



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**Talajból izolált oltóanyagok hatása ökológiai gazdálkodásban különböző
talajerőgazdálkodási technológiákkal**

Pabar Sándor Attila

Budapest

2024

A doktori iskola

Megnevezése: Kertészettudományi Doktori Iskola

Tudományága: Növénytermesztési és kertészeti tudományok

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

Témavezetők: Dr. Biró Borbála
egyetemi tanár, prof. emerita, DSc
MATE
Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék

Dr. Kotroczó Zsolt
tanszékvezető helyettes, egyetemi docens, PhD
MATE
Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék

.....
.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
.....
A témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK	6
2.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
2.1	A talajok fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai.....	9
2.2	A talajművelés és földhasználat hatása a talajok szervesanyag-gazdálkodására és biológiai aktivitására	11
2.2.1	A szénvesztő talajművelés.....	11
2.2.2	A talajregeneráló művelés.....	12
2.3	Az ökológiai gazdálkodás célja, irányelvei és szabályozása	14
2.4	A növény-növekedést serkentő mikroorganizmusok (PGPM) jelentősége	18
2.4.1	A PGPM-ek működése és hatásmódok.....	19
2.4.2	A talajbiom és talajoltóanyagok túlélését, aktivitását befolyásoló tényezők	20
2.5	A talajminőség javítása termésnövelő anyagok, talajadalékok és a talajművelés segítségével.....	22
2.5.1	A szerves anyagok hatásai a talajbiomra.....	22
2.5.2	A talajoltóanyagok és a talajművelési gyakorlatok szerepe	23
2.5.3	A talajművelés hatásának monitorozása és módszerei.....	23
3.	ANYAG ÉS MÓDSZER	28
3.1	Kísérleti beállítások.....	28
3.1.1	PGPM-ek izolálása, vizsgálata és a gyakorlati szempontú törzs-szelekciója	28
3.1.2	Csíranövény-teszt sejttálcás módszerrel	29
3.1.3	Tenyészedény-teszt bazsalikkal, salátával <i>Bacillus megaterium</i> oltással	31
3.1.4	Tenyészedény-teszt hazai talajokkal, bab és kukorica tesztnövényekkel.....	32
3.1.5	Szabadföldi kísérletek oltótörzsek keverékével és ökológiai gazdálkodásban alkalmazható talajerőgazdálkodási technológiákkal	35
3.2	Felhasznált anyagok.....	39
3.2.1	Alkalmazott mikroorganizmusok.....	39
3.2.2	Felhasznált táptalajok, táplevesek	40
3.2.3	Talajjavító adalékanyagok – az alginit	42
3.3	Laboratóriumi vizsgáló, monitorozó módszerek	42
3.3.1	Talajok biológiai aktivitása: enzimvizsgálatok és cellulóz teszt.....	42
3.3.2	Mikroorganizmusok legvalószínűbb számának (MPN) a meghatározása: Aerob-, Spórás baktériumok, Mikroszkopikus gombák	43
3.3.3	Vizsgált növényi paraméterek	44
3.3.4	Talaj fizikai-kémiai paraméterek vizsgálati módszerei	44
3.3.5	A talaj szénformáinak mérései	45
3.3.6	Alkalmazott statisztikai módszerek	46
4.	EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK.....	47

4.1	Mikroorganizmusok izolálása gyakorlati felhasználáshoz	47
4.1.1	A mikrobák kiválasztása, tisztítása	47
4.1.2	Az izolátumok hatásának igazolása	49
4.2	Izolált mikroorganizmusok azonosítása (genetikai elemzés).....	51
4.3	Az izolált és később alkalmazandó mikroorganizmusainak hatásának vizsgálata csíratesztekkel, fehér mustár (<i>Sinapis alba</i>) és angolperje (<i>Lolium perenne</i>) tesztnövényekkel	53
4.3.1	A csírázási százalék és a csíranövény növekedése	53
4.3.2	Az alkalmazott mikroorganizmus törzsek hatása a talajok enzim-aktivitására.....	55
4.4	A talajsterilizálás és az alginit alkalmazásának hatása mikrobiálisoltás sikerességére	57
4.4.1	A kezelések hatása a talajbiológiai aktivitására	57
4.4.2	Növényi biomassa értékek.....	62
4.5	Mikrobiális törzskeverékek hatásának vizsgálata mezőgazdasági talajokon, bokorbab és csemegekukorica tesztnövényekkel tenyészedényes kísérletben	63
4.5.1	Talajbiológiai eredmények vizsgálatának az eredménye a különböző talajok, és alginites kezelés összehasonlítására.....	63
4.5.2	A biomassa száraz tömege (g).....	71
4.6	A mikrobiális törzskeverékek és az ökológiai gazdaságban használható talajerőgazdálkodási technológiák vizsgálata szabadföldi, több éves kísérletben	72
4.6.1	Talajbiológiai eredmények alakulása szabadföldi kísérletben a talajerőgazdálkodási technológiák és az oltóanyaggal való kombinációjuk hatására	73
4.6.2	Normalizált terméseredmények a talajerőgazdálkodási technológiák hatására	78
4.6.3	Talaj szén (C%) és nitrogén (N%) tartalmának mérése a talajerőgazdálkodási eljárások hatására.....	79
4.6.4	A talajban található szerves anyagai, és minőségi indikátorinak vizsgálata a talajerőgazdálkodási technológiák és az oltóanyagok kombinációik hatására	82
4.6.5	A mért paraméterek korrelációs elemzésének eredményei a szabadföldi kísérlet adataiból.....	91
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK.....	93
5.1	A mikrobiális oltások hatékonyságáról	93
5.2	Az alginit, mint talajadalék, a talajtulajdonságokra gyakorolt hatása	93
5.3	Az ökológiai gazdálkodásban használt talajerőgazdálkodási technológiák hatása a talajok tulajdonságaira.....	94
5.4	A talajerőgazdálkodási módok (és az alginit) interakciója az oltóanyagokkal.....	94
5.5	A talajregeneráló módszerek hatásához alkalmazható talajszervesanyag mérési módszerek különböző időtávokra.....	95
6.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	96
7.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	97
8.	SUMMARY	99
9.	IRODALOMJEGYZÉK.....	104
10.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	121

Jelölések, rövidítések jegyzéke

CFU - Colony Forming Unit - Telepképző egység

CO₂ - Szén-dioxid

CCS - Carbon Capture and Storage - Szén-dioxid megkötés és tárolás

DHA - Dehidrogenáz enzim aktivitás

EC - Electro-conductivity - Elektromos vezetőképesség

EPS - Extracelluláris poliszacharid

ERW - Enhanced Rock Weathering - Fokozott kőzet mállás

FDA - Fluoreszcein-diacetát hidrolízis analízis

KSB - Potassium Solubilizing Bacteria - Káliumoldó baktériumok

MBC - Microbial Biomass-C - a mikrobiális biotartalom széntartalma

MPN - Most Probable Number - Legvalószínűbb sejtszám

NT - No-till - Művelés nélküli gazdálkodás

PCR - polymerase chain reaction

PGP - Plant Growth Promoting - Növénynövekedést Serkentő

PGPM - Plant Growth Promoting Microorganisms - Növénynövekedést Serkentő
Mikroorganizmusok

PGPR - Plant Growth Promoting Rhizobacteria - Növénynövekedést Serkentő (általában a
rhizoszférában élő) Baktériumok

POXC - Permanganát-Oxidálható (könnyen oxidálható) Szén-tartalom

PSB - Phosphate solubilizing bacteria - Foszforoldásra képes baktériumok

RM - Regeneratív mezőgazdaság

SFW - Soil Food Web - Talaj-táplálékháló

SOM - Soil Organic Matter - Talaj szerves anyag

TMMg - Talajmegújító mezőgazdaság

TOC - Teljes Szerves Szén - Total Organic Carbon

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A talaj termékenysége és egészsége alapvető fontosságú a fenntartható mezőgazdaság és a globális élelmiszerbiztonság szempontjából. A modern mezőgazdasági gyakorlatok, mint a túlzott műtrágya- és vegyszerhasználat, valamint a nem megfelelő talajművelés, gyakran vezetnek a talaj degradációjához és a termékenység csökkenéséhez. Ezek a módszerek nemcsak a talaj szerkezetét és biológiai aktivitását rontják, hanem hosszú távon negatív hatással vannak a környezetre is, beleértve a vízkészletek szennyezését és a biodiverzitás csökkenését (Kertész, 2019).

A vegyszerhasználat és a talaj degradációjának csökkentésére két fő mozgalom alakult ki: a vegyszermentes, illetve csak az engedélyezett természetes anyagokat felhasználó ökológiai termesztés (Tirado, 2015) és a talajművelés minimalizálására, végül a teljes elhagyására törekvő talajmegújító (regeneratív) mozgalom (Brown, 2018).

Az ökológiai gazdálkodás és más fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok alternatívát kínálnak a kémiai, vegyszeralapú megoldásokkal szemben. Az ökológiai gazdálkodás alapelvei közé tartozik a talaj természetes tápanyag-körforgásának fenntartása, a biológiai sokféleség megőrzése, növelése és a környezetbarát módszerek alkalmazása. Mivel ebben a rendszerben nem lehet művi előállítású, kémiai vegyszereket használni, különösen fontos, hogy természetes és ökológiai megoldásokat alkalmazzunk a termékenység és egészség megőrzése érdekében (Meredith et al., 2018).

Egy másik irány a jelenlegi intenzív vált talajművelés megváltoztatásával járó talajmegújító mezőgazdaság (TMMg), amely a talajforgatás minimalizálására összpontosít. Ezzel csökkentik a szerkezeti romlást, és védik annak fizikai-kémiai- és ezáltal a biológiai tulajdonságait is. Az egyik ilyen eljárás, hogy takarónövények alkalmazásával fedve tartják a talajt nem csak a vegetációs időszakban, de a főnövény letermése után is, az egész év során. Ezáltal csökken a szél- és a vízerózió hatása és további előnyök is kialakulhatnak, különösen hosszabb távon. Ezen módszerek célja a talajból eredő biomassza mennyiségének növelése, valamint a talajban lévő szerves anyagok megőrzése, gyarapítása (Brown, 2018).

Mindkét megközelítésnél (az ökológiai és a regeneratív módszereknél is) jelentős kihívás a gyomproblémák kezelése. Kertészeti léptékben az ökológiai művelés során mulcsozással, geotextíliával, kapálással és kézi gyomtalanítással orvosolható ez (Koltai, 2010). Nagyobb léptékben azonban komolyabb kihívást jelent az intenzív szántás, bolygatás szükségessége az

ökológiai művelésnél, valamint a vegyszerhasználat elkerülése vagy minimalizálása a regeneratív (minimum-till, vagy no-till) rendszereknél. Áthidaló megoldásként alkalmazzák a takarónövényeket (Pinke et al., 2015), és végső célként az állattartás integrálását is a rendszerbe (Brown, 2018).

Magyarország gazdag ásványi vagyonban, amelyet a korábbi hazai gyakorlat szerint, államilag kezelt talaj-ameliorációs gyakorlat részeként használtak. Az ásványi anyagok alkalmazása lehetőséget biztosít a talaj alapvető fizikai-kémiai tulajdonságainak, elsősorban a szerkezetességének és savanyúságának a javítására, ezzel támogatva az ökológiai gazdálkodás célkitűzéseit, és csökkentve a talajművelés károsító hatásait (Várallyay, 2001). Ennek során a mikrobiális oltóanyagok és készítmények használata szintén engedélyezett, és nemzetközi szinten is erős gyakorlattá, trenddé váltak annak ellenére, hogy hatékonyságuk még napjainkban is számos bizonytalansági tényezőt rejt magában. Az ipari, kereskedelmi oltóanyagok alkalmazása ígéretes módja lehet a talajbiológiai aktivitás növelésének és a talaj-növényi egészség támogatásának.

A fenti elvek nemcsak a mezőgazdasági termelés fenntarthatóságát növelik, hanem hozzájárulnak a globális környezeti problémák, például az éghajlatváltozás enyhítéséhez is. A talaj termékenységének és egészségének fenntartása érdekében ezért elengedhetetlen, hogy a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatokat olyan innovatív megoldásokkal támogassuk, amelyek figyelembe veszik a természeti erőforrások megőrzését és a globális környezeti kihívások megfelelő kezelését (Bíró, 2018).

A jelen dolgozat kutatásait néhány hipotézis megfogalmazásával kezdtük és ezen hipotézisek ellenőrzései voltak a céljaink:

1. Úgy gondoltuk, hogy egy bizonyos, ismert talajból izolált, szelektált, és előkísérletekkel tesztelt mikrobiális törzsek hatékonyabbak lesznek azoknál, amelyek, mint kereskedelmi oltóanyagok nem az adott talajból származnak.

2. Feltételeztük, hogy a talajok mikroorganizmusai nem csak az eddig ismert és jól leírt tulajdonságokkal rendelkeznek, hanem olyan tulajdonságokkal is, amiket eddig kevésbé kutattak, valamint alkalmazkodás révén, az adott talajon alakulnak ki a megfelelő talaj-növény-mikroorganizmus interakciókhoz, mint például a káliumoldó (KSB) tulajdonság. Ez a dinamikus adaptáció lehetővé teszi a mikroorganizmusoknak, hogy optimálisan reagáljanak a környezeti változásokra és

növényi igényekre, ezáltal elősegítve a növények tápanyagellátását és stressztoleranciáját.

3. Az alginit, mint az eddigiek során gyakran felhasznált hazai meliorációs ásvány kedvezően tudja változtatni a talaj biológiai tulajdonságait és ezen keresztül befolyásolja az oltóanyagok hatékonyságát is. De ezek alkalmazása korlátozott az eddig nem kutatott, kevésbé cél talajok (nem elsavanyodott, nem tápanyag szegény) esetében.

4. Feltételeztük, hogy mivel a különböző hazai/nemzetközi szerves anyag és „talajszén” mérési módszerek különböző vegyületcsoportokat mérnek. Ezért összehasonlításuk során is eltérő mértékű változások mutathatók ki a kezelések hatására. Így vizsgáltuk a talaj labilisabb szerves anyagait mérő módszerek közül a POXC, DOC és az NaOH kivonási módszert.

5. A különböző talajerőgazdálkodási kezelések javíthatják a talaj szervesanyag-tartalmát, de a változás mértéke eltérő lesz a vizsgált szerves anyag függvényében. Minél labilisabb frakciót mérünk, annál jobban kimutatható a változás mértéke rövid távon, de ezek hosszabb távon egyre kevésbé megbízhatóak, nagyban befolyásolhatja őket a szezonáltság, pillanatnyi hatások, hamarabb elérhetnek egy telítődést. Így célszerű más-más módszereket alkalmazni, hogy a különböző időtávokra teljesebb képet kapjunk, javítsuk a változások nyomon követhetőségét. Noha a kutatás időkerete nem engedi, hogy pár évnél hosszabb megfigyeléseket tegyünk, de szeretnénk a hosszabb távú vizsgálati lehetőségeknek is irányt mutatni.

Ezekkel a kutatásokkal szeretnénk bővíteni a tudást a különböző talajjavító módszerek hatékonyságáról, az oltóanyagok és ásványi talajjavító anyagok együttes alkalmazásának hatásairól, különösen az ökológiai gazdálkodás szempontjából. Célunk, hogy hozzájáruljunk a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kialakításához és a talaj termékenységének hosszú távú megőrzéséhez. Vizsgálataink kiemelten foglalkoznak a talaj szervesanyag-tartalmának változásainak nyomon követésével. Eredményeink segíthetnek a mezőgazdaság kémiai alapú gyakorlatainak megváltoztatásában, ezáltal védelmet nyújtva a környezetnek és elősegítve a fenntartható élelmiszertermelést.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A talajok fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai

A talaj (a *pedoszféra*), a Föld szilárd kérgének legkülső burkán kialakult rendszer, melynek legfontosabb tulajdonsága a termőképessége, ami elengedhetetlen a hatékony növénytermesztéshez. Ezt nem lehet pusztán a talajok fizikai, kémiai tulajdonságaival jellemezni, hanem csak a biológiai tényezőket is figyelembe véve lehet teljes képet kapni. A talaj fizikai tulajdonságai jelentősen befolyásolják a kémiai és biológiai folyamatokat, beleértve az adszorpciós jelenségeket, az oxidáció-redukció feltételeit, az anyagtranszport lehetőségeit, a biológiai aktivitást és a tápanyagforgalmat, ami végül meghatározza a talaj termékenységét. Az ásványi anyagok alkotják a talaj legnagyobb részét, ami jól mutatja, hogy akár annak a 95%-át is kitehetik, de az átlagos arány is meghaladja az 50 %-ot (Stefanovits et al., 1999).

Az ásványi alkotók a talajok fizikai tulajdonságait határozzák meg alapvetően. A talajfizikai jellemzők között szerepel a talaj színe, a talajszemcsék mérete, a talaj textúrája (szemcseösszetétele), a talaj sűrűsége és térfogattömege, a talaj porozitása, a talaj szerkezete (a szerkezeti formák, a szerkezet minősége), a talaj vízgazdálkodása (vízáteresztő képessége, vízkapacitása, a holtvíz és a hasznosítható víz mennyisége), valamint a pórustér nagysága és eloszlása, illetve mindezen tulajdonságok közvetve meghatározzák a talajok levegőzöttségét és hőgazdálkodását is (Kátai, 2011). A talajszerkezet kialakulását befolyásoló fizikai tényezők közé tartozik a duzzadás és zsugorodás, az átfagyás és olvadás, a gyökérzet nyomásából és vízfelvételéből adódó változások, valamint a talajművelő eszközök hatásai.

A talajok kémiai tulajdonságait elsősorban a vízben oldható sók mennyisége és minősége, a kolloidkémiai reakciók, a kémhatás és a redoxi feltételek határozzák meg. Ezek a folyamatok együttesen befolyásolják a talaj szerkezetét, vízzel való viselkedését és a talajba került anyagok sorsát egyaránt (Stefanovits et al., 1999). A kémiai tulajdonságok a fluktuáló víztartalom miatt is dinamikusan változnak, de ezt okozzák a talajban található és életfeltételeik szerint működő élőlények (organizmusok) is.

A talaj egészsége a talaj azon képességét jelenti, hogy élő ökoszisztémaként működjön, amely fenntartja a növényeket, állatokat és embereket, és támogatja az ökoszisztéma szolgáltatásokat, beleértve a mezőgazdasági termelést (Karlen et al., 2019). A talaj egészségének javítása és fenntartása megfelelő mezőgazdasági gazdálkodási gyakorlatok révén kulcsfontosságú a fenntartható növénytermesztéshez. A talaj egészségi állapota a tényleges talajviszonyokat tükrözi, vagyis egy adott talaj állapotát egy adott időpontban, amely eltérhet a talaj elérhető állapotától például korábbi gazdálkodás miatt (Ros et al., 2022).

A fenntarthatóság elve mellett kiemelt fontosságot kapnak ezek a talajlakó szervezetek, a *talajbiota* (az *edafon*), mivel ezek önálló egységként, de külön-külön élettani tulajdonságaik szerint is képesek befolyásolni oda-visszahatásként a talajok működését (Wolters, 1991). A talaj biológiai összetevőit a talajban található mikroszkopikus és a szabad szemmel is jól látható, közepes és nagyobb méretű, magasabb rendű élőlények alkotják, összességében egy teljes talaj táplálékhálót (SFW-t, soil-food-web-et) alkotva. Az SFW szervezetei és egyedei egymással és a fizikai-kémiai tulajdonságokkal szoros kölcsönhatásban fejtik ki tevékenységeiket. Az edafon (France René magyar származású kutató elnevezése szerint) kizárólag a talajban található élőlényeket foglalja magában, de így nem tartalmazza a magasabb rendű zöld növények föld feletti részeit, csak a gyökérzete sorolható ide (France, 1913). Az ásványi anyagok és a talajba került szerves anyagok bomlása (dekompozíciója) során az edafon is erősen befolyásolja, képes visszahatni a talaj ásványi összetételére. A baktériumok és gombák tápanyag- és energiaforrásként használják a feltárt ásványi- és szerves anyagokat, amelyekkel befolyásolják a talaj kémhatását, redoxi-viszonyait és a mállás folyamatát is (Florea et al., 2014).

A talaj mikrobiális összetétele legaktívabban a *növény gyökérzónájában* (a *rhizoszférában*) nyilvánul meg, ahol a mikroorganizmusok (röviden csak mikrobák) száma és aktivitása a legnagyobb. Ennek oka, hogy a növény a kizárólag csak szerves anyagokkal táplálkozó élőlényeket kémiai úton odavonzva juthat csak a saját táplálkozásához és növekedéséhez szükséges szerves, ásványi anyagokhoz, tápelemekhez. A rhizoszféra, ennek a „*rhizoszféra effektusnak*” nevezett hatás következtében 2-5-10-, de akár 100-szor is több élőlényt tartalmazhat (Hiltner, 1904).

A talajok és a növényi részek (szférák) *mikrobiális közösségeinek összetételét* és aktivitását különböző módszerekkel lehet vizsgálni, többek között kitenyésztéses telepszámlálásos, határhígításos módszerekkel, mint például a legvalószínűbb sejtszám, MPN (Most Probable Number) módszerek. A klasszikus szelektív táptalajokkal történő kitenyésztéses vizsgálatok napjainkban genetikai módszerekkel egészülnek ki (Acién et al., 2023). A talaj mikrobiális összetétele és aktivitása fontos szempont lehet a *talajállapot mennyiségi és minőségi felmérése* során, különösen az anyagcserére vonatkozó (metabolikus tulajdonságok) enzimes módszerekkel történő vizsgálatainak során (Ravensberg, 2015). A talajok biológiai összetétele és aktivitása által meghatározott tulajdonságok jelentőségét tovább fokozza a kölcsönhatások és a legfontosabb hatótényezők megállapítása is a talajban, mint „multifaktoriális” rendszerben.

A *biotikus tényezők* azok az élő szervezetek, amelyek kölcsönhatásban állnak egymással és a környezetükkel is egyfajta folyamatos rendszer, dinamika szerint. A kölcsönhatások több formában is megnyilvánulhatnak. A legfontosabbak ezek közül a *szimbiózis*, a *kommenzalizmus* és az *antibiózis*. Ezeket a kölcsönhatásokat igyekszik felhasználni az ipar és a kereskedelem, amikor tipikusan ilyen termékeket hoz forgalomba. A növény-növekedés-serkentő mikroorganizmusokat (PGPM, Plant-Growth-Promoting Microorganisms) tartalmazó talajoltóanyagok legfontosabb összetevői a biokontroll tulajdonságú baktériumok, gombák, illetve már rovarok is (pl. kártevők parazita darazsai) (Moënné-Loccoz et al., 2015).

2.2 A talajművelés és földhasználat hatása a talajok szervesanyag-gazdálkodására és biológiai aktivitására

A *talajok szervesanyag gazdálkodása* az agrártudomány és ökológia egyik kiemelkedően fontos területe. A szerves anyagok, mint a talajok életének és termékenységének alapvető elemei, kulcsszerepet játszanak a növényi tápanyagok elérhetőségében, a talaj szerkezetének fenntartásában, valamint a biológiai sokféleség támogatásában. A szerves anyagok mennyisége és minősége alapvetően befolyásolja a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságait, és ezek révén a mezőgazdasági termelékenységet és a fenntarthatóságot (Lal, 2009).

A *szerves anyagok (SOM, Soil Organic Matter) jelenléte* a talajban különböző forrásokból származik, beleértve a növényi maradványokat, a mikroorganizmusok által termelt anyagokat, valamint a szerves trágyák és komposztok alkalmazását. A talajok szervesanyag-tartalmának növelése és fenntartása nemcsak a terméshozam növelése szempontjából elengedhetetlen, hanem a talajok szénmegkötő képességének javítása érdekében is, amely kulcsfontosságú a globális klímaváltozás elleni küzdelemben (Johnston et al., 2009; Kotroczó et al., 2023; Juhos et al., 2023).

A talajok szervesanyag-gazdálkodása magában foglalja a szerves anyagok ciklusát, a talajba való bevitelük, lebomlásuk és átalakulásuk folyamatát, valamint a talaj termékenységének fenntartását célzó gyakorlati módszerek alkalmazását. A hatékony szervesanyag-gazdálkodás elősegíti a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatokat, amelyek hozzájárulnak a talajminőség javításához, a biológiai aktivitás fokozásához és a környezeti hatások csökkentéséhez (Jat et al., 2019a; Kotroczó et al., 2023; Fekete et al., 2023).

2.2.1 A szénvesztő talajművelés

A *fenntartható fejlődés* jelenkorunk egyik legnagyobb kihívása. Az intenzív mezőgazdasági módszerek mellett azonban ez a cél nehezen valósítható meg (Madarász et al.,

2021). Az intenzív talajművelés talajdegradációhoz vezet, amelyek során a talaj termékenysége, szerkezete és általános minősége romlik. Ez a probléma jelentős kihívást jelent a mezőgazdaságban és a környezetvédelemben, mivel csökkenti a talaj termékenységet és hozzájárul a globális éghajlatváltozáshoz (AbdelRahman, 2023).

A *talaj szénvesztése* olyan állapot, amely a nagy légző felület és a szerves anyag visszapótlás hiánya miatt alakul ki. Következménye a talaj gyors ülepedése és tömörödése, ami gyengíti a vízvisszatartó képességét és növeli az aszálykár kockázatát. Ezt megelőzheti a szénkímélő művelés és a szerves anyag, mint a tarlómaradványok és szerves trágyák, rendszeres visszajuttatása a talajba, valamint a tarlómaradványok eltávolításának szabályozása. (Bottlik et al., 2012)

A *talaj széntartalma* kulcsfontosságú a talaj termékenységének fenntartásában, mivel a szerves szén fontos szerepet játszik a talaj szerkezetének, a tápanyagok elérhetőségének és a vízmegtartó képességének kialakításában (Fageria, 2012). A talajdegradáció során a széntartalom csökken, mivel a szerves anyagok lebontása megindul. Egy részük a lebontó folyamatok során szén-dioxidként távozik a légkörbe a talajlégzés folyamán, másik része kimosódik a talajból. Ennek okai lehetnek az erózió, a szervesanyag-csökkenés és a talaj vízháztartási viszonyai is többek között (Obalum et al., 2017).

Mivel számos talajlakó szervezet, mikroorganizmus kiválaszt olyan szerves szénben gazdag vegyületeket, ami hozzájárul a szemcsék összetartásához, így ezek számának a csökkenése hatással van a szemcseméretre, aggregátumok kialakulására (Zhang et al., 2022). A *talaj szemcsemérete* az egyik igen fontos tényező a talaj fizikai tulajdonságainak meghatározásában. A talajdegradáció hatására a szemcseméret eloszlása megváltozhat, például a szerkezetromlás vagy az egyenletesebb eloszlás következtében (Lal, 2001). Emiatt a talaj egy részét por formájában elfújhatja, elszállíthatja a szél, ezzel további szén, tápanyagot veszítve, más része pedig tömörödhet és keményebbé válhat, ami kedvezőtlen a növények gyökérnövekedésére és a talaj mikrobiális életére nézve is (Osman, 2013).

2.2.2 A talajregeneráló művelés

A *regeneratív művelés* (angolul regenerative agriculture) egy olyan mezőgazdasági megközelítés, amelynek célja a talaj egészségének és termékenységének helyreállítása és fenntartása, miközben minimalizálja a környezeti befolyásoló hatásokat és azok szélsőségeit, mindezek mellett növeli a gazdaságok fenntarthatóságát. Ennek a módszernek a lényege a holisztikus szemlélet, amely figyelembe veszi a talaj biológiai, fizikai és kémiai tulajdonságait, valamint a mezőgazdasági rendszerek ökológiai egyensúlyát is (Brown, 2018).

Az alapelvek és gyakorlatok között szerepelnek a következők:

i) *A konzervációs talajművelés, a művelés nélküli (no-till) és csökkentett művelésű (reduced-till), vagy a sávos művelésű (strip-till) módszerek* során minimalizálják, vagy szinte teljesen elhagyják a talaj bolygatását és a talajmunkálatokat. Ennek hatására csökken a talaj szénvesztése és növekszik a szerves anyagok felhalmozódása, különösen a talaj felső rétegeiben (Zikeli et al., 2013).

ii) *A talajfedettség folyamatos fenntartásával*, a növényi maradványok és takarónövények alkalmazásával, védik a talajt az eróziótól és növelik a szerves szén mennyiségét.

iii) *Takarónövények, zöldtrágya és diverzifikált vetésforgó* használatával maximalizálják a gyökerek mennyiségét a talajban, növelik a rizoszféra aktivitását, és az így a talajba juttatott szén mennyiségét (Blanco-Canqui et al., 2015).

iv) *Komposztálás, szerves trágyák és az integrált állattartás alkalmazásával* növelik a talajok szervesanyag- és tápanyagtartalmát. Az integrált állattartás is fontos eleme lehet a talajregeneráló talajművelésnek. Az állattartás integrálása a növénytermesztési rendszerekbe hozzájárul a tápanyagok körforgásához, javítja a talaj szerkezetét és serkenti a növényi biomassza termelését. Egyrészt a szerves trágya termelésén keresztül, másrészt, ha szabad tartású állattartás folyik, terelve, nem túllegeltetve segít a szerves anyagok talajba dolgozásában a beletaposás révén (Brown, 2018).

v) *Agroerdészet és szélfogó fasorok* telepítésével A fák és cserjék integrálása a mezőgazdasági rendszerekbe véd a talajerózió ellen, növeli a szénmegkötést a talajban és a biomasszában (Fahad et al., 2022).

A különböző gazdálkodási gyakorlatok, beleértve a talajművelést és a takarónövények alkalmazását, jelentős hatást gyakorolnak a talaj táplálékhálójára és biológiájára. Hedde et al. (2023) kutatásai azt mutatják, hogy a talajművelés intenzitásának változásai idővel befolyásolják a talaj táplálékhálózatának szerkezetét, és a talajművelési gyakorlatok erősebb hatást gyakorolnak ennek működésére, mint más gazdálkodási módszerek. Thapa és Mowrer (2024) továbbá megállapították, hogy a talaj szénvel való javítása, a talajművelési gyakorlatok és a takarónövények alkalmazása befolyásolják a permanganát oxidálható szenet (POXC) és a nedves aggregátum stabilitást (WAS), amelyek *a talaj egészségi állapotának javulását jelző mutatók*. Emellett Sui et al. (2022) felfedezte, hogy a hosszú távú talajművelési gyakorlatok hatással vannak a talaj mikrobiális és fauna közösségeire, és a felszíni talajművelést javasolják a talaj tulajdonságainak javítása és a talaj mikrobiális táplálékhálózatának szerkezetének és összetettségének fokozása érdekében. Hasonló megállapítást tett Kovács et al. (2020; 2024),

akik vizsgálataik során arra jutottak, hogy a talajművelés gyakorlata jelentős hatást gyakorol a mind a bakteriális-, mind a mikroszkopikus gombák összetételére.

A talajművelési gyakorlatok jelentős hatással vannak a mikrobiális oltóanyagok mezőgazdasági hatékonyságára. Az intenzív talajművelés, valamint más hagyományos mezőgazdasági gyakorlatok, mint például a monokultúras termesztés és a műtrágyák használata, megzavarhatják a talajban élő mikrobaközösségeket, ami a talaj egészségének és szerkezetének romlásához vezethet. A talajban élő mikrobiális közösségek megfelelő egyensúlyának fenntartása, valamint a különféle oltóanyagok alkalmazása kulcsfontosságú a talaj egészségének, tápanyag-ellátottságának és a jótékony hatású mikroorganizmusok megőrzése szempontjából, ezáltal javítva a növények teljesítményét és a terméshozamot (Srivastava et al., 2024).

Bár a talajregeneráló talajművelésnek számos előnye van, bevezetése és fenntartása kihívásokkal járhat. Ezek közé tartoznak a kezdeti magas költségek, a tudás és tapasztalat hiánya, valamint a hagyományos mezőgazdasági módszerekről való átállás nehézségei. A hosszú távú előnyök és a fenntarthatósági szempontok miatt azonban egyre nagyobb figyelmet kap ez a megközelítés, és várhatóan növekedni fog az alkalmazása a jövőben.

2.3 Az ökológiai gazdálkodás célja, irányelvei és szabályozása

Az ökológiai gazdálkodás célja a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok megvalósítása, amely során minimalizálják a környezeti károkat, környezetterhelést, maximalizálják a biodiverzitást, és lehetőség szerint biztosítják a talajok egészségét. Ebben a rendszerben az ökológiai gazdálkodásban felhasználható termésnövelő anyagok különösen fontos szerepet játszanak. Ezek az anyagok a természetes folyamatok erősítésére és a talaj természetes tápanyag-körforgásának fenntartására összpontosítanak.

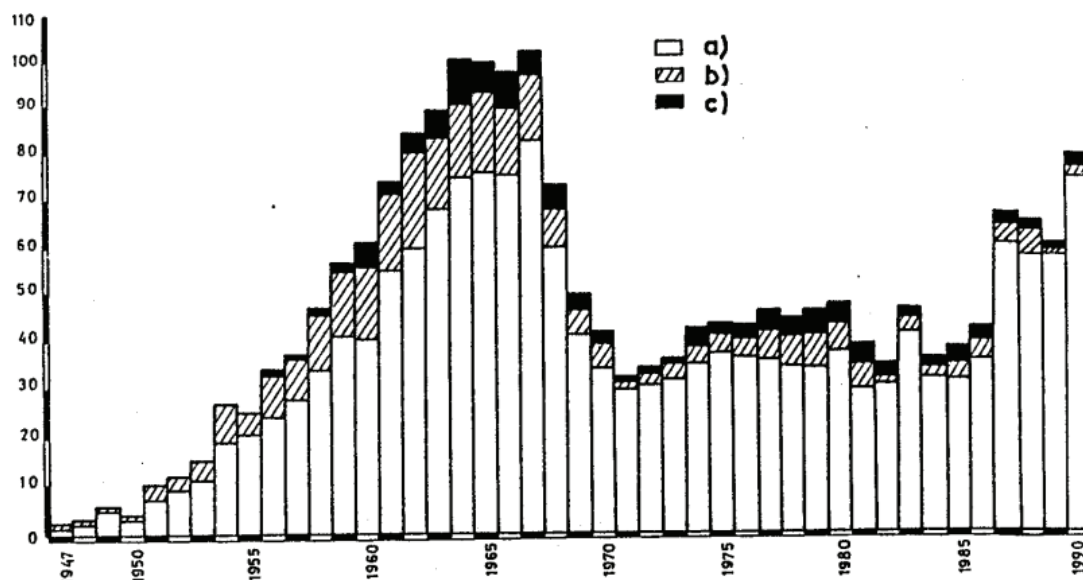
Az ökológiai gazdálkodás során alkalmazott termésnövelő anyagok általában természetes eredetűek és biológiai aktivitásuk révén javítják a talaj termékenységet és a növények egészségét. Ezek az anyagok az élőlények közötti kölcsönhatásokat is kedvezően érvényesítik, ezeken keresztül is kifejtetik az elvárt pozitív hatásait.

A *szerves trágyák* természetes úton előállított termésnövelő anyagok (Christians et al., 2016), amelyek a talajhoz vagy a növényekhez adhatók tápanyagellátás és a növekedés fenntartása érdekében. Ezen termésnövelők közé tartozik az összes állati eredetű anyag, úgy, mint a húsfeldolgozási hulladékok, a trágyák és a hígtrágya; plusz növényi alapú termésnövelők, például a komposzt; és bioszilárd anyagok. A szervesetlen termésnövelők közé

tartoznak az ásványi eredetű kőzetőrlemények és az égésterméként megjelenő hamu (Solti, 2000; Guertal and Green, 2012).

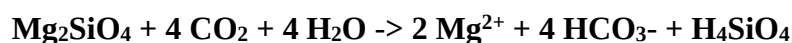
A szerves istállótrágyákon és komposzton túl további anyagokat is talajba juttathatunk, amik elősegítik a szén-dioxid kivonását a légkörből, és vagy a már megkötött szén talajban tartását. A már, valamilyen formában megkötött szenet talajba juttatják. A talajban tárolva a szenet, és mellette növelve a talajtermékenységet. Erre az egyik leggyakrabban alkalmazott anyag a *bioszén* (*biochar*) alkalmazása. A bioszenet a növényi/állati eredetű biomassza-anyagok nyomás alatt magas hőfokon történő, oxigén-mentes izzításával (pirolízisével) állítják elő. A bioszén alkalmazása növeli a talaj szerves szén tartalmát és javítja a talaj víz- és tápanyagmegtartó képességét (Kocsis et al., 2022).

Magyarország területének jelentős része különféle talajproblémákkal küzd, amelyek hatékony kezelése nélkülözhetetlen a megfelelő mennyiségű és minőségű mezőgazdasági termékek előállításához. Az elmúlt évtizedekben a talajjavítási módszerek folyamatosan fejlődtek, a cél mindig az volt, hogy a talajok termőképességét fenntartsuk és javítsuk, miközben minimalizáljuk a káros környezeti hatásokat. Az *ásványi trágyák* fontos szerepet játszanak a mezőgazdaságban a növények tápanyagellátásának javítása és a talaj termékenységének fokozása érdekében. Ezek a természetes eredetű anyagok a talaj makro-, mezo- és mikroelemeinek a pótlásában segítenek, ezáltal elősegítve a növények optimális növekedését és a termés hozam növelését. A leggyakoribb ásványi trágyák közé tartoznak a makroelemeket, és igen gyakran a mikroelemeket is pótolni szándékozó kőzetlisztek, mint például a kálium-szulfát, apatit, bazaltpor, dolomit, alginít és a zeolit (Solti, 2000). Ennek a csúcsa a 1960-as években volt, amikor elsősorban a talajmeszezéssel javították a savanyú talajokat (1. ábra) (Várallyay, 2001).



1. ábra. Talajjavításban részesült területek Magyarországon (1947–1986). Függőleges tengely: terület, 1000 hektár. a) savanyú talajok javítása; b) szikjavítás; c) homokjavítás (Forrás: Várallyay, 2001)

A vulkanikus eredetű kőzetek kijuttatásával CO₂ megkötés is megvalósul a mállásuk során. Ennek tudatos alkalmazása az angolul Enhanced Rock Weathering (ERW)-nek hívott technológia, amit gyorsított kőzet mállasztási eljárásként lehetne magyarra fordítani. Az ERW során a szilikát- vagy karbonátásványok gyorsított mállását alkalmazzák. Az aprított ásványok vízzel és szén-dioxiddal érintkezve oldatba mennek, ahol a következő reakciók játszódhatnak le (példa az olivin esetében):



Az oldatban képződött bikarbonátok (HCO₃⁻) végül stabil karbonátok formájában csapódnak ki. Az így megkötött szén-dioxid stabil formában kerül tárolásra a talajban, vagy a folyók és tengerek vizeibe jutva ott rakódik le. Ez a karbonát képződésének köszönhetően hosszú távon kivonja a CO₂-t a légkörből. Ez javítja a talaj szerkezetét és a felszabadult mikrotápanyagok serkentik a növényeket is (Beerling et al., 2020; Ros et al., 2022).

Nemzetközi viszonylatban és hazánkban is nagy hangsúlyt fektetnek a természetes eredetű ásványi trágyák alkalmazására a mezőgazdaság különböző területein, így leginkább a szőlő-, gyümölcs-, és szántóföldi növénytermesztésben a terméshozam és a talajok, termesző közegek javítása érdekében. Hazánkban az egyik ilyen igen gyakran felhasznált anyag az **alginit**, ami vulkanikus eredete miatt nagy mennyiségben tud mikrotápanyagokat szolgáltatni

és a kimagasló mésztartalmán keresztül is képes ellensúlyozni a talajok fizikai-kémiai tulajdonságait, beleértve a talaj-savanyodást is (Ragályi et al., 2019).

Az alginít főként a Kárpát-medencében található meg, és mintegy 150 millió tonnányi vagyont képez, sajátos ásványi és organikus összetétele teszi ezeket különlegessé. Hazánkban jelenleg három helyen bányászható gazdaságosan. Az alginítet felhasználják a talaj szerkezetének javítására és a növények növekedésének támogatására. Az egyik kutatás során egy savanyú homoktalajon tesztelték, és megfigyelték, hogy az alginít segítette a talaj szerkezetének javítását és növelte a növények víz- és tápelemhasznosulását. Emellett növelte a talaj pH-értékét és a víztároló kapacitást is. Más kutatások is hasonlóan kedvező hatásokat állapítottak meg az alginít alkalmazásával kapcsolatban, például Egyiptomban is, ahol egy mikroparcellás szabadföldi kísérletben használták fel (Helal, 2010).

Az alginít kapcsán kevés kutatás foglalkozik a talaj biológiai változásainak nyomon követésével. Elsősorban a termésre, a talajtápanyagokra, és a talajsavanyodással kapcsolatos paraméterekre fókuszálnak (Solti, 2000). Ragályi és munkatársai (2019) szignifikáns változást tudtak kimutatni az eddigieken túl, a talaj Arany-féle kötöttségében is.

A talajok tulajdonságainak megváltoztatása, általában javítása hosszú idők óta központi kérdést jelent. A talajba kerülhetnek szervesetlen ásványi anyagok, de az előzőekben említett fontosságuk miatt élő szervezetek (organizmusok) is. Az élő szervezeteket is tartalmazó ipari, kereskedelmi készítmények elsődleges célja a termés növelése, azaz a *termésnövelő mikrobiális oltóanyagok* felhasználása. Az ilyen PSP (termésnövelő, azaz Plant Strengthening Product) termékek engedélyeztetését és regisztrálását nemzetközi szinten is szabályozni kell. A „termésnövelés” ugyanakkor sok esetben ahogy azt az eredeti angol nyelvű kifejezés (plant strengthening) is jelzi, sok esetben inkább csak, mint „növény-erősítés” nyilvánul meg. A helytelen magyarra fordítás ezért félreértelmezhető elvárt hatásokat vetít előre (Biró, 1995).

Az *Európai Unióban* nincs egységes, minden tagállamra kiterjedő szabályozás a termésnövelő anyagok felhasználására, engedélyezésére, tárolására és forgalmazására vonatkozóan. Számos ponton engedélyezhetik az egyes tagországok saját, egyéni gyakorlatát is. Ennek következtében a tényleges és hatékony szabályozás kialakítása tagállami hatáskörben is van. Magyarország különböző jogszabályokat vezetett be, hogy biztosítsa a termésnövelők szakszerű és környezetkímélő felhasználását.

Az élelmiszerláncról és hatóság felügyeletéről szóló 2008. évi XLVI. törvény (Éltv.) alapján a *termésnövelő anyagok*, és az *engedélyköteles termékek* kategóriája érintett. A

„termésnövelő anyagok” olyan anyagok, amelyek célja a növények tápanyagellátásának biztosítása vagy a talajok tápanyagszolgáltató képességének és termőképességének a javítása. Kivételt képez a víz, a szén-dioxid, valamint az adalékanyag nélküli, kezeletlen istállótrágya. A termésnövelő anyagok lehetnek természetes eredetűek, vagy előállítottak fizikai, kémiai, biológiai, illetve egyéb mesterséges úton, továbbá ezek kereskedelmi céllal összeállított kombinációi is. Az *engedélyköteles termékek*, ahogy a nevük is sugallja egy szűkebb, szigorúbb kategória. Ide tartoznak a növényvédő szerek, a növényvédőszer-hatóanyagok, adalékanyagok, segédanyagok, növényvédelmi hatású termékek, valamint növényvédelmi célú eszközök és anyagok (kivéve műszerek). Ezen termékek, köztük a termésnövelő anyagok is (az EU 2003/2003/EK rendelet szerinti EK-műtrágyák kivételével), csak engedély birtokában hozhatók forgalomba és használhatók fel. Ide sorolhatók mindazon termékek is, amelyek alkalmazási céljuk alapján a termés növelés és/vagy a talajjavítás céljára visszavezethetők úgy, hogy azokhoz és forgalomba hozatalukhoz, hatósági engedélyre van szükség.

Magyarországon a termésnövelő anyagok használata szigorúan szabályozott a környezet védelme és a mezőgazdasági termelés fenntarthatósága érdekében. Az engedélyezési eljárás biztosítja, hogy biztonságos és hatékony termékek kerüljenek a piacra. A 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet az Élelmiszerláncról és hatósági felügyeletéről szóló törvény alapján részletesen szabályozza a termésnövelők különböző aspektusait, beleértve azok típusait, engedélyezési folyamatát, tárolását, forgalmazását és felhasználását is.

2.4 A növény-növekedést serkentő mikroorganizmusok (PGPM) jelentősége

A növény-növekedést serkentő mikroorganizmusok (PGPM-ek) olyan mikrobák csoportját alkotják, amelyek képesek pozitívan befolyásolni, előmozdítani a növények élettani folyamatait (növekedését, fejlődését) és azok ökológiai tényezőktől függő megnyilvánulását különböző mechanizmusok által. Gyakran PGPR-ként találkozhatunk velük az irodalomban, akkor, ha ezek a PGPM-ek csak baktériumokat tartalmaznak és kizárólag a rhizoszférában történő felhasználásról beszélünk (Bhattacharyya and Jha, 2012). A PGPM mikroorganizmusok egyébként lehetnek baktériumok, gombák és egyéb mikrobák (algák) is, amelyek szimbiotikus vagy szabadon élő formában találhatók meg és életképesek a talajban, a rhizoszférában, vagy a növények egyéb szerveiben. egyfajta növénybelsőben is életképes (*endofita*) szervezatként.

A PGPM-ek szerepe különösen fontos a fenntartható mezőgazdaság és növénytermesztés területén, mivel hozzájárulhatnak a tápanyagok jobb hasznosulásához, a növényi betegségekkel szembeni ellenálló képesség növeléséhez, valamint a stressztolerancia fokozásához is. Ezek a tulajdonságok akár felváltva is megjelenhetnek az adott és éppen megnyilvánuló környezeti tényező hatására. Így lehetnek a PGPM-ek például a talajok egészségét, szerkezetét és többek

között a vízháztartását is befolyásoló szervezetek. Mindezt költséghatékony és környezetbarát módon teszik (Díaz-Rodríguez et al., 2024; Nkebiwe et al., 2024).

2.4.1 A PGPM-ek működése és hatásmódok

A PGPM-ek számos, élettani és környezeti tényezők által befolyásolt mechanizmus révén segíthetik a növények növekedését, fejlődését és/vagy védekező (biokontroll) tulajdonságait:

1. Tápanyagok elérhetőségének növelése: Számos PGPM képes oldhatatlan tápanyagokat, mint például a foszfor és a kálium, oldható formába hozni, ezáltal növelve azok elérhetőségét a növények számára (Han et al., 2006). Leggyakoribb hivatkozásként az arbuszkuláris mikorrhiza gombák (AMF) képesek segíteni, oldhatóvá tenni (szolubilizáció) vagy a hifafonalaik által eljuttatni a növényhez ezeket a tápanyagokat (Liu et al., 2016).

2. Biológiai nitrogénkötés: Egyes PGPM-ek közül külön ki kell emelni az obligát, az asszociatív és a szabadon-élő, a levegő szabad nitrogénjének a felvehetővé tételére (az inert N₂-gázmolekula megbontására) is képes baktériumokat. Legtöbbjük a pillangós növényekkel (*Papilionaceae*) képes specifikus, gazda-növény függő módon szimbiózis kialakítására. A *Rhizobium* genus tagjain túl ismertek a szabadon élő *Azotobacter* nemzetségek tagjai is. Ezek képesek a légköri nitrogént ammóniává alakítani, amely már közvetlenül felhasználható a növények számára. Ez a mechanizmus különösen fontos a nitrogénigényes növények, a hüvelyesek esetében (Wong et al., 2022).

3. Növényi hormonok termelése: A PGPM-ek képesek különféle növényi hormonok, úgynevezett növekedés-szabályozók (PGR, Plant growth regulator) anyagok kiválasztására is. Ilyenek például az auxinok, gibberellinek és a citokininek szintézise, amelyek szabályozzák a növényi élettani folyamatokat. Az auxinok (abscizinsav) így például gyökérnövekedést serkenti, míg a gibberellinek a szár és levél növekedését befolyásolják (Cantabella et al., 2022).

4. Biokontroll ágensként való működés: Egyes PGPM-ek antimikrobiális vegyületeket termelnek, megkötik a tápanyagokat, blokkolják a többi mikroorganizmus tápanyag felvételét (Bhattacharyya, 2012, vagy a kórokozó szervezeteken élnek predátorként (pl. a *Trichoderma* sp. gombák, mint hiperparaziták). Ezzel a mechanizmussal gátolják a növényi kórokozók, a patogén baktériumok és gombák növekedését, fejlődését, így csökkenthetik a növénybetegségek előfordulását és súlyosságát (Panpatte et al., 2016).

5. Stressztolerancia növelése: PGPM-ek hozzájárulhatnak a növények abiotikus stresszekkel szembeni ellenállóképességének a fokozásához, például a szárazság-, a só-stressz vagy a toxikus nehézfémek jelenléte esetén. A mikroorganizmusok különféle metabolitokat

termelnek, amelyek segítenek a növényeknek a stresszes körülményekhez való alkalmazkodásban, az élettani alapon működő adaptáció kialakulásában (Hashem et al., 2019).

6. Talajszerkezet és vízháztartás növelése: különböző típusú anyagok termelésével összefogják a talajszemcséket azokat a szerves anyagokkal együvé összefogva javítják a talaj struktúráját, szerkezetességét, közvetlenül és közvetve is csökkentik az eróziót, javítják a vízháztartást. Ilyen például egyes baktériumok extracelluláris poliszacharid (EPS) termelése (a mucigél kiválasztás), vagy az arbuszkuláris mikorrhiza gombák (AMF) glomalin- (ragacsos glikoprotein) termelése is. Az AM gombák a talaj egészségének kulcsfontosságú indikátorai (Bíró et al., 2000; Gupta, 2020). Az AMF hifák által termelt glomalin jelentős részét képezi a talajban az aggregátumokban lokalizált szénnek. A glomalin egy N-tartalmú glikoprotein, amelynek összetétele 0,9–7,3% N, 28–45% C, 0,03–0,1% P és 0,8–8,8% Fe (Holátko et al., 2021). Jelentős hatást gyakorol nemcsak a talaj morzsalékonyságára, aggregációjára, hanem a talaj szerkezetére és vízmegtartó képességére is. Ezen túl a glomalin jelentős szénraktár is.

7. A termés beltartalmi értékeinek javulása: Az oltóanyagok befolyásolhatják, nem csak a felvett tápanyagokat, hanem a növények által termelt másodlagos anyagszere termékeket. Növelhetik az általuk termelt antioxidánsok mennyiségét, így például a paradicsomból kimutatható likopint (Tóth et al., 2024).

2.4.2 A talajbiom és talajoltóanyagok túlélését, aktivitását befolyásoló tényezők

A talaj mikroorganizmusainak tömegét és előfordulását (abundanciáját), de az aktivitásukat is számos faktor befolyásolja. Ilyenek a talaj fizikai tulajdonságai (víztartalom, hőmérséklet és levegőzöttség), a kémiai tulajdonságai (pH, sótartalom, tápelemek mennyisége) és biológiai tulajdonságai (gazdanövények előfordulása, más mikro/organizmusokkal való viszony, mint a szimbiózis, kommenzalizmus, és az antibiózis).

Az ökológiai folyamatokat befolyásoló környezeti tényezők egy adott élőhelyen jelenlévő populációkra lehetnek előnyösek vagy hátrányosak is. Előnyös, ha a fenti paraméterek az optimális tartományban vannak, és van elég tápanyag. A mikrobákra hátrányos, káros környezeti tényezők két fő típusa a stressz és a zavarás.

- *Stresszhatás:* olyan tényezők, mint szélsőséges hőmérséklet, vízhiány, oxigénhiány, vagy túlzottan magas, illetve alacsony tápanyag-szintek. Továbbá a különböző féle szennyeződések (pl. nehézfém), melyek csökkentik az élőhely populációját.

- *Zavarás* (diszturbancia): drasztikus változások, melyek az élő szervezetek részleges vagy teljes pusztulását okozzák.

A talajoltóanyagoknál ez hatványozottan igaz, mivel gyakran nem az adott talajhoz adaptálva, idegen környezetbe juttatják ki őket, ahol gyakran a talajban már jelenlévő mikroorganizmusok között kell, hogy megtalálják a helyüket.

A *mikrobiális oltás* (inokuláció) sikerét számos kulcsfontosságú tényező befolyásolja, ahogyan azt a kutatási tanulmányok is kiemelik. Ezen tényezők közé tartozik a célzott növény és a kiválasztott törzsek közötti kölcsönhatás, a mikrobiális oltóanyag jellemzői, például a taxonómia és az oltási módszer, a gazdálkodási gyakorlatok, mint a trágyázás és a talajművelési rendszerek, valamint a talaj- és környezeti feltételek, mint például a pH, a hőmérséklet és az őshonos mikroorganizmusok jelenléte (Ayala-Zepeda et al. 2024).

A *talaj abiotikus tényezői*, mint például a textúra, pH, hőmérséklet és nedvesség közvetlenül befolyásolják a mikrobiális populációk dinamikáját, ezáltal hatva az inokulált törzsek túlélésére és teljesítményére (Khare és Arora, 2015). A különböző talajtípusok valóban befolyásolhatják a mikrobiális inokuláció sikerét. A kutatások kimutatták, hogy a különböző talajtípusokban található őshonos cianobaktériumok összetétele döntő szerepet játszik a bevezetett törzsek kolonizációjában, befolyásolva a cianobaktériumok növekedését és az általános mikrobiális bőséget (Kour et al., 2023). Emellett a talaj *mikrobiális közösségének faji sokfélesége, biodiverzitása* jelentősen eltérhet a talajtípusok között, bizonyos bakteriális kombinációk javíthatják a növények növekedését és a hozam mutatóit, például növelhetik a rendelkezésre álló foszfor mennyiségét bizonyos talajtípusokban (Sokolova et al., 2024). A talaj inokulációja továbbá a különböző ökoszisztémák talajával különböző irányokba terelheti a talajok életközösségét (mikrobiomját) és a növényi közösségeket, az oltóanyag mennyisége és eredete pedig kulcsszerepet játszik az eredményekben, bemutatva a donor talaj specifikus hatásait a talaj mikrobiomra és a növényi közösségekre (Han et al., 2022). Ezek az eredmények hangsúlyozzák a talajtípusok sokféleségének fontosságát a mikrobiális inokulációs stratégiák mezőgazdasági és ökológiai célú alkalmazásakor.

A *mikrobiális oltóanyagok* kifejlesztése olyan lépéseket igényel, mint az izolálás, jellemzés, biomassza termelés és formulázási eljárások, ahol a fermentációs körülmények optimalizálása kulcsfontosságú a termelési hatékonyság maximalizálása érdekében (Villarreal-Delgado et al., 2024). Az oltóanyag összetétele és életképessége is kulcsfontosságú szerepet játszik a mikrobiális oltóanyagok minőségének és hatékonyságának meghatározásában, hangsúlyozva a formulációk összetételének és javításának fontosságát az optimális teljesítmény elérése érdekében a mezőgazdasági rendszerekben (Sekhon és Keshani, 2024).

Ezen talajjal kapcsolatos tényezők megértése elengedhetetlen a mikrobiális oltóanyagok testre-szabásához, hogy azok az elvárt és maximális kedvező hatást gyakorolják a növényi termelékenységre, a talaj egészségére és a környezeti fenntarthatóságra (Ayala-Zepeda et al. 2024; Wong et al., 2022). Az oltóanyagok széles körű alkalmazása és gazdasági életképessége szempontjából fontos a terepi eredmények változékonyságával, a minőségellenőrzéssel és a nagyszabású termeléssel kapcsolatos kihívások leküzdése, kiemelve a szakértők közötti együttműködés szükségességét, valamint a hatékonyság és alkalmazhatóság javítása érdekében folytatott további kutatások fontosságát (Díaz-Rodríguez et al., 2024).

2.5 A talajminőség javítása termésmenvelő anyagok, talajadalékok és a talajművelés segítségével

A talajok minőségének javítása régóta cél, hazánkban és nemzetközi szinten egyaránt. Ennek során két fő célkitűzés fogalmazódott meg:

- Egyrészt a talaj minőségét csökkentő tényezők kedvező irányú megváltoztatása, másrészt
- Másrészt a talajdegradációs folyamatok megelőzése és azok káros hatásainak mérséklése.

Előbbi talajadalékokkal próbálták minimalizálni, utóbbira megoldás a már tárgyalt talajregeneráló művelési gyakorlat.

2.5.1 A szerves anyagok hatásai a talajbiomra

A *talajbiom* létfontosságú szerepet játszik a szén-körforgalomban, ahol a szén átalakulásának és mozgásának irányítása történik az ökoszisztémában (Janzen, 2004). A talaj, mint szénforrás és szénhasznosító, központi szerepet tölt be a szén-dioxid megkötésében, tárolásában és felszabadításában. A növények a légkörből felvett szén-dioxidot szerves vegyületekké alakítják, amelyek az elhalt növényi maradványok révén a talajba kerülnek. A talajlakó mikroorganizmusok tevékenysége során ezek a szerves anyagok lebomlanak, és a szén-dioxid jelentős része visszajut a légkörbe (Paul, 2016), a széntartalom kisebb része pedig beépül a mikrobák sejtjeibe.

A *humifikáció* során a szerves anyagok stabil, nagy molekulájú humuszanyagokká alakulnak, amelyek megkötik a szenet a talajban, javítják a talaj szerkezetét, és növelik a víz- és tápanyagmegtartó képességet. E folyamat hatékonysága a talajba kerülő szerves anyagok minőségétől, a mikroorganizmusok tevékenységétől, a kémiai tulajdonságoktól és a környezeti feltételektől függ (Semenov et al., 2013).

A *mineralizáció* során a mikroorganizmusok lebontják a szerves anyagokat, felszabadítva a bennük lévő tápanyagokat, mint a nitrogén, foszfor és magnézium, amelyek ionos formában elérhetővé válnak a növények számára. A cellulóz, amely a szerves anyagok nagy részét alkotja, speciális enzimek, a cellulázok révén bomlik le. E folyamatot különféle mikroorganizmusok, például aerob és anaerob baktériumok, mikroszkópikus gombák végzik; a lebomlás során keletkező szén-dioxid pedig visszakerülhet a légkörbe (Sokol et al., 2022).

A humuszanyagok szerepe a talaj termékenységének növelésében is megmutatkozik, mivel különböző kötéseket alakítanak ki az ásványi anyagokkal, ami hozzájárul a talaj szerkezetének stabilitásához és javítja a talaj vízgazdálkodását. Összességében a talajbiom aktivitása alapvető fontosságú a szén-körforgalom fenntartásában, a talaj termékenységének javításában és az ökoszisztéma fenntarthatóságában (Romero et al., 2017).

2.5.2 A talajoltóanyagok és a talajművelési gyakorlatok szerepe

A *talajművelési gyakorlatok* jelentős mértékben befolyásolják a talaj biológiai aktivitását azáltal, hogy különböző mikrobiális tulajdonságokat érintenek. A kutatások rámutatnak, hogy a különböző talajművelési intenzitások változásokat idéznek elő a mikrobiológiai aktivitásban, a mikrobiális biomassza szén mennyiségében, valamint a potenciálisan *mineralizálható nitrogén* szintjében a talajban (Gajda és Przewłoka, 2012). Például a minimális talajművelési módszerek, mint például a forgatás nélküli művelés, segítenek megőrizni a csernozjom talaj egyedi szerkezetét, növelik a friss szerves maradványok áramlását, és fenntartják a magas biológiai sokféleséget, amely a természetes biocönózisokra jellemző. Ezenkívül a szántás és forgatás nélküli gyakorlatok javítják a dehidrogenáz enzim (DHA) aktivitást, a mikrobiális biomassza szén (MBC) mennyiségét, és a potenciálisan mineralizálható nitrogén szintjét, miközben csökkentik a talaj *metabolikus aktivitását*, ami a szerves szén stabil felhalmozódását eredményezi (Bhaduri et al., 2017). Összességében a talajművelés mechanikai hatásának mértéke befolyásolja a mikroorganizmusok mennyiségi mutatóit és biológiai aktivitását a talajban, a mélyebb rétegeket jelentősebben érinti az erőteljesebb talajművelés.

2.5.3 A talajművelés hatásának monitorozása és módszerei

Amit nem mérünk annak a változásáról nem is tudhatunk. Így a talajban bekövetkező változások nyomon követése elengedhetetlen a talaj egészségének és termékenységének fenntartásához, különösen a talajregeneráló talajművelési gyakorlatok alkalmazásakor. A *vizsgálati módszerek sokfélesége* lehetővé teszi a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságainak átfogó értékelését, mind rövid, mind hosszú távon. Az alábbiakban áttekintem

a legfontosabb mérési módszereket, amelyeket a talaj változásainak nyomon követésére alkalmaznak.

A talaj fizikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a talajművelés. Az *intenzív talajművelés leváltása*, a különböző csökkentett művelés módokra, a talaj szerkezetére jelentős hatást gyakorol. Tanulmányok kimutatták, hogy a minimális talajművelés változásokat idézhet elő a talaj térfogatsűrűségében, porozitásában, talaj aggregátum stabilitásában, vízelvezető-, vízmegtartó képességében és tömörödöttségében, ami befolyásolja a talaj szerkezetét és termékenységét (da Silva et al., 2023; Steponavičienė et al., 2023; Isaak et al., 2024). Ezekben a talajtulajdonságokban bekövetkező változások hatással lehetnek a víz és a levegő elérhetőségére a talajban, a gyökérnövekedésre, a növények tápanyagfelvételére és az általános talajegészségre. Ezek végső soron befolyásolják a termelékenységet és a fenntarthatóságot a mezőgazdasági rendszerekben.

Mérésükre gyakran alkalmazott eszközök a penetrométer, kétgyűrűs infiltrométer és a hidrométer. Valamint intakt minták vétele, majd ezek laboratóriumi vizsgálata a telítési és kiszáradási görbék segítségével.

A minimális talajművelési gyakorlatok, mint például a *forгатás nélküli művelés* (no-till, NT), jelentős hatást gyakorolnak a talaj különböző *kémiai tulajdonságaira*. Ezek a gyakorlatok befolyásolják a talaj pH-értékét, a kicserélhető savanyúságot, az bázisok koncentrációját, a gravimetrikus víztartalmat, a szervesanyag-tartalmat és a tápanyagok hozzáférhetőségét. Az NT kimutathatóan növeli a bázisok koncentrációját, a pH-értéket és a gravimetrikus víztartalmat a felső talajrétegben a hagyományos talajművelési gyakorlatokhoz képest (Vilakazi et al., 2022). Emellett az NT hozzájárul a szervesanyag-felhalmozódáshoz, amely javítja a talaj minőségét és a tápanyag-körforgást (Didenko et al., 2023). A talajművelés mész- és foszfor alkalmazással való integrálása növeli a talaj pH-értékét, a kicserélhető bázisok mennyiségét, a kationcserekapacitást és a rendelkezésre álló foszfort, valamint a teljes nitrogéntartalmat, ezáltal javítva a talaj egészségét és termékenységét a savanyú talajok esetében (Muindi et al., 2023; Stankowski et al., 2022). Tanulmányok azt is kimutatták, hogy az NT a talaj kémiai tulajdonságainak rétegződéséhez vezet, ami olyan paramétereket érint, mint a kicserélhető alumínium, a potenciális savasság, a kalcium, a magnézium és a bázistelítettség, amelyek elengedhetetlenek a növénytermesztés szempontjából (Antonangelo et al., 2022).

Ezek nyomon követésére ezért gyakran mérik a talaj pH-ját, elektromos vezetőképességét (EC); a talajok *makrotápanyag-tartalmát*: a nitrogént (N), foszfort (P és a káliumot (K); a *mezoelemeket*, a magnéziumot (Mg) és a kalciumot (Ca, valamint a *mikroelemeket* is. A talajok szervesanyag-tartalmának a vizsgálata az elsődleges minden egyéb tulajdonság mellett is.

A minimális talajművelési gyakorlatok pozitív hatást gyakorolnak a talaj fizikai, és kémiai tulajdonságaira, ezeken keresztül pedig a *biológiai tulajdonságaira* is, amelyek végső soron *befolyásolják a talaj egészségét és a terméshozamot*. A minimális talajművelési gyakorlatok bevezetése összefüggésbe hozható a talajbiológia, a tápanyag-körforgás és a szervesanyag-felhalmozódás javulásával, amelyek mind hozzájárulnak a fokozott ökoszisztéma szolgáltatásokhoz és a fenntartható növénytermesztéshez, különös tekintettel a klímaváltozás hatásaira (Didenko et al., 2023)

A talajbiológiai változásokat megfigyelhetjük a mikrobiális biomassza és a biodiverzitás alakulásán keresztül. Az aktivitásuk mérésével továbbá a talaj tápanyagforgalmát követhetjük nyomon, amelynek a mérésére számos módszert fejlesztettek ki.

- A talaj mikrobiális biomasszáját és aktivitását mérik a *mikrobiális biomassza-C* (MBC) (fumigációs-extrakciós módszer) (Vance et al., 1987a), és a talaj légzési (respirációs) vizsgálatával.
- A *mikrobiális diverzitást* vizsgálják a DNS-alapú módszerekkel, például metagenomikai elemzéssel és polimeráz láncreakcióval (PCR) (Nural et al., 2022). Vizsgálják a mikroorganizmusok kitenyészhetőségét szelektív táptalajokon is (Rodríguez et al., 2018), valamint a szubsztrát hasznosítási profiljukat (Campbell et al., 2003). A gomba és baktérium arányhoz a zsírsav összetétel vizsgálata egy gyakori eljárás (Bååth és Anderson, 2003). Ezek a módszerek lehetővé teszik a talajban található mikroorganizmusok összetételének és változásainak nyomon követését.
- A *mikrobiális aktivitás* mérésére alkalmasok a különféle enzimaktivitások. A talaj enzimatiságait például a dehidrogenáz enzim aktivitással (DHA) (Veres et al., 2013), és a fluorescein diacetát (FDA) hidrolízissel vizsgálhatjuk (Adam és Duncan, 2001; Villányi et al., 2006), laboratóriumi módszerekkel. Ezek az enzimek a talaj különböző biokémiai folyamatairól adnak információt. A DHA és FDA az általános aktivitásról, a β -glükózidáz a szén ciklusról, a ureáz aktivitás a nitrogén, a foszfatáz a foszfor, a szulfatáz pedig a kén körforgásáról ad információt (Dotaniya et al., 2019).

A *talaj széntartalmának mérése* kiemelten fontos a talaj egészségének értékelésében, a szénmegkötés nyomon követésében, így a klímaváltozás mérséklésére irányuló erőfeszítések szempontjából. Befolyásolja az eddig tárgyaltakat, a talaj fizikai, kémiai és biológiai paramétereit. A modern technológiák és módszerek lehetővé teszik a talaj széntartalmának pontos és hatékony mérését, de a régi módszerek jól ismertek, elterjedtek, adataik sok évtizedre állnak rendelkezésre.

A talaj szénkészletének különböző aspektusait szokták vizsgálni. Ilyen a teljes (szerves) széntartalom (Total Organic Carbon content – TOC). A frissebb, instabilabb, mikroorganizmusok könnyebben felhasználható labilis szén frakciók. Az éppen élőszervezetekben, mikroorganizmusokban tárolt szén. Valamint ezek kombinálásával különböző indexek használata is elterjedt. Az alábbiakban bemutatom a leginkább alkalmazott talajszén mérési módszereket.

A TOC mérések esetében a legelterjedtebb a *Walkley-Black módszer*, a *Tyurin-féle szervesanyag-meghatározás* és a *Loss on Ignition (LOI)* módszerek. Az első kettő nedves oxidációval méri a szerves szenet a talajban. A LOI egy égetéses eljárás, egyszerű, olcsó, de limitációja, hogy nem különíti el a szerves és szervetlen szénformákat, illetve jelentősen befolyásolja értékeit a talajok Ca-tartalma is (Wang et al., 2012). A friss, *labilis talajszén mérési módszerek* vizsgálatai hozzájárulnak a gyorsabban bekövetkező talajszénben történő változások nyomon követésére, amik természetüknél fogva alapjául szolgálnak a talajban történő mikrobiális folyamatoknak, valamint később a tartósabb szénformák kialakulásához. *Permanganát-Oxidálható Szén (POXC)* módszer a talajban lévő aktív, könnyen oxidálható szerves szén mennyiségét méri. Ez a módszer a világban, és hazánkban is egyre népszerűbb módszer, mivel előnyei közé tartozik az egyszerűség, gyorsaság és alacsony költség, amely lehetővé teszi a gyakori és széles körű alkalmazást a talaj egészségének monitorozására (Weil et al., 2003; Kotroczó et al., 2023). Az *NaOH-oldható szerves anyagok* mennyisége is egy jó indikátora a frissebb, kevésbé humifikálódott szerves anyagoknak a talajban (Buurman és Nierop, 2007). A vízben *oldható szerves szén (Dissolved Organic Carbon DOC)*, olyan szerves szénfrakció, amely vízben oldható és könnyen elérhető a mikroorganizmusok számára, így jelentős szerepet játszik a talaj tápanyagkörforgásában és a szén ciklusban (Montaño et al., 2007). A DOC-hoz nagyon hasonló még a *WEOC (Water-extractable Organic Carbon)* (Juhos et al., 2023). Az *Easily Extractable Glomalin-related Soil Protein (EEGRSP)* ígéretes szabályozónak bizonyul a talaj termékenységének és szerkezetének javítására. Wu et al., (2015) munkájukban kimutatták, hogy a citrusfélék rizoszférájában, pozitívan befolyásolta a talaj szerves szén (SOC) tartalmát. A glomalin egy glikoprotein, amely az arbuszkuláris mikorrhiza gombák (AMF) hifáiban termelődik (de kimutatták a spórákban is), amelyek kölcsönösen előnyös kapcsolatot alakítanak ki a növények gyökereivel. Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy a forgatás nélküli művelési (NT) gyakorlat jelentősen javítja az AMF hifák hosszát és a glomalinhoz kapcsolódó talajfehérjék (GRSP) mennyiségét, amely vízstabilabb aggregátumokat eredményez, mint a hagyományos talajművelési módszerek (Dai et al., 2015; Juhos et al., 2023). Mivel a glomalin magas széntartalmú, jó indikátora a szénforgalomnak (Chatterjee et al., 2009). A *mikrobiális biomassza szén (Microbial Biomass Carbon, MBC)* a

talaj mikrobiális közösségében tárolt szerves szén mennyiségét jelenti. Ez a szénfrakció fontos indikátora a talaj mikrobiális aktivitásának és egészségének. Ezt több megközelítéssel szokták mérni. A közvetlen megközelítés, ahol feltárjuk a mikroorganizmusokat (kloroform-fumigációval), és az extra szén mennyiség az MBC (Vance et al., 1987b). A közvetett eljárások, a szénhasznosítás mérésére alapulnak. Ilyen a talaj enzimaktivitás mérése (Sinsabaugh et al., 2016), szénhasznosítási hatékonyság mérése (Geyer et al., 2016), vagy a különböző izotópos eljárások (Pold et al., 2020). A szerves anyagok vizsgálatakor, nem csak az egyes anyagok/csoportok mennyiségét lehet figyelembe venni, hanem ezeknek az arányát is. Erre Magyarországon kétféle módszer elterjedt, az *E4/E6* (Swift, 1991), és a *Hargitai-féle két oldószeres humuszminőség vizsgálat* (Buzás, 1988). Az alapjuk, hogy különböző vegyületekkel oldva a talaj szerves anyagait, majd ezeket különböző hullámhosszokon mérve, információt kapunk az eltérő mértékben humifikálódott, így különböző „minőségű” humuszanyagokról. Ebből pedig lehet következtetni a talajban beálló változásokra, a talaj minőségére. Hargitai a NaF oldható szerves anyagokat „jól kialakult, nagyobb kondenzációs fokú Ca-hoz kötött szerves anyagok” -ként jellemezte. A NaOH oldhatókat pedig „nyers szerves anyagok és a humifikáció kezdeti stádiumában lévő szerves anyagok”. A NaF oldható szerves anyagokról leírta, hogy nagyobb a nitrogén %-os arányuk (Hargitai, 1955).

A hosszú távú talajváltozások nyomon követéséhez rendszeres és ismételt mintavételre és mérésre van szükség.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 Kísérleti beállítások

A kutatás során lépcsőzetesen haladtunk, és fokozatosan növeltük a kísérleti léptéket. Ez az úgynevezett „felskálázás” magába foglalja, az alkalmazott kezeléseket és a vizsgálati módszereket is. A következő lépésekben haladt előre a kutatás:

1. Mikroorganizmusok izolálása, szelekciója táptalajokon, általunk izolált törzsek azonosításuk.
2. Értékelésük, kisléptékű, sejttálcás kísérlet, a növényekre és talaj enzimaktivitására gyakorolt hatásuk alapján.
3. Tenyészedényes kísérletben tesztelésük és alkalmasságuk vizsgálata többféle növényrel és talajon. Ezen a szinten bevontunk további kezeléseket is, úgymint talajásvány örlemény, alginit használatát, valamint a talaj sterilizést is összehasonlításképpen.
4. A szabadföldi kísérletben több éven keresztül vizsgáltuk a mikrobiális oltóanyagok hatását, és ezek interakcióit egyéb talajmegújító kezelésekkal, a MATE (korábban SZIE) soroksári ökológiai intézeti tangazdaságban. Ebben a kísérletben különös hangsúlyt fektettünk a talajok mikrobiális változásainak a vizsgálatára, valamint ezek mellett a különböző szerves anyag és szén mérésekre a talajban.

A mikroorganizmusok izolációját és tesztelését Petri-csészében, sejttálcában, majd tenyészedényben, a Magyar Agrártudományi Egyetem (MATE), Agrárkörnyezettani Tanszékén (AKT), valamint annak a fényszobájában végeztük el.

3.1.1 PGPM-ek izolálása, vizsgálata és a gyakorlati szempontú törzs-szelekciója

A kutatás során PGPM-eket használtunk fel. Ezek egyrészét magunk izoláltuk specifikus, szelektív táptalajokon. A legígéretesebb törzseket a szelekciót követően genetikai (PCR - polymerase chain reaction) azonosításnak vetettük alá, külső laboratórium bevonásával.

A saját törzsek *izolálása* során szelektív táptalajokat használtunk (a szelektív táptalajokról bővebben a „3.2.2 Felhasznált táptalajok, táplevesek” fejezetben), amin a talajok szuszpenzióinak megfelelő hígításait szélesztettük. A minták a Soroksári Kísérleti Üzem és Tangazdaságában beállított kísérletünk területéről származtak. A szelekciós tényezőket jelen esetben olyan táptalajok jelentették, ahol valamilyen tápelem korlátozott volt, például a nitrogén, a foszfor vagy a kálium, mivel fontosnak tartottuk a növények növekedése szempontjából az elérhető makrotápelemek mennyiségét. Ezeken a szélesztést követően a

kioldási zónákat figyeltük a baktérium- és/vagy a gombatelepek körül, ami azt jelezte, hogy az adott kolónia mennyire eredményes az adott tápelemek feltárásában, és hogy mennyire erős a telep növekedése (2. ábra).



2. ábra. Táptalajoldás és telepnövekedés vizsgálata GYCA táptalajon, egy gyökérgümőről izolált törzs esetén.

A táptalajokon szelektált, és izolált törzseink molekuláris *azonosítását* a Gödöllői BIOMI Kft. végezte el. Az azonosításhoz a baktériumok 16S rRNS-t kódoló génszakaszát használtuk fel az alábbi három primer alkalmazásával:

-27f (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') (Feigl et al., 2023).

-P338F-GC (5'-

CGCCCGCCGCGCGCGGGCGGGGCGGGGGGCACGGGGGGACTCCTACGGGAG
GCAGCAG-3 ') (Ovreås et al., 1997)

-803F (5'-CACCGAAACTGTGCAAGCA-3') (Sipos et al., 2007)

3.1.2 Csíranövény-teszt sejttálcás módszerrel

A kísérletet a növények csíráztatására használt „sejttálcákon” hajtottuk végre fényszobában, ellenőrzött körülmények között (3. ábra). A fényviszonyokat 16/8 óras nappali/éjszakai időszakra állítottuk be a növények növekedéséhez. A hőmérséklet 22 ± 2 °C, a relatív páratartalom $55 \pm 5\%$ volt. A sejttálcák sejteit egyesével oltottuk be a különböző törzsekkel. Randomizált elrendezést használtunk a sejttálcákon. A sejttálcák 7×12 (84) db sejtet tartalmaztak, a tálca 52,5 x 30 x 7 cm méretű, a lyuk térfogat pedig 76 cm³ volt. A Kontrollal

együtt 7 kezelést alkalmaztunk, így 12 független paraméter vizsgálatára volt lehetőség a kísérletben tálcánként. A kísérletekhez gyengén humuszos, meszes homok (arenosol) talajt (Soroksár 1) használtunk, amit 90:10 arányban komposzttal tömeg %-ban bekeverve alkalmaztunk (Pabar et al., 2023). További részletek a talajról a 2. táblázatban.

A kísérlet beállítása során minden sejt aljába elhelyeztünk egy papírréteget, hogy az öntözések során a talaj kimosódását megakadályozzuk. A sejtálca oldalára műanyag lapokat illesztettünk, hogy így védjük a tálca szélén elhelyezkedő növényeket a fokozott párologtatástól. Az így előkészített tálcán megtöltöttük az egyes sejteket talajjal, majd beoltottuk azokat a különböző mikroorganizmusok törzseivel.

A talajoltáshoz használt mikrobiális PGPM törzsek és jelöléseik a következők voltak:

A5: *Enterobacter ludwigii*;

Bm: *Bacillus megaterium*;

Bs: *Bacillus subtilis*;

D1: *Kosakonia cowanii*;

Pf: *Pseudomonas fluorescens* Hx1;

Th: *Trichoderma harzianum* T-22

Ezekből a baktériumokból 48 órás rázatásos (150 rpm) felszaporítás után 0,5 mL mennyiségeket juttattunk ki a sejtálca minden egyes sejtjébe. A *Trichoderma harzianum* mikroszkópikus gomba, csak por formájában állt rendelkezésünkre, így azt nem volt szükséges előzetesen felszaporítani. A megfelelő koncentrációjú oldat készítése után azonos módon alkalmaztuk, mint a baktériumokat. A mikroba-szuszpenziókat a felszaporítás után centrifugáltuk, majd fiziológiás sóoldatban újra szuszpendáltuk. Ezzel a kísérlet során kiküszöböltük azt, hogy a tápleves hatását mérjük a felhasznált mikroorganizmusok helyett. A sejtszámot OD600 méréssel állítottuk be. Az A5, D1, Pf, esetén 10^8 , a Bm 5×10^7 , a Bs esetén pedig 10^7 sejt/ml-re tudtuk beállítani. Majd az így előkészített szuszpenzióból 0,5 ml-t juttattunk ki a sejtálca minden egyes sejtjébe.

Tesztnövényként a fehér mustárt (*Sinapis alba* L.) és az angolperjét (*Lolium perenne* L.) alkalmaztuk. Ezeket a sejtálca sejtjeibe a következő mennyiségben juttattuk be: mustár - 4 db mag/sejt, angolperje - 0,6 g fűmag/sejt. Vetés után 2 héttel termináltuk a kísérletet és megmértük a mustárnál a 4 kiindulási maghoz viszonyítva a kicsírázott magvak számát egy-egy adott sejtben, a perjénél erre nem volt lehetőség. A mustárnál és a perjénél is mértük a biomassa nedves-, és száraztömegét, valamint a növények hosszát.

Ebben a kísérletben az alábbi tulajdonságokat mértük: A növényi hajtásokra vonatkoztatva a nedves- és száraz tömeget (g), a növekedési hosszt (mm), a mustárnál a kicsírázott magvak számát is. Mértük továbbá a mustárnövények talajának a fluoreszcein-diacetát (FDA) aktivitási értékeit (Adam és Duncan 2001; Villányi et al., 2006).



3. ábra: A sejt-tálcák sejtjeiben növekvő angolperje, mikrobiális oltást követően.

A mikrobiális inokulációk magcsírázásra gyakorolt hatását a következőképpen számítottuk ki: az átlagos relatív válaszarányok (Response Ratio - RR) az alkalmazott törzsek és a kontroll eredményeinek összehasonlítása mutatják a százalékos változást (%) a következő képlet szerint:

$$RR = \left(\frac{\text{Kontroll} - \text{Törzs}}{\text{Törzs}} \right) \times 100$$

3.1.3 Tenyészedény-teszt bazsalikkal, salátával *Bacillus megaterium* oltással

Tesztnövényként fejes salátát (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) és bazsalikomot (*Ocimum basilicum* L.) használtunk. A növényeket gyengén humuszos, meszes homoktalajon (Soroksár 1) és humuszos, laza szerkezetű mezősegi talajon (Martonvásár) neveltük (1. táblázat). Tenyészedényenként 175 g száraz talajnak megfelelő természetes állapotú, nedves talajt

használtunk az eredeti mikroflóra megőrzése érdekében. Negatív kontrollként autoklávban 3 egymást követő napon sterilizált (121 °C, 20 perc) talajokat használtunk az eredeti mikrobaközösség kizárására.

Az ásványi anyagok feltáródását 5 % (m/m) alginit hozzáadásával vizsgáltuk. A növényeket előnevelés után, a hasonló fejlettségi állapotúakat random módon átültettük a tenyészedényekbe. A *Bacillus megaterium* oltás a palántázást követően bazsalikom esetében 1 nappal, salátánál pedig 10 nappal történt. Növényenként 1 ml $1,735 \times 10^6$ CFU/ml oltást alkalmaztunk, kontrollként a baktérium-mentes nutrient táptalajt adtuk. Az első mintákat az ültetés utáni 4. héten vettük.

1. táblázat. A vizsgált talajok legfontosabb fizikai-kémiai tulajdonságai

	Soroksár	Martonvásár
pH (H ₂ O)	7,79	7,78
Kötöttség K _A	30	38
CaCO ₃ m/m %	0,67	1,47
Szerves anyag m/m %	1,6	2,88
P ₂ O ₅ (mg/kg)	357	687,6
K ₂ O (mg/kg)	215	733,36
Nitrit-N (mg/kg)	0,16	0,55
Nitrát-N (mg/kg)	10,1	11

Mértük a talajok biológiai paramétereit. MPN módszerrel meghatároztuk a kitenyészthető aerob, spórás baktérium, valamint a mikroszkópikus gomba számot. Bazsalikomnál mértük a talajok DHA értékeit, salátánál pedig az FDA-t. valamint a talaj (Ca, K, P) és a növények (K, P) tápanyagértékeit.

3.1.4 Tenyészedény-teszt hazai talajokkal, bab és kukorica tesztnövényvel

Tenyészedény-kísérletet állítottunk be a Szent István Egyetem, Kertészettudományi Kar Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék fényszobájában. Kontrollált körülmények között, a növények neveléséhez a fényszobai feltételeket 16/8 órás nappal/éjszaka időperiódus alapján állítottuk be. A hőmérséklet 22 ± 2 °C, a relatív páratartalom pedig 55 ± 5 % volt. A tenyészedényeket a szántóföldi vízkapacitás 60%-ra, állítva öntöztük, mérleggel ellenőrizve. Minden kezelés 4 ismétléssel történt.

A növényeket öt, különböző tulajdonságokkal rendelkező hazai talajon neveltük. Származási helyeiket és rövid jellemzésüket a 4. ábrán mutatjuk be.



4. ábra. A kísérletekhez felhasznált talajok jellemzése és származási helyeik. T1: Humuszos **homoktalaj**, karbonátos, gyengén lúgos (Soroksár 1). T2: Öntés **réti talaj**, közép kötött, erősen karbonátos (Soroksár 2). T3: **Mezőségi talaj**, közép kötött, gyengén lúgos és karbonátos (Hatvan). T4: Agyag-bemosódásos **barna erdőtalaj**, erősen savanyú (Tófej). T5: Típusos **réti talaj**, agyag fizikai féleségű, semleges, felszínen nem karbonátos, erősen glejes tulajdonságú (Szeghalom).

A talajok semleges, enyhén lúgos pH-val rendelkeznek, viszont eltérő a kötöttségük és a szervesanyag-tartalmuk is különbözik. A talajok a termesztésben is használt genetikai talajtípusoknak felelnek meg. A felhasznált talajok fontosabb fizikai-kémiai tulajdonságait az 2. táblázatban mutatjuk be. Tenyészedényenként 850 g száraz talajt használtunk, majd 60 %-os vízkapacitásra állítottuk be ezeket.

2. táblázat. A tenyészedény-kísérletben felhasznált talajok főbb fizikai-kémiai jellemzői.

Talajok és vizsgált tulajdonságok	T1	T2	T3	T4	T5
Mintavételi hely	Soroksár 1	Soroksár 2	Tófej	Hatvan	Szeghalom
WRB besorolás	Arenosol	Gleysol	Chernozem	Luvisol	Gleysol
Koordináták	47°23'33" 19°08'55"	47°24'02" 19°09'18"	46.65473 16.78882	47.65475 19.61545	47.12483 21.07916
Kötöttség (K _A)	26	43,4	49	54	57,5
Fizikai féleség	Homok	Agyagos vályog	Agyagos vályog	Agyag	Agyag
pH _(H₂O)	7,49	7,42	7,44	7,50	7,61
pH _(KCl)	6,94	7,13	6,58	6,74	6,45
Vízoldható só m/m %	0,0317	0,0216	0,02677	0,0555	0,0665
Szervesanyag-mennyiség (SOM %):	2,18	4,09	4,63	3,89	3,75

Tesztnövényként sárgahüvelyű bokorbabot (*Phaseolus vulgaris* var. 'Maxidor'), majd a bab helyére vetve csemegekukoricát (*Zea mays* var. *saccharata*) használtunk (hasonlóan, mint a szabadföldi kísérletnél, ahol első évben babot, a rá következő évben pedig kukoricát ültettünk). A bab esetén az előáztatott magokat a tenyészedénybe vetettük (4-4 mag/edény), majd kikelés után azonos növényszámra (1 növény/edény) ritkítottuk. A kukoricánál sejttálcában előneveltük a növényeket.

A mikrobiális oltás a magvetéssel, palántázással egyszerre történt. A használt törzsek a következők voltak:

D1 - *Kosakoni cowanii*,

Pf - *Pseudomonas fluorescens*,

A5 - *Enterobacter ludwigii*,

Bs - *Bacillus subtilis*,

Th - *Trichoderma harzianum*

Ezen törzsek tulajdonságait a 4. táblázat mutatja be. Az oltóanyagokat 48 órán keresztül rázattuk inkubátorban, majd centrifugáltuk, és a szuszpenziót újraoldottuk fiziológiás sóoldatban. Tenyészedényenként 0,5-0,5 ml oltóanyagot alkalmaztunk, kontrollként az autoklávban előlt baktérium szuszpenziót adagoltunk. A talajmintákat a virágzás 60 %-nál vettük, a kísérlet egyidejű bontásakor.

A Soroksár 1 és a Szeghalom talaj esetén (mint a két legszélsőségebb talaj fizikai-féleség alapján) Vázsonyi alginittel együtt is elvégeztük a kísérleteket. Így az 5 talajra elvégezve az az oltóanyag kezelést, valamint 2 talajra kombinálva ezeket alginittel (5 % m/m), 14 kezelést eredményezett összesen. A kezeléseket 4 ismétlésben hajtottuk végre. A kezeléseket a 3. táblázatban foglaltam össze. Az eredmények kiértékeléséhez az adatokat vagy az 5 talajra és ezek oltóanyagos kezeléseit értékeltük ki, vagy az alginites kezelések (és ezek interakciója az oltóanyaggal) esetén csak a Soroksár és Szeghalom talajokat értékeltük ki.

3. táblázat. A használt talajok és rajtuk alkalmazott kezelések zöld színnel kiemelve. (Bővebb információ a szövegben).

	T1 - Soroksár 1	T2 - Soroksár 2	T3 - Tófej	T4 - Hatvan	T5 - Szeghalom
Kontroll					
Oltóanyag					
Alginit 5 % (m/m)					
Oltóanyag + alginit					

3.1.5 Szabadföldi kísérletek oltótörzsek keverékével és ökológiai gazdálkodásban alkalmazható talajerőgazdálkodási technológiákkal

A területet, és meteorológiai viszonyait Kocsis (2018) mutatja be értekezésében. Soroksár, a Budapest XXIII. kerülete, a Pesti-síkságon található, közvetlenül északról a XX. kerület, nyugatról a Ráckevei-Duna-ág, délről pedig a főváros közigazgatási határa, keletről pedig a XVIII. kerület határolja. A kerület közepén található Magyar Agrártudományi Egyetem (MATE) Kísérleti Üzem és Tangazdaság domborzati adottságait tekintve síkság, tengerszint feletti magassága nem haladja meg a 200 métert. Talajtani jellemzői szerint a területen glaciális és alluviális üledékek találhatók, melyeken humuszos homoktalaj alakult ki. A termőréteg vastagsága meghaladja a 100 centimétert, szervesanyag-készlete pedig 100-200 tonna/hektár körül van. Az itt található humuszos homoktalaj nagy vízelvezető-képességű, gyenge vízgazdálkodású, és nagyon gyenge vízmegtartó képességgel rendelkezik.

Az éghajlati viszonyokat tekintve Soroksár mérsékelt meleg-száraz éghajlati körzetben helyezkedik el. Évente átlagosan 4400-4450 MJ/m² global sugárzás éri a területet, az átlagos napfényes órák száma évi 2000 óra körül van, ami átlagosan 10-11 °C évi középhőmérsékletet eredményez. Csapadékviszonyait tekintve a terület száraz, az éves átlagos csapadékmennyiség 500-550 milliméter között alakul. Ehhez képest a kísérlet ideje alatt eltértek a csapadék viszonyok, 2019: 660 mm, 2020: 443 mm, 2021: 339 mm csapadék hullott. A legtöbb csapadék májustól júliusig hullik, míg a legkevesebb januártól márciusig. Szélirány szempontjából az északnyugati szél a meghatározó, de a déli szeleknek is másodlagos jelentősége van. Éves szinten az átlagos szélsébség 2,5-3 m/s.

A kísérleti területen csepegtető öntözést alkalmaztunk. A kísérlet megkezdése előtt a területet felszántottuk, majd a parcellákat szezonok előtt rotációs kapával kezeltük, szezonok után a parcellákat fűnyíróval lenyírtuk, a gyom probléma ellen, kivéve a mulcsos parcellákat. Valamint szezon közben, illetve ültetéskor a sorokat kézzel, kapával gyomtalanítottuk.

Az általunk alkalmazott mintavételi eljárás az alábbi lépéseket foglalja magában:

- A talajmintát mindig azonos mélységből gyűjtöttük a növényi rhizoszférából. Ez 2019-es évben 0-20 cm-t jelent. 2020-2021-ben külön vizsgáltuk a 0-10, és 10-20-as mélységet, mivel a bizonyos kezelések (mulcs), inkább a felső réteget érintik, így lehetett kisebb változásokat is vizsgálni a kezelések között. De az időhatás vizsgálatára a 0-10, 10-20-as mélységeket átlagolva a 0-20-as mélységnek megfelelő adatokat kaptunk.

- Minden parcellából legalább három ismételtsben vettük talajmintát, majd azokat a látható növényi maradványok eltávolítása után szitáltam 2mm-es szitával, így kezelésként három homogenizált mintával rendelkeztem.

Kísérleti elrendezés

A kezelésekről bővebben:

Alginit: 2018-ban bab növények elvetése előtt vázsonyi alginitet kevertünk az erre kijelölt parcellák talajába 20 cm-es mélységben, 40 t/ha dózisban.

Mikrobiális oltóanyagok: 2019-2020: Saját keverék, 2021: Phy - kereskedelmi oltóanyag-készítmény: *Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus circulans* és *Bacillus megaterium* összetételben.

2019 és 2020-ban saját oltóanyag keveréket használtunk. A kísérlet utolsó évében a Phy kódnevű, kereskedelmi talajoltót használtuk, mivel hagyma teszt növényénél regisztrált és minőségileg is garantált termékről akartunk információt nyerni az élelmiszer-minőség és biztonság szempontjai miatt.

Mulcs: 2019-ben a kijelölt parcellákra 10 cm-es mulcs réteget juttattunk ki, később a fogyás függvényében pótoltuk ezt. Mulcsként természetes ökológiai eredetű tritikálé szalmát alkalmaztunk.

Takarónövény: a bab (2018) betakarítása után rukkolát vetettünk takarónövényként. 2019-2021-ben bíbor-bükköny, homoki-zab, és etióp mustár (Demeter-féle) takarónövény keverék lett felhasználva: *Lathyrus sativus* - szegletes lednek; *Vicia faba* - lóbab; *Vicia benghalensis* - bíbor bükköny; *Avena strigosa* - homoki zab; *Raphanus sativus* (*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*) - művelő retek; *Brassica carinata* – etióp mustár; *Phacelia tanacetifolia* – facélia; *Trigonella foenum-graecum* L. – görögszéna.

A kezelések elrendezését az 5. ábra szemlélteti. A területen csepegtető csöves öntözést alkalmaztunk.



5. ábra: A szabadföldi kísérletben alkalmazott kezelések és elrendezésük: K=kontroll, A=alginít, M=mulcs, T=takarónövény, O=oltóanyag, AO=alginít + oltóanyag, MO=Mulcs + oltóanyag, TO=takarónövény + oltóanyag.

A Kontrollnál és az Alginít kezelésű parcelláknál (a konvencionális mezőgazdasági gyakorlatnak megfelelően) eltávolítottuk a keletkezett szerves anyagot, a „Takarónövény” kezelésnél a parcellán rajta maradt az ott keletkezett növény, a „Mulcs”-nál többlet szerves

anyag bevitelt alkalmaztunk. A gyomtalanítási és betakarítási munkálatok után így a keletkezett növényi maradványokat a parcellák mentén a következő módon osztottuk szét: A Kontroll és az Alginit kezelésű parcellákról eltávolítottuk a növényi maradványokat. A Takarónövényes parcellákra visszaterítettük, a Mulcsra pedig áthordtuk az első 2 kezelésről a szerves anyagot, és kiegészítettük szükség szerint, hogy a mulcstakaró megfelelő vastagságát elérjük. A kezelések minden évben ugyanoda kerültek.

Tesztnövények a vetésforgóban

2018-ban *bokorbab* tesztnövényt vetettünk. Ekkor a kezelések még nem kerültek beállításra, csak az alginit (40 t/ha) lett kijuttatva az érintett parcellákra.

A takarónövényt tartalmazó parcellákra a bab betakarítása (2018) után rukkolát vetettünk takarónövényként.

2019-ben *csemegekukoricát* (*Zea mays* var. *saccharata*) ültettünk sejttálcás előnevelés után. A kiültetéssel egy menetben Cofuna szerves trágya került kijuttatásra 2,5 t/ha dózisban. Takarónövényként a fent leírt kombinációt alkalmaztuk. Oltóanyagként a saját mikrobiális keverékünket jutattuk ki 72 órás, előzetes felszaporítás után. Ez a következő fajokat tartalmazta: Bs - *Bacillus subtilis*, Bm - *B. megaterium*, Pf - *Pseudomonas fluorescens*, Ac - *Azotobacter chroococcum*, A5 - *Enterobacter ludwigii*, D1 - *Kosakonia cowanii*, Th - *Trichoderma harzianum*.

A szezon után a kukorica szármaradványokat szecskázógéppel aprítottuk és visszaterítettük a fent leírt módon.

2020-ban *fűszerpaprikát* (*Capsicum annuum* cv. *longum* 'Szeged 80') Sapphire seedcoat premixel csávázva, és *spárgatököt* (*Cucurbita moschata*) ültettünk ki. A kiültetéssel egy menetben Siforga és Orgevit 1:1 szerves trágyát jutattunk ki 3,5 t/ha dózisban a növények alá bedolgozva. Az oltóanyag kezelés megegyezett az előző évvel.

A fűszerpaprikát, és spárgatököt hetente gyűjtöttük, és mértük le, hogy biztosítsuk, hogy a megfelelő állapotukban legyen feljegyezve a terméseredmény.

2021-ben *vöröshagymát* (*Allium cepa* 'Sturon') duggattunk el. Ebben az évben nem alkalmaztunk szerves trágyát a területen. Takarónövényként a fent leírt kombináció volt alkalmazva. Oltóanyagként pedig egy vásárolt kereskedelmi terméket (Phy) talajoltót alkalmaztunk.

3.2 Felhasznált anyagok

3.2.1 Alkalmazott mikroorganizmusok

4. táblázat: A felhasznált mikroorganizmusok lehetséges és várható tulajdonságai. (Gy – Gyűjtemény, T – Termék, I – Izolált). Termék esetében nincs feltétlenül kódnev.

Kód és Fajnév	Forrás	PGPM tulajdonságok	Kísérlet
Baktériumok			
Bm - <i>Bacillus megaterium</i>	Gy, T	PSB, KSB, N kötés, <i>Fusarium</i> gomba antagonizmus, IAA-, sziderofór és extracelluláris poliszacharid termelés (EPS)	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.3. tenyészedény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
<i>Bacillus circulans</i>	T	Cellulóz-bontás, PSB, IAA termelés. biokontroll	3.1.5. szabadföldi kísérlet
Bs - <i>Bacillus subtilis</i>	Gy	PSB, sziderofór termelés, antibiózis, IAA termelés	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
A3 - <i>Bacillus coreaensis</i>	I	xilán-hidrolizáló enzimaktivitás, sziderofór-, és EPS termelés	3.1.2. csíranövény-teszt,
Ac - <i>Azotobacter chroococcum</i>	Gy, T	N kötés, <i>Fusarium</i> antagonista, PSB, biodegradáció	3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
A5 - <i>Enterobacter ludwigii</i>	I	PSB, KSB, IAA-, EPS termelés, Antifungális hatás, alkán biodegradáció	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
D1 - <i>Kosakonia cowanii</i>	I	N kötés, PSB, IAA-, sziderofór termelés	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
C1 - <i>Lelliottia amnigena</i>	I	PSB, ACC-dezamináz aktivitás, sziderofór és IAA termelés.	3.1.2. csíranövény teszt,
Pf - <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Gy	PSB, biokontroll, szideroforok, IAA termelése	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet
<i>Pseudomonas putida</i>	T	PSB, biokontroll, szideroforok, IAA termelése	3.1.5. szabadföldi kísérlet
Mikroszkopikus gomba			
Th - <i>Trichoderma harzianum</i>	T	Antifungális hatás, cellulóz bontás	3.1.2. csíranövény-teszt, 3.1.4. tenyészedény-teszt, 3.1.5. szabadföldi kísérlet

A kutatás során számos mikroorganizmussal dolgoztunk és használtuk fel őket a kísérletekhez a fent leírt kombinációkban. Ezek egyrésze már rendelkezésre állt a labor törzsgyűjteményében, másokat kereskedelmi termékek tartalmaztak, továbbá voltak saját izolált törzseink, a Budai campus, valamint a soroksári kísérleti területéről izolálva, mivel az volt a hipotézis, hogy az adott talajhoz már adaptálódott mikroorganizmusok nagyobb eséllyel élnek túl a kijuttatás utáni körülményeket, továbbá, nagyobb hatékonysággal tudnak funkcionálni egy olyan környezetben, ahonnan izolálva lettek.

A főbb törzseket kódnevekkel, származással, és feltételezett tulajdonságokkal, amikkel a kutatás során dolgoztunk a 4. táblázat mutatja be

3.2.2 Felhasznált táptalajok, táplevesek

A laboratóriumi és tenyészedényes kísérleteim során, a mikroorganizmusok fenntartására és szaporítására Szegi (1979) munkájában, valamint a vonatkozó irodalomban közölt táptalaj és tápoldat receptúrákat, használtam. Az adatok 1 liter tápközeg előállításához vannak megadva, melyeket az összemérés után 20 percig 1 atm nyomáson autoklávban sterilizáltam. Abban az esetben, amikor szilárd agaron történő kitenyésztést is végeztük, ott a receptúra végén zárójelben tüntettem fel az összemérés során hozzáadott agar mennyiségét.

A használt táptalajok pontos receptjei és elkészítésük módja az 1. mellékletében található.

Izolációra használt táptalajok és táplevesek

Az alkalmazott táptalajok a mikroorganizmusok izolálásához és a fenntartásukhoz vagy a felszaporításukra alkalmasak. A szelektivitást a speciális fiziológiai csoportok kimutatása érdekében azok különböző összetétele biztosítja. Ennek megfelelően a N-kötő baktériumokhoz:

- Am (Ashby's mediumot) használtunk, ezen az *Azotobacter* csíraszámot vizsgáltuk.
- a BNm (Burk's N-free medium) is a nitrogénkötő baktériumok izolálására szolgált.
- a YM (Yeast Mannitol) a *Rhizobium*-ok szelektív táptalaja.

A Foszfor-oldó baktériumok (PSB) és savtermelők kitenyésztése:

- GYCA, (Glucose Yeast Calcium Agaron) történt,
- GYCA+Na-benzoát táptalaj is a foszfor-oldók vizsgálatára,
- NBRIP (National Botanical Research Institute's Phosphate) Medium: A foszfor-oldó aktivitás értékelésére, kiegészítve Kongóvíz festékkel indikációs célokra.
- Pikovskaya Agar (PVK): Foszfor-oldók kimutatására kioldási zónák alapján.

A káliumoldó baktériumokat (KSB) Am (Aleksandrow Medium) felhasználásával vizsgáltuk.

- Sabouraud Agar: Gombák izolálására és tisztántartására.
- Kristályibolya-Neutrálvörös-Epe-Glükóz (VRBG) Agar: *Enterobacter* izolálására.
- Hutschinson-Clayton medium (szűrőpapírra kijuttatva): Cellulózbontó szervezetek izolálására

Felszaporításra használt táptalajok és táplevesek

Általános a baktériumokhoz:

- NB – Nutrient tápleves (N Broth)
- TGE (Tryptone Glucose Extract) táptalaj
- LB (Luria-Bertani) közeg: Alkalmas *Enterobacter* és kólifág baktériumok felszaporítására.
- King-B Medium: Specifikusan a *Pseudomonas* fajok, különösen a *P. fluorescens* és *P. putida* fajok szaporítására szolgál.

Általános a gombákhoz:

- Potato Dextrose (PD) medium
- Sabouraud táplevest
- Hutschinson-Clayton medium
- Rose-Bengal (RB) szilárd táptalaj

Mikroorganizmusok felszaporítása

A törzsekből törekedtünk a kísérletek során az egységes mennyiség és így a pontos csíraszámok, vagy azok javasolt mennyiségeinek a kijuttatására. A baktériumokból 1 napos, 1 éjszakán keresztüli síkrázon való felszaporítás után juttattunk ki. Később vizsgáltuk a különböző törzsek növekedési görbáját, és optikai tulajdonságait, így az optikai denzitás módszerrel 600 nm-en (OD600) határoztuk meg a csíraszámot, így még pontosabban be tudtuk állítani a kijuttatandó mennyiségeket.

A Th - *Trichoderma harzianum* T-22 mikroszkopikus gomba, egy kereskedelmi termék, csak por formájában állt rendelkezésünkre, így azt nem volt szükséges előzetesen felszaporítani. Ezt a termék leírás alapján készítettük elő.

3.2.3 Talajjavító adalékanyagok – az alginit

Talajjavítóként vázsonyi alginitet használtunk, melyet Pulán, Magyarországon bányásztak ki. Az alginit átlagos összetétele a következő volt: nedvesség < 40 %, szerves anyag > 21 %, CaCO_3 > 31 %, mikroelemek/nehézfémek: As < 10, Cd < 2, Co < 50, Cr < 100, Cu < 100, Hg < 1, Ni < 50, Pb < 100 és Se < 50 mg·kg⁻¹ szárazanyag (NÉBIH, 2009). Az alginit, mint *ásványi trágya* gazdag szerves anyagokban, kalcium-karbonátban és mikrotápanyagokban is.

A dózisokat szabadföldön 40 t/ha, a tenyészedény kísérletekben pedig 5 m/m %-ra (ami 100 t/ha-nak felel meg) mennyiségre állítottuk be. Ezt az irodalomban is használt dózisok alapján állapítottuk meg (Solti et al. 1987; Ragályi et al., 2019).

A tenyészedény kísérletekben különböző talajokon, és oltóanyagokkal kombinálva vizsgáltuk. A szabadföldi kísérletben pedig csak az oltóanyagokkal való kombinációját vizsgáltuk.

3.3 Laboratóriumi vizsgáló, monitorozó módszerek

A talajok vizsgálatához reprezentatív (több pontos) mintavétel történt, és homogenizáltuk a mintákat. A nagyobb, látható szervesanyag-maradványokat eltávolítottuk. A biológiai mérésekhez a mintákat 4 °C-ig hűtőben, vagy -20 °C-on fagyasztoóban tároltuk feldolgozásig. A kémiai és fizikai mérésekhez pedig a mintákat szobahőmérsékleten kiszárítottuk, és száraz, hűvös helyen tároltuk őket a vizsgálatig.

3.3.1 Talajok biológiai aktivitása: enzimvizsgálatok és cellulóz teszt

a, A fluoreszcein-diacetát (FDA) hidrolízis

Az FDA módszer egy gyakran alkalmazott technika a talaj enzimatikus aktivitásának mérésére. Adam és Duncan (2001), és Villányi et al., 2006-os munkája alapján alkalmaztuk a módszert. A módszer segítségével vizsgálható, hogy a mikrobiális közösség milyen mértékben képes organikus anyagokat lebontani, ami fontos információt nyújt a talaj termékenységéről és biológiai aktivitásáról. Ez több, nem-specifikus extracelluláris enzim aktivitását képes kimutatni, így képes egy általános képet adni a talaj mikrobiális közösségek aktivitásáról,

közvetve megállapítható az összes baktérium és fonalas gomba biomasszája a talajban (Schnürer és Rosswall, 1982).

A szintelen fluoreszcein diacetátot a talajban lévő szabad és membránhoz kötött enzimek hidrolizálják, A talajokat (1 g) foszfát pufferrel (7,5 ml) rázattuk 30 percen keresztül 30 °C-on. Majd az FDA oldat hozzáadása után inkubáltuk további 1 órán keresztül 30 °C-n. Az inkubált minták enzimaktivitását leállítottuk 50 %-os acetonnal. A felszabadult egy színes végterméket spektrofotometriásan megmértük 490 nm-en, Libra S22 UV/VIS spektrofotométerrel.

b, DHA- dehidrogenáz enzim aktivitás (DHA)

A dehidrogenáz enzim aktivitás (DHA) mérésére szolgáló módszer az egyik leggyakrabban használt indikátora a mikrobiális aktivitásnak a talajban. A dehidrogenázok a mikrobák sejtjeiben találhatók, és szerves anyagok oxidációjában vesznek részt, azaz az elektrontranszfer folyamatokban közvetlen szerepet játszanak. Ezek az enzimek csak életképes sejtekben aktívak, így aktivitásuk jól tükrözi a talaj mikrobiális életképességét és egészségét (Veres et al., 2013,).

A talajmintában lévő dehidrogenáz enzim jelenléte azáltal igazolható, hogy a hozzáadott triféniltetrazólium-klorid (TTC) a reakció során redukálódik, és sötétvörös trifénil-formazánná alakul át. Ezt a változást fotometriás módszerrel mérik 546 nm-en, mi Libra S22 UV/VIS spektrofotométert használtunk. A mintavétel hálólapú eljárással történik, ahol minden egyes parcelláról 2-2 grammos nedves talajminta kerül kémcsövekbe (A és B alosztályok). Mindegyik kémcsőbe 2 ml 1,5 %-os TTC-oldatot adnak, majd a kémcsőkeverő segítségével homogenizálják a mintát. Az így előkészített kémcsöveket lezárt állapotban 24 órán keresztül 37 °C-on inkubálják (Veres et al., 2015).

c, Cellulózfogyás

Tenyészedény kísérletben a talajok biológiai aktivitását mértük azzal, hogy 1 g vattát helyeztünk el a tenyészedényekben egyenlő mélységben A vattát nem sterilizáltuk, vagy készítettük elő bármilyen módon. Majd a kísérlet során ezeket visszamértük (Unger H. 1960).

3.3.2 Mikroorganizmusok legvalószínűbb számának (MPN) a meghatározása: Aerob-, Spórás baktériumok, Mikroszkopikus gombák

A talajok legvalószínűbb élő mikroba számát MPN (Most Probable Number) Hoskins-féle táblázatból (Cochran 1950) határoztuk meg. Így vizsgáltuk az összes kitenyészthető mikroorganizmus, a mikroszkopikus gombák és a beoltott spóráképzők csíraszámát (Olsen 1996).

A minták vétele és laboratóriumi feldolgozása során a mintákkal és a mikroorganizmusok tenyésztésére használt táptalajokkal érintkező üvegeket, eszközöket, készülékeket, műszereket és azok tartozékait sterilizáltuk. A vizsgálat során 1 g mintát 9 ml sterilizált fiziológiás sóoldatban szuszpendálunk, majd ebből háromszoros ismétléssel bemérünk a tápoldatot tartalmazó microplate lemezekre. Itt tízszeres hígításokat alkalmazva kihígítottuk a mintákat. Az inkubációs időtartam (3 nap) lejárta után a kémcsövekben a szaporodást értékeljük. Az utolsó három pozitív kémcsövet tartalmazó hígítás eredményei alapján a Hoskins-táblázatból kikeresztük az kiindulási minta legvalószínűbb mikroorganizmusszámát.

Az aerob mikroorganizmusokat Nutrient táplevesben tenyésztettük. A mikroszkopikus gombaszámhoz Sabouraud dextróz táplevest használtunk. Míg a spórás baktériumszám meghatározáshoz, az aerobok baktériumokhoz hasonlóan Nutrient táplevest használtunk, hogy 20 perc 80 °C-os vízfürdőbe helyeztük a mintákat, ezzel elpusztítva a spórázásra nem képes baktériumokat.

3.3.3 Vizsgált növényi paraméterek

A kísérletek során mértünk különböző növénybiológiai paramétereket. A sejttálcás és tenyészedeny kísérletekben mértük a hajtás hosszát, nedves és száraz tömegét. A gyökér nedves és száraz tömegét.

A szabadföldi kísérlet esetén a termésértékeket rögzítettük. *Normalizált Termésértékek* kiszámítása úgy történt, hogy az adott év átlagértékeivel osztottuk mért értékeket. Ennek a folyamatnak az a célja, hogy biztosítsuk az összehasonlíthatóságot a parcella termésállományai között különböző évek során, figyelembe véve, hogy minden évben különböző növényeket termesztettünk. Ennek eredményeként az Év tényezőt kizártuk ennek a változónak az elemzéséből.

3.3.4 Talaj fizikai-kémiai paraméterek vizsgálati módszerei

A kísérletek indításakor és azt követően a talajban felhalmozódott tápelem tartalmát, a talajok fizikai és kémiai paramétereit az alábbi módszerekkel vizsgáltam:

- Szénsavas mésztartalom (CaCO_3) meghatározása Scheibler készülékkel ill. módszerrel határozzuk meg. (MSZ 08-0206-2:1978), (2. fejezet)
- Vízben oldható összes sótartalom meghatározása (MSZ 08-0206-2: 1978), (4. fejezet).
- Arany-féle kötöttségi szám meghatározása (MSZ 21470-51:1983).
- A talajnedvesség tartalmát meghatároztuk úgy, hogy megmértük a nedves állapotát, majd légszárazra szárítottuk. Ezután a kettő hányadosából lett kiszámítva a talaj eredeti nedvesség tartalma. Ez főleg az enzimaktivitások kiszámításához volt használva.

- A talaj kémhatásának (H_2O , KCl) vizsgálata MSZ-318-4:1979 (5. fejezet), 24 órás állást követően.
- Mintaelőkészítés oldható tápelem-tartalom meghatározásához (MSZ 20135:1999), (2-4. fejezet).
- A foszfor (P) és kálium (K) tartalom meghatározásához ammónium-laktátos kivonást használtunk (Egnér és et al., 1960), melyet ion-láng kromatográffal (FP910 lángspektrofotométer, PG Instruments Ltd., Anglia) és spektrofotométerrel (Libra S22 UV/VIS spektrofotométer, Biochrom Ltd., Anglia) mértünk.
- Nitrit-N (tápelem-tartalom meghatározás 1:2,5 KCl kivonatból (MSZ 20135:1999), (5.4.3. szakasz).
- Nitrát-N (tápelem-tartalom) meghatározás 1:2,5 KCl kivonatból (MSZ 20135:1999), (5.4.4. szakasz).

3.3.5 A talaj szénformáinak mérései

A teljes szerves szén (TOC) tartalmát kálium-dikromátos oxidáció után határoztuk meg, majd a felesleges $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ titrálásával $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ segítségével (Tyurin, 1951). A SOM % (Soil Organic Matter) értékeket a TOC értékek 1,724-szeresének szorzásával kaptuk. A SOM %-ra szinonimaként használják a humusz (H %)-ot is. Ez ebben a dolgozatban is előfordul majd, mert bizonyos mérési módszerek (Hargitai féle két oldószeres eljárás) a számításaikhoz a H%-ot használják).

A totál nitrogén (TN) és totál szén (TC) mennyiséget egy vario MAX cube CNS analizátorban (Elementar Analysen systeme, GmbH, Németország) határoztuk meg száraz égés után.

A TC és a TOC különbségéből kiszámolható az szervetlen szén (IC), ami a legtöbb esetben a talaj CaCO_3 tartalmát foglalja.

Az Oldott Szerves Szén (Dissolved Organic Carbon - DOC) mennyiséget Sharma et al. (2017) által leírt eljárással mértük, 1:10-es szuszpenziót használva. A mintákat 0,01M CaCl_2 oldattal kevertük össze, majd 2 órán át rázókeverőn 40 fordulat/perc sebességgel kevertük. A 5000 fordulat/perc sebességgel történő 10 perc centrifugálást követően a mintákat 0,45 μm -es nylon szűrőn átszűrtük a vízkivonat visszanyerése érdekében. Az oldatok DOC koncentrációját folyékony (liquid) üzemmódban az Elementar Vario TOC cube eszközzel mértük (Németország).

Vizsgáltuk a talajok Labilis-C, vagy másnéven POXC (Permanganate Oxidizable Carbon) tartalmát is Weil et al. (2003) alapján. A felhasznált KMnO_4 koncentrációjának

változása alapján az oxidált szén mennyiségének becslésén alapul. A módszert úgy módosítottuk, hogy 1 g szárított talajt 10 ml 0,02 M KMnO_4 oldatban 5 percig ráztunk, majd centrifugáltunk. 565 nm-en mértük egy Libra S22 UV/VIS spektrofotométerrel (Biochrom Ltd., Anglia). A módszer lényege arra épül, hogy szerves anyagokat rövid ideig kémiai oxidációnak tesszük ki, ki így elsősorban a könnyen oxidálható, labilisebb C vegyületek reagálnak, amiket a mikroorganizmusok is könnyen bontanának, így a jelenleg biológiai körforgásban lévő C vegyületekre utal.

A *glomint* (*Easily extractable glomalin-related soil proteins - EE-GRSP*) az alábbi módon nyertük ki: 1 g mintát 8 ml 20 mM pH 7,0 Na-citrát pufferben mosunk 121 °C-on 30 percig (Wright és Upadhyaya, 1998). Az EEG-GRSP tartalma a Quick Start™ Bradford fehérje assay készlettel (Bio-Rad Laboratories, Hercules, CA, USA) lett meghatározva, az abszorpciót 595 nm-en mérve egy Helios β v4.60 spektrofotométerrel (Thermo Spectronics Fisher Scientific UK).

A humuszminőséget a *Hargitai-féle két oldószeres eljárással* vizsgáltuk (Hargitai, 1955). Mértük a talajok NaOH (0,5 %) és NaF (1 %) oldható szervesanyag-tartalmát 400, 480, 540 és 670 nm-en, majd ezeket átlagoltuk. Ezek, tapasztalatom szerint, önmagukban is értékes információk, de belőlük, továbbá a H %-ból kiszámolhatóak a Hargitai nevéhez köthető $Q = \text{ENaF}/\text{ENaOH}$, és $K = Q/H$ %.

A Hargitai módszer mellett használtuk az *E4/E6* módszert, ahol a 0,5%-os NaOH oldat értékeit vizsgáltuk a 460/660 nm-es tartományban.

A *mikrobiális biomassza szén* (*Microbial Biomass Carbon, MBC*) a talaj mikrobiális közösségében tárolt szerves szén mennyiségét jelenti. Ez a szénfrakció fontos indikátora a talaj mikrobiális aktivitásának és egészségének. Az MBC mérése során a mikroorganizmusokat kloroform-fumigációval tártuk fel, és az így felszabaduló extra szén mennyisége adja az MBC értékét (Vance et al., 1987b).

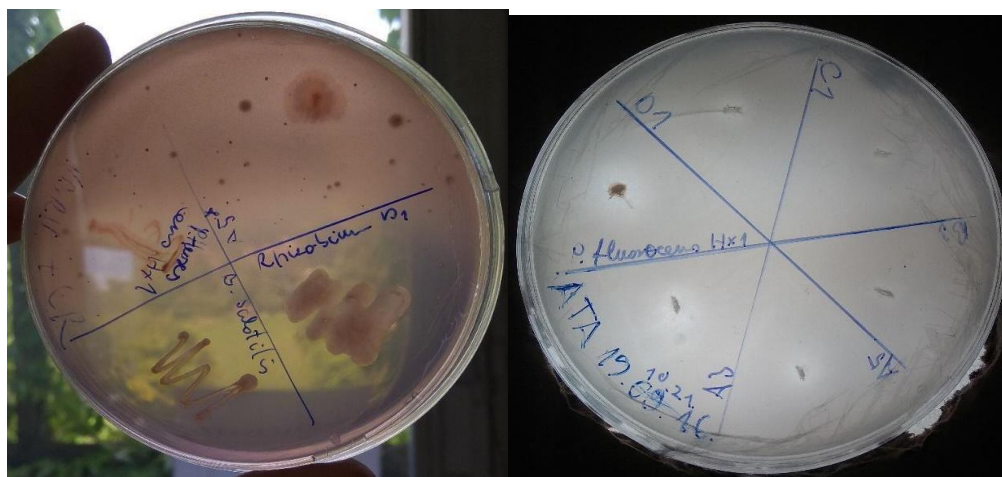
3.3.6 Alkalmazott statisztikai módszerek

Az eredmények feldolgozásához IBM SPSS 25, R 4.3.1., és Excel programcsomagot is használtam. Egy és többutas ANOVA-t, Tukey's post-hoc tesztet alkalmaztunk a faktorok közötti különbségek megállapítására. Ezen túl korrelációs vizsgálatokat is lefolytattunk a különböző vizsgált paraméterek összefüggéseinek a megállapításához. Az ANOVA-hoz normalitás vizsgálatot Kolmogorov-Smirnov tesztel, a szóráshomogenitást Levene-tesztel ellenőriztem. Ha a feltételek nem feleltek meg egyutas Welch-ANOVA-t alkalmaztam, Games-Howell's post-hoc tesztel, amivel nem parametrikusan vizsgálhattuk a faktorokat.

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKEKELÉSÜK

4.1 Mikroorganizmusok izolálása gyakorlati felhasználáshoz

A törzsszelekció első szakaszában vizuális megfigyeléssel vizsgáltuk az egyes mikroorganizmusok táptalajon megjelenő formáit, telepeit és a kifejtődött hatásokat (6. ábra). A KSB-k vizsgálatához, Soroksárról gyűjtöttünk mintákat.



6. ábra. A PSB oldás vizsgálata savtermelésen keresztül. NBRIP+CR táptalajon (balra) és KSB aktivitás vizsgálata Aleksandrow táptalajon (jobbra).

4.1.1 A mikrobák kiválasztása, tisztítása

Bizonyos szelektív táptalajok használatával egy lépésben vált döntő fontosságúvá a telepek növekedése és a táptalajon okozott feltisztulási zónák nagysága (7. ábra). Előbbi mutatja az adott mikroorganizmusok életképességét, utóbbi pedig, hogy arányaiban mennyire hasznos azokra a célokra, amiért izolálni és a gyakorlatban felhasználni, alkalmazni kívánjuk.



7. ábra. A mikroorganizmus telepek növekedésének és feltisztulási zónájának a vizsgálata GYCA táptalajon.

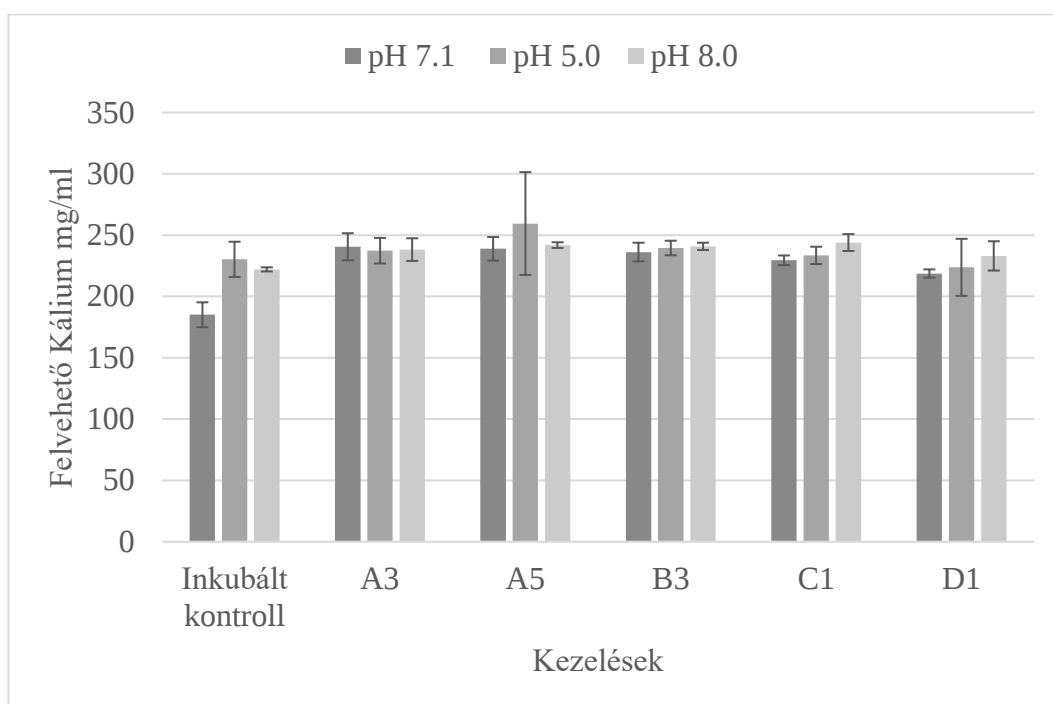
Az alábbi ábrán (8. ábra) egy erős növekedésű, de viszonylag gyenge tápelemfeltáró, N-kötő képességgel rendelkező mikroorganizmus telep látható. A későbbi kísérletekhez izoláltuk, tiszta tenyészetben is előállítottuk ezt a baktériumot a bab gyökérgümőjéből (nitrogénhiányos táptalajon). Látható, hogy a rhizobiumokra jellemző külső nyálka (exopoliszacharid, EPS) termelés jellemzi és a telep morfológiája is jellegzetes, rhizobiumokra jellemző. A későbbi genetikai vizsgálatok azonban nem *Rhizobium* fajnak igazolták, hanem a *Kosakonia cowanii* fajnévhez rendelték hozzá.



8. ábra. D1 - *Kosakonia cowanii* törzsként beazonosított baktérium-telep PSB aktivitásának a vizsgálata GYCA táptalajon

4.1.2 Az izolátumok hatásának igazolása

A szelektálásra az irodalom szerint az Aleksandrow táptalaj (Etesami et al., 2017). A fajokat, a táptalajon történő szelektálás után, folyékony Aleksandrow táplevesben neveltük és lángfotométerrel megmértük a káliumoldó-kapacitásukat különböző pH tartományokban (pH=5,0; 7,1 és 8,0). Főleg a semleges, azaz a 7.1-es pH-n jól kivethető a káliumoldó képességük (9. ábra).



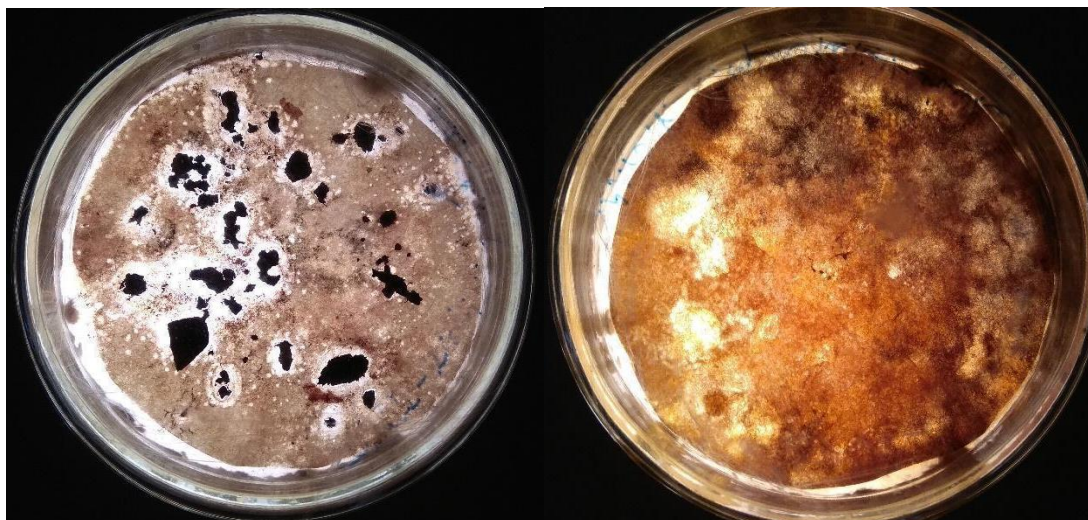
9. ábra. Az izolált törzsek felvehető káliumoldó képességének a vizsgálata lángfotométerrel.

Yaghoubi Khanghahi *et al.* (2018) alapján kevés kutatás van a KSB mikrobák káliumoldó kapacitására a hőmérséklet és pH hatására, így a kutatásunk azzal, hogy különböző pH-n vizsgáltuk ezeket hiánypótlónak tekinthető.

Nem tisztázott pontosan a KSBk hatásmechanizmusa, de több folyamatot is feltételezhetünk ezeknél. Gyakran szerves savakat képeznek, de a táptalajok fémes elemeinek a megkötését (kelációját) is leírták már (Etesami et al, 2017).

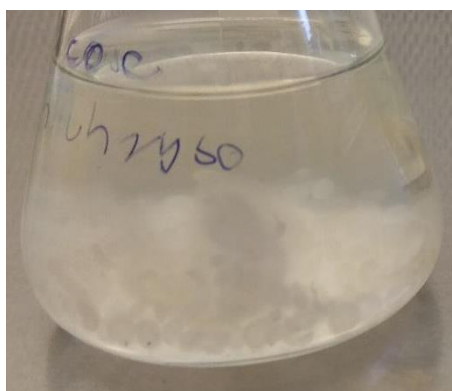
A nitrogénkötő fajokat a javasolt szelektív, N mentes táptalaj, az Ashby agaron történő növekedési képességük alapján vizsgáltuk. Ezek nem jelentenek mennyiség, csak minőségi, jelenléti kimutatásokat.

Elvégeztük a szervesanyag-bontás vizsgálatán keresztül történő izolálást is. Ezt úgy hajtottuk végre, hogy Hutschinson-Clayton féle táplevessel átitatott szűrőpapírra juttattunk komposzt darabokat, valamint oldatot (10. ábra). Az így megjelenő feltisztulási zónák igen látványosak, alkalmasak lehetnek oktatási célokra is.



10. ábra. A szervesanyag-bontás vizsgálata Hutschinson-Clayton féle táplevessel átitatott szűrőpapírra kijuttatott komposzt-szemcsékkel.

Több törzset is sikerült izolálnunk, de később realizáltuk, hogy a komposzt-bontásra izolált gombatörzseket a laborban bevett felszaporítási módokon nem tudjuk tenyészteni és vizsgálni, mivel az egyenletes kijuttatás és utána a tényleges gombasejtszám meghatározása kivitelezhetetlen. A gomba ugyanis összeáll, fragmentálódik mennyiségileg nem azonosítható nagyobb darabokban (11. ábra). Erre a célra ezért a továbbiakban kereskedelmi terméket használtunk, amit vízzel elkeverve lehetett kijuttatni, és ezáltal az ismert csíraszámot be lehetett állítani a Th - *Trichoderma harzianum* T-22-es törzsével.



11. ábra. Szervesanyag bontásra használandó gomba felszaporítása cellulóz poros Hutschinson-Clayton táplevesben. A gomba labdácskákat formázott, így az általunk eltervezett módon nem lehetett egyenletesen kijuttatni, és visszamérni.

4.2 Izolált mikroorganizmusok azonosítása (genetikai elemzés)

Az előzetes tesztek alapján kiválasztottunk néhány mikroorganizmus izolátumot genetikai módon történő beazonosításra (identifikációra). Ezek eredményeit az alábbi táblázat (5.) tartalmazza.

5. táblázat. Az izolátumok genetikai vizsgálata alapján beazonosított fajok és azok %-os valószínűségeinek értékei.

Jelölés	Azonosított mikroba faj	hasonlósági %	Bázispár (bp)
A3	<i>Bacillus coreaensis</i>	98,52 %	1481
A5	<i>Enterobacter ludwigii</i>	99,72 %	1438
B3	<i>Enterobacter tabaci</i>	100,00 %	1079
C1	<i>Lelliottia amnigena</i>	99,44 %	1438
D1	<i>Kosakonia cowanii</i>	99,51 %	1441

Az izolált mikroorganizmusok közül az A5 és a D1 jelűeket választottuk ki további vizsgálatokra az előzetes laboratóriumi megfigyelésinket is figyelembe véve. A kiválasztást, a törzs-szelekciót segítették például a PSB, a nitrogénköti és az EPS tulajdonságok is.

A beazonosított izolátumok (saját törzsek) jellemzése

A3: *Bacillus coreaensis*

Irodalmi adatok alapján Feigl et al. (2023) az Ajkai bauxitos talajból (pH 9,1) izoláltak ilyen baktériumokat, 16S rRNS génjeiket vizsgálva. Ennek során univerzális 27f (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') és 1492r (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') primerekkel amplifikálták és azonosították azokat. Az egyik faj ezek közül a *B. coreaensis* volt. Ehhez a fajhoz sótűrés, xilán-hidrolizáló enzimaktivitás, sziderofor-, és EPS termelés társítható (Chi et al., 2015; Gunasekaran et al., 2022).

A5 *Enterobacter ludwigii*

Az A5-ös (*Enterobacter ludwigii*) izolátum képes volt a kalcium-trifoszfát oldására, valamint a *Fusarium solani* micélium növekedésének és spóracsírázásának gátlására. Az A5 törzs továbbá javította a *Lolium perenne* (angol perje) gyökérzetének fejlődését (Schoebitz et al., 2009). Do et al. (2023) PSB, KSB aktivitást, és antifungális hatást jelentett róla. Az *Enterobacter ludwigii* az *Enterobacter cloacae* komplexumhoz tartozik, amelyről ismert, hogy humán patogéneket is tartalmazhat, de vannak növényekkel asszociált törzsei is, amelyek jótékony hatással vannak a növényekre. Az *E. ludwigii* törzsek hatékonyan kolonizálták a

növényeket nem steril talajkörnyezetben (Dolkar et al., 2018). Az *E. ludwigii* törzsek hatékonyan fejezték ki az alkánlebontó géneket a növényekben. Az *E. ludwigii* hatékonyan bontotta le az alkán szennyeződések és elősegítette a növénynövekedést.

Az *E. ludwigii* hatékonyabban lépett kölcsönhatásba az olasz perjével, mint más növényekkel. A lebontási aktivitás változott a növényi és mikrobiális genotípusok, valamint az idő függvényében (Schoebitz et al., 2009). Hőmérséklet-, pH- és sótoleráns *Enterobacter ludwigii* PS1 izolátumot azonosítottak. A PS1 növekedésserkentő tulajdonságokat mutatott (IAA, sziderofor és HCN termelés). A magok inokulációját és a palántakezelést vizsgálták paradicsomon. A magok inokulációja 25 %-os növekedést eredményezett a hajtás és 37 %-os növekedést a gyökér hosszában. Az *E. ludwigii* kezelés 15 %-kal több gyümölchozamot eredményezett nyílt, és 27 %-kal hálóval fedett körülmények között (Dolkar et al., 2018). A PGPR inokuláció javította a növekedést és a fotoszintetikus pigmentek mennyiségét cink (Zn) stressz alatt. A PGPR inokuláció fokozta a kompatibilis oldatokat, az úgynevezett 'ozmolitok' mennyiségét a cink stresszelt növényekben. A GC-MS analízis kimutatta, hogy az *E. ludwigii* túlélőképes a cink stressz alatt. A Zn koncentrációja magasabb volt az *E. ludwigii*-vel inokulált növényekben, ami illusztrálja a Zn mobilizálásának képességét. Az *E. ludwigii* ideális jelölt lehet fitoremediációs célokra (Singh, et al., 2018).

B3 *Enterobacter tabaci*

Az *Enterobacter tabaci* 4M9 (CCB-MBL 5004)-ről beszámoltak, hogy növekedésserkentő és nehézfém-tűrő tulajdonságokkal rendelkezik. Több mint 300 mg/L kadmiumot (Cd), 600 mg/L arzént (As) és 500 mg/L ólmot (Pb) képes tolerálni, miközben megőrzi a növekedésserkentő anyagok termelésének képességét fémstressz-körülmények között is. Ezeknek a PGPR tulajdonságoknak a genetikai alapjainak feltárása érdekében a 4M9 teljes genomjának szekvenálását elvégezték a Pacific Bioscience (PacBio) szekvenálási technológia alkalmazásával. A teljes genom egy 4 654 430 bp hosszúságú kromoszómából állt, 54,6 %-os GC-tartalommal, valamint egy 51 135 bp hosszúságú plazmidből 49,4 %-os GC-tartalommal. A genom annotáció számos, a növekedésserkentő tulajdonságokkal kapcsolatos gént tárt fel, beleértve a sziderofor, az indolecetsav és az 1-aminociklopropán-1-karbonsav-dezamináz termelését; a foszfát és kálium oldását; valamint a nitrogén anyagcserét. Hasonlóképpen, a nehézfémek (As, Co, Zn, Cu, Mn, Se, Cd, és Fe) toleranciájával kapcsolatos géneket is kimutattak. Ezek alátámasztják annak potenciálját, mint nehézfém-tűrő növekedésserkentő baktérium, és mint jó genetikai forrás, amely biotechnológiai technikákkal alkalmazható a nehézfém-szennyezett talajok fitoremediációs hatékonyságának javítására

(Abdullahi et al., 2021). Valamint biokontroll tulajdonságokat írtak le róla padlizsán esetén (Abdul Malek et al. 2023).

C1 *Lelliottia amnigena*

Az irodalom szerint a C1 törzs rendelkezik néhány in vitro növekedésserkentő mechanizmussal: foszfát oldása (PSB), ACC-dezamináz aktivitás, sziderofor és/vagy indolecetsav (IAA) termelés. Az izolált (C1 törzs) *Lelliottia amnigena* (korábban *Enterobacter amnigenus*) törzs olyan fajhoz tartozik, amely patogén lehet (Menéndez et al., 2016).

D1: *Kosakonia cowanii*

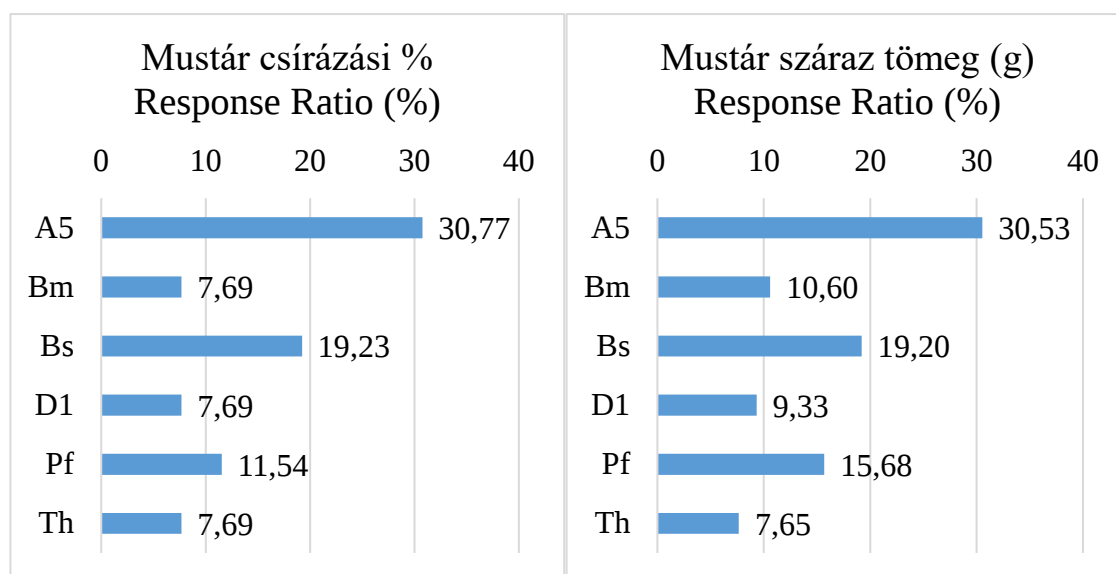
A *Kosakonia cowanii* korábbi neve *Enterobacter cowanii* volt, de újra-vizsgálatok alapján átnevezésre került (Brady et al., 2013). Mind a *Kosakonia*, mind az *Enterobacter* genuson belül több fajról írtak le PGPR hatást, és nitrogén kötő képességeket. A *Kosakonia radicincitans* N₂-fixációs aktivitást, hormon-termelést, IAA abscizinsav szerű vegyület kibocsátást, sziderofor termelési- és foszfátoldási képességet is mutatott (Menéndez et al., 2016). Az *Enterobacter sacchari* egy új faj, amelyet cukornáddal (*Saccharum officinarum* L.) asszociált nitrogénkötő baktériumként nevezték el (Zhu et al., 2013; Lin 2012).

4.3 Az izolált és később alkalmazandó mikroorganizmusainak hatásának vizsgálata csíratesztekkel, fehér mustár (*Sinapis alba*) és angolperje (*Lolium perenne*) tesztnövényekkel

4.3.1 A csírázási százalék és a csíranövény növekedése

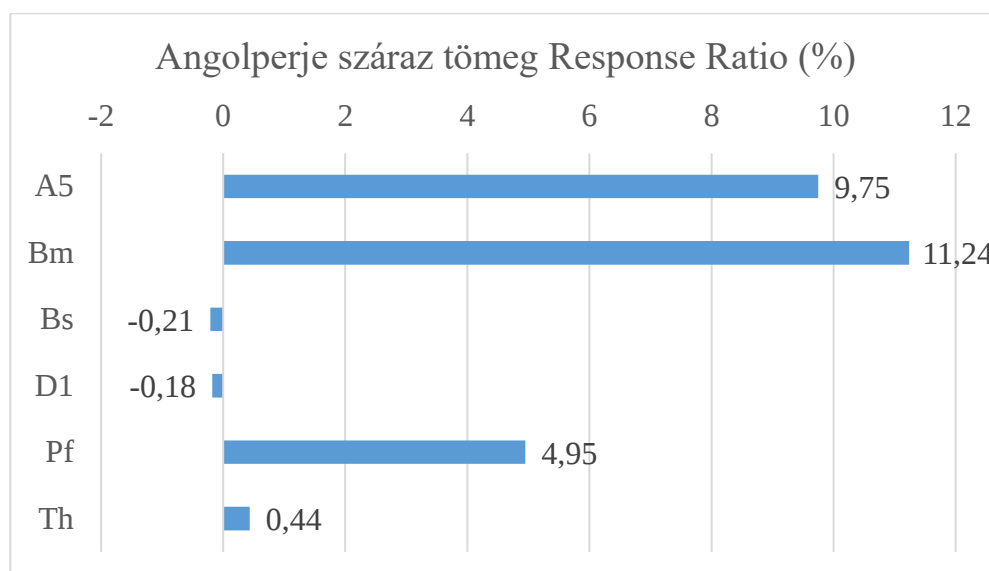
A PGPM törzsek vizsgálati és szelekciós kísérlete során magasabb növekedési paramétereket figyeltünk meg a mikrobiális törzsek hatására a kontrollhoz képest.

A mustár tesztnövényénél nem szignifikánsan, de magasabb értékeket kaptunk a kontrollhoz viszonyítva a növény-tulajdonságokra (kivéve a mustárnövények hosszát) vonatkoztatva minden vizsgált törzs esetén. A legmagasabb értékkel (+30 % a csírázásra és a biomasszára) az A5: *Enterobacter ludwigii* rendelkezett (12. ábra). A mustár csírázási %-as és a keletkezett biomassza erősen összefügg. Ez alapján nem feltétlenül volt érdemi hatása a biomasszára a törzseknek, hanem csak a csírázást serkentették nagyban, és ezt mértük vissza biomassza növekményként. Az irodalom hiányos a mustármag PGPM tesztekkel, de más növényeknél is hasonlóan tapasztaltak a PGPM oltások hatására, ahol Minut et al., (2023) a mustár mellett vizsgálták a következő fajokat: *Brassica napus* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Linum usitatissimum* L., *Panicum miliaceum* L. és *Rumex patientia* L.).



12. ábra. Az mustárnövény csírázási %-a, és a száraz tömegének %-os változása a kezelések hatására a kontrollhoz viszonyított "response ratio" (RR) értékek az oltások hatására: A5 - *Enterobacter ludwigii*, Bm - *Bacillus megaterium*, Bs - *Bacillus subtilis*, D1 - *Kosakonia cowanii*, Pf - *Pseudomonas fluorescens*, Th - *Trichoderma harzianum*

Hasonló következtetésre juthatunk az angolperje teszt növényénél is. Nincs szignifikáns különbség a kapott eredményekben, de a kontrollal szemben minden kezelés nagyobb biomasszával rendelkezett, kivéve a D1: *Kosakonia cowanii* és a Bs: *Bacillus subtilis* kezelést. Ez jelezheti azt, hogy a baktérium törzsek, és a célnövény között interakció áll fenn, és nem általános, minden növényfajra kiterjedő a pozitív PGP hatásuk. A legnagyobb különbség az A5: *Enterobacter ludwigii* (RR = +9,75 %) és a Bm: *Bacillus megaterium* (RR=11,24 %) mutatta a legnagyobb növekedést a kontrollhoz képest (13. ábra). Nem találtunk olyan szakirodalmat, amely kifejezetten az *Enterobacter ludwigii* inokulációt tárgyalná a *Lolium perenne* esetében. Azonban Zaballa et al. (2020) beszámoltak arról, hogy ez a baktérium pozitív hatást gyakorolt az árpa biomasszájára, és izolálták angolperjéből is.



13. ábra. Az angolperje száraztömegének %-os változása a kezelések a kontrollhoz viszonyított "response ratio" (RR) értékek az oltások hatására: A5 - *Enterobacter ludwigii*, Bm - *Bacillus megaterium*, Bs – *Bacillus subtilis*, D1 - *Kosakonia cowanii*, Pf – *Pseudomonas fluorescens*, Th - *Trichoderma harzianum*

A hajtáshosszról ugyanaz mondható el, mint a biomasszáról, de a D1 mellett a Th kezelés is rövidebb, kisebb csíranövényeket eredményezett (2. melléklet). A *Trichoderma harzianum* (Th) mikroszkopikus gomba az irodalmi adatok szerint is inkább biokontroll tulajdonságú, így főleg a növény védelmére és csak közvetve a termés növelésére szolgál (Abdel-Fattah et al., 2007; Haddadin et al., 2009).

Az bővebb adatokat (a nem ábrázoltakkal együtt) a 2. melléklet tartalmazza.

4.3.2 Az alkalmazott mikroorganizmus törzsek hatása a talajok enzim-aktivitására

A talaj FDA enzimaktivitását vizsgáltuk a mustár növény esetében, ezt a 14. ábrán tüntettük fel. A kontrollhoz viszonyítva minden esetben magasabb értéket kaptunk, tehát a kezelések hatására nagyobb biológiai működőképességet tudtunk kimutatni. Ez alól kivétel a D1-es baktérium-kezelés volt.

Az FDA enzimaktivitás és a mért növényi tulajdonságok korrelációs analízisét is elvégeztük. Megállapítottuk, hogy az FDA általában pozitív korrelációt mutatott az összes mért növényi paraméterrel, kivéve a mustár hajtások hosszát, ami további vizsgálatokat igényel. De az eredmények statisztikailag nem voltak igazolhatóak, mivel a kevés talajmennyiség miatt pusztán tájékoztató jellegű átlagmintákat-képeztünk kezelésként az FDA méréshez.

A teszt növényenél a hajtáshossz mérések kerültek a leginkább közel a szignifikánsan is igazolható hatásokhoz, ami megerősíti a tesztelés eredményét és lehetőségét (6. táblázat)



14. ábra. FDA aktivitás a kezelések hatására: A5 - *Enterobacter ludwigii*, Bm - *Bacillus megaterium*, Bs – *Bacillus subtilis*, D1 - *Kosakonia cowanii*, Pf – *Pseudomonas fluorescens*, Th - *Trichoderma harzianum*. (A mérések átlag talajmintákból lettek elvégezve tájékoztató jelleggel, így nem végezhető el rájuk statisztikai analízis, nincs szórás.)

6. táblázat. FDA korrelációja a mustár növény mért paramétereivel

	r	P-value
Kicsírázott magok/sejt	0,3087	0,5005
Nedves tömeg (g/sejt)	0,3622	0,4247
Száraz tömeg (g/sejt)	0,3657	0,4199
Hossz átlag (mm/sejt)	-0,5497	0,2012

Az itt bemutatott kísérletekben kis-léptékű vizsgálatokkal, a tenyészedény kísérleteket megelőzően különböző PGPR fajok hatását hasonlítottuk össze. A vizsgálatokhoz mustár és perje csíranövényeket használtunk. A legtöbb esetben pozitív eredményeket értünk el a kezelések hatására. A legígéretesebb törzsek az eredmények alapján a mustármag csírázására az A5 - *Enterobacter ludwigii* és a Pf - *Pseudomonas fluorescens* baktériumok voltak. A mustár biomasszára az *Enterobacter ludwigii*, a *Bacillus megaterium* és Bs - *B. subtilis*, valamint a Pf - *Pseudomonas fluorescens* voltak a legjobbak. A mustár hajtáshosszra a Bm - *Bacillus megaterium* és a D1 - *Kosakonia cowanii* volt a legkedvezőbb.

A perje biomasszát az A5 - *Enterobacter ludwigii* és a Bm - *Bacillus megaterium* növelte a leginkább. A perje hajtáshosszát pedig az A5 - *Enterobacter ludwigii*, a Bm - *Bacillus megaterium* és Bs - *B. subtilis*, valamint a Pf - *Pseudomonas fluorescens* növelte. Az FDA vizsgálatoknál a két *Bacillus* faj teljesítményét kell kiemelni. A korreláció-regressziós vizsgálatok alapján a legtöbb eredmény pozitívan korrelált a kapott FDA adatokkal.

Eredményeink alapján a növényrel szoros kapcsolatra, és így akár az endoszimbionta „együttélésre” is képes mikroorganizmusok (az A5 - *Enterobacter ludwigii* és a Pf - *Pseudomonas fluorescens*) előnyei is körvonalazódtak (Pabar et al., 2024).

A csíranövények kezdeti növekedéséhez az endofita mikroorganizmusok jelenthetnek nagyobb támogatást (Mahdi et al., 2021). A leginkább a rhizoszférában és a gyökérhez kapcsolódó talajban működőképes *Bacillus* fajoknál ugyanakkor a talajok nagyobb enzimaktivitási értékei emelhetők ki, így azok a tápanyagok mobilizálásán keresztül fejthetik ki pozitív hatásukat a növényi növekedésre (Ahmad et al., 2019).

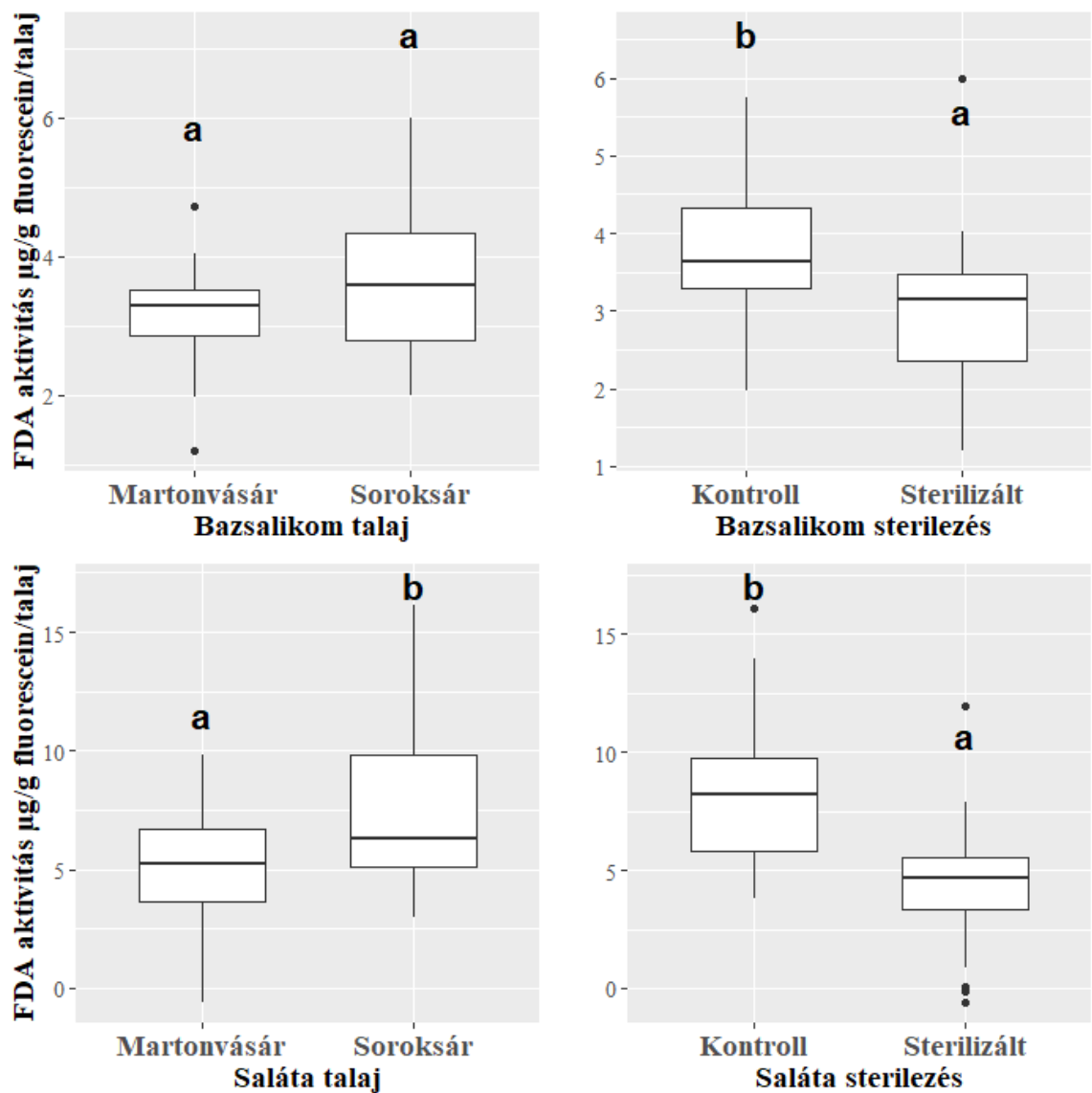
4.4 A talajsterilizálás és az alginit alkalmazásának hatása mikrobiálisoltás sikerességére

4.4.1 A kezelések hatása a talajbiológiai aktivitására

Az FDA-t vizsgáltuk mindkét növény talajában. A növények között szignifikáns különbség látható az FDA aktivitást illetően ($F(1, 90) = 48.003$, $p < 0.001$), ahol a saláta talaja rendelkezett magasabb talajbiológiai aktivitással.

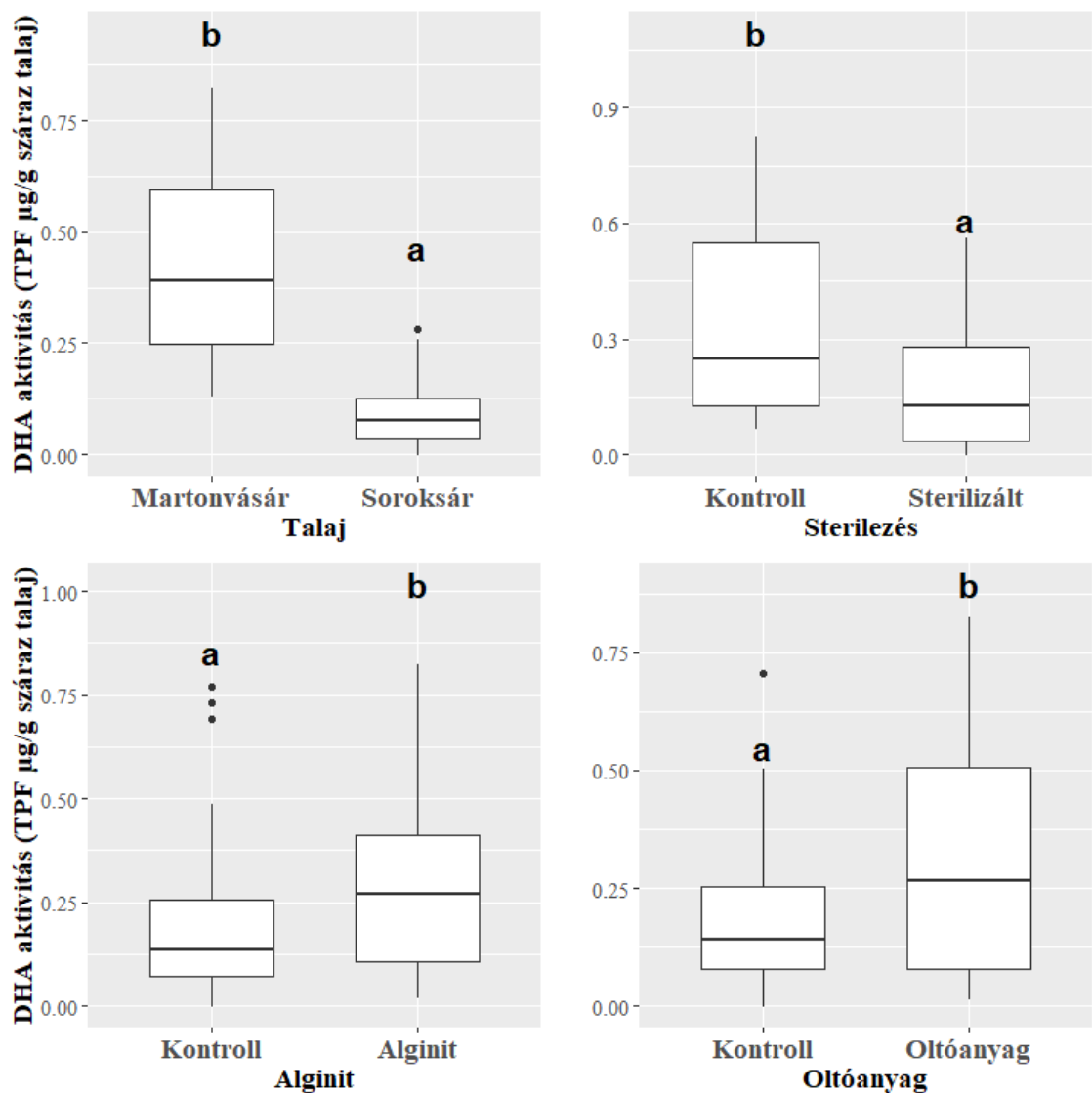
A többi paramétert növényeként külön vizsgáltuk. A talajok közötti különbség csak a salátával lett szignifikáns ($F(1, 43) = 17.804$, $p < 0.001$), ahol a martonvásári talaj adott magasabb értéket.

A sterilizálás mindkét növénynél, így a bazsalikom és a saláta esetében is szignifikánsan alacsonyabb FDA enzimaktivitásokat mértünk a talajokban (Bazsalikom ($F(1, 43) = 7.403$, $p < 0.01$); Saláta ($F(1, 43) = 30.147$, $p < 0.001$)). (15. ábra). A többi faktor esetében nem állapítottunk meg szignifikáns különbségeket.



15. ábra. A talaj FDA aktivitása a különböző növények, talajok és a talaj sterilizálásának hatására.

A *DHA*-t csak a bazzalikom növény talajában vizsgáltuk, ott viszont a bazzalikom minden faktorra szignifikáns eredményt adott. A talajok közül a martonvásári talaj eredménye bizonyult magasabbnak ($F(1, 43) = 90.563$, $p < 0.001$). A talaj sterilizálása után a kontroll mutatott magasabb *DHA* értékeket ($F(1, 43) = 24.267$, $p < 0.001$). Az alginit bekeverésével is magasabb értékek mutatkoztak ($F(1, 43) = 4.896$, $p < 0.05$). Az alginitnek a talaj enzimaktivitására gyakorolt hatását más még nem vizsgálta ilyen rendszerben, információink szerint. Az oltóanyag hatására is nagyobb enzimaktivitás értékeket mértünk ($F(1, 43) = 12.821$, $p < 0.001$) (16. ábra), amit Bayraklı (2022) kutatásai is megerősítettek.



16. ábra. Kétféle talaj DHA aktivitásának alakulása a bazsalikom növénynél a talaj-sterilizálás hatására.

A mikroorganizmusok számát mindkét növény esetében vizsgáltuk. Az eredményeket logaritmikusan transzformáltuk.

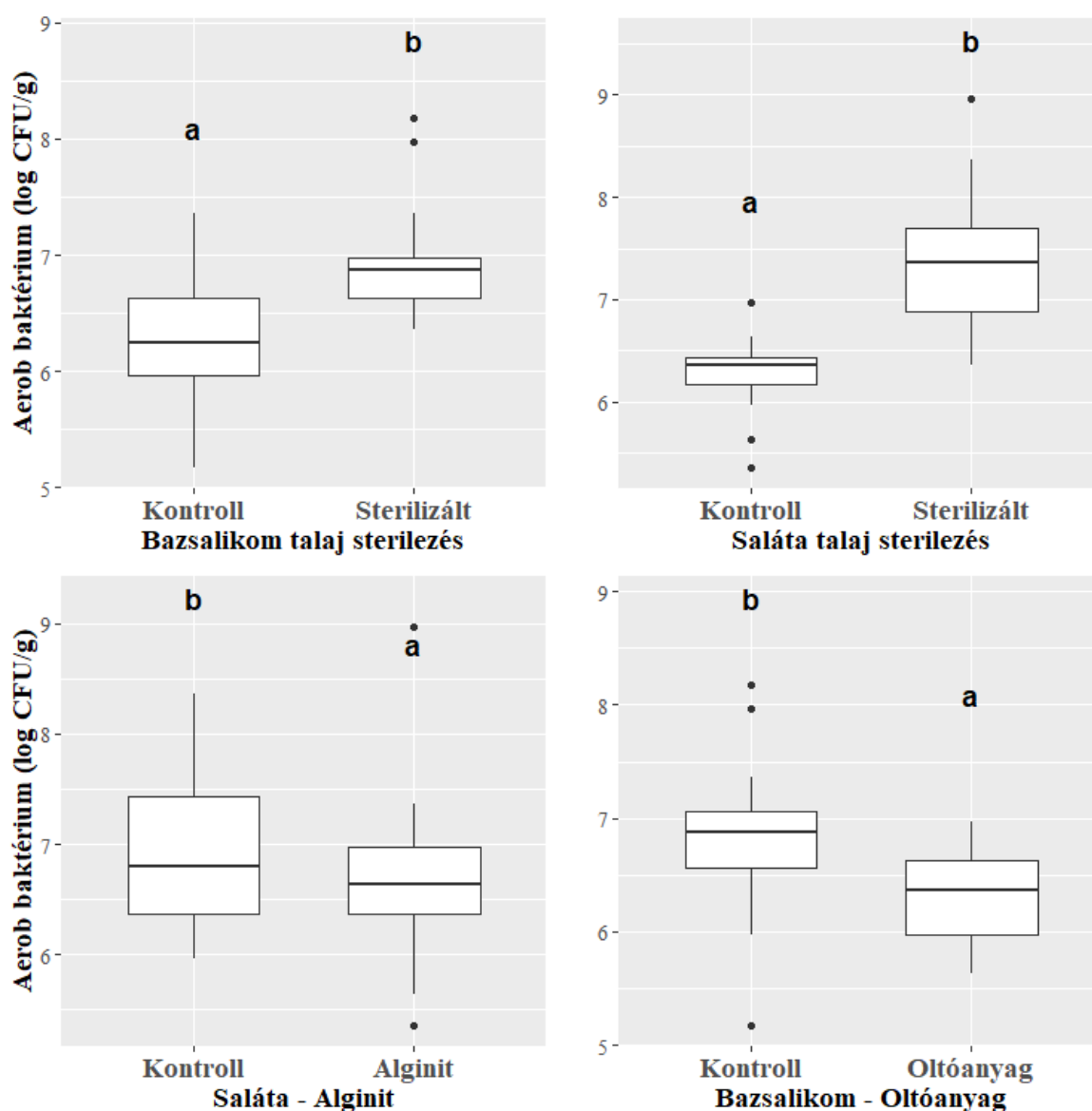
A növények között szignifikáns különbség látható az *aerob baktériumok* (log CFU/g) értékek között ($F(1, 90) = 5.053$, $p < 0.05$), ahol a saláta rendelkezett magasabb aerob számokkal.

A többi faktort növényeként külön vizsgáltuk.

A sterilizálás azonban mindkét növénynél szignifikánsnak bizonyult. A bazsalikomnál ($F(1, 43) = 32.453$, $p < 0.001$), a salátánál pedig ($F(1, 43) = 51.191$, $p < 0.001$). Mindkét növény esetében a sterilizálás növelte a talajban található aerob mikroorganizmusainak a számát a sterilizálástól számított 4. héten.

A kezelés csak a saláta esetében lett szignifikáns ($F(1, 43) = 4.464, p < 0.05$). A oltóanyag kezelés viszont csak a bazsalikomnál adott szignifikáns eredményt ($F(1, 43) = 15.518, p < 0.001$) (17. ábra).

A többi faktor nem bizonyult szignifikánsnak, így sem az az alginites kezelés, sem pedig a talajok között nem volt szignifikáns különbség egyik növénynél sem.

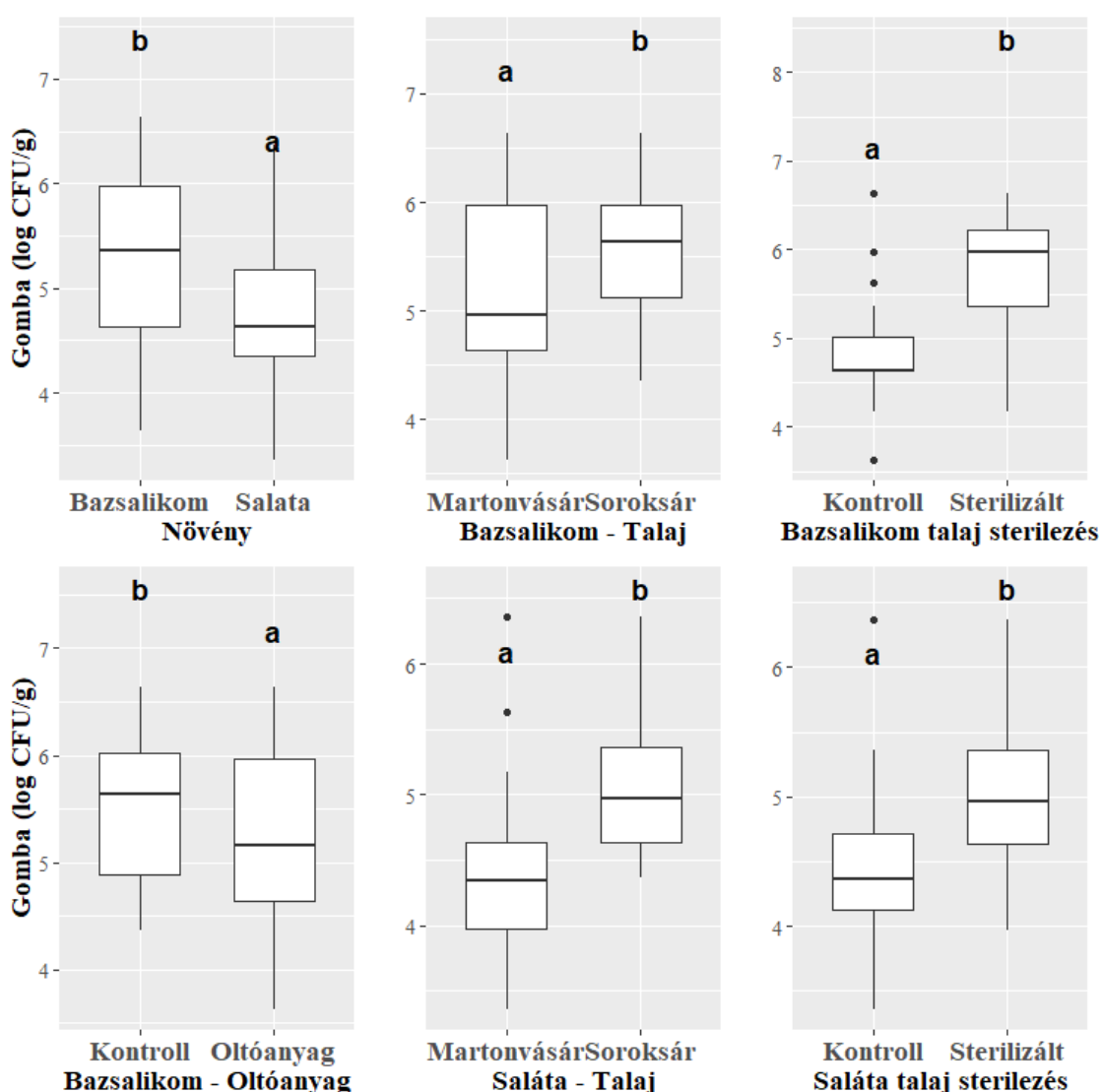


17. ábra. Az Aerob baktériumok (log CFU/g) sejtszámai a talajok sterilizálása, alginit kezelése és az oltóanyagok hatására.

A növényeket vizsgálva, szignifikánsan magasabb értékeket a bazsalikom növények mutattak a *kitenyészhető gomba sejtszám* (log CFU/g) értékeinél ($F(1, 90) = 5.053, p < 0.001$).

A többi vizsgált faktort növényeként külön-külön értékeltem ki.

A bazsalikomnál a soroksári talaj szignifikánsan magasabb értékeket mutatott a talaj kitenyészthető mikroszkopikus gombaszáma ($F(1, 43) = 6.250, p < 0.05$), úgyszintén a saláta növénynél ($F(1, 43) = 14.010, p < 0.001$) is. A talajok sterilizálása mindkét növény hatására szignifikáns értékeket adott. A bazsalikomnál ($F(1, 43) = 40.674, p < 0.001$), a salátánál pedig ($F(1, 43) = 11.418, p < 0.01$). Mindkét növény esetében a sterilizálás növelte a talajban található mikroszkopikus gombák sejtszámát a sterilizálástól számított 4. héten. A alginit kezelésnek nem, az oltóanyagnak viszont a bazsalikomnál szignifikáns eredménye adódott ($F(1, 43) = 6.250, p < 0.05$). (18. ábra)



18. ábra. A mikroszkopikus gombák log (CFU) értékei a talajokban, a különböző növények, a talajok és a talaj-sterilizálás, valamint az oltóanyag hatására. Jelölések: NS-nem sterilizált (kontroll), S-sterilizált, NO-nincs oltóanyag (kontroll), O-oltóanyaggal kezelve.

A két vizsgált növény között szignifikáns különbség volt kimutatható a kitenyészthető spórás baktérium számában (log CFU/g), ahol a bazsalikom talajából több spórás baktériumot mutattunk ki ($F(1, 90) = 4.047, p < 0.05$).

A többi faktort (alginit, oltóanyag, sterilizálás) növényenként külön vizsgáltuk, de azok nem mutattak szignifikáns különbségeket.

Összefoglalva, a sterilizálás jelentősen befolyásolta a mikroorganizmusok élő sejtszámait és a talaj enzimaktivitását. A sterilizálás során elpusztultak a talajban eredetileg jelen lévő mikroorganizmusok, de az üres életteret a levegőből érkező és a növények átültetésével bevitt mikrobák gyorsan kolonizálták. Négy héttel az ültetés után a sterilizált talajban is kimutatható volt a mikrobiális jelenlét, és a mikrobák száma még magasabb is lett, mint a nem steril körülmények között. Ezzel, viszont nem tudtak lépést tartani a vizsgált enzimaktivitások. Ennek oka az lehet, hogy az extracelluláris enzimek lényegében megsemmisültek, és ezek pótlásához több idő kellhet (Pabar et al., 2018).

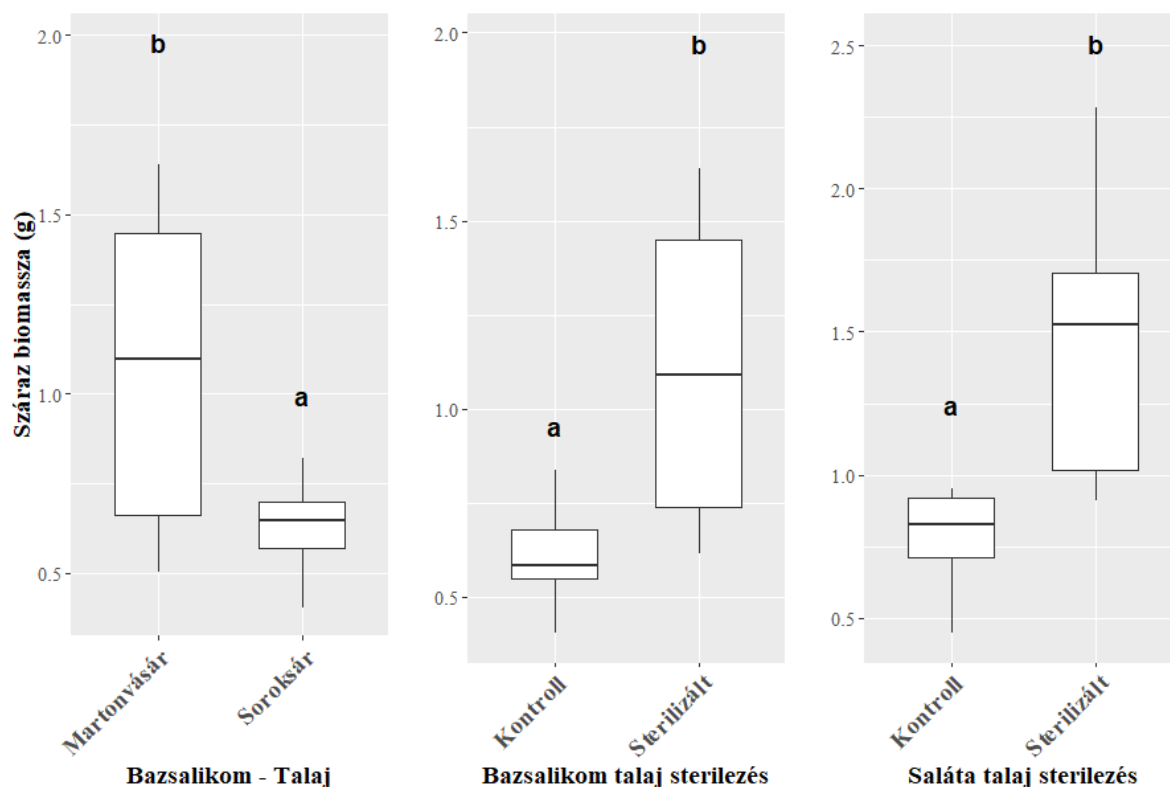
Az alginit kezelés nem volt szignifikáns hatással sem a talaj DHA enzim aktivitására, sem pedig annak a mikroorganizmus abundanciájára.

Az, hogy a *B. megaterium*mal való inokuláció csökkentette a kitenyészthető aerob baktériumok, és a mikroszkopikus gombák számát, ellentétes az irodalmi adatokkal (Zhao et al., 2021), ahol az oltás növelte az oltott mikroorganizmusok abundanciáját, de meg is változtatta a mikroorganizmus közösség összetételét. Az is lehetséges, hogy a *B. megaterium* átvette az élettér egy részét, ez pedig a vizsgált abundancia értékek csökkenésében mutatkozik meg, de mikrobiális biomassza állandó maradt a talajban, mivel a *B. megaterium* sejtmérete nagyobb a többi *Bacillus* fajéhoz képest (innen a neve). Ezért nőhetett a DHA enzim aktivitása az oltás során. De ennek a megállapításához, direktebb mikrobiális biomassza vizsgálatok lennének szükségesek.

4.4.2 Növényi biomassza értékek

Növényenként vizsgáltuk a száraz biomassza tömegek alakulását. A bazsalikomnál a martonvásári talaj szignifikánsan magasabb értékeket mutatott ($F(1, 43) = 15.161, p < 0.01$). A sterilizálás mindkét növénynél szignifikáns különbségeket eredményezett. A bazsalikom esetében ($F(1, 43) = 19.793, p < 0.001$), a salátánál pedig ($F(1, 43) = 11.604, p < 0.01$). Mindkét növénynél a talaj-sterilizálásának hatására növekedett a növények száraz biomassza-tömege. Ennek oka a feltáródott plusz tápanyagok lehetnek, ami egyezést mutat a fellelhető szakirodalmi

adatokkal (Mahmood et al., 2014). A növényi száraz biomaszatömegre nem volt hatása az alginites kezelésnek sem az oltóanyagnak, és még kölcsönhatást interakciót sem találtunk (19. ábra).



19. ábra. A növények száraz biomasza tömege (g) a különböző talajok esetén és a talajsterilizálás hatására.

4.5 Mikrobiális törzskeverékek hatásának vizsgálata mezőgazdasági talajokon, bokorbab és csemegekukorica teszt növényekkel tenyésztéskísérletben

Növényenként értékeltem a vizsgált paramétereket és faktorok rájuk gyakorolt hatását. Vizsgáltuk az interakciót az oltóanyag és a talajok között, hogy fennáll-e, talajfüggő oltóanyag hatás.

Az alginit hatását csak a két legkülönbözőbb textúrájú talajon vizsgáltam, a Soroksár 1 meszes homoktalajon, és a Szeghalom nehéz, kötött agyagos talaján. Ezeknél vizsgáltuk az interakciót az alginit, a talajok és az oltóanyag között.

4.5.1 Talajbiológiai eredmények vizsgálatának az eredménye a különböző talajok, és alginites kezelés összehasonlítására

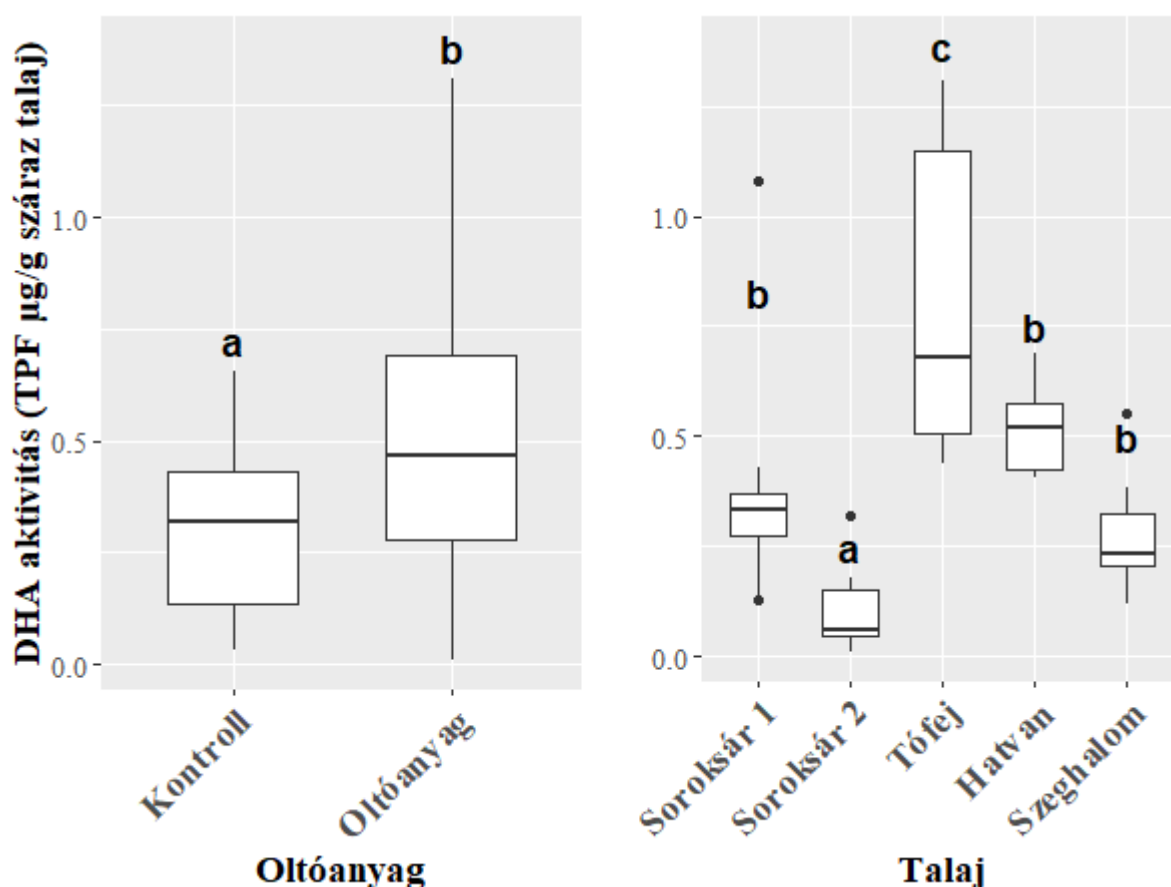
A talajok között a bab ($F(4,34) = 14.75$, $p < 0.001$) és a kukorica ($F(4,34) = 11.347$, $p < 0.001$) esetén is szignifikáns különbség volt a *DHA* esetében. A talajok közötti dehidrogenáz

enzim különbséget alátámasztja az irodalom. Telesiński et al. (2019) megállapították, hogy a DHA jelentősen eltér a különböző talajtípusok között. Ennek oka lehet a kolloid tartalom, ami befolyásolja a talaj víz- és hőháztartását, valamint a pH. Ezek pedig nagyban befolyásolják a mikroorganizmusok biológiai aktivitását, így az enzimaktivitást is.

Az oltóanyag hatása is szignifikánsnak bizonyult a babnál ($F(1,34) = 14.18$, $p < 0.001$), magasabb értékeket adott az oltóanyag. Abou-Zeid (2019) szignifikáns különbségekről számolt be a DHA aktivitásában a PGPR baktériumokkal történő oltás következtében. A kukorica tesztnövény esetében nem tudtunk szignifikáns különbségeket kimutatni.

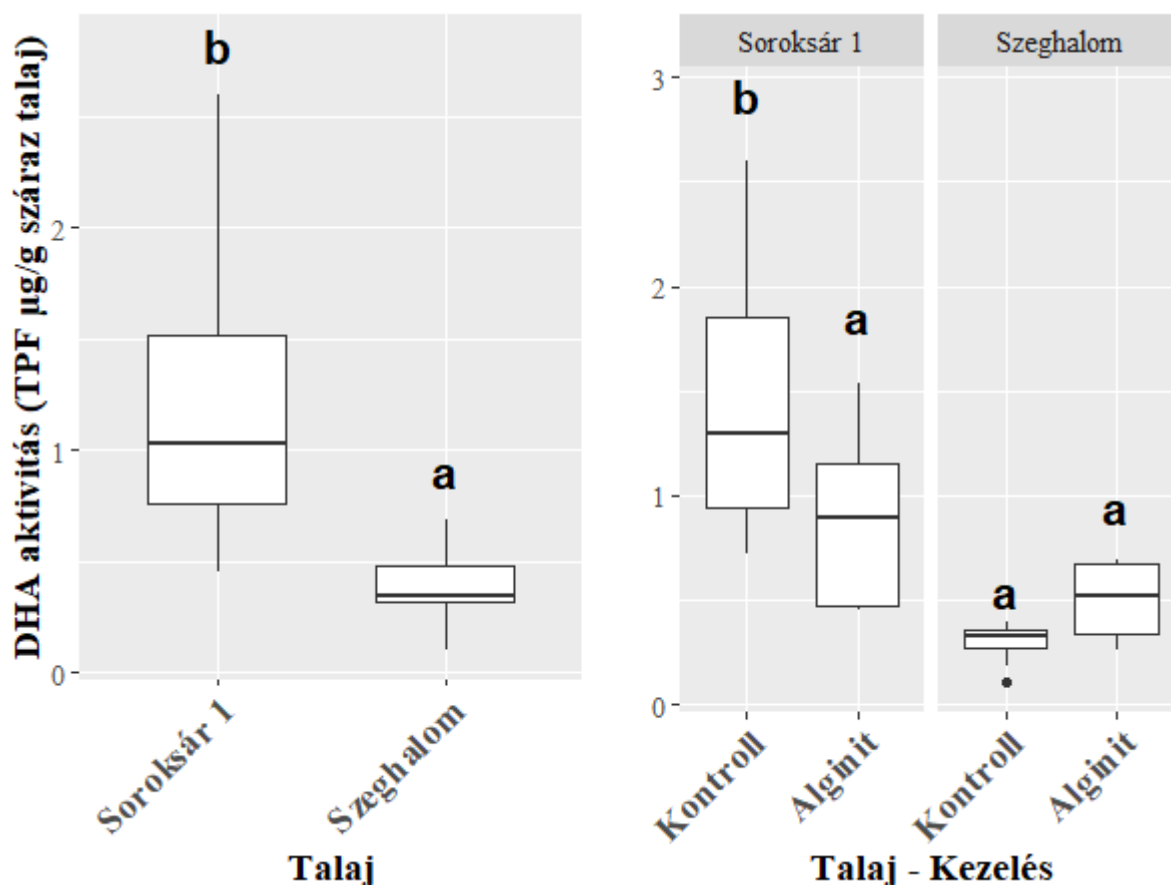
A bab növény esetében volt interakció hatás a talajok és az oltóanyag között. A Tófej talajon az oltóanyag kezelés szignifikánsan magasabb dehidrogenáz enzimaktivitást mutatott ($F(4,34) = 3.194$, $p < 0.05$).

A fenti eredményekről csak a babra vonatkozó eredményeket prezentálom ábrával, mivel a babnál és a kukoricánál is ugyanaz a mintázat áll fenn a talajokra vonatkozóan (20. ábra).



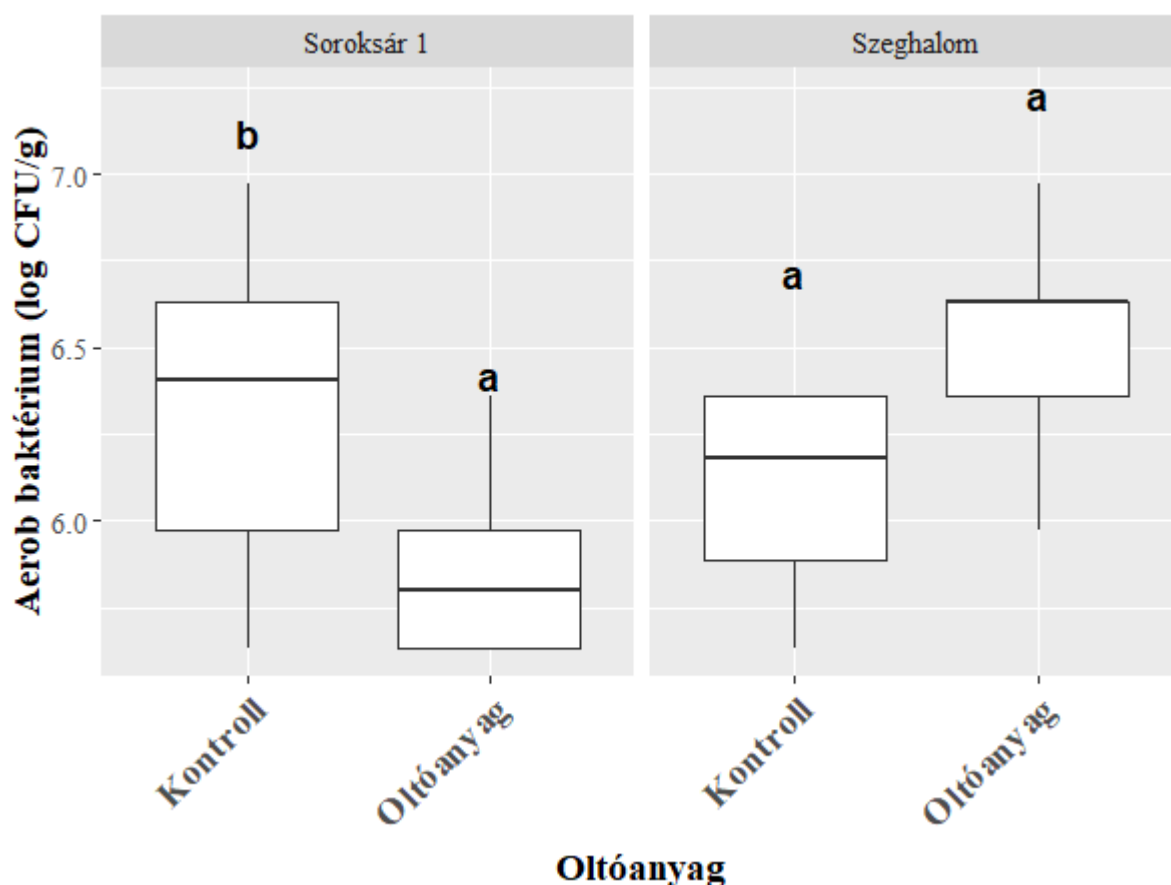
20. ábra. DHA értékek alakulása a kombinált oltóanyag és a különböző talajok esetében a bab növénynél.

Az alginit szignifikáns hatása kukorica tesztnövényénél igazolódott, így a Soroksár 1 talajnál magasabb DHA értéket ($F(1,24) = 32.506$, $p < 0.001$) és az alginit-talaj interakciót eredményezett. A kezelés emellett ezzel egy időben a kontrolltól alacsonyabb DHA aktivitást okozott ($F(1,24) = 7.577$, $p < 0.05$) (21. ábra).



21. ábra. A DHA értékek alakulása az oltóanyag és a különböző talajok esetében alginittel kezelve a kukorica növényénél.

Az *aerob baktériumok* abundanciájára egyik faktor hatására se tudtunk kimutatni szignifikáns különbségeket. De interakcióhatás állt fenn a bab növényénél a Soroksár1 talajon az oltóanyaggal, ahol szignifikánsan alacsonyabb aerob baktérium számot eredményezett az oltás ($F(1,24) = 12.518$, $p < 0.01$) (22. ábra), vagyis az oltás hatása talajfüggő volt, az alginites (és kontrolljaik) értékelésekor, az oltóanyag hatására. Tudomásunk szerint egyetlen tanulmány sem vizsgálta a talajtípus és az oltásnak a talajban lévő baktériumszámra gyakorolt hatását, az alginites kezelések mellett.

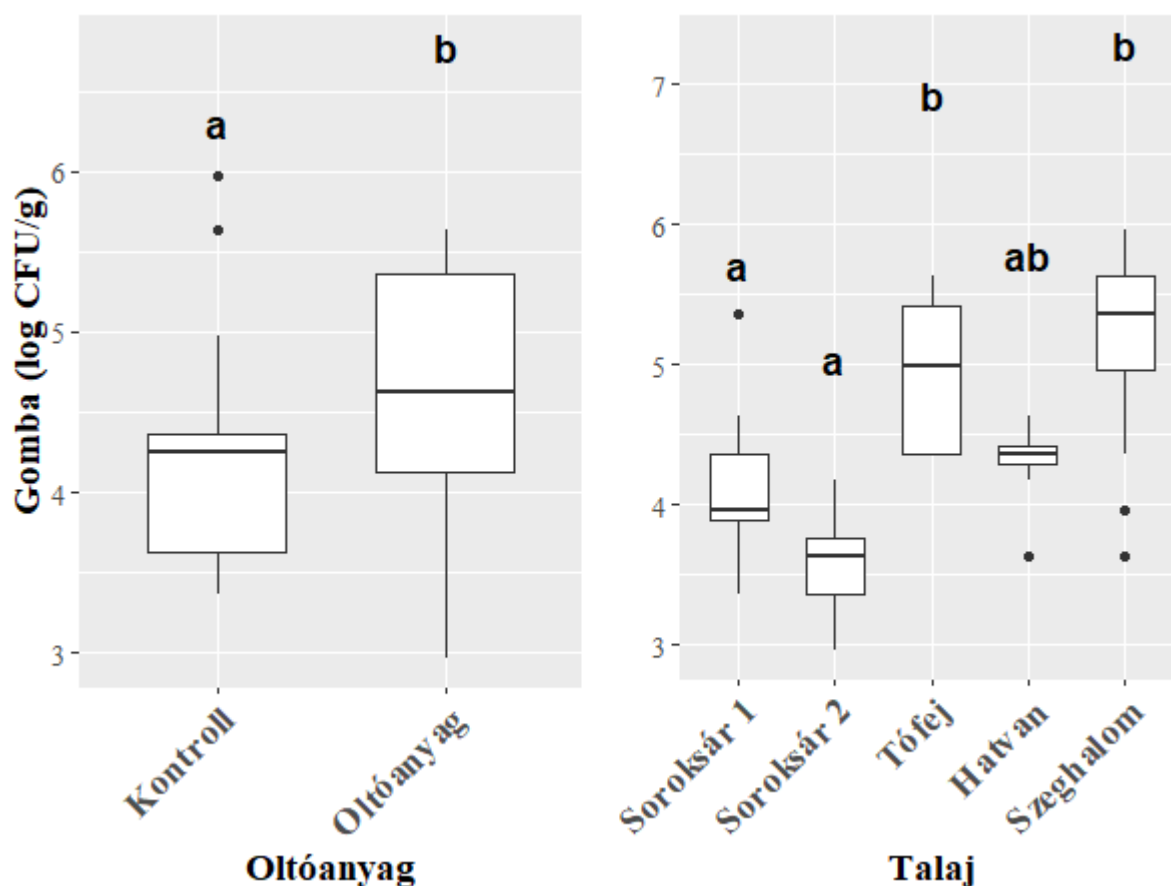


22. ábra. Az aerob baktériumok (log CFU/g) mennyiségének alakulása a különböző talajok esetében az oltóanyag kezelés hatására a bab növénynél.

A kitenyészthető gomba (log CFU/g) mennyiségére, a bab növénynél a talajok is ($F(4,34) = 14.81, p < 0.001$) és az oltóanyag is ($F(4,34) = 14.96, p < 0.001$) is szignifikánsnak bizonyult (23. ábra). A kukoricánál viszont egyik faktor sem.

Az interakció szignifikáns bizonyult a bab növénynél; az oltóanyaggal kezelt Tófej és a Szeghalom talajok esetében nagyobb volt a kitenyészthető gombák száma ($F(4,30) = 8.319, p < 0.001$). Kutateladze et al. (2016) is megállapították, hogy a talajtípus nagymértékben befolyásolja a mikroszkopikus gombák számát. Továbbá Gazdag et al. (2019) azt találta, hogy a talaj típusa és textúrája erősebb hatással volt az *Alphaproteobacteria* közösség összetételére, mint az alkalmazott mezőgazdasági gyakorlatok. A PGPM-oltás mikroszkopikus gombákra gyakorolt hatását ritkán tanulmányozzák. A legtöbb kutatás Petri-csészékben és a növényi fertőzések által okozott gombaellenes hatások értékelésére összpontosít (Schoebitz et al., 2009), vagy az arbuszkuláris mikorrhiza gombákkal (AMF) és a PGPR baktériumokkal való szinergikus hatásokra (Javed et al., 2021). Ez arra utal, hogy a gomba-komponensek, -feltehetőleg elsősorban a *T. harzianum* – sikeresen túléltek a kijuttatást és képesek voltak fennmaradni a talajban a mérés időpontjáig. Tehát elmondhatjuk, hogy az oltóanyag gomba komponensei a legköztöttebb talajon fejtették ki a legeredményesebb hatásukat (Tófej KA 54,

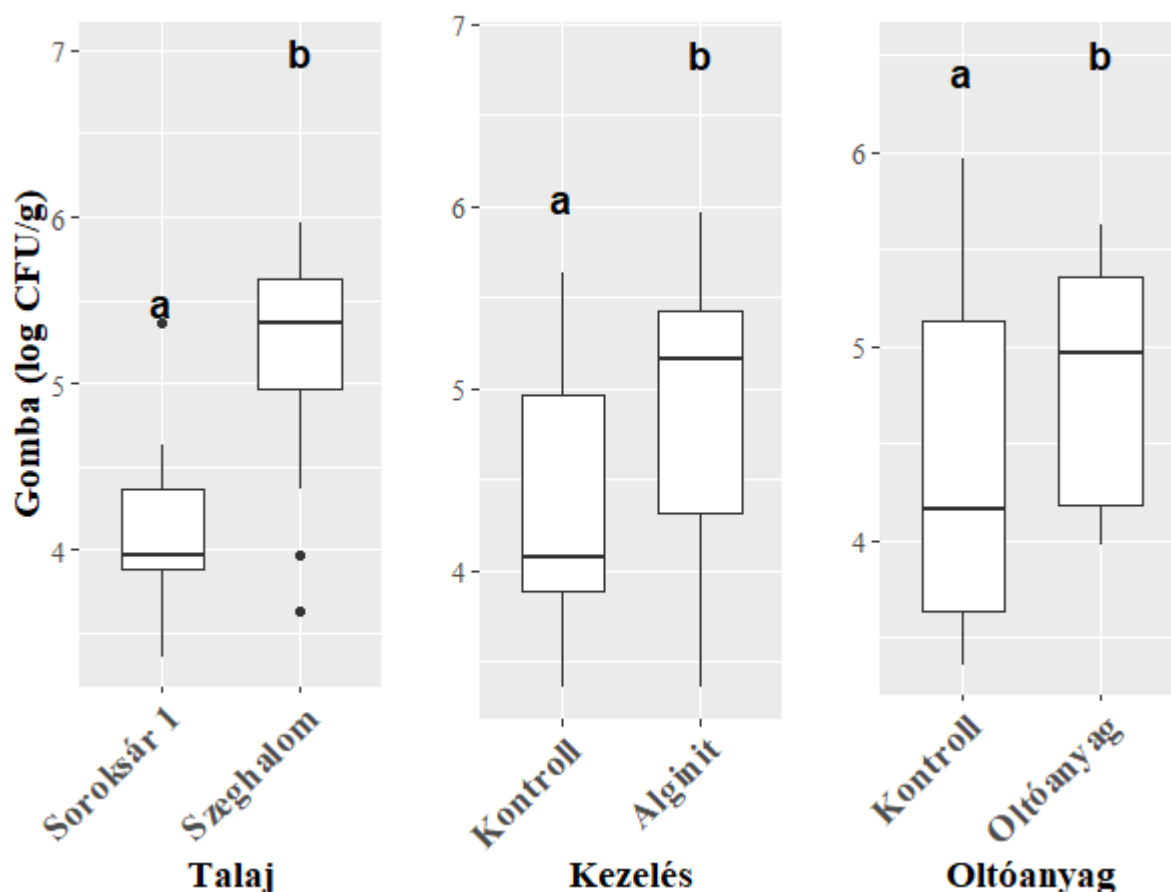
Szeghalom KA 57,5). Ezt azonban nem támasztja alá a szakirodalom, amely nem mutat összefüggést (Frey et al., 1999).



23. ábra. A kitenyészthető gomba (log CFU/g) mennyiségének alakulása a különböző talajok esetében az oltóanyag kezelés hatására a bab növénynél.

Az alginites összevetések esetén a bab növénynél az összes faktor szignifikáns különbségeket mutatott egymástól a kitenyészthető gombaszámában (24. ábra) (Talaj - ($F(1,24) = 62.959$, $p < 0.001$); Alginit - ($F(1,24) = 17.619$, $p < 0.001$); Oltóanyag - ($F(1,24) = 8.195$, $p < 0.01$).Valamint releváns az interakció is a faktorok között, az alginit-mentes kezeléseknél az oltóanyag hatása szignifikáns volt ($F(1,24) = 8.515$, $p < 0.001$).

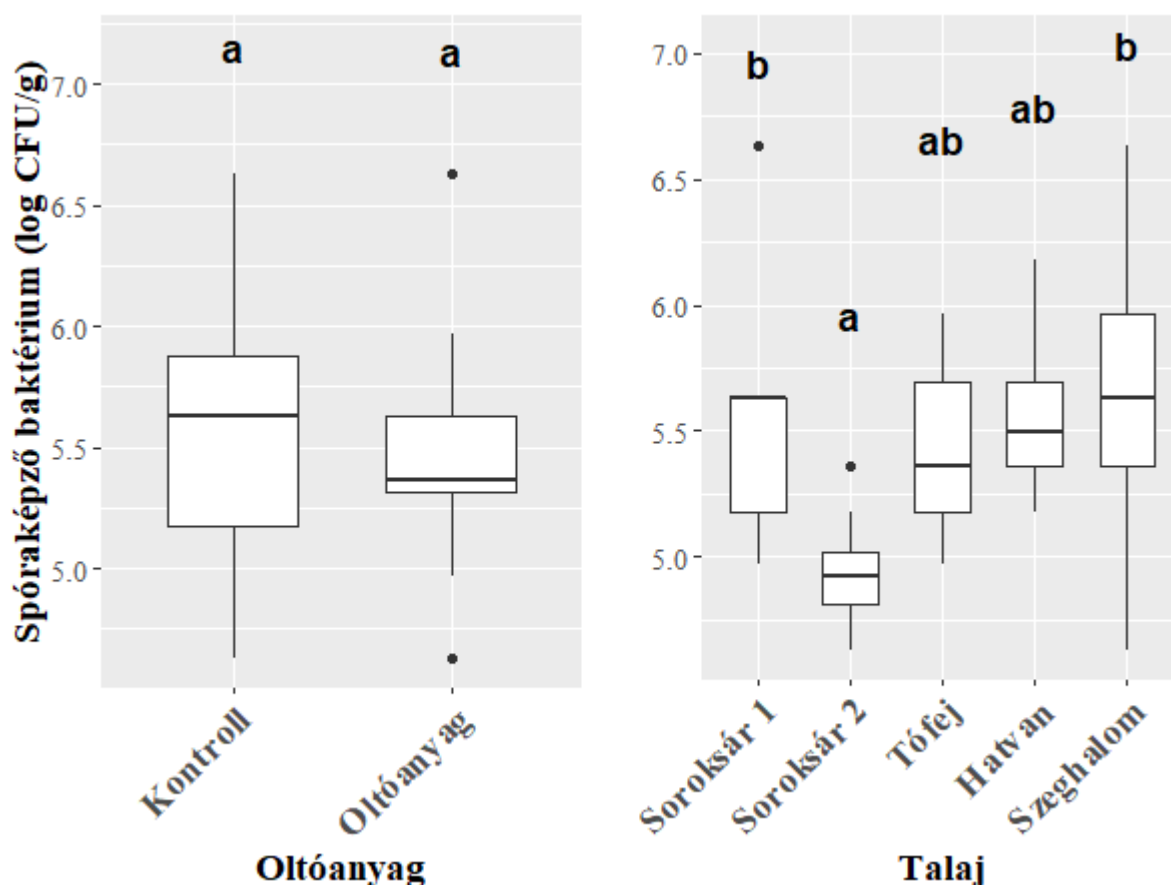
A kukoricánál nem voltak kimutathatók statisztikailag is igazolt hatások.



24. ábra. A kitenyészthető gomba (log CFU/g) értékek alakulása a különböző talajok esetében az alginit kezelés és az oltóanyag kezelés hatására a bab növénynél.

A spóráképző baktériumok (log CFU/g) mennyiségére, a bab növények esetében, a talaj és az oltóanyag faktornál is voltak szignifikáns különbségek a kezelések között. A talajok ($F(4,34) = 3.595$, $p < 0.05$) esetében, a Hatvan talaj szignifikánsan magasabb értékekkel rendelkezett a Soroksár 2 talajhoz képest. Az oltás hatására is szignifikánsan nőtt a spóráképző baktériumok száma ($F(1,34) = 5.929$, $p < 0.05$). De interakció nem volt szignifikáns a talajok és az oltóanyag között a spórás baktériumok abundanciájára tekintettel.

A kukorica növénynél csak a talajtípusok között tudtunk szignifikáns különbségeket kimutatni, ahol a Soroksár 1 és a Szeghalom talaj szignifikánsan magasabb spóráképző baktérium mennyiséggel rendelkezett, mint a Soroksár 2 talaj ($F(4,34) = 4.174$, $p < 0.01$) (25. ábra). Az alginit kezelés hatására nem tudtunk szignifikáns különbséget kimutatni a spórás baktériumok számára nézve.



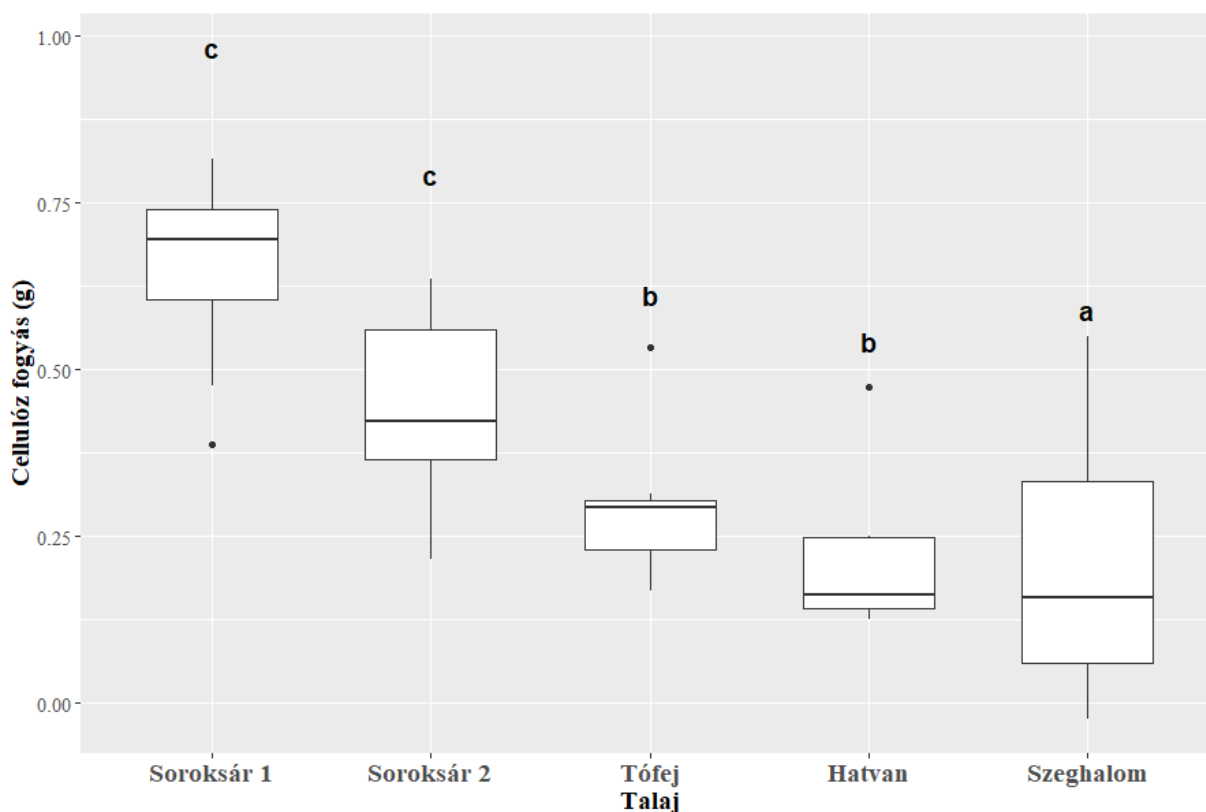
25. ábra Kukorica növény esetében a spóráképző baktériumok száma az oltóanyag hatására és a különböző talajokon.

A mikrobiális eredményeket összegezve elmondható, hogy a talajok között volt a legmarkánsabb a különbség. Az oltóanyag egyedül a bab növény esetében volt szignifikáns a DHA, gomba és a spóráképző baktériumok számára tekintettel. Az oltás hatása a natív talajbaktérium-közösségek összetételére és abundanciájára meglehetősen ellentmondásos, egyértelmű tendenciák nem figyelhetők meg (Mallon et al., 2015; Mawarda et al., 2022). Mawarda et al. (2022) 2 *bacillus* törzzsel hajtottak végre kísérleteket. Megállapították, hogy a *B. pumilis* nem tudott életképes propagulumként fennmaradni, és csak átmenetileg befolyásolta a baktériumközösségek szerkezetét a talajban. Tehát a használt oltóanyag törzs egy kulcsfaktor az oltás sikerére nézve. Mallon et al. (2015) kísérletei pedig arra jutottak, hogy a minél nagyobb a biodiverzitás a talajban, annál ellenállóbb az új mikroorganizmusokkal történő oltással szemben.

A DHA és a mikrobiális paraméterek így egy pozitív összefüggést adnak, ahol DHA jelzi az oltóanyag sikerességét a talaj mikrobiális paramétereinek növelésére. Interakció a Tófej és a Szeghalom talajon volt megfigyelhető a talaj – mikrobiális oltóanyag között. Megállapíthatjuk tehát, hogy a talajok kiinduló fizikai félesége alapvetően befolyásolja a talaj „fogékonyságát” mikroorganizmusokra (Kincses et al. 2008, Balláné Kovács et al. 2008, Pabar et al., 2024). Az

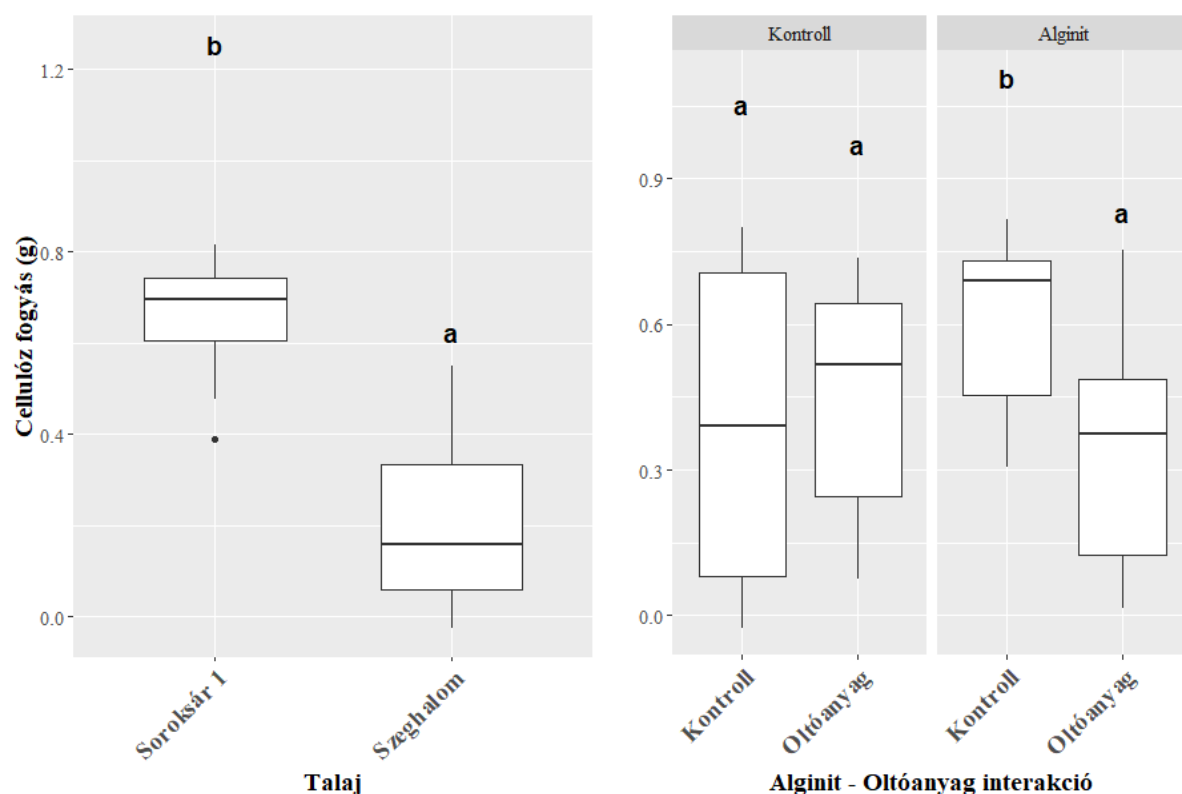
agyagos, sok kolloiddal rendelkező Tófej, Hatvan és Szeghalom talaj több életteret tudott biztosítani a mikroorganizmusok számára, ezért a talaj általánosságban nagyobb MPN értékeket adott.

Vizsgáltuk a *szerves anyag lebontást* Unger teszttel (1960). A cellulózbontás csak a talajra mutatott szignifikáns különbséget ($F(4,34) = 9.794$, $p < 0.001$). A talajok közötti különbség valószínűleg a talajok fizikai féleségéből fakad. A Soroksár 1 talaj egy homokos talaj, a szeghalmi talaj pedig egy nehéz, agyagos, kötött talaj így nehezen járja át az oxigén. A talajnedvesség ronthatná a Soroksár 1 talaj lebontó képességét, mivel homok, ezért gyorsan kiszárad, de kísérleti körülmények között a talajnedvesség kontrolálva volt folytonos öntözéssel (26. ábra). A talaj szerkezetének a bomlási sebességre gyakorolt hatását az irodalom jól alátámasztja (Chmolowska et al., 2017; Li et al., 2020).



26. ábra. A cellulózfogyás mértéke különböző talajokon, bab növény alatt.

Az alginites kezelések esetén a cellulóz fogyasztás továbbra is szignifikáns különbségeket mutatott a talajok között ($F(1,24) = 101.892$, $p < 0.001$). Valamint interakció volt az alginittel kezelt tenyészedényekben az oltóanyag nélkül szignifikánsan több cellulóz fogyott ($F(1,24) = 10.353$, $p < 0.01$) (27. ábra).



27. ábra A cellulózfogyás mértéke a bab növény esetében a különböző talajokon, mikrobiális oltás hatására.

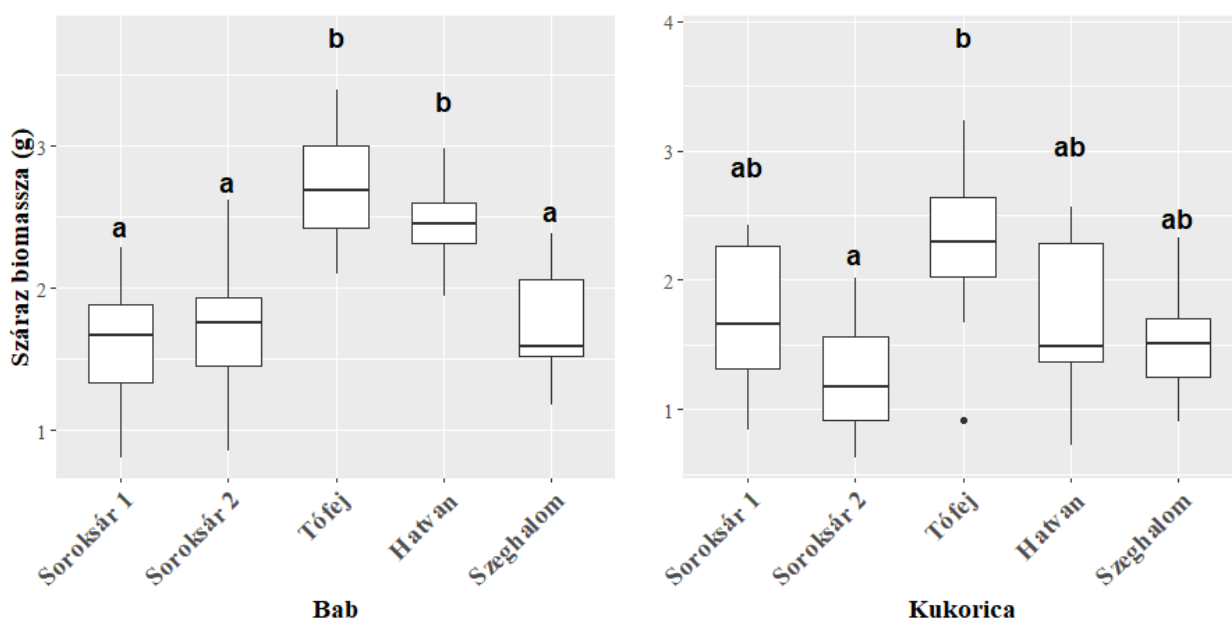
4.5.2 A biomassa száraz tömege (g)

A növények száraz biomasszája mindkét növénynél szignifikáns különbségeket mutatott a különböző talajokon, viszont nem volt szignifikáns az oltóanyagra nézve. A bab növények esetében ($F(4,34) = 9.794$, $p < 0.001$), a kukoricánál pedig ($F(4,34) = 3.121$, $p < 0.05$) szinten volt szignifikáns a talaj faktorra. De a talajok interakciója nem állt fenn sem az oltóanyaggal, sem pedig az alginittel.

A növényi biomassa-tömeg statisztikai vizsgálatánál megállapítottuk, hogy a hajtás száraztömege nem mutatott szignifikáns különbséget a kontroll és az oltott talajokat összehasonlítva. Bizonyos talajoknál megfigyelhető volt az is, hogy az oltott növények száraztömege alacsonyabbnak adódott a kontroll növényekkel összehasonlítva.

Ezt a tendenciát már korábban is leírták (Jakab, 2014), mégis viszonylag kevés figyelmet kap az ilyen, az elvártakhoz képest a növénytömeg-növekedésre ható negatív eredmény. Ennek okaként feltételezzük a következő hatást. A rhizoszférába az oltással is bekerült mikroorganizmusokat a gyökér-exudátumoknak kell táplálni akkor, amikor a növényi fotoszintetikus aktivitás ezt még nem képes kielégíteni, és/vagy amikor a talajban sincs elegendő szerves anyag a mikroba-tápláláshoz. Ez kezdetben hátráltathatja a növények növekedését, mivel a saját fotoszintetikus terméküket így nem tudják teljes egészében a

biomassza-növeléséhez használni. A tényleges hatótényezők kiderítéséhez további vizsgálatokra lesz szükség. (28. ábra)



28. ábra. A bab és a kukorica növény biomassa (g) produkciójának összehasonlítása a különböző talajokon.

4.6 A mikrobiális törzskeverékek és az ökológiai gazdaságban használható talajerőgazdálkodási technológiák vizsgálata szabadföldi, több éves kísérletben

A 2019-2021 között végzett méréseket a 0-20 cm-es talajmélységre értékeltük ki. Viszont néhány paraméter kapcsán vizsgáltuk a 0-10 és 10-20 cm közötti különbséget, ezeket is tárgyalom indokolt esetben a megfelelő helyen.

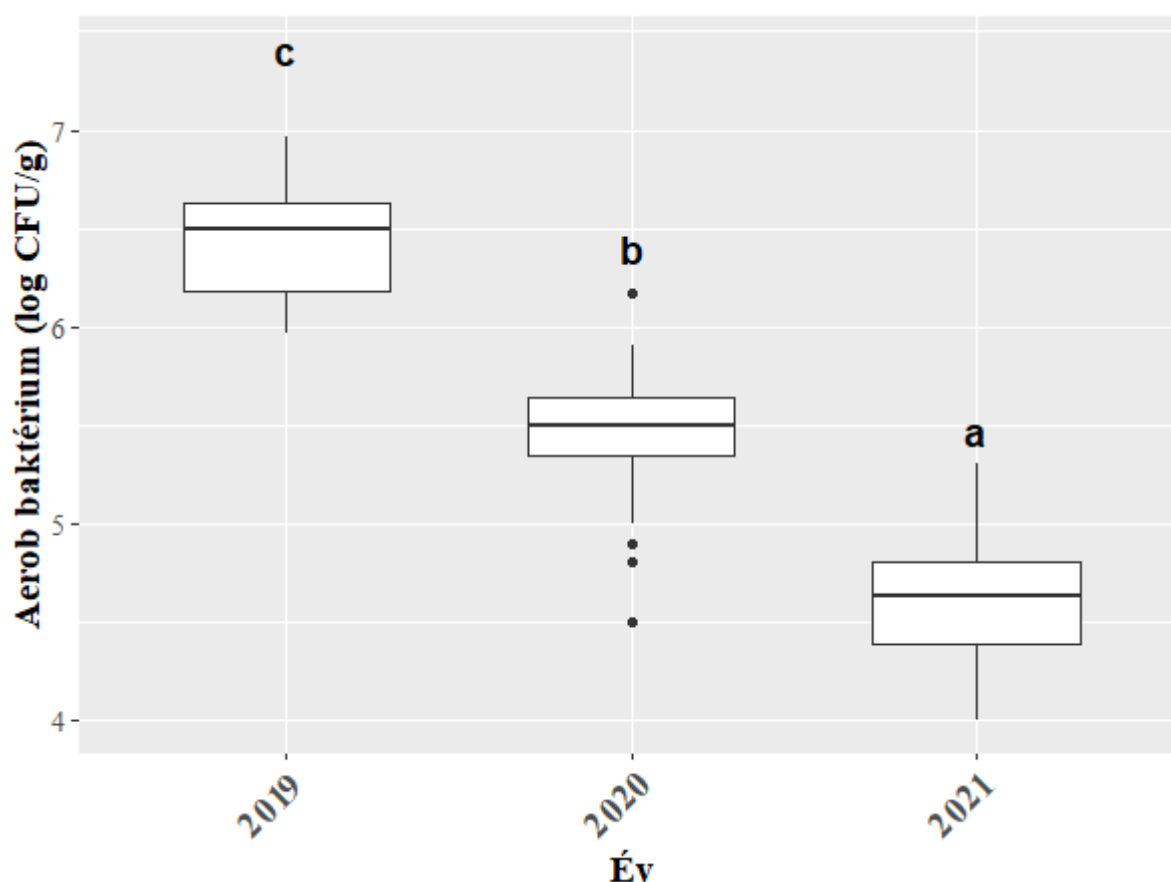
Az eredmények kiértékeléséhez több faktoros ANOVA-t alkalmaztunk. A fő faktorok következők voltak: Talajmegújító módszerek (kezelések), Oltóanyag használata, Idő (évek között beállt változások), és bizonyos helyeken a talaj mintavétel mélysége. Valamint korrelációs vizsgálattal elemeztük a különböző talajparamterek közötti összefüggést.

Az alginit, mulcs, és takarónövény kezelések és a mikrobiális oltóanyagok hatását a talajra és termésre az évek során monitoroztuk. Elsősorban ezek hatását vizsgáltuk a különböző biológiai paramétereken, talaj szénre és termésre gyakorolt hatásán keresztül. Továbbá vizsgáltunk különböző talajkémiai, fizikai tulajdonságokat, de ezeket inkább ellenőrző jelleggel.

4.6.1 Talajbiológiai eredmények alakulása szabadföldi kísérletben a talajerőgazdálkodási technológiák és az oltóanyaggal való kombinációjuk hatására

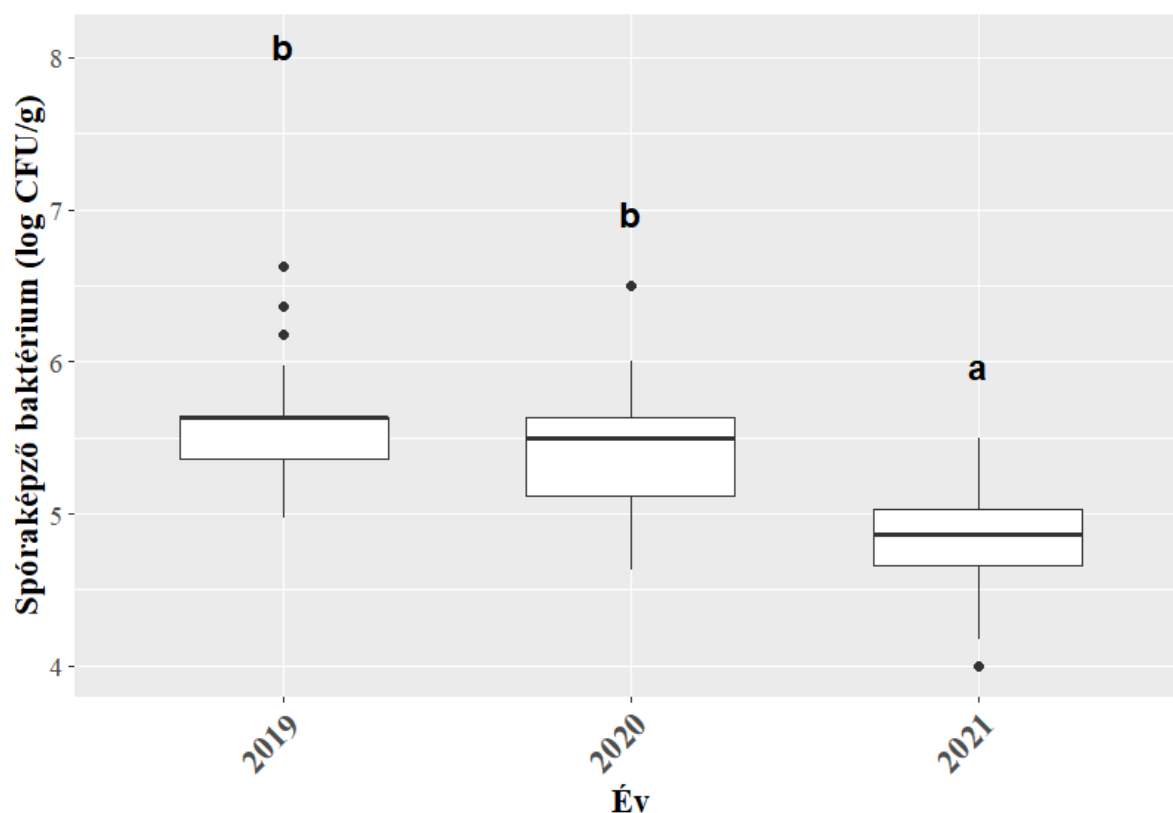
Talajbiológiai tulajdonságok esetében vizsgáltuk a talajban található mikrobiális abundancia értékeit, amiket MPN módszerrel mértünk. A statisztikai értékeléshez a Log értékeiket vettük. Továbbá a talaj DHA enzimaktivitását is vizsgáltuk.

Az *aerob baktériumok* (log CFU/g) mennyiségére, a kezeléseknek és az oltóanyagnak, nem volt szignifikáns hatása, de a vizsgálat évek között szignifikáns változás volt kimutatható, ami csökkenő tendenciát mutatott ($F(2,65)=158,409$ $p<0,001$) (29. ábra).



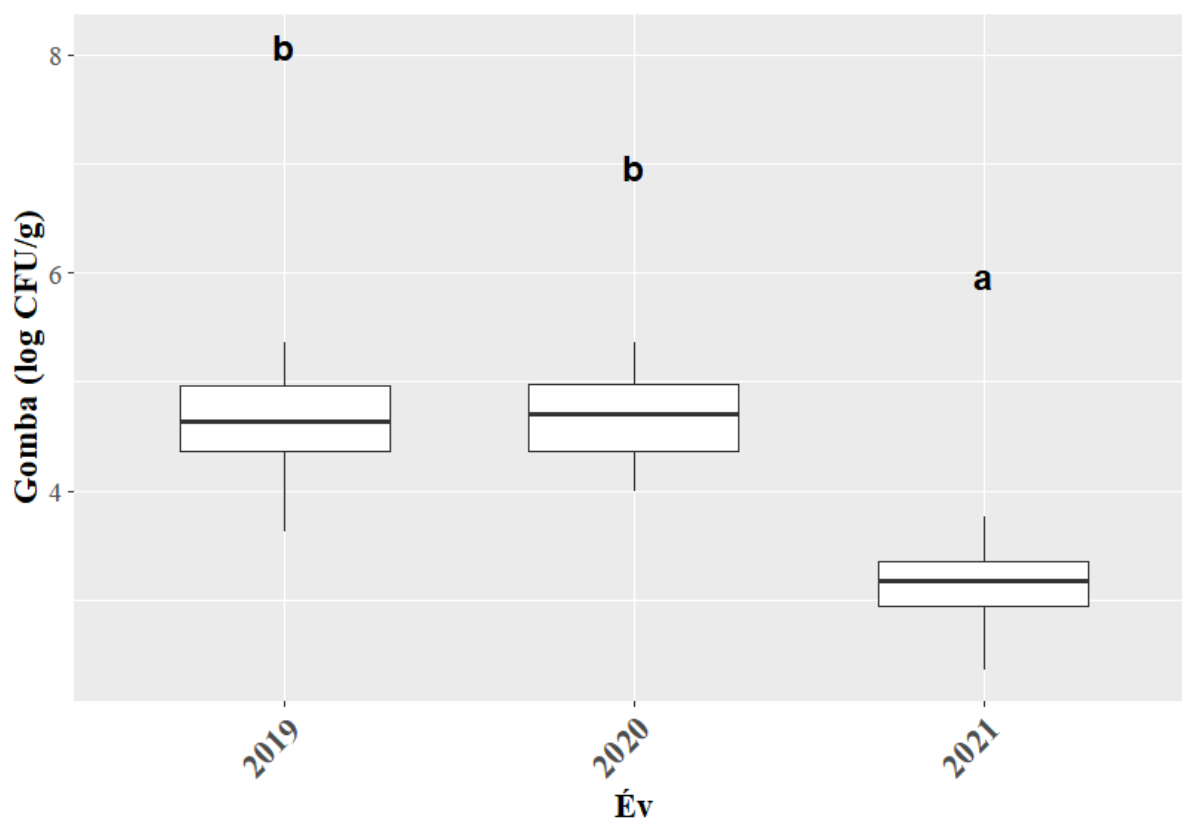
29. ábra. Az aerob baktériumok (log CFU/g) számának alakulása a kísérleti évek alatt.

A *spórás baktériumok* hasonló eredményeket mutatnak, mint az aerob baktériumok abundanciája. A kezelés és az oltóanyag nem mutatott szignifikáns különbséget a kitenyészthető spórás baktériumok számában, míg az idő faktor ($F(2,65)$ $F=25,017$, $p<0,001$) igen, egy csökkenő tendenciát (30. ábra).



30. ábra. A Spóráképző baktériumok (log CFU/g) számának alakulása kísérlet alatt.

A mikroszkopikus gombák MPN-el mérhető értékei hasonló eredményeket mutatnak, mint az aerob és spórásbaktériumok számai. A mennyiségük csökkenése azonban nem volt olyan egyenletes. Az első két év hasonlóan alakult, majd az utolsó év értékei csökkentek. A kezelés és az oltóanyag nem mutatott szignifikáns különbségeket a kezelések között, míg az évek között egy csökkenő tendenciát mutatott ($F(2,65) F=111,844, p<0,001$) (31. ábra).



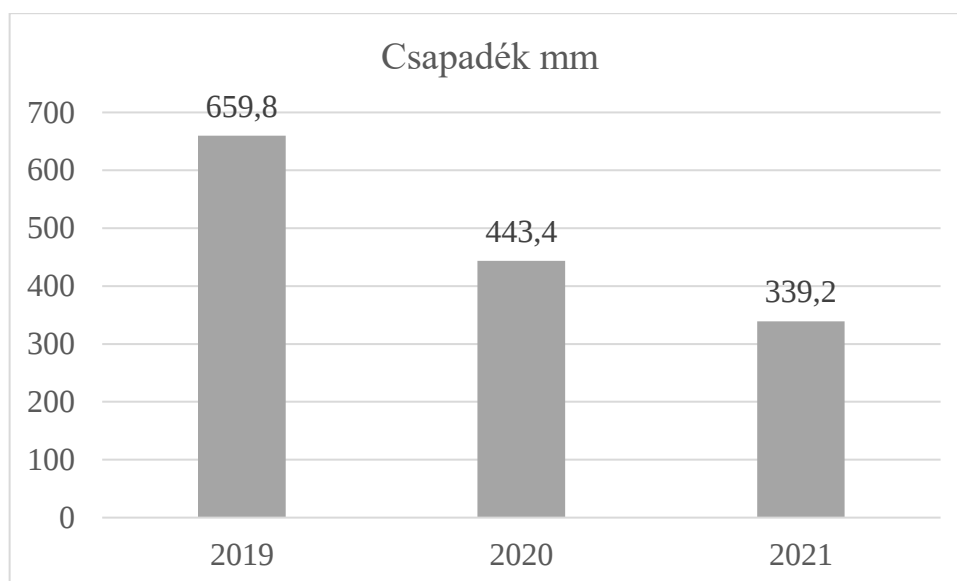
31. ábra. A mikroszkopikus gombák számának (log CFU/g) változása a kísérlet ideje alatt.

Az MPN-nel kimutatható gombák számának a csökkenése meglepő, mivel a mulcsozott parcellák esetén szemmel láthatóan nedvesebb, lazább volt a talaj, valamint gyakran tapasztaltunk gombákat ezeken a parcellákon (32. ábra). Ez utalhat arra, hogy a makroszkopikusabb gombák kezdték el kitölteni ezeket az élettereket a mikroszkopikus gombák helyett.



32. ábra. A mulcsozott parcellákon magasabb talajnedvesség és gombaszám értékek vizuálisan, szabad szemmel is megfigyelhetők.

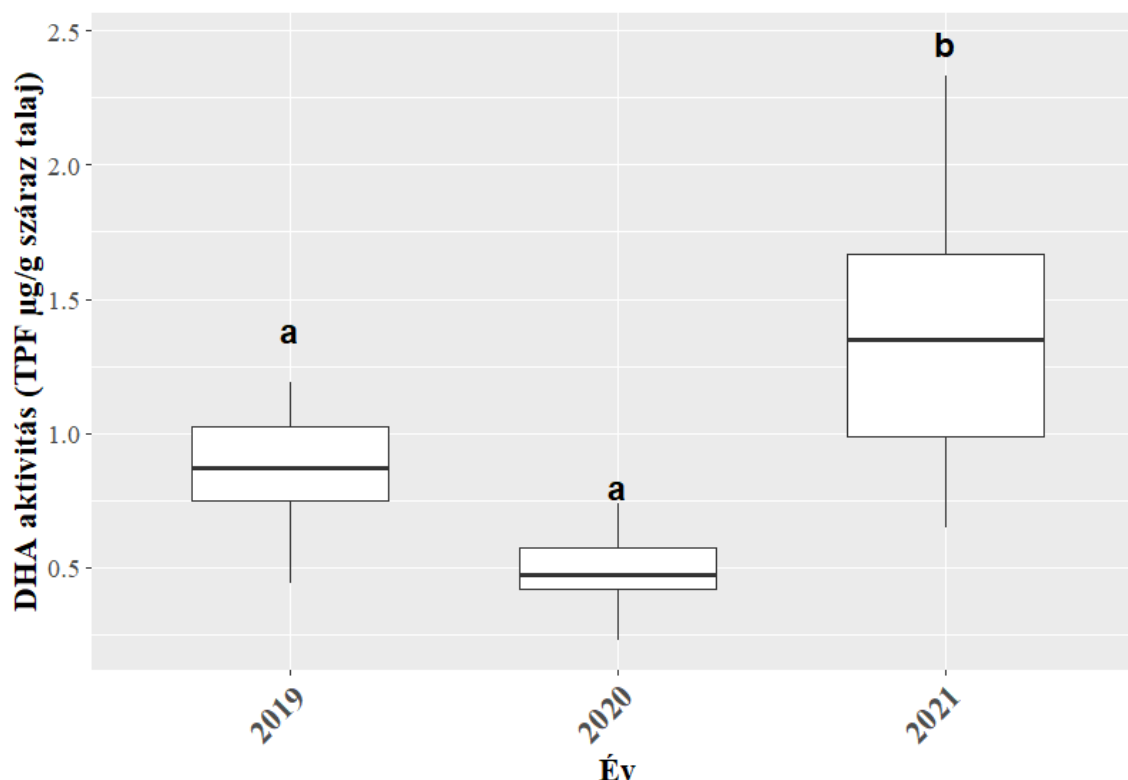
Ezeket a csökkenő tendenciákat a *csapadék mennyiség* csökkenése is okozhatta ebben a 2019-2021-es évben, annak ellenére is, hogy a terület öntözött volt. (33. ábra)



33. ábra. A csapadék (mm) mennyiség alakulása a vizsgálati évek során. (Megjegyzés: ezek az adatok a teljes évet mutatják be, nem pedig a mintavételig lehullottat, vagy az azt megelőző időszakot).

A *DHA* esetén az idő faktor mellett a kezelések ($F(3,65) = 2,997$, $p=0,037$) is mutattak szignifikáns különbségeket, de ezt a post hoc teszt nem erősítette meg. Az oltóanyag hatására nem tudtunk kimutatni szignifikáns különbségeket, míg a kísérletben vizsgált évek között szignifikáns különbségek voltak ($F(2,65) F=52,323$, $p<0,001$), de nem ez mutatott egyértelmű

tendenciát, és a csapadék adatok sem magyarázzák. A kísérlet végén jelentős magasabb értékek vannak a kiinduláshoz képest (34. ábra).



34. ábra. A DHA értékek alakulása az kísérlet ideje alatt.

A talajbiológiai paraméterek trendszerű változásai az évek során ellentmondásosnak hathatnak, hogy a csökkenő kitenyészhető mikroorganizmus szám ellenére a DHA nem követi ezt a trendet. Erre egy magyarázat lehet, hogy csökkent a mikroorganizmusok MPN-nel kimutatható száma, de nőtt a talajban a biodiverzitás. A talaj-táplálékháló komplexebbé válásával több olyan szervezet is megjelenhetett, ami mikroorganizmusokkal táplálkozik, így csökkent ezek száma, de a talaj biológiai aktivitása összességében nőtt. Ezt erősíti meg több forrás is, ahol a talaj-táplálékháló átalakulásáról, és a magasabb rendű, mikroorganizmusokkal táplálkozó szervezetek arányának a növekedéséről számoltak be (Natalio és Richards, 2022; Sui et al., 2022; Bokova et al., 2023). De ennek megerősítéséhez a mikrobiális biomasszát mérő tesztek eredményeire lenne szükség. Viszont indirekt módon a DHA enzimen keresztüli talajbiológiai aktivitás vizsgálata is alkalmas erre (Sinsabaugh et al., 2016).

A mikroorganizmusok csökkenése egy minimum-till művelés esetén ellentmondásos lehet, de ezt jelezheti a talajtáplálékháló átalakulása. Pusztán az alkalmazott módszerekkel kimutatható mikroorganizmusok száma csökkent. Több forrás is azt erősíti meg, hogy minimum művelési gyakorlatok mellett nő a talaj mikroorganizmus abundanciája, és biológiai

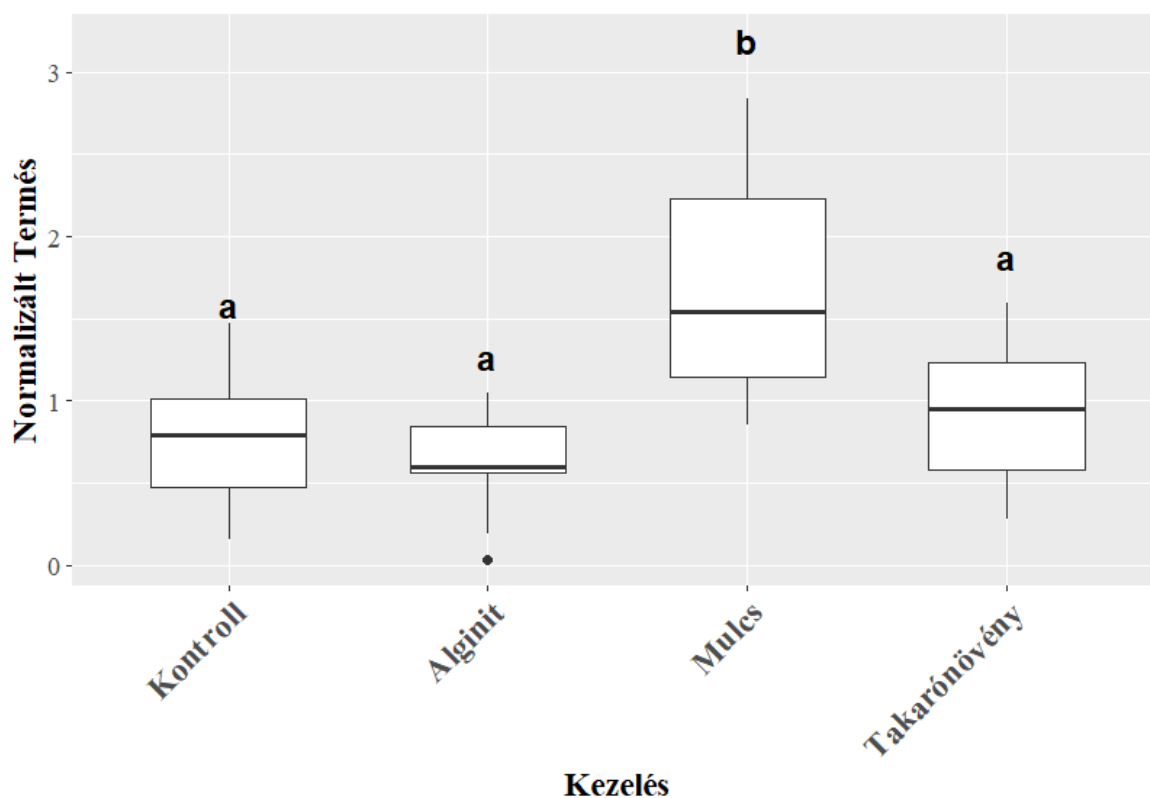
aktivitása (Khangura et al., 2023; Wang és Zou, 2020; Govednik et al., 2023). De a jelen kísérletben, ennek vizsgálatára, nem volt olyan kezelés, amit konvencionálisan műveltünk volna, így nem lehet biztos kijelentéseket tenni.

4.6.2 Normalizált terméseredmények a talajrőgzádkodási technológiák hatására

A normalizált terméseredmények elemzése során nem célszerű az évek közötti különbségeket vizsgálni, mivel a normalizálási folyamat során kiküszöböljük az éves variációkat. Ez különösen akkor indokolt, ha minden évben eltérő növényfajtákat használunk, ami összehasonlíthatatlanná teszi az adatokat az évek között. Emellett a kezelések és az oltóanyagok hatásának vizsgálata továbbra is releváns, mivel ezek az információk függetlenek az évenkénti változásoktól, és így értékes betekintést nyújtanak a különböző agronómiai gyakorlatok hatékonyságába.

A kezelések ($F(3,67) = 13.627, p < 0.001$) között szignifikáns különbséget tudtunk kimutatni. A post hoc teszt alapján a mulcsozott parcellák termés mennyiség eredményei a többi kezeléstől szignifikánsan magasabb értéket mutattak ($p < 0.001$). (35. ábra). Ennek a legfőbb oka a mulcs gyomelnyomó tulajdonsága lehet, mivel a területen minimális talajművelés volt, a szezon elején és végén, ezért a gyom jelentős problémát okozott. De ezeken felül a befolyásolhatta az eredményeket a mulcs nedvesség, hőmérséklet, és pH szabályzó hatása (Zhang, 2021). Valamint a szalma mulcs által biztosított extra felvehető tápanyagok (Huang et al., 2021). A mulcs talajnedvességet befolyásoló hatását jól prezentálja a 32. ábra. Noha a terület öntözve volt, így is biztosíthatott annyi előnyöket, főleg annak fényében, hogy mivel a mulcs elnyomta a gyomnövényeket, így a rendelkezésre álló nedvességet csak a haszonnövény biztosította.

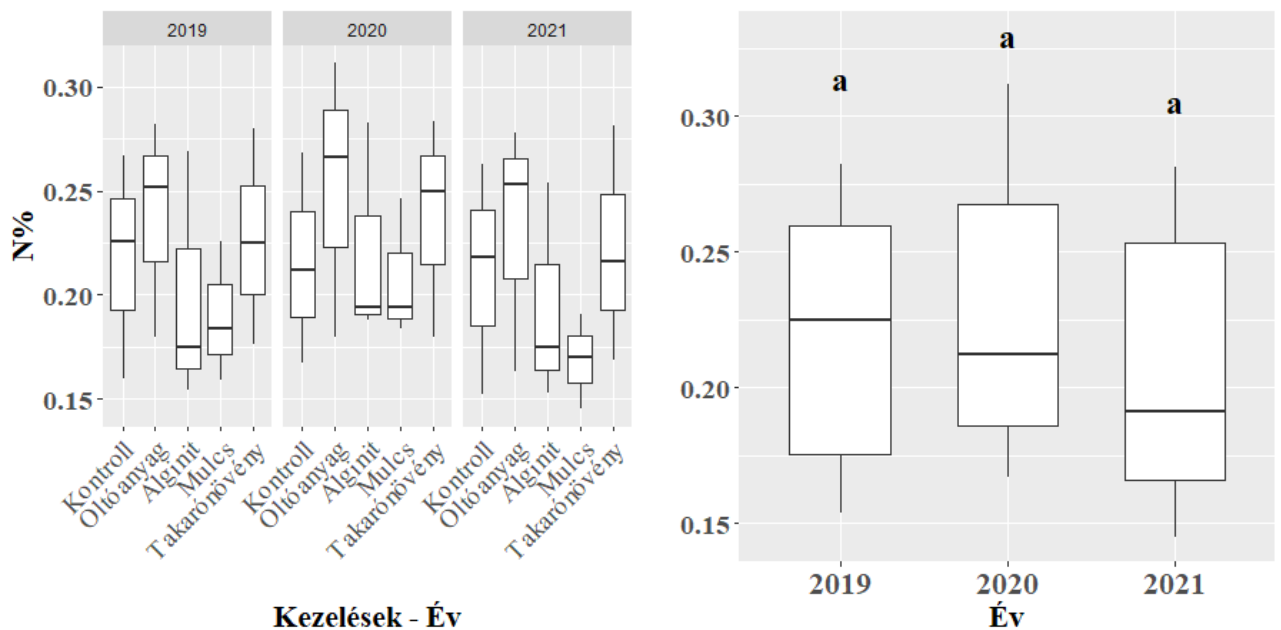
Az oltóanyag nem mutatott szignifikáns különbséget a kontrollhoz képest.



35. ábra. A kezelések hatása a terméseredményekre.

4.6.3 Talaj szén (C%) és nitrogén (N%) tartalmának mérése a talajerőgazdálkodási eljárások hatására

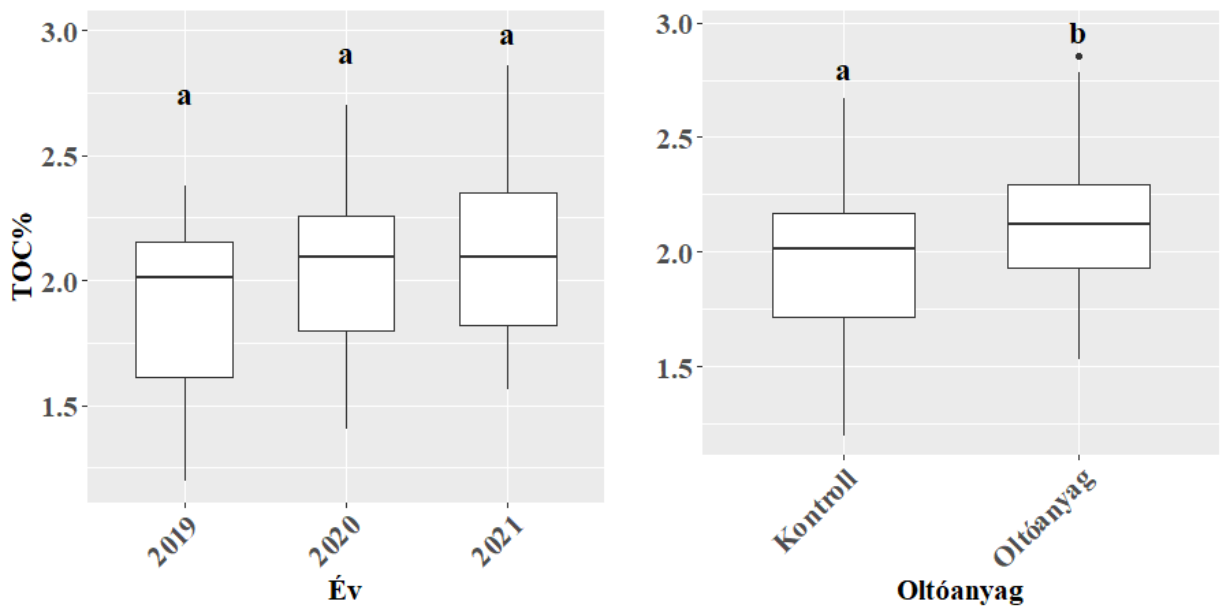
A *nitrogén tartalom (%)* meghatározására a fő kezelések (Kontroll, Alginit, Mulas, Takarónövény) és az oltóanyaggal kezelt parcellák talajaiból volt lehetőségünk, a kombinációkra nem. A talaj teljes nitrogén tartalma (N %) csökkent az évek során, azonban ez nem volt szignifikáns. Ennek oka, hogy az évek során csak kevés trágya került felhasználásra (a növények alatt). Hasonlóan igaz ez a kezelésekre is: a Takarónövény kezelés a három év során érte el a legmagasabb N % értékeket, amelyet követett a Kontroll; ezután jöttek az Alginit és Mulcsoszás kezelések, de nem voltak szignifikáns különbségek a kezelések között (36. ábra). Ez összhangban van más hosszú távú kísérletek eredményeivel, ahol a minimum talajművelés és a takarónövény kezelés befolyásolta a talaj nitrogéntartalmának csökkenését vagy növekedését (Mazzoncini et al, 2011).



36. ábra. N % kezelésenként évekre lebontva, és alakulása a kísérlet ideje során.

A talaj teljes szerves szén (TOC) tartalma (%) jelentős növekedést mutatott a hároméves időszak alatt. Különösen, az átlagos TOC érték 2019-ről 2020-ra 1,906 %-ról 2,055 %-ra emelkedett, ami +7,8 %-os relatív növekedést jelent az első évben. Ez a jelentős növekedés 2020-ról 2021-re is folytatódott, tovább emelkedve 2,116 %-ra, ami további +3 %-os relatív növekedést jelent a második évben. Ezek az eredmények összhangban vannak West és Post (2002) kutatásaival, amelyek hasonló trendeket figyeltek meg a talaj szén dinamikájában, a minimum talajművelési kezelések hatására. Tanulmányuk szerint az ilyen kezelések gyakran mutatják a legmagasabb növekedést a talaj tartalmában az első 5-15 évben, mielőtt új egyensúlyi állapotot érnének el.

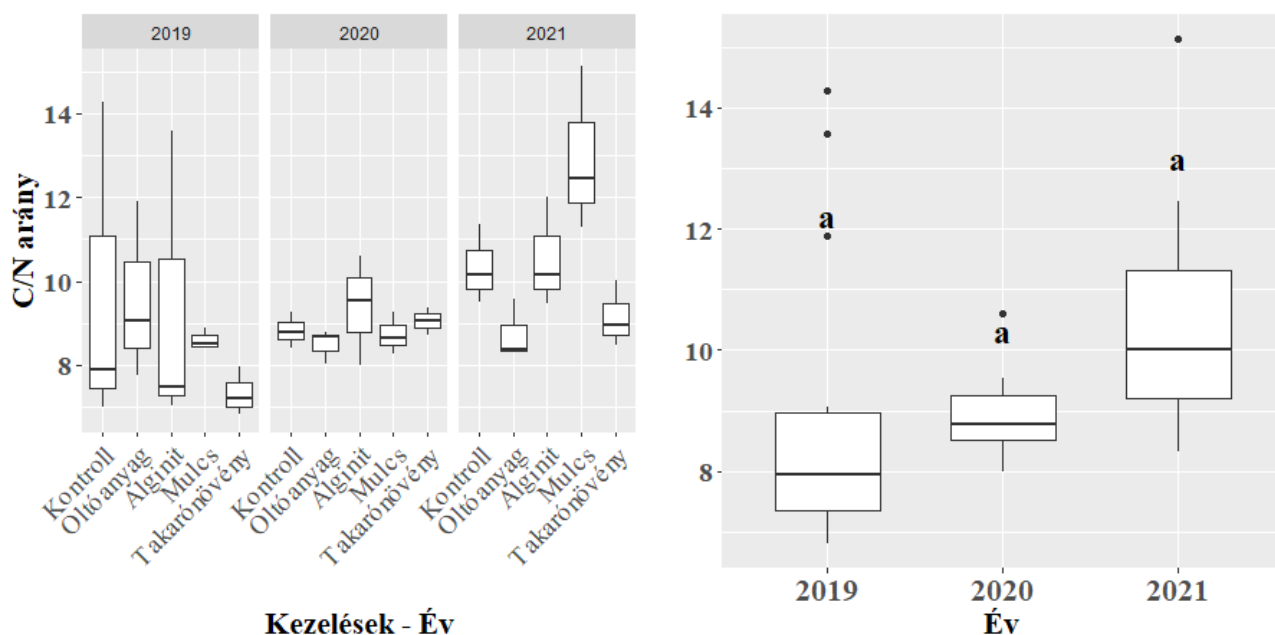
Noha az idő és a kezelés faktorokhatása nem lett szignifikáns, de az oltóanyag hatására szignifikánsan magasabb lett a TOC ($F(1,65) = 4.072, p < 0.05$) (37. ábra).



37. Ábra. A talaj szervesanyag-tartalom (TOC %) alakulása a kísérlet ideje során, és az oltóanyag hatására.

A *C/N arány*-hoz a N adataink csak a 4 kezelésre + oltóanyagra vannak, így a *C/N arány* adataink csak ezekre vonatkoznak. A *C/N arány* adatai jelentős hatást mutattak az évek között ($F(2, 30) = 3.532$, $p = 0.0419$). A *C/N arány* növekedést mutatott, ami a nitrogén szintek enyhe csökkenésének és a szén szintek növekedésének eredménye az évek során. A post hoc elemzés viszont nem erősítette meg, hogy szignifikáns különbség lenne az évek között (38. ábra).

Az átlagos *C/N arány* az utolsó évben volt a legmagasabb átlag értéke a vizsgált parcelláknak (10,3), még mindig jelentősen alacsonyabb, mint az ilyen típusú talaj globális átlagértéke (14,2) (Batjes et al., 1996). Bár a Kezelés faktor nem mutatott szignifikáns különbségeket a kezelések között, az utolsó évben az Oltóanyag és Takarónövény kezelés mutatta a legalacsonyabb *C/N arányt*. A Mulcsozás kezelés esetében a legmagasabb értékeket kaptuk, ahogy várható volt, mivel az Oltóanyag és a Takarónövény kezelés nitrogénnel gazdagította a talajt (Mazzoncini et al., 2011), míg a Mulcsozás kezelés extra szenet adott hozzá (Fekete et al., 2011; Qin et al., 2022; Kotroczó et al., 2023).



38. ábra. Az évek során mért C/N arány értékek a talajban, a szén szintek enyhe növekedése és a nitrogén szintek enyhe csökkenése miatt. Különböző betűk jelentik, hogy szignifikáns különbség van a csoportok között.

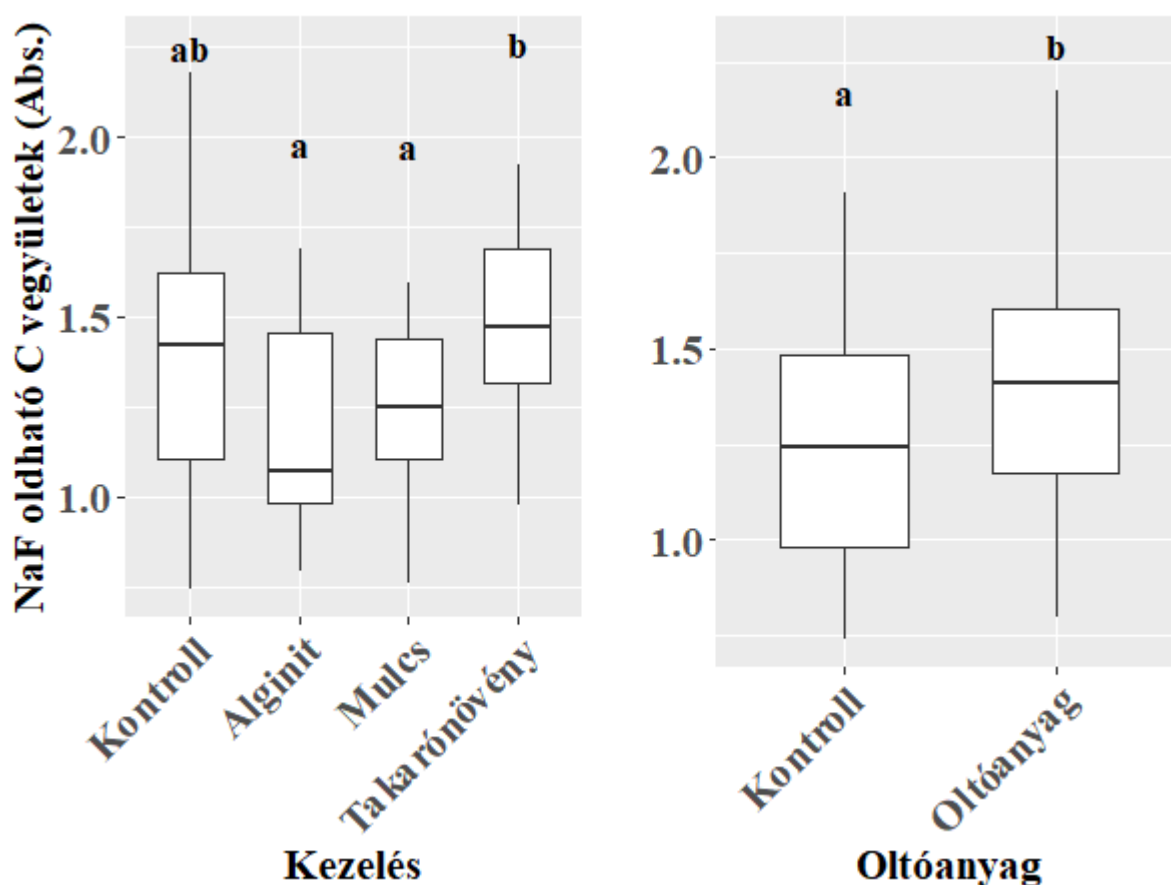
4.6.4 A talajban található szerves anyagai, és minőségi indikátorinak vizsgálata a talajerőgazdálkodási technológiák és az oltóanyagok kombinációik hatására

A talaj szerves anyag összetételének változásainak megismerése érdekében különböző extrakciókból származó szerves anyagok abszorbanciáját értékeltük NaF és NaOH oldatok segítségével. Ezen oldatok abszorbancia értékeinek a használt aránypárjait. Vizsgáltuk a könnyen kivonható és oxidálható szerves vegyületeket a DOC-al és POXC-al. Valamint a talaj szerves vegyületek közé tartozó glomalin, és MBC értékeket.

A NaF-oldható szerves anyagok elemzése szignifikáns változásokat mutatott a kezelések ($F(3, 65) = 4,382, p = 0.007$) és az oltóanyag ($F(1,65) = 4557, p = 0.037$) hatására. Ezt a Tukey post hoc teszt megerősítette mindkét esetben. A takarónövény szignifikánsan nagyobb eredményeket mutatott az alginit és a mulcs kezeléshez képest is, valamint az oltóanyag szignifikánsabb nagyobb az kontrollhoz képest. Ez összefügghet azzal, hogy mind a takarónövény, mind az oltóanyag nitrogénben dúsabb szerves anyagokat produkálhat N-kötés révén, a takarónövény esetében kifejezett kontrasztot jelent a mulcs és alginit, amik inkább C-ben domináns vegyületekkel dúsították a talajt. Noha az N esetében ezek a különbségek nem érték el a szignifikancia szintjét (39. ábra). Hargitai a NaF oldható szerves anyagokat „jól kialakult, nagyobb kondenzációs fokú Ca-hoz kötött szerves anyagok” -ként jellemezte. A NaF oldható szerves anyagokról leírta, hogy nagyobb a nitrogén %-os arányuk (Hargitai, 1955). Ez magyarázhatja a nagyobb értékeket a takarónövény, és oltóanyag kezelés hatására. Az alginit

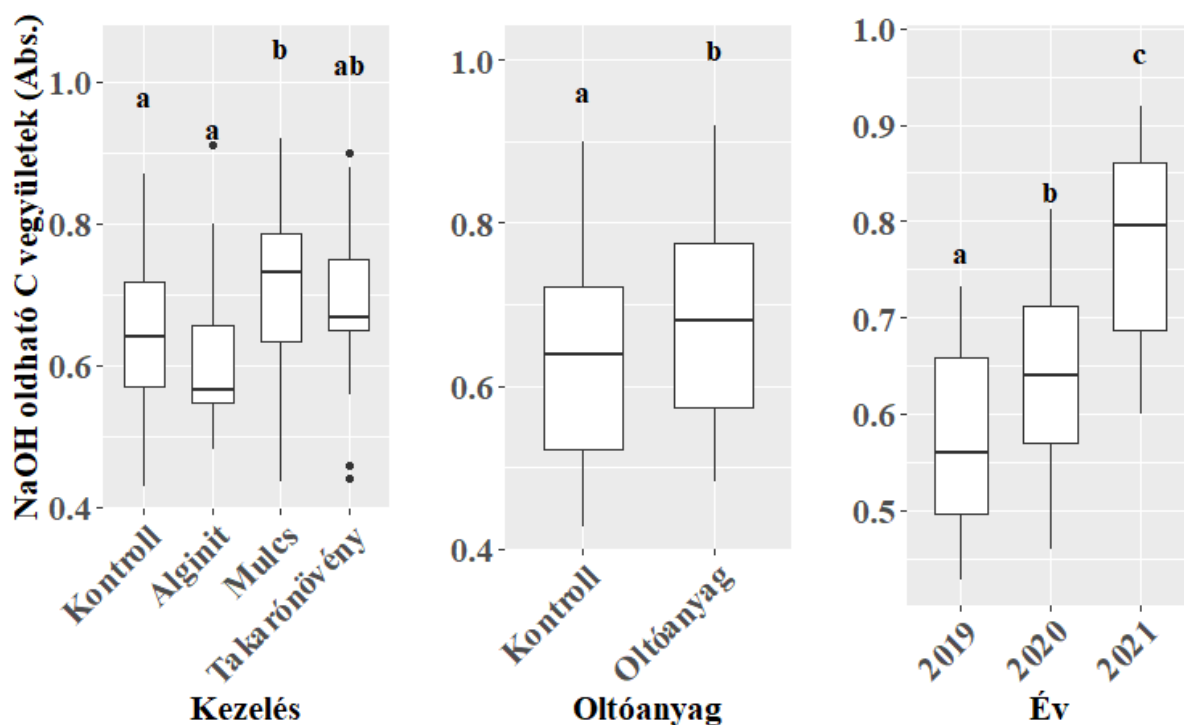
Ca-tartalom hatására is várható lett volna ez alapján változás, de ez talán a soroksári talaj alapvetően magas Ca (és C) tartalma miatt nem tudott érvényesülni.

Az idő faktor esetében nem érte el azt, hogy szignifikáns különbséget jelenthessünk ki, de ez a stabil természetük miatt várható volt, hogy ez a változó nem mutat jelentős ingadozásokat. Eredményeink megerősítették a NaF-oldható szerves anyagok stabilitását a vizsgálat időtartama alatt. Ez ellentmond a meglévő kutatásoknak, amelyek szerint a talajmegőrző gazdálkodási gyakorlatok – mint például a növényi maradványokból származó szénbevitel növelése, a no-till gazdálkodás és a hüvelyesek integrálása – elősegítik a növényi maradványok a talaj szerves széné történő átalakulását, ami a jobban humifikálódott, minőségibb szerves anyagokban dúsabb talajt eredményez (Jat et al., 2019b; Datta et al., 2022; Kobierski et al., 2018). Továbbá, Dou és Hons (2006) a rezisztens, stabil szerves C növekedését figyelte meg, amit a huminsav-kalcium-agyag komplexek kialakulásának tulajdonítottak talajmegőrző talajművelés mellett. Eredményeink ettől való eltérése a rövidebb vizsgálati időtartammal és az agyagásványok hiányával magyarázható.



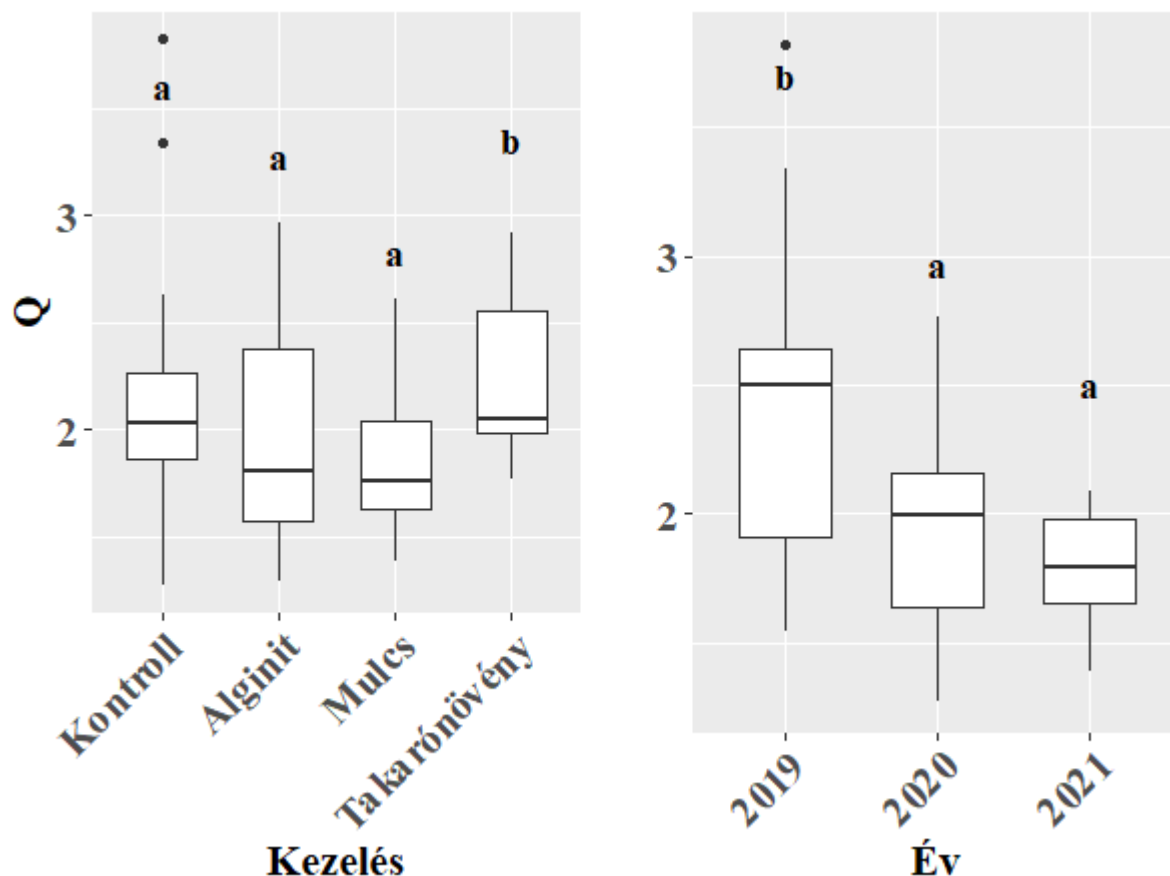
39. ábra. A NaF oldható C vegyületek mennyisége a kezelések és az oltóanyag hatására.

A NaF oldható szerves anyagokkal szemben a *NaOH-oldható szerves anyagokat* a talaj friss, még a humifikáció kezdeti stádiumában járó szerves anyagoként jellemezte (Hargitai, 1992). Az eredmények azt mutatták, hogy mindhárom faktor esetében szignifikáns különbség található. A kezelésnél ($F(3, 65) = 4,009, p = 0.011$) a mulcs kezelés esetén mutattuk ki a legnagyobb értékeket, amely az alginít kezeléstől mutatott szignifikáns eltérést. Az oltóanyagnál ($F(1, 65) = 9,235, p = 0.003$) az oltott parcellák szignifikánsabb nagyobb értékeket mutattak a kontrollhoz képest. De a legnagyobb változást az évek között tudtuk kimutatni ($F(2, 65) = 35,502, p < 0.001$). A post hoc elemzés jelentős különbségeket jelzett 2021-2019 ($p < 0.001$), 2021-2020 ($p < 0.001$) között, ami 35.89 %-os növekedést jelent 2019 és 2021 között. 2020 és 2019 között már nem volt ennyire jelentős különbség, de továbbra is szignifikáns ($p < 0.05$) (40. ábra). Ez jelzi, hogy a NaOH oldható szerves anyagok kiváló indikátorai a friss szervesanyag-növekedésnek a talajban.



40. ábra. A NaOH oldható C vegyületek mennyisége a kezelések, oltóanyag és idő hatására.

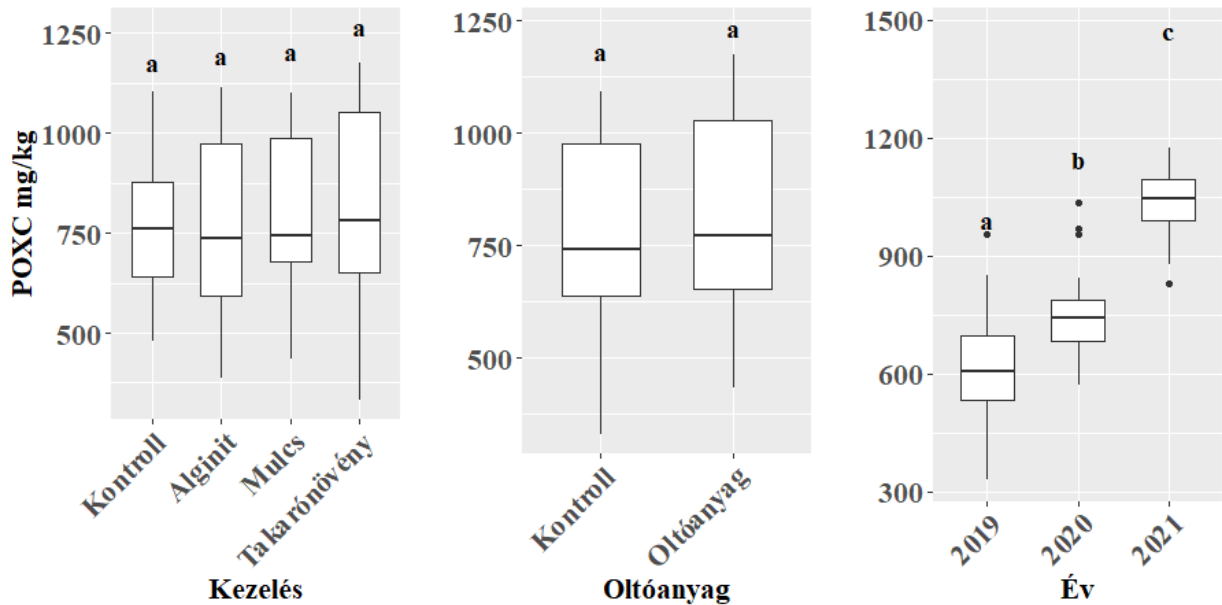
A Hargitai-féle két oldószeres humusz minőség (Q) és stabilitási (K) értékek, a fentebb már tárgyalt NaF és NaOH oldatok abszorbancia értékeiből az ún. Hargitai féle humuszminőség (Q) és humuszstabilitási (K) indexet kapjuk. Mindkettő nagyon hasonló eredményt mutatott, az évek között szignifikáns különbségeket mutattak. Q ($F(2, 65) = 15.574, p < 0.001$), K ($F(2, 65) = 26.378, p < 0.001$). De a Q esetében a kezelés faktor hatására ($F(3, 65) = 3,396, p < 0.05$) is szignifikáns lett a Q érték. (41. ábra)



41. ábra. A Hargitai Q értékek alakulása a kezelések és idő hatására.

A fent tárgyalt eredményekkel szemben itt csökkenő, romló tendenciát láthatunk. Ez abból fakad, hogy ezeket a számokat a humuszminőség javulásának a mérésére alkalmazták abban az időben, amikor meszezéssel, és N-tartalmú vegyületek (szerves, vagy műtrágya) kijuttatásának a segítségével a NaF oldható szerves anyagok javulását várták, nem pedig a talaj friss szerves anyagának a növekedését. Így mivel, gyakorlatilag a NaF oldható szerves anyagok szintje változatlan maradt, a NaOH-hoz képest, ezért gyakorlatilag az előzőknek a reciprokát kapjuk. Persze ez érdekes kérdéseket vett fel a Q és K alkalmazhatóságáról a modern talajmegújító célokkal kapcsolatban.

A *permanganát-oxidálható szén (POXC)* eredmények a NaOH-oldható szerves anyagokhoz hasonló, de még jelentősebb hatásokat mutatnak az évek közötti változásra. Összességében 68,97 %-os növekedéssel 2019 és 2021 között. Mubvumba et al. (2022) szintén jelentős POXC növekedést tapasztaltak egy minimális talajművelési kísérletük során. Az Év tényező jelentős volt ($F(2, 24) = 41.943$, $p < 0.001$). A post hoc teszt minden év közötti szignifikáns különbséget mutatott ($p < 0.001$) (42. ábra). Viszont ebben az esetben a kezelés és az oltóanyag faktorban nincs szignifikáns különbség.



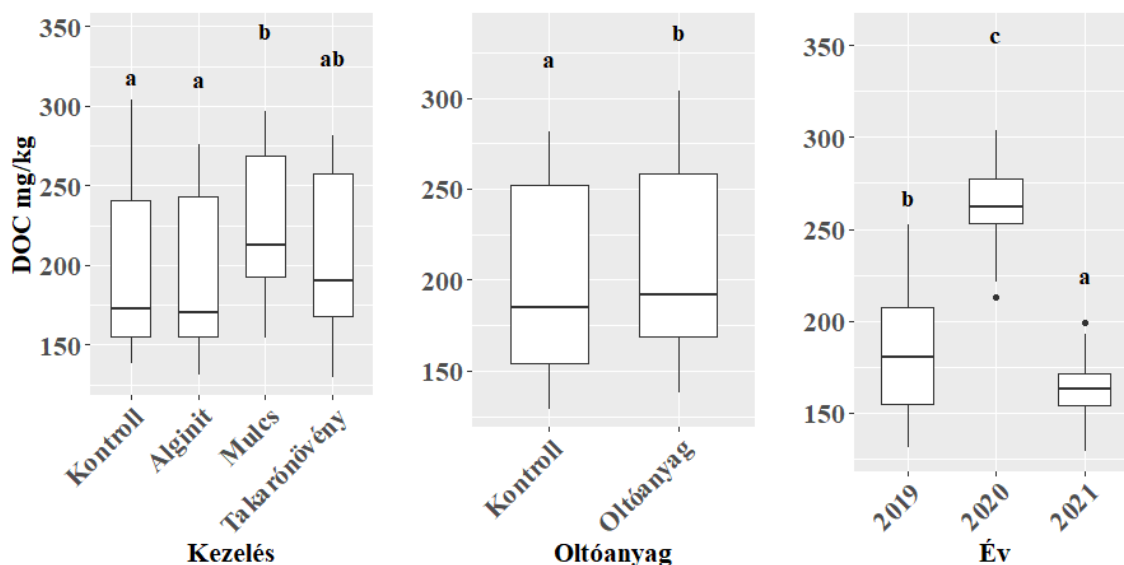
42. ábra. A POXC mennyiségének alakulása az idő hatására.

A talaj oldott szerves anyagainak (*Dissolved Organic Carbon - DOC*) változó esetében az eredmények azt mutatták, hogy az idő tényező ($F(2, 64) = 147.66, p < 0.001$) jelentős hatást gyakorolt. A DOC értékek az első év után kifejezett növekedést mutattak, majd visszatértek a kezdeti szintekre. Ez a nagy érzékenységeinek tulajdonítható, ami érzékeny a szezonális hatásokra. Továbbá, az utolsó évben egy olyan növényt (hagyma) termesztettek, amely természeténél fogva kevesebb szenet adott a talajhoz, mivel eltávolítjuk a talajból termény formájában. Az irodalom is megerősíti, hogy akár a termesztett növények, és azok későbbi humifikációja miatt is lehetnek különbségek a DOC szintben (Romero et al., 2017).

A kezeléseknek is jelentős hatásuk volt a DOC-ra ($F(3, 64) = 5.906, p < 0.01$). A kezelési csoportok összehasonlítása szignifikáns különbségeket mutatott ($p < 0.01$) a mulcs-alginit és a mulcs-kontroll páros között.

Az oltóanyag-kezelés is szignifikánsan magasabb értékeket adott az oldott szerves anyagok mennyiségében a kontrollhoz képest ($F(1, 64) = 5.104, p < 0.05$).

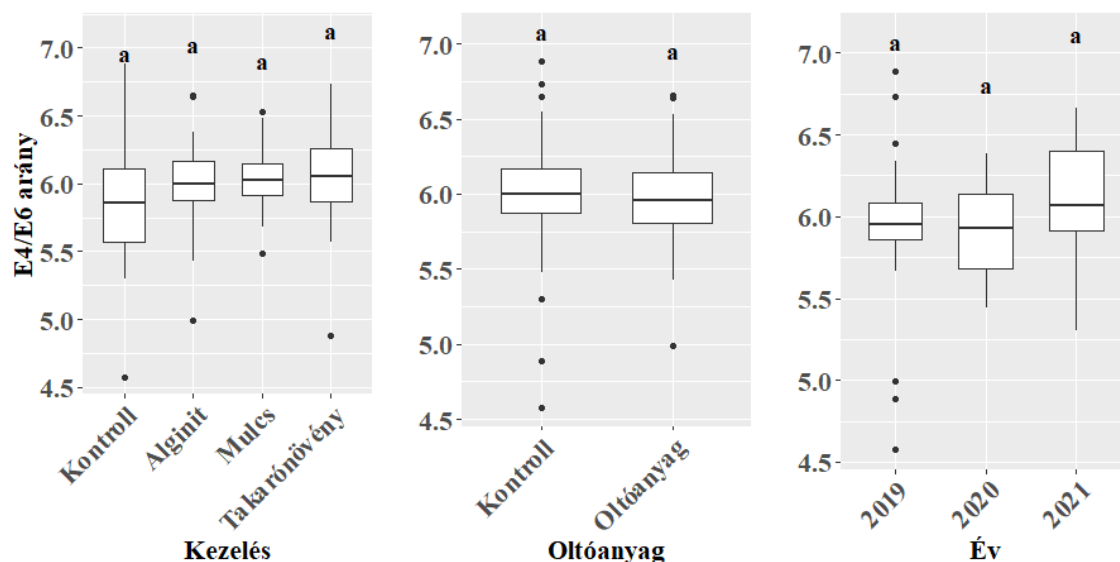
Ez azt jelenti, hogy ellentétben más módszerekkel, a DOC túlságosan érzékeny lehet az évek közötti tartós szénszint növekedésének vizsgálatához, de elég érzékeny ahhoz, hogy rövid távú kísérletben a kezelések közötti különbségeket vizsgálja (43. ábra). Az irodalom megerősíti ezeket az eredményeket, ahol a DOC változó paraméter, enyhén megemelkedett értékekkel bizonyos talajmegőrzési gyakorlatok miatt (Walmsley et al., 2011; Mailapalli et al., 2012).



43. ábra. A DOC (mg/kg) mennyisége a kezelések, oltóanyagok és idő hatására.

Ez E4/E6 nem mutatott szignifikáns különbséget egyik vizsgált faktorra se (44. ábra). Ez a mérés az oldott szerves anyagok, főként a humuszanyagok jelenlétét és minőségét jelzi a talajban. Az E4/E6 arány az abszorbanancia aránya a két hullámhosszon, és fontos információkat ad a humuszanyagok szerkezetéről és minőségéről. A magasabb (>5) E4/E6 arány általában a kevésbé érett, alacsonyabb molekulatömegű humuszanyagokat jelzi (Haddad et al., 2015). Ezek az anyagok kevésbé kondenzáltak, és a humuszanyagok bomlásának korai stádiumára utalnak. Gyakran fiatalabb, labilisabb szerves anyagokat jelentenek, amelyek könnyebben bomlanak le, így gyorsabban hasznosulnak a talaj mikroorganizmusai számára (Datta et al., 2022).

Az E4/E6 nem mutatott szignifikáns különbségeket egyik faktor esetében sem, de az év során kis növekedés figyelhető meg, és magasabb értékek voltak a Mulcs és Takarónövény kezelésnél, ami jelzi, hogy ezeknél volt a legnagyobb a friss szerves anyagok szintje. Ez jelezheti, hogy különböző talajerőgazdálkodási gyakorlatok befolyásolják a talaj szerves anyag gazdálkodását (Zalba et al., 2016).



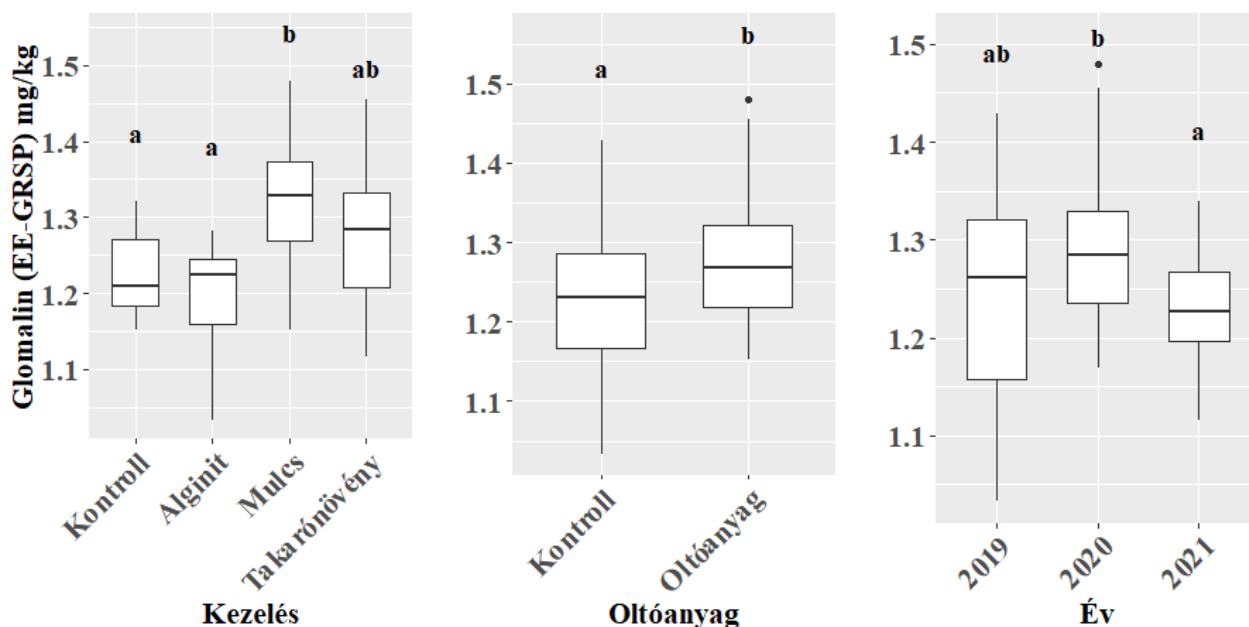
44. ábra. E4/E6 arány az eltérő kezelésekben, években és az oltóanyag hatására

A *glomalin* (*Easily extractable glomalin-related soil proteins* - *EE-GRSP*) adataink szignifikáns különbséget mutattak a kezelés tényezőre ($F(3, 65) = 11.264, p < 0.001$). A kezelési tényező post hoc tesztje szignifikáns különbséget mutatott a Mulcsozott-Kontroll ($p < 0.001$), - Alginit ($p < 0.001$), és a Takarónövény és Alginit parcellák ($p < 0.05$) talajok között (47. ábra). Bár a Mulcs és a Takarónövény kezelt parcellák hasonló medián értékekkel rendelkeztek. Az oltóanyag faktor szignifikánsan magasabb a kontrollhoz képest ($p > 0.01$). Interakció nem állt fent a faktorok között. Ez azt jelenti, hogy ezekben a körülményekben (minimális talajművelés, gyomirtószer nélkül) a Mulcsozás kezelés könnyen felülmúlja a többi kezelés terméseredményeit gyomelnyomó hatása miatt. Az oltóanyag faktor esetében az oltóanyag szignifikánsabb magasabb értékeket mutatott ($p < 0.001$) nem mutatott szignifikáns különbséget. (45. ábra)

Mivel a glomalin egy AM gombákhoz köthető glikoprotein, ez azt jelenti, hogy a többlet szénbevitel és a minimális talajbolygatás növelte az AM gombák aktivitást a Mulcs és a Takarónövény kezelésekben, így ezekben a kezelésekben a glomalin szintje a legmagasabbra emelkedett. Ezt az irodalom is alátámasztja (Juhos et al., 2023).

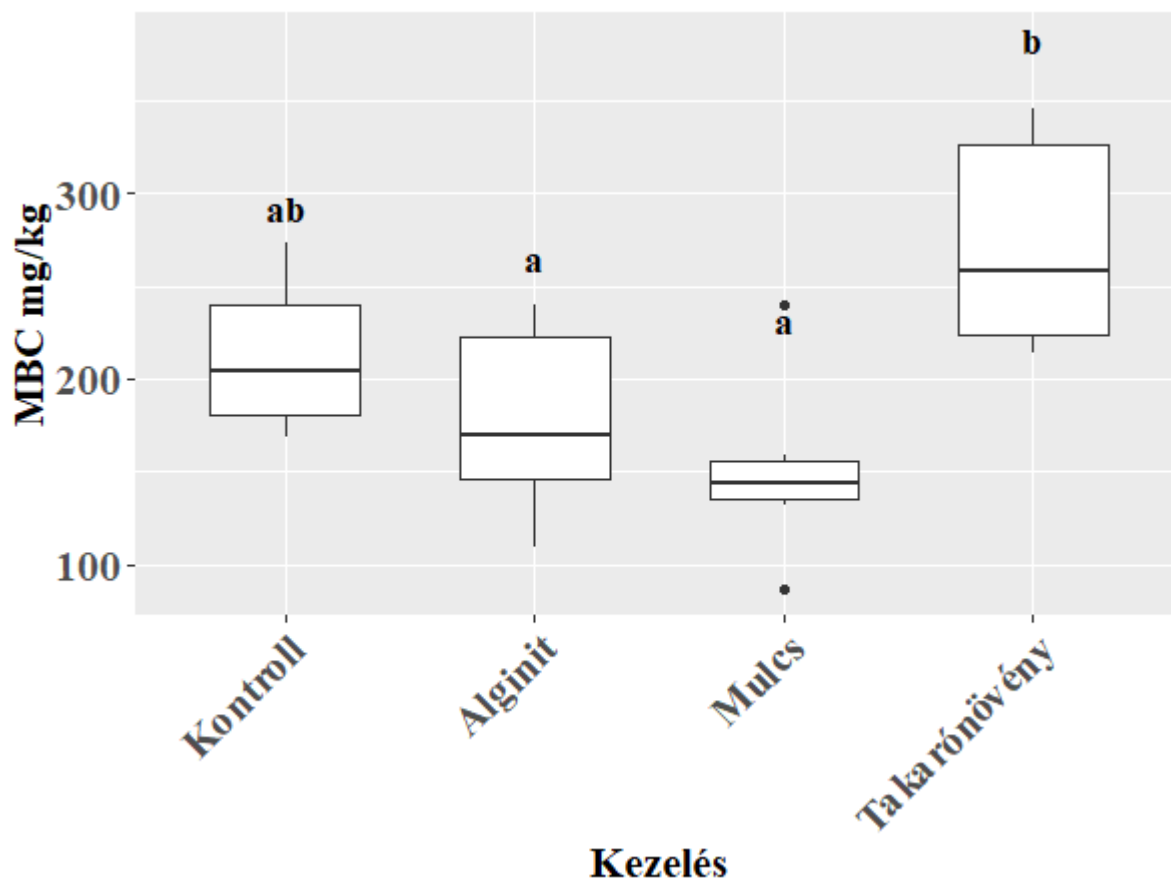
Az Alginit kezelt parcellákban mért legalacsonyabb glomalin tartalmat az ökológiai szempontból elfogadott ásványi adalékanyag Ca, P tartalma okozhatja. A fokozott foszforellátás csökkentheti az AM gombák gyökér kolonizációját, az extraradikális hifahálózatot, és így a glomalin termelést (Liu et al., 2016). Más leírások szerint az AM gombák által közvetített GRSP termelés nem feltétlenül függ a külső foszforkoncentrációktól (Cissé et al., 2021; Wu et al., 2015).

A glomalin, az idő faktor hatására minimális, de szignifikáns különbségeket mutatott a 2020 és 2021 között ($p < 0,01$). Viszont a glomalin tartalom csökkenése nem volt várható, ellentmond az irodalomnak, mivel az irodalom szerint a glomalin átalakulási, bomlási ideje években mérhető (Holátka et al., 2021).



45. ábra. A Glomalin (EE-GRSP) mg/kg mennyisége a kezelések, oltóanyagok és idő faktorra elemezve.

A mikrobiális biomasza-C (MBC) (mg/kg) értékeket az utolsó évben (2021), a talaj felső 10 cm-éből végeztük, hogy a Kezelések és az Oltóanyag hatását megvizsgáljuk. Az oltóanyagos parcellákon magasabb, de nem szignifikáns értékeket mutattunk ki. A kezelések között szignifikáns különbség volt kimutatható ($F(3, 16) = 5.529$, $p = 0.00846$). A Takarónövényes parcellák szignifikánsan magasabb értékeket mutattak az Alginittel kezelt ($p < 0.05$) és a Mulcsozott ($p < 0.001$) parcellákhoz képest is. Ez a nagyobb élőnövény biomaszából fakadhat a területen, mivel a takarónövényes parcellákon sokkal több élőnövény volt, több szén tudtak a talajba juttatni, ami táplálta a mikroorganizmusokat. Míg a mulcsozott parcellákon elhalt növényi talajtakaró volt, mi akadályozta a nem kívánt növények (gyomok) növekedését, ezzel kevesebb C kerülhetett a kiválasztott gyökérváladékok által a mikroorganizmusokhoz. Ezt az irodalom is megerősíti (Muhammad et al., 2021). A növények gyökerével bejuttatott szerves szén pedig nem tudta kompenzálni a mulcs bomlásából bejutott szerves szén mennyisége. Az alginit esetében nincs irodalmi adat, amivel össze lehetne vetni, de ez alapján úgy tűnik, hogy egy meszes talajjavító egy meszes homoktalajon negatív hatással van a talaj mikrobiális biomaszájára. (46. ábra)



46. ábra. A mikrobiális biomassza-C (MBC) mennyisége a kezelések hatására a 2021-es évben. A felső 0-10 cm-ből mintavételezve a szabadföldi kísérlet során.

A talaj szén vizsgálatok nagy mértékű változást mutattak az évek során, de érzékenyek bizonyultak a talajerőgazdálkodási technológiákra is. Az oltóanyaggal kezelt parcellákon rendre magasabb értékeket kaptunk. Ennek oka lehet az, hogy nőtt a produktivitás, vagy legalábbis a gyökérek által kiválasztott szervesanyagok-mennyisége a talajba. De ezeket az elméleteket, megfelelő mérések híján nem tudjuk igazolni. Valamint, az sem kizárt, hogy megfelelő 0. állapot felmérése híján, a már eredetileg meglévő területi heterogenitást mértük vissza, ami konzekvensen befolyásolta a terület szerves anyag eloszlását és felhalmozódását.

Lal (2014) szerint a talaj C megkötő képessége 0.5–1 t C/ha/év. Ez 1,83-3,66 t CO₂ megkötésével egyenlő. Lal (2014) 4000 × 10⁹ t C raktárt ír a talajra (3m mélységig).

0.5–1 t C/ha/év esetén évente 0,00412-0,00206 %-al nő a C-készlet. Tehát 243-486 év kell 1 %-al növelni a talaj C (és humusz) tartalmát. A fenti irodalmak és számításaink a tartós C-növekedésből indulnak ki. A rövidebb, idővel elbomló H %-ok magasabb értékeket produkálhatnak.

A bemutatott szabadföldi kísérlet alatt a TOC % 1,906 %-ról 2,116 %-ra nőtt 2019 és 2021 között. Ez a 0,21 % érték a fent kiszámolt elméleti érték felett van, még akkor is ha a kísérlet pusztán a talaj felső 20 cm-ét vizsgálta az eddig számolt 3 m helyett, és 2 évre vetítjük. Ha ezekkel korrigálunk akkor is legalább 0,007 %-nyi abszolút növekedést értünk el. Ez a 11,02 %-os relatív növekedés 2019 és 2021 között nagyrésze a friss, még humifikációra váró C-formákat is tartalmazza. Ezt jól mutatja az is, hogy a Labilis-C formákat mérő módszerek esetében a növekedés sokkal jelentősebb volt (NaOH-oldható szerves anyagok 35,89 %, POXC 68,97 %).

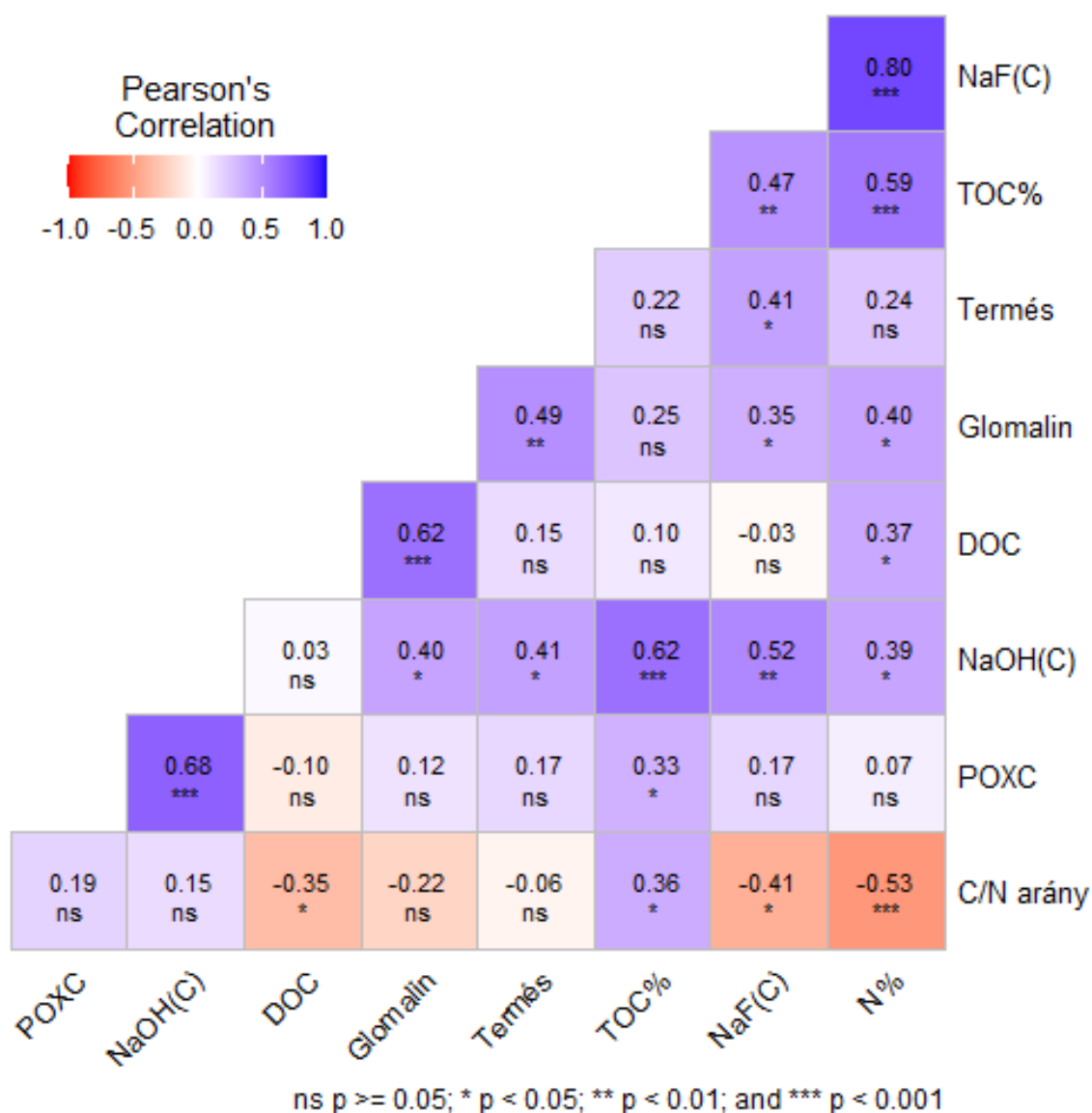
Ez a TOC % növekedés megfelel a nemzetközi kezdeményezés, hogy növeljük évente a talaj C készletét, hogy (részlegesen) kompenzáljuk a CO₂ kibocsátásunkat (Budiman et al., 2017).

4.6.5 A mért paraméterek korrelációs elemzésének eredményei a szabadföldi kísérlet adataiból

A főbb, terméssel, talaj szénnel, nitrogénnel összefüggő paramétereket korreláció analízisnek vettük alá, hogy a kapcsolataikba mélyebb betekintést nyerhessünk, és mennyire feleltethetők meg egymásnak a különböző szénmérési módszerek. Ezt a kontroll és a három fő talajregeneráló módszer adataiból tettük meg, mivel ezekhez rendelkezésünkre álltak a nitrogén adatok is.

A legerősebb korreláció a talajban található stabil szénformák (NaF-oldható C vegyületek) és a talaj teljes nitrogéntartalma között volt megfigyelhető ($r = 0,80$, $p < 0,001$). A TOC szintén pozitívan korrelált a nitrogéntartalommal ($r = 0,59$, $p < 0,001$). A talajban található könnyen lebomló szénformák mérései, a NaOH-oldható C vegyületek és a POXC is erősen korreláltak ($r = 0,68$, $p < 0,001$). A TOC és a NaOH-oldható C vegyületek között is erős korreláció volt megfigyelhető ($r = 0,62$, $p < 0,001$) (47. ábra) (Pabar et al., 2021).

Erős korreláció figyelhető meg a DOC és a gombákhoz kapcsolódó glomalin között is ($r = 0,62$, $p < 0,001$). A terméshozam mérsékelten korrelált a glomalin szintjével ($r = 0,49$, $p < 0,01$). Az irodalom szerint azonban a glomalin erősebben korrelál a TOC és a nitrogéntartalommal (Barna et al., 2020).



47. ábra. Pearson-korrelációs elemzés a vizsgált paraméterek között: NaF(C) - NaF-oldható C vegyületek, TOC% - Teljes Szerves Szén, Termés - Normalizált terméshozam, Glomalin – Glomalin (EE-GRSP), DOC – Oldott Szerves Szén, NaOH(C) – NaOH-oldható C vegyületek, POXC – Permanganát Oxidálható Szén, C/N arány, N% – Talaj Teljes Nitrogéntartalma. n.s.: nem szignifikáns, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$.

Ezek a korrelációk hasonló alapfolyamatokat jelző, szorosan összefüggő változókat sugallanak, ahogyan azt a 47. ábra is illusztrálja. Juhos et al. (2023) hasonló eredményekről számoltak be számos talaj egészségügyi indikátor korrelációjával egy hosszú távú talajmegőrzési kísérletben.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK

5.1 A mikrobiális oltások hatékonyságáról

Az általunk izolált és a kísérletek során felhasznált törzsek eltérő eredményeket mutattak a különböző környezeti körülmények hatására, beleértve a talajtípusokat, a tesztelt növényeket és az egyéb kezeléseket is. A talajspecifikus PGPM-ek adaptálása és alapos tesztelése elengedhetetlen, különösen nagyobb léptékű alkalmazások esetén. Fontos továbbá az eddigiek során nem figyelt, vagy még nem ismert tényezők alapos vizsgálata is annak érdekében, hogy ezeket a környezetbarát és gazdaságos eljárásokat szélesebb körben és nagyobb megbízhatósággal lehessen alkalmazni (Sokolova et al., 2024).

Míg a kisléptékű kísérletek biztató eredményeket hoztak, a tenyészedényes és szabadföldi kísérletekben az eredmények nem/kevés szignifikáns eredményt mutattak az oltások hatására és már nem mutatkoztak a PGPR hatások jelei (nagyobb biomassza, termés) a növényeken. Ez az oltóanyagok alkalmazása során gyakori probléma. Ilyen esetekben egyre erőteljesebb a versengés az adaptálódott, meglévő mikrobiális törzsek és a frissen kijuttatott mikroorganizmusok között. Szabadföldi kísérletünkben nem hagyományos művelésű talajon végeztük a vizsgálatokat, hanem egy ökológiai gazdálkodás alatt álló területen, ahol a talaj állapota és biológiai sokfélesége jónak mondható. Ez vélhetően megnehezítette a kijuttatott mikroorganizmusok érvényesülését a jól kialakult és stabilizálódott talaj-közösségen belül. Az eredményekből arra következtethetünk, hogy rosszabb talajokon (pl. bioremediációra szoruló területeknél) jobban és hatékonyabban érvényesülhetnek a mikrobiális oltások, különösen, ha ezekhez a degradációs tényezőkhöz adaptált törzseket használnak fel. Ezeken a talajokon a specifikus, helyhez igazított oltások képesek eredményesen növelni a növények stressz-, és például a nehézfém toleranciáját is (Dolkar et al., 2018; Han és Lee, 2005; Wong et al., 2022).

Mivel a kísérletek változatos és gyakran nem szignifikáns, esetleg tendenciaszerű eredményeket hoztak, további és alaposabb kutatások szükségesek a változó környezeti körülmények közötti vizsgálatok eredményei közötti törvények és szabályszerűségek felfedezésére. Ezáltal nagyobb lehetőség nyílhat a mikrobiális oltások és egyéb fenntartható kezelések következetes és megbízható alkalmazására a jövőben.

5.2 Az alginit, mint talajadalék, a talajtulajdonságokra gyakorolt hatása

Az alginitet az irodalom szerint elsősorban a savanyú, vagy erre érzékeny és a tápanyagban szegény talajokon alkalmazzák sikeresen. Kutatásunk során minimális eredményeket tapasztaltunk az ásványianyag-tartalom növekedésében, mint például a kalcium (Ca) és a foszfor (P) szintjének emelkedésében. A vizsgált meszes Soroksári talajon azonban

az alginit kezelés nem okozott szignifikáns különbségeket, és nem volt interakciója az alkalmazott oltóanyagokkal, mivel ezen a talajon nem álltak fenn az alginnal és a talajokkal kapcsolatos problémák. Az alginit alkalmazása különösen ajánlott olyan talajokon, amelyeknél például a túlzott nitrogénműtrágyázás hatására csökkent le a talaj optimális pH-ja a savas irányba (Ragályi et al., 2019).

5.3 Az ökológiai gazdálkodásban használt talajerőgazdálkodási technológiák hatása a talajok tulajdonságaira

A szabadföldi kísérletben, amely a talajmegújító művelés hatásait vizsgálta, kutatásunk főként a talaj biológiai tulajdonságaira és a talaj szervesanyag-formáinak változására összpontosított. A legjelentősebb pozitív változásokat a takarónövényekkel és a mulcsozással kezelt parcellákon tapasztaltuk. A takarónövények által megkötött nitrogén (N) és a gyökereiken keresztül a talajba juttatott szén (C), valamint a mulcs bomlásából származó szén jelentősen növelte a talaj szerves széntartalmát. Mivel az egész kísérleti terület minimális művelést kapott, ezek az értékek az egész területen emelkedtek az évek során, ami jól mutatja a minimális művelés hatékonyságát egy arenosol talajon, és az idő jelentőségét.

Azonban a minimális művelés jelentős gyomnövekedési problémát okozott, amelyet a mulcs alkalmazása jelentősen csökkentett, így ezeken a parcellákon volt a legmagasabb a terméshozam. Ezért ilyen körülmények között javasoljuk a mulcs alkalmazását, vagy ha a cél a maximális biomassza és talaj széntartalom növekedésének elérése, akkor a takarónövények használatát. Az utóbbi különösen az állatok integrálása mellett lehet kifizetődő, mivel a biomassza takarmánnyként hasznosítható (Brown et al., 2018).

A talajbiológiai mérőszámok vizsgálatakor azt tapasztaltuk, hogy az MPN-módszerrel kimutatható mikroorganizmusok száma csökkent az évek során. Azonban a mikrobiális biomasszára utaló talaj enzimaktivitás (DHA) nem követte ezt a trendet, ami arra utalhat, hogy a talajtáplálék-hálózat átalakulása történt (Sinsabaugh et al., 2016), magasabb rendű szervezetekkel, amelyeket a módszereink nem tudtak kimutatni. Ezek pontosabb nyomon követése érdekében érdemes lenne közvetlen mikrobiális biomasszát mérő módszereket alkalmazni (Vance et al., 1987a), illetve a talajfauna vizsgálatát folytatni (Bokova et al., 2023).

5.4 A talajerőgazdálkodási módok (és az alginit) interakciója az oltóanyagokkal

Az interakció a különböző kezelések között elhanyagolható volt. Azonban a talaj és az oltóanyag közötti kölcsönhatás néhol befolyásolta a kitenyészthető aerob baktériumok számát, valamint a mikroszkopikus gombák számát a Tófej és a Szeghalom talajokon. Emellett az

alginit és az oltóanyag interakciója megváltoztatta a cellulózbontás sebességét is (Pabar et al., 2024).

Ezen esetek azt mutatják, hogy a kutatásban alkalmazott kezelések, és anyagok között elhanyagolható volt az interakció hatás, és a legjelentősebb hatása a talajoknak van. De mivel az oltóanyagok (a saját készítmény és a kereskedelmi termék egyaránt) ritkán mutattak szignifikáns hatást, így nehéz biztos következtetéseket levonni arra vonatkozólag, hogy mennyire van, vagy nincs érdemi hatásuk a vizsgált faktoroknak az oltóanyagok eredményességére.

5.5 A talajregeneráló módszerek hatásához alkalmazható talajszervesanyag mérési módszerek különböző időtávokra

A minimum-till művelési módok esetében különösen fontos az adott időtávhoz és kezeléshez legmegfelelőbb szervesanyag-mérési módszerek kiválasztása. Ennek célja, hogy a kezelések hatásai a kísérlet ideje alatt jól kimutathatóak legyenek, és ne vesszenek el a variabilitás vagy telítődési görbe miatt. Kísérleti eredményeink alapján a következő módszereket ajánlhatjuk:

Rövidtávú vizsgálatok: A *dissolved organic carbon (DOC)* mérések a leghatékonyabbak. Ezek a mérések gyorsan tükrözik a szerves anyag változásait rövid időn belül, de éppen ezért, érdemes lenne ezeket többször is vizsgálni évente.

Középtávú vizsgálatok: Ajánlott a *NaOH-oldható szerves anyagok* vizsgálata és a *permanganát-oxidálható szén (POXC)* mérése. Emellett a *Hargitai-féle humuszminőség* vizsgálata is alkalmazható, azonban fontos megjegyezni, hogy ebben az esetben az értékelést nem csak a Q vagy K alapján kell értékelni, hanem külön-külön vizsgálni a NaF és NaOH oldható szerves anyagokat (ahogy Hargitai is tette), mert így nyomon követhető, hogy a minőségibb, szerves anyagokat jelző (NaF oldható) értékek nem változnak jelentősen, hanem frissebb (NaOH oldható) szerves anyagok mennyisége nőtt meg (Pabar et al., 2021).

Hosszútávú vizsgálatok: Noha az általunk folytatott kísérlet hossza nem alkalmas pontos adatok szolgáltatására hosszabb távú változásokról, azonban az alapján, hogy néhány vizsgált paraméter minimálisan változott csak, ezért javaslatokat tehetünk erre. Így javasolt a különböző *teljes szerves szén (TOC)* módszerek alkalmazása, valamint a *nátrium-fluorid (NaF) oldható*, lassabban humifikálódó szerves anyagok vizsgálata, amelyek hosszabb időtávon mutatják a szerves anyagok tartós változásait. A *glomalin (EE-GRSP)* is a hosszútávú mérésekhez alkalmas (Holátko et al., 2021), de ezt az eredményeink nem támasztották alá.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Az általunk az adott talajból izolált A5: *Enterobacter ludwigii* törzs képes volt pozitív hatást kifejteni a törzsszelekció első lépései során a mustár és angol perje növények növekedésére. A pozitív hatás létrejött a talaj nem specifikus FDA enzimjének a nagyobb aktivitásához is köthető. Ez az eredmény adott talajból származó törzsek fontosságára és a felhasználás sikerességének a potenciális jobbítására hívja fel a figyelmet.

2. Az izolált törzseket az eddig még nem, vagy csak kevésbé kutatott káliumoldó képességre (KSB) is teszteltük. Három saját izolálású törzsnél (**D1-Kosakonia cowanii**, **A3-Bacillus coreaensis**, **C1-Lelliottia amnigena**) elsőként mutattuk ki a KSB képességet, amely ezzel az új, eddig még nem vagy kevésbé kutatott tulajdonsággal alkalmas lehet gyakorlati felhasználásra is.

3. Az alginit vizsgálata esetén kimutattuk, hogy a talajok mellett a növény fajok interakciójának a vizsgálata is lényeges a talajbiológiai hatások kialakulásában. Nagyon eseti volt, hogy hol milyen irányba (növeli, vagy csökkenti) befolyásolja szignifikánsan a talajbiológiai (DHA, mikrobiális abundancia, szerves anyag bontó képesség) eredményeket az alginit. Ez az eredmény kiegészíti a korábbi kutatásokat, ahol a talajsavasodás problémáját, és alacsony tápanyag tartalmat kompenzálták vele. Elmondható, hogy az alginit felhasználási köre az általánosan ismert talajtulajdonságok szerint limitált és helyspecifikus módon lehet leginkább eredményes.

4. A nemzetközi és a hazai ismert szénvizsgálatok összehasonlításával érzékenységbeli különbségeket tudtunk megállapítani és pontos összehasonlító mérésekkel alátámasztani. A POXC a NaOH oldható szerves anyagokkal mutatott erős pozitív összefüggést ($r=0.68$, $p<0.001$), ami alátámasztja azt a feltételezésünket, hogy ezek a frissebb, labilisabb, az aktuálisan hozzáférhető szerves anyagokról adnak információt. Ezek az eredmények a hazai és nemzetközi módszerek összehasonlíthatóságához járulnak hozzá.

5. A talajerőgazdálkodási művelésmódok nyomon követésére alkalmazható szervesanyag-vizsgálatokat a művelésmód-váltás óta eltelt hatóidő szerint célszerű megválasztani. Amíg a POXC és a NaOH oldható szerves anyagok vizsgálata rövid távon a legjobb. Addig a TOC és a NaF oldható szerves anyagok vizsgálata hosszabb távú vizsgálatokhoz bizonyult alkalmasabbnak.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A fenntartható mezőgazdaság alapvető célja a talaj termékenységének és egészségének fenntartása, amely elengedhetetlen a globális élelmiszerbiztonság és a környezeti stabilitás szempontjából. A modern mezőgazdasági gyakorlatok, mint a túlzott műtrágya- és vegyszerhasználat, hozzájárulnak a talaj degradációjához, amely ellentétes hatást gyakorol a talaj biológiai aktivitására és szerkezetére. Ez hosszú távon negatívan érinti a környezeti egészséget, beleértve a vízkészletek szennyezését és a biodiverzitás csökkenését.

A vegyszermentes ökológiai gazdálkodást és a minimális talajművelést előtérbe helyező talajmegújító mozgalmak alternatív megoldásokat kínálnak. Ezek a módszerek a talaj természetes tápanyag-körforgásának fenntartására, a biológiai sokféleség növelésére, és a környezetbarát gazdálkodási technikák alkalmazására összpontosítanak. Ezen gyakorlatok középpontjában a talaj szerkezetének megóvása és a biológiai aktivitás fenntartása áll, miközben a gyomproblémák kezelése is kiemelt figyelmet kap.

A fenntartható módszerek implementálása során jelentkező kihívások kezelésére a mikrobiális oltóanyagok és az ásványi anyagok, mint az alginit használata is teret kap. Ezek a módszerek lehetőséget biztosítanak a talaj tulajdonságainak javítására, a talajbiológia aktiválására, és ezen keresztül a növényi egészség és termékenység elősegítésére, de ezeket a megfelelő körülmények között, talajokon, növényekkel érdemes használni. Ezek további kutatást igényelnek.

A kutatás során megvizsgáltuk a mikrobiális oltóanyagok hatékonyságát különböző talajtípusokon, ahol az adaptált és tesztelt törzsek eltérő eredményeket mutattak. Fontosnak bizonyult az ismeretlen tényezők alapos vizsgálata, hogy a környezetbarát és gazdaságos eljárások szélesebb körben alkalmazhatóak legyenek.

A talajregeneráló művelési módok, mint a minimális talajművelés (minimum-till) és a takarónövények használata, jelentős pozitív változásokat eredményeztek a talaj szerves széntartalmának növelésében. Azonban a gyomnövekedés kezelése továbbra is kihívást jelentett, amit a mulcs alkalmazása és a takarónövények stratégiai használata mérsékel.

A kutatás során felvetett hipotéziseink és célkitűzéseink alapján az eredmények rávilágítottak arra, hogy a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok és a talajművelési technikák innovatív alkalmazása kulcsfontosságú a mezőgazdaság jövője és a környezeti fenntarthatóság szempontjából. Ezek a módszerek nemcsak a termelékenység növelésében, hanem a klímaváltozás elleni küzdelemben is fontos szerepet játszanak, elősegítve a CO₂ megkötését és a talaj egészségének hosszú távú fenntartását.

Hatásaik jobb megismeréséhez érdemes kiválasztani a megfelelő talajparamétereket és vizsgálni őket hosszabb távon. Ezen az időtávon arenosol talajon, talajszervesanyagok vizsgálata hozta legátütőbb eredményeket, ezen belül is a POXC, az NaOH oldható szerves anyagok. De ezek mellett a talajbiológiai eredmények is látványos eredményeket mutattak, viszont ezeket érdemes lenne kiegészíteni további, a mikrobiális biomasszát, vagy a talaj biodiverzitást célzó méréseket alkalmazni.

Az eredmények és a kutatási folyamat során szerzett tapasztalatok alapján jól látható, hogy a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok és a talajkezelési technikák további fejlesztése és alkalmazása elengedhetetlen a globális élelmiszerbiztonság és a környezeti fenntarthatóság előmozdításához.

8. SUMMARY

The fundamental goal of sustainable agriculture is the maintenance of soil fertility and health, which is essential for global food security and environmental stability. Modern agricultural practices, such as excessive use of fertilizers and chemicals, contribute to soil degradation, adversely affecting soil biological activity and structure. This, in turn, negatively impacts environmental health over the long term, including pollution of water resources and reduction in biodiversity.

Chemical-free organic farming and soil regenerative movements that emphasize minimal soil cultivation offer alternative solutions. These methods focus on maintaining the natural nutrient cycling of the soil, enhancing biological diversity, and applying eco-friendly farming techniques. At the heart of these practices is the preservation of soil structure and the maintenance of biological activity, while also prioritizing weed management. The implementation of sustainable methods involves challenges that are addressed through the use of microbial inoculants and minerals like alginite. These methods provide opportunities to improve soil properties, activate soil biology, and thereby enhance plant health and productivity, although these should be used under appropriate conditions with specific soils and plants, requiring further research.

Our research examined the effectiveness of microbial inoculants across different soil types, where adapted and tested strains showed varying results. It was crucial to thoroughly investigate unknown factors to ensure that these eco-friendly and economical processes can be widely implemented.

Soil regenerative practices, such as minimal tillage (minimum-till) and the use of cover crops, resulted in significant positive changes in increasing the soil's organic carbon content. However, weed management continued to be a challenge, which was mitigated by the strategic use of mulches and cover crops.

Based on our hypotheses and objectives, the findings highlighted that the innovative application of sustainable agricultural practices and soil management techniques is crucial for the future of agriculture and environmental sustainability. These methods not only enhance productivity but also play a significant role in combating climate change by facilitating CO₂ sequestration and maintaining long-term soil health.

To better understand their effects, it is advisable to select appropriate soil parameters and study them over an extended period. In our research, the examination of soil organic matter on arenosol soil showed the most impactful results, particularly through the POXC and NaOH

soluble organic matter tests. Additionally, the biological results were also significant, but it would be beneficial to complement these with further measurements targeting microbial biomass or soil biodiversity.

The experiences and results from the research process clearly demonstrate that further development and application of sustainable agricultural practices and soil management techniques are indispensable for advancing global food security and environmental sustainability.

A disszertáció témaköréből megjelent lektorált publikációk, a *kiemelt kulcsszavakkal*

Folyóiratcikkek (IF-es)

1. **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, 1586. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091586>
2. Kotroczó, Zs., Juhos, K., Biró, B., Kocsis, T., **Pabar, S. A.**, Varga, Cs., & Fekete, I. (2020). *Effect of detritus manipulation on different **organic matter decompositions** in temperate deciduous forest soils.* *Forests*, 11(6), 675-689. <https://doi.org/10.3390/f11060675>
3. Gorliczay, E., Boczonádi, I., Kiss, N. É., Tóth, F. A., **Pabar, S. A.**, Biró, B., Kovács, L. R., & Tamás, J. (2021). ***Microbiological effectivity** evaluation of new poultry farming organic waste recycling.* *Agriculture-Basel*, 11(7), Paper 683. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070683>

Folyóiratcikkek (Lektorált, nem IF-es)

4. **Pabar, S. A.**, Mónok, D., Kotroczó, Zs., & Biró, B. (2020). *Soil microbial parameters and synergies between bean growth and **microbial inoculums** as a dependence of five soils with different characteristics.* *Hungarian Agricultural Engineering*, 37, 27-33. <http://doi.org/10.17676/HAE.2020.37.27>
5. Kocsis, T., **Pabar, S. A.**, Ferschl, B., Kotroczó, Zs., Mohácsi-Farkas, Cs., & Biró, B. (2020). ***Biotic and abiotic risks** of soil biochar treatment for food safety and human health.* *Acta Universitatis Sapientiae Alimentaria*, 13(1), 69-84.
DOI: 10.2478/ausal-2020-0004
6. **Pabar, S. A.**, Mónok, D., Ferschl, B., Kotroczó, Zs., & Biró, B. (2020). *Néhány kritikus talaj-tulajdonság a **mikrobiális oltások** alkalmazásánál bokorabbal tenyészedény-kísérletben.* *Talajvédelem*, (1216-9560), 163-175.
7. **Pabar, S. A.**, Prettl, N., Kotroczó, Z., & Biró, B. (2023). *Módszertani fejlesztés **mikrobiális oltótörzsek** gyors hatásvizsgálatára két tesztnövényt.* *Journal of Central European Green Innovation*, 11(2), 59-67.
<https://doi.org/10.33038/jcegi.4851>

Teljes terjedelmű konferencia közlemények:

8. Biró, B., Dudás, A., Wass-Matics, H., Kocsis, T., **Pabar, S. A.**, Tóth, E., Szalai, Z., Kotroczó, Zs. (2018): *Improved soil- and tomato quality by some **biofertilizer products**: 150 éves a debreceni agráróktatás. Jubileumi kötet.* Agrártudományi Közlemények, pp. 93-107, 15 p.
9. **Pabar S A**, Begum S R, Kotroczó Zs, Kardos L, Mónok D, Pribeli A, Biró B. *A saláta (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) növekedésére és a **talajállapotra ható bioeffektív kezelések.*** In: Füleky Gy (szerk.) XIV. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia kiadványa. Gödöllő, Magyarország, 018.04.05-2018.04.07. pp. 236-241.

ISBN:978-615-00-1645-0

10. **Pabar S A**, Begum S R, Mónok D, Pribeli A, Biró B. *A bioeffektív **talajoltó kezelések** hatása a **talaj biológiai paramétereire** saláta és bazsalikom tesztnövényekkel.*In: XXIV. Ifjúsági Tudományos Fórum. Keszthely, Magyarország, 2018.05.24. Keszthely: Pannon Egyetem Georgikon Kar, pp. 1-6.

ISBN:978-963-9639-90-4

11. Begum S R, **Pabar S A**, Kotroczó Zs, Kardos L, Erős-Honti Zs, Biró B. *Growth of basil (*Ocimum basilicum* L.) and **soil microbial enzyme activities** with biotic and abiotic soil treatments in pot experiments.* In: Füleky György (szerk.) XIV. Kárpát-Medencei

Környezettudományi Konferencia kiadványa. Gödöllő, Magyarország, 2018.04.05-07. pp. 284-288.

ISBN:978-615-00-1645-0

12. Kocsis T., **Pabar SA**, Kotroczó Zs, Domonkos M, Sheak RB, Kardos L, Biró B (2018): *Risk-management and food safety aspects of biochar and vermicompost applications*. In: András, I., Rajcsányi-Molnár, M. (szerk.) East - West cohesion II.: Strategical study volumes. Subotica: Čikoš Group, 2018. pp. 120-126.

ISBN:978-86-82621-30-0

13. **Pabar, S. A.**, Kotroczó, Zs., Mónok, D., Ferschl, B., Prettl, N., Péter, D., & Biró, B. (2021). *Korreláció vizsgálat a talaj szervesanyag minősége és kémiai, biológiai tulajdonságai között*. In D. Cseresznyés & Cs. Király (Eds.), XVI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Absztrakt kötet, pp. 187-192. Budapest, Hungary: ELTE Természettudományi Kar.

ISBN: 9789638221827.

14. Prettl, N., Kotroczó, Zs., **Pabar, S. A.**, Juhos, K., & Biró, B. (2021). *Starterműtrágya hatás-vizsgálata kukoricában eltérő tápanyag-ellátottságú talajokon a talajbiológiai tulajdonságok tükrében*. In D. Cseresznyés & Cs. Király (Eds.), XVI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia [16th Carpathian Basin Conference for Environmental Sciences]: Absztrakt kötet [Abstract book] (pp. 193-199). Budapest, Hungary: ELTE Természettudományi Kar.

ISBN 9789638221827.

15. 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*. In D. Cseresznyés & Cs. Király (Eds.), XVI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Absztrakt kötet, pp. 151-156. Budapest, Hungary: ELTE Természettudományi Kar.

ISBN: 9789638221827.

16. Prettl, N., Kotroczó, Zs., Priyo, A. N., **Pabar, S. A.**, Biró, B., & Juhos, K. (2022). *Mikrobiológiai termésnövelők és foszfor műtrágya hatása a kukorica növekedésére, két különböző talajtípuson*. In I.-L. Szigyártó & A. Szikszai (Eds.), XVII. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia: Konferenciakötet (pp. 160-165). Cluj-Napoca, Romania: Ábel Kiadó.

A kutatási témához közvetlenül nem kapcsolódó publikációk

Folyóiratcikkek (IF-es)

17. Freytag, C., **Pabar, S. A***, Demeter, Z., Simon, Á., Resetár, A., Molnár, V. A., Sramkó, G., & Máthé, C. (2017). *Production and characterization of tissue cultures of four Crocus species from the Carpathian Basin*. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 59(2), 31-39. <https://doi.org/10.1515/abcsb-2017-0009>

*megosztott első szerzőség

18. Mónok, D., Kardos, L., **Pabar, S. A.**, Kotroczó, Zs., Tóth, E., & Végvári, Gy. (2021). *Comparison of soil properties in urban and non-urban grasslands in the Budapest area*. Soil Use and Management, 37(4), 790-801.

<https://doi.org/10.1111/sum.12632>

Folyóiratcikkek (Lektorált)

19. Kotroczó, Z., Juhos, K., Biró, B., Kocsis, T., **Pabar, S. A.**, & Fekete, I. (2020). *Nemzetközi Tea-avar bomlási kísérlet eredményei hazai lombhullató erdő eltérő avarprodukciójú kezeléseiben*. Talajvédelem, (1216-9560), 117-132.

20. Mónok, D., Kardos, L., **Pabar, S. A.**, & Kotroczó, Zs. (2020). *Physico-chemical and ecotoxicological characterizations of suburban soils*. International Journal of Environmental Pollution and Remediation, 8, 23-29. DOI: 10.11159/ijepr.2020.003

Teljes terjedelmű konferencia közlemények:

21. Erős A, **Pabar S A**, Mónok D, Kardos L (2018): *Szennyezett talaj ex situ kezelése települési zöldhulladékból előállított komposzttal tenyészedényes kísérletben*. In: Fülekgy György (szerk.) XIV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia kiadványa. Gödöllő, Magyarország, 2018.04.05-2018.04.07. Gödöllő: pp. 132-137

ISBN:978-615-00-1645-0

22. Mónok, D., Kardos, L., **Pabar, S. A.**, & Kotroczó, Zs. (2020). *Külvárosi zöldterületek talajainak vizsgálata különböző biotesztekkel*. In D. Cseresznyés, Cs. Király, V. Forray, & Cs. Szabó (Eds.), Kárpát-medencei Környezettudományi Kutatások Aktuális Eredményei. Absztrakt kötet, pp. 109-114. Online konferencia, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar.

ISBN 9789634892267.

23. Mónok, D., Kardos, L., **Pabar, S. A.**, & Kotroczó, Zs. (2020). *Applying bioassays for investigation of soils from suburban green sites*. In Proceedings of the 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, CSEE'20 (Paper ICEPTP 108, pp. 1-6). Lisbon, Portugal: International ASET Inc. DOI: 10.11159/iceptp20.108

24. Rozmann, V., **Pabar, S. A.**, Kotroczó, Zs., Ladányi, M., & Kardos, L. (2022). *Effects of lignite-derived humic acids and flue gas desulphurisation gypsum on maize biomass and soil enzyme activity in saline and potting soil*. In I.-L. Szigyártó & A. Szikszai (Eds.), XVII. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia: Konferenciakötet (pp. 243-252). Cluj-Napoca, Romania: Ábel Kiadó.

9. IRODALOMJEGYZÉK

- Abdel-Fattah, G.M., Shabana, Y.M., Ismail, A.E., Rashad, Y.M., 2007. *Trichoderma harzianum*: a biocontrol agent against *Bipolaris oryzae*. *Mycopathologia* 164, 81–89. <https://doi.org/10.1007/s11046-007-9032-9>
- AbdelRahman, M.A.E., 2023. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 34, 767–808. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>
- Abdul Malek, A., SA, N., Kadir, J., Vadamalai, G., Halimi, M., 2023. *Enterobacter tabaci* and *Bacillus cereus* as Biocontrol Agents against Pathogenic *Ralstonia solanacearum* of Eggplant 20, 24–30. <https://doi.org/10.13057/biotek/c200104>
- Abdullahi, S., Haris, H., Zarkasi, K.Z., Amir, H.G., 2021. Complete genome sequence of plant growth-promoting and heavy metal-tolerant *Enterobacter tabaci* 4M9 (CCB-MBL 5004). *J Basic Microbiol* 61, 293–304. <https://doi.org/10.1002/jobm.202000695>
- Abou-Zeid, M., 2011. Improvement of soybean growth by co-inoculation with *Rhizobium* and plant growth-promoting rhizobacteria. *Egyptian Journal of Applied Science* 26 (11), 445–449.
- Acien, J.M., Cañizares, E., Candela, H., González-Guzmán, M., Arbona, V., 2023. From Classical to Modern Computational Approaches to Identify Key Genetic Regulatory Components in Plant Biology. *International Journal of Molecular Sciences* 24, 2526. <https://doi.org/10.3390/ijms24032526>
- Adam, G., Duncan, H., 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 943–951. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
- Ahmad, M., Adil, Z., Hussain, A., Mumtaz, M., Nafees, M., Ahmad, I., Jamil, M., 2019. Potential of phosphate solubilizing bacillus strains for improving growth and nutrient uptake in mungbean and maize crops. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 56, 283–289. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/19.7285>
- Antonangelo, J.A., Neto, J.F., Crusciol, C.A.C., Zhang, H., Alleoni, L.R.F., 2022. Lime and calcium-magnesium silicate cause chemical attributes stratification in no-till fields. *Soil and Tillage Research* 224, 105522. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105522>
- Ayala-Zepeda, M., Rojas-Padilla, J., Díaz-Rodríguez, A.M., Chávez-Luzanía, R.A., Parra Cota, F.I., Villalobos, S. de los S., 2024. Chapter 12 - Performance evaluation of bacterial inoculants in the field, in: Villalobos, S. de los S. (Ed.), *New Insights, Trends, and Challenges in the Development and Applications of Microbial Inoculants in Agriculture, Developments in Applied Microbiology and Biotechnology*. Academic Press, pp. 117–127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18855-8.00012-6>
- Bååth, E., Anderson, T.-H., 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 955–963. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00154-8)
- Balláné Kovács A., Kremper R., Vágó I., Filep T., 2008. Az NH_4NO_3 és a Phylazonit MC baktériumtrágya hatása a talaj könnyen oldható nitrogén-, foszfor- és káliumtartalmára. *Talajvédelem különszám*
- Barna, G., Makó, A., Takács, T., Skic, K., Füzy, A., Horel, Á., 2020. Biochar Alters Soil Physical Characteristics, Arbuscular Mycorrhizal Fungi Colonization, and Glomalin Production. *Agronomy* 10, 1933. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121933>

- Batjes, N., 1996. Total Carbon and Nitrogen in the Soils of the World. *European Journal of Soil Science* 47, 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bayraklı, B., 2022. Effect of *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* applied together with rock phosphate on wheat yield and some soil properties in a calcareous soil. *Eurasian Journal of Soil Science* 11, 198–205. <https://doi.org/10.18393/ejss.1057950>
- Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., Wade, P., Eufrazio, R.M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M.G., James, R.H., Pearce, C.R., Mercure, J.-F., Pollitt, H., Holden, P.B., Edwards, N.R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N.F., Janssens, I.A., Hansen, J., Banwart, S.A., 2020. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Bhaduri, D., Purakayastha, T.J., Patra, A.K., Singh, M., Wilson, B.R., 2017. Biological indicators of soil quality in a long-term rice–wheat system on the Indo-Gangetic plain: combined effect of tillage–water–nutrient management. *Environ Earth Sci* 76, 202. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6513-0>
- Bhattacharyya, P.N., Jha, D.K., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J Microbiol Biotechnol* 28, 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Biro, B., Bayoumi Hamuda, H.E.A.F. & Kecskes, M., 1995. Associative, symbiotic N₂-fixers and scavenger strains, affected by Cu²⁺ and Zn²⁺ in vitro. *NATO ASI Series. Series G: Ecological Sciences*, 37, pp.495-500.
- Biró, B., Dudás, A., Wass-Matics, H., Kocsis, T., Pabar, S., Tóth, E., Szalai, M., Kotroczó, Z., 2018. Improved soil and tomato quality by some biofertilizer products. *Acta Agraria Debreceniensis* 93–105.
- Biró, B., Köves-Péchy, K., Vörös, I., Takács, T., Eggenberger, P., Strasser, R.J., 2000. Interrelations between *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers and arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of alfalfa in sterile, AMF-free or normal soil conditions. *Applied Soil Ecology* 15, 159–168. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00092-5)
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., Hergert, G.W., 2015. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agronomy Journal* 107, 2449–2474. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
- Bokova, A.I., Panina, K.S., Dridiger, V.K., Gadzhumarov, R.G., Kuznetsova, N.A., Potapov, M.B., 2023. Soil-dwelling springtails as indicators of the efficiency of No-till technologies with different amounts of mineral fertilizers in the crop rotation on chernozem soils. *Soil and Tillage Research* 232, 105760. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105760>
- Bottlik, L., Kalmár, T., Csorba, Sz., Szemők, A. és Birkás, M., 2012. Talajművelés új szemlélete – a precíziós növénytermesztés alapjai. *Agrártudományi Közlemények*, 2012/49, pp.123. Szent István Egyetem Növénytermesztési Intézet, Gödöllő.
- Brady, C.; Cleenwerck, I.; Venter, S.; Coutinho, T.; De Vos, P. Taxonomic evaluation of the genus *Enterobacter* based on multilocus sequence analysis (MLSA): Proposal to reclassify *E. nimipressuralis* and *E. amnigenus* into *Lelliottia* gen. nov. as *Lelliottia nimipressuralis* comb. nov. and *Lelliottia amnigena* comb. nov., respectively, *E. gergoviae* and *E. pyrinus* into *Pluralibacter* gen. nov. as *Pluralibacter gergoviae* comb. nov. and *Pluralibacter pyrinus* comb. nov., respectively, *E. cowanii*, *E. radicincitans*, *E. oryzae* and *E. orachidis* into *Kosakonia* gen. nov. as *Kosakonia cowanii* comb. nov.,

- Kosakonia radicincitans* comb. nov., *Kosakonia oryzae* comb. nov. and *Kosakonia arachidis* comb. nov., respectively, and *E. turicensis*, *E. helveticus* and *E. pulveris* into *Cronobacter* as *Cronobacter zurichensis* nom. nov., *Cronobacter helveticus* comb. nov. and *Cronobacter pulveris* comb. nov., respectively, and emended description of the genera *Enterobacter* and *Cronobacter*. *Syst Appl Microbiol* **2013**, 36 (5), 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2013.03.005>
- Brown, G., 2018. *Dirt to Soil: One Family's Journey into Regenerative Agriculture*, 1st edition. ed. Chelsea Green Publishing, White River Junction, Vermont.
- Budiman, M., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Buurman, P., Nierop, K.G.J., 2007. NaOH and Na-Na₄P₂O₇-extractable organic matter in two allophanic volcanic ash soils of the Azores Islands — quantified pyrolysis-GC/MS data and factor analysis, in: Arnalds, Ó., Óskarsson, H., Bartoli, F., Buurman, P., Stoops, G., García-Rodeja, E. (Eds.), *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 401–410. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1_29
- Buzás, I. (ed.) (1988) *Talaj- és agrokémiai módszerkönyv. 2*. Budapest: Mezőgazdasági Kiadó.
- Campbell, C.D., Chapman, S.J., Cameron, C.M., Davidson, M.S., Potts, J.M., 2003. A Rapid Microtiter Plate Method To Measure Carbon Dioxide Evolved from Carbon Substrate Amendments so as To Determine the Physiological Profiles of Soil Microbial Communities by Using Whole Soil. *Appl Environ Microbiol* 69, 3593–3599. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.6.3593-3599.2003>
- Cantabella, D., Dolcet-Sanjuan, R., Teixidó, N., 2022. Using plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) to improve plant development under in vitro culture conditions. *Planta* 255, 117. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03897-0>
- Chatterjee, A., Lal, R., Wielopolski, L., Martin, M.Z., Ebinger, M.H., 2009. Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28, 164–178. <https://doi.org/10.1080/07352680902776556>
- Chi, W.-J., Youn, Y.S., Park, J.-S., Hong, S.-K., 2015. *Bacillus coreaensis* sp. nov.: a xylan-hydrolyzing bacterium isolated from the soil of Jeju Island, Republic of Korea. *J Microbiol* 53, 448–453. <https://doi.org/10.1007/s12275-015-5140-2>
- Chmolewska, D., Hamda, N., Laskowski, R., 2017. Cellulose decomposed faster in fallow soil than in meadow soil due to a shorter lag time. *J Soils Sediments* 17, 299–305. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1536-9>
- Christians, N.E., Patton, A.J., Law, Q.D., 2016. *Fundamentals of Turfgrass Management*, Fifth Edition. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119308867.ch8>
- Cissé, G., Essi, M., Kedi, B., Mollier, A., Staunton, S., 2021. Contrasting effects of long term phosphorus fertilization on glomalin-related soil protein (GRSP). *European Journal of Soil Biology* 107, 103363. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103363>
- Cochran, W.G., 1950. Estimation of bacterial densities by means of the “most probable number.” *Biometrics*, 6(2):105-16.

- da Silva, T.S., Suzuki, L.E.A.S., Tormena, C.A., Schmidt, M.R., Mazurana, M., Levien, R., 2023. Soil Tillage and Cropping System Effects on the Physical-Hydric Properties of a Soil under No-Tillage. *Sustainability* 15, 15936. <https://doi.org/10.3390/su152215936>
- Dai, J., Hu, J., Zhu, A., Bai, J., Wang, J., Lin, X., 2015. No tillage enhances arbuscular mycorrhizal fungal population, glomalin-related soil protein content, and organic carbon accumulation in soil macroaggregates. *J Soils Sediments* 15, 1055–1062. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1091-9>
- Datta, A., Choudhury, M., Sharma, P.C., Priyanka, Jat, H.S., Jat, M.L., Kar, S., 2022. Stability of humic acid carbon under conservation agriculture practices. *Soil and Tillage Research* 216, 105240. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105240>
- de Oliveira-Paiva, C.A., Bini, D., de Sousa, S.M., Ribeiro, V.P., dos Santos, F.C., de Paula Lana, U.G., de Souza, F.F., Gomes, E.A., Marriel, I.E., 2024. Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. *Front. Microbiol.* 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1426166>
- Díaz-Rodríguez, A.M., Parra Cota, F.I., Villalobos, S. de los S., 2024. Chapter 15 - Perspectives and challenges for innovating microbial inoculants, in: Villalobos, S. de los S. (Ed.), *New Insights, Trends, and Challenges in the Development and Applications of Microbial Inoculants in Agriculture, Developments in Applied Microbiology and Biotechnology*. Academic Press, pp. 153–155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18855-8.00015-1>
- Didenko, N.O., Kolomiiets, S.S., Sardak, A.S., Islam, K.R., Reeder, R.C., 2023. Tillage effects on soil functional properties: a review. *Land Reclamation and Water Management* 85–93. <https://doi.org/10.31073/mivg202301-356>
- Do, T.T.T., Dang, T.N.T., Minh, T.H., 2023. Characterization of phosphate and potassium solubilization, and antifungal activity of bacteria isolated from rhizosphere of *Allium ascalonicum* (L.) grown in Ninh Hai district, Ninh Thuan province, Vietnam. *World J. Adv. Res. Rev.* 17, 018–027. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.17.3.0318>
- Dolkar, D., Dolkar, P., Angmo, S., Chaurasia, O.P., Stobdan, T., 2018. Stress tolerance and plant growth promotion potential of *Enterobacter ludwigii* PS1 isolated from Seabuckthorn rhizosphere. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 14, 438–443. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.04.012>
- Dotaniya, M.L., Aparna, K., Dotaniya, C.K., Singh, M., Regar, K.L., 2019. Chapter 33 - Role of Soil Enzymes in Sustainable Crop Production, in: Kuddus, M. (Ed.), *Enzymes in Food Biotechnology*. Academic Press, pp. 569–589. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00033-5>
- Dou, F., Hons, F.M., 2006. Tillage and Nitrogen Effects on Soil Organic Matter Fractions in Wheat-based Systems. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1896–1905. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0229>
- Egnér, H., Riehm, H., Domingo, W., 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. *Kunigliga Lantbrukshögskolans Annaler II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor-und Kaliumbestimmung.*, 199–215.
- Etesami, H., Emami, S., Alikhani, H.A., 2017. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 17, 897–911. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005>

- Fageria, N.K., 2012. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43, 2063–2113. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>
- Fahad, S., Chavan, S.B., Chichaghare, A.R., Uthappa, A.R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D.K., Kumar, V., Farooq, T.H., Ali, B., Sawant, A.V., Saud, S., Chen, S., Poczai, P., 2022. Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability* 14, 14877. <https://doi.org/10.3390/su142214877>
- Feigl, V., Medgyes-Horváth, A., Kari, A., Török, Á., Bombolya, N., Berkl, Z., Farkas, É., Fekete-Kertész, I., 2023. The potential of Hungarian bauxite residue isolates for biotechnological applications. *Biotechnol Rep (Amst)* 41, e00825. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00825>
- Fekete, I., Francioso, O., Simpson, M.J., Gioacchini, P., Montecchio, D., Berki, I., Móricz, N., Juhos, K., Béni, Á., Kotrocó, Z., 2023. Qualitative and Quantitative Changes in Soil Organic Compounds in Central European Oak Forests with Different Annual Average Precipitation. *Environments* 10, 48. <https://doi.org/10.3390/environments10030048>
- Fekete, I., Kotrocó, Z., Varga, C., Zs, V., TÓTH, J., 2011. The Effects of Detritus Input on Soil Organic Matter Content and Carbon Dioxide Emission in a Central European Deciduous Forest. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 7, 87–96. <https://doi.org/10.37045/aslh-2011-0007>
- Florea, N., Voicu, V., Mocanu, V., 2014. Cycles of substances and energy at geospheres interface - fluxes conditioning the soil and life. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 9, 209–217.
- France R. H (1913): *Das Edaphon. Untersuchungen zur Oekologie der bodenbewohnenden Mikroorganismen*. München, 99 p.
- Frey, S.D., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 573–585. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00161-8)
- Gajda, A., Przewłoka, B., 2012. Soil biological activity as affected by tillage intensity. *International Agrophysics* 26, 15–23. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0003-0>
- Gazdag, O., Takács, T., Ködöböcz, L., Krett, G., Szili-Kovács, T., 2019. Alphaproteobacteria communities depend more on soil types than land managements. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 69, 147–154. <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1520289>
- Geyer, K.M., Kyker-Snowman, E., Grandy, A.S., Frey, S.D., 2016. Microbial carbon use efficiency: accounting for population, community, and ecosystem-scale controls over the fate of metabolized organic matter. *Biogeochemistry* 127, 173–188. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0191-y>
- Govednik, A., Potočnik, Ž., Eler, K., Mihelič, R., Suhadolc, M., 2023. Combined effects of long-term tillage and fertilisation regimes on soil organic carbon, microbial biomass, and abundance of the total microbial communities and N-functional guilds. *Applied Soil Ecology* 188, 104876. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104876>
- Guertal, E.A., Green, B.D., 2012. Evaluation of organic fertilizer sources for south-eastern (USA) turfgrass maintenance. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 62, 130–138. <https://doi.org/10.1080/09064710.2012.683201>
- Gunasekaran, Y., Thiyageshwari, S., Ariyan, M., Choudhury, A.R., Park, J.H., Selvi, D., Chithra, L., Anandham, R., 2022. Alleviation of sodic stress in rice by exploring the

- exopolysaccharide-producing sodic-tolerant bacteria. *Agriculture (Switzerland)* 12, 1451. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12091451>
- Gupta, M., 2020. Arbuscular Mycorrhizal Fungi: The Potential Soil Health Indicators. pp. 183–195. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_11
- Haddad, G., El-Ali, F., Mouneimne, A.H., 2015. Humic Matter of Compost: Determination of Humic Spectroscopic Ratio (E4/E6).
- Haddadin, M.S.Y., Haddadin, J., Arabiyat, O.I., Hattar, B., 2009. Biological conversion of olive pomace into compost by using *Trichoderma harzianum* and *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioresource Technology* 100, 4773–4782. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.047>
- Han, H.S., Supanjani, Lee, K.D., 2005. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant, Soil and Environment* 52, 130–136. <https://doi.org/10.17221/3356-PSE>
- Han, X., Li, Yingbin, Li, Yuhui, Du, X., Li, B., Li, Q., Bezemer, T.M., 2022. Soil inoculum identity and rate jointly steer microbiomes and plant communities in the field. *ISME Communications* 2, 59. <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00144-1>
- Hargitai, L., 1955. Összehasonlító szervesanyag-vizsgálatok különböző talajtípusokon optikai módszerekkel, in: *Agrártudományi Egyetem Agronómi Kar Kiadványa*, 10. Debrecen.
- Hargitai, L., 1992. Some aspects of chemical topology from the evaluation of properties of humic substances. *Science of The Total Environment, Advances in Humic Substances Research* 117–118, 379–392. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90104-Z](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90104-Z)
- Hashem, A., Tabassum, B., Fathi Abd_Allah, E., 2019. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences* 26, 1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
- Hedde, M., Coudrain, V., Maron, P.-A., Chauvat, M., Cheviron, N., Ekelund, F., Mougin, C., Mary, B., Recous, S., Villenave, C., Thébault, E., 2023. Crop Management Strategies Shape the Shared Temporal Dynamics of Soil Food Web Structure and Functioning. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4652822>
- Helal, M.I.D., 2010. Alginit field trial in Egypt in the year 2010: Final Report. Terra Natural Resource GmbH., Germany and Switzerland.
- Hiltner, L. (1904). Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arbeiten der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG)*, 98, 59–78.
- Holátko, J., Brtnický, M., Kučerík, J., Kotianová, M., Elbl, J., Kintl, A., Kynický, J., Benada, O., Datta, R., Jansa, J., 2021. Glomalin – Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. *Soil Biology and Biochemistry* 153, 108116. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108116>
- Huang, T., Yang, N., Lu, C., Qin, X., Siddique, K.H.M., 2021. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods. *Soil and Tillage Research* 214, 105171. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105171>
- Isaak, M., Azawi, A., Turkey, T., 2024. Influence of various tillage systems and tillage speed on some soil physical properties. <https://doi.org/10.1556/446.2024.00070>
- Jakab A., 2014. Műtrágyák és biokészítmények hatása a talaj mikrobiológiai aktivitására és a termékenységre. Debreceni Egyetem, Debrecen.

- Janzen, H.H., 2004. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104, 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.040>
- Jat, H.S., Datta, A., Choudhary, M., Sharma, P.C., Yadav, A.K., Choudhary, V., Gathala, M.K., Jat, M.L., McDonald, A., 2019b. Climate Smart Agriculture practices improve soil organic carbon pools, biological properties and crop productivity in cereal-based systems of North-West India. *CATENA* 181, 104059. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.05.005>
- Jat, H.S., Datta, A., Choudhary, M., Yadav, A.K., Choudhary, V., Sharma, P.C., Gathala, M.K., Jat, M.L., McDonald, A., 2019a. Effects of tillage, crop establishment and diversification on soil organic carbon, aggregation, aggregate associated carbon and productivity in cereal systems of semi-arid Northwest India. *Soil and Tillage Research* 190, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.005>
- Javed, S., Javaid, A., Hanif, U., Bahadur, S., Sultana, S., Shuaib, M., Ali, S., 2021. Effect of necrotrophic fungus and PGPR on the comparative histochemistry of *Vigna radiata* by using multiple microscopic techniques. *Microscopy Research and Technique* 84, 2737–2748. <https://doi.org/10.1002/jemt.23836>
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K., 2009. Chapter 1 Soil Organic Matter: Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 1–57. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00801-8)
- Juhos, K., Nugroho, P.A., Jakab, G., Prettl, N., Kotroczó, Z., Szigeti, N., Szalai, Z., Madarász, B., 2023. A comprehensive analysis of soil health indicators in a long-term conservation tillage experiment. *Soil Use and Management* 40, e12942. <https://doi.org/10.1111/sum.12942>
- Karlen, D.L., Veum, K.S., Sudduth, K.A., Obrycki, J.F., Nunes, M.R., 2019. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research* 195, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>
- Káta, J. (2011) *Alkalmazott talajtan*. Debrecen: Debreceni Egyetem; Nyugat-Magyarországi Egyetem; Pannon Egyetem, 108 p.
- Kertész, Á. (Ed.), 2019. Landscape degradation in Hungary. Geographical Institute, Research Centre for Astronomy and Earth Sciences. <https://doi.org/10.15201/978-963-9545-60-1>
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., Bowyer, J., 2023. Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability* 15, 2338. <https://doi.org/10.3390/su15032338>
- Khare, E., Arora, N.K., 2015. Effects of Soil Environment on Field Efficacy of Microbial Inoculants, in: Arora, Naveen Kumar (Ed.), *Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets*. Springer India, New Delhi, pp. 353–381. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8_19
- Kincses S., Filep T., Káta J., 2008. Szerves-, mű- és baktériumtrágyázás hatása a talajok 0,01 M CaCl₂- oldható tápelem-tartalmára. *Talajvédelem különszám*.
- Kobierski, M., Kondratowicz-Maciejewska, K., Banach-Szott, M., Wojewódzki, P., Peñas Castejón, J.M., 2018. Humic substances and aggregate stability in rhizospheric and non-rhizospheric soil. *J Soils Sediments* 18, 2777–2789. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1935-1>
- Kocsis, T., 2018. *Bioszén és bioeffektor kombinációk hatása homoktalajok biológiai tulajdonságaira*. Ph.D. értekezés, Szent István Egyetem, Kertészettudományi Kar, Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék, Budapest.

- Kocsis, T., Ringer, M., Biró, B., 2022. Characteristics and Applications of Biochar in Soil–Plant Systems: A Short Review of Benefits and Potential Drawbacks. *Applied Sciences* 12, 4051. <https://doi.org/10.3390/app12084051>
- Koltai, J.P., 2010. *Az ökológiai gazdaságok termelési tényezőinek és gyomszabályozási módszereinek ökonómiai elemzése*. PhD értekezés. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Mosonmagyaróvár.
- 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, 909. <https://doi.org/10.3390/biology12070909>
- Kour, B., Sharma, P., Ramya, S., Gawdiya, S., Sudheer, K., Ramakrishnan, B., 2023. Response of distinct soil types to cyanobacterial biofertilizer inoculation. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3368169/v1>
- Kovács, B., Andreolli, M., Lampis, S., Biró, B., Kotroczó, Z., 2024. Bacterial Community Structure Responds to Soil Management in the Rhizosphere of Vine Grape Vineyards. *Biology* 13, 254. <https://doi.org/10.3390/biology13040254>
- Kovács, B., Dobolyi, C., Sebők, F., Kocsis, L., Tóth, Z., 2020. Effect of Vineyard Floor Management on Seasonal Changes of Cultivable Fungal Diversity in the Rhizosphere. *Agriculture* 10, 534. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110534>
- Kutateladze, L.Y., Zakariashvili, N.G., Jobava, M.D., Burduli, T.A., Sadunishvili, T.A., 2016. Microscopic fungi spread in different types of soils in Western Georgia. *Annals of Agrarian Science* 14, 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.08.007>
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12, 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lal, R., 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science* 60, 158–169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>
- Lal, R., 2014. Soil Carbon Management and Climate Change, in: Hartemink, A.E., McSweeney, K. (Eds.), *Soil Carbon, Progress in Soil Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 339–361. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_35
- Li, D., Li, Z., Zhao, B., Zhang, J., 2020. Relationship between the chemical structure of straw and composition of main microbial groups during the decomposition of wheat and maize straws as affected by soil texture. *Biol Fertil Soils* 56, 11–24. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01397-0>
- Lin, L., Li, Z., Hu, C., Zhang, X., Chang, S., Yang, L., Li, Y., An, Q., 2012. Plant Growth-Promoting Nitrogen-Fixing Enterobacteria Are in Association with Sugarcane Plants Growing in Guangxi, China. *Microbes Environ* 27, 391–398. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME11275>
- Liu, W., Zhang, Y., Jiang, S., Deng, Y., Christie, P., Murray, P.J., Li, X., Zhang, J., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi in soil and roots respond differently to phosphorus inputs in an intensively managed calcareous agricultural soil. *Sci Rep* 6, 24902. <https://doi.org/10.1038/srep24902>
- Madarász, B., Jakab, G., Szalai, Z., Juhos, K., Kotroczó, Z., Tóth, A., Ladányi, M., 2021. Long-term effects of conservation tillage on soil erosion in Central Europe: A random forest-based approach. *Soil and Tillage Research* 209, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104959>

- Mahdi, I., Hafidi, M., Allaoui, A., Biskri, L., 2021. Halotolerant Endophytic Bacterium *Serratia rubidaea* ED1 Enhances Phosphate Solubilization and Promotes Seed Germination. *Agriculture* 11, 224. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030224>
- Mahmood, T., Mehnaz, S., Fleischmann, F., Ali, R., Hashmi, Z.H., Iqbal, Z., 2014. Soil sterilization effects on root growth and formation of rhizosheaths in wheat seedlings. *Pedobiologia* 57, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2013.12.005>
- Mailapalli, D.R., Horwath, W.R., Wallender, W.W., Burger, M., 2012. Infiltration, Runoff, and Export of Dissolved Organic Carbon from Furrow-Irrigated Forage Fields under Cover Crop and No-Till Management in the Arid Climate of California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138, 35–42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000385](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000385)
- Mallon, C.A., Poly, F., Le Roux, X., Marring, I., van Elsas, J.D., Salles, J.F., 2015. Resource pulses can alleviate the biodiversity–invasion relationship in soil microbial communities. *Ecology* 96, 915–926. <https://doi.org/10.1890/14-1001.1>
- Mawarda, P.C., Mallon, C.A., Le Roux, X., van Elsas, J.D., Salles, J.F., 2022. Interactions between Bacterial Inoculants and Native Soil Bacterial Community: the Case of Spore-forming *Bacillus* spp. *FEMS Microbiology Ecology* 98, fiac127. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac127>
- Mazzoncini, M., Sapkota, T.B., Bärberi, P., Antichi, D., Risaliti, R., 2011. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil and Tillage Research* 114, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.001>
- Menéndez, E., Ramirez-Bahena, M.H., Peix, A., Tejedor, C., Mulas, R., González-Andrés, F., Martínez-Molina, E., Velázquez, E., 2016. Analysis of Cultivable Endophytic Bacteria in Roots of Maize in a Soil from León Province in Mainland Spain, in: González-Andrés, F., James, E. (Eds.), *Biological Nitrogen Fixation and Beneficial Plant-Microbe Interaction*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32528-6_5
- Meredith, S., Lampkin, N. és Schmid, O., 2018. *Organic Action Plans: Development, implementation and evaluation*. 2. kiadás. IFOAM EU, Brussels.
- Minuț, M., Diaconu, M., Roșca, M., Cozma, P., Bulgariu, L., Gavrilescu, M., 2023. Screening of *Azotobacter*, *Bacillus* and *Pseudomonas* Species as Plant Growth-Promoting Bacteria. *Processes* 11, 80. <https://doi.org/10.3390/pr11010080>
- Moënné-Loccoz, Y., Mavingui, P., Combes, C., Normand, P., Steinberg, C., 2015. Microorganisms and Biotic Interactions, in: Bertrand, J.-C., Caumette, P., Lebaron, P., Matheron, R., Normand, P., Sime-Ngando, T. (Eds.), *Environmental Microbiology: Fundamentals and Applications: Microbial Ecology*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 395–444. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9118-2_11
- Montaño, N.M., García-Oliva, F., Jaramillo, V.J., 2007. Dissolved organic carbon affects soil microbial activity and nitrogen dynamics in a Mexican tropical deciduous forest. *Plant Soil* 295, 265–277. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9281-x>
- Mubvumba, P., DeLaune, P.B., Hons, F.M., 2022. Enhancing long-term no-till wheat systems with cover crops and flash grazing. *Soil Security* 8, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100067>
- Muhammad, I., Wang, J., Sainju, U.M., Zhang, S., Zhao, F., Khan, A., 2021. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma* 381, 114696. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114696>

- Muindi, E.M., Mrema, J., Semu, E., Mtakwa, P., Gachene, C., 2023. Soil Chemical Properties as Affected by Tillage Method, Phosphorus and Lime Application. *International Journal of Plant & Soil Science* 35, 213–221. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i163147>
- Natalio, A.I.M., Richards, A., 2022. Field's Spatial Variation Influenced Outcomes more so than N-fertiliser, FYM, Cover Crops or Their Legacy Effects Following Conversion to a No-till Arable System.
- 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., Dobczinski, S., Geistlinger, J., Lüthi, A., Gómez-Muñoz, B., Kandeler, E., Kolberg, F., Kotroczo, Z., Kulhanek, M., Mercl, F., Tamir, G., Moradtalab, N., Piccolo, A., Maggio, A., Nassal, D., Szalai, M.Z., Juhos, K., Fora, C.G., Florea, A., Pošta, G., Lauer, K.F., Toth, B., Tlustoš, P., Mpanga, I.K., Weber, N., Weinmann, M., Yermiyahu, U., Magid, J., Müller, T., Neumann, G., Ludewig, U., 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. *Front. Plant Sci.* 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1333249>
- Nural Yaman, B., Aytar Çelik, P., Enuh, B.M., Çabuk, A., 2022. Molecular Approaches of Microbial Diversity in Agricultural Soil, in: Prasad, R., Zhang, S.-H. (Eds.), *Beneficial Microorganisms in Agriculture*. Springer Nature, Singapore, pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0733-3_1
- Obalum, S.E., Chibuike, G.U., Peth, S., Ouyang, Y., 2017. Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environ Monit Assess* 189, 176. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>
- Olsen, P.E., Sanda, E.S., Keyser, H.H., 1996. The enumeration and identification of Rhizobial bacteria in legume inoculant quality control procedures. *NifTAL Center*, USA, p. 96
- Osman, K.T., 2013. Soil Resources and Soil Degradation, in: Osman, K.T. (Ed.), *Soils: Principles, Properties and Management*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 175–213. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_12
- Ovreås, L., Forney, L., Daae, F.L., Torsvik, V., 1997. Distribution of bacterioplankton in meromictic Lake Saalen, as determined by denaturing gradient gel electrophoresis of PCR-amplified gene fragments coding for 16S rRNA. *Appl Environ Microbiol* 63, 3367–3373.
- Pabar, S.A., Begum, S.R., Mónok, D., Pribeli, A., Biró, B., 2018. A bioeffektív talajoltó kezelések hatása a talaj biológiai paramétereire saláta és bazsalikom teszt növényekkel, in: XXIV. Ifjúsági Tudományos Fórum. Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, Magyarország, pp. 1-6.
- Pabar, S.A., Kotroczo, Z., Mónok, D., Ferschl, B., Prettl, N., Péter, D., Biró, B., 2021. Korreláció vizsgálat a talaj szervesanyag minősége és kémiai, biológiai tulajdonságai között, in: XVI. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia, Absztrakt Kötet. ELTE Természettudományi Kar, Budapest, Magyarország, pp. 187–192.
- Pabar S.A., Prettl N., Kotroczo Z., Biró B., 2023. Módszertani fejlesztés mikrobiális oltótörzsek gyors hatásvizsgálatára két teszt növényvel. *Journal of Central European Green Innovation* 11, 59–67. <https://doi.org/10.33038/jcegi.4851>
- Pabar, S.A., Kotroczo, 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, 1586. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091586>

- Panpatte, D.G., Jhala, Y.K., Shelat, H.N., Vyas, R.V., 2016. *Pseudomonas fluorescens*: A Promising Biocontrol Agent and PGPR for Sustainable Agriculture, in: Singh, D.P., Singh, H.B., Prabha, R. (Eds.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 1: Research Perspectives*. Springer India, New Delhi, pp. 257–270. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_15
- Paul, E.A., 2016. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry* 98, 109–126. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>
- Pinke, G., Blazsek, K., Magyar, L., 2015. Szemelvények a szója gyomnövényzetének és gyomszabályozásának külföldi szakirodalmából. *Növényvédelem* 51, 327–336.
- Pold, G., Domeignoz-Horta, L.A., DeAngelis, K.M., 2020. Heavy and wet: The consequences of violating assumptions of measuring soil microbial growth efficiency using the ^{18}O water method. *Elementa: Science of the Anthropocene* 8, 069. <https://doi.org/10.1525/elementa.069>
- Qin, T., Wang, L., Zhao, J., Zhou, G., Li, C., Guo, L., Jiang, G., 2022. Effects of Straw Mulching Thickness on the Soil Health in a Temperate Organic Vineyard. *Agriculture* 12, 1751. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111751>
- Ragályi, P., Kádár, I., Csathó, P., Murányi, A., Radimsky, L., & Gajdó, A. (2019) 'Effect of Gércé Alginít on the fertility of an acidic sandy soil during five years', *Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont; Alginít Kft., Martonvásár; Budapest*.
- Ravensberg, W.J., 2015. Commercialisation of Microbes: Present Situation and Future Prospects, in: Lugtenberg, B. (Ed.), *Principles of Plant-Microbe Interactions: Microbes for Sustainable Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp. 309–317. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_32
- Rodríguez, C.A., Gavilánez, T.C., Chamorro, J.P., Vinuesa, A.G., Salazar, D.M., Arancibia, M.Y., 2018. Selective Isolation and Phenotypic Characterization of Bacteria and Actinomycetes from Oil-contaminated Soils. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 151, 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012039>
- Romero, C.M., Engel, R.E., D'Andrilli, J., Chen, C., Zabinski, C., Miller, P.R., Wallander, R., 2017. Bulk optical characterization of dissolved organic matter from semiarid wheat-based cropping systems. *Geoderma* 306, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.029>
- Ros, G.H., Verweij, S.E., Janssen, S.J.C., De Haan, J., Fujita, Y., 2022. An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management. *Environ. Sci. Technol.* 56, 17375–17384. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04516>
- Rutherford, D.W., Chiou, C.T., Kile, D.E., 1992. Influence of soil organic matter composition on the partition of organic compounds. *Environ. Sci. Technol.* 26, 336–340. <https://doi.org/10.1021/es00026a014>
- Schnürer, J., Rosswall, T., 1982. Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Total Microbial Activity in Soil and Litter. *Appl Environ Microbiol* 43, 1256–1261.
- Schoebitz, M., Ribaud, C.M., Pardo, M.A., Cantore, M.L., Ciampi, L., Curá, J.A., 2009. Plant growth promoting properties of a strain of *Enterobacter ludwigii* isolated from *Lolium perenne* rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1768–1774. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.031>

- Sekhon, K.K., Keshani, 2024. Microbial Inoculum Improvement for Soil Health, in: Bhatia, R.K., Walia, A. (Eds.), *Advancements in Microbial Biotechnology for Soil Health*. Springer Nature, Singapore, pp. 49–65. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9482-3_4
- Semenov, V.M., Tulina, A.S., Semenova, N.A., Ivannikova, L.A., 2013. Humification and nonhumification pathways of the organic matter stabilization in soil: A review. *Eurasian Soil Sc.* 46, 355–368. <https://doi.org/10.1134/S106422931304011X>
- Sharma, P., Laor, Y., Raviv, M., Medina, S., Saadi, I., Krasnovsky, A., Vager, M., Levy, G.J., Bar-Tal, A., Borisover, M., 2017. Compositional characteristics of organic matter and its water-extractable components across a profile of organically managed soil. *Geoderma* 286, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.014>
- Singh, R., Mishra, S., Jha, Pameela, Raghuvanshi, S., Jha, Prabhat, 2018. Effect of inoculation of zinc-resistant bacterium *Enterobacter ludwigii* CDP-14 on growth, biochemical parameters and zinc uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *Ecological Engineering* 116, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.033>
- Sinsabaugh, R.L., Turner, B.L., Talbot, J.M., Waring, B.G., Powers, J.S., Kuske, C.R., Moorhead, D.L., Shah, J.J.F., 2016. Stoichiometry of microbial carbon use efficiency in soils. *Ecological Monographs* 86, 172–189.
- Sipos, R., Székely, A.J., Palatinszky, Márton, Révész, S., Márialigeti, K., Nikolausz, M., 2007. Effect of primer mismatch, annealing temperature and PCR cycle number on 16S rRNA gene-targeting bacterial community analysis: PCR parameters influencing quantitative bias. *FEMS Microbiology Ecology* 60, 341–350. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00283.x>
- Sokol, N.W., Slessarev, E., Marschmann, G.L., Nicolas, A., Blazewicz, S.J., Brodie, E.L., Firestone, M.K., Foley, M.M., Hestrin, R., Hungate, B.A., Koch, B.J., Stone, B.W., Sullivan, M.B., Zablocki, O., Pett-Ridge, J., 2022. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. *Nat Rev Microbiol* 20, 415–430. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00695-z>
- Sokolova, E.A., Mishukova, O.V., Hlistun, I.V., Tromenschleger, I.N., Tikunov, A.Y., Manakhov, A.D., Rogaev, E.I., Savenkov, O.A., Buyanova, M.D., Ivanov, I.V., Smirnova, N.V., Voronina, E.N., 2024. The Effectiveness of Co-Inoculation by Consortia of Microorganisms Depends on the Type of Plant and the Soil Microbiome. *Plants* 13, 116. <https://doi.org/10.3390/plants13010116>
- Solti G., Magyar Állami Földtani Intézet (Budapest), 1987. *Az alginit: a Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa*. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Solti, G. (2000). *Talajjavítás és tápanyag-utánpótlása ökológiai gazdálkodásban (Soil-improving, and ecological nutrient-management)*. Budapest, Hungary: Mezőgazda Press.
- Srivastava, P., Chaudhary, P., Mishra, A., Dasila, H., Maithani, D., 2024. Influence of Microbial Inoculants on Soil Health, in: Chaudhary, P., Chaudhary, A. (Eds.), *Microbial Inoculants: Applications for Sustainable Agriculture*. Springer Nature, Singapore, pp. 29–48. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0633-4_2
- Stankowski, S., Jaroszewska, A., Osińska, B., Tomaszewicz, T., Gibczyńska, M., 2022. Analysis of Long-Term Effect of Tillage Systems and Pre-Crop on Physicochemical Properties and Chemical Composition of Soil. *Agronomy* 12, 2072. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092072>
- Stefanovits P, Filep Gy, Fülek Gy (1999): *Talajtan*. Mezőgazda Kiadó, Budapest. 470 p.

- Steponavičienė, V., Rudinskienė, A., Žiūraitis, G., Bogužas, V., 2023. The Impact of Tillage and Crop Residue Incorporation Systems on Agrophysical Soil Properties. *Plants* 12, 3386. <https://doi.org/10.3390/plants12193386>
- Sui, P., Li, R., Zheng, H., Wang, H., Yuan, Y., Luo, Y., Zheng, J., Liu, W., 2022. Long-Term Conservation Tillage Practices Directly and Indirectly Affect Soil Micro-Food Web in a Chinese Mollisol. *Agronomy* 12, 2356. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102356>
- Swift, R.S., 2018. Organic Matter Characterization, in: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), *SSSA Book Series*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 1011–1069. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>
- Szegi, J., 1979. Talajmikrobiológiai vizsgálati módszerek. Mezőgazda kiadó, Budapest, HU.
- Telesiński, A., Krzyśko-Łupicka, T., Cybulska, K., Pawłowska, B., Biczak, R., Śnieg, M., Wróbel, J., 2019. Comparison of oxidoreductive enzyme activities in three coal tar creosote-contaminated soils. *Soil Res.* 57, 814–824. <https://doi.org/10.1071/SR19040>
- Thapa, B., Mowrer, J., 2024. Soil carbon and aggregate stability are positively related and increased under combined soil amendment, tillage, and cover cropping practices. *Soil Science Society of America Journal* 88, 730–744. <https://doi.org/10.1002/saj2.20642>
- Tirado, R., 2015. Ecological Farming: The seven principles of a food system that has people at its heart | FAO [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/agroecology/database/detail/en/c/470132/> (accessed 8.28.24).
- Tóth, E., Csambalik, L., Biró, B., Gere, A., Koren, D., Kotroczó, Z., Szalai, Z., 2024. Are the Nutritional Properties of Organic Tomatoes Altered by Single and Combined Microbial Soil Inoculants?: A Multiperspective Approach. *J Plant Growth Regul.* <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11358-z>
- Tyurin, I.V., 1951. Analytic procedure for a comparative study of soil humus. *Trudy PochvInst Dokuchayeva*, *Trudy PochvInst Dokuchayeva* 5–21.
- Unger, H., 1960. The cellulose test as a method for determining the cellulose-decomposing activity of soil in field experiments. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 91, 44–52.
- Vance, E., Brookes, P., Jenkinson, D., 1987b. An Extraction Method for Measuring Soil Microbial Biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 703–707.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987a. Microbial biomass measurements in forest soils: The use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 697–702. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90051-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90051-4)
- Várallyay, G., 2001. Szemléletváltozások a magyarországi talajjavítás történetében. *Agrokémia és Talajtan*, 1-2 50, 119–135.
- Veres, Z., Kotroczó, Z., Fekete, I., Tóth, J., 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>
- 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, 25–33. <https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0002>
- Vilakazi, B.S., Zengeni, R., Mafongoya, P., 2022. Selected Soil Physicochemical Properties under Different Tillage Practices and N Fertilizer Application in Maize Mono-Cropping. *Agriculture* 12, 1738. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101738>

- Villányi, I., Füzy, A., Angerer, I., Biró, B., 2006. Total catabolic enzyme activity of microbial communities. Fluorescein diacetate analysis (FDA), in: Jones, D.L. (Ed.), Understanding and Modelling Plant-Soil Interactions in the Rhizosphere Environment. Handbook of Methods Used in Rhizosphere Research. Chapter 4.2. Biochemistry. Swiss Federal Research Institute WSL; Birmensdorf, pp. 441–442.
- Villarreal-Delgado, M.F., Díaz-Rodríguez, A.M., Villalobos, S. de los S., 2024. Chapter 10 - Microbial inoculants production systems, in: Villalobos, S. de los S. (Ed.), New Insights, Trends, and Challenges in the Development and Applications of Microbial Inoculants in Agriculture, Developments in Applied Microbiology and Biotechnology. Academic Press, pp. 99–104. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18855-8.00010-2>
- Walmsley, D.C., Siemens, J., Kindler, R., Kirwan, L., Kaiser, K., Saunders, M., Kaupenjohann, M., Osborne, B.A., 2011. Dissolved carbon leaching from an Irish cropland soil is increased by reduced tillage and cover cropping. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.011>
- Wang, J., Zou, J., 2020. No-till increases soil denitrification via its positive effects on the activity and abundance of the denitrifying community. *Soil Biology and Biochemistry* 142, 107706. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107706>
- Wang, X., Wang, J., Zhang, J., 2012. Comparisons of Three Methods for Organic and Inorganic Carbon in Calcareous Soils of Northwestern China. *PLoS One* 7, e44334. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044334>
- 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, 3–17.
- West, T., Post, W., 2002. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1930–1946.
- Wolters, V., 1991. Soil Invertebrates - Effects on Nutrient Turnover and Soil Structure - A Review. *J Plant Nutrition & Soil* 154, 389–402. <https://doi.org/10.1002/jpln.19911540602>
- Wong, W.S., Morald, T.K., Whiteley, A.S., Nevill, P.G., Trengove, R.D., Yong, J.W.H., Dixon, K.W., Valliere, J.M., Stevens, J.C., Veneklaas, E.J., 2022. Microbial inoculation to improve plant performance in mine-waste substrates: A test using pigeon pea (*Cajanus cajan*). *Land Degradation & Development* 33, 497–511. <https://doi.org/10.1002/ldr.4165>
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97–107. <https://doi.org/10.1023/A:1004347701584>
- Wu, Q.-S., Li, Y., Zou, Y.-N., He, X.-H., 2015. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate orange grown under different P levels. *Mycorrhiza* 25, 121–130. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3>
- Yaghoubi Khanghahi, M., Pirdashti, H., Rahimian, H., Nematzadeh, G., Ghajar Sepanlou, M., 2018. Potassium solubilising bacteria (KSB) isolated from rice paddy soil: from isolation, identification to K use efficiency. *Symbiosis* 76, 13–23. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0533-0>
- Zaballa, J.I., Golluscio, R. & Ribaudó, C.M., 2020. Effect of the phosphorus-solubilizing bacterium *Enterobacter ludwigii* on barley growth promotion. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 63(1), pp.144-157.

- Zalba, P., Amiotti, N.M., Galantini, J.A., Pistola, S., 2016. Soil Humic and Fulvic Acids from Different Land-Use Systems Evaluated By E4/E6 Ratios. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47, 1675–1679. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206558>
- Zhang, J.-X., 2022. Study on the Effect of Straw Mulching on Farmland Soil Water. *Journal of Environmental and Public Health* 2022, 3101880. <https://doi.org/10.1155/2022/3101880>
- Zhang, S., Hu, W., Xu, Y., Zhong, H., Kong, Z., Wu, L., 2022. Linking bacterial and fungal assemblages to soil nutrient cycling within different aggregate sizes in agroecosystem. *Front. Microbiol.* 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1038536>
- Zhao, Y., Mao, X., Zhang, M., Yang, W., Di, H.J., Ma, L., Liu, W., Li, B., 2021. The application of *Bacillus Megaterium* alters soil microbial community composition, bioavailability of soil phosphorus and potassium, and cucumber growth in the plastic shed system of North China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 307, 107236. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107236>
- Zhu, B., Zhou, Q., Lin, L., Hu, C., Shen, P., Yang, L., An, Q., Xie, G., Li, Y., 2013. *Enterobacter sacchari* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium associated with sugar cane (*Saccharum officinarum* L.). *Int J Syst Evol Microbiol* 63, 2577–2582. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.045500-0>
- Zikeli, S., Gruber, S., Teufel, C.-F., Hartung, K., Claupein, W., 2013. Effects of Reduced Tillage on Crop Yield, Plant Available Nutrients and Soil Organic Matter in a 12-Year Long-Term Trial under Organic Management. *Sustainability* 5, 3876–3894. <https://doi.org/10.3390/su5093876>

Egyéb irodalom:

- (MSZ 08-0206-2:1978), (2. fejezet)
- (MSZ 08-0206-2: 1978), (4. fejezet)
- (MSZ 21470-51:1983)
- MSZ-318-4:1979 (5. fejezet)
- (MSZ 20135:1999), (2-4. fejezet).
- (MSZ 20135:1999), (5.4.3. szakasz).
- (MSZ 20135:1999), (5.4.4. szakasz).
- NÉBIH, 2009. A Vázsonyi Alginit módosításokkal egységes szerkezetbe foglalt engedélyokirata. MgSzHK, NÉBIH, Budapest. Elérhető: <https://portal.nebih.gov.hu/documents/10182/287703/vazsonyialginit2012.pdf/937281e5-f535-407e-a5cf-bbb5fad84013> [Hozzáférés: 2024. 03. 06.]
- Európai Parlament és a Tanács (2003). 2003/2003/EK rendelet a műtrágyákról. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32003R2003> [Letöltve: 2024.08.01.]
- 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet az Élelmiszerláncról és hatósági felügyeletéről szóló törvény. Elérhető: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/hun124336.pdf> [Letöltve: 2024.08.01.]

Melléklet:

1. melléklet

Kísérletben használt táptalajok:

Hutchinson-Clayton media g/L-ben: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,5; K_2HPO_4 : 0,5; KH_2PO_4 : 0,2; NaCl : 0,1; CaCO_3 : 0,02; FeCl_3 : 0,01 (oldva 0,1 M HCl -ban); Ammónium-szulfát $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 1; Glükóz: 10; Agar (ha szilárd táptalajt készítünk): 15; Végző pH (25 °C-on): $7,0 \pm 0,2$

Aleksanrow media g/L-ben: MgSO_4 : 0,5 ; CaCO_3 : 0,1 ; $\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$: 2; Glükóz: 5; FeCl_3 : 0,005; $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$: 2. Végző pH (25 °C-on): $7,2 \pm 0,2$

Ashby's medium: g/L-ben: Mannit 20; KH_2PO_4 0,20; MgSO_4 0,2; NaCl 0,20; K_2SO_4 0,1; CaCO_3 5; Agar 15.

Azotobacter Med 2. g/L-ben: glükóz 50, Élesztőkivonat 10, CaCO_3 30, agar 15

Burk's N-free medium g/L-ben: Glükóz: 10 g; KH_2PO_4 : 0,41 g; K_2HPO_4 : 0,52 g; Na_2SO_4 : 0,05 g; CaCl_2 : 0,2 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,1 g; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,005 g; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 0,0025 g; Agar (félig szilárdhoz): 1,8 g; Agar (teljesen szilárdhoz): 15 g.

Foszfátoldó mikroorganizmusokat általában Pikovskaya (PVK) agar segítségével vizsgálnak tányéros tesztekkel. A Pikovskaya agar összetétele g/L-ben: Glükóz: 10; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 5; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0,5; NaCl : 0,2; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,1; KCl : 0,2; Élesztőkivonat: 0,5; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$: 0,002; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,002

GYCA + Na-benzoát g/L-ben: Glükóz 20; Élesztőkivonat 10; CaCO_3 20; Agar 20; Na-benzoát 3

GYCA g/L-ben (glucose yeast extract calcium carbonate agar): Glükóz 20; Élesztőkivonat 10; CaCO_3 20; Agar 20

Kristályibolya-neutrálvörös-epe-glükóz (VRBG)-agar összetétele g/L-ben: Pepton: 7,0; Élesztőkivonat: 3; Glükóz: 10; NaCl : 5; Epesó: 1,5; Neutrálvörös: 0,03; Kristályibolya: 0,002; Agar: 12,0-18,0; Ezt a közeg alkalmas az *Enterobacteriaceae* családba tartozó baktériumok számának meghatározására.

LB (Luria-Bertani) MEDIUM: Tryptone 10, élesztőkivonat 5, NaCl 10, Agar 20,

NBRIP + Congo red közeg g/L-ben: Glükóz: 10; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 5; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,25; KCl : 0,2; és $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0,1; 15 ml Congo red oldat (2,5 g Congo red feloldva 1000ml vízben)

NBRIP összetevők g/l-ben: Glükóz: 10; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 5; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,25; KCl : 0,2; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0,1; Agar: 15.

Nutrient g/L-ben: Húskivonat 3, Pepton 5, NaCl 0,5, Glükóz 5g, Agar 17,

Potato dextróz agar g/L-ben: PD broth (MERCK) 20 g agar por; végző pH $5,6 \pm 0,2$

PVK összetevők g/l-ben: Glükóz: 10; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 5; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0,5; NaCl : 0,2; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,1; KCl : 0,2; Élesztőkivonat: 0,5; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$: 0,002; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,002; Agar: 15.

TGE g/L-ben Trypton 5; Glükóz 1; Élesztőkivonat (YE) 2,5; Agar 20.

YM összetevői és mennyisége g/l-ben: K_2HPO_4 : 0,5; MgSO_4 : 0,1; NaCl : 0,2; Mannitol: 10; Élesztőkivonat: 0,5; Agar: 15

2. melléklet.

A vizsgált növény paraméterek a mikrobiális oltások hatására. A5 - *Enterobacter ludwigii*, Bm - *Bacillus megaterium*, Bs – *Bacillus subtilis*, D1 - *Kosakonia cowanii*, Pf – *Pseudomonas fluorescens*, Th - *Trichoderma harzianum*

Kezelés	Mustár – <i>Sinapis alba</i>				Perje – <i>Lolium perenne</i>		
	Csírázott magok (x/4)	Nedves tömeg (g)	Száraz tömeg (g)	Hossz átlag (mm)	Nedves tömeg (g)	Száraz tömeg (g)	Hossz átlag (mm)
Kontroll	2,16±1,06	0,484±0,328	0,033±0,020	69,10±7,91	0,474±0,106	0,055±0,011	84,54±8,59
A5	2,83±0,98	0,675±0,346	0,043±0,019	67,86±10,47	0,516±0,069	0,060±0,006	87,75±11,09
Bm	2,33±1,17	0,655±0,211	0,044±0,013	72,87±11,76	0,542±0,080	0,061±0,007	85,62±6,98
Bs	2,58±0,75	0,640±0,253	0,039±0,017	61,86±15,19	0,482±0,092	0,055±0,009	88,20±9,321
D1	2,33±1,24	0,603±0,270	0,039±0,016	71,21±11,00	0,472±0,154	0,055±0,015	81,95±12,89
Pf	2,41±1,25	0,667±0,209	0,046±0,012	67,75±5,18	0,497±0,149	0,058±0,016	90,18±14,87
Th	2,33±1,17	0,550±0,294	0,039±0,020	67,07±13,62	0,478±0,116	0,055±0,010	82,75±10,65

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton mondok köszönetet témavezetőimnek Prof. Dr. Biró Borbálának és Dr. Kotroczó Zsoltnak, hogy támogatták munkámat és hogy számos elméleti gyakorlati ismeretet tanulhattam tőlük. Köszönöm az évek során belém vetett bizalmat, a közös laboratóriumi és terepi munkákat, a szakmai megbeszéléseket és a támogató szavakat, amik segítettek felülkerekedni a nehézségeken.

Köszönöm a Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék munkatársainak, Dr. Juhos Katalinnak, Dr. Kardos Leventének, Dr. Madarász Balázsnak, valamint Kovács Jánosné Évának; a Soroksári Ökológiai Intézeti tangazdaság jelenlegi és volt munkatársainak, Ferschl Barbarának és Feró Ágnesnek; doktorandusz-társaimnak a doktori munkám során nyújtott segítségét, a közös labormunkákat és hogy motiváltak, lelkesítettek és ösztönöztek a nehéz időszakokban is.

Köszönöm Dr. Ladányi Mártának, hogy a statisztikai analízisekhez biztos tudást adott és hogy kérdéseimmel mindig bizalommal fordulhattam hozzá.

Köszönöm az ELKH, ATK, Talajtani Kutató Intézet (TAKI) munkatársainak, külön köszönet Dr. Takács Tündének, hogy motiváló légkört biztosítottak számomra és támogatták doktori értekezésem elkészültét.

Köszönöm a családom, barátaim támogatását. Köszönöm páromnak Bondár Juditnak a biztatást és az önzetlen segítséget, hogy mindig támaszt nyújt számomra és bármikor számíthatok rá. Hálás vagyok végtelen türelméért, és hogy empátiával és segítőkészséggel fordult felém a disszertáció írás során.

Köszönöm az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-19-3 kódszám) támogatását