



SZENT ISTVÁN EGYETEM

**BIOTIKUS, ABIOTIKUS TÉNYEZŐK ÉS
KÜLÖNBÖZŐ TALAJOK
LEBONTÓHATÉKONYSÁGÁNAK KAPCSOLATA**

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

TÓTH ZSOLT

Gödöllő

2017

A doktori iskola

megnevezése: Szent István Egyetem, Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Környezettudomány

vezetője: Csákiné Dr. Michéli Erika, D.Sc.
tanszékvezető, egyetemi tanár
Szent István Egyetem,
Mezőgazdaság- és
Környezettudományi Kar,
Környezettudományi Intézet,
Talajtani és Agrokémiai Tanszék

Témavezető: Dr. Hornung Erzsébet, C.Sc.
egyetemi tanár
Állatorvostudományi Egyetem,
Biológiai Intézet,
Ökológiai Tanszék

.....
Iskolavezető jóváhagyása

.....
Témavezető jóváhagyása

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, A KITŪZOTT CÉLOK

A sokasodó és máig megoldatlan globális környezeti problémák révén egyre nagyobb figyelmet kapnak a természetes és módosított ökoszisztémák által nyújtott „szolgáltatások”, amelyek felmérése, megőrzése és optimalizálása kiemelt fontosságú. Ilyen szolgáltatás többek között a talajban játszódó szervesanyag-bomlás is, mely nélkül nem beszélhetnénk anyagkörforgásról. Vizsgálataim a növényi szervesanyag-bomlásra korlátozódtak, amik a lebontás jelentős hányadát adják. A dekompozícióban nagyon sokféle élőlény vesz részt. A makrofauna tagok [földigiliszták (Oligochaeta), szárazföldi csigák (Gastropoda), ikerszelvényesek (Diplopoda), szárazföldi ászkarák (Isopoda: Oniscidea)] aprító, keverő és inokuláló tevékenysége megteremti a növényi anyagok mikrobiális bontásához szükséges körülményeket. A mezofauna képviselői [főként az atkák (Acari) és ugróvillások (Collembola)] tovább fragmentálják a növényi részeket, amik az emésztőcsatornán áthaladva tovább serkentik a mikrobiális aktivitást. Ugyanakkor a lebontás jelentős részben a gombák és baktériumok tevékenységének köszönhető. Az ehhez szükséges előemésztés és felületnövelő hatás nélkül azonban enzimeik kevésbé hatékonyak, ami a dekompozíció időbeli elhúzódásához vezethet. Tehát a biogeokémiai ciklusok működéséhez szükséges szervesanyag-bomlás fontos szukcessziós hálózatot képez, ami bizonyos funkciós csoportok kiesése révén lelassulhat, vagy akár fel is gyorsulhat. A lebontás során keletkező üvegházhatású gázok (főleg CO₂ és CH₄) légköri koncentrációnövekedése tovább fokozhatja a szervesanyag-dekompozíciót, ugyanis a megemelkedett CO₂ szint serkenti a primer produkciót, és növeli a légköri hőmérsékletet (pozitív feedback). A globális felmelegedés mellett azonban az urbanizáció és az intenzív mezőgazdálkodás hatásai sem elhanyagolhatók, ugyanis jelentős mértékben módosítják ökoszisztémáinkat, többek között talajaink állapotát is, befolyásolva ezáltal azok biodiverzitását és működőképességét.

A jelen tanulmány központi kérdése, hogy a különböző antropogén hatások (urbanizáció, klímaváltozás, mezőgazdálkodási kezelés) hogyan befolyásolják a talaj fizikokémiai tulajdonságait, a biodiverzitást és a növényi szervesanyag-lebomlás közötti kapcsolatokat.

A témában végzett kutatásaimat négy nagy fejezetben mutatom be a következő célkitűzések és hipotézisek szerint:

(i) Az urbanizáció talaj biodiverzitásra és szervesanyag-bomlásra gyakorolt hatásainak vizsgálata a főváros budai oldalán (GLUSEEN-Projekt: 'Global Urban Soil Ecology and Education Network'). Ennek során az antropogén zavarás és kezelés mértéke alapján négy élőhelytípus talajbiótáját és lebontási hatékonyságát hasonlítottuk össze. A hipotéziseink:

- (a) a városiasodásnak kimutatható hatása van a fizikokémiai talajtulajdonságokra;
- (b) a természetközeli, antropogén hatásoknak kevésbé kitett élőhelyek (városi erdőfragmentumok és referenciaerdők) gazdagabb talajbiótával jellemezhetők, mint a degradáltabb urbán területek;
- (c) a talajélet szempontjából kedvezőbb feltételekkel bíró élőhelyeken (városi erdőfragmentumok, referenciaerdők) gyorsabban zajlik a szervesanyag-dekompozíció;
- (d) a talaj biodiverzitás és növényianyag-bomlás intenzitása között pozitív összefüggés van.

(ii) Az extrém aszály talajmikrobára, valamint növényi szervesanyag-bomlásra gyakorolt hatásainak megismerése egy klímamanipulációs terepkísérletben (ExDRain-Projekt: 'Extreme Drought and Rain Manipulation Experiment'- Fülöpháza). A vizsgálat során szárazságkezelt (5 hónapos csapadékkizárás) és kontroll parcellák talajainak mikrobiális diverzitását, valamint lebontási hatékonyságát hasonlítottuk össze a talaj mikroklimatikus jellemzőivel (talajnedvesség- és hőmérséklet) összefüggésben. Továbbá célunk volt a mintavételi terület mezo- és makrofaunájának felmérése. A következő hipotéziseket állítottuk fel:

- a) a szervesanyag-dekompozíció mértéke csökken az extrém aszály eredményeként előálló vízhiány hatására;
- b) a csapadékkizárást követő hat hónap elteltével is kimutatható az extrém aszály hatása a talajmikrobióta közösségi szerkezetére; valamint
- c) a bakteriális diverzitás befolyásolja a szervesanyag-bomlás intenzitását.

(iii) Az ugaroltatás makrodekomponáló talajizeltlábúakra gyakorolt hatásainak felmérése a Hevesi-sík Érzékeny Természeti Területen (mai nevén Magas Természeti Értékű Terület). A vizsgálat során egy, kettő és három évig ugaroltatott szántók szárazföldi ászkarák és ikerszelvényes populációit hasonlítottuk össze az ugaroltatás kezdete óta eltelt idő függvényében, valamint őszi vetésű gabonaföldekkel és féltermészetes gyepekkel. Főbb hipotéziseink:

- a) az ászka és ikerszelvényes fajgazdagság és abundancia nagyobb az ugarokon, mint a búzaterületeken;
- b) azok fajgazdagsága és abundanciája nő az ugarok korával;
- c) az idősebb ugarok melletti búzaterületek makrodekomponáló diverzitása és abundanciája nagyobb, mint az egyéves ugarral szomszédosaké;
- d) a növényi fajgazdagság, vegetáció borítottság, valamint az élőhely típusa jelentős hatással vannak a fajok abundancia viszonyaira, illetve az együttesek összetételére.

(iv) Az ugaroltatás talaj biodiverzitásra és szervesanyag-bomlásra gyakorolt hatásainak feltérképezése a Hevesi-síkon (LIBERATION-Projekt: 'Linking farmland Biodiversity to Ecosystem services for effective ecological intensification'). Két éve pihentetett ugarterületek, valamint gabonaföldek és féltermészetes gyepek talajbiótáját és lebontási hatékonyságát vetettük össze. Hipotéziseink:

- (a) a mezőgazdálkodási kezelések a talaj fizikokémiai paramétereinek megváltozásához vezetnek;
- (b) az ugarok, illetve féltermészetes gyepek gazdagabb talajbiótával jellemezhetők, mint a mezőgazdasági kezeléseknek jobban kitett gabonaterületek, valamint;
- (c) azokon gyorsabban zajlik a szervesanyag-dekompozíció;
- (d) a talaj biodiverzitás és növényianyag-bomlás intenzitása között pozitív összefüggés van.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A városiasodás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (GLUSEEN-Projekt, Budapest)

ÉLŐHELYEK KIJELÖLÉSE: Alapvető szempont volt a városon belüli egységes alapközet, a talajtípus, a növényzet, a terület nagysága, megközelíthetősége és elhelyezkedése. Ennek megfelelően 20 mintavételi hely került kiválasztásra a főváros budai oldalán. Ezeket az antropogén zavarás és kezelés mértéke szerint a következő élőhelytípusokba soroltuk: (1) erősen zavart habitatok [intenzív zavarás/alacsony kezelés]; (2) városi gyepek [intenzív zavarás/közepes kezelés]; (3) városi erdőfragmentumok [alacsony zavarás/alacsony kezelés]; illetve (4) a természetes vegetációt reprezentáló referenciaerdők.

MINTAVÉTELI MÓDSZEREK: A fizikokémiai és mikrobiális vizsgálatokhoz 2013 őszén kompozit talajmintákat vettünk a talaj felső 10, illetve 5 cm-es rétegeiből, amikből meghatároztuk a talajok pH-ját, CaCO_3 , szervesanyag- és nitrogéntartalmát, valamint P_2O_5 és K_2O mennyiségét. A talajmikrobaközösség feltérképezése valós idejű PCR-rel, illetve Illumina MiSeq platformon végzett amplikon szekvenálással történt. A talaj mikroarthropodaközösségének feltárására 2015 májusában, élőhelyenként kb. 800 cm^3 mintát vettem a talaj 0-10 cm-es rétegéből. A talajállatok extrakcióját Berlese-típusú futtató segítségével végeztem. A kinyert mikroarthropodákat Parisi és mtsai (2005) alapján nagyobb taxonokra válogatva minden élőhelynek kiszámítottam a talaj biológiai minőségére utaló QBS indexét. A

mintavételi helyeken megtörtént a legjellemzőbb makrodekomponáló csoportok (földgiliszták, csigák, ászkarák, ikerszelvényesek) felvétele. A giliszták mintázása 2014 és 2015 tavaszán, mustárporos és formalinos kiöntéssel, míg a többi taxoné 2015 májusában, egyelűes időgyűjtéssel történt.

DEKOMPOZÍCIÓS VIZSGÁLAT: A talajban történő növényi szervesanyag-bomlás nyomonkövetése teafilterekkel történt (Keuskamp *et al.* 2013). A vizsgálat 2013 novemberében kezdődött, területenként 20-20, összesen 400 db teafilter elásásával (a talaj felső 5 cm-ébe). Ehhez piramis alakú, rooibos (*Aspalathus linearis*) tea anyaggal töltött műanyagfiltereket használtam, amiket terepi alkalmazásuk előtt, a vízdoldható anyagok (egyszerű cukrok, fenolok) eltávolítása céljából kiáztattam, majd a kezdeti tömeg felvétele előtt tömegállandóságig 35 °C-on szárítottam. A filterek visszagyűjtése négy alkalommal, 4, 6, 8 és 12 hónappal a leásás után történt.

STATISZTIKAI ELEMZÉSEK: A vizsgált városi élőhelyek urbanizáltságának mértékét urbanizációs index (UI) segítségével fejeztem ki (Liker *et al.* 2008). A talajtulajdonságok élőhelytípusonkénti különbségeit általános lineáris kevert modellekkel (LMM) teszteltem, amikben a habitat típus, mint magyarázó, a lokalitás, mint random változó szerepeltek. Az urbanizáció talajparaméterekre gyakorolt hatásának vizsgálata is hasonló módon történt, azzal az eltéréssel, hogy ezekben a modellekben az UI szerepelt független változóként. A talajok ősbaktérium (Archaea) és baktérium (Bacteria) közösségeinek α diverzitását a mintákban talált különböző taxonómiai egységek (OTU) számával, valamint gyakran használt diverzitás mutatókkal, a Shannon (H') és Egyenletesség (J') indexekkel fejeztem ki. A mennyiségi viszonyok érzékeltetésére a mikrobák kópiaszámok alapján kapott abundanciáját használtam. A baktériumok közösségi összehasonlítására az ún. SDR szimplex megközelítést alkalmaztam (Podani és Schmera 2011). A mikrobiális diverzitás, abundancia és az urbanizáció, élőhelytípus, valamint a talaj fizikokémiai paraméterei közötti kapcsolatot LMM segítségével vizsgáltam. A habitat típus Bacteria és Archaea közösségek összetételére gyakorolt hatását permutációs többváltozós varianciaanalízissel (PERMANOVA) elemeztem, aminek eredményét főkoordináta-elemzés (PCoA) segítségével ábrázoltam. A mikrobióta összetételét befolyásoló edafikus tényezők felderítésére kanonikus korrespondencia-analízist (CCA) használtam. A CCA és PERMANOVA elemzésekhez csak a $\geq 0,01$ % relatív abundanciájú szekvenciákat vettem figyelembe. Mivel strukturálisan különböző élőhelyeket mintáztunk, a mintavételek számának megfelelőségét egyedalapú fajakkumulációs görbe segítségével igazoltam ('iNEXT' programcsomag, Hsieh *et al.* 2016). A mezofaunát a QBS indexszel, és a talajmikroarthropodák össz. egyedszámával jellemeztem. A vizsgált

makrofauna elemek diverzitását a fajgazdagsággal (=fajszám) fejeztem ki. A földigiliszták esetében biomassa adatokat is felvettünk (g/m^2). Az említett változók függő változókként szerepeltek az általános és általánosított lineáris kevert modellekben, melyek segítségével az urbanizáció és a fizikokémiai talajtulajdonságok céltaxonokra gyakorolt hatásait valószínűsítettem. A fajösszetételt befolyásoló tényezők megismeréséhez többváltozós megközelítést alkalmaztam az R szoftver 'manylm' függvényének használatával ('mvabund' csomag, Wang *et al.* 2012). A teafilterek kezdeti és visszamért tömegei közötti különbség alapján megállapítottam a szervesanyag-bomlás mértékét, amit a negatív exponenciális bomlási modellből számolt dekompozíciós rátával (k) fejeztem ki (Olson 1963). A szervesanyag-bomlási folyamat és az urbanizáció, és a mért talajváltozók közötti kapcsolat felderítésére LMM-et használtam. A talaj biodiverzitás index a talaj általunk vizsgált minőségi és mennyiségi biotikus jellemzőinek egy mutatóba integrálásával jött létre. Az index magában foglalja a földigilisztá fajgazdagságot és biomasszát, a Gastro-, Iso- és Diplopoda fajgazdagságot, a QBS indexet, a talajmikroarthropoda egyedszámot, valamint a mikrobiális diverzitást és abundanciát kifejező legfontosabb változókat (Archaea és Bacteria: H' és J' indexek, kópiaszámok). Az ezek standardizálása után átlagolt értékeket használtam a talaj biodiverzitás általános indikátoraként, a dekompozíciós folyamatokkal összefüggésben végzett elemzéshez (Wagg *et al.* 2014). A talaj biológiai sokfélesége és a szervesanyag-dekompozíció mértéke közötti összefüggéseket LMM segítségével elemeztem, ahol a lebontási ráta, mint függő, a biodiverzitás index, mint magyarázó változó szerepelt, a térbeli függetlenség hiányát kiküszöbölő lokális random faktor mellett. A szervesanyag-bomlás szempontjából legfontosabb biotikus jellemzők megismerésére ugyancsak LMM-et használtam a már fentebb említett – biodiverzitás indexbe integrált – változók magyarázó változókkénti modellbe vonásával.

2.2. Az extrém aszály hatása a talaj biodiverzitására és szervesanyag-lebontására (ExDRain-Projekt, Fülöpháza)

VIZSGÁLATI TERÜLET, MINTAVÉTELI ELRENDEZÉS: Kutatásunk helyszínéül az MTA Ökológiai Kutatóintézetének fülöpházi terepállomása szolgált, ahol az ún. ExDRain-Projekt ('Extreme Drought and Rain Manipulation Experiment') keretében 2013 óta klímaváltozással kapcsolatos, hosszútávú csapadékkizárásos terepi vizsgálatok folynak hat, egyenként 3×6 m-es kísérleti blokkban, amik egy-egy, 3×3 m-es kontroll (CC) és aszálykezelt (XC) parcellát tartalmaznak. Utóbbiakban a csapadék kizárása időszakos átlátszó fóliatető borítással történt, így szimulálva az extrém aszályos időszakot. A csapadék kizárása közel öt hónapos periódusban történt (2014. április 24-től szeptember 18-ig).

MINTAVÉTELI MÓDSZEREK: A talajhőmérséklet és -nedvesség mérése a talajban elhelyezett automata szenzorok segítségével történt, 10 percenkénti adat rögzítéssel. A mikrobiális vizsgálatokhoz 2015 márciusában kompozit talajmintákat vettem a felső 5 cm-es rétegből. A mikrobaközösségek összehasonlító vizsgálata (16S rDNS T-RFLP molekuláris ujjlenyomat módszer és shotgun metagenom szekvenálás) a Szent István Egyetem Regionális Egyetemi Tudásközpontjának laboratóriumában történt. A kísérleti terület lebontó talajízeltlábú faunájának kimutatására Barber-féle talajcsapdákat alkalmaztunk a kísérleti blokkok közelében (Barber 1931): blokkonként kettő-kettőt, 2015 tavaszán (április) és őszén (október) kététes időszakokban.

DEKOMPOZÍCIÓS VIZSGÁLAT: A szervesanyag-lebomlás vizsgálat az extrém aszálykezelés előtt egy hónappal kezdődött (2014. március 26.). Ehhez az említett piramis alakú, roiboos teafiltereket használtam a korábban leírtaknak megfelelően. A terepkísérletben parcellánként négy-négy teafilter (6 blokk \times 2 parcella \times 4 teafilter = 48 db) került lehelyezésre. A teafilterek visszagyűjtése négy alkalommal, a leásásuk után 2, 4, 6 és 12 hónappal történt. A visszagyűjtött filterek alapján felvett tömegcsökkenés adatokból, a korábbiakban leírtak szerint számoltam ki a lebontási rátákat.

STATISZTIKAI ELEMZÉSEK: A baktériumközösségek α diverzitásának becslésére a T-RFLP abundancia adatokból számolt H' és J' indexeket használtam. A talajbaktériumok közösségi összehasonlítására az ún. SDR szimplex megközelítést alkalmaztam (Podani és Schmera 2011). Az extrém aszály kezelés mikroklimatikus talajparaméterekre gyakorolt hatását LMM-mel értékeltem, amihez az R szoftver 'lme4' programcsomag 'lme' függvényét vettem igénybe (Pinheiro *et al.* 2015). A fix faktor a modellben a kezelés (kétszintű: kontroll vagy aszálykezelt), míg a random faktorok a blokk és idő változók voltak. A talaj háttérváltozókhoz kapcsolódó elemzéseknél figyelembe vettem a talajhőmérséklet és -nedvesség évközi ingadozásait is, a változók varianciáját felhasználva. Mivel ezek az adatok nem feleltek meg a normalitás és az egyenlő varianciák feltételeinek, a talajhőmérséklet és -nedvesség fluktuációjának összehasonlítását általánosított legkisebb négyzetek modellekkel (gls) végeztem ('nlme' programcsomag, Pinheiro *et al.* 2015). Az extrém aszály, a mikroklimatikus talajparaméterek és a bakteriális diverzitás, valamint szervesanyag-dekompozíció közötti összefüggések feltérképezése LMM-ekkel történt. A kevert modellekben az aszálykezelés, valamint a mikroklimatikus változók átlaga és varianciája voltak a fix, míg az idő és a blokk a random faktorok. Az idősort a 'corAR1' korrelációs struktúra modellbe vonásával vettem figyelembe. Az aszálykezelés baktériumközösségek szerkezetére gyakorolt hatásának

felderítésére PERMANOVA-t végeztem, a 'vegan' programcsomagot használva (Oksanen *et al.* 2015). A talajminták bakteriális összetétel alapján történő csoportosulását hierarchikus klaszteranalízissel, NMS ('nonmetric multidimensional scaling'), valamint CCA ordinációs módszerekkel vizsgáltam. A klaszterek közötti szignifikáns elágazások meghatározására SIMPROF ('similarity profile permutation') tesztet alkalmaztam a 'clustsig' nevű R programcsomaggal (Whitaker és Christman 2014).

2.3. Az ugaroltatás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra

2.3.1. I. vizsgálat: Az ugaroltatás hatása a talajfelszíni makrodekomponáló gerinctelenekre (2008. évi vizsgálat, Hevesi-sík)

A 2008. évi vizsgálat Kovács-Hostyánszki Anikó doktori kutatásának (Kovács 2011) részeként valósult meg, munkám a talajcsapdaanyagok makrodekomponáló együtteseinek faji identifikációjára és az adatok értékelésére terjedt ki.

ÉLŐHELYEK KIJELÖLÉSE: A szántóföldi célprogramon belül előírt rövidtávú területpihentetés során létrejött egy-, két- és hároméves ugarterületek makrodekomponáló faunáját hasonlítottuk össze egymással, valamint őszi vetésű búzaföldekkel és féltermészetes gyepekkel. A három, különböző korú ugartípusból hat-hat (háromévesből a területi adottságok miatt csak öt) területet választottak Besenyőtelek, Mezőtárkány és Poroszló térségében. Mindegyik ugar mellett közvetlenül egy-egy búzatábla, valamint összesen hat gyeperült került kijelölésre.

MINTAVÉTELI MÓDSZEREK: A területek növényi fajgazdagsága és vegetáció borítottsága élőhelyenként tíz darab 2×2 m-es botanikai kvadrátban került felmérésre 2008 tavaszán (Kovács 2011). A talajfelszíni makrodekomponálók (Iso- és Diplopoda) gyűjtését tölséres talajcsapdák segítségével végezték 2008. május-júniusában. Élőhelyenként öt talajcsapda működött egymástól 20 m távolságra, a táblák szegélyétől min. 50 m-re.

STATISZTIKAI ELEMZÉSEK: Az adatok elemzésekor a Diplopoda és Oniscidea fajgazdagságot és abundanciát, mint függő változókat vettem figyelembe. Az ugar-búzaföld párok fajgazdagság és egyedszám szerinti páronkénti összehasonlítását páros Wilcoxon-próbával végeztem. Mivel strukturálisan nagyon különböző élőhelyeket mintáztunk, a mintavételek számának megfelelőségét egyedalapú fajakkumulációs görbe segítségével igazoltam ('iNEXT' programcsomag, Hsieh *et al.* 2016). Az ugaroltatás hatékonyságát új változó (az ugar-búza területpárok ászkarák és ikerszelvényes

fajgazdagsága, illetve egyedszámbeli különbségei) bevezetésével vontam be a statisztikai elemzésbe. Az ugarok korának búzaterületekre gyakorolt hatását Kruskal-Wallis tesztekkel vizsgáltam, amit a csoportok összehasonlítása (Dunn-féle post-hoc teszt) követett. Kruskal-Wallis tesztet és Dunn-féle post hoc tesztet alkalmaztam a különböző korú ugarok, valamint gyepék ászka- és ikerszelvényes fajgazdagságának és abundanciájának összevetéséhez is. Mivel vizsgálataink során relatíve kevés faj került elő a Wilcoxon és Kruskal-Wallis tesztek faji szinten is elvégeztem. A habitattípus (ötszintű fix faktor: őszi búza, egy-, két- és hároméves ugar, gyep), a növényfajgazdagság, valamint a vegetáció borítottság makrodekomponáló taxonokra gyakorolt hatását LMM-ekkel elemeztem. Többváltozós megközelítést alkalmazva lehetővé vált a fajok közötti preferencia különbségek kimutatása is ('manylm' nevű függvény). Az egyes minták között a mintavételi elrendezésből adódó térbeli függetlenség hiányát, az ugar-búza területek páros elrendezését random faktor modellbe építésével vettem figyelembe. A növényi fajgazdagság, vegetáció borítottság és az élőhelytípus makrolebontó együttesek fajösszetételére gyakorolt hatását redundancia analízis (RDA) segítségével vizsgáltam ('vegan' programcsomag, Oksanen *et al.* 2015).

2.3.2. II. vizsgálat: Az ugarok hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (LIBERATION-Projekt, Hevesi-sík)

ÉLŐHELYEK KIJELÖLÉSE: A Hevesi-síkon, Poroszló és Besenyőtelek térségében hét pár gabona – ugarterület, illetve hat, kontrollként szolgáló féltermészetes gyep és hat ugar nélküli gabonaföld került kijelölésre.

MINTAVÉTELI MÓDSZEREK: Alap talajtani vizsgálatok céljából 2014 májusában minden élőhelyről kompozit talajmintát vettem a talaj 0-10 cm-es rétegéből. Ezt követően meghatározásra került a talaj pH, K_A , az összes só, $CaCO_3$, humusztartalom, valamint a P_2O_5 , K_2O , Na, NO_2+NO_3-N , Mg és SO_4-S mennyisége. A mikrobiális diverzitás felmérése, a talajbaktériumok közösségi összehasonlító vizsgálata, a talaj felső 5 cm-éből vett minták (2014. május) alapján, T-RFLP genetikai ujjlenyomat módszerrel történt. A mezofauna extrakciójához területenként hat-hat pontból vettem (2014. május) talajmintát. A mintavételi helyek egy transzekt mentén, a tábla szegélytől 0, 10 és 20 m-es távolságokban voltak. A féltermészetes gyepék mintái a szegélytől 2-300 m-es távolságból származtak, hat, egymástól 10 m-re lévő, véletlenszerűen kiválasztott pontból. A kinyert talajállatokat nagyobb taxonokra válogattam, majd ez alapján kiszámítottam a területek QBS indexét (Parisi *et al.* 2005). Az Iso-, Diplopoda együttesek felmérése talajcsapdák segítségével történt (2014. május, kéthetes időszak). Élőhelyenként négy-négy talajcsapda került kihelyezésre egy transzekt mentén, a tábla szegélytől számított 0, 5, 10 és 20 m-es távolságokban. A féltermészetes gyepék esetén

a csapdák véletlenszerűen, egymástól 10 m-re, a szegélytől számított 2-300 m-es távolságban voltak.

DEKOMPOZÍCIÓS VIZSGÁLAT: Az élőhelyek talajainak szervesanyag-lebontó képességét a már előzőekben ismertetett teafilter módszerrel követtük. A 2014 májusában, a talaj felső 5 cm-es rétegébe helyezett, területenként négy-négy teafilter – a nyári aratási munkákat megelőzően – 1 hónappal később került visszagyűjtésre. Ezt követően a visszamért tömegekből – a korábbiakban ismertetett módon – történt a lebontási ráták számolása.

STATISZTIKAI ELEMZÉSEK: A vizsgált talajtulajdonságok élőhelytípusonkénti különbségeinek kimutatására LMM-eket alkalmaztam, ahol a habitattípus magyarázó, míg a lokalitás, random változóként szerepeltek. A baktérium közösségek α diverzitását a H' és J' indexekkel fejeztem ki. Közösségi összehasonlításukhoz itt is az SDR szimplexet alkalmaztam (Podani és Schmera 2011). A bakteriális diverzitás és az élőhelytípus, valamint talaj fizikokémiai paraméterek közötti kapcsolatot LMM-ek segítségével vizsgáltam. A habitattípus Bacteria közösségek összetételére gyakorolt hatásának megismerésére PERMANOVA-t végeztem, melynek eredményét PCoA segítségével ábrázoltam. A mintavételi helyek talajainak mezofaunáját QBS indexszel, és az előkerült mikroarthropodák össz. egyedszámával jellemeztem. A makrodekomponáló gerinctelenek diverzitását a fajgazdagsággal fejeztem ki. A mennyiségi viszonyok bemutatásához a talált fajok egyedszámát vettem alapul. Az Iso-és Diplopoda fajgazdagság és abundancia függő változókként szerepeltek az általánosított lineáris kevert modellekben, amiket az élőhelytípus és a fizikokémiai talajtulajdonságok céltaxonokra gyakorolt hatásainak kimutatására alkalmaztam. A fajösszetélt befolyásoló tényezők megismerésére CCA-t használtam. Mivel strukturálisan különböző élőhelyeket mintáztunk, a mintavételek számának megfelelőségét egyedalapú fajakkumulációs görbe segítségével igazoltam ('iNEXT' programcsomag, Hsieh *et al.* 2016). A szervesanyag-bomlási folyamat és az élőhely milyensége, valamint a mért talajváltozók közötti kapcsolat felderítésére LMM-et használtam. A talaj biodiverzitás index megalkotásánál az Iso- és Diplopoda fajgazdagság, valamint abundancia, QBS index, mikroarthropoda egyedszám, ill. a bakteriális diverzitást kifejező H' és J' mutatókat alkalmaztam. Az ezzel kapcsolatos további statisztikai elemzések megegyeznek a korábban leírtakkal.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A városiasodás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (GLUSEEN-Projekt, Budapest)

Az UI értékei -3,56 és 3,53 között változtak. A mutató szerint a mintavételi területek nem alkottak határozottan elkülöníthető csoportokat, illetve mintázatot. A növényborítottság a kis beépítettségű, antropogén hatásoknak minimálisan kitett referenciaterületeken volt a legmagasabb. A leginkább urbanizálódott mintavételi helyek elsősorban az erősen zavart és városi gyep kategóriák közül kerültek ki.

Élőhelytípusonként számos talajtulajdonság esetében markáns különbségeket tapasztaltunk. Az erősen zavart és városi gyep élőhelyek rendszerint lúgosabb talajjal rendelkeztek a városi erdőfragmentumokhoz és referenciaterületekhez képest. Ehhez hasonló trend volt megfigyelhető a talajok szénsavas mésztartalmát illetően is, míg ezzel ellentétes a talajok kötöttsége, humusztartalma és nitrogén-ellátottsága vonatkozásában. A városiasodással nőtt a talaj pH, a szénsavas mésztartalom, valamint a kálium mennyisége, de a talaj kötöttsége, ill. nitrogén-ellátottsága ellenkező irányú változásokat mutatott.

A talajmintákból összesen 61 019 db Archaea és Bacteria doménbe tartozó OTU-t sikerült kimutatni, 1,91 % : 98,09 %-os arányban. A talált 2 509 732 darab szekvencia 94,78 %-a bakteriális, míg 5,22 %-a archeális eredetű volt. Az élőhely milyensége jelentős mértékben befolyásolta az ősbaktériumok α diverzitását és abundanciáját. Az OTU-k és szekvenciák száma átlagosan a városi gyepek talajában volt a legmagasabb, amit az erősen zavart, városi erdőfragmentum és referenciaterületek követtek. A H' diverzitás index vonatkozásában is a városi gyepek bizonyultak a legjobb élőhelynek, amit a hasonló értékekkel bíró városi erdőfoltok követtek, míg a ruderalis és referenciaerdő habitatok talajai szignifikánsan alacsonyabb diverzitással bírtak. Ugyanakkor az Archaea közösségek egyenletessége a városi erdőfragmentumokról származó mintákban volt a legnagyobb, szignifikánsan különbözve a legkisebb értékeket mutató, erősen zavart élőhelyektől. Az urbanizáltság mértékének növekedésével azonban az OTU szám és az abundancia csökkenését tapasztaltuk. A talajtulajdonságok közül ezzel szemben a szénsavas mésztartalom és kálium-ellátottság pozitív hatásai voltak megfigyelhetők. A talaj nitrogén mennyisége negatívan befolyásolta a H' és a J' index alakulását. Előbbi esetében a foszfor-ellátottság is hasonló irányú változást mutatott. A habitattípus az α diverzitás mellett szignifikánsan hatott az archeák közösségi összetételére is, még ha csak marginálisan is ($F_{\text{PERMANOVA}} = 1,698$; $p = 0,07$). Az erősen zavart és városi gyep élőhelyek talajai hasonló Archaea közösséggel bírtak, ellentétben a városi

erdőfragmentumokkal és a referenciaterületekkel. A talaj humusztartalma is szignifikáns változónak bizonyult az ősbaktériumok közösségi összetételével kapcsolatban ($F = 1,7600$; $p = 0,039$). A bakteriális OTU számot is befolyásolta (marginális szignifikánsan) a habitattípus: az erősen zavart, ruderalis élőhelyek mutatva a legnagyobb, míg a referenciaerdő területek a legkisebb fajgazdagságot. A talaj pH és Arany-féle kötöttségi értékek növekedésével a bakteriális abundancia csökkent, míg a talaj humusztartalmával pozitív kapcsolatot mutatott. Az archeákhoz hasonlóan a baktériumok közösségi összetételét is jelentősen befolyásolta az élőhely milyensége ($F_{PERMANOVA} = 1,523$; $p = 0,06$).

A gyűjtött talajmintákból 18 mikroarthropoda taxon összesen 6833 egyedét sikerült kinyerni. Az ebből számolt QBS indexek szerint átlagosan a városi erdőfragmentumok bírtak a legjobb minőségű talajokkal. Szignifikánsan kisebb QBS indexeket kaptunk az erősen zavart, valamint referenciaerdő élőhelyeken. Az egyedszámok esetében ugyanakkor nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget az élőhelyek között. Az élőhelytípus mellett a talaj kálium-ellátottsága bírt jelentős hatással a talaj biológiai minőségére.

A földgiliszta gyűjtések hét faj 172 egyedét eredményezték. A vizsgált két év között a fajösszetétel és a közösségek fajonkénti megoszlását illetően jelentős különbségeket tapasztaltunk: míg 2014-ben az *Aporrectodea* sp., 2015-ben az *Octolasion lacteum* fordult elő legnagyobb arányban. A taxon fajgazdagságát a talaj humusz- és szénsavas mésztartalma befolyásolta szignifikánsan. A biomassa és a faji összetétel tekintetében a két gyűjtési év között statisztikailag igazolható különbségeket kaptunk.

A mintavételi területekről 12 család összesen 18 Gastropoda fajt mutatunk ki. Leggyakoribbnak az *Aegopinella pura*, *Granaria frumentum* és *Macrogastera ventricosa* bizonyultak. A fajok között három védett faj is szerepelt: *Cepaea hortensis*, *Helix pomatia*, *Orcula dolium*. Fajgazdagságban az élőhelyek között szignifikáns eltérés adódott. Az erősen zavart élőhelyek átlagosan kisebb fajszámmal voltak jellemezhetők, mint a legnagyobb fajgazdagsággal bíró városi erdőfoltok ($z = 2,257$; $p = 0,024$). Az élőhely milyenségén túl szignifikáns hatása volt a talaj pH-jának, szénsavas mésztartalmának, valamint foszfor- és nitrogén-ellátottságának. Jelen vizsgálatban a fajösszetétel tekintetében egyik háttérváltozó sem bizonyult meghatározónak.

A mintavételi területek talajfelszíni makrodekomponáló ízeltlábúiból közül három Oniscidea- és 13 Diplopoda fajt sikerült kimutatni. A leggyakoribbak a *Porcellium collicola*, ill. az *Ophiulus pilosus* és *Cylindroiulus boleti* fajok voltak. Mindkét taxonban domináltak a tág tűrőképességű és/vagy emberi hatást jól toleráló, szinantrop fajok. Az Oniscidea fajgazdagságra egyik vizsgált háttérváltozó sem mutatott szignifikáns hatást. Az ikerszelvényesek esetén az élőhely milyensége és az urbanizáció (UI) mellett a talajok

kötöttsége, valamint nitrogéntartalma is jelentős változónak bizonyult. A referenciaerdőben találtuk átlagosan a legmagasabb Diplopoda fajsza­m­ot, szignifikáns különbséget tapasztalva a legkisebb fajgazdagsággal jellemezhető, erősen zavart, ruderalis habitatokhoz képest. Az urbanizáltság és az Arany-féle kötöttség növekedésével fajgazdagságbeli csökkenés prediktálható, míg a talaj N ellátottságának emelkedése pozitívan befolyásolta fajsza­m­ukat.

A dekompozíciós vizsgálat egy éve alatt átlagosan a szerves anyag 32,89 %-a bomlott le. A lebontás azonban élőhelytípustól függően eltérő intenzitással zajlott: a városi gyepek talajában nagyobb mértékű tömegcsökkenés volt kimutatható. A talaj biodiverzitás és szervesanyag-dekompozíció mértéke között pozitív összefüggést találtunk: a biodiverzitás növekedésével a bomlási folyamatok intenzitása is nőtt ($t = 2,0565$; $p = 0,064$). A talaj biodiverzitás indexet alkotó biotikus jellemzők közül a földgiliszta fajgazdagság, a mikroarthropoda egyedszám, az Archaea és Bacteria diverzitás, valamint ez utóbbi abundanciája bírtak szignifikáns hatással a szervesanyag-dekompozíció mértékére.

3.2. Az extrém aszály hatása a talaj biodiverzitására és szervesanyag-lebontására (ExDRain-Projekt, Fülöpháza)

Az extrém aszálykezelés mintegy öt hónapos periódusa alatt a vizsgált időszakban hullott teljes csapadékmennyiség 61,24 %-a (523 mm) került kizárásra az XC parcellákban. Ennek következtében jelentős különbségek mutatkoztak az aszálykezelt és kontroll parcellák között, mind a talajhőmérséklet ($t = 10,577$; $p < 0,001$), mind a talajnedvesség ($t = -6,357$; $p < 0,001$) esetében. Az XC parcellák talajnedvessége átlagosan 41,82 %-kal volt kevesebb, a talajhőmérséklet viszont átlagosan 1,56 °C-kal emelkedett meg a CC parcellákhoz képest a szervesanyag-bomlási vizsgálat végére. A talaj mikroklimatikus háttérváltozónak időbeli ingadozását tekintve a talajnedvesség esetében csökkenés ($p < 0,001$), míg a talajhőmérsékletet illetően növekedés volt megfigyelhető az XC parcellákban ($p = 0,043$).

A bakteriális abundancia adatokra alkalmazott PERMANOVA szerint a szárazságkezelésnek középtávon is szignifikáns hatása volt az egész talajbaktérium-közösségre ($F_{\text{PERMANOVA}} = 10,36$, $p = 0,002$). Az α diverzitás indexek alapján ugyan ez a különbség már nem volt számottevő: a CC parcellák esetében a talajbaktérium-közösségek némileg diverzebbnek látszódtak, illetve nagyobb egyenletességgel voltak jellemezhetőek az XC parcellákhoz képest. A vizsgált 12 talajminta bakteriális fajkészlete, SDR szimplex módszerrel összevetve, nagy fajsza­m­beli hasonlóságot mutatott. Említésre érdemes, hogy a CC és XC talajminták közötti összehasonlítás SDR pontfelhője a háromszög R csúcsa felé tolódik, ami nagyobb fajkicserélődésre, így nagyobb β diverzitásra utal azokhoz az esetekhez képest, amikor

hasonlóan kezelt (CC vagy XC) talajbaktérium-közösségeket vetettünk össze. A fajösszetételre a vizsgált talaj mikroklimatikus változók közül a talajhőmérséklet varianciája ($p = 0,05$) és az átlagos talajnedvesség ($p = 0,03$) bizonyult döntő jelentőségűnek. A shotgun metagenom szekvenálás eredményei szerint mindkét vizsgált talajmintában a Bacteria doménbe tartozó DNS szekvenciák domináltak (1XC: 86,1 % és 6CC: 83,3 %). Az Archaea doménre jellemző szekvenciák aránya csaknem azonos volt: az XC parcella talajában 2,26 %, míg a CC parcella esetén 2,33 %. Az előbbiekkal ellentétben az Eukaryota doménhez köthető szekvenciákban számottevő különbség volt detektálható a minták között (1XC: 1,7 % és 6CC: 5,7 %). A baktériumok közösségi összetétele – bizonyos nemzetségektől eltekintve – hasonló volt. Mindkét mintában a *Streptomyces* tagjai voltak jelen a legnagyobb arányban, különösen a CC parcella talajában (az összes metagenom szekvencia csaknem 4,5%-a). Az XC minta esetén ez az arány csak 3,1 % volt. Hasonló trend adódott az Actinobacteria családba tartozó *Mycobacterium* nemzetség esetén is (6CC: 3,2 %; 1XC: 2,1 %). Azonban a *Rubrobacter* nemzetséghez köthető szekvenciák aránya közel 2,7 % volt mindkét mintában. Ezzel szemben az *Acinetobacter* nemzetségbe tartozó baktériumok esetében jelentős különbséget detektáltunk: a CC talajban a metagenom szekvenciák 1,4 %-át, míg az XC mintákban 0,1 %-át ez a taxon adta. Fontos még megemlíteni, hogy a *Candidatus Solibacter*, *Candidatus Koribacter*, *Gemmata* és *Methylobacterium* nemzetségek a szárazságkezelt talajmintában nagyobb mértékben voltak megfigyelhetők. Az Archaea domén esetén nem volt a minták között figyelemre méltó különbség. Mindkét talajban a Thaumarchaeota törzsbe tartozó taxonok voltak jelen a legtomegesebben: a *Nitrosopumilus*, *Crenarchaeum* és *Nitrososphaera* nemzetségek. A 6CC talajmintát az Eurotiomycetes családba tartozók gombák dominanciája jellemezte, ami főként az *Aspergillus* és *Penicillium* nemzetségek nagyarányú jelenlétének volt köszönhető. Ezzel ellentétben az 1XC talajmintában nem volt fellelhető egy domináns gombacsoport sem. De a Dothideomycetes osztály *Phaeosphaeria* és *Pyrenophora* nemzetségeibe tartozó szekvenciák kétszeres mennyiségben voltak jelen az aszálykezelt parcella talajában (1XC: 18,7 %, míg 6CC: 9,2 %).

A 2015 tavaszán és őszén végzett 2-2 hetes talajcspadázások során 13 ugróvillás faj (*Collembola*) összesen 5861 egyedét sikerült kimutatni. Az évszakok között jelentős különbségek voltak a közösség faji összetételében és abundancia viszonyaiban. Míg tavasszal az *Entomobrya nigriventris* (a gyűjtött egyedek több, mint 90 %-a), addig ősszel a *Brachystomella curvula* (közel 64 %-os relatív abundanciával) volt a leggyakoribb faj. A makrodekomponáló ízeltlábúak közül csak egyetlen, szárazságtűrő ikerszelvényes faj (*Megaphyllum unilineatum*) került elő a cspadázások során, az őszi időszakban.

A szervesanyag-bomlás intenzitása a CC parcella talajaiban átlagosan csaknem kétszer akkora volt, mint az XC-k esetében. Fontos megjegyezni, hogy az extrém aszályos időszak után fokozatos növekedés volt megfigyelhető az XC parcellákban. Az egy esztendő alatt bekövetkezett tömegcsökkenés eredményeként a CC parcellákban a szerves anyag átlagosan 80,19 %-a ($\pm 2,4$ %), míg a csapadékkizárásos talajokban átlagosan 87,66 %-a ($\pm 2,44$ %) maradt meg a vizsgált időszak végére. Az extrém aszálykezelés tehát szignifikáns hatással volt a növényiszervesanyag-bomlásra: a szárazság következtében ugyanis jelentős mértékben csökkent annak intenzitása. A lebontás mértékét mindkét vizsgált mikroklimatikus talajparaméter drasztikus megváltozása szignifikánsan befolyásolta. A dekompozíciós ráták növekedést mutattak a talajok bakteriális diverzitásának emelkedésével, ám jelen adatok tükrében ez nem volt szignifikáns.

3.3. Az ugaroltatás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra

3.3.1. I. vizsgálat: Az ugaroltatás hatása a talajfelszíni makrodekomponáló gerinctelenekre (2008. évi vizsgálat, Hevesi-sík)

A talajcsapdázások során nyolc ászka- és ikerszelvényes faj összesen 2362 egyede került elő. Legnagyobb arányban az *Armadillidium vulgare* (Isopoda: Oniscidea) és a *Leptoionus cibdellus* (Diplopoda) fajok fordultak elő. A legalacsonyabb átlagos ászka egyedszámok a búza (4 egyed/terület) és egyéves ugarterületeken (3,6 egyed/terület) voltak megfigyelhetők, ami az ugarok korának növekedésével egyre emelkedett. A hároméves ugarokon számuk elérte a területenkénti 43,6 átlagos egyedszámot, de a legnagyobb értékekkel a kétéves ugarok voltak jellemezhetők (139,5 egyed/terület).

Az ikerszelvényesek esetén a gyepek bizonyultak a legszegényebb élőhelynek: átlagosan 14 egyed került elő területenként. A Wilcoxon-féle előjeles rangpróbákkal végzett páronkénti összehasonlítások azt mutatták, hogy az ászka fajgazdagság ($p = 0,045$) és abundancia ($p = 0,008$) szignifikánsan magasabb volt az ugarokon, azok búzapárjaihoz képest. Az ikerszelvényesek esetében ez nem volt megfigyelhető. Faji szintű elemzéseink alapján csaknem minden faj nagyobb egyedszámban fordult elő az ugarterületeken, azok búzapárjaihoz viszonyítva. A vizsgált makrodekomponálók fajgazdagsága és egyedszáma növekvő trendet mutatott az ugarok korával. A hároméves ugarterületek az ászkarakók fajszáma és abundanciája tekintetében hasonló, ill. bizonyos esetekben nagyobb értékekkel voltak jellemezhetők, mint a féltermészetes gyepek. Az ikerszelvényesek esetében mind a kétéves, mind a hároméves ugarok szignifikánsan nagyobb faj- és egyedszámmal bírtak a gyepterületekhez

képest. A szárazföldi ászkarák fajgazdagságát és abundanciáját illetően az ugargazdálkodás hatékonysága szignifikáns növekedést mutatott az ugarok korával. Az ikerszelvényesek esetében is hasonló trendeket találtunk. Az ikerszelvényesek átlagos egyedszáma a kétéves ugarterületeken volt a legnagyobb. A faji szintű elemzéseink szerint csaknem minden faj tekintetében szignifikánsan nagyobb volt az ugaroltatás hatékonysága a hároméves ugarok esetén. Az ászkarák faj-, illetve egyedszáma szignifikánsan különbözött a búzaterületekhez tartozó ugarok korával és a következő sorrendben mutatkozott csökkenés: B1 > B3 > B2. Ezzel szemben a két- és hároméves ugarok melletti búzaföldeken nagyobb volt az ikerszelvényesek fajgazdagsága és abundanciája, mint az egyéves ugarok szomszédságában lévő búzaterületeken. Az élőhelytípus szignifikánsan befolyásolta az összes talált fajt. A növényi fajgazdagság is jelentős hatást mutatott – a *B. bagnalli* és *I. terrestris* kivételével – csaknem minden fajra. A növényfajszám szempontjából a búzaterületek számítottak a legszegényebb élőhelyeknek, míg a hároméves ugarok a leggazdagabbaknak. A vegetáció borítottság ugyanakkor csak három faj (*B. bagnalli*, *I. terrestris* és *L. cibdellus*) esetében hatott szignifikánsan. A csupasz talajfelszín aránya a búzaterületeken volt átlagosan a legkisebb és az ugarok korával egyre csökkent a növényborítottság mértéke. A növényi fajgazdagság ($F = 4,27$, $p = 0,042$) szignifikáns hatással volt a gerinctelen együttesekre. Az élőhelytípus is jelentős hatással bírt a makrodekomponálók faji összetételére, azonban ez a hatás csak marginálisan volt szignifikáns ($F = 2,43$, $p = 0,071$).

3.3.2. II. vizsgálat: Az ugarok hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (LIBERATION-Projekt, Hevesi-sík)

Az élőhelytípusok között a pH, a kálium- és nátriumtartalom tekintetében kaptunk szignifikáns különbségeket. A talaj pH szignifikánsan alacsonyabb volt a gyepeken, a lúgosabb kémhatású gabonaterületekhez képest. A nátriumtartalom a gyepeken volt a legmagasabb. Ezzel szemben a káliumtartalmat tekintve a gabona, ill. ugar melletti gabona élőhelyek szignifikánsan nagyobb értékekkel bírtak az ugaroknál és a gyepeknél.

A talajbaktérium-közösségek diverzitásának becslésére használt mutatók közül csak az egyenletesség (J') esetében tapasztaltunk jelentősebb változást a környezeti változókkal összefüggésben. Szignifikánsnak a talaj humusz- ($t = -2,47$; $p = 0,05$) és nátriumtartalma ($t = 3,28$; $p = 0,022$) bizonyult: előbbi a diverzitás indexre negatív, míg utóbbi pozitív irányú hatással.

Vizsgálataink során a talajmikroarthropodák 19 taxonjának 14 385 egyede került elő. Az ebből számolt QBS indexek 29 és 128 között mozogtak és élőhelytípusonként szignifikáns különbséget mutattak. A legmagasabb átlagértékeket a féltermészetes gyepek, míg a legalacsonyabbakat az ugar nélküli gabonaterületek esetében tapasztaltuk. Az élőhely milyensége a

mikroarthropoda egyedszámok esetében is meghatározó jelentőséggel bírt, ugyanis az ugarterületeken szignifikánsan több talajállat volt a többi habitattípushoz képest. Az ugar- és gabonaterületek páronkénti összehasonlítása azonban sem a QBS index, sem az össz. egyedszám esetében sem mutatott jelentős eltéréseket az élőhelyek között. A QBS indexre a talaj pH és Na negatív, míg a humusztartalom, a talaj kötöttsége és szulfátmennyisége kedvező hatást gyakorolt. A mikroarthropoda egyedszáma és a talaj pH, ill. nitrát és nitrit-nitrogén mennyiség között pozitív összefüggést találtunk, míg a talaj sókoncentrációja, kálium- és nátrium-ellátottságának emelkedése a talajállatok számának csökkenésével járt.

A talajcsapdázás 8 szárazföldi ászkarák- és ikerszelvényes faj összesen 1391 példányát eredményezte (783 db Isopoda, 608 db Diplopoda), ami 4-4 faj között oszlott meg. Az ászkák közül az *Armadillidium vulgare* (89,27 %), míg az ezerlábúak közül a *Iulus terrestris* (59,38 %) bizonyult a legtömegesebbnek. A makrodekomponáló gerinctelenek fajgazdagságát illetően csak az Isopoda taxon esetében találtunk szignifikánsnak bizonyuló környezeti háttérváltozókat. Az élőhely jellege meghatározó voltán túl a talaj pH emelkedésének ászkafajsámszámra gyakorolt negatív hatását tapasztaltuk ($z = -2,236$; $p = 0,022$). A legnagyobb fajgazdagság a féltérmeztes gyepeket jellemezte, míg a legszegényebb élőhelynek az ugar nélküli gabonaterületek bizonyultak. Az Iso- és Diplopoda egyedszámok tekintetében is megfigyelhető volt az élőhelyhatás, szignifikáns eltéréseket mutatva a különböző habitatok között. Előbbi esetében – a fajgazdagsághoz hasonlóan – a féltérmeztes gyepek bizonyultak a leggazdagabb, míg az ugar nélküli gabonaterületek a legszegényebb élőhelyeknek. Ezzel szemben az ikerszelvényesek az ugar nélküli gabonaterületeken jelentek meg legnagyobb átlagos egyedszámban. Az ugarokon és gabonaföld szomszédjaikon ehhez képest szignifikánsan kisebb számban voltak ezerlábúak. A szárazföldi ászkarákok abundanciájára a habitattípus mellett a talaj kálium- és nitrogénmennyisége is nagy jelentőséggel bírt, negatív irányú hatást gyakorolva azok tömegességére. Az ugar-gabonapárok között egyik taxon fajgazdagsága és abundanciája esetében sem tapasztaltunk szignifikáns eltérést. Az élőhelytípus – a talaj sókoncentrációja, humusztartalma és magnéziummennyisége mellett – az ászkarák és ikerszelvényes fajösszetételt is jelentősen befolyásolta. A *B. superus* és *B. bagnalli* elsősorban a gabonaterületeken voltak jelen, míg a *M. unilineatum* és *A. vulgare* a humuszban és magnéziumban gazdagabb talajú gyepek és ugarterületeket preferálta. A *T. rathkii* faj esetében is ezek voltak a legkedveltebb élőhelyek. A *I. terrestris* a magasabb sókoncentrációjú élőhelyeken fordult elő gyakrabban.

A lebontási vizsgálat egy hónapja alatt a szerves anyag átlagosan 22,41 %-a bomlott le. A tömegcsökkenés mértéke élőhelytípusonként szignifikánsan különbözött. Az ugarterületeken tapasztaltuk a legnagyobb,

míg a gabonaterületeken a legkisebb bomlást. A habitattípus mellett a dekompozíciós ráta alakulására a kálium-ellátottság, sókoncentráció és humusztartalom növekedésének negatív, míg a foszformennyiség és a talaj pH emelkedésének pozitív hatásait találtuk. A vizsgált biotikus komponensek közül a talaj biológiai minősége (QBS index) befolyásolta szignifikánsan a lebontást, még ha csak marginálisan is ($t = 2,1076$; $p = 0,08$).

3.4. Új tudományos eredmények

1. Vizsgálataim átfogó képet adnak a különböző, ember által befolyásolt ökoszisztémák lebontó alrendszerének felépítéséről, valamint működéséről.
2. A talajban játszódó növényi szervesanyag-dekompozíció nyomon követésére a nemzetközi szinten is újszerű, teafilter módszert alkalmaztam, illetve tökéletesítettem/módosítottam.
3. Munkám során többek között igazolást nyert a főváros antropogén zavarásnak fokozottabban kitett élőhelyeinek szénkibocsátó volta, valamint azok talaj biodiverzitás megőrzésében betöltött fontos szerepe.
4. Egy úttörő klímaváltozás kutatás részeként, az extrém aszály talajmikrobákra (baktériumok, ősbaktériumok, gombák) gyakorolt hatásait mutattam ki. Ennek keretében a talajmikroba-közösségek között markáns különbségeket tapasztaltam félévvel az öt hónapos csapadékkizárást követően.
5. Eredményeim alapján megállapítható, hogy az agrár-környezetvédelmi program keretében létesített ugarok rendkívüli jelentőséggel bírnak a talaj biodiverzitás fenntartása szempontjából, kedvező körülményeket biztosítva a talajélőlények többsége számára. A területpihentetés hosszát illetően bebizonyosodott, hogy az ugarok korával ez a pozitív hatás még kifejezettebb.
6. A talajok biodiverzitása és a szervesanyag-bomlás intenzitása között pozitív kapcsolatot találtam, ami jelentős mértékben hozzájárulhat a még ma is jellemző tudományos bizonytalanság tisztázásához.
7. A fülöpházi kutatás során a hazai faunára új ugróvillás fajt (*Orchesella taurica*) sikerült kimutatni.

4. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Talajaink állapota az emberi tevékenységek eredményeként egyre romlik, amit a globális környezeti problémák még tovább súlyosbítanak. Az ENSZ szerint a talajokat leginkább veszélyeztető degradációs folyamatok elleni

fellépés tehát kiemelt célkitűzés kell, hogy legyen nemzeti és nemzetközi szinten egyaránt. Európa- és világszerte megfigyelhető a talajok egyre nagyobb mértékű pusztulása, köszönhetően többek között a nem megfelelő mező-, erdőgazdálkodási gyakorlatnak, a környezetszennyezésnek, a városok terjeszkedésének és a klímaváltozásnak. A FAO adatai alapján ez a tendencia folytatódik, és ennek eredményeként az egy főre jutó termőterület 2050-re drasztikus mértékben csökken (Conforti 2011). Az Európai Bizottság már egy 2002. évi közleményében felhívta a figyelmet a talajainkat leginkább veszélyeztető folyamatokra, amik a következők: erózió, talaj szervesanyag-tartalmának csökkenése, talajszennyezés, szikesedés, talajtömörödés, talaj biodiverzitás leromlása, talajfedés, földcsuszamlás (European Commission 2002). Kialakulásuk sok esetben nem egy tényező függvénye, hanem több talajdegradációs folyamat együttes hatásának összetett, olykor kaszkádszerű eredménye.

Tanulmányomban a talaj abiotikus és biotikus tényezőinek, valamint a növényiszervesanyag-dekompozíciónak kapcsolatát vizsgáltam a legkülönbözőbb antropogén eredetű hatásokkal összefüggésben. Doktori disszertációmban ennek megfelelően négy vizsgálatban mutatom be az urbanizáció, a klímaváltozás következtében valószínűleg egyre gyakoribbá váló extrém aszály, illetve az ugargazdálkodás lebontó alrendszerre gyakorolt hatásait.

4.1. A városiasodás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (GLUSEEN-Projekt, Budapest)

A városiasodással és az emberi zavarással összefüggésben számos fizikokémiai talajtulajdonság (pH, CaCO_3 , K_A , N, H) esetében szignifikáns változást tapasztaltunk. Vizsgálatunkban bebizonyosodott az emberi zavarásnak fokozottabban kitett, tipikus, városi zöld élőhelyfoltok (erősen zavart és városi gyep habitatok) biológiai sokféleség fenntartásában betöltött fontos szerepe. A vártakkal ellentétben ugyanis a talaj biodiverzitása összességében ezeken az antropogénebb élőhelyeken volt a legnagyobb. Többek között gazdagabb talajbaktérium- és ősbaktériumközösséggel voltak jellemezhetők, a természetesebbnek tekintett városi erdőfoltokhoz és referenciaerdőkhöz képest. Ugyanakkor néhány taxon (pl.: Gastropoda, Diplopoda) vonatkozásában éppen ezek a természetesebbnek tekintett habitatok bizonyultak gazdagabbnak. Tehát az urbanizáció, valamint a talaj abiotikus paraméterei különböző módon befolyásolták a talajbióta tagjait. A legintenzívebb szervesanyag-dekompozíció az antropogén hatásoknak jobban kitett élőhelyeken volt megfigyelhető, ami ezen habitatok jelentősebb szénkibocsátó voltáról tanúskodik. Továbbá azt találtuk, hogy a talaj biodiverzitásával szignifikánsan nőtt a szervesanyag-bomlás mértéke. Tehát a

városi ökoszisztémák lebontó alrendszerének jobb megismerése a klímaváltozás kapcsán is számos kérdést vet fel.

4.2. Az extrém aszály hatása a talaj biodiverzitására és szervesanyag-lebontására (ExDRain-Projekt, Fülöpháza)

Az aszálykezelt talajokban drasztikusan megváltoztak a talaj mikroklimatikus paraméterei az öt hónapos szárazság hatására. A talajhőmérséklet és -nedvesség alakulása szignifikánsan befolyásolta a dekompozíciós folyamatok intenzitását. A szervesanyag-bomlás mértéke a kontroll parcellákban átlagosan csaknem kétszer akkora volt, mint a szárazságkezeltekben. Ami a talajmikrobákat illeti, még fél évvel a szárazság után is jelentős közösségszerkezeti különbségek voltak megfigyelhetők.

Bolygónk összetett, globális környezeti kihívásokkal néz szembe, ideértve az emelkedő hőmérsékletet, a megváltozó csapadékviszonyokat és a biológiai diverzitás csökkenését. Jelen kutatásban bizonyítást nyert, hogy a vízhiány, még hat hónap elteltével is közvetlen következményekkel jár a talajmikrobiótára, annak kompozíciójára, valamint működésére egyaránt. Eredményeink összhangban vannak azon korábbi munkákkal, melyek a klimatikus tényezők talajszervesanyag-háztartására gyakorolt hatásait vizsgálták. Habár a szervesanyag-dekompozíció és a bakteriális diverzitás közötti pozitív kapcsolat nem nyert igazolást jelen kutatásban, a talaj mikroklimatikus tényezők (talajnedvesség és -hőmérséklet) ingadozásának ezekre való hatása vitathatatlan. Mindennek ellenére további mikrobaközösséggel kapcsolatos vizsgálatok szükségesek a szervesanyag-lebontó folyamatok hátterének teljes felderítésére. Összességében rávilágítottunk a klímaváltozással kapcsolatos terepkísérletek kapcsán a talajmikrobióta fontosságára, aminek segítségével képet kaphatunk többek között a szélsőséges időjárási események anyagkörforgásra gyakorolt esetleges hatásairól, valamint következményeiről.

4.3. Az ugaroltatás hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra

Az agrár-környezetvédelmi programok szántóföldi célprogramjában működtetett ugaroltatás rendszerének potenciális természetvédelmi jelentőségére két vizsgálat is fókuszált.

4.3.1. I. vizsgálat: Az ugaroltatás hatása a talajfelszíni makrodekomponáló gerinctelenekre (2008. évi vizsgálat, Hevesi-sík ÉTT)

A vetett, évente kaszált, maximum 3 évig pihentetett területeken fajgazdag és heterogén struktúrájú növényzet alakult ki az ugaroltatás ideje alatt. Ez a gabonaföldekhez képest kedvezőbb feltételeket biztosított a makrodekomponáló talajízeltlábú együtteseknek, ideális élő-, búvó- és táplálkozó területként szolgálva azok számára. Az ugaroltatás idejével szignifikánsan nőtt a szárazföldi ászkarákok és ikerszelvényesek faj- és egyedszáma, egyes esetekben meghaladva a féltermészetes gyepek esetében tapasztalt diverzitást. A két- és hároméves ugarok melletti búzaföldeken nagyobb volt az ikerszelvényesek fajgazdagsága és abundanciája, mint az egyéves ugarok szomszédságában lévő búzaterületeken. Az élőhelytípus mellett csak a növénydiverzitásnak volt szignifikáns hatása a vizsgált makrodekomponáló gerinctelenek faji összetételére.

4.3.2. II. vizsgálat: Az ugarok hatása a talaj biodiverzitására és a szervesanyag-bomlásra (LIBERATION-Projekt, Hevesi-sík)

A vizsgálatba vont élőhelytípusok (ugar nélküli és ugar melletti gabonaterület, ugar, valamint gyepek) között a pH, a kálium- és nátriumtartalom tekintetében tapasztaltunk szignifikáns különbségeket. A második, ugyancsak a Hevesi-síkon zajlott vizsgálat is az ugarok talaj biodiverzitására gyakorolt kedvező hatásait támasztotta alá, főként a mikroarthropodák és ászkarákok vonatkozásában. A talajbaktériumok, illetve ikerszelvényesek kapcsán azonban nem tapasztaltunk hasonlót. Az ugarok és féltermészetes gyepek talajaiban a gabonaföldekhez képest intenzívebb szervesanyag-bomlás zajlott, ami vélhetően a természetesebb élőhelyek gazdagabb talajfaunájával magyarázható. A legdiverzebb mikroarthropoda és szárazföldi ászkarák együttesek ugyanis ezeket a habitatokat jellemezték. Összességében a talaj biodiverzitással ugyan nem, de a talaj biológiai minőségét kifejező QBS indexekkel szignifikáns pozitív kapcsolatot mutatott a szervesanyag-dekompozíció mértéke.

Kutatásaink felhívják a figyelmet az ugargazdálkodás talajélőlényekkel kapcsolatos rendkívüli jelentőségére. A bemutatott eredmények alátámasztják az ugaroltatás hatékonyságát a nagyobb fajgazdagság elérését illetően. Az ugarok természetközeli élőhelyként funkcionálnak és – különösképpen a létesítésüket követő két év után – kedvező körülményeket biztosítanak a lebontó fauna számára, ezzel is elősegítve a talajok biológiai erőforrásainak regenerálódását. Tehát a két évnél hosszabb területpihentetés egy értékes lehetőséget nyújthatna az EU agrárpolitikájának 2013. évi reformját követően megjelenő ún. ökológiai jelentőségű területek ('ecological focus areas') létesítéséhez, melyeken egyidejűleg lenne megvalósítható a felszíni és felszín alatti biodiverzitás védelme. Mindazonáltal további kutatások szükségesek a talajhoz kötődő élőlények szempontjából is előnyös, optimális gazdálkodási

rendszerek kialakításához, különös tekintettel az ugarok és más természetközeli élőhelyek létesítésének módjait illetően, melyek révén többek között gazdag és diverz ízeltlábúközösségek tarthatók fenn.

IRODALOMJEGYZÉK

- BARBER H.S. (1931): Traps for cave-inhabiting insects. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 46, 259-266.
- CONFORTI P. (Szerk.) (2011): Looking ahead in world food and agriculture: Perspectives to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- EUROPEAN COMMISSION (2002): Towards a thematic strategy for soil protection. COM (2002) 179 final.
- HSIEH T.C., MA K.H., CHAO A. (2016): iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity. R package version 2.0.12 <http://chao.stat.nthu.edu.tw/blog/software-download>
- KEUSKAMP J.A., DINGEMANS B.J.J., LEHTINEN T., SARNEEL J.M., HEFTING, M.M. (2013): Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 4 (11), 1070-1075.
- KOVÁCS A. (2011): Alföldi szántók, gyepek és ugarok biodiverzitásának komparatív elemzése és természetvédelmi szempontú vizsgálata. Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.
- LIKER A., PAPP Z., BÓKONY V., LENDVAI Á.Z. (2008): Lean birds in the city: Body size and condition of house sparrows along the urbanization gradient. *Journal of Animal Ecology*, 77, 789-795
- OKSANEN J., BLANCHET F.G., KINDT R., LEGENDRE P., MINCHIN P.R., O'HARA R.B., SIMPSON G.L., SÓLYMOS P., STEVENS M.H.H., WAGNER H. (2015): Vegan: Community Ecology Package. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- OLSON J.S. (1963): Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44, 322-331.
- PARISI V., MENTA C., GARDI C., JACOMINI C., MOZZANICA E. (2005): Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105, 323-333.
- PINHEIRO J., BATES D., DEBROY S., SARKAR D., R CORE TEAM (2015): nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-121. <http://CRAN.Rproject.org/package=nlme>.
- PODANI J., SCHMERA D. (2011): A new conceptual and methodological framework for exploring and explaining pattern in presence – absence data. *Oikos*, 120, 1625-1638.

- WAGG C., BENDER S.F., WIDMER F., VAN DER HEIJDEN M.G.A. (2014): Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *PNAS*, 111, 5266-5270.
- WANG Y., NAUMANN U., WRIGHT S., WARTON D.I. (2012): mvabund: an R package for model-based analysis of multivariate data. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 471-474.
- WHITAKER D., CHRISTMAN M. (2014): clustsig: Significant Cluster Analysis. R package version 1.1. <http://CRAN.R-project.org/package=clustsig>.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

1. Tudományos folyóiratokban megjelent (közlésre elfogadott), lektorált, teljes szövegű tudományos közlemény

1.1. Idegen nyelvű, impakt faktoros folyóiratban

1.1.2. Külföldi kiadású

TÓTH ZS, TÁNCICS A, KRISZT B, KRÖEL-DULAY GY, ÓNODI G & HORNUNG E (2017): Extreme drought effects on soil bacterial community composition and plant tissue decomposition. *European Journal of Soil Science*, X (y): pp-pp. DOI: 10.1111/ejss.12429 (IF = 3,475)

TÓTH ZS, HORNUNG E, BÁLDI A & KOVÁCS-HOSTYÁNSZKI A (2016): Effects of set-aside management on soil macrodecomposers in Hungary. *Applied Soil Ecology*, 99: 89-97. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.11.003 (IF = 2,67)

1.2. Idegen nyelvű, nem impakt faktoros folyóiratban

1.2.1. Hazai kiadású

TÓTH ZS, HORNUNG E & DOMBOS M (2017): Tea Bag method: a new possibility to assess impacts of agrienvironmental measures on soil functioning. (In Press, *Hungarian Agricultural Research*)

1.3. Magyar nyelvű, nem impakt faktoros hazai folyóiratban

TÓTH ZS (2016) Paradigmaváltás a környezeti problémák kezelésében: Az ökoszisztéma-szolgáltatás koncepció és jogi vetületei. *Pro Futuro: A Jövő Nemzedékek Joga* (ISSN: 2063-1987) 6: (2): 98-113.

TÓTH ZS, HORNUNG E, CILLIERS S, DOMBOS M, KOTZE DJ, SETÁLÁ H, YARWOOD SA, YESILONIS I, POUYAT RV & SZLAVECZ K (2015): Előzetes eredmények városi talajok lebontó hatásfokának vizsgálatáról (GLUSEEN-Projekt, Budapest). *Természetvédelmi Közlemények*, 21: 352-361. (ISSN: 1216-4585)

SERES A, TÓTH ZS, HORNUNG E, PÖRNEKI A, SZAKÁLAS J, NAGY PI, BOROS G, ÓNODI G & KRÖEL-DULAY GY (2015): Szerves anyag lebomlás vizsgálatok módszertani kérdései egy védett homokpusztagyep talajában. *Természetvédelmi Közlemények*, 21: 262-270. (ISSN: 1216-4585)

5. Kongresszusi kiadványokban megjelent közlemények (nyomtatott formában v. elektronikus adathordozón – nem hitelesített kiadványokra vonatkozóan)

5.3. Egy oldalas idegen vagy magyar nyelvű összefoglaló

TÓTH ZS, POUYAT R V, SZLAVECZ K, KRÖEL-DULAY GY, ÓNODI G, BÁLDI A & HORNUNG E (2017): Tea Bag method: a universal tool to assess organic matter decomposition in soil. 2nd International Tea Bag Index Workshop, 1 March 2017, Wien, Austria, pp. 17.

TÓTH ZS, HORNUNG E, ÓNODI G & KRÖEL-DULAY GY (2015): Az extrém aszály hatásának vizsgálata a szerves anyag bomlására egy klímamanipulációs kísérletben. 10. Magyar Ökológus Kongresszus absztraktkötet, 2015. augusztus 12-14. Veszprém, pp. 151. (http://mok2015.limnologia.hu/bin/book_of_abstracts.pdf)

TÓTH ZS, HORNUNG E, CILLIERS S, DOMBOS M, KOTZE DJ, SETÄLÄ H, YARWOOD SA, YESILONIS I, POUYAT RV & SZLAVECZ K (2014): Városi talajok lebontó határfokának vizsgálata (GLUSEEN, Budapest). In: Lengyel Sz (szerk.): IX. Magyar Természetvédelmi Biológiai Konferencia: "Tudományoktól a döntéshozatalig": absztrakt-kötet. 2014. november 20-23. Szeged, pp. 129-130. (http://www.mtbk.hu/mtbk09/doc/IX.MTBK_AbsztraktKotet.pdf)

TÓTH ZS, KOVÁCS-HOSTYÁNSZKI A, HORNUNG E & BÁLDI A (2014): Ugarok hatása talajfelszíni makrodekomponáló gerinctelen együttesekre. In: Lengyel Sz (szerk.): IX. Magyar Természetvédelmi Biológiai Konferencia: "Tudományoktól a döntéshozatalig": absztrakt-kötet. 2014. november 20-23. Szeged, pp. 128-129. (http://www.mtbk.hu/mtbk09/doc/IX.MTBK_AbsztraktKotet.pdf)

SERES A, NAGY PI, SZAKÁLAS J, HORNUNG E, TÓTH ZS, BOROS G & KRÖEL-DULAY GY (2014) Szervesanyag-lebomlás vizsgálatok módszertani kérdései egy védett homokpusztagyepen. In: Lengyel Sz (szerk.): IX. Magyar Természetvédelmi Biológiai Konferencia: "Tudományoktól a döntéshozatalig": absztrakt-kötet. 2014. november 20-23. Szeged, pp. 108. (http://www.mtbk.hu/mtbk09/doc/IX.MTBK_AbsztraktKotet.pdf)

TÓTH ZS, KOVÁCS-HOSTYÁNSZKI A, HONRUNG E & BÁLDI A (2014): Effects of fallows on species richness and abundance of macrodecomposer invertebrates in agricultural areas. The First Global Soil Biodiversity Conference, 2-5 December 2014, Dijon, France. pp. 190.