) Matics, H., & Biró, B. (2015). History of soil fertility enhancement with inoculation methods. *Journal of Central European Agriculture*, 16(2), 231–248. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/16.2.1614>
- 168) 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>
- 169) McDowell, R. W., Elkin, K. R., & Kleinman, P. J. A. (2017). Temperature and nitrogen effects on phosphorus uptake by agricultural stream-bed sediments. *Journal of Environmental Quality*, 46(2), 295–301. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.09.0352>
- 170) McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—Arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495–501. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- 171) McGrath, J. M., & Binford, G. D. (2012). Corn response to starter fertilizer with and without AVAIL. *Crop Management*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1094/CM-2012-0320-02-RS>
- 172) McKenzie, N., Coughlan, K., & Cresswell, H. (2002). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation* (Vol. 5). Csiro Publishing.
- 173) Mehnaz, S., Kowalik, T., Reynolds, B., & Lazarovits, G. (2010). Growth promoting effects of corn (*Zea mays*) bacterial isolates under greenhouse and field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10), 1848–1856. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.07.003>
- 174) Miller, A. J., & Cramer, M. D. (2005). Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant and Soil*, 274(1–2), 1–36. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0965-1>
- 175) Moore, J. M., Klose, S., & Tabatabai, M. A. (2000). Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 31(3–4), 200–210. <https://doi.org/10.1007/s003740050646>
- 176) Mosimann, C., Oberhänsli, T., Ziegler, D., Nassal, D., Kandeler, E., Boller, T., Mäder, P., & Thonar, C. (2017). Tracing of two *Pseudomonas* strains in the root and rhizoplane of maize, as related to their plant growth-promoting effect in contrasting soils. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02150>
- 177) Naiman, A. D., Latrónico, A., & García De Salamone, I. E. (2009). Inoculation of wheat with *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens*: Impact on the production and culturable rhizosphere microflora. *European Journal of Soil Biology*, 45(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.11.001>
- 178) Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of phosphatase enzymes in soil. In *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling* (pp. 215–243). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9>
- 179) Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fornasier, F., Moscatelli, M. C., & Marinari, S. (2012). Soil enzymology: Classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 48(7), 743–762. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0723-0>
- 180) Näsholm, T., Kielland, K., & Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*, 182(1), 31–48. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02751.x>
- 181) Nemeskéri, E., Le, A. T., Bakr, J., Posta, K., Neményi, A. B., Pék, Z., Takács, S., & Helyes, L. (2023). Application of mycorrhizae and rhizobacteria inoculations in the cultivation of processing tomato under water shortage. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2, 111–118. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/2/13340>
- 182) Newcomb, C. J. (2015). Humic matter in soil and the environment, principles and controversies. *Soil Science Society of America Journal*, 79(5), 1520–1520.

<https://doi.org/10.2136/sssaj2015.0004br>

- 183) Neyroud, J., & Lischer, P. (2003). Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(4), 422–431. <https://doi.org/10.1002/jpln.200321152>
- 184) Nichols, K. A., & Wright, S. F. (2004). Contributions of fungi to soil organic matter in agroecosystems. In *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture* (pp. 180–196). CRC Press.
- 185) 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>
- 186) Nonaka, A., Yamamoto, H., Kamiya, N., Kotani, H., Yamakawa, H., Tsujimoto, R., & Fujita, Y. (2019). Accessory proteins of the nitrogenase assembly, NifW, NifX/NafY, and NifZ, are essential for diazotrophic growth in the nonheterocystous cyanobacterium *Leptolyngbya boryana*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 495. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00495>
- 187) Nugroho, P. A. (2024). *Indicative soil biological parameters in long-term conventional and conservation tillage experiment*. Doctoral (Ph.D.) dissertation, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Doctoral School of Horticulture Sciences, Budapest.
- 188) Nugroho, P. A., Juhos, K., Prettl, N., & Kotrocó, Zs. (2023a). Soil biological indicators under sunflowers field in a long-term tillage experiment of luvisol. *International Scientific Journal 'Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources Journal'*, LXIX(4), 143–146.
- 189) Nugroho, P. A., Juhos, K., Prettl, N., Madarász, B., & Kotrocó, Zs. (2023b). Long-term conservation tillage results in a more balanced soil microbiological activity and higher nutrient supply capacity. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(3), 528–537. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.003>
- 190) Nugroho, P. A., Kotrocó, 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>
- 191) Nugroho, P. A., Prettl, N., Kotrocó, 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>
- 192) Nyéki, A., Kerepesi, C., Daróczy, B., Benczúr, A., Milics, G., Nagy, J., Harsányi, E., Kovács, A. J., & Neményi, M. (2021). Application of spatio-temporal data in site-specific maize yield prediction with machine learning methods. *Precision Agriculture*, 22(5), 1397–1415. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09833-8>
- 193) Ocaña-Reyes, J. A., Gutiérrez, M., Paredes-Espinosa, R., Riveros, C. A., Cárdenas, G. P., Bravo, N., Quispe-Tomas, A., Amaringo-Cordova, L. P., Ocaña-Canales, J. C., Zavala-Solórzano, J. W., Huamaní Yupanqui, H. A., Cruz, J., & Solórzano-Acosta, R. (2024). Tillage practices and liming: Comparative study of soil properties and forage corn production. *Agronomy*, 14(3), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030558>
- 194) Opala, P. A. (2017). Influence of lime and phosphorus application rates on growth of

- maize in an acid soil. *Advances in Agriculture*, 2017, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2017/7083206>
- 195) Osterholz, W. R., Rinot, O., Liebman, M., & Castellano, M. J. (2017). Can mineralization of soil organic nitrogen meet maize nitrogen demand? *Plant and Soil*, 415(1–2), 73–84. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3137-1>
- 196) Pabar, S. A., Kotroczó, Z., Takács, T., & Biró, B. (2024). Evaluating the efficacy of selected plant growth-promoting microorganisms in optimizing plant growth and soil health in diverse soil types. *Agriculture*, 14(9), 1586. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091586>
- 197) Padilla, F. M., de Souza, R., Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Giménez, C., & Thompson, R. B. (2018). Different Responses of Various Chlorophyll Meters to Increasing Nitrogen Supply in Sweet Pepper. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1752. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01752>
- 198) Pardo, P., López-Sánchez, J. F., & Rauret, G. (2003). Relationships between phosphorus fractionation and major components in sediments using the SMT harmonised extraction procedure. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 376(2), 248–254. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-1897-y>
- 199) Pellegrino, E., Turrini, A., Gamper, H. A., Cafà, G., Bonari, E., Young, J. P. W., & Giovannetti, M. (2012). Establishment, persistence and effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal inoculants in the field revealed using molecular genetic tracing and measurement of yield components. *New Phytologist*, 194(3), 810–822. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04090.x>
- 200) Penn, C., & Camberato, J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- 201) 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>
- 202) Pereira, N. C. M., Galindo, F. S., Gazola, R. P. D., Dupas, E., Rosa, P. A. L., Mortinho, E. S., & Filho, M. C. M. T. (2020). Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth promoting bacteria. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00040>
- 203) 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.
- 204) Posta, K., & Füleky, Gy. (1997). Foszfortrágyázás hatása a kukorica (*Zea mays* L. cv. Pioneer) mikorrhizáltságára *Glomus mosseae* (Nicol. Ger.) fertőzésekör. *Növénytermelés*, 46, 573–582.
- 205) Posta, K., & Hong Duc, N. (2020). Benefits of arbuscular mycorrhizal fungi application to crop production under water scarcity. In G. Ondrasek (Ed.), *Drought—Detection and Solutions*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86595>
- 206) Power, J. F., Grunes, D. L., Reichman, G. A., & Willis, W. O. (1964). Soil temperature effects on phosphorus availability. *Agronomy Journal*, 56(6), 545–548. <https://doi.org/10.2134/agronj1964.00021962005600060007x>
- 207) Preston, C. L., Ruiz Diaz, D. A., & Mengel, D. B. (2019). Corn response to long-term phosphorus fertilizer application rate and placement with strip-tillage. *Agronomy Journal*, 111(2), 841–850. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0422>

- 208) 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>
- 209) 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>
- 210) 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>
- 211) Ragán, P., Rátónyi, T., Széles, A., Nagy, J., & Tamás András. (2024). Az agrotechnikai paraméterek és az évjárat hatásának vizsgálata a kukorica (*Zea mays* L.) termésére polifaktoriális tartamkísérleti adatok felhasználásával. *Növénytermelés*, *73*(2), 77–100.
- 212) Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(1), 49–68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- 213) Reid, R., & Hayes, J. (2003). Mechanisms and control of nutrient uptake in plants. In *International review of cytology* (pp. 74–114).
- 214) Renaut, S., Daoud, R., Masse, J., Vialle, A., & Hijri, M. (2020). Inoculation with *Rhizophagus irregularis* does not alter arbuscular mycorrhizal fungal community structure within the roots of corn, wheat, and soybean crops. *Microorganisms*, *8*(1), 83. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010083>
- 215) Rengel, Z. (1993). Mechanistic simulation models of nutrient uptake: A review. *Plant and Soil*, *152*(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/BF00029086>
- 216) Rodríguez, V. M., Butrón, A., Sandoya, G., Ordás, A., & Revilla, P. (2007). Combining maize base germplasm for cold tolerance breeding. *Crop Science*, *47*(4), 1467–1474. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0648>
- 217) Roesti, D., Gaur, R., Johri, B., Imfeld, G., Sharma, S., Kawaljeet, K., & Aragno, M. (2006). Plant growth stage, fertiliser management and bio-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria affect the rhizobacterial community structure in rain-fed wheat fields. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(5), 1111–1120. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.010>
- 218) 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>
- 219) Rosa, A. T., Diaz, D. A. R., Hansel, F. D., Sebastian, J. S. V., & Adee, E. A. (2019). Genotypic variation on root growth and nutrient uptake in corn and soybean. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, *2*(1), 1–12. <https://doi.org/10.2134/age2019.03.0018>
- 220) Rubin, R. L., Van Groenigen, K. J., & Hungate, B. A. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria are more effective under drought: A meta-analysis. *Plant and Soil*, *416*(1–2), 309–323. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3199-8>
- 221) Salomon, M. J., Demarmels, R., Watts-Williams, S. J., McLaughlin, M. J., Kafle, A., Ketelsen, C., Soupir, A., Bücking, H., Cavagnaro, T. R., & Van Der Heijden, M. G. A.

- (2022). Global evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants under greenhouse and field conditions. *Applied Soil Ecology*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104225>
- 222) 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>
- 223) Sardans, J., Peñuelas, J., & Estiarte, M. (2008). Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.011>
- 224) Sárdi, K. (2015). A foszfordinamika jellemzői trágyázási tartamkísérletek talajaiban. *Agrokémia És Talajtan*, 64(1), 199–208. <https://doi.org/10.1556/0088.2015.64.1.14>
- 225) Sarikhani, M. R., Aliasgharzad, N., & Khoshru, B. (2020). P solubilizing potential of some plant growth promoting bacteria used as ingredient in phosphatic biofertilizers with emphasis on growth promotion of *Zea mays* L. *Geomicrobiology Journal*, 37(4), 327–335. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1700323>
- 226) Sasvári, Z., Magurno, F., & Posta, K. (2012). Hosszú időtartamú monokultúrás termesztésből és különböző vetésforgó rendszerekből származó növények arbuszkuláris mikorrhiza (AM) gomba-közösségeinek vizsgálata. *Tájökológiai Lapok*, 10(2), 351–360. <https://doi.org/10.56617/tl.3801>
- 227) Scharfy, D., Boccali, N., & Stucki, M. (2017). Clean Technologies in Agriculture—How to Prioritise Measures? *Sustainability*, 9(8), 1303. <https://doi.org/10.3390/su9081303>
- 228) Schulte-Uebbing, L., & De Vries, W. (2021). Reconciling food production and environmental boundaries for nitrogen in the European Union. *Science of The Total Environment*, 786, 147427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147427>
- 229) Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2204. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>
- 230) Selvakumar, G., Kundu, S., Joshi, P., Nazim, S., Gupta, A. D., & Gupta, H. S. (2010). Growth promotion of wheat seedlings by *Exiguobacterium acetylicum* 1P (MTCC 8707) a cold tolerant bacterial strain from the Uttarakhand Himalayas. *Indian Journal of Microbiology*, 50(1), 50–56. <https://doi.org/10.1007/s12088-009-0024-y>
- 231) Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- 232) Simonné Dudás, A. (2021). *Bioeffektor talajoltók hatása a paradicsomra és a talaj foszforhasznosulására*. Doktori (PhD.) értekezés, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Kertészettudományi Intézet Agrárkörnyezettani Tanszék.
- 233) 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* (pp. 318–348).
- 234) Sinsabaugh, R. L., Lauber, C. L., Weintraub, M. N., Ahmed, B., Allison, S. D., Crenshaw, C., Contosta, A. R., Cusack, D., Frey, S., Gallo, M. E., Gartner, T. B., Hobbie, S. E., Holland, K., Keeler, B. L., Powers, J. S., Stursova, M., Takacs-Vesbach, C., Waldrop, M. P., Wallenstein, M. D., ... Zeglin, L. H. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at

- global scale: Stoichiometry of soil enzyme activity. *Ecology Letters*, 11(11), 1252–1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- 235) Smith, P., & Gregory, P. J. (2013). Climate change and sustainable food production. *Proceedings of the Nutrition Society*, 72(1), 21–28. <https://doi.org/10.1017/S0029665112002832>
- 236) Song, Y. Y., Zeng, R. S., Xu, J. F., Li, J., Shen, X., & Yihdego, W. G. (2010). Interplant communication of tomato plants through underground common mycorrhizal networks. *PLoS ONE*, 5(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013324>
- 237) Soumare, A., Diedhiou, A. G., Thuita, M., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Gopalakrishnan, S., & Kouisni, L. (2020). Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards a sustainable agriculture. *Plants*, 9(8), 1011. <https://doi.org/10.3390/plants9081011>
- 238) Sparling, G., Vojvodić-Vuković, M., & Schipper, L. A. (1998). Hot-water-soluble C as a simple measure of of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(10–11), 1469–1472.
- 239) Spohn, M., & Kuzyakov, Y. (2013). Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation – Coupling soil zymography with 14C imaging. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.015>
- 240) Spohn, M., Treichel, N. S., Cormann, M., Schloter, M., & Fischer, D. (2015). Distribution of phosphatase activity and various bacterial phyla in the rhizosphere of *Hordeum vulgare* L. depending on P availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.018>
- 241) Sylvia, D. M., Hammond, L. C., Bennett, J. M., Haas, J. H., & Linda, S. B. (1993). Field response of maize to a VAM fungus and water management. *Agronomy Journal*, 85(2), 193–198. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500020006x>
- 242) Széles, A., Horváth, É., Simon, K., Zagyai, P., & Huzsvai, L. (2023). Maize production under drought stress: Nutrient supply, yield prediction. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183301>
- 243) Széles, A., Megyes, A., & Nagy, J. (2012). Irrigation and nitrogen effects on the leaf chlorophyll content and grain yield of maize in different crop years. *Agricultural Water Management*, 107, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.02.001>
- 244) Szentpéteri, L., Irmes, K., Kristó, I., Rácz, A., Vályi-Nagy, M., & Tar, M. (2023). The effect of arbuscular mycorrhiza on the yield of different winter wheat varieties at four nutrient levels. *Review on Agriculture and Rural Development*, 12(1–2), 88–94. <https://doi.org/10.14232/rard.2023.1-2.88-94>
- 245) Szigeti, N., Hermann, T., Juhos, K., & Tóth, G. (2023). Distribution pattern of major crops and their cultivation intensity indicated by soil phosphorus concentrations in Europe. *Agronomy Journal*, 115(4), 1678–1693. <https://doi.org/10.1002/agj2.21337>
- 246) Szili-Kovács, T., Kátai, J., & Takács, T. (2011). Mikrobiológiai indikátorok alkalmazása a talajminőség értékelésében. 1. Módszerek. *Agrokémia És Talajtan*, 60(1), 273–286. <https://doi.org/10.1556/agrokem.60.2011.1.20>
- 247) Tan, K. H. (2014). *Humic matter in soil and the environment: Principles and controversies*. CRC Press.
- 248) Tawaraya, K. (2003). Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition*, 49(5), 655–668. <https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410323>

- 249) Teare, I. D., & Wright, D. L. (1990). Corn hybrid-starter fertilizer interaction for yield and lodging. *Crop Science*, 30(6), 1298–1303. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000060028x>
- 250) Tian, H., Drijber, R. A., Zhang, J. L., & Li, X. L. (2013). Impact of long-term nitrogen fertilization and rotation with soybean on the diversity and phosphorus metabolism of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi within the roots of maize (*Zea mays* L.). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.09.007>
- 251) Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1966). *A talaj termékenységése és a trágyázás*. Mezőgazdasági Kiadó.
- 252) Tóth, E. A., Kalocsai, R., Dorka-Vona, V., & Giczi, Zs. (2017). Az esszenciális mikroelemek szerepe a növények élettani folyamataiban. *Acta Agronomica Óváriensis*, 59(2), 126–150.
- 253) Touchton, J. T., & Karim, F. (1986). Corn growth and yield responses to starter fertilizers in conservation-tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 7(1–2), 135–144. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90013-9)
- 254) Treseder, K. K. (2013). The extent of mycorrhizal colonization of roots and its influence on plant growth and phosphorus content. *Plant and Soil*, 371(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1681-5>
- 255) Tufail, M. A., Ayyub, M., Irfan, M., Shakoor, A., Chibani, C. M., & Schmitz, R. A. (2022). Endophytic bacteria perform better than endophytic fungi in improving plant growth under drought stress: A meta-comparison spanning 12 years (2010–2021). *Physiologia Plantarum*, 174(6). <https://doi.org/10.1111/ppl.13806>
- 256) Turner, B. L., Hopkins, D. W., Haygarth, P. M., & Ostle, N. (2002). β -Glucosidase activity in pasture soils. *Applied Soil Ecology*, 20(2), 157–162. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00020-3)
- 257) Turrini, A., Sbrana, C., Nuti, M. P., Pietrangeli, B. M., & Giovannetti, M. (2005). Development of a model system to assess the impact of genetically modified corn and aubergine plants on arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 266(1–2), 69–75. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4892-6>
- 258) Vahter, T., Lillipuu, E. M., Oja, J., Öpik, M., Vasar, M., & Hiiesalu, I. (2023). Do commercial arbuscular mycorrhizal inoculants contain the species that they claim? *Mycorrhiza*, 33(3), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01105-9>
- 259) Van Der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & Van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
- 260) Van Der Ploeg, R. R., Böhm, W., & Kirkham, M. B. (1999). On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1055–1062. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351055x>
- 261) Varinderpal-Singh, Kunal, Sharma, S., Gosal, S. K., Choudhary, R., Singh, R., Adholeya, A., & Bijay-Singh. (2020). Optical sensing and arbuscular mycorrhizal fungi for improving fertilizer nitrogen and phosphorus use efficiencies in maize. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2087–2098. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00277-z>
- 262) Veerman, C., Pinto Correia, T., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., & Cienciel, E. (2020). Caring for soil is caring for life. *EU Soil Health and Food Mission Board: Brussels, Belgium*.

- 263) Veres, Z., Kotroczó, Z., Fekete, I., Tóth, J. A., Lajtha, K., Townsend, K., & Tóthmérész, B. (2015). Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability. *Applied Soil Ecology*, 92, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.03.006>
- 264) 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>
- 265) Vetsch, J. A., & Randall, G. W. (2002). Corn production as affected by tillage system and starter fertilizer. *Agronomy Journal*, 94(3), 532–540. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.5320>
- 266) Vona, V., Bakos, I. A., Giczi, Z., Kalocsai, R., Vona, M., Kulmány, I. M., & Centeri, C. (2020). Múlt-jelen-jövő a hazai mezőgazdasági talajvizsgálatokban. *Agrokémia És Talajtan*, 69(1–2), 127–151. <https://doi.org/10.1556/0088.2020.00061>
- 267) Vose, P. B. (1984). Effects of genetic factors on nutritional requirements of plants. In *Crop Breeding: A Contemporary Basis* (pp. 67–114).
- 268) Waggoner, P. E., & Norvell, W. A. (1979). Fitting the law of the minimum to fertilizer applications and crop yields. *Agronomy Journal*, 71(2), 352–354. <https://doi.org/10.2134/agronj1979.00021962007100020030x>
- 269) Wakwoya, M. B., Woldeyohannis, W. H., & Yimamu, F. K. (2022). Effects of minimum tillage and liming on maize (*Zea mays* L.) yield components and selected properties of acid soils in Assosa Zone, West Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100301>
- 270) Wang, K., Lin, Z., Dou, J., Jiang, M., Shen, N., & Feng, J. (2023). Identification and surveys of promoting plant growth VOCs from biocontrol bacteria *Paenibacillus peoriae* GXUN15128. *Microbiology Spectrum*, 11(3), e04346-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.04346-22>
- 271) Wang, X.-C., & Lu, Q. (2006). Beta-glucosidase activity in paddy soils of the Taihu Lake Region, China. *Pedosphere*, 16(1), 118–124. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60033-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60033-7)
- 272) Wang, Y., Dong, J., Zheng, X., Zhang, J., Zhou, P., Song, X., Song, W., & Wang, S. (2021). Wheat straw and biochar effect on soil carbon fractions, enzyme activities, and nutrients in a tobacco field. *Canadian Journal of Soil Science*, 101(3), 353–364. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0092>
- 273) Wani, S. A., Chand, S., Wani, M. A., Ramzan, M., & Hakeem, K. R. (2016). *Azotobacter chroococcum* – A potential biofertilizer in agriculture: An overview. In K. R. Hakeem, J. Akhtar, & M. Sabir (Eds.), *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives* (pp. 333–348). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-34451-5_15
- 274) Watts, D. B., Torbert, H. A., Feng, Y., & Prior, S. A. (2010). Soil Microbial Community Dynamics as Influenced by Composted Dairy Manure, Soil Properties, and Landscape Position. *Soil Science*, 175(10), 474–486. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181f7964f>
- 275) Weih, M., Hamnér, K., & Pourazari, F. (2018). Analyzing plant nutrient uptake and utilization efficiencies: Comparison between crops and approaches. *Plant and Soil*, 430(1–2), 7–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3738-y>
- 276) Weih, M., Westerbergh, A., & Lundquist, P.-O. (2017). Role of nutrient-efficient plants for improving crop yields: Bridging plant ecology, physiology, and molecular biology. In *Plant Macronutrient Use Efficiency* (pp. 31–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978->

- 277) 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>
- 278) Wilke, B. - M. (1988). Langzeitwirkungen potentieller anorganischer Schadstoffe auf die mikrobielle Aktivität einer sandigen Braunerde. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde*, 151(2), 131–136. <https://doi.org/10.1002/jpln.19881510212>
- 279) Wolinska, A., & Stepniewsk, Z. (2012). Dehydrogenase activity in the soil environment. In R. A. Canuto (Ed.), *Dehydrogenases* (pp. 183–210). <https://doi.org/10.5772/48294>
- 280) Xavier Martins, W. F. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in crop plants – A review. *Kavaka*, 59(4), 62–74. <https://doi.org/10.36460/Kavaka/59/4/2023/62-74>
- 281) Yi, Y., Huang, W., & Ge, Y. (2008). Exopolysaccharide: A novel important factor in the microbial dissolution of tricalcium phosphate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(7), 1059–1065. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9575-4>
- 282) Yusran, F. H. (2018). The Relationship between phosphate adsorption and soil organic carbon from organic matter addition. *Journal of Tropical Soils*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.5400/jts.2010.v15i1.1-10>
- 283) Zeffa, D. M., Perini, L. J., Silva, M. B., De Sousa, N. V., Scapim, C. A., Oliveira, A. L. M. D., Amaral Júnior, A. T. D., & Azeredo Gonçalves, L. S. (2019). *Azospirillum brasilense* promotes increases in growth and nitrogen use efficiency of maize genotypes. *Plos One*, 14(4), e0215332. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215332>
- 284) Zeng, Q., Wu, X., & Wen, X. (2016). Effects of soluble phosphate on phosphate-solubilizing characteristics and expression of *gcd* gene in *Pseudomonas frederiksbergensis* JW-SD2. *Current Microbiology*, 72(2), 198–206. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0938-z>
- 285) 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>
- 286) Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of The Total Environment*, 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>
- 287) Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

PUBLIKÁCIÓS LISTA

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. Kotroczó, Z., Fekete, I., Juhos, K., **Prettl, N.**, Nugroho, P. A., Várbíró, G., Biró, B., & Kocsis, T. (2023). Characterisation of Luvisols Based on Wide-Scale Biological Properties in a Long-Term Organic Matter Experiment. *Biology*, *12*(7), 909. <https://doi.org/10.3390/biology12070909>, **Scopus: Q1, Impact factor: 3,5 (2023)**
3. **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>
4. Juhos, K., Nugroho, P. A., Jakab, G., **Prettl, N.**, Kotroczó, Z., Szigeti, N., Szalai, Z., Madarász, B. (2024). A comprehensive analysis of soil health indicators in a long-term conservation tillage experiment. *Soil Use and Management*, *40*(1), e12942. <https://doi.org/10.1111/sum.12942>, **Scopus: D1, Impact factor: 5,0 (2023)**
5. Nugroho, P. A., Juhos, K., **Prettl, N.**, Madarász, B., & Kotroczó, Zs. (2023). Long-term conservation tillage results in a more balanced soil microbiological activity and higher nutrient supply capacity. *International Soil and Water Conservation Research*, *11*(3), 528–537. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.003>
6. Nugroho, P. A., **Prettl, N.**, Kotroczó, Z., & Juhos, K. (2023). 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>
7. Nugroho, P. A., Juhos, K., **Prettl, N.**, & Kotroczó, Zs. (2023). Soil biological indicators under sunflowers field in a long-term tillage experiment of luvisol. *International Scientific Journal 'Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources Journal'*, *LXIX*(4), 143–146.
8. Nugroho, P. A., **Prettl, N.**, Kotroczó, Z., & Juhos, K. (2022). Comparison of Some Soil Enzymatic Activities in Luvisol of Conservation and Conventional Tillage in a Model Experiment. *Journal of Central European Green Innovation*, *10*(Suppl 3), 3–12. <https://doi.org/10.33038/jcegi.3558>
9. Nugroho, P. A., Kotroczó, Z., **Prettl, N.**, Kovács, F., Madarász, B., & Juhos, K. (2024). *Soil Biological Parameters after a 17-Year Tillage Study: Vertical and Temporal Variability Effect*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5071357>
10. Pabar, S. A., **Prettl, N.**, Kotroczó, Z., & Biró, B. (2023). Módszertani fejlesztés mikrobiális oltótörzsek gyors hatásvizsgálatára két tesztnövényvel. *Journal of Central European Green Innovation*, *11*(2), 59–67. <https://doi.org/10.33038/jcegi.4851>

Teljes terjedelmű konferencia közlemények:

11. **Prettl, N.**, Kotroczó, Zs., Pabar, S.A., Juhos, K., Biró, B. (2021). Startermútrágya hatás-vizsgálata kukoricában eltérő tápanyag-ellátottságú talajokon a talajbiológiai tulajdonságok tükrében. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest, Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 193-199. oldal.
12. **Prettl, N.**, Kotroczó, Zs., Priyo, A.N., Pabar, S.A., Biró, B., Juhos, K. (2022). Mikrobiológiai termésmenővelők 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
13. Kotroczó, Zs., Juhos, K., Priyo, A.N., **Prettl, N.**, Várbió, G., Fekete, I. (2022). Biológiai aktivitás és labilis szén tartalom változás egy hosszú távú szerves anyag manipulációs kísérletben. XVII. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia, (Kolozsvár, Románia, 2022. április 6-9.) Absztrakt kötet: ISSN: 1842-9815., 144-152. oldal
14. Nugroho, P. A., **Prettl, N.**, Madarasz, B., Kotroczó, Zs., Juhos, K. (2022). Soil chemical properties under 16 years conservation tillage practice in Hungary. XVII. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia, (Kolozsvár, Románia, 2022. április 6-9.) Absztrakt kötet: ISSN: 1842-9815., 272-278. oldal
15. Pabar, S.A., Kotroczó, Zs., Mónok, D., Freschl, B., **Prettl, N.**, Péter, D., Biró, B. (2021). Korreláció vizsgálat a talaj szervesanyag minősége és kémiai, biológiai tulajdonságai között. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 187-192. oldal.
16. Kotroczó, Zs., Juhos, K., Pabar, S.A., Biró, B., Tóth, J.A., **Prettl, N.**, Bódi, A., Fekete, I., (2021). A talajlégzés összetevőinek megoszlása egy agyagbemosódásos barna erdőtalajon. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 151-156. oldal.

Összefoglalók és absztraktok:

17. **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
18. **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.
19. **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
20. **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.)

21. **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.
22. Juhos, K., Nugroho, P.A., Jakab, G., Kotroczó, Zs., **Prettl, N.**, Szalai, Z., Madarász, B. (2024). A comprehensive analysis of soil health indicators in a long-term conservation tillage experiment. Central European field trial. Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences (May 19-21, 2024, Florence, Italy), Abstract book: 1272.
23. Nugroho, P.A., Juhos, K., **Prettl, N.**, Kabalan, S., Madarász, B., Kotroczó, Zs., (2024). Effect of long-term reduced tillage on selected soil biological indicators on livisols in Hungary. Central European field trial. Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences (May 19-21, 2024, Florence, Italy), Abstract book: 1361.
24. Priyo, A.N., Kotroczó, Zs., Juhos, K., **Prettl, N.**, Madarasz, B. (2022). Soil enzymes activity in the growing season under different tillage systems in western Hungary. XXII. World Congress of Soil Science (Glasgow, Scotland, 31 July – 5 August 2022.).
25. Kotroczó, Z.; Juhos, K.; Pabar, S.A.; Nugroho, P.A; **Prettl, N.**; Fekete I.; (2022). Effect of long-term organic matter manipulation on soil labile carbon content and biological activity. XXII. World Congress of Soil Science (Glasgow, Scotland, 31 July – 5 August 2022.)
26. Kotroczó, Zs., Juhos, K., Pabar, S.A., Biró, B., Tóth, J.A., **Prettl, N.**, Bódi, A., Fekete, I., (2021). A talajlégzés összetevőinek megoszlása egy lombhullató cseres-tölgyes erdő ökoszisztémában. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 99. oldal.
27. Pabar, S.A., Kotroczó, Zs., Mónok, D., Freschl, B., **Prettl, N.**, Péter, D., Biró, B. (2021). Korreláció vizsgálat a talaj szervesanyag minősége és kémiai, biológiai tulajdonságai között. XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia (Budapest (online), Magyarország, 2021. március 30. -április 1.) Absztrakt kötet: ISBN: 978-963-8221-82-7., 95. oldal.

Egyéb közlemények:

28. **Prettl N.** (2020). A kukorica foszforhiányos lilulása kezdeti fejlettségben. Agrárágazat, 2020 július: 16-18. oldal.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani elsősorban témavezetőimnek Prof. Dr. Biró Borbálának és Dr. Juhos Katalinnak a munkám során nyújtott folyamatos és magas színvonalú iránymutatásukért és a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges laboratóriumi és műszaki háttér biztosításáért.

Köszönettel tartozom Dr. Kotroczó Zsoltnak, a laboratóriumi munkák kivitelezésében nyújtott segítségéért, tanácsaiért, illetve az egész kutatási munka során végzett támogatásáért. Munkám közben bármikor bátran fordulhattam hozzá szakmai kérdéssel.

Köszönöm a Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék tanszékvezetőjének Dr. Kardos Leventének és a Tanszék munkatársainak a támogatását, kiemelten köszönöm Dr. Priyo Adi Nugrohonak a talajmintavételezésben és a laboratóriumi minták analízisében nyújtott segítségét. Köszönöm doktorandusz hallgatótársaimnak a közös vizsgálatokat, segítségüket, a gyakori eszmecsere-t és a kutatás során szerzett közös élményeket.

Köszönöm Dr. Ladányi Mártának a statisztikai ismeretanyag magas szintű oktatását, mely nélkülözhetetlen volt a dolgozat elkészítéséhez.

Köszönöm a családom és barátaim folyamatos támogatását, a kísérletek kivitelezésében nyújtott önzetlen segítségüket. Hálás vagyok biztatásukért, mellyel nagymértékben hozzájárultak a kutatómunka elvégzéséhez.